

中　国　船　级　社

矿砂船结构规范

2022

（试用版）

2022 年 11 月 1 日生效

北　京

目　录

第 1 章　总　则 1
第 1 节　一般规定 1
第 2 节　规范原则 5
第 3 节　符合验证 1
第 4 节　符号和定义 2
第 2 章　总布置设计 7
第 1 节　一般规定 7
第 2 节　分舱布置 7
第 3 节　舱室布置 8
第 4 节　通道和逃生布置 10
第 3 章　结构设计原则 12
第 1 节　材　料 12
第 2 节　净尺寸方法 19
第 3 节　腐蚀增量 23
第 4 节　腐蚀防护 24
第 5 节　结构细节原则 25
第 6 节　结构理想化 50
第 4 章　载　荷 70
第 1 节　一般规定 70
第 2 节　动载荷工况 72
第 3 节　船舶运动和加速度 87
第 4 节　船体梁载荷 92
第 5 节　外部载荷 99
第 6 节　内部载荷 124
第 7 节　设计载荷场景 138
第 8 节　装载工况 142
附录 1　基于等效设计波法的波浪载荷直接计算方法 156
附录 2　载货量曲线 160
第 5 章　船体梁强度 166
第 1 节　一般要求 166
第 2 节　船体梁屈服强度 170
第 3 节　船体梁极限强度 176
第 4 节　船体梁残存强度 178
附录 1　剪流直接计算 181
附录 2　船体梁极限弯曲能力 184
第 6 章　船体局部构件尺寸要求 194
第 1 节　一般规定 194
第 2 节　最小厚度 196
第 3 节　板 198
第 4 节　骨材 202
第 5 节　主要支撑构件和支柱、横撑材 204

第 6 节　首部、机器处所、尾部 209
第 7 节　进水强度要求 216
第 8 节　其他要求 224
第 7 章　舱段直接强度分析 229
第 1 节　强度评估 229
第 2 节　舱段结构强度分析 231
第 3 节　局部结构细化分析 256
第 4 节　机舱结构舱段直接强度分析 262
第 8 章　整船有限元强度评估 266
第 1 节　一般规定 266
第 2 节　整船有限元局部细化分析 269
第 9 章　屈　曲 270
第 1 节　一般规定 271
第 2 节　长细比要求 273
第 3 节　描述性屈曲要求 279
第 4 节　直接强度分析屈曲要求 283
第 5 节　屈曲能力 293
附录 1　基于应力的参考应力 322
第 10 章　疲　劳 326
第 1 节　一般规定 326
第 2 节　评估的结构细节 329
第 3 节　疲劳评估 339
第 4 节　简化应力分析 353
第 5 节　舱段有限元应力分析 372
第 6 节　结构细节设计标准 383
附录 1　基于谱分析的船体结构疲劳强度评估 392
第 11 章　上层建筑、甲板室和舾装 402
第 1 节　上层建筑、甲板室 402
第 2 节　舷墙和护栏 405
第 3 节　锚系泊设备 407
第 4 节　甲板设备和装置的支撑结构 407
第 5 节 舱口和舱口盖 407
第 12 章　货物装卸载 408
第 1 节　一般规定 408
第 2 节　快速装载 408
第 3 节　重货加强 409
第 4 节　抓斗加强 410
第 13 章　建　造 411
第 1 节　建造和制造 411
第 2 节　焊接制造 413
第 3 节　焊接接头设计 415
第 14 章　营运船舶换新衡准 428
第 1 节　原则和检验要求 428
第 2 节　验收衡准 429

附录 A　船体结构波激振动和砰击颤振直接计算评估方法 431
1　一般要求 431
2　计算条件 433
3　线性波激振动作用下的船体结构疲劳强度评估 438
4　砰击颤振和波激振动作用下的船体结构疲劳强度评估 441
5　砰击颤振作用下的船体梁极限强度评估 443
附录 A.1　阻尼数值模型 445

第 1 章　总　　则

第 1 节　一般规定

1 适用范围

1.1 本规范适用于单甲板、货舱区具有二道纵舱壁、中舱为双层底且装载矿砂、边舱为单层底、机舱位于尾部的自航式矿砂船。矿砂船典型的横剖面如图 1.1 所示。

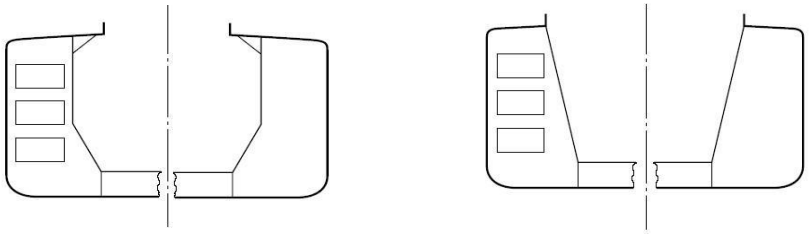


图 1.1

1.2 本规范适用于无限航区航行、船长 250m 及以上的矿砂船。

1.3 矿砂船装载手册和装载仪应符合《钢质海船入级规范》第 2 篇第 8 章第 7 节的有关要求。

1.4 对本规范无规定者，均应符合《钢质海船入级规范》第 2 篇的有关要求。

2 定义

2.1 船长

船长 L（m）：即规范船长，系指沿结构吃水 T_{SC} 处水线，由首柱前缘量至舵柱后缘的长度；对无舵柱的船舶，由首柱前缘量至舵杆中心线的长度；但均不应小于结构吃水处水线总长的 96%，且不必大于 97%。对于具有非常规船首和船尾的船舶，其船长 L 需特别考虑。

对于箱形船体，L 为沿结构吃水处水线自船首端壁前缘量至船尾端壁后缘的长度。

对于无舵杆的船舶(如设有全回转推进器的船舶)，L 为结构吃水处水线总长的 97%。

2.2 载重线船长

载重线船长 L_{LL}（m）：系指载重线公约[①]定义的船长。

2.3 船宽

船宽 B（m）：系指船中结构吃水 T_{SC} 处的最大型宽度，m。

2.4 型深

型深 D（m）：系指在船中的舷侧处，自型基线量至最上层连续甲板的型甲板边线的垂直距离。有圆弧形舷缘的船舶，D 应量至型甲板线的延长部分。

2.5 吃水

吃水 T（m）：系指在船中处，由平板龙骨上缘量至夏季载重线水线的垂直距离。

---

① 载重线公约系指《1966 年国际载重线公约》或《经 1988 年议定书修订的 1966 年国际载重线公约》及其修正案。

2.6 结构吃水

结构吃水 T_{SC}（m）：系指在船中处，由平板龙骨上缘量至结构吃水处水线的垂直距离。结构吃水是满足船舶尺度的强度要求并反映满载工况的吃水，且应不小于核定干舷对应的吃水。

2.7 压载吃水

正常压载吃水 T_{BAL}（m）：系指在船中处，满足船舶尺度的强度要求的最小设计正常压载吃水，取装载手册所有压载工况的最小吃水，包括出港、到港、压载水置换操作（如有时）的任何压载工况。

最大压载吃水 $T_{BAL\text{-}H}$（m）：系指满足船舶尺度强度要求的最大设计压载吃水，取装载手册中所有压载工况最大吃水。

2.8 最大服务航速

最大服务航速 V（kn）：系指船舶按其设计在营运中以最大航行吃水、螺旋桨最大转速（RPM）和发动机的相应最大持续功率（MCR）所保持的最大航速。

2.9 方形系数

2.9.1 结构吃水处的方形系数 C_b 按下式确定：

$$C_b = \frac{\nabla}{LBT_{SC}}$$

式中：∇ ——结构吃水处的型排水体积，m^3。

2.9.2 正常压载吃水处的方形系数 $C_{b\text{-}BAL}$ 按下式确定：

$$C_{b\text{-}BAL} = \frac{\nabla_{BAL}}{LBT_{BAL}}$$

式中：∇_{BAL} ——正常压载吃水 T_{BAL} 处的型排水体积，m^3。

2.9.3 最大压载吃水处的方形系数 $C_{b\text{-}BAL\text{-}H}$ 按下式确定：

$$C_{b\text{-}BAL\text{-}H} = \frac{\nabla_{BAL\text{-}H}}{LBT_{BAL\text{-}H}}$$

式中：$\nabla_{BAL\text{-}H}$ ——最大压载吃水 $T_{BAL\text{-}H}$ 处的型排水体积，m^3。

2.10 空船重量

空船重量（t）：系指船舶在没有货物，舱柜内无燃油、润滑油、压载水、淡水、锅炉给水，消耗物料，且无乘客、船员及其行李物品时的排水量。

2.11 载重量

载重量 DWT（t）：系指密度ρ为 1.025 t/ m^3 海水中夏季载重线吃水处的排水量和空船重量之差。

2.12 首垂线

首垂线（FP）：系指通过船长 L 的首柱前缘与结构吃水处水线交点的垂线，见图 2.12 。

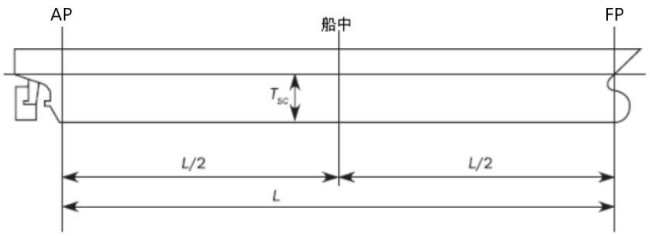


图 2.12 首、尾垂线和船中

2.13 尾垂线

尾垂线（*AP*）：系指距离首垂线*L*处与结构吃水处水线的垂线，见图2.12。

2.14 船中

船中：系指首垂线之后0.5*L*距离处与结构吃水处水线的垂线，见图2.12。

2.15 船中部分

船中部分：除另有规定外，系指船中0.4*L*区域。

2.16 载重线首垂线

载重线首垂线（FP_{LL}）：系指船长L_{LL}的前端，且与在计量船长L_{LL}的水线上的首柱前缘相重合。

2.17 载重线尾垂线

载重线尾垂线（AP_{LL}）：系指船长 L_{LL} 的后端。

2.18 参考坐标系

船舶的几何尺寸、载荷以及载荷效应按下述右手坐标系定义（见图 2.18）。

原点：船舶对称纵剖面、船长 *L* 尾垂线和基线的相交处；

X 轴：纵向轴，向前为正；

Y 轴：横向轴，向左为正；

Z 轴：垂向轴，向上为正。

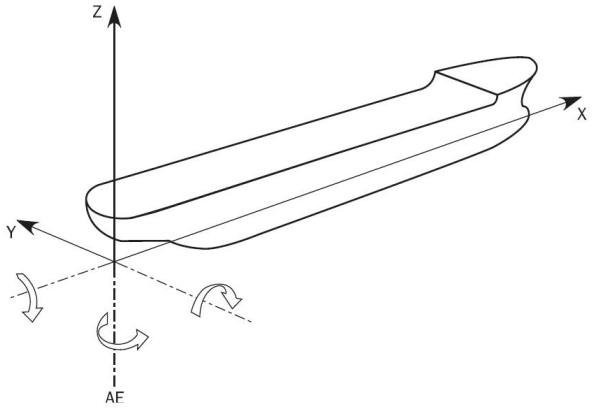


图 2.18 参考坐标系

2.19 位置 1

载重线公约定义的位置 1。

2.20 位置 2

载重线公约定义的位置 2。

2.21 上层建筑标准高度

2.21.1 上层建筑标准高度定义见表 2.21.1。

上层建筑标准高度　　**表 2.21.1**

标准高度 h_s (m)	
后升高甲板	**所有其他上层建筑**
1.80	2.30

2.21.2 层系指上层建筑或甲板室范围的量度。一个上层建筑或甲板室层包括一个甲板和外部舱壁。一般而言，第一层是位于干舷甲板的那一层。

2.22 水线面系数

2.22.1 结构吃水处的水线面系数 C_W 按下式确定：

$$C_W = \frac{A_W}{L\,B}$$

式中：A_W ——结构吃水处的水线面面积，m^2。

2.22.2 正常压载吃水处的水线面系数 $C_{W\text{-}BAL}$ 按下式确定：

$$C_{W\text{-}BAL} = \frac{A_{W\text{-}BAL}}{L\,B}$$

式中：$A_{W\text{-}BAL}$ ——在正常压载吃水 T_{BAL} 处的水线面面积，m^2。

2.22.3 最大压载吃水处的水线面系数 $C_{W\text{-}BAL\text{-}H}$ 按下式确定：

$$C_{W\text{-}BAL\text{-}H} = \frac{A_{W\text{-}BAL\text{-}H}}{LB}$$

式中：$A_{W\text{-}BAL\text{-}H}$ ——在最大压载吃水 $T_{BAL\text{-}H}$ 处的水线面面积，m^2。

3 附加标志

3.1 船型附加标志

3.1.1 对于符合本规范要求的矿砂船，授予附加标志：Ore Carrier。

3.2 其他附加标志

3.2.1 本规范规定的矿砂船其他附加标志见表 3.2.1。

其他附加标志 **表 3.2.1**

序号	附加标志	说明和应用		技术要求
1	No MP	无多港口装/卸货物	如矿砂船设计中未按第 4 章第 8 节中规定的工况对多港口装/卸货物提出要求，则应授予该附加标志。	本规范第 6 章、第 7 章
2	GFE	整船有限元强度评估	（1）符合下列条件之一的矿砂船，该附加标志要求为强制： 1) 船长 L 大于 350m； 2) 结构布置非常规形式。 （2）除上述以外的其他矿砂船，该附加标志为可选。	本规范第 8 章
3	FL	最小疲劳设计寿命	该附加标志要求为强制，并加注（XX,YY）后缀标志，说明如下： XX—船舶运营波浪环境条件，如基于全球波浪谱的环境条件取为 WW，如基于北大西洋波浪谱的环境条件取为 NA； YY—疲劳设计寿命（年），本规范规定的最小疲劳设计寿命至少为 25 年，可以从 25 年开始计以	本规范第 10 章

序号	附加标志	说明和应用		技术要求
			5 年为间隔； 例如，FL（NA，25）表示在北大西洋波浪环境下的设计寿命为 25 年。	
4	SFA	基于谱分析的疲劳强度评估	该附加标志为可选，后缀标志的说明同序号 3。	本规范第 10 章附录 1
5	EL100	快速装载	对于符合规范要求具有快速装载的矿砂船，授予该附加标志。该附加标志为可选。	本规范第 12 章第 2 节
6	Strengthened for Heavy Cargoes	重货加强	对货舱区域双层底、船底骨架进行加强，该附加标志为强制。如满足第 12 章第 3 节[3]的要求，可在该附加标志后加注（IB）后缀标志。	本规范第 12 章第 3 节
7	Grab*（X）	抓斗装卸结构加强	对货舱内底板、纵舱壁最下列板和横舱壁的底凳板具有最大 X 吨重的抓斗装卸货的结构加强： X—空抓斗重量。 该附加标志为强制。	本规范第 12 章第 4 节
8	SAF	线性波激振动下疲劳强度评估	对于满足本规范附录 A 中 1.1.3 相关要求的矿砂船，在疲劳强度评估时计及线性波激振动的影响，该附加标志为强制。	本规范附录 A
9	SWAF	砰击颤振和波激振动下疲劳强度评估	对于满足本规范附录 A 中 1.1.3 相关要求的矿砂船，在疲劳强度评估时计及波激振动和砰击颤振的影响，该附加标志为强制。	本规范附录 A
10	WAU	砰击颤振下船体梁极限强度评估	对于满足本规范附录 A 中 1.1.3 相关要求的矿砂船，在船体梁极限强度评估时计及砰击颤振的影响，该附加标志 WAU 为强制。	本规范附录 A

第 2 节　规范原则

1 规范目标

1.1 本规范的目标是规定入级船舶的最低要求，以减小船体结构失效的风险，提高海上人命、环境和财产的安全性以及在船舶设计寿命内船体结构的耐久性。

1.2 本节包括：

（1）一般要求，包括规范应用和实施、载荷适用条件。

（2）设计基础，规定了规范所基于的前提，诸如船舶营运的假定和设计参数。

（3）设计原则，定义了用于在规范中与载荷、结构能力有关的结构要求的基本原则。

（4）规范设计方法，描述如何应用设计原理，以及如何使用衡准。

2 一般要求

2.1 应用和实施

2.1.1 CCS 制定和颁布的船舶入级规范包括船体结构和重要舾装设备的最低要求。在船舶设计、建造和营运期间，CCS 核实其符合入级要求，并且当获得主管机关授权时，核实其符合适用国家规则。

2.1.2 本规范涉及船舶入级方面的船体结构。为了达到本规范的目标安全水平，规范应用和实施的各相关方应遵守与设计、建造和营运相关的要求。

2.2 载荷适用条件

2.2.1 本规范在环境载荷方面适用于满足下述条件的矿砂船：

- $L < 500$ m
- $C_b > 0.6$
- $L/B > 5$
- $B/D < 2.5$

对于不满足上述条件的矿砂船，CCS 可要求进行特殊考虑，例如采用载荷直接计算方法。

3 设计基础

3.1 一般要求

3.1.1 本节规定了作为规范设计原则基础的有关船舶营运的设计参数和假定。

3.1.2 船舶应设计为能在完整条件下，针对适当的装载工况，承受设计寿命中预期的环境条件。结构强度取决于屈曲和屈服强度，极限强度计算应包括船体梁极限能力以及板和骨材极限能力。

3.1.3 残存强度

船舶应设计为具有足够的储备强度以承受破损条件下的载荷，例如：碰撞、搁浅或进水。残存强度计算应考虑计及第 5 章第 4 节定义的船体梁极限储备能力。

3.1.4 有限元分析

货舱区域内的构件尺寸应根据第 7 章规定的要求进行评估。船长 L 大于 350m 的矿砂船主要支撑构件还应根据第 8 章规定的要求进行评估。

3.1.5 疲劳寿命

应根据设计疲劳寿命对第 10 章规定的结构细节进行评估。

3.1.6 本规范适用于符合设计基础的船舶，对于不同于此设计基础的船舶，应按《钢质海船入级规范》第 1 篇第 2 章第 2 节 2.2.5 的规定进行等效替代。

3.1.7 由建造者和船东联系确定的，用于每条船舶设计的设计基础应形成文档提交 CCS。所有设计基础的改变应正式告知 CCS 和船东。

3.2 设计寿命

3.2.1 假定设计寿命为 25 年来选取船舶设计参数。规定的设计寿命是假定船舶在营运状况下的名义时间。

3.3 环境条件

3.3.1 波浪环境

本规范的强度要求是基于船舶在其整个设计寿命期间航行于北大西洋波浪环境，疲劳要求是基于船舶在其整个设计寿命期间航行于北大西洋波浪环境或全球波浪环境（非常态化在北大西洋波浪环境营运的船舶）。

3.3.2 风和流

本规范不考虑风和流对结构强度的影响。

3.3.3 冰

本规范不考虑结冰和积冰的影响。

3.3.4 设计温度

本规范假定对船体强力构件的结构评估在以下设计温度下有效：

（1）最低日平均空气温度的平均值为-10℃；

（2）最低日平均海水温度的平均值为 0℃。

对于拟在比上述更低的日平均温度的平均值下营运的船舶（如冬季常态化去北极或南极水域营运的船舶），其暴露于低气温中的船体结构用钢应满足第 3 章[2.4]的要求。。

上述要求中的有关定义如下：

平均值：整个观测周期（至少 20 年）的统计平均。

日平均：一昼夜内的平均。

最低：一年内的最低。

对季节性有限航区，适用营运期间的最低值。

3.3.5 热载荷

本规范不考虑热载荷和残余应力的影响。

3.4 营运假定

3.4.1 本规范规定了应评估的最少装载工况。船东有责任对除本规范要求外的装载工况作出规定，这些其它装载工况也应形成文件并进行评估。

3.4.2 设计营运吃水应由制造商/设计者规定，由船东认可且用于计算恰当的结构尺寸。装载手册中的所有营运装载工况应满足规定的设计营运吃水。至少应考虑以下吃水：

（1）用于结构评估的结构吃水；

（2）用于结构评估的船中最小压载吃水；

（3）用于船首承受砰击载荷船体结构评估的最小船首吃水。

3.4.3 最大服务航速

最大服务航速应在设计说明书中确定。尽管船体结构验收衡准考虑了服务航速，但船东和营运人员仍有责任正确操纵船舶。

3.5 内部环境

3.5.1 用于强度评估的燃油密度

除特殊的液化天然气燃料外，所有相关燃油液舱结构强度评估所采用的液体密度应使用 1.025t/m^3 或设计者规定的更高值。

3.5.2 用于疲劳评估的燃油密度

如适用时，除特殊的液化天然气燃料外，燃油舱结构疲劳评估所采用的液体密度应使用 0.98t/m^3 或设计者规定的更高值。

3.5.3 压载水密度

压载舱结构强度和疲劳评估所采用的压载水密度为 1.025t/m^3。

3.6 结构建造和检查

3.6.1 本规范结构要求的制定是基于船舶建造和修理将遵循可以接受的船舶建造和修理的标准和公差的假定。在建造中以及在交船后修理时，CCS 可要求制造商/船东特别关注结构的关键区域。

3.6.2 作为目标，必要时船舶应采用认可的材料，按可控的生产质量标准进行建造。

3.6.3 本规范规定了各结构构件的换新衡准。在制定本规范的结构要求时，假定船舶一旦投入营运，结构将接受船东恰当的监控并按照 CCS 的规范和规则接受定期检验。

3.6.4 液舱强度和密性试验应作为验证计划的一部分，根据 CCS《钢质海船入级规范》第 1 篇予以执行。

3.6.5 在船舶建造质量程序中应包含材料生产、组装、连接和焊接程序以及钢材表面预

处理和涂层的详细说明。

3.7 船东的额外要求

3.7.1 在入级或法定要求以外，船东提出的要求会对结构设计产生影响。船东的额外要求可能有：

(1) 振动分析；

(2) 使用高强度钢的最大百分比；

(3) 高于本规范要求的附加构件尺度；

(4) 对本规范规定载荷的附加设计余量等；

(5) 提高抗疲劳性，如增加设计疲劳寿命或相当要求。

3.7.2 有可能影响到结构设计的任何船东额外要求，应在设计文件资料中予以明确规定。

4 设计原则

4.1 一般要求

4.1.1 本节定义本规范在载荷、结构能力模型和评估衡准以及建造和营运方面的基本设计原则。

4.1.2 通用原则

本规范基于以下通用原则：

(1) 当船舶承受营运和环境载荷/条件时，可利用潜在的结构失效模式评估结构安全；

(2) 设计符合设计基础，见第 1 章第 3 节；

(3) 结构要求基于涵盖船舶适当营运方式的一致的设计载荷组。

船舶结构应设计为：

(1) 具有一定的冗余度。船舶结构应以分级方式工作，一般而言在该等级体系中处于较低级别的构件失效，不会立即导致该等级体系中较高级别构件失效；

(2) 具有足够的储备强度以承受合理预见的破损条件下的波浪和内部载荷，例如：碰撞、搁浅或进水。残存强度计算应考虑计及永久变形和后屈曲的船体梁极限储备能力；

(3) 将营运中发生裂纹的事故减至最低限度，尤其在影响到结构完整性或影响到结构系统或其他系统的性能或难以检查和修理的部位。

(4) 有足够的结构冗余，以防止任一舱室进水而漫延到其他舱室。

4.1.3 极限状态设计

本规范基于极限状态设计原则。

极限状态设计是一个系统的方法，每一构件应评估与设计场景相关的失效模式。对每一失效模式，可能涉及一个或多个极限状态。通过考虑所有涉及的极限状态，可以找到由此引起的最小极限载荷。

极限状态分为 4 类：使用性极限状态（SLS）、最终极限状态（ULS）、疲劳极限状态（FLS）和事故极限状态（ALS），具体定义如下：

（1）使用性极限状态（SLS），指超越了该状态特定的要求就不再满足了。使用性极限状态与正常使用相关，包括：

- 可能减少结构工作寿命的局部损伤；
- 影响结构构件或非结构构件的有效性或外形的局部损伤；
- 影响结构构件或非结构构件的有效使用和外形的不可接受变形；
- 影响安全设备功能的不可接受变形。

（2）最终极限状态（ULS），指在完整（未破损）状态下的最大承载能力或在某些情况

下的最大可用应变或变形，包括：由于断裂或过度变形或失稳（屈曲），剖面、构件或构件连接能达到的最大抵抗能力；由于过度屈服，使结构整体或局部变为塑性机构。

（3）疲劳极限状态（FLS），指由于交变载荷而引起的失效，用于评估交变载荷作用下结构构件的抗疲劳能力大于设计疲劳寿命。

（4）事故极限状态（ALS），指结构抵抗事故场景的能力，包括：

- 假定在受到意外或非正常载荷作用的完整（未破损）状态下，任一舱室进水而不漫延到其他舱室，考虑围蔽性没有丧失但结构强度丧失。
- 假定在有限时间范围内所遇到的环境载荷作用的破损状态下，结构强度和围蔽性均丧失。

4.1.4 失效模式

船舶结构的不同部分可能有不同的失效模式。对每种失效模式，可能与一种或多种极限状态相关。评估船舶结构安全时，须考虑的失效模式与极限状态的关系如表 4.1.4 所示。

极限状态相关的失效模式　　表 4.1.4

失效模式	极限状态(1)			
	SLS	ULS	FLS	ALS
屈服	Y	Y	-	Y
塑性崩溃	-	Y	-	Y
屈曲	Y	Y	-	Y
断裂	-	Y	-	Y
疲劳破坏	-	-	Y	-
脆性断裂(2)	-	-	-	-

(1)“Y”指须进行结构评估；

(2)由材料的钢级规范要求控制。

4.1.5 结构评估

本规范中给出的结构评估方法用于验证不同构件的相关极限状态。本规范中的结构强度评估定义为屈服校核、屈曲校核、极限强度校核和疲劳校核，如表 4.1.5 所示。

结构评估　　表 4.1.5

结构类型(1)		屈服校核	屈曲校核	极限强度校核	疲劳校核
局部结构	骨材	Y	Y	Y(2)	Y
	板	Y	Y	Y(3)	Y
主要支撑构件		Y	Y	Y(2)	Y
船体梁		Y	Y(4)	Y	-

(1)“Y”指须进行结构评估；

(2)极限强度校核包含在屈曲校核中；

(3)板的极限强度校核包含在板的屈服和屈曲校核中；

(4)船体梁的屈曲校核通过组成船体梁的构件在船体梁载荷引起的应力作用的屈曲校核来实现。

（1）使用性极限状态

船体梁屈服校核的应力对应于 10^{-8} 概率水平的载荷。主要支撑构件的板的屈服和屈曲校核的应力对应于 10^{-8} 概率水平的载荷。骨材屈服校核的应力对应于 10^{-8} 概率水平的载荷。

（2）最终极限状态

船体梁极限强度校核的船体梁载荷对应于 10^{-8} 概率水平的载荷，该载荷由分项安全因子予以放大。主要支撑构件和骨材之间的板的极限强度校核对应于 10^{-8} 概率水平的载荷。骨材极限强度校核对应于 10^{-8} 概率水平的载荷。

（3）疲劳极限状态

应取基于 10^{-2} 概率水平的长期分布载荷对典型焊接结构细节进行疲劳评估，并考虑颤振和波激振动效应（适用时）。

（4）事故极限状态

货舱区进水条件和破损条件下的船体梁屈服和极限强度应根据第 5 章第 1 节和第 2 节进行评估。货舱区残存强度应根据第 5 章第 4 节评估碰撞和搁浅造成的损坏。货舱区进水条件下的双层底和横舱壁结构应按照第 6 章相关要求校核。进水条件的板、加强筋和主要支撑构件应按照第 6 章和第 9 章相关要求校核。

4.1.6 冲击载荷强度校核

结构对冲击载荷（如船首底部砰击、船首舷侧冲击）的响应取决于载荷面积、载荷幅值和结构板架。根据作用在板架构件（如骨材与主要支撑构件之间的板和连同带板的骨材）上的最大冲击载荷进行极限强度校核。

4.2 载荷

4.2.1 设计载荷场景

结构评估基于船舶所遭遇的设计载荷场景，见第 4 章第 7 节。

设计载荷场景基于如下静态和动态载荷：

（1）静态设计载荷场景（S），涵盖相关静态载荷，通常包括在港、遮蔽水域或舱室试验；

（2）静态加动态设计载荷场景（S＋D），涵盖相关静态载荷加上同时发生的动载荷成分，通常包括航行工况下的载荷场景；

（3）冲击设计载荷场景（I），涵盖船舶航行中遭遇的冲击载荷（如底部砰击和船首冲击等）。

（4）晃荡设计载荷场景（SL），涵盖船舶航行中遭遇的晃荡载荷。

（5）疲劳设计载荷场景（F），涵盖相关动载荷。

（6）事故设计载荷场景（A），涵盖在正常营运过程中不会出现的载荷。

4.3 结构能力评估

4.3.1 一般要求

结构设计的基本原则是应用所定义的设计载荷，识别可能的失效模式并使用合适的能力模型来验证所要求的结构尺度。

4.3.2 ULS、SLS 和 ALS 能力模型

结构强度评估方法应能按所要求的精度分析失效模式，包括描述性方法和更高级的计算方法（如有限元分析方法）。用于确定应力、变形和能力的公式应与所选用的能力评估方法和设计载荷组的类型和大小相适应。

4.3.3 FLS 能力模型

疲劳评估方法提供了用于评估结构细节疲劳失效的规范要求。

疲劳能力模型基于线性累积损伤（Palmgren-Miner 准则），并结合设计 S–N 曲线、参考应力范围和假定的应力长期分布曲线。

疲劳能力评估模型采用描述性方法或更高级的计算方法（如有限元分析方法），考虑整体和局部动态载荷的组合效应。

4.3.4 净尺寸方法

净尺寸方法的目的是：

(1) 将新造船阶段用于强度计算的厚度与营运阶段可接受的最小厚度联系起来；

(2) 在船舶整个使用寿命期间内能够清晰确定有关腐蚀的结构状态。

净尺寸方法分为局部腐蚀和总体腐蚀。局部腐蚀定义为局部结构单元（如单块板和骨材）的均匀腐蚀。总体腐蚀定义为较大区域（如主要支持构件和船体梁）的总平均腐蚀。局部和总体腐蚀都是新造船审核和营运船评估的基础。在结构能力评估时不考虑涂层或类似防腐系统。应按第 3 章第 2 节规定用净厚度方法评估结构能力。

4.3.5 完整结构

ULS、SLS 和 FLS 中所有强度计算均假定结构是完整的。对于 ALS，需评估船舶在结构损坏工况下的残存强度。

5 规范设计方法

5.1 一般要求

5.1.1 设计方法

对不同的结构，为涵盖相关极限状态（ULS、SLS、FLS 和 ALS）规定了尺寸要求。

构件尺寸的评估衡准是基于以下的设计方法之一：

（1）工作应力设计（WSD）法，也称作许用或允许应力法；

（2）分项安全因子（PSF）法，也称作载荷和承载能力因子设计法（LRFD）。

对于 WSD 和 PSF, 给出 A、B 两个设计评估条件和相应验收衡准，A 和 B 与组合载荷的概率水平相关联。

（1）WSD 法有如下构成：

$$\text{对于条件 A} \qquad W_{stat} \le \eta_1 R$$

$$\text{对于条件 B} \qquad W_{stat} + W_{dyn} \le \eta_2 R$$

式中：

W_{stat}——同时出现的静态载荷（或以应力表示的载荷效应）；

W_{dyn}——同时出现的动态载荷。动态载荷通常是局部和整体载荷成分的组合；

R ——特征结构能力（例如最小屈服强度或屈曲能力）；

η_i ——许用利用因子（承载能力因子），计及载荷、结构能力和失效后果的不确定性。

（2）PSF 法有如下构成：

$$\text{对于条件 A} \qquad \gamma_{stat-1} W_{stat} + \gamma_{dyn-1} W_{dyn} \le \frac{R}{\gamma_R}$$

$$\text{对于条件 B} \qquad \gamma_{stat-2} W_{stat} + \gamma_{dyn-2} W_{dyn} \le \frac{R}{\gamma_R}$$

式中：γ_{stat-i}——考虑与静态载荷相关不确定性的分项安全因子；

γ_{dyn-i}——考虑与动态载荷相关不确定性的分项安全因子；

γ_R ——考虑与结构能力相关不确定性的分项安全因子。

为使得静态和动态载荷效应的所有组合获得协调一致和可接受的安全水平，WSD 法和 PSF 法的验收衡准按不同的要求予以校准。

5.2 最小要求

5.2.1 最小要求系指规范的最小尺寸要求，独立于其他所有要求。最小要求通常包括下列形式：

（1）最小厚度，与规定的最小屈服强度无关。

（2）最小刚度和尺度比，基于屈曲失效模式。

5.3 基于承载能力的要求

5.3.1 一般要求

一般除了船体梁极限强度衡准采用 PSF 法以外，在其他要求中采用 WSD 法。分项安全因子能够更好的计及与静态载荷、动态载荷和能力公式相关的不确定性。

本规范从设计载荷、设计形式和验收衡准方面考虑所识别的载荷场景，见表 5.3.1。

基于载荷的描述性要求为所有板、局部支撑构件、大部分主要支撑构件和船体梁提供了尺寸要求，涵盖了包括甲板室、甲板设备基座在内的所有构件。

上述要求通常明确控制一种特定的失效模式，因此可应用多个要求评估单个特定构件。

5.3.2 SLS、ULS 和 ALS 设计载荷

舱室边界的结构评估是基于营运相关的装载工况。

为了确保方法的一致性，规范载荷计算时应采用标准化的规范参数（如 GM、R_{roll}、T_{sc} 和 C_b 等）。整体和局部的动载荷以及冲击载荷(见表 5.3.1)的概率水平是 10^{-8}，采用长期统计方法导出。晃荡载荷(见表 5.3.1)的概率水平采用 10^{-4}。

应对用于结构校核的设计载荷场景施加同时作用的、适用的局部和整体载荷分量。相关的设计载荷场景见第 4 章第 7 节。

同时出现的动载荷是通过在第 4 章给出的动载荷值之上乘以动载荷组合系数予以确定。定义动载荷工况的动载荷组合系数见第 4 章第 2 节。

船体梁极限强度的设计载荷工况见第 5 章第 3 节。

载荷场景与对应的验收衡准　　表 5.3.1

营运	载荷类型	设计载荷场景	验收衡准
航行状态			
短暂	恶劣天气的静态和动态载荷	S + D	AC-SD
	恶劣天气的冲击载荷	冲击(I)	AC-I
	内部晃荡载荷	晃荡(SL)	AC-S AC-SD
	循环波浪载荷	疲劳(F)	-
溢流法或顺序法压载水置换	恶劣天气的静态和动态载荷	S + D	AC-SD
在港和遮蔽海域			
装载、卸载和压载	在装载、卸载和压载过程中的典型最大载荷	S	AC-S
舱室试验	在舱室试验过程中的典型最大载荷	S	AC-S
港内特殊工况	在港内特殊工况中的典型最大载荷，如漂浮中的螺旋桨检验和干坞装载工况	S	AC-S
事故工况			
进水工况	由于事故进水工况导致的内部水密分舱结构所承受的典型最大载荷	A	AC-S AC-SD

5.3.3 FLS 设计载荷

疲劳要求见第 10 章，载荷评估基于预期的载荷历程并采用了平均方法。设计寿命的预期载荷历程是采用 10^{-2} 概率水平的动载荷值，每个构件的载荷历程采用相应应力的 Weibull 概率分布表示。

所考虑的波浪诱导载荷包括：

(1) 船体梁载荷(如垂向和水平弯矩、扭矩)

(2) 波浪动压力

(3) 货物/液舱动压力

载荷值基于装载工况对应的规范参数，如 GM，C_b，适用的船中吃水等。通过不同动载荷成分引起的应力组合来考虑同时出现的动载荷。应力组合方法见第 10 章。

5.3.4 结构响应分析

一般的，下列方法适用于确定设计载荷组合作用时的结构响应：

（1）梁理论

- 用于描述性要求

（2）有限元分析

- 粗网格用于舱段和整船有限元分析
- 细网格用于局部模型
- 精细网格用于疲劳评估

整船有限元强度评估是基于水动力载荷直接计算的结构响应。

5.4 验收衡准

5.4.1 一般要求

本规范规定的验收衡准基于特征组合载荷的概率水平。

验收衡准 AC-S 适用于静态设计载荷组合，包括舱室试验载荷和完整状态下的进水载荷。上述载荷的许用应力应小于考虑下述影响的极端载荷的许用应力：

(1) 重复屈服；

(2) 对一些动载荷的允许值；

(3) 针对一些选定的、有限的营运失误的余量。

验收衡准 AC-SD 适用于静态加动态设计载荷组合，考虑出现概率低的极端载荷。验收衡准 AC-I 适用于冲击载荷，例如底部砰击和船首冲击载荷等。

5.4.2 验收衡准

本规范规定的屈服和屈曲失效模式下的验收衡准见表 5.4.2（1）和（2）。对屈服衡准，许用应力与材料的最小屈服强度成比例。对屈曲失效模式，验收衡准基于刚度和尺度比的控制以及屈曲利用因子。

验收衡准–描述性要求　　表 5.4.2（1）

验收衡准	板和局部支撑构件 (1)		主要支撑构件 (1)		船体梁(2)	
	屈服	屈曲	屈服	屈曲	屈服	屈曲
AC-S AC-SD	许用应力：第 6 章第 3 节、第 4 节	刚度和尺度比控制：第 9 章第 2 节	许用应力：第 6 章第 5 节	刚度和尺度比控制：第 9 章第 1 节、第 9 章第 2 节、支柱屈曲	许用应力：第 5 章第 2 节	许用屈曲利用因子：第 9 章第 1 节

验收衡准	板和局部支撑构件 (1)		主要支撑构件 (1)		船体梁(2)	
	屈服	屈曲	屈服	屈曲	屈服	屈曲
AC-I	塑性衡准 第 6 章第 8 节[3]	刚度和尺度比控制： 第 9 章第 2 节	塑性衡准： 第 6 章第 8 节[3]	刚度和尺度比控制： 第 9 章第 2 节	N/A	N/A
注（1）对其他结构，见第 6 章第 8 节；对上层建筑、甲板室和船体艏装，见第 11 章。 （2）船体梁极限弯曲能力见第 5 章第 3 节和第 4 节。						

验收衡准–有限元分析　　表 5.4.2（2）

验收衡准	舱段和整船分析		细网格分析
	屈服	屈曲	屈服
AC-S AC-SD	许用应力： 第 7 章第 2 节 第 8 章第 1 节	许用屈曲利用因子： 第 9 章第 1 节	许用 Von Mises 应力： 第 7 章第 3 节 第 8 章第 2 节

5.5 设计验证

5.5.1 船体梁极限强度

船体梁极限强度的要求是基于 PSF 法。安全因子被赋予每个基本变量，如静水弯矩，波浪弯矩和极限能力。安全因子采用结构可靠性方法确定，并采用船舶运动分析技术获得波浪弯矩的长期载荷分布。船体梁极限强度验证的目的是证明船体梁发生崩溃失效得到了控制。

5.5.2 有限元分析

有限元分析用于验证基于描述性要求给出的尺寸，以更好的考虑船体结构构件间复杂的相互作用、复杂的局部结构几何、厚度和构件剖面特性的变化，以及有足够精度的复杂载荷模式。有限元分析的目的是验证船体结构构件的应力和屈曲能力在所应用设计载荷的可接受范围内。

5.5.3 疲劳评估

疲劳评估旨在验证关键结构节点的疲劳寿命是足够的。对于可使用应力集中系数（SCF）确定几何细节实际热点应力的结构节点（如纵骨端部连接处），采用简化应力疲劳分析方法。对于其他结构节点，采用有限元应力分析方法确定几何细节实际热点应力。

5.5.4 描述性尺寸要求与替代方法之间的关系

除非明确说明，描述性要求确定的尺寸不得采用其他替代方法计算或减少，如有限元方法。

第 3 节　符合验证

1 一般要求

1.1 新建船舶

1.1.1 对于新建船舶，按[2]的规定送审的图纸资料应符合本规范的适用要求。

1.1.2 船舶建造应满足本规范第 13 章和《钢质海船入级规范》第 1 篇第 4 章的相关要求。

1.2 营运船舶

1.2.1 营运船舶应符合本规范第 14 章的要求。

2 应提交的文件

2.1 文件资料和数据要求

2.1.1 船上应配有经批准的装载手册和装载仪。

2.1.2 按照本规范要求的计算资料应包含以下内容：

(1) 使用的计算程序；

(2) 结构模型的描述；

(3) 直接计算分析参数概要，包括属性、边界条件、装载工况、载荷施加方式等（适用时）；

(4) 计算结果汇总；

(5) 适用的算例。

2.1.3 设计者应确保提交的计算资料和程序数据输入及输出结果的正确性。

2.2 图纸和资料的提交

2.2.1 应按《钢质海船入级规范》第 2 篇的要求提交图纸和资料。

2.2.2 在结构图纸上应标明如下信息：

（1）构件的尺寸；

（2）结构连接细节；

（3）设计材料的说明，一般包括钢级、制造工艺、焊接工艺和热处理等；

（4）第 14 章规定的与换新厚度相关的信息。

3 结构细节

3.1 制造文件中的细节

3.1.1 与构件的质量和功能有关的重要细节应记入制造文件（车间图纸等）中。这不仅应包括结构尺寸，而且如相关，还应包括表面状况（如气割边和焊缝的修整）、特殊制造方法所涉及的检查和验收要求，以及允许公差之类项目。当采用一个标准（工厂标准或国家标准等）时，应将其提交 CCS。

如果因制造文件中没有细节或细节的内容欠缺而对构件的质量或功能产生怀疑，CCS 可以要求制造厂经适当改进后提交。这应包括补充或附加部分（如加强）的规定，即使这些部分在审图时未予要求。

4 等效替代

4.1 应用范围

4.1.1 若采用第 1 章第 2 节[3]设计基础以外的其他设计参数或具有新型结构和新型特性的设计，应按《钢质海船入级规范》第 1 篇第 2 章第 2 节 2.2.5 的规定进行等效替代。

4.2 新颖设计

4.2.1 对具有本规范所规定以外的非常规线型、尺度比例、航速和结构布置等设计新颖的船舶，应根据[4.2.2]至[4.2.4]的内容作特殊考虑。

4.2.2 在设计阶段早期应联系 CCS 以确定适用的规范和所要求提交的附加资料。

4.2.3 相关资料应能验证新颖设计的结构安全至少与本规范的结构安全目标等效。

4.2.4 基于设计偏离的性质，可要求对与规范的等效性作系统评估。

4.3 替代计算方法

4.3.1 如本规范具体章节中有明确规定，可接受规范中的替代计算方法，但应遵循结构强度等效原则。

第 4 节　符号和定义

1 主要符号和单位

1.1 一般要求

1.1.1 除另有规定外，本规范使用的一般符号及其单位的定义见表 1.1.1。

主要符号　　表 1.1.1

符号	含义	单位
A	面积	m^2
	普通骨材和主要支撑构件横剖面面积	cm^2
C	系数	-
F	力和集中载荷	kN
I	船体梁惯性矩	m^4
	普通骨材和主要支撑构件惯性矩	cm^4
M	弯矩	kNm
P	压力	kN/m^2
Q	剪力	kN
Z	船体梁剖面模数	m^3
	普通骨材和主要支撑构件剖面模数	cm^3
a_i	影响 i 的加速度	m/s^2
b	带板宽度	m
	普通骨材和主要支撑构件面板宽度	mm
g	重力加速度	m/s^2
h	高度	m
	普通骨材和主要支撑构件腹板高度	mm
l	普通骨材和主要支撑构件长度/跨距	m

符号	含义	单位
n	项目数	-
r	半径	mm
	板材曲率半径或舭部半径	mm
t	厚度	mm
x	纵向轴 X 坐标	m
y	横向轴 Y 坐标	m
z	垂向轴 Z 坐标	m
η	许用利用因子（利用因子）	-
γ	安全因子	-
δ	变形/位移	mm
θ	角度	deg
ρ	海水密度，取 1.025t/m^3	t/m^3
σ	弯曲应力	N/mm^2
τ	剪应力	N/mm^2

2 符号

2.1 船舶主要数据

2.1.1 除另有规定外，本规范使用的船舶主要数据符号及其单位的定义见表 2.1.1。

船舶主要数据　　表 2.1.1

符号	含义	单位
L	规范船长	m
L_{LL}	载重线船长	m
L_{PP}	垂线间长	m
L_1	规范船长 L，但不必大于 250m	m
L_2	规范船长 L，但不必大于 300m	m
B	船宽	m
D	型深	m
T	吃水	m
T_{SC}	结构吃水	m
T_{BAL}	正常压载吃水	m
$T_{BAL\text{-}H}$	最大压载吃水	m
T_{MPLC}	装载手册中连舱装载的最小吃水	m
T_{MPALT}	装载手册中多港隔舱工况的最大吃水	m
T_{LC}	所考虑装载工况的最小吃水	m
C_b	结构吃水处的方形系数	-
$C_{b\text{-}BAL}$	压载吃水处的方形系数	-
C_W	结构吃水处的水线面系数	-
$C_{W\text{-}BAL}$	压载吃水处的水线面系数	-

符号	含义	单位
V	最大服务航速	knot
x,y,z	相对参考坐标系统的计算点的 X、Y 和 Z 坐标	m

2.2 材料

2.2.1 除另有规定外，本规范使用的材料符号及其单位的定义见表 2.2.1。

材　料　　**表 2.2.1**

符号	含义	单位
E	杨氏模量，见第 3 章第 1 节[2]	N/mm^2
G	剪切模量，$G=\frac{E}{2(1+\nu)}$	N/mm^2
R_{eH}	规定的最小屈服强度（简称最小屈服强度），见第 3 章第 1 节[2]	N/mm^2
τ_{eH}	规定的剪切屈服强度（简称剪切屈服强度），$\tau_{eH}=\frac{R_{eH}}{\sqrt{3}}$	N/mm^2
ν	泊松比，见第 3 章第 1 节[2]	-
K	材料系数，见第 3 章第 1 节[2]	-
R_m	规定的最小抗拉强度（简称抗拉强度），见第 3 章第 1 节[2]	N/mm^2
R_Y	名义屈服应力，取值为 235/K	N/mm^2

2.3 载荷

2.3.1 除另有规定外，本规范使用的载荷符号及其单位的定义见表 2.3.1。

载　荷　　**表 2.3.1**

符号	含义	单位
C_S	波浪系数	-
T_θ	横摇周期	s
θ	横摇单幅值	deg
T_φ	纵摇周期	s
φ	纵摇单幅值	deg
a_o	公共加速度参数	-
a_z	垂向加速度	m/s^2
a_y	横向加速度	m/s^2
a_x	纵向加速度	m/s^2
f_p	概率因子	-
k_r	横摇回转半径	m
GM	稳性高度	m
λ	波长	m
S	静载荷工况	-
$S+D$	静加动载荷工况	-
P_{ex}	海水总压力，见第 4 章第 5 节	kN/m^2
P_{in}	液体引起的内部总压力，见第 4 章第 6 节	kN/m^2

符号	含义	单位
P_s	海水静压力	kN/m^2
P_{ls}	液舱静压力	kN/m^2
P_w	波浪动压力	kN/m^2
P_{ld}	液舱动压力	kN/m^2
P_D	甲板上浪压力	kN/m^2
P_{slh-j}	晃荡压力，j 指方向	kN/m^2
P_{dl}	甲板或平台上分布载荷引起的总压力，见第 4 章第 5 节或第 4 章第 6 节	kN/m^2
P_{SL}	船底砰击压力	kN/m^2
P_{FB}	船首冲击压力	kN/m^2
P_{fs}	进水工况的静压力	kN/m^2
P_{ST}	液舱试验压力（静压）	kN/m^2
F_U	甲板或平台上集中载荷引起的总力，见第 4 章第 5 节或第 4 章第 6 节	kN
M_{sw-j}	垂向静水弯矩，j=h,s,p（中拱，中垂，在港）	kNm
Q_{sw}	垂向静水剪力	kN
M_{wv-j}	垂向波浪弯矩，j=h,s（中拱，中垂）	kNm
Q_{wv}	垂向波浪剪力	kN
M_{wt}	波浪扭矩	kNm
M_{wh}	水平波浪弯矩	kNm

2.4 结构尺寸

2.4.1 除另有规定外，本规范使用的结构尺寸符号及其单位的定义见表 2.4.1。

结构尺寸 **表 2.4.1**

符号	含义	单位
I_{y-n50}	船体梁净垂向惯性矩	m^4
I_{z-n50}	船体梁净水平惯性矩	m^4
Z_{D-n50}, Z_{B-n50}	分别为甲板处和船底处船体梁垂向剖面模数	m^3
z_n	基线至水平中和轴的垂向距离	m
a	基本板格长度	mm
b	基本板格宽度	mm
s	普通骨材间距	mm
S	主要支撑构件间距	m
ℓ	普通骨材或主要支撑构件跨距	m
ℓ_b	肘板臂长	m
t	扣除全部腐蚀后的净厚度	mm
t_{n50}	扣除一半腐蚀后的净厚度	mm
t_c	腐蚀增量	mm
t_{gr}	总厚度	mm
t_{as_built}	建造厚度	mm
t_{gr_off}	总提供厚度	mm
t_{gr_req}	总要求厚度	mm
t_{off}	净提供厚度	mm

符号	含义	单位
t_{req}	净要求厚度	mm
t_{vol_add}	自愿增加厚度	mm
t_{res}	储备厚度	mm
t_{c1} , t_{c2}	构件一侧腐蚀增量	mm
h_w	普通骨材或主要支撑构件腹板净高度	mm
t_w	普通骨材或主要支撑构件腹板净厚度	mm
b_f	普通骨材或主要支撑构件的面板净宽度	mm
h_{stf}	普通骨材或主要支撑构件的高度	mm
t_f	普通骨材或主要支撑构件的面板/翼板净厚度	mm
t_p	普通骨材或主要支撑构件的带板净厚度	mm
d_e	对 L3 型材，腹板上边缘至翼板顶部距离	mm
b_{eff}	弯曲下带板有效宽度，用于屈服和疲劳校核	mm
A_{eff} 或 $A_{eff\text{-}n50}$	骨材或主要支撑构件连同宽度 s 带板的净剖面面积	cm^2
A_{shr} 或 $A_{shr\text{-}n50}$	骨材或主要支撑构件的净剪切面积	cm^2
I_p	骨材关于与板材连接处的净极惯性矩	cm^4
I	骨材连同带板，对平行于板的中和轴的净惯性矩	cm^4
Z 或 Z_{n50}	骨材或主要支撑构件连同宽度 b_{eff} 带板的净剖面模数	cm^3

第 2 章　总布置设计

第 1 节　一般规定

1 一般要求

1.1 一般要求

1.1.1 本章概述船舶结构布置的一般要求，包括分舱布置、舱室布置、通道和逃生布置等。

1.1.2 所有密闭处所一般应设置方便到达的通道以用于检查。对于人员无法进入的小型密闭处所，经 CCS 同意，可使用特殊方法检查和维修。

1.2 布置及结构形式

1.2.1 矿砂船在货舱区域的船底和货舱开口线外的强力甲板均应为纵骨架式，开口边线以内强力甲板采用横骨架式。

1.2.2 货舱区域中舱的水密横舱壁应尽可能与边舱的横舱壁位于同一平面内，否则应采取措施，以保证横向强度。但中舱的水密横舱壁和边舱的横舱壁可采用不同的结构形式。

1.2.3 货舱区域边舱内可设置强框架、横舱壁、制荡舱壁，且应与中舱船底肋板位于同一平面内。

1.2.4 如必要，可在强框架之间的船底设置中间肋板。

第 2 节　分舱布置

1 水密舱壁布置

1.1 水密舱壁的数量和位置

1.1.1 所有船至少需具有以下水密横舱壁：

(1) 一道防撞舱壁；

(2) 一道尾尖舱舱壁；

(3) 一道机器处所前端舱壁，和一道机器处所后端舱壁（可能是尾尖舱舱壁）。

1.1.2 除[1.1.1]的要求外，横舱壁的数量和位置还需满足分舱和破损稳性的要求，并应符合主管机关的要求。

1.1.3 货舱区域的横舱壁应尽可能均匀布置。

2 防撞舱壁

2.1 防撞舱壁的范围和位置

2.1.1 应设有水密延伸至干舷甲板的防撞舱壁。该舱壁应位于距载重线首垂线的距离不小于 $0.05L_{LL}$ 或 10m 处(取小者)，除经主管机关允许外，不大于 $0.08L_{LL}$ 或 $0.05L_{LL}$+3m(取大者)。

2.1.2 如船舶水线以下的任何部分自载重线首垂线向前延伸，例如球鼻首，则[2.1.1]规定的距离应从下列各点之一来量取，取最小者：

（1） 此类延伸的长度中点；

（2） 载重线首垂线前方距离 $0.015L_{LL}$ 处；

（3） 载重线首垂线前方距离 3m 处。

2.2 防撞舱壁的布置

2.2.1 通常，防撞舱壁应在一个平面上，但如果符合[2.1.1]和[2.1.2]的规定，则该舱壁可以设有

台阶或凹槽。

2.2.2 干舷甲板以下的防撞舱壁上不允许开设门、人孔、永久通道或通风管道。当防撞舱壁延伸到干舷甲板以上时，延伸部分的开孔数量应保持最少，并满足船舶的设计和正常工作的要求。

3 尾尖舱舱壁

3.1 一般要求

3.1.1 应设置舱壁将机器处所与前后起居、货物处所隔开，该舱壁应水密延伸至干舷甲板。

3.1.2 只要不降低船舶分舱的安全程度，尾尖舱舱壁可在干舷甲板下方做成阶层。

3.1.3 如尾尖舱舱壁延伸在最深载重线上，并且所有的舵杆轴承在一个不与尾尖舱舱壁前方处所相通的水密舱室内，可接受尾尖舱舱壁终止于低于干舷甲板的水密甲板。

3.1.4 尾管应封闭于具有适度容积的水密处所内。否则，应采用其他措施以降低海水渗入船体的风险，并经 CCS 同意。

第 3 节　舱室布置

1 隔离空舱

1.1 定义

1.1.1 隔离空舱是为了让相邻两侧的舱室没有共同边界而设置的空舱。隔离空舱可以垂直或水平设置。按照规定，隔离空舱应保持气密，且应适当通风，设置排水系统，并应有足够大的空间，以便可以进入检查、维护和安全撤离。

1.2 隔离空舱的布置

1.2.1 用于装载液态碳氢化合物（包括燃油、滑油）的舱室与用于装载淡水（主机和锅炉用水）的舱室之间应设置隔离空舱。

1.2.2 用于装载液态碳氢化合物（包括燃油、滑油）的舱室与用于装载液态灭火泡沫的舱室之间应设置隔离空舱。

1.2.3 在饮用水舱与其他装载人体有害物质的舱室（淡水舱和压载水舱除外）之间应通过设置隔离空舱或 CCS 批准的其他方式隔离开。

1.2.4 相对位置为角对角布置的液舱，视为非相邻舱室。

1.2.5 如无法设置隔离空舱时，应采取以下措施作为替代，并经 CCS 同意：

(1) 相邻液舱的共用边界板厚应在第 6 章第 3 节的基础上增加：

- 2mm，对于装载淡水或锅炉饮用水的液舱；
- 1mm，对于其他情况。

(2) 这些板边缘处的填角焊缝两侧焊喉厚度总和不应小于这些板自身的厚度。

(3) 根据第 1 章第 2 节[3.6.4]进行结构试验时，试验压力增加 1m。

2 双层底

2.1 一般要求

2.1.1 应设置符合[2.2]~[2.4]规定的双层底。

2.2 双层底的范围

2.2.1 双层底应尽可能从防撞舱壁延伸到尾尖舱舱壁，并满足船舶设计和正常工作的要求。

2.3 双层底高度

2.3.1 双层底自龙骨线量起的垂直距离 h 应不小于 $B/20$，且不得小于 760mm，但不必大于 2000mm。

2.4 双层底内的小阱

2.4.1 应提供有效布置将水从内底排出。设于双层底内且与排水装置连接的小阱，不应向下延伸至超过所需的深度。从这种阱的底部至与龙骨线重合的水平面的垂直距离不得小于 $h/2$ 或 500 mm，取大者。如其他阱（如主机下的润滑油阱）的布置与符合本条的双层底具有等效的保护作用，则可允许设置。

2.5 特殊布置

2.5.1 在大小适度的水密舱(包括干舱)处，如该舱的底部或侧面破损时满足 SOLAS 公约第 II-1 章的要求，可不设双层底。

2.5.2 未按[2.1.1]设置双层底时，应满足 SOLAS 公约第 II-1/9 条的底部破损稳性要求。

3 压载舱与边舱

3.1 压载舱承载能力和布置

3.1.1 所有的船舶都应配备具有足够承载能力的压载舱，以保证船舶能够安全的压载航行。压载舱的承载能力至少应能保证在任何航行阶段的任何压载情况下，包括仅有空船重量和压载的情况，船舶的吃水和纵倾能满足第 4 章第 8 节[4.1]的要求。

3.1.2 边舱可设计为压载舱或空舱。

4 首楼

4.1 设置首楼的要求

4.1.1 干舷甲板上应设置封闭的首楼。

4.1.2 首楼的结构布置和尺寸还应满足第 11 章第 1 节的适用要求。

4.2 布置

4.2.1 首楼后端壁应位于第一货舱的前舱壁的上方或后面，见图 4.2.1。如该布置妨碍舱口盖操作，首楼后端壁可适当位于第一货舱前舱壁的前面，但首楼在载重线首垂线（FP_{LL}）之后的长度应不小于 $0.07\,L_{LL}$。

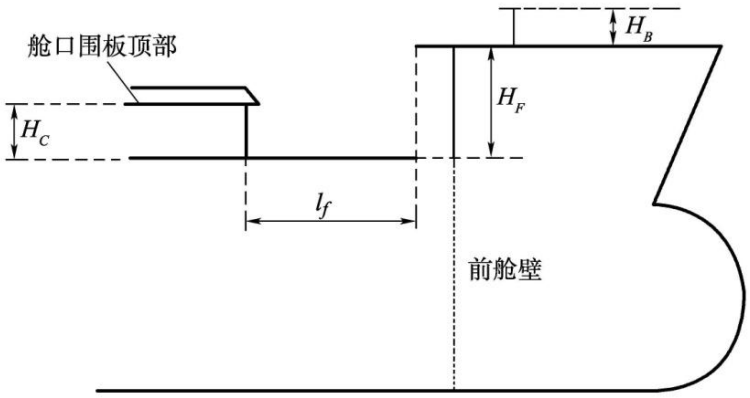


图 4.2.1 首楼布置

4.2.2 首楼在主甲板以上的高度 H_F 应不小于以下值的较大者：

- 第 1 章第 1 节 [2.21] 规定的上层建筑标准高度；
- H_C + 0.5 m，H_C 为第一货舱舱口盖的前端横向围板在中纵剖面处的高度。

4.2.3 首楼甲板后端边缘上的所有点与第一货舱舱口盖的前端横向围板的距离 l_f 应满足下式要求：

$$l_f \le 5\sqrt{H_F - H_C} \qquad \text{m}$$

4.2.4 在首楼甲板上不应为保护舱口围板和舱口盖而设置挡浪板。如需要设置挡浪板，挡浪板的上边缘在中线处与首楼甲板后边缘的距离应不小于 $H_B / tan20^\circ$，其中 H_B 为挡浪板在首楼甲板上的高度，见图 4.2.1。

第 4 节　通道和逃生布置

1 围蔽处所

1.1 特殊考虑

1.1.1 可采用 CCS《船舶人体工程学应用指南》的适用要求考虑人为因素。

1.1.2 对通过性有特殊考虑或要求的处所，如二氧化碳室为防止意外泄露而设置的安全限制，应与本节的要求一起考虑。

1.2 围蔽处所

1.2.1 所有围蔽处所都应设置合适的通道设施，以能够到达方便的进行检查、检验和维护，即应允许人员穿戴合适的服装、人员保护设备和所有必需的工具和测试设备等检查设备时，能够顺畅通行。

1.2.2 应确保按照 CCS《船舶人体工程学应用指南》的适用要求或经 CCS 同意的工业标准，以及 SOLAS 或其他相关监管工具的要求提供合适的布置，以便检查人员或船员紧急退出。

1.3 SOLAS 未明确涵盖的处所

1.3.1 对于 SOLAS 公约第 II-1 章第 3-6 条未明确涵盖的处所，造船厂应按照 CCS《船舶人体工程学应用指南》的适用要求或经 CCS 同意的工业标准提供合适的通道设施，以方便的进行检查、检验和维护，见[1.5]。

1.3.2 应确保按照 CCS《船舶人体工程学应用指南》的适用要求或经 CCS 同意的工业标准提供合适的布置，以便检查人员或船员紧急退出。

1.3.3 在由于设计而不可进入的狭小封闭处所应提供用于检查和维护的特殊措施。

1.4 通常无人处所的通风

1.4.1 除本规范中有其他具体要求外，通常无人处所应具备通过自然或者强制通风方式通风的能力。其通风可通过菌型通风筒、鹅颈通风筒、具备风雨保护盖的通风筒等方式。可通过永久性或临时性机械通风设备和通风井系统或穿过舱室开口的合适的空气交换通道和通风机进行空气交换。

1.5 通常无人处所的永久通道

1.5.1 除本规范中有其他具体要求外，通常无人处所的永久通道的设置应遵循 SOLAS 公约第 II-1 章第 3-6 条。

1.5.2 对于 SOLAS 公约第 II-1 章第 3-6 条未明显覆盖的围蔽处所，应尽量按公约和相关决议中的要求实施。用于进入或应急撤出运行中无人处所的、用于维护的或用于常规检验进入的这些开孔，若为椭圆形的，一般尺寸不小于 600mm × 400mm，或者若为圆形的，应按照按照 CCS《船舶人体工程学应用指南》的适用要求或经 CCS 同意的工业标准。

1.6 特殊布置

1.6.1 如果设有箱形龙骨或管遂，应备有至少两个通往开敞甲板且尽量相互远离的出口。尾部通

道可从机舱通至箱形龙骨。如果设有从机舱通至箱形龙骨的尾部通道，进入箱形龙骨的通道开口应设有水密舱口盖、盖板或水密门。可以按要求使用机械方式辅助通风。

1.6.2 如果进入箱形龙骨的通道设置水密门，水密门的结构至少应与周围结构等强度。

2 货舱区域和首部处所

2.1 通道

2.1.1 每个处所应按 SOLAS 公约第 II-1 章第 3-6 条的规定设置通道。

2.1.2 所有液舱都须可达以便检查。

第 3 章　结构设计原则

第 1 节　材　　料

1 一般要求

1.1 材料标准

1.1.1 船体结构用材料应符合 CCS《材料与焊接规范》的有关规定。

1.2 材料试验

1.2.1 材料应按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 1 章中的适用要求进行试验。

1.3 加工工序

1.3.1 本节的要求假设焊接及其他冷/热加工工序符合 CCS《材料与焊接规范》和船舶建造及修理质量标准。

2 船体结构用钢

2.1 一般要求

2.1.1 除另有规定外，碳钢材料的弹性模量取为 2.06×10^5 N/mm^2，泊松比取为 0.3。

2.1.2 规定最小屈服强度为 235N/mm^2 的钢材定义为一般强度船体结构钢，其符号为“MS”。规定最小屈服强度大于 235N/mm^2 的钢材定义为高强度船体结构钢，其符号为“HT”。

船体结构钢的材料等级如下：

（1）A、B、D 和 E 符号代表一般强度钢级

（2）AH、DH、EH 和 FH 符号代表高强度钢级

表 2.1.2 给出了船体结构用钢的力学性能。

船体结构用钢的力学性能　　表 2.1.2

板厚 t_{as_built}≤100 mm 的钢材等级	R_{eH}，最小屈服强度，N/mm^2	R_m，抗拉强度，N/mm^2
A-B-D-E	235	400 – 520
AH27-DH27-EH27-FH27	265	410 – 530
AH32-DH32-EH32-FH32	315	440 – 570
AH36-DH36-EH36-FH36	355	490 – 630
AH40-DH40-EH40-FH40	390	510 – 660

2.1.3 表 2.1.2 所列之外的高强度钢，CCS 将根据具体情况予以考虑。

2.1.4 如船上使用规定最小屈服强度 R_{eH} 大于 235 N/mm^2 的钢材，确定船体梁强度和船体结构尺寸时，计入的材料系数 K 见[2.2]。

2.1.5 船上应保存一份标明船体结构所采用的钢材的种类与等级的图纸。如使用表 2.1.2 所列之外的钢材，其力学和化学性能以及工艺要求或建议应与上述图纸一起存放在船上。

2.2 材料系数 *K*

2.2.1 除另有规定外，用于确定船体梁强度和尺寸要求的船体结构钢的材料系数 K 见表 2.2.1。该系数是规定最小屈服强度 R_{eH} 的函数。

对于 R_{eH} 在表 2.2.1 规定值中间的材料，可通过线性内插法求得 K。

对于规定最小屈服强度大于 390 N/mm^2 的钢材，其材料系数将特殊考虑。

材料系数 K　　表 2.2.1

R_{eH}，最小屈服强度，N/mm^2	K
235	1.0
265	0.92
315	0.78
355	0.72
390	0.68

2.3 钢材等级

2.3.1 船体各强力构件的材料级别和钢级应不低于相应表 2.3.1(1)至表 2.3.1(4)的规定。

表 2.3.1(1)：材料级别和钢级的一般要求；

表 2.3.1(2)：船长 L 大于 150m 船舶的最低材料钢级；

表 2.3.1(3)：船长 L 大于 250m 船舶的最低材料等级；

2.3.2 对不同材料级别的船体构件，应根据船体构件的建造厚度按表 2.3.1(4)选用钢级。

2.3.3 对于表 2.3.1（1）至表 2.3.1（3）中未列出的正常气温下强力构件，一般采用 A/AH 级钢。

2.3.4 用于制作尾框架和尾轴架的板材一般应不低于材料级别 II 对应的钢级。

材料级别和等级　　表 2.3.1(1)

构件类别		材料级别/等级
次要类	A1. 纵舱壁列板，属于主要类的除外 A2. 露天甲板板，属于主要类和特殊类的除外 A3. 舷侧板	- 船中 0.4L 内材料级别 I - 船中 0.4L 外钢级 A/AH
主要类	B1. 船底板，包括龙骨板 B2. 强力甲板板，不包括属于特殊类者 B3. 强力甲板以上的强力构件的纵向连续板，不包括舱口围板 B4. 纵舱壁的最上列板 B5. 垂直列板(舱口纵桁)	- 船中 0.4L 内材料级别 II - 船中 0.4L 外钢级 A/AH
特殊类	C1. 强力甲板处的舷顶列板(1) C2. 强力甲板边板(1) C3. 纵舱壁处的甲板列板(1)	- 船中 0.4L 内材料级别 III - 船中 0.4L 外材料级别 II - 船中 0.6L 外材料级别 I
	C4. 货舱舱口角隅处的强力甲板板	- 船中 0.6L 内材料级别 III - 货舱其他区域材料级别 II
	C5. 舭列板(1)	- 船中 0.4L 内材料级别 III - 船中 0.4L 外材料级别 II - 船中 0.6L 外材料级别 I
	C6. 长度大于 0.15L 的纵向舱口围板，包括围板顶板和翼板 C7. 纵向舱口围板的端肘板和甲板室过渡区域	- 船中 0.4L 内材料级别 III - 船中 0.4L 外材料级别 II - 船中 0.6L 外材料级别 I - 等级不低于 D/DH
（1）除非受到船舶设计的几何形状的限制，否则在船中 0.4L 范围内，凡采用材料级别 III 的单列板的宽度应不小于 800 + 5L (mm)，且不必大于 1800mm。		

船长 L 大于 **150m** 船舶的最低材料等级　　表 2.3.1(2)

构件类别	材料等级
参与总纵强度的强力甲板板的纵向板	船中 0.4L 内等级 B/AH
强力甲板以上的强力构件的纵向连续板	船中 0.4L 内等级 B/AH

船长 L 大于 250m 船舶的最低材料等级　　表 2.3.1(3)

构件类别(1)	材料等级
强力甲板处的舷顶列板	船中 0.4L 内等级 E/EH
强力甲板上的甲板边板	船中 0.4L 内等级 E/EH
舭列板	船中 0.4L 内等级 D/DH
(1) 除非受到船舶设计的几何形状的限制，否则在船中 0.4L 范围内，凡要求钢材等级 D/DH 和 E/EH 的单列板的宽度应不小于 800 + 5L (mm)，且不必大于 1800mm。	

级别 I、II 和 III 要求的材料等级　　表 2.3.1(4)

材料级别	I		II		III	
建造厚度，mm	MS	HT	MS	HT	MS	HT
$t \leqslant 15$	A	AH	A	AH	A	AH
$15 < t \leqslant 20$	A	AH	A	AH	B	AH
$20 < t \leqslant 25$	A	AH	B	AH	D	DH
$25 < t \leqslant 30$	A	AH	D	DH	D	DH
$30 < t \leqslant 35$	B	AH	D	DH	E	EH
$35 < t \leqslant 40$	B	AH	D	DH	E	EH
$40 < t \leqslant 50$	D	DH	E	EH	E	EH

2.4 暴露于低气温下的船体结构用钢的要求

2.4.1 对于拟在低气温区域（小于-10℃）营运的船舶，如冬季常态化去北极或南极水域营运的船舶， 其暴露结构材料应根据设计温度 t_D 选取。

2.4.2 最低压载水线(BWL)以上的暴露于低气温下的船体结构用钢（包括表 2.4.2 中注⑤）应不低于表 2.4.2 的规定，对于 BWL 以上非暴露于低气温下的船体结构用钢（除表 2.4.2 中注⑤）和 BWL 以下的船体结构用钢应满足本节[2.3]的要求。

低气温下的材料级别　　表 2.4.2

构件类别	构件名称	材料级别	
		船中 0.4L 内	船中 0.4L 外
次要类	通常的露天甲板板 BWL 以上的舷侧板 BWL 以上的横舱壁⑥	I	I
主要类	强力甲板板① 强力甲板以上的纵向连续构件（不包括舱口围板） BWL 以上的纵舱壁 BWL 以上的边舱舱壁	II	I

特殊类	舷侧顶列板，包括圆弧形舷板② 强力甲板边板② 纵舱壁处的甲板板③ 纵向连续的舱口围板④	III	II

注：① 凡可能发生局部高应力处的强力甲板板应按材料级别III或选用 E/EH 钢级。

② 船长 L 大于 250m 的船舶，在船中 0.4L 范围内，应选用不低于 E/EH 钢级。

③ 船宽超过 70m 的船舶，至少有 3 列甲板板应为材料级别 III。

④ 应选用不低于 D/DH 钢级。

⑤ 适用于与暴露在低气温下船体外板相连接的板材。至少有一列板被同样认为是暴露板，该板的宽度至少为 600mm。

2.4.3 对不同材料级别的船体构件所要求的钢级，应根据船体构件所取的板厚和设计温度按表 2.4.3 选取。设计温度 t_D＜-55℃时，其所用的钢级应经 CCS 特殊考虑。

2.4.4 凡采用钢级 E/EH 及 FH 或材料级别 III 的单列板的宽度应不小于 800+5L，mm(L 为船长，m)，但不必大于 1800mm。

低温下各材料级别要求的钢级 表 2.4.3

材料级别 I										
板厚(mm)	−11～−15℃		−16～−25℃		−26～−35℃		−36～−45℃		−46～−55℃	
	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢
t≤10	A	AH	A	AH	B	AH	D	DH	D	DH
10＜t≤15	A	AH	B	AH	D	DH	D	DH	D	DH
15＜t≤20	A	AH	B	AH	D	DH	D	DH	E	EH
20＜t≤25	B	AH	D	DH	D	DH	D	DH	E	EH
25＜t≤30	B	AH	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
30＜t≤35	D	DH	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
35＜t≤45	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH	–	FH
45＜t≤50	D	DH	E	EH	E	EH	–	FH	–	FH
材料级别 II										
板厚(mm)	−11～−15℃		−16～−25℃		−26～−35℃		−36～−45℃		−46～−55℃	
	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢
t≤10	A	AH	B	AH	D	DH	D	DH	E	EH
10＜t≤20	B	AH	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
20＜t≤30	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH	–	FH
30＜t≤40	D	DH	E	EH	E	EH	–	FH	–	FH
40＜t≤45	E	EH	E	EH	–	FH	–	FH	–	–
45＜t≤50	E	EH	E	EH	–	FH	–	FH	–	–
材料级别 III										
板厚(mm)	−11～−15℃		−16～−25℃		−26～−35℃		−36～−45℃		−46～−55℃	
	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢	低碳钢	高强度钢
t≤10	B	AH	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
10＜t≤20	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH	–	FH
20＜t≤25	D	DH	E	EH	E	EH	E	FH	–	FH
25＜t≤30	D	DH	E	EH	E	EH	–	FH	–	FH

30＜t≤35	E	EH	E	EH	–	FH	–	FH	–	–
35＜t≤40	E	EH	E	EH	–	FH	–	FH	–	–
40＜t≤50	E	EH	–	FH	–	FH	–	–	–	–

注：表中“–”为不适用。

2.4.5 设计温度 t_D 应为航区内的最低日平均温度的平均值，其中：

平均值：整个观测周期（至少 20 年）的统计平均。

日平均：一昼夜内的平均。

最低：一年内的最低。

对季节性有限航区，适用营运期间的最低值。

图 2.4.5 为通用温度定义。

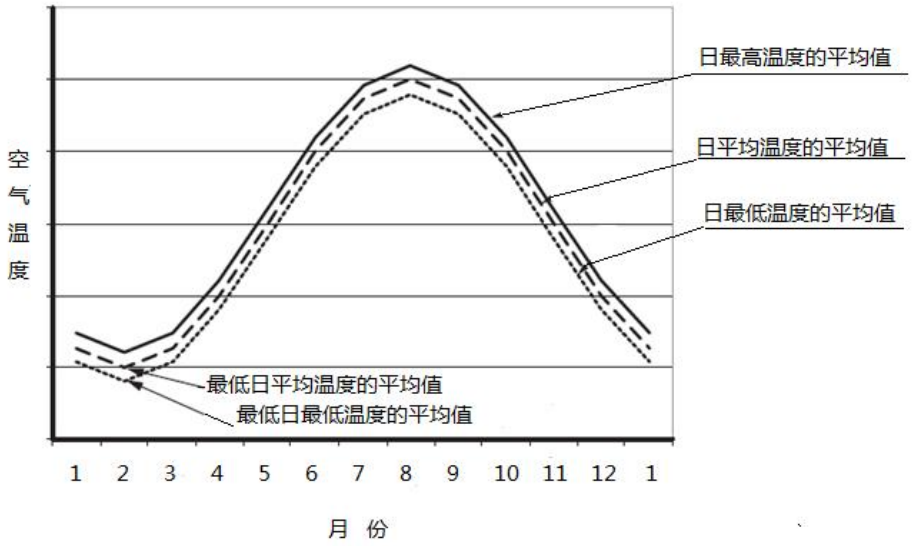


图 2.4.5 通用温度定义

2.5 厚度方向特性

2.5.1 船体结构中使用全焊透焊接的 T 型或十字型接头时，而且在板厚方向承受较大应力的板材，应采用具有全厚度特性的 Z 向钢钢板，此钢板应符合 CCS《材料与焊接规范》Z 向钢的要求。在图纸上这些钢应以所要求的钢材强度等级后加缀字母 Z 来标明（例如 EH36Z35）。

3 锻钢件和铸钢件

3.1 一般要求

3.1.1 锻钢件和铸钢件的力学性能和化学成分应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 5 章和第 6 章的要求。

3.1.2 拟进行焊接的锻钢件和铸钢件应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 5 章和第 6 章焊接结构用锻钢件和铸钢件的适用要求。

3.1.3 锻钢件和铸钢件应分别按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 5 章和第 6 章进行试验。

3.2 锻钢件

3.2.1 轧制圆钢一般不能用于替代船体重要结构用锻钢件（如舵杆），若用于其他非重要结构件，应经 CCS 同意。在此情况下，其质量和试验应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 5 章对锻件相关要求。

3.3 铸钢件

3.3.1 用于制造首柱、尾柱、舵叶、舵承及其他结构用铸钢件应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 6 章关于规定最小抗拉强度 R_m = 400 N/mm^2 的铸钢件的要求。

3.3.2 铸钢件与构成船体强力构件的主要板材的焊接，应根据材料碳当量、结构刚性等具体情况，确定预热温度和焊后热处理等工艺措施，并经 CCS 同意。

3.3.3 对船体重要结构用铸钢件的冲击性能和无损检测要求，应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 6 章的要求。

4 铝合金

4.1 一般要求

4.1.1 上层建筑、甲板室和舱口盖等类似结构，可使用铝合金材料。使用的铝合金材料应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 8 章要求。

4.1.2 当设计温度低于-55℃的低温铝合金结构，应使用退火态 5083 铝合金。

4.1.3 除另有规定外，铝合金的杨氏模量应取为 70000N/mm^2，泊松比取为 0.33。

4.1.4 铝合金与钢结构之间的连接方法应提交 CCS。

4.2 挤压板材

4.2.1 板和骨材的组合型挤压件， 可参照作为挤压板材使用。

4.2.2 一般情况下，挤压板材的适用范围限于甲板、舱壁、上层建筑和甲板室。在其他方面的使用，《钢质海船入级规范》第 1 篇第 2 章第 2 节 2.2.5 的规定进行等效替代。

4.2.3 挤压板材的取向应使其骨材平行于主要应力的方向。

4.2.4 挤压板材与主要构件间的连接应予以特别注意。

4.3 焊接接头的力学性能

4.3.1 焊接热输入将会导致加工硬化（除 O 或 H111 状态外的 5000 系列）或热处理硬化（6000 系列）后的铝合金局部的力学强度降低。

4.3.2 5000 系列铝合金的焊接性能一般为 O 或 H111 状态下的性能。如经适当验证，可以考虑更高的力学特性。

4.3.3 6000 系列铝合金的焊态性能应符合《材料与焊接规范》第 3 篇第 3 章第 2 节规定。

4.4 材料系数 K

4.4.1 铝合金的材料系数 K 应根据下列公式计算得到：

$$K = \frac{235}{R'_{\lim}}$$

式中：

$R'_{\lim}$ —— 焊接状态下母材最小可保证屈服应力 $R'_{p0.2}$，N/mm^2，但不大于焊接状态下母材的最小可保证抗拉强度 R'_m (N/mm^2)的 70%

$R'_{p0.2}$ —— 焊接状态下材料的最小可保证屈服应力，N/mm^2

$$R'_{p0.2} = \eta_1 R_{p0.2}$$

R'_m —— 焊接状态下材料的最小可保证抗拉强度，N/mm^2

$$R'_m = \eta_2 R_m$$

$R_{p0.2}$ —— 交货状态下母材最小可保证屈服应力，N/mm^2

R_m —— 交货状态下母材最小可保证抗拉强度，N/mm^2

η_1，η_2—— 在表 4.4.1(1)中给出

铝合金-焊接结构系数　　表 4.4.1(1)

铝合金	η_1	η_2
未经加工硬化处理的铝合金（退火状态 O 或退火矫平状态 H111 下 5000 系列）	1	1
经加工硬化处理的铝合金（除 O 或 H111 状态外 5000 系列）	$R'_{p0.2}/R_{p0.2}$	R'_m/R_m
经热处理硬化的铝合金（6000 系列）(1)	$R'_{p0.2}/R_{p0.2}$	0.6
(1)如无资料提供，系数η_1应取为表 4.4.1(2)所定义的金相效率系数β		

铝合金-金相效率系数β　　表 4.4.1(2)

铝合金	回火状态	总厚度，mm	β
6005A（开口型材）	T5 或 T6	$t \le 6$	0.45
		$t > 6$	0.40
6005A（闭合型材）	T5 或 T6	所有	0.50
6061（型材）	T6	所有	0.53
6082（型材）	T6	所有	0.45

4.4.2 如两种不同的铝合金进行焊接，用于尺度计算的材料系数 k 应取为铝合金组装件中较大的材料系数。

4.5 其他

4.5.1 舷梯之类的重的移动式铝结构的底面应以硬质塑料或木质覆盖物或其他经认可的方式予以保护，以避免形成痕迹。该保护装置应与该铝质结构永久性牢固相连。

5 其他材料和产品

5.1 通则

5.1.1 对其他材料和产品，例如铸铁制造的部件、铜合金制造的产品、铆钉、锚、锚链和钢丝绳，应满足 CCS《材料与焊接规范》的适用要求。

5.1.2 根据设计温度、板厚、起重机类型等因素，按 CCS《船舶与海上设施起重设备规范》第 6 章要求选用起重机、桅、起重柱、吊杆及附件的材料。

5.1.3 塑料等其他非金属材料应满足 CCS《材料与焊接规范》第 2 篇的要求。

5.2 铸铁件

5.2.1 通常，铁素体/珠光体组结的灰铸铁件、可锻铸铁件或球墨铸铁件仅允许用于制造次要的低应力构件。

5.2.2 窗或舷窗一般不能使用普通铸铁件。经 CCS 同意，可考虑采用抗拉强度不低于 300N/mm^2、伸长率不低于 15%的铸铁件。

第 2 节　净尺寸方法

符号

t　——净厚度，mm

t_c　——腐蚀增量，mm

t_{gr}　——总厚度，mm

h_{stf}　——骨材或主要支撑构件高度，mm

h_w　——骨材或主要支撑构件腹板高度，mm

t_w　——骨材或主要支撑构件腹板厚度，mm

b_f　——骨材或主要支撑构件面板宽度，mm

t_f　——骨材或主要支撑构件面板厚度，mm

t_p　——骨材或主要支撑构件带板厚度，mm

d_e　——L3 型材从腹板顶端至翼板顶部的距离，mm

t_{as_built}——建造厚度，mm，取为新建阶段的实际板厚

t_{gr_off}　——总提供厚度，mm

t_{gr_req}　——总要求厚度，mm

t_{off}　——净提供厚度，mm

t_{dm}　——设计生产余量，mm，取为总提供厚度和总要求厚度的差值（也等于净提供厚度与净要求厚度的差值），是设计者或建造者为满足设计或生产实际情况的所使用的尺寸的结果。该差值不可视为额外的腐蚀增量。

t_{req}　——净要求厚度，mm

t_{vol_add}——自愿增加厚度，mm，取为船东或建造者在 t_c 之外自愿额外增加的厚度。

t_{res}　——储备厚度，mm，等于 0.5mm

t_{c1}, t_{c2}——结构构件一侧的腐蚀增量，mm

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 净厚度方法

结构单元的净厚度 t 是为了符合设计的结构强度而要求的。结构单元的腐蚀增量 t_c 是独立于尺度要求而单独给出的。该方法将净厚度与为了船舶运营阶段可能出现的腐蚀而增加的厚度区分开。

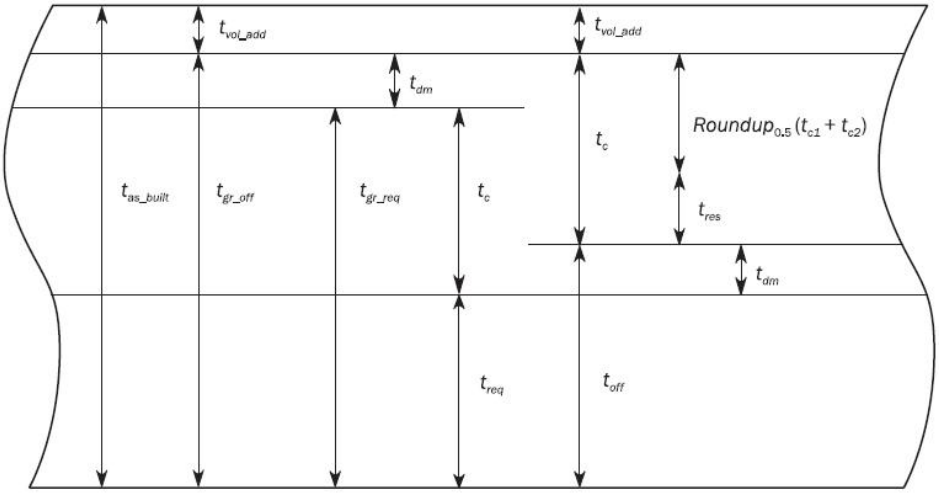


图 1.1.1 净尺寸方法图解

1.1.2 局部和总体腐蚀

局部与总体腐蚀中的净尺寸方法有区别。局部腐蚀定义为局部结构单元（如一块板或一根骨材）的均匀腐蚀。总体腐蚀定义为较大区域（如主要支撑构件和船体梁）的平均腐蚀。

1.1.3 使用总尺寸的例外情况

直接由总尺度决定的结构不使用净尺寸方法，即其尺寸已经包含腐蚀增量，但不包含船东自愿增加厚度。总尺度要求用后缀“gr”来标示，例如：

(1) 上层建筑和甲板室的尺度

(2) 大型锻钢件和铸钢件的尺度

1.2 总尺度和净尺度的定义

1.2.1 总要求厚度

总要求厚度 t_{gr_req} 由腐蚀增量与净要求厚度相加得到，按下式计算：

$$t_{gr_req} = t_{req} + t_c$$

1.2.2 总提供厚度

总提供厚度 t_{gr_off} 系指在新建阶段中所提供的总厚度，是从建造厚度减去自愿增加厚度后得到的，按下式计算：

$$t_{gr_off} = t_{as_built} - t_{vol_add}$$

1.2.3 净提供厚度

净提供厚度 t_{off} 系指总提供厚度减去 t_c 后得到的净厚度，按下式计算：

$$t_{off} = t_{gr_off} - t_c = t_{as_built} - t_{vol_add} - t_c$$

1.3 尺度符合

1.3.1 所要求的净厚度 t_{req} 由按照本规范计算的净厚度圆整到最近的半毫米得到。例如：

(1) 当 10.75 ≤$t_{calc\text{-}net}$< 11.25 mm 时，则本规范要求的净厚度为 11.0 mm。

(2) 当 11.25 ≤$t_{calc\text{-}net}$< 11.75 mm 时，则本规范要求的净厚度为 11. 5 mm。

1.3.2 本规范相关的尺度符合原则如下：

(1) 板的净提供厚度应大于等于板的净要求厚度。

(2) 局部支撑构件的剖面模数、惯性矩和剪切面积要求应使用净厚度的带板、腹板和翼板来计算。局部支撑构件的净剖面尺寸如图 1.3.2 所定义。剖面模数和腹板净厚度要求值适用于远离端部肘板的区域。

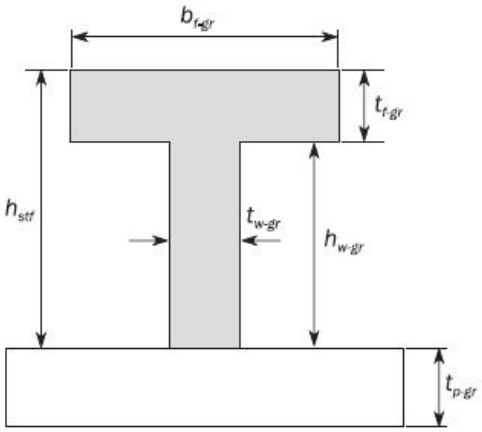
(3) 主要支撑构件和船体梁的净提供剖面特性应大于等于净剖面特性要求值。净提供剖面特性应基于总提供尺寸减去适当的腐蚀增量。

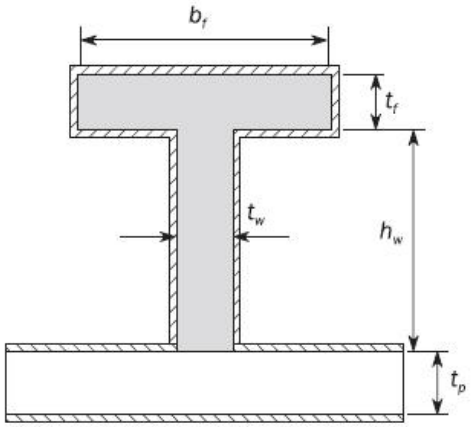
应用本规范进行符合性验证时不考虑船东或建造者增加的任何额外厚度。

评估时对总尺寸所用的腐蚀　　表 1.3.2

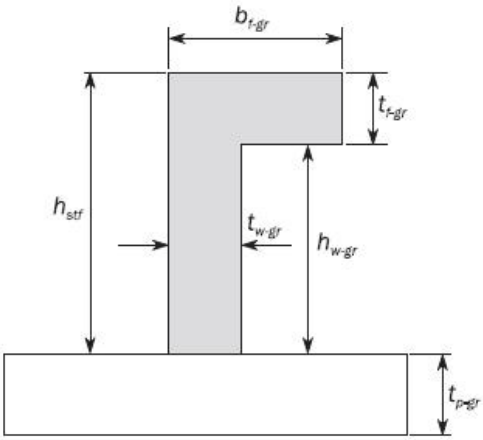
结构要求	特性/分析类型	施加的腐蚀增量
最小净厚度（所有构件，包括主要构件）	厚度	t_c
局部强度（板和骨材）	板厚/剖面特性	t_c
	刚度/剖面特性/屈曲能力	t_c
主要支撑构件（描述性方法）	剖面特性	$0.5t_c$
	刚度/腹板和翼板特性/屈曲能力	t_c
有限元强度评估	舱段/整船粗网格	$0.5t_c$
	屈曲能力	t_c
	局部细化网格	$0.5t_c$
	特定的细网格区域	$0.5t_c$
船体梁强度	剖面特性	$0.5t_c$

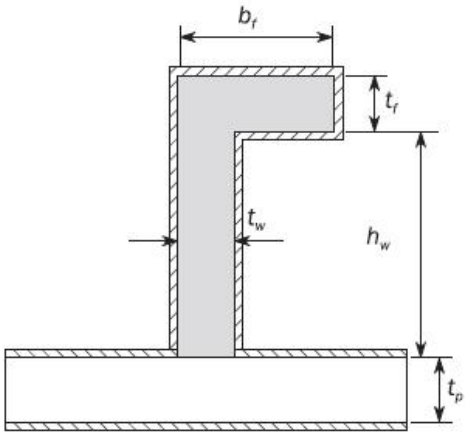
结构要求	特性/分析类型	施加的腐蚀增量
	屈曲能力	t_c
船体梁极限强度 船体梁残存强度	剖面特性	$0.5t_c$
	屈曲/垮塌能力	$0.5t_c$
疲劳评估（简化应力分析）	船体梁剖面特性 局部支撑构件	$0.5t_c$
疲劳评估（有限元应力分析）	粗网格 精细网格	$0.5t_c$



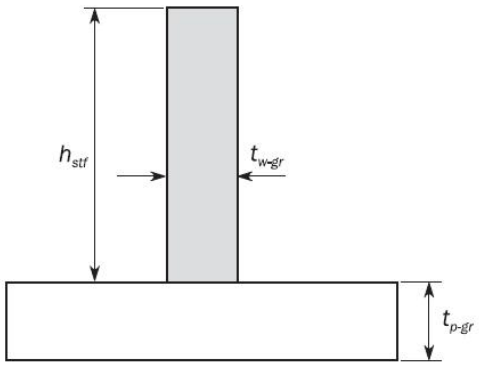


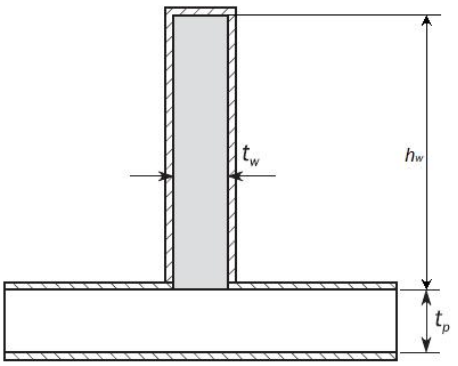
T 型材



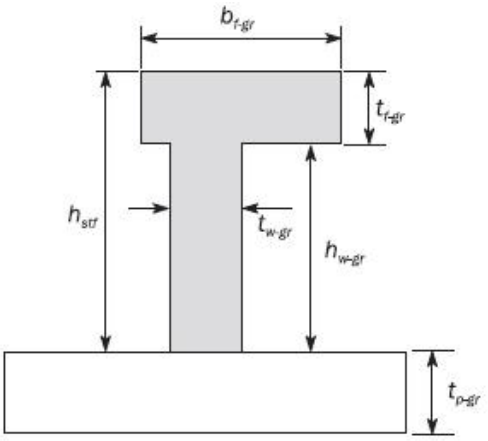


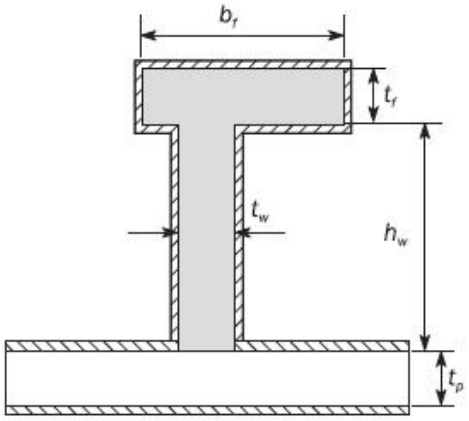
角钢



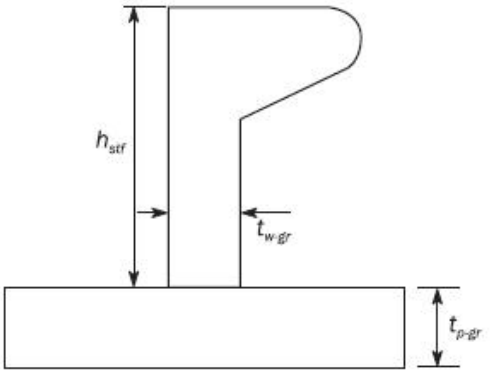


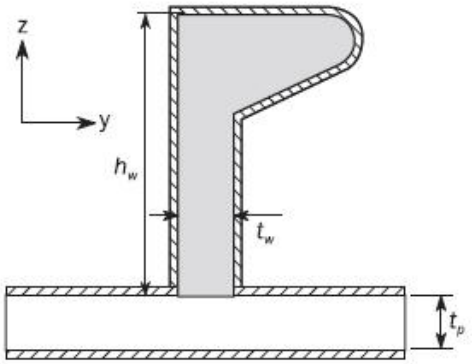
扁钢





L2 角钢





球扁钢及相似型材

计算净剖面面积、关于 y 轴的惯性矩和相关中和轴位置时，应假设从型材剖面的表面扣除 $0.5t_c$ 的腐蚀增量。

图 1.3.2 局部支撑构件的净剖面特性

第 3 节　腐蚀增量

定义

t_c——总腐蚀增量， mm

t_{c1}, t_{c2}——构件一侧的腐蚀增量， mm

t_{res}——储备厚度，取为 0.5mm

1 一般要求

1.1 适用性

1.1.1 本节中规定的腐蚀增量适用于碳锰钢、不锈钢、不锈钢复合板和铝合金。不锈钢复合板中暴露的碳钢一侧的腐蚀增量按碳钢对应的舱室要求取值。

1.2 腐蚀增量的确定

1.2.1 结构构件两侧的每一侧的腐蚀增量，t_{c1} 或 t_{c2}，见表 1.2.1。

（1）构件两侧的总腐蚀增量 t_c，mm，用下式求得：

$$t_c = Roundup_{0.5}(t_{c1} + t_{c2}) + t_{res}$$

（2）对设定舱室内部构件，总腐蚀增量 t_c 用下式求得：

$$t_c = Roundup_{0.5}(2t_{c1}) + t_{res}$$

式中：t_{c1} 指表 1.2.1 中暴露于该舱室的一侧的规定值；

$Roundup_{0.5}(t)$指 t 按向上圆整半毫米取值。

（3）不锈钢或铝制舱室边界和内部构件的腐蚀增量 t_c，mm，取为：

$$t_c = t_{res} = 0.5$$

（4）对于不锈钢复合钢板，碳钢一侧的腐蚀增量 t_{c1} 和不锈钢一侧的腐蚀增量 t_{c2} 分别取为：

- t_{c1} 取表 1.2.1 中相应舱室的给定值
- t_{c2}=0

1.2.2　总腐蚀增量最小值

除骨材的腹板和面板或干舱内部的可取 1.5mm 外，其他总腐蚀增量应不小于 2mm。该腐蚀增量最小值不适用于不锈钢、不锈钢复合板或铝合金结构构件。

1.2.3 扶强材的腐蚀增量由其与带板连接处的位置决定。

1.2.4 当局部支撑构件/板由多个腐蚀增量影响，则对整块板列都采用最大的值。

构件单侧的腐蚀增量　　表 1.2.1

舱室类型	结构构件		t_{c1} 或 t_{c2}
压载水舱、舭部液舱、污油舱、污水舱、锚链舱(1)	主要支撑构件面板	舱顶以下 3m 范围内(2)	1.2
		其他位置	1.0
	其他构件	舱顶以下 3m 范围内(2)	1.2
		其他位置	1.0
货舱	横舱壁（含顶凳、底凳）	上部(3)	1.2
		内底垂直向上 3m 的范围内	3.0
		其他部分(4)	2.0
	纵舱壁板	上部(3)	1.2

舱室类型	结构构件		t_{c1} 或 t_{c2}
		内底垂直向上 3m 的范围内	3.0
		其他部分	2.0
	内底板		3.0
	其他构件	上部(3)及舱口围	1.2
		其他部分	2.0
暴露于大气	露天甲板板		1.0
	其他结构		1.0
暴露于海水	最小设计压载吃水线与结构吃水线之间的外壳板		1.0
	其他位置的外壳板		0.5
燃油舱和滑油舱			0.5
淡水舱			0.5
空舱	不经常进入的处所，如仅能通过人孔、管隧等才可进入，与干散货舱或压载货舱不连通的凳处所的内表面。		0.5
干舱	机器处所、泵舱、储藏室、舵机处所等舱室的内部		0.5

（1）锚链舱底上表面以上 3m 范围内的板表面应增加 1.0mm。

（2）仅适用于露天甲板作为舱顶的污油水舱和压载水舱。3m 距离从平行于舱顶垂直向下量取。

（3）货舱的上部对应于货舱（不含舱口围）高度的上三分之一。

第 4 节　腐蚀防护

1 一般要求

1.1 专用海水压载舱

1.1.1 专用海水压载舱应符合 SOLAS 公约第 II-1 章第 3-2 条规定，建造期间按照《所有类型船舶专用海水压载舱和散货船双舷侧处所保护涂层性能标准（PSPC-WBT）》涂装。

1.2 双舷侧处所

1.2.1 双舷侧处所应符合 SOLAS 公约第 II-1 章第 3-2 条规定，建造期间按照《所有类型船舶专用海水压载舱和散货船双舷侧处所保护涂层性能标准（PSPC-WBT）》涂装。

2 牺牲阳极

2.1 舱内牺牲阳极的安装

2.1.1 所有阳极与结构的连接应保证这些阳极从开始到运营中甚至报废时都能安全的绑牢。可接受以下方法：

（1）通过连续填角焊将钢芯焊接至结构上；

（2）用螺栓连接到每个支架上，至少要有 2 只带防松螺母的螺栓。但也可以接受其他机械夹紧装置。

2.1.2 阳极应安装在骨材上或平面舱壁板上与骨材对齐的位置，但不得连接到船壳上。两端不得接到相对移动的两个单独的构件上。

2.1.3 钢芯或支架如果焊到局部支撑构件或主要支撑构件上，应与端部支撑、肘板趾部和类似的应力集中点保持距离。如将其焊到不对称构件上时，焊缝应距腹板边缘至少 25 mm。如果骨材或桁材有对称面板，则可与腹板相连或与面板中线相连，但应远离自由边。一般而言，阳极不得装到高强度钢构件的面板上。

第 5 节　结构细节原则

符号

本节未定义的符号，见第 1 章第 4 节。

1 适用范围

1.1 一般要求

1.1.1 除另有规定外，本节的要求适用于除上层建筑和甲板室以外的船体结构。

2　一般原则

2.1 结构连续性

2.1.1 一般要求

应关注结构的连续性，尤其是以下区域：

(1) 骨架形式改变处；

(2) 主要支撑构件或普通骨材的端部连接处；

(3) 货舱区域与船首、尾部和机器处所之间的过渡区域；

(4) 上层建筑侧壁和端壁处。

在构件终结处，应设置合适的支持结构以保证结构的连续性。

应避免纵向构件横剖面特性的突然变化。应进行光顺的过渡。

2.1.2 纵向构件

纵向构件的布置应确保强度的连续性。参与船体梁总纵强度的纵向构件应尽可能向船体端部连续延伸。特别是，应确保货物区域内纵舱壁构件连续延伸至货物区域以外。设置与纵舱壁对齐的大过渡肘板（如嵌接肘板）可作为实现这种结构连续性的一种方法。

2.1.3 主要支撑构件

主要支撑构件应以确保强度连续性的方式布置。应避免腹板高度或横剖面的突然变化。

2.1.4 骨材

骨材的布置应确保强度的连续性。参与船体梁总纵强度的骨材在船中 0.4L 范围内应在穿过主要支撑构件时保持连续性，船中 0.4L 范围外也应尽可能连续。骨材在大开口、机座和短纵桁处终止时，应布置补偿结构以提供端部连接处的结构连续性。

2.1.5 板

当不同厚度的板连接在一起时，在承受载荷的方向的板建造厚度的变化不得超过较厚板厚度的 50%。该要求同样适用于局部嵌入式加强，如双层底纵桁、实肋板和内底板的嵌入板。

2.1.6 焊接接头

在高应力集中区域应避免焊接接头。

2.2 局部加强

2.2.1 折角处的局部加强

(1) 通常折角处应通过对齐折角设置普通骨材或等效方法来进行加强，以保证面外刚度。

(2) 在主要构件（外板、纵舱壁等）的折角处应设置用于加强的构件，包括框架、肘板或型材，并应与能够传递载荷（剪力）的构件相连。

(3) 对于纵向浅折角，可在折角上下的纵向构件之间，跨越折角装设间距紧密的短梁。在不受到高侧向载荷或不受沿折角的高面内载荷作用的浅折角区域，如甲板梁拱折角，不必设置短梁或其他形式的加强。

(4) 在折角和与折角对齐的支撑加强之间的距离一般不大于 50 mm。否则，设计者应按照第 10 章的要求提交疲劳分析。

2.2.2 永久通道附件处的加强

永久通道船体结构的附件处应根据位置和强度考虑局部加强。

2.2.3 集中载荷处的甲板结构加强

锚机、甲板机械等载荷集中位置处的甲板结构应进行加强。

2.2.4 通过嵌入板加强

嵌入板应至少采用与所焊接的板相同的最小屈服强度和相同的钢级，见[2.1.5]。

2.3 不参与船体梁总纵强度的纵向构件的连接

2.3.1 当强力甲板或船底处的船体梁应力高于普通强度钢的许用应力时，不参与船体梁总纵强度并焊接至强力甲板或船底板和舭部板的纵向构件（如排水沟角钢、甲板开口的加强构件、舭龙骨等），应使用与强力甲板或船底结构钢的最小屈服强度相同的钢材。

2.3.2 上述要求同样适用于参与船体梁总纵强度的主要支撑构件（如舱口围板、水平桁和纵桁）的腹板上焊接的非连续纵骨，或焊接在内底板上的船体梁应力高于普通强度钢许用应力的那些非连续纵骨。

3 骨材

3.1 一般要求

3.1.1 所有类型的骨材（除腹板骨材外）的端部都应有连接。但是，类似船体中独立的区域无法实施端部连接等特殊情况，可以允许端部削斜。不同的连接类型（有肘板、无肘板或削斜）的要求在[3.2]到[3.4]中给出。

3.1.2 当骨材腹板和带板间的夹角小于 50º 时，如图 3.1.2 所示，则应设置防倾肘板。如不对称骨材的腹板和带板间的夹角小于 50º，则骨材面板应设置在开阔斜角的一侧。

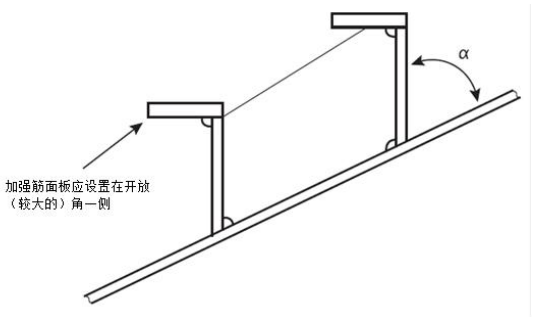


图 3.1.2 与带板夹角小于 50° 的加强筋

3.2 非连续加强筋的肘板端部连接

3.2.1 在通过肘板实现纵向构件强度连续的位置，应确保在主要支撑构件的每侧正确校准肘板，且肘板尺寸应使其骨材/肘板组合的剖面模数和有效横剖面面积不小于构件的剖面模数和有效横剖面面积。

3.2.2 在肘板端部连接处，应保持骨材与肘板的连接和肘板与支撑构件连接的强度连续性。

3.2.3 骨材与肘板的连接布置应保证连接处任何位置的剖面模数不小于骨材的剖面模数要求。

3.2.4 腹板净厚度

肘板腹板净厚度，t_b，mm，应满足以下要求：

$$t_b = \left(2 + f_{bkt}\sqrt{Z}\right)\sqrt{\frac{R_{eH-stf}}{R_{eH-bkt}}}$$，且不大于 13.5mm

式中：

f_{bkt}——参数，取为：

对于有翼板或边缘骨材的肘板，$f_{bkt} = 0.2$

对于无翼板或边缘骨材的肘板，$f_{bkt} = 0.3$

Z——骨材剖面模数净规范要求值，cm^3。若两个骨材相连，Z 取作相连骨材中的最小净要求剖面模数

$R_{eH\text{-}stf}$——骨材材料的最小屈服强度，N/mm^2

$R_{eH\text{-}bkt}$——肘板材料的最小屈服强度，N/mm^2

3.2.5 非连续骨材端部的肘板

非连续骨材端部应设置臂长 l_{bkt}，mm，不小于下式的肘板：

$$l_{bkt} = c_{bkt}\sqrt{\frac{Z}{t_b}}$$

l_{bkt} 不得小于：

(1) $l_{bkt} = 1.8\ h_{stf}$ 对于该骨材的腹板端部得到支持且肘板与骨材腹板焊接在一条线上或者具有必要的偏移以便焊接的情况，见图 3.2.5 中(c)

(2) $l_{bkt} = 2.0\ h_{stf}$ 对于其他情况，见图 3.2.5 中(a)、(b)和(d)

式中：

C_{bkt}——参数，取为：

$C_{bkt} = 65$ 对于有翼板或边缘骨材的肘板

$C_{bkt} = 70$ 对于无翼板或边缘骨材的肘板

Z——骨材的净剖面模数要求值，cm^3。如[3.2.4]定义

t_b——肘板最小净厚度，mm，如[3.2.4]定义

对于图 3.2.5 中(b)项类似但未搭接的连接，肘板臂长应满足 $l_{bkt} \geq 2h_{stf}$。

对于图 3.2.5 中(c)和(d)类似的连接，当较小的骨材与主要支撑构件或舱壁相连时，肘板臂长不得小于两倍的 h_{stf}。

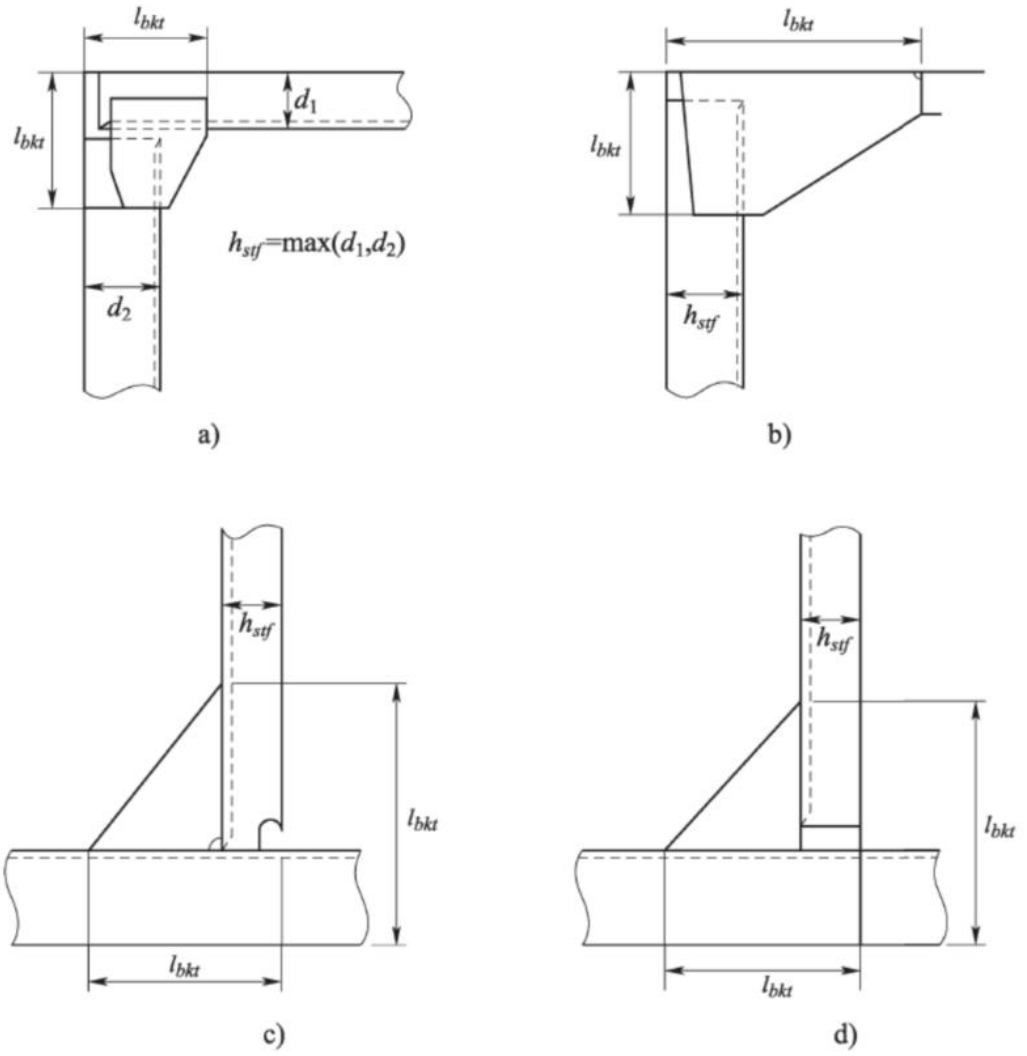


图 3.2.5 非连续骨材的肘板臂长

3.2.6 不同臂长的肘板

从板至肘板趾端所量取的臂长应为：臂长之和大于 $2l_{bkt}$ 且每个臂长不小于 $0.8l_{bkt}$，其中 l_{bkt} 如[3.2.5]定义。

3.2.7 肘板的边缘加强

若要求边缘骨材，则边缘骨材的腹板高度 h_w，mm 不小于：

$$h_w = 45\left(1+\frac{Z}{2000}\right)$$，但不得小于 50mm

式中：

Z—— 骨材的净剖面模数，cm^3，如[3.2.4]定义。

3.3 无肘板连接

3.3.1 无肘板连接的设计应保证连接处能够足够限制转角和位移。

3.4 削斜端部

3.4.1 当骨材所支撑的板的净厚度 t_p 不小于下式时，可在动载荷很小的位置使用削斜端部：

$$t_p = c_1\sqrt{\left(1000l-\frac{s}{2}\right)\frac{sPk}{10^6}}$$

式中：

P——所考虑的设计载荷组中的骨材设计压力，kN/m^2。

c_1——所考虑的设计载荷组系数，取为：

c_1 =1.2　对于 AC-S 验收衡准

c_1 =1.1　对于 AC-SD 验收衡准

通常削斜骨材不许用在主机或发电机或桨推进区域或船体外壳的结构上。

3.4.2 肘板趾端和削斜骨材的端部一般应终止在相邻构件附近。该距离不可超过40mm，除非肘板或构件在板材的相反面有另一构件支撑。端部削斜过渡一般不超过 30 度。趾端或削斜端部的高度一般不得超过肘板趾端或削斜端部构件的厚度，但也不必小于15mm。

4　主要支撑构件（PSM）

4.1 一般要求

4.1.1 主要支撑构件的腹板骨材、防倾肘板和端肘板应满足[4.2]到[4.4]的要求。若结构布置的情况使得无法满足这些要求，设计方应阐明替代布置是适当的。

4.2 腹板加强布置

4.2.1 主要支撑构件腹板加强筋应满足第 9 章第 2 节给出的这类骨材的尺度要求。

4.3 防倾肘板布置

4.3.1 防倾肘板（见图 4.3.1）通常应设置在：

(1) 沿构件跨距的位置，且应满足第 9 章第 2 节中关于防倾肘板间距和翼板刚度的衡准要求；

(2) 端肘板趾部；

(3) 连续弯曲面板的端部；

(4) 集中载荷处；

(5) 靠近剖面变化处。

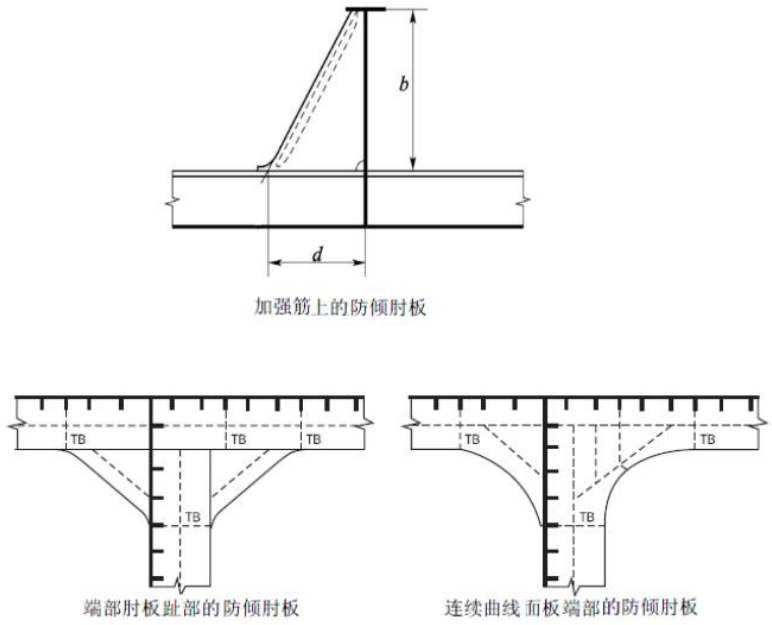


图 4.3.1 主要支撑构件防倾肘板布置

4.3.2 如对称面板的宽度大于 400 mm，则应在防倾肘板处设置背肘板。

4.3.3 如主要支撑构件的面板在腹板的任一侧宽度超过 180 mm，则应设置防倾肘板以支撑面板。

4.3.4 臂长

防倾肘板的臂长，m，应不小于以下值的大值：

$$d = 0.38b$$

$$d = 0.85b\sqrt{\frac{s_t}{t}}$$

式中： b—— 防倾肘板的高度，m，如图 4.3.1 所示；

s_t—— 防倾肘板的间距，m；

t—— 防倾肘板的净厚度，mm。

4.4 端部连接

4.4.1 一般要求

主要支撑构件端部应设置肘板或等效结构。端肘板一般应为软趾。当相邻的面板有足够支撑时，可以使用无肘板连接。

4.4.2 端肘板尺寸

通常，图 4.4.2 所示的连接主要支撑构件的肘板臂长应不小于主要支撑构件的腹板高度，且无需大于腹板高度的 1.5 倍。

在货舱区域内，肘板厚度一般不小于相连接的主要支撑构件腹板厚度。货舱区域以外，肘板厚度不得小于主要支撑构件腹板厚度。

端肘板的尺寸应使连同端肘板的主要支撑构件剖面模数（当面板削斜时不考虑面板）不小于跨中处的主要支撑构件的剖面模数。

肘板面板的净剖面面积 A_f，cm^2，不小于：

$$A_f = l_b\, t_b$$

式中：l_b—— 肘板边缘长度，m，见图 4.4.2。对于曲线形肘板，肘板边缘长度可取为边缘中点处的切线长度。

t_b—— 肘板最小净厚度，mm，见[3.2.4]的定义

但是，面板的净厚度应不小于肘板腹板的值。

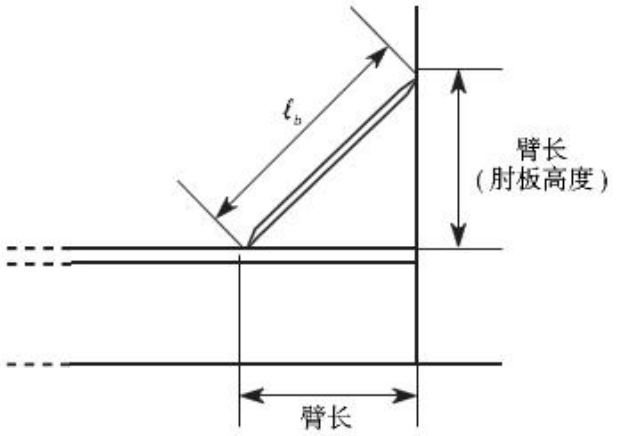


图 4.4.2 肘板尺寸

4.4.3 端肘板布置

当肘板自由边的长度 l_b 大于 1.5 m 时，则肘板的腹板按应按以下要求予以加强：

(1) 腹板骨材的净剖面面积，cm^2，应不小于 $16.5l$。l 为骨材的跨距，m。

(2) 应设置防倾扁钢。当对称面板的宽度大于 400 mm 时，则应额外设置背肘板。

对于环形框架系统，端肘板与构件腹板为一个整体，且面板沿构件和肘板的边缘连续布置，则在靠近肘板中点处应使面板保持最大面积的完整面积，并向较小面板逐渐过渡。面板的对接应远离肘板趾部。

如果宽的面板邻接窄的面板，锥度一般不得大于 1:4。

肘板趾部不得设置在无骨材的板材上。趾高不应大于肘板趾部厚度，但也不必小于 15 mm。主要支撑构件端肘板一般应为软趾。当主要支撑构件由高强度钢制成时，应特别关注端肘板趾端的设计以使应力集中最小化。

当面板焊接到端肘板的边缘或临近端肘板的边缘（见图 4.4.3）时，该面板应削斜，且过渡角不大于 30°。

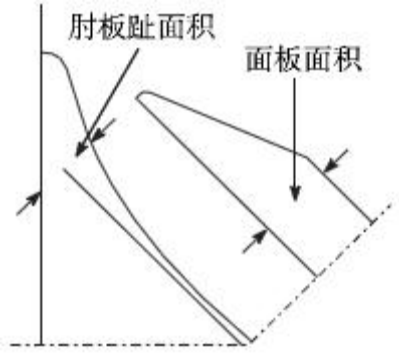


图 4.4.3 临近边缘的肘板面板

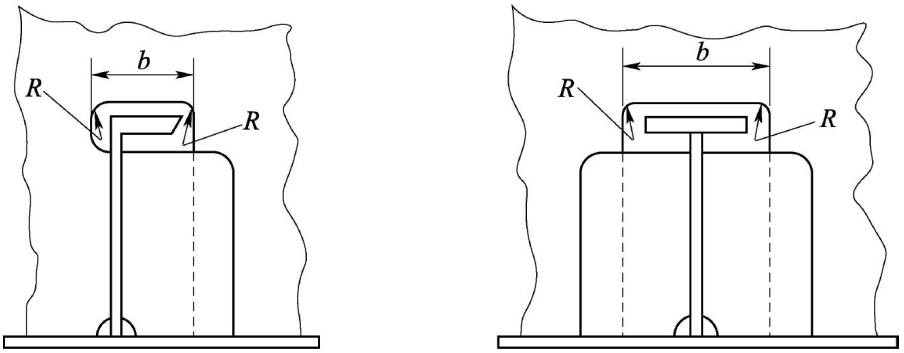
5 骨材与主要支撑构件的相交

5.1 开口

5.1.1 供加强筋穿过主要支撑构件腹板的切口和相关补板的布置，应设计成使开口四周及其附近腹板加强筋上的应力集中减少到最小。

5.1.2 无补板的开口的总高度不得大于主要支撑构件腹板高度的 50%。

5.1.3 在舱壁下的实肋板上或高应力区域的切口应设置全补板，见图 5.1.3。



$R \geqslant 0.2b$，但不小于25mm。

图 5.1.3 全补板

5.1.4 在[5.2]要求的切口和高应力集中区域（如主要支撑构件趾端）应设置补板型领板。典型补板布置见图 5.1.4。

5.1.5 主要支撑构件在结构吃水 T_{sc} 以下与外板骨材的连接处，以及与内底骨材的连接处，当根据[5.2]要求计算的腹板扶强材正应力σ_w超过许用值的 80%时，应在主要支撑构件腹板骨材跟部设置软根。软根应具有钥匙孔，类似图 5.1.5 中(c)所示。

在骨材与水密舱壁和主要支撑构件的相交处，当设置了背肘板或主要支撑构件腹板与骨材面板焊接时，不要求设置软根。

5.1.6 通常，切口应有圆角，且圆角半径 R 应尽可能大些，至少为切口宽度 b 的 20%或 25 mm 之间的大值。圆角半径 R 可不必大于 50mm，见图 5.1.3。其他的形式应基于保持等效强度和最小应力集中的原则来考虑。

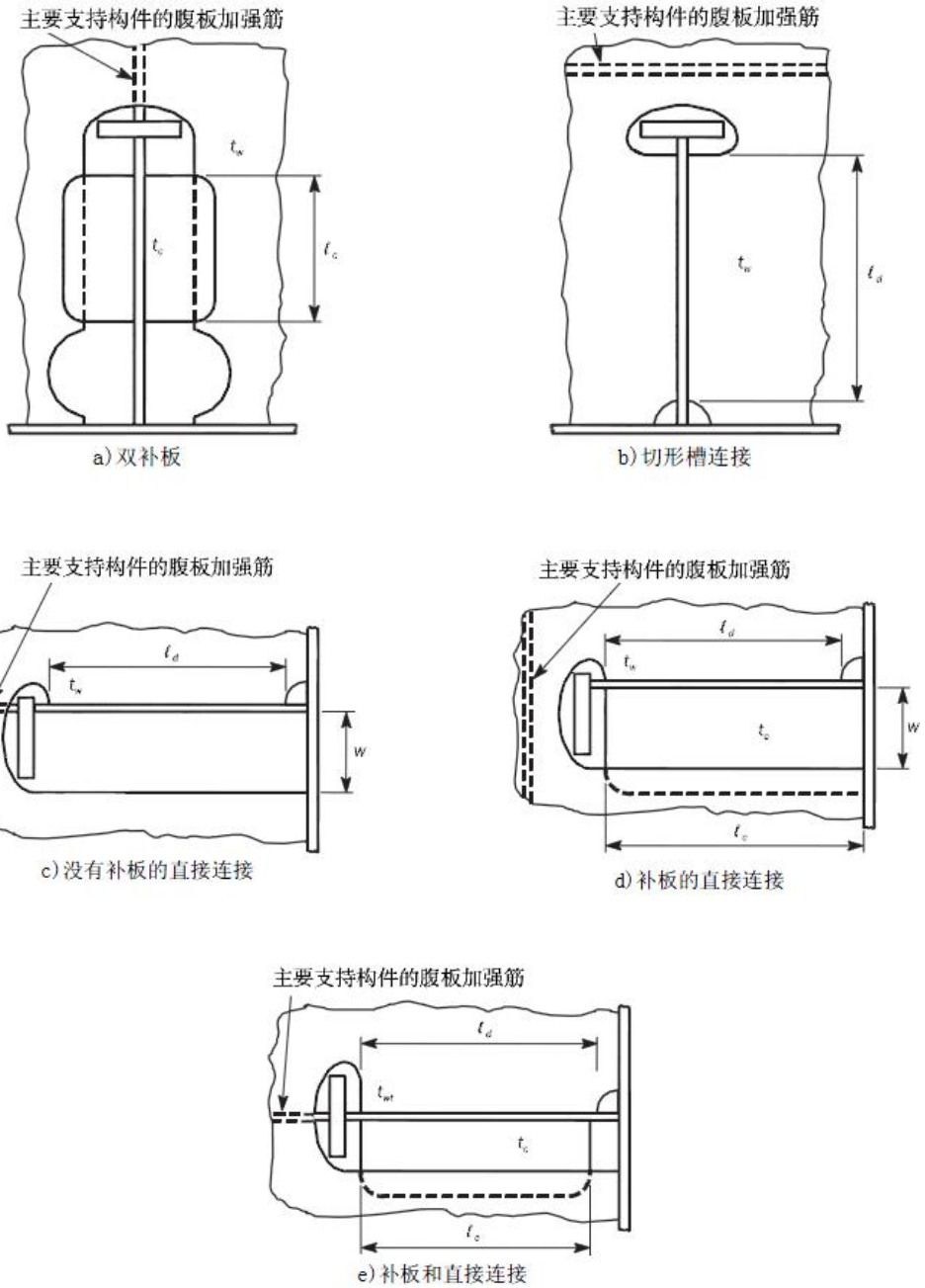
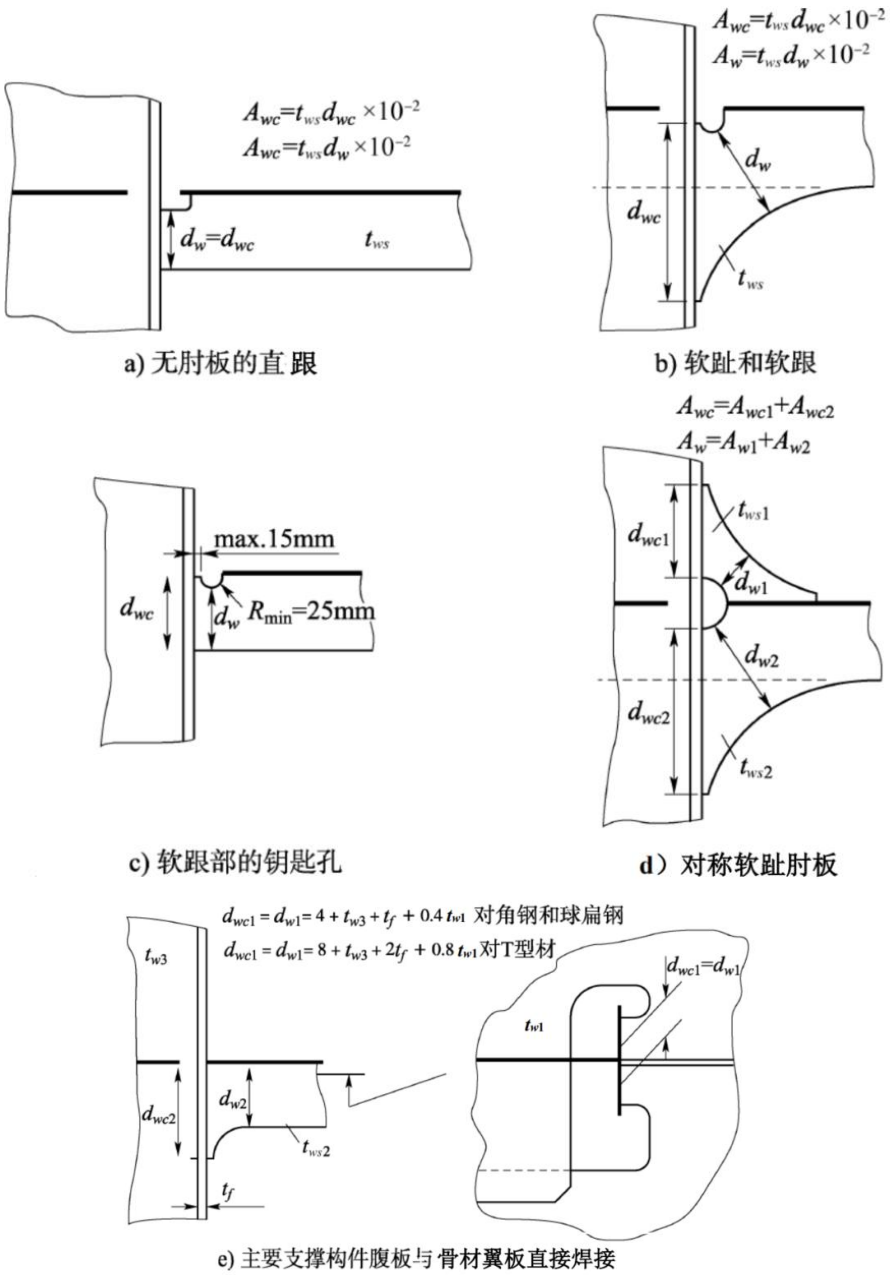


图 5.1.4 对称和非对称切口



t_{ws}，t_{ws1}，t_{ws2}——主要支撑构件腹板加强筋/背肘板净厚度，mm.

d_w，d_{w1}，d_{w2}——主要支撑构件腹板加强筋/背肘板最小高度，mm.

d_{wc}，d_{wc1}，d_{wc2}——主要支撑构件腹板加强筋/背肘板与骨材的连接长度，mm

图 5.1.5 主要支撑构件腹板加强筋细节

5.2 骨材与 PSM 的连接

5.2.1 一般要求

对于承受侧向压力的骨材与 PSM 连接，适用[5.2.2]和[5.2.3]。连接处的横剖面面积取决于每个构件传递的载荷所占的比例及该构件适用的许用应力。

5.2.2 通过剪切连接传递的载荷 W_1，kN 取作：

（1）如果腹板加强筋与相交骨材相连：

$$W_1 = W\left(\alpha_a + \frac{A_1}{4f_cA_w + A_1}\right)$$

（2）如果腹板加强筋未与相交骨材相连：

$$W_1 = W$$

式中：W—— 通过连接传递到 PSM 的总载荷，等于：

$$W = \frac{P_1 s_1 \left(S_1 - \frac{s_1}{2000} \right) + P_2 s_2 \left(S_2 - \frac{s_2}{2000} \right)}{2 \sin \varphi_{w1} \sin \varphi_{w2}} 10^{-3}$$

P_1，P_2—— 所考虑设计载荷组下骨材的设计压力，kN/m^2，作用在所考虑连接的两侧。对于船底砰击或船首冲击载荷，P_1 和 P_2 分别取第 4 章第 5 节[3.2]和[3.3]所定义的设计压力。

S_1，S_2 —— 所考虑连接处与两侧相邻主要支撑构件之间的间距，m。

s_1，s_2 —— 所考虑连接处与两侧相邻骨材之间的间距，mm。

φ_{w1}—— 主要支撑构件和带板之间的角度，°，见第 3 章第 6 节的定义。

φ_{w2}—— 骨材和带板之间的角度，°，见第 3 章第 6 节的定义。

α_a —— 板格形状比，取值不得大于 0.25

$$\alpha_a = \frac{s}{1000S}$$

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

$$s = \frac{s_1 + s_2}{2}$$

A_1—— 连接的有效净剪切面积，cm^2，取为：

$$A_1 = A_{1d} + A_{1c}$$

切型槽口连接面积的情况，A_1 由下式得出：

$$A_1 = 2A_{1d}$$

典型的双补板或领板连接面积的情况，A_1 由下式得出：

$$A_1 = 2A_{1c}$$

A_{1d}—— 不包括补板或领板的净剪切连接面积，cm^2，由下式得出：

$$A_{1d} = l_d t_w \, 10^{-2}$$

l_d—— 骨材和主要支撑构件腹板间的直接连接长度，mm

t_w—— 主要支撑构件腹板净厚度，mm

A_{1c}—— 含补板或领板的净剪切连接面积，cm^2，由下式得出：

$$A_{1c} = f_1 l_c t_c \, 10^{-2}$$

l_c —— 补板或领板与主要支撑构件间的连接长度，mm

t_c—— 补板或领板的净厚度，不得取为大于相邻主要支撑构件腹板净厚度，mm

f_1 —— 剪切刚度系数，取为：

$f_1 = 1.0$，对于对称横剖面的骨材

$f_1 = 140/w$，不得取为大于 1.0，对于非对称横剖面的骨材

w —— 不对称骨材的切口宽度，从骨材腹板的切口边量起，mm，如图 5.1.4 所示

A_w—— 包括背肘板（若设置）在内连接的主要支撑构件腹板骨材横截面有效净面积，cm^2，如图 5.1.5 所示。如果主要支撑构件腹板骨材具有软根或软根和软趾端部，则 A_w 应在连接的喉部处量取，如图 5.1.5 所示。

f_c—— 补板载荷因子，取值如下：

对于对称横截面的相交骨材：

f_c= 1.85　　对于 $A_w \leq 14$

f_c= 1.85 – 0.0441 (A_w - 14)　　对于 14<Aw≤31

f_c= 1.1 – 0.013(A_w– 31)　　对于 31<Aw≤58

f_c=0.75　　对于 A_w>58

对于不对称横截面的相交骨材：

$$f_c = 0.68 + 0.0172\frac{l_s}{A_w}$$

l_s—— 连接长度，等于：

对于通过单面补板或领板连接到主要支撑构件的

$l_s=l_c$

对于通过单边直接连接到主要支撑构件的

$l_s= l_d$

当通过一个补板或领板加上一个直接连接的

$l_s= 0.5(l_c+l_d)$

5.2.3 通过主要支撑构件腹板加强筋传递的载荷 W_2，kN，取作：

（1）如果腹板加强筋与相交骨材相连：

$$W_2 = W\left(1-\alpha_a - \frac{A_1}{4f_cA_w + A_1}\right)$$

（2）如果腹板加强筋未与相交骨材相连：

W_2=0

A_w、A_{wc} 和 A_1 的值应使计算的应力满足下列衡准:

（1）对于不在焊缝处，与主要构件腹板加强筋的连接：$\sigma_{w} \leqslant \sigma_{perm}$

（2）对于焊缝处，与主要构件腹板加强筋的连接：$\sigma_{wc} \leqslant \sigma_{perm}$

（3）对于与主要支撑构件腹板的剪切连接：$\tau_{w} \leqslant \tau_{perm}$

式中：W—— [5.2.2]定义的载荷，kN

f_c —— [5.2.2]定义的补板载荷因子

α_a—— [5.2.2]定义的板格形状比

A_1—— [5.2.2]定义的有效净剪切面积，cm^2

A_w—— [5.2.2]定义的横剖面有效净面积，cm^2

σ_w—— 离开焊缝处的 PSM 腹板加强筋肘板面积最小处的正应力，N/mm^2

$$\sigma_w = \frac{10W_2}{A_w}$$

σ_{wc}—— 焊缝连接处的 PSM 腹板加强筋正应力，N/mm^2

$$\sigma_{wc} = \frac{10W_2}{A_{wc}}$$

τ_w—— PSM 腹板的剪切连接的剪应力，N/mm^2

$$\tau_{wc} = \frac{10W_1}{A_1}$$

A_{wc}—— 图 5.1.5 所示焊缝处的 PSM 腹板加强筋有效净面积，N/mm^2

σ_{perm}—— 表 5.2.3 中 AC-S、AC-SD、AC-I 验收衡准组的许用正应力，N/mm^2

τ_{perm}—— 表 5.2.3 中 AC-S、AC-SD、AC-I 验收衡准组的许用剪应力，N/mm^2

5.2.4 当主要支撑构件腹板加强筋之外，还设有一个背衬肘板时，则该肘板应与腹板加强筋对齐。背肘板臂长不得小于腹板加强筋高度。在计算 Aw 时应计入该肘板喉部的横截面净面积，如图 5.1.5 所示。

5.2.5 在货舱区域，不允许 PSM 腹板加强筋或防倾肘板与骨材搭接。

5.2.6 当组合型材的面板焊接到腹板边缘时，应设置与 PSM 的对称布置连接。通过在 PSM 或舱壁背面设置背肘板就可满足该要求。货舱区域，PSM 腹板加强筋和背肘板应对接焊接到相交骨材的腹板上。

5.2.7 当 PSM 腹板加强筋与相交骨材的腹板平行但未连接时，偏置的 PSM 腹板加强筋应安放在距离切口边缘尽可能近的位置，如图 5.2.7 所示。偏置的腹板加强筋端部应适当削斜并软化。

PSM 腹板加强筋与相交骨材未连接的位置及细节布置应基于[5.2.2]至[5.2.3]的载荷传递能力的相等有效性来特别考虑。

5.2.8 可基于表 5.2.8 给出的焊缝系数，按照第 13 章第 3 节的要求计算角焊缝的尺寸。对于剪切连接处的焊缝，要求的焊缝尺寸不可低于所考虑位置处的 PSM 腹板的焊缝。

骨材和 PSM 的连接的许用应力 **表** 5.2.3

项目		正应力σ_{perm}，N/mm^2			剪应力τ_{perm}，N/mm^2		
		验收衡准组			验收衡准组		
		AC-S	AC-SD	AC-I	AC-S	AC-SD	AC-I
PSM 腹板加强筋		$0.83R_{eH}$(2)	R_{eH}	R_{eH}	-	-	-
PSM 腹板加强筋与相交骨材的焊缝处：	双面连续角焊	$0.58R_{eH}$(2)	$0.7R_{eH}$(2)	R_{eH}	-	-	-
	部分熔透焊缝	$0.83R_{eH}$(1)(2)	R_{eH}(1)	R_{eH}	-	-	-
PSM 骨材与相交骨材的搭接焊缝处		$0.50R_{eH}$	$0.60R_{eH}$	R_{eH}	-	-	-
包括补板或领板的剪切连接：	单面连接	-	-	-	$0.71\tau_{eH}$	$0.85\tau_{eH}$	τ_{eH}
	双面连接	-	-	-	$0.83\tau_{eH}$	τ_{eH}	τ_{eH}
(1)钝边不得大于 PSM 骨材总厚度的三分之一。 (2)当 PSM 腹板加强筋跟部设有软根时，许用应力可增加 5%。							

骨材与 PSM 连接的焊缝系数 **表** 5.2.8

项目	验收衡准	焊缝系数
PSM 腹板加强筋与相交骨材	AC-S、AC-SD、AC-I	$0.6\sigma_{wc}/\sigma_{perm}$ 不得小于 0.38
包括补板或领板在内的剪切连接	AC-S、AC-SD、AC-I	0.38
包括补板或领板在内的剪切连接，且 PSM 腹板加强筋未与相交骨材相连	AC-S、AC-SD、AC-I	$0.6\ \tau_w/\tau_{perm}$ 不得小于 0.44
其中： τ_w——[5.2.3]定义的剪应力，N/mm^2 σ_{wc}——[5.2.3]定义的应力，N/mm^2 τ_{perm}——许用剪切应力，N/mm^2，见表 5.2.3		

σ_{perm}——许用正应力，N/mm^2，见表 5.2.3
W——[5.2.2]定义的载荷，kN
A_1——[5.2.2]定义的有效净剪切面积，cm^2
A_w——[5.2.2]定义的横剖面有效净面积，cm^2

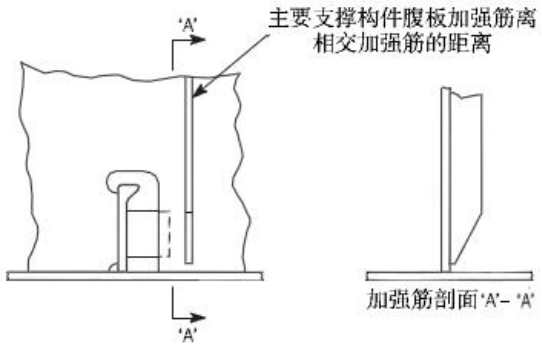


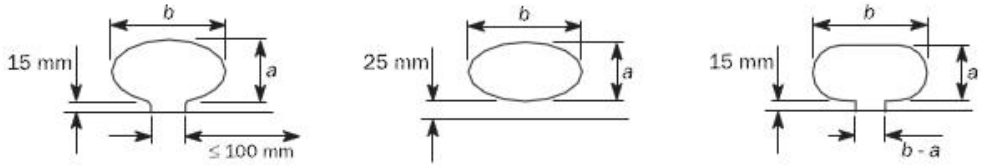
图 5.2.7 偏置的 PSM 腹板加强筋

6 开口

6.1 骨材上的开口和扇形孔

6.1.1 图 6.1.1 展示了通气孔、流水孔和扇形孔的示例。通常，图 6.1.1 中所定义的 a/b 的比值应在 0.5 至 1.0 之间。在疲劳敏感区域，可能进一步对开孔和扇形孔的细节和布置做要求。

6.1.2 开孔和扇形孔应与端肘板趾端、端部连接和其他高应力集中区域，在沿骨材长度朝跨中方向保持至少 200mm 的距离，并沿相反方向保持 50mm 的距离，见图 6.1.2。在剪应力小于许用值的 60%的区域，可以采用替换的布置。



注：本图所示的细节仅是指导和示例。

图 6.1.1 通气孔、流水孔和扇形孔示例

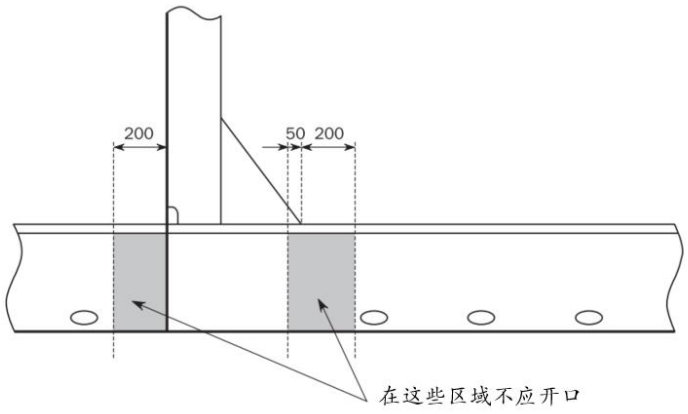


图 6.1.2 通气孔和流水孔位置

6.1.3 参与总纵强度的骨材不允许有间距紧密的扇形孔或流水孔，比如间距小于如图 6.1.1 所示宽度 *b* 的两倍。对于其他骨材，在离骨材端部 20% 跨距的区域不允许有间距紧密的扇形孔或流水孔。允许有间距大的通气孔或流水孔，若这些孔是椭圆形或等效形状以最大限度减少应力集中，且应在焊接处刮净。

6.2 主要支撑构件上的开口

6.2.1 一般要求

人孔、减轻孔和其他类似开口应避免开在载荷集中处和高剪力区域。人孔和类似开口特别要避免开在高应力区域，除非板材应力和板格屈曲特性经计算可认为满足要求。高应力区域的例子包括：

(1) 狭窄隔离舱/双板舱壁内，距离两端六分之一长度范围内的垂直或水平隔板；

(2) 肋板或双层底桁材靠近其跨距端部处；

(3) 端肘板趾端处的主要支撑构件腹板；

(4) 支柱的顶部以上及跟部以下。

在设置开口处，开口的形状应使应力集中保持在验收衡准范围内。开口应良好倒圆且边缘光滑。

6.2.2 人孔和减轻孔

通常，以下所列腹板开口不要求加强：

（1）单壳剖面中，高度不超过腹板高度的 25%，且开口边缘距离面板的距离不小于腹板高度的 40%。

（2）双壳剖面中，高度不超过腹板高度的 50%，且边缘远离骨材穿过的切口。

开口的长度不大于：

（1）主要支撑构件跨中处：相邻开口之间的距离

（2）跨距端部：相邻开口之间距离的 25%

对于单壳剖面的开口，开口长度不得大于腹板高度或骨材间距的 60%之间的大值。

开口边缘到各骨材切口应为等间距。

当肘板上开减轻孔时，开孔圆周至肘板自由翼板边的距离不得小于减轻孔的直径。

不符合本要求的开口应按照[6.2.3]的要求进行加强。

6.2.3 开口周围加强

人孔和减轻孔应按照本要求进行加强，除非说明其替代布置能够满足第 7 章所述的分析方法的要求。

在总纵强度构件上，应平行于开口的垂直和水平轴沿开口的自由边设置骨材。当短轴的长度小于 400mm 时，该方向可不设骨材。当双向轴都小于 300mm 时，两个方向都可以不设骨材。边缘加强可以替代骨材，见图 6.2.3。

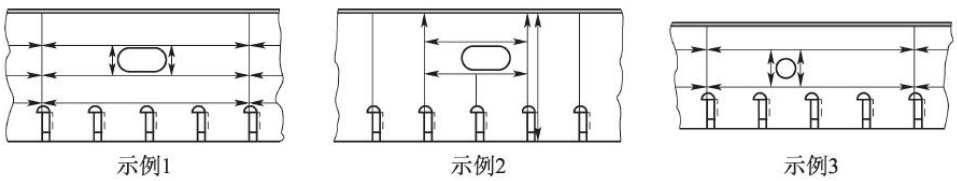


图 6.2.3 带开口的腹板

对于 PSM 腹板上的大开口（如双层底内设置的管隧），开口的加强应考虑 PSM 上的次要应力。

当不进行有限元分析时，可根据下列公式为 PSM 分配等效的横剖面净剪切面积来实现：

$$A_{s-n50}=\frac{A_{1-n50}}{1+\dfrac{32l_{shr}^2A_{1-n50}}{I_{1-n50}}}+\frac{A_{2-n50}}{1+\dfrac{32l_{shr}^2A_{2-n50}}{I_{2-n50}}}$$

式中：

$I_{1\text{-}n50}$，$I_{2\text{-}n50}$ —— 分别为高腹板（1）和（2）连带板的平行于板的中和轴的净剖面惯性矩，cm^4；

$A_{1\text{-}n50}$，$A_{2\text{-}n50}$—— 分别为高腹板（1）和（2）的净剪切面积，腹板高度应计入普通骨材穿过处的开口高度的减少，cm^2；

l_{shr}—— 高腹板（1）和（2）的跨距，m，见第 3 章第 7 节[1.1.2]的定义；

高腹板（1）和（2）的定义见图 6.2.3（2）。

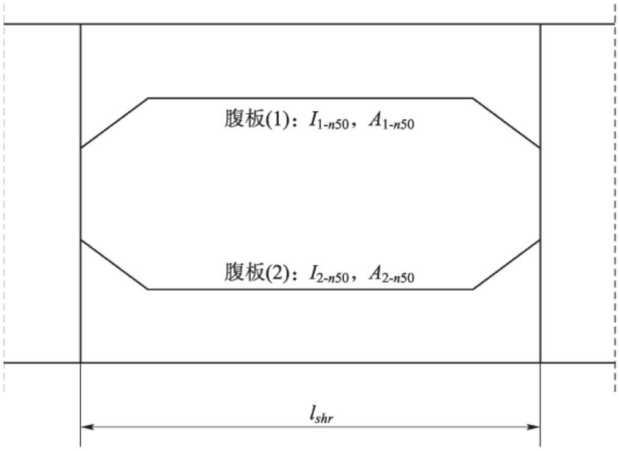


图 6.2.3（2） 主要支撑构件腹板大开口

6.3 强力甲板开口

6.3.1 通则

强力甲板上的开口应尽可能少，且应尽可能相互远离并远离上层建筑的端部。开口应尽量远离舷侧板、舱口角隅或舱口围板侧板等高应力区域。

6.3.2 小开口位置

开口一般应位于如图 6.3.2(1)所示的阴影区域限制以外。阴影区域的定义为：

- 圆形舷顶列板的弯曲部分（如设有），或舷侧外板。
- 距开口边缘 $e = 0.25\ (B - b)$。
- $c = 0.07l + 0.1b$ 或 $0.25b$，取较大者。

式中：b——所考虑的舱口的宽度，m，按横向量取，见图 6.3.2(1)；

l——两连续舱口之间所考虑角隅处的横向甲板条的宽度，m，按纵向量取，见图 6.3.2(1)。

图 6.3.2(1)所示的上述限制与开口之间的横向距离，应不小于：

- $g_2 = 2a_2$ 对于圆形开口
- $g_1 = a_1$ 对于椭圆形开口

如图 6.3.2(2)所示开口之间的横向距离应不小于：

- $2\ (a_1 + a_2)$ 对于圆形开口
- $1.5\ (a_1 + a_2)$ 对于椭圆形开口

式中：a_1——椭圆形开口的横向尺寸，或圆形开口的直径；

a_2——椭圆形开口的横向尺寸，或圆形开口的直径；

a_3——椭圆形开口的纵向尺寸，或圆形开口的直径。

开口之间的纵向距离应不小于：

- (a_1+a_3)　　对于圆形开口
- $0.75\,(a_1+a_3)$　　对于椭圆形开口和与圆形开口在同一平面上的椭圆形开口

如开口布置不符合这些要求，进行船体梁总纵强度评估时，应减去这些开口的面积，见第 5 章第 1 节 [1.2.11] 。

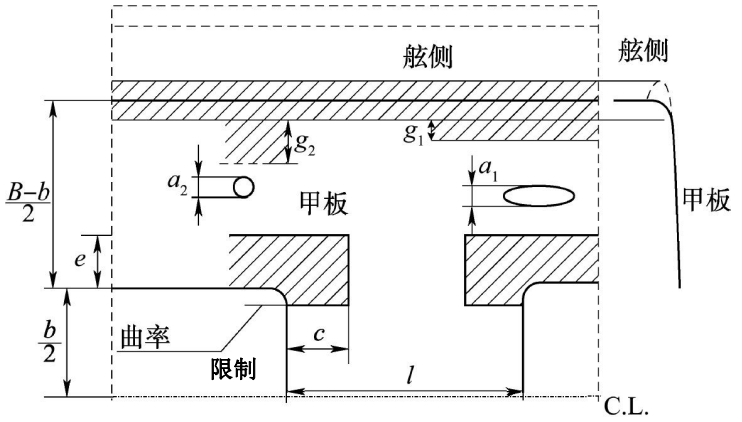


图 6.3.2(1)　强力甲板开口的位置

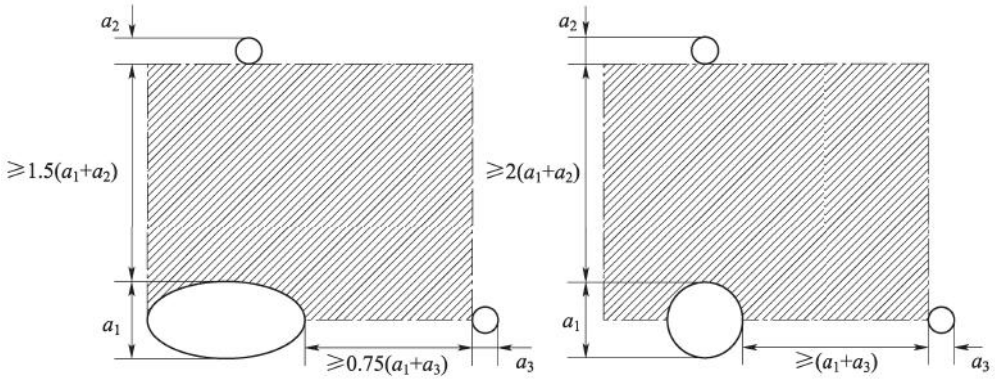


图 6.3.2(2)　强力甲板上的椭圆形和圆形开口

7 双层底结构

7.1 一般要求

7.1.1 除本条要求外，双层底结构还应满足第 2 章第 3 节[2]的要求。

7.1.2 双层底高度的任意变化均应为逐渐地并足够长的过渡；内底板的折角应位于实肋板处。如该布置无法实现，则应布置如局部纵桁、纵向肘板等适当的纵向结构越过折角。

7.1.3 应在测深管下提供足够厚度的防撞垫板或其它等效布置，以防止测深锤损坏底部板。

7.1.4 如设置箱形龙骨，则中桁材可用两根间距不大于 3m 的桁材来代替。否则，对于间距大于 3m 的情况，这两根桁材应设置相邻结构支撑。肋板处的结构应确保肋板具有足够的连续性。

7.1.5 在船舶全长范围内，龙骨板应延伸到平底以外。龙骨板的宽度，m，不得小于0.8+*L*/200，但不必取大于 2.3m。

7.1.6 若船底设置中桁材，则其应在货舱区域延伸，并向船首和船尾尽可能延伸。中纵桁应在船舶全长范围内保持连续。如双层底舱室用来装载燃油、淡水或压载水，中桁材应为水密。但类似端部的狭窄液舱或在中心线 0.25*B* 范围内设置了其它水密桁材的情况除外。

7.1.7 船底旁桁材应在货舱区域的平行中体范围内延伸，并向货舱区的首尾端尽可能延伸。

7.1.8 在纵向普通骨材处的船底实肋板上应设置腹板加强筋。当腹板加强筋未焊接至纵骨时，除非对切口和纵骨的连接处作疲劳强度评估，否则应使用第 10 章第 6 节[2]给出的设计标准。

7.2 舭龙骨

7.2.1 材料

舭龙骨和垫板的材料应与其所连接的材料具有相同的屈服应力。当舭龙骨延伸长度超过 0.15*L* 时，舭龙骨和垫板应与其所连接构件具有相同的材料级别。

7.2.2 设计

当采用单腹板舭龙骨设计时，舭龙骨腹板的厚度应不超过垫板厚度，以避免垫板的失效出现在腹板之前。

与图 7.2.2 所示的设计不同时，舭龙骨不能与船体外板直接焊接，应设置垫板或覆板。垫板或覆板可直接焊接在船体上，且保持连续。舭龙骨上的对接焊缝、垫板或覆板上的对接焊缝、外板上的对接焊缝应相互错开。

7.2.3 垫板

舭龙骨不可直接焊接在外壳板上。应设置如图 7.2.2 和 7.2.3 所示的垫板或覆板。通常，垫板应连续。垫板的总厚度应不小于舭部板的总厚度或 14mm 之间的小值。

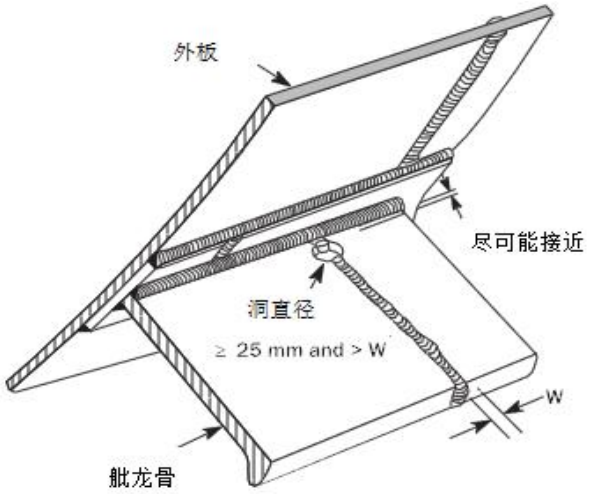


图 7.2.2 舭龙骨构造

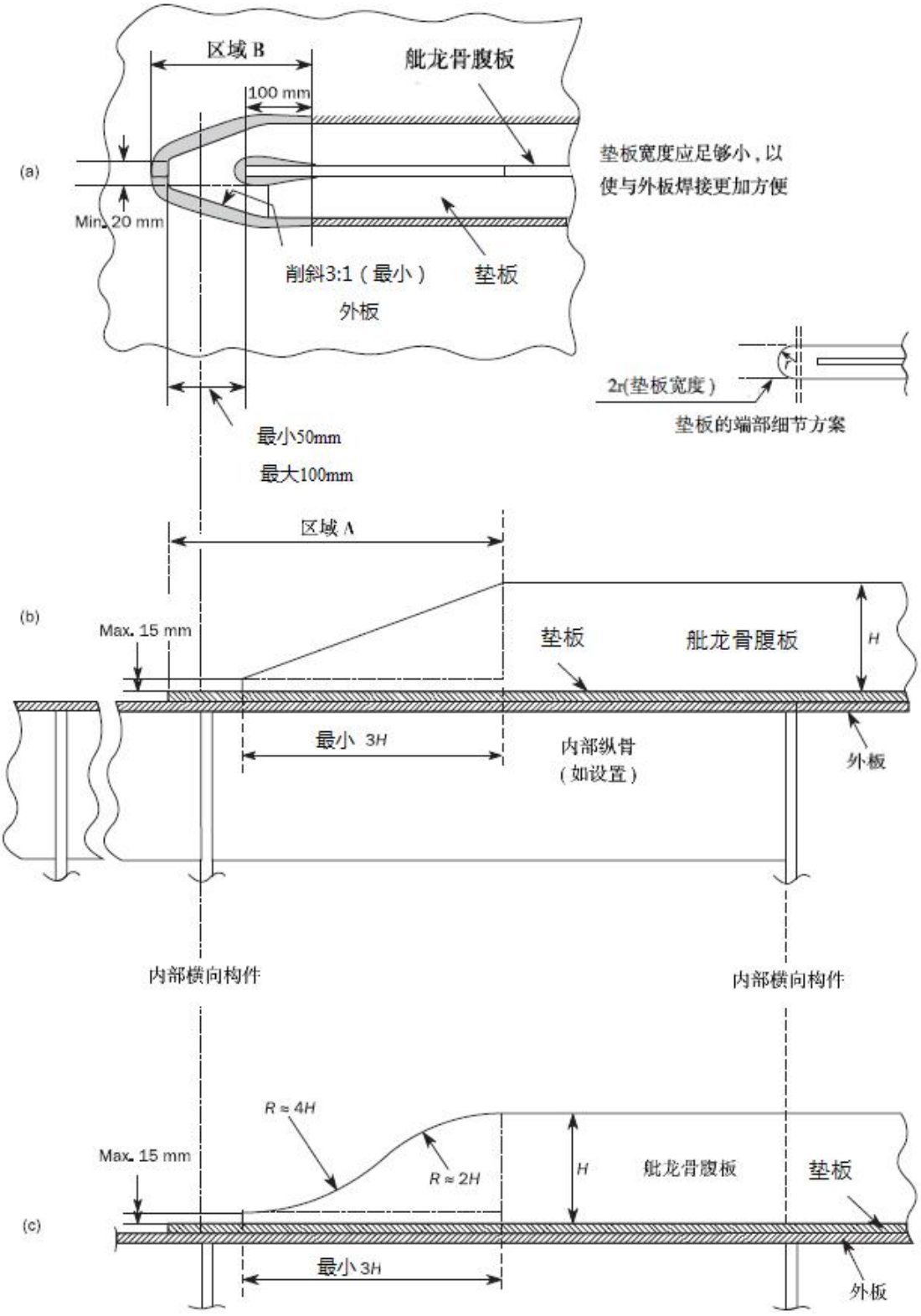


图 7.2.3 舭龙骨端部设计

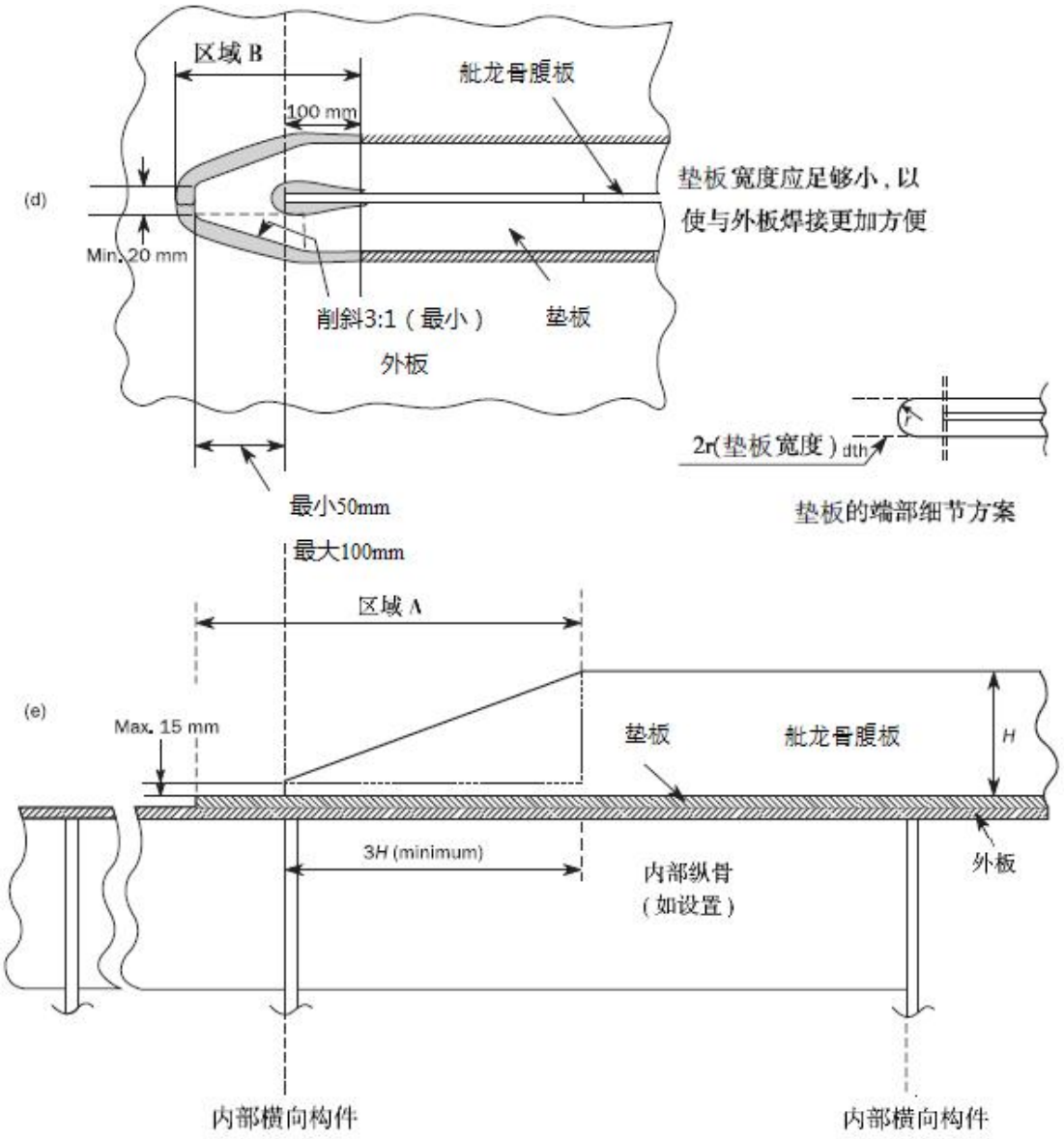


图 7.2.3 舭龙骨端部设计（接上）

7.2.4 端部细节

垫板和舭龙骨的端部应当削斜或打磨。如端部削斜，则斜度应渐进，最小比例为 3:1，如图 7.2.2 和图 7.2.3 所示。端部打磨应如图 7.2.3 (c)中所示。“A”区（见图 7.2.3 (b)和(e)）以内的舭龙骨腹板不允许开切口。

舭龙骨腹板端部距离垫板端部应不小于 50mm，但不大于 100mm。见图 7.2.3 (a)和(d)。

舭龙骨和垫板端部在船体内应设置横向或纵向构件进行支撑，如下所示：

（1）横向支撑构件应在舭龙骨腹板端部与垫板端部之间的长度中点处设置，见图 7.2.3 (a)、(b)和(c)。

（2）纵向骨材应与舭龙骨腹板安装在一条线上，且至少应延伸到“A”区域的前端和后端的横向构件处，见图 7.2.3(b)和(e)。

若替代端部布置是等效的，则可接受。

7.3 进坞

7.3.1 船底的结构应能够承受进干船坞时所受的作用力。

7.3.2 连接中纵桁与船底板的坞墩肘板应连接至相邻的船底骨材。

8 边舱结构

8.1 一般要求

8.1.1 舷侧与纵舱壁通常应为纵骨架式。

8.1.2 边舱布置还应满足第 2 章第 3 节[3]的要求。

8.2 结构布置

8.2.1 边舱内强框架由强横梁、强肋骨、实肋板、纵舱壁垂直桁材和横撑材组成。

8.2.2 舷侧和纵舱壁上的纵骨应在货舱区域的平行中体长度范围内连续。纵骨应在与货舱横舱壁位于同一平面的横舱壁处设置软趾肘板，且应与边舱内的强框架有效连接。舷侧纵骨架应延伸至货舱以外尽可能远。

8.3 舷顶列板

8.3.1 沿垂向量取的舷顶列板宽度应不小于 0.8+L/200m，但不必大于 1.8m。舷顶列板可直接与甲板边板焊接或为圆弧形。

8.3.2 如舷顶列板为弧圆形，则其半径，mm，应不小于 17t_s。t_s为舷顶列板的净厚度，mm。圆弧形舷顶列板的纵向焊缝的位置应在弯曲区域以外，距离不得小于舷顶列板最大净厚度的 5 倍。船中 0.6L 范围内应避免甲板舾装件焊接到圆弧形舷顶列板。从圆弧形舷顶列板到与上层建筑布置相关的角形舷顶列板，应设计过渡以避免任何不连续性。

8.3.3 焊接的舷顶列板的上缘应圆滑且无槽口。舷墙、眼板等附件不得直接焊接在舷顶列板的上缘，但首部和尾部除外。可允许纵向过渡光滑的排水孔。

8.4 单底结构

8.4.1 当边舱采用单底结构时，须注意中舱的双层底内底板向单底边舱的良好过渡，内底板应向边舱内延伸足够宽度，且与舱壁或强框架间应设置连接肘板。

8.4.2 当边舱采用单底结构时，若仅在强框架间中舱底部设中间肋板时，应注意肋板向边舱的良好过渡，在边舱的对应位置设垂向肘板。该肘板在横向一般应向舷侧延伸足够宽度，在垂向应伸出内底板在边舱的延伸部分以上足够高度。

8.5 纵舱壁

8.5.1 纵舱壁应是平面舱壁，纵舱壁的底部应设置连续底纵桁。

8.5.2 纵舱壁折角处板厚应适当增加，纵舱壁折角处可设置水平桁材予以加强，以提高纵舱壁的横向抗压能力，水平桁材的尺寸由直接计算确定。

8.5.3 在纵舱壁的任何垂直折角处，均应设有主要构件。折角与主要构件间的距离应不大于 70 mm。如折角不是垂直的，则应用与折角在同一直线上的普通扶强材适当加强，或采取其他等效的措施。

8.6 横舱壁和制荡舱壁

8.6.1 边舱横舱壁一般为平面横舱壁结构，且应符合[10.2]的适用要求。

8.6.2 必要时在边舱内设置开孔式平面制荡舱壁，且应符合[10.5]的适用要求。

9 甲板及舱口围结构

9.1 结构布置

9.1.1 参与总纵强度的甲板区域应为纵骨架式。

9.1.2 平行于甲板量取的甲板边板的宽度应不小于 0.8+*L*/200m，但不必大于 1.8m。如采用圆弧形甲板边板，则应满足[8.3]的要求。

9.1.3 甲板室和上层建筑与强力甲板的连接设计应使载荷能够传递到甲板下的支撑结构上。

9.2 甲板及舱口

9.2.1 甲板骨材的腹板高度不得小于 60mm。PSM 的腹板高度应分别不小于其在液舱内无支撑弯曲跨距的 10%和在干舱内无支撑弯曲跨距的 7%。若腹板上的切口未封闭，PSM 腹板高度不小于切口高度的 2.5 倍。无支撑的弯曲跨距是指第 3 章第 6 节定义的弯曲跨距或板架结构中与其他 PSM 连接处之间的距离。

9.2.2 舱口角隅

（1）货舱区域内

对位于货舱区域内的货舱舱口，应在开口呈圆形的角隅处设置按以下所给的公式所确定厚度的嵌接板。在舱口围板下设有连续甲板纵桁时，圆形角隅的半径应不小于舱口宽度的 5%。

对位于货舱区域内的舱口，若开口呈椭圆形或抛物线形，且椭圆形开孔的半轴或抛物线拱的一半长度不小于如下要求时，则一般不要求设置嵌接板。

- 横向：舱口宽度的 1/20 或 600mm，取较小值
- 船长方向：横向尺寸的两倍

如需嵌接板，其净厚度，mm，从下列式中得到：

$$t_{INS} = \left(0.8 + 0.4\frac{b}{l}\right)t_{off}$$

取不小于 t_{off} 且不大于 1.6 t_{off}。

式中：l——两连续舱口间横向甲板条在所考虑的角隅处的宽度，m，沿纵向量取，图 6.3.2(1)；

b——所考虑的舱口宽度，m，沿横向量取，图 6.3.2(1)；

t_{off}——舱口边甲板的净提供厚度，mm。

对端部舱口的末端角隅，需要嵌接板。嵌接板的净厚度应大于相邻甲板净提供厚度的 60%。当计算表明舱口角隅处的应力小于许用值时，可接受较小的厚度。

如需设置嵌接板，其布置如第 10 章第 6 节表 6.1.1 所示，其中 d_1，d_2，d_3 和 d_4 应大于骨材间距。角隅半径、嵌入板的厚度及范围可以通过第 7 章、第 8 章（适用时）的直接计算强度评估，以及第 9 章和第 10 章的屈曲校核以及舱口角隅疲劳强度评估的结果来确定。推荐布置圆形舱口角隅。

（2）货舱区域外

对位于货舱区域之外的舱口，可基于具体情况，考虑将角隅处嵌接板的厚度减薄。

9.2.3 防钢丝绳划槽保护

为防止货舱开口处的钢丝绳划槽，应在舱口纵桁（即顶边舱板上部）和货舱内的舱口端横梁上以及舱口围板上部设置防护装置，如半圆钢。

9.2.4 货舱舱口角隅机械损伤防护

应采取特定措施防止货舱舱口角隅与正常操作的抓斗垂向钢索直接接触而导致机械损伤。

10 横舱壁

10.1 一般要求

10.1.1 本条的要求适用于平面或槽形横向舱壁。

10.1.2 舱壁在甲板纵桁处应加强。

10.1.3 支撑纵桁或支柱的舱壁和代替纵桁的纵舱壁应加强，以确保其与在该位置设置立柱或支柱时有效性不降低。

10.1.4 当管系穿过舱壁时，连接处的结构布置应足够承受因管道中液体压力对舱壁施加的载荷。

10.2 平面横舱壁

10.2.1 平面舱壁可以进行水平或垂直加强。水平骨架式的舱壁以垂直主要支撑构件支撑的水平扶强材构成。垂直骨架式的舱壁以垂直普通扶强材构成，如有必要可以水平桁材支撑。

边舱水密舱壁扶强材的腹板应与纵舱壁板纵骨的腹板对齐。

10.2.2 骨材穿过水密舱壁的相交处应为水密。骨材的端部应以肘板连接。对于船体中的独立区域，如因船体型线等原因不能用肘板进行端部连接时，可接受包括削斜端部的其他布置。

10.2.3 当承受静水压力的横舱壁满足[3.4]的要求时，可使用削斜端部。

10.3 槽形舱壁

10.3.1 一般规定

横向垂直槽形舱壁应设置底凳，且通常在甲板下还设置顶凳。

10.3.2 构造

槽形舱壁的主尺度 $b_{f\text{-}cg}$，R，$b_{w\text{-}cg}$，d_{cg}，t_f，t_w 和 s_{cg} 见图 10.3.2 的定义。

槽形角不得小于 55°。如弯曲区域的焊缝平行于弯曲轴线方向，其焊接工艺应提交 CCS 认可。

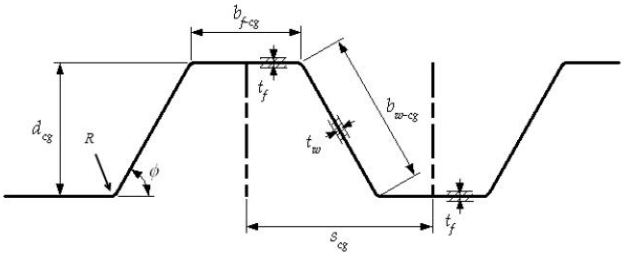


图 10.3.2　槽形舱壁尺度

10.3.3 槽形舱壁深度

槽条深度 d_{cg}，mm，应不小于

$$d_{cg} = \frac{1000 l_c}{C}$$

式中：l_c ——所考虑槽条的平均跨距，m，见[10.3.5]定义；

C——系数，取为：

C =15 对于液舱和压载货舱舱壁

C =18 对于干货舱舱壁

10.3.4　槽条的实际剖面模数

槽条净剖面模数，cm^3，可按下式获得：

$$Z=\left[\frac{d_{cg}\left(3b_{f-cg}t_f+b_{w-cg}t_w\right)}{6}\right]10^{-3}$$

式中：

t_f，t_w——槽条板的净厚度，mm，如图 10.3.2 所示；

d_{cg}，$b_{f\text{-}cg}$，$b_{w\text{-}cg}$——槽条尺寸，mm，如图 10.3.2 所示。

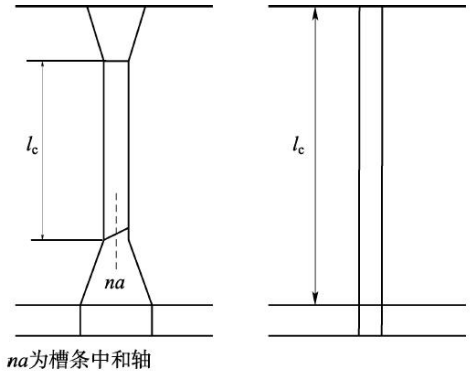
当不能确保舱壁端部处的腹板的连续性时，槽条的净剖面模数，cm^3，应按下式计算：

$$Z=0.5b_{f\text{-}cg}t_f d_{cg}10^{-3}$$

10.3.5 槽条跨距

槽条的跨距 l_c 应取为图 10.3.5 所示的距离。为定义 l_c，顶凳的底部应取在中纵剖面处至甲板的距离不大于：

- 3 倍槽深，对于非矩形凳；
- 2 倍槽深，对于矩形凳。



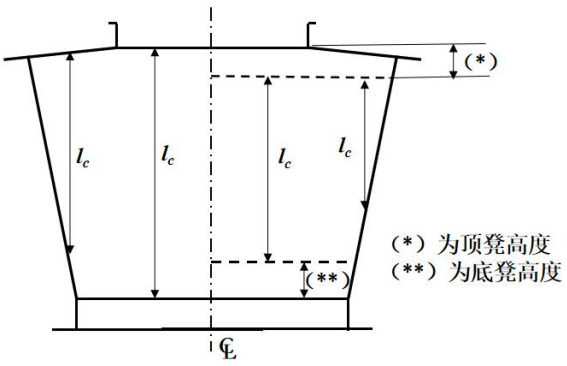


图 10.3.5　槽条跨距

10.3.6 结构布置

当槽形舱壁在主要支撑构件处切断时，主要支撑构件一侧的槽条应与另一侧的对齐。

10.3.7 舱壁端部支撑

在槽条端部，应确保槽形舱壁的强度连续性。当槽形舱壁设有底凳时，应在对齐底凳的两侧板处都设置肋板。

当槽形舱壁未设置底凳时，应对齐槽形横舱壁的每侧翼板设置肋板。支撑的肋板或纵桁应通过适当设计的剪力板来相互连接。

若未设置顶凳，应在甲板上设置与槽形舱壁翼板对齐的横向或纵向骨材。

若连接到相邻边界结构（即纵舱壁、围壁通道等）的槽形翼板小于典型槽形翼板宽度的 50%，连接部位需要进行高级分析。

10.3.8 舱壁凳

凳侧板应与槽形翼板对齐。

10.3.9 底凳

若设置底凳，则其高度通常应不小于 3 倍槽深。

若底凳侧板普通扶强材垂向布置，其端部应用肘板与底凳的上下端相连。在凳内的底凳侧板垂直扶强材及其肘板应与纵骨或类似的内底结构对齐。底凳侧板在内底到底凳顶板之间任何位置都不可有折角。

底凳顶板的边缘到槽形翼板表面的距离 d 应按照图 10.3.9 中所示。

底凳侧板下部应视情况与双层底肋板或纵桁安装在同一条直线上，且底凳底部的宽度不小于 2.5 倍槽深。

底凳内应设隔板。隔板与双层底纵桁或肋板安装在同一条直线上。在与底凳顶板连接处，肘板和隔板上应避免扇形孔。

底凳侧板应通过全焊透或部分焊透与底凳顶板及内底相连。支撑肋板应通过全焊透或部分焊透与内底连接。

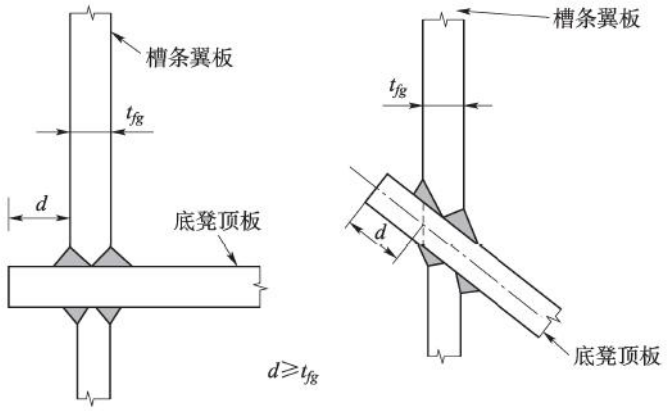


图 10.3.9 底凳顶板边缘到槽形翼板表面的允许间距 d

10.3.10 顶凳

如设顶凳，其高度应不小于 2 倍槽深。

矩形顶凳的高度在舱口边纵桁处或内壳处（如适用）由甲板水平向下量取，一般应是 2 倍槽深。应设置肘板或高腹板将顶凳与甲板强横梁或舱口端横梁连接。

横舱壁顶凳应由相邻舱口端横梁之间的甲板纵桁或高腹板肘板适当支撑。顶凳底板宽度通常应与底凳顶板相同。非矩形顶凳的顶部的宽度应不小于 2 倍槽深。若顶凳侧板普通扶强材垂向布置，其端部应用肘板与顶凳上下端相连。

顶凳内应设置隔板。隔板应与延伸到舱口围板桁材或甲板横向主要支撑构件的甲板纵桁安装在同一条直线上且有效连接。在与顶凳底板连接处，肘板和隔板上应避免扇形孔。

10.4 非密性舱壁

10.4.1 一般规定

通常，制荡舱壁上的开口应具有较大半径，并且开口面积总和不小于舱壁面积的 10%。非密性舱壁的面积是一个平面上到舱室边界的整个横剖面面积。

10.4.2 不用作支柱的非密性舱壁

通常，不用作支柱的非密性舱壁上的骨材最大间距应为：

- 0.9m，对于横舱壁；
- 2 个肋距，最大 1.5m，对于纵舱壁。

舱壁骨材的净厚度，mm，不小于：

$$t = 3 + 0.015L_2$$

扁钢型舱壁骨材的高度通常不得小于骨材长度的 1/12。

若计算结果满足第 6 章第 5 节和第 9 章的要求，则可接受较小的骨材高度。

10.4.3 用作支柱的非密性舱壁

用作支柱的非密性舱壁应设置舱壁骨材，骨材的最大间距等于：

- 2 个肋距，当肋距不超过 0.75 m 时；
- 1 个肋距，当肋距大于 0.75 m 时。

当非密性舱壁为槽形时，槽形深度不得小于 100mm。

每根垂直骨材，连同宽度等于带板净厚度的 35 倍或 1/12 的骨材长度或骨材间距之间的较小者的带板，应符合第 6 章中关于所支撑载荷的适用要求。

10.5 围壁通道和隧道的水密舱壁

10.5.1 水密围壁通道、隧道、箱形龙骨及通风管道,均应与相应高度的水密舱壁具有同等强度。其水密性及其开口的关闭装置应满足 CCS《钢质海船入级规范》第 1 篇第 4 章第 3 节要求。

11 支柱

11.1 一般要求

11.1.1 支柱应尽可能地安装在同一垂线上。如不可能，应采取有效的措施将载荷传递到其下面的支撑上。所有支柱的顶部与根部均应设置有效布置以使载荷分散。当支柱支撑偏心载荷时，支柱应对额外施加的弯矩进行加强。

11.1.2 支柱应与双层底桁材成一直线或尽实际可能与其靠近，支柱上面和下面的结构应有足够强度来有效分担载荷。若与内底相连的支柱不是位于肋板和桁材的相交处，应尽量布置支撑支柱的局部肋板或桁材或等效结构。

11.1.3 设在液舱内的支柱应为实心或开口式剖面。当静压力可能在支柱内产生拉应力时，支柱内及其端部连接处的拉应力不得超过材料最小屈服强度的 45%。

11.2 连接

11.2.1 必要时，支柱的顶端和底端应用厚垫板和肘板加以固定。若垫板替代布置是等效的，并得到 CCS 的认可，则可以接受替代布置。如支柱很可能承受拉伸载荷，则支柱的顶端和底端应予有效地固定，以使其能承受拉伸载荷，并用嵌入板代替垫板。

若设置垫板，则垫板的净厚度应不小于支柱的净厚度的 1.5 倍。支柱的顶端和底端的连接应使用连续焊。

第 6 节　结构理想化

符号

对于本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

φ_w —— 骨材或主要支撑构件的腹板与带板的夹角，°，见图 14。若该夹角大于或等于 75°，则φ_w应取为 90°

l_{bdg}—— 有效弯曲跨距，m，对于骨材定义见[1.1.2]，对于主要支撑构件定义见[1.1.6]

l_{shr}—— 有效剪切跨距，m，对于骨材定义见[1.1.3]，对于主要支撑构件定义见[1.1.7]

l—— 骨材或主要支撑构件的端部支撑之间的完整跨距，m

s—— 骨材间距，mm，定义见[1.2]

S —— 主要支撑构件间距，m，定义见[1.2]

a—— EPP 的长度，mm，定义见[2.1.1]

b—— EPP 的宽度，mm，定义见[2.1.1]

h_{stf}—— 骨材高度，包括面板，mm

t_p —— 带板的净厚度，mm

t_w —— 腹板净厚度，mm

b_f —— 翼板宽度，mm，见第 3 章第 2 节图 1.3.2

t_f —— 翼板净厚度，mm

PSM—— 主要支撑构件

EPP—— 单元板格

LCP—— 载荷计算点

1 骨材和主要支撑构件的结构理想化

1.1 有效跨距

1.1.1 一般要求

对于结构布置不同于本节所定义的情况，其跨距定义应特殊考虑。

1.1.2 骨材的有效弯曲跨距

骨材的有效弯曲跨距 l_{bdg} 应按照图 1.1.2(1)单壳结构和图 1.1.2(2)双壳结构所示量取。

若腹板加强筋的端部削斜或未连接到所考虑的骨材上，除非设置背肘板，否则有效弯曲跨距取两个 PSM 之间的全长，见图 1.1.2(1)。

当骨材翼板或自由边上设置肘板时，有效弯曲跨距可以折减。若肘板设置在相对于带板与骨材相反一侧，则在折减有效弯曲跨距时不考虑肘板的效果。

单壳结构中，仅在主要支撑构件腹板的一侧由肘板或腹板加强筋支撑的骨材的有效弯曲跨距，应取为主要支撑构件之间的总跨距，如图 1.1.2(1)(a)所示。如果主要支撑构件两侧均设有肘板，有效弯曲跨距应取图 1.1.2(1)(b)、(c)和(d)。

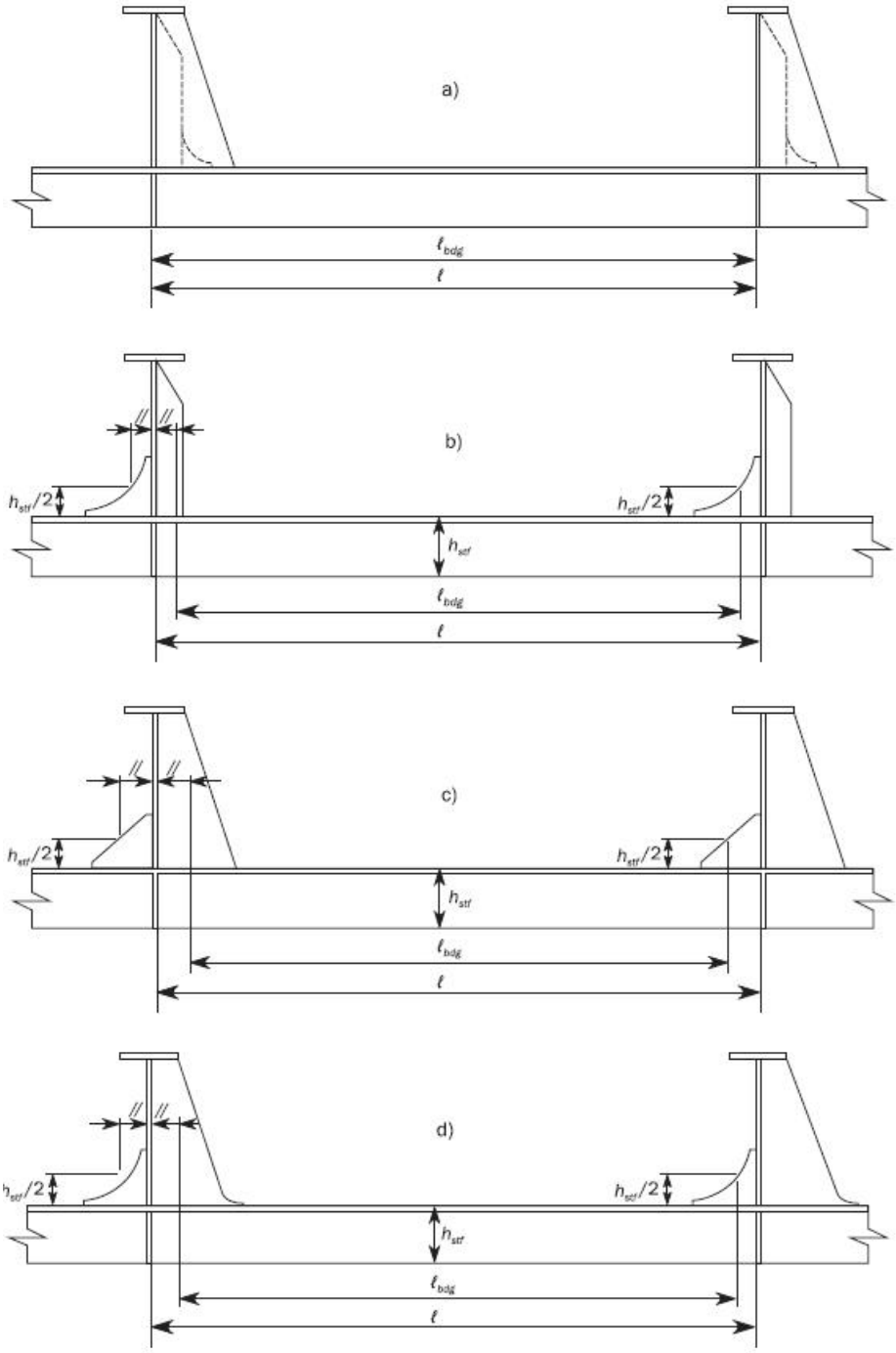


图 1.1.2（1） 腹板加强筋支撑的骨材有效弯曲跨距（单壳结构）

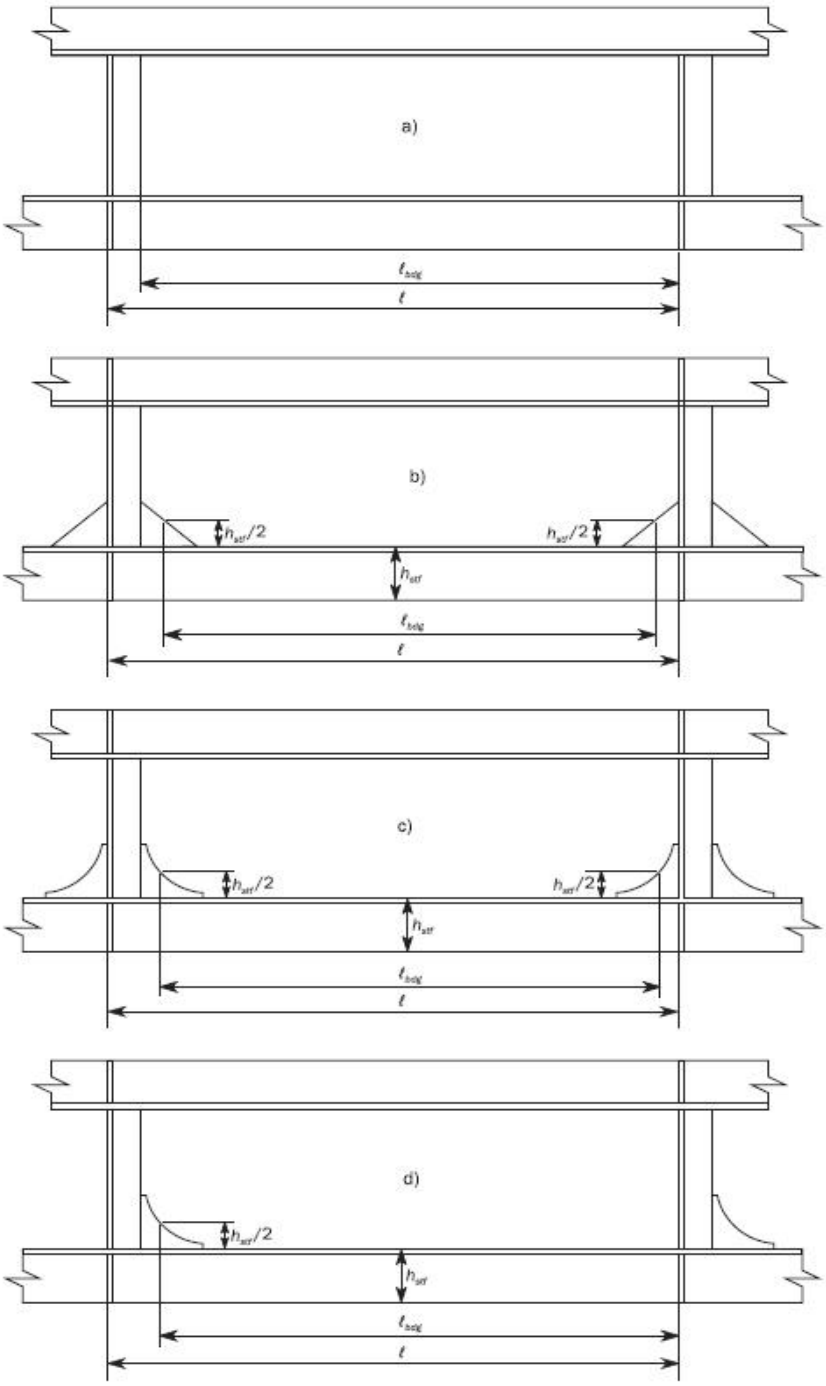


图 1.1.2（2） 腹板加强筋支撑的骨材有效弯曲跨距（双壳结构）

如果骨材的面板沿肘板边缘是连续的，有效弯曲跨距点应取在肘板高度等于骨材高度1/4 之处，见图 1.1.2（3）。

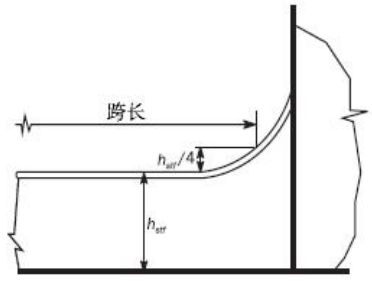


图 1.1.2（3） 面板沿肘板边缘连续的局部支撑构件的有效弯曲跨距

1.1.3 骨材的有效剪切跨距

骨材的有效剪切跨距 l_{shr}，m，应按图 1.1.3（1）单壳结构和图 1.1.3（2）双壳结构所示量取。对于骨材的翼板或自由边设置肘板，或者骨材带板背面设置肘板的情况，可以折减有效剪切跨距。若在骨材翼板或自由边以及骨材带板背面都设置肘板，则可以采用较长的有效肘板臂长来折减有效剪切跨距。不论支撑细节，在构件每一端，骨材全长可以减少最少 s/4000m，因此有效剪切跨距 l_{shr} 应取为：

$$l_{shr} \le l - \frac{s}{2000}$$

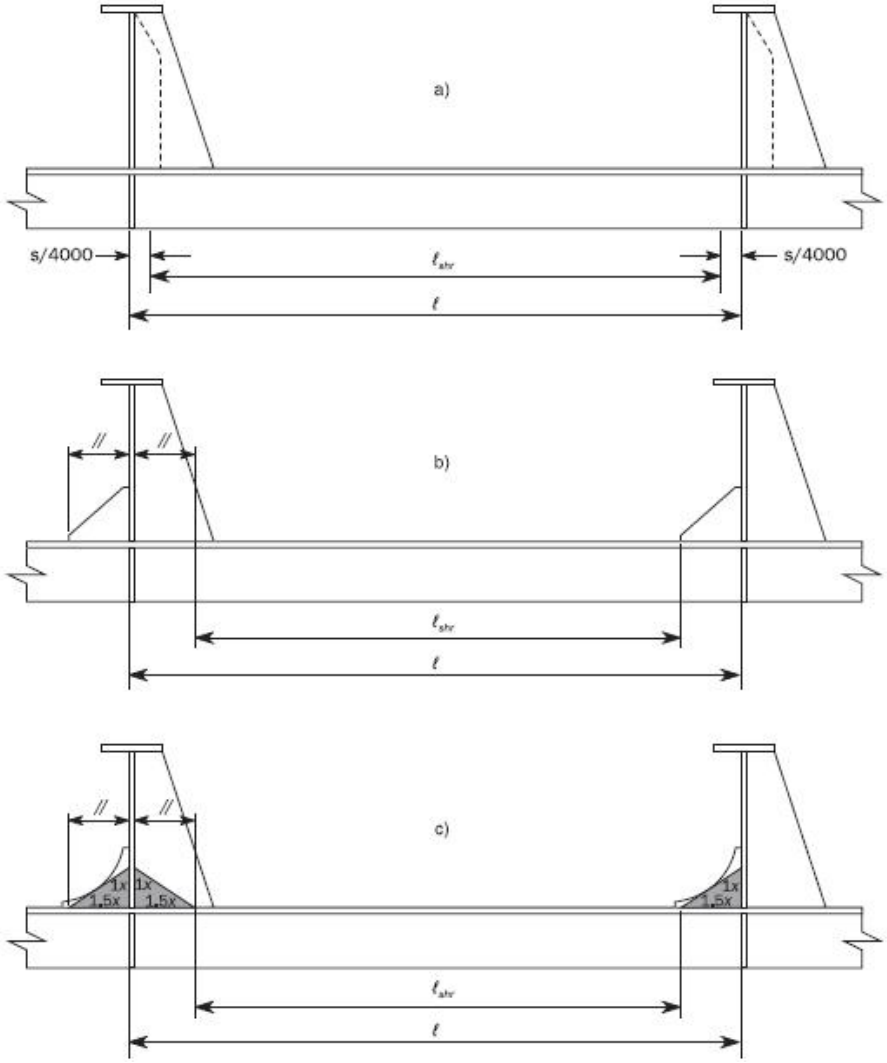


图 1.1.3（1） 腹板加强筋支撑的骨材有效剪切跨距（单壳结构）

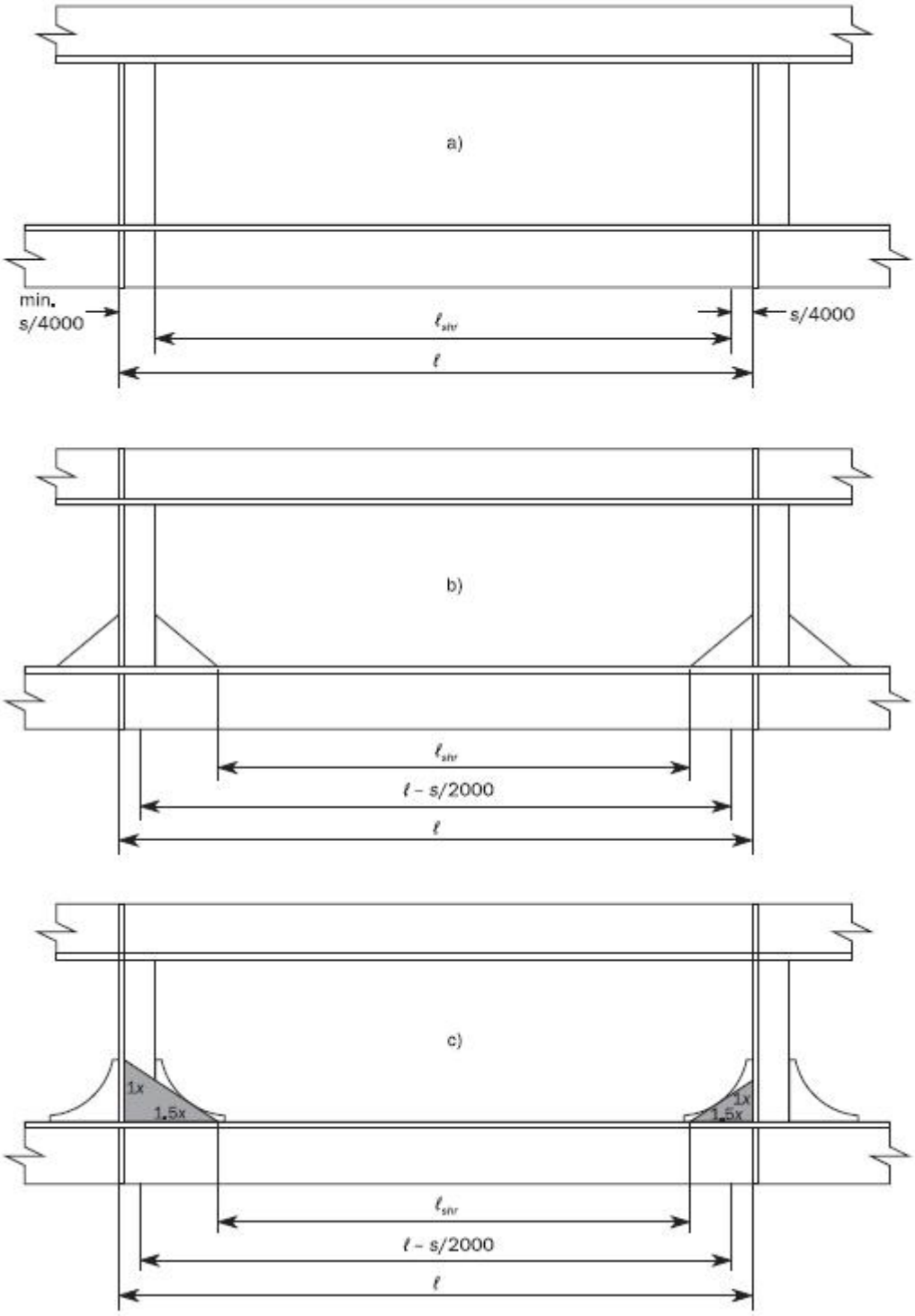


图 1.1.3（2） 腹板加强筋支撑的骨材有效剪切跨距（双壳结构）

对于曲线型和/或长肘板（长/高比率较大），有效肘板长度取作如图 1.1.3（1）(c)和图 1.1.3（2）(c)所示的 1：1.5 的最大内切直角三角形。

如果骨材面板沿肘板边缘是连续的，则用于确定跨距的肘板臂长取为不大于肘板臂长的 1.5 倍，见图 1.1.3（3）。

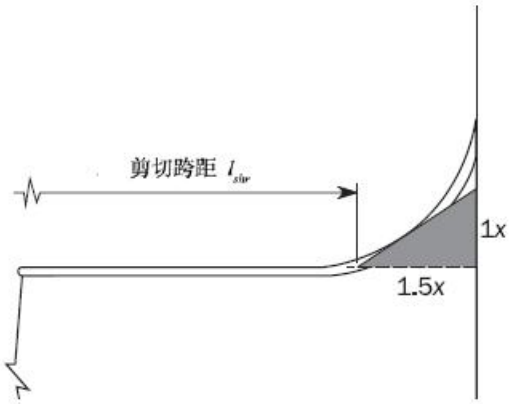


图 1.1.3（3） 面板沿肘板边缘连续的局部支撑构件的有效剪切跨距

1.1.4 船体线型对骨材跨距的影响

弯曲骨材的跨距定义为跨距点之间的弦长。对于有翼板的骨材在翼板处量取，对扁钢骨材在自由边量取。有效跨距的计算应符合[1.1.2]和[1.1.3]的要求。

1.1.5 撑柱支撑的骨材有效跨距

船长 L 超过 120m 的船舶不允许采用撑柱支撑普通骨材的布置。

在主要支撑构件正中间处设置 1 根撑柱的普通骨材的跨距 l 应取为 $0.7l_2$。

若主要支撑构件间 1/3 和 2/3 长度处设有 2 根撑柱，则普通骨材的跨距ℓ应取为 $0.7l_2$。

l_1 和 l_2 为图 1.1.5（1）和图 1.1.5（2）中所定义的跨距。

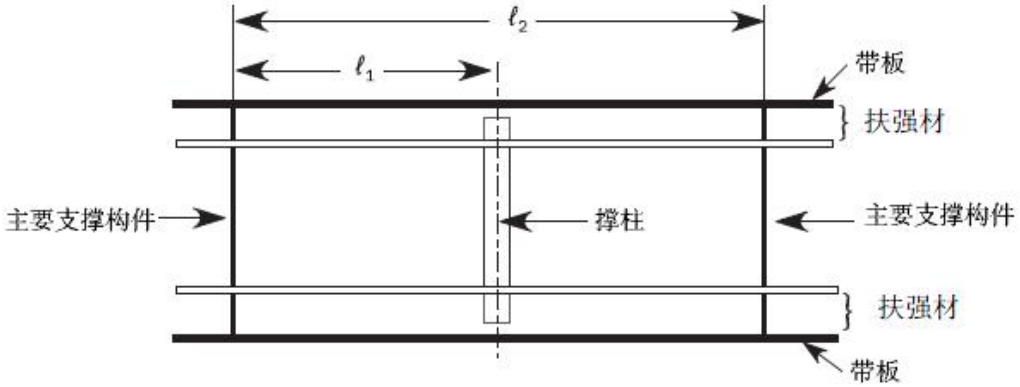


图 1.1.5(1) 一根撑柱的骨材间距

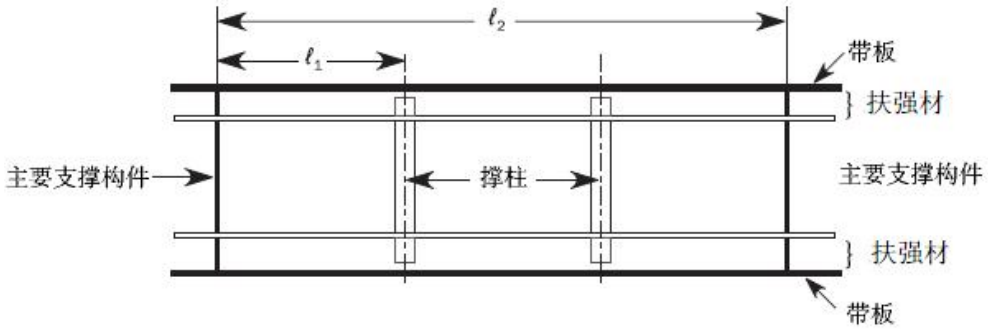


图 1.1.5(2) 两根撑柱的骨材间距

1.1.6 主要支撑构件的有效弯曲跨距

无端部肘板的主要支撑构件有效弯曲跨距 l_{bdg}，m，取为支撑构件之间的构件长度。

若设置合适的端部肘板，则主要支撑构件有效弯曲跨距 l_{bdg} 可取小于支撑构件之间的构件全长。

设置端部肘板的主要支撑构件有效弯曲跨距 l_{bdg}，m，取为肘板高度等于主要支撑构件腹板高度一半的两点之间的长度，如图 1.1.6(b)所示。用于定义这些跨距点的有效肘板按[1.1.8]给出。

如果主要支撑构件面板沿肘板面板是连续的，如图 1.1.6(a)，(c)和(d)，有效弯曲跨距 l_{bdg}，m，取为肘板高度等于主要支撑构件腹板高度 1/4 的两点之间的长度。用于定义这些跨距点的有效肘板按[1.1.8]给出。

对于长高比大于 1.5 的直线肘板，跨距点取到有效肘板；否则，跨距点取到所设置的肘板。

对于曲线形肘板，当跨距点在设置肘板和有效肘板间切点以上时，跨距点取在所设置的肘板。否则，跨距点取在有效肘板。

对于主要支撑构件面板延伸到肘板且设置背肘板的布置，跨距点的位置取到总高度不必大于两倍主要支撑构件高度的位置。设有小尺寸背肘板和大尺寸背肘板的布置如图 1.1.6(e)和(f)所示。

对于主要支撑构件高度保持一致且面板宽度向支撑方向增大的布置，有效弯曲跨距可取到面板宽度达到正常宽度两倍的位置。

1.1.7 主要支撑构件的有效剪切跨距

主要支撑构件的有效剪切跨距相对于有效弯曲跨距可以再折减，即取为支撑该构件的有效肘板的趾端，有效肘板趾端如图 1.1.7 所示。用于定义这些跨距点的有效肘板按[1.1.8]给出。

对于有效背肘板大于面板处的有效肘板的布置，剪切跨距取如图 1.1.7(f)所示的有效肘板趾端间的平均距离。

1.1.8 有效肘板定义

有效肘板定义为在所设置的肘板内的长高比为 1.5 的最大尺寸的直角三角形肘板。见图 1.1.6 示例。

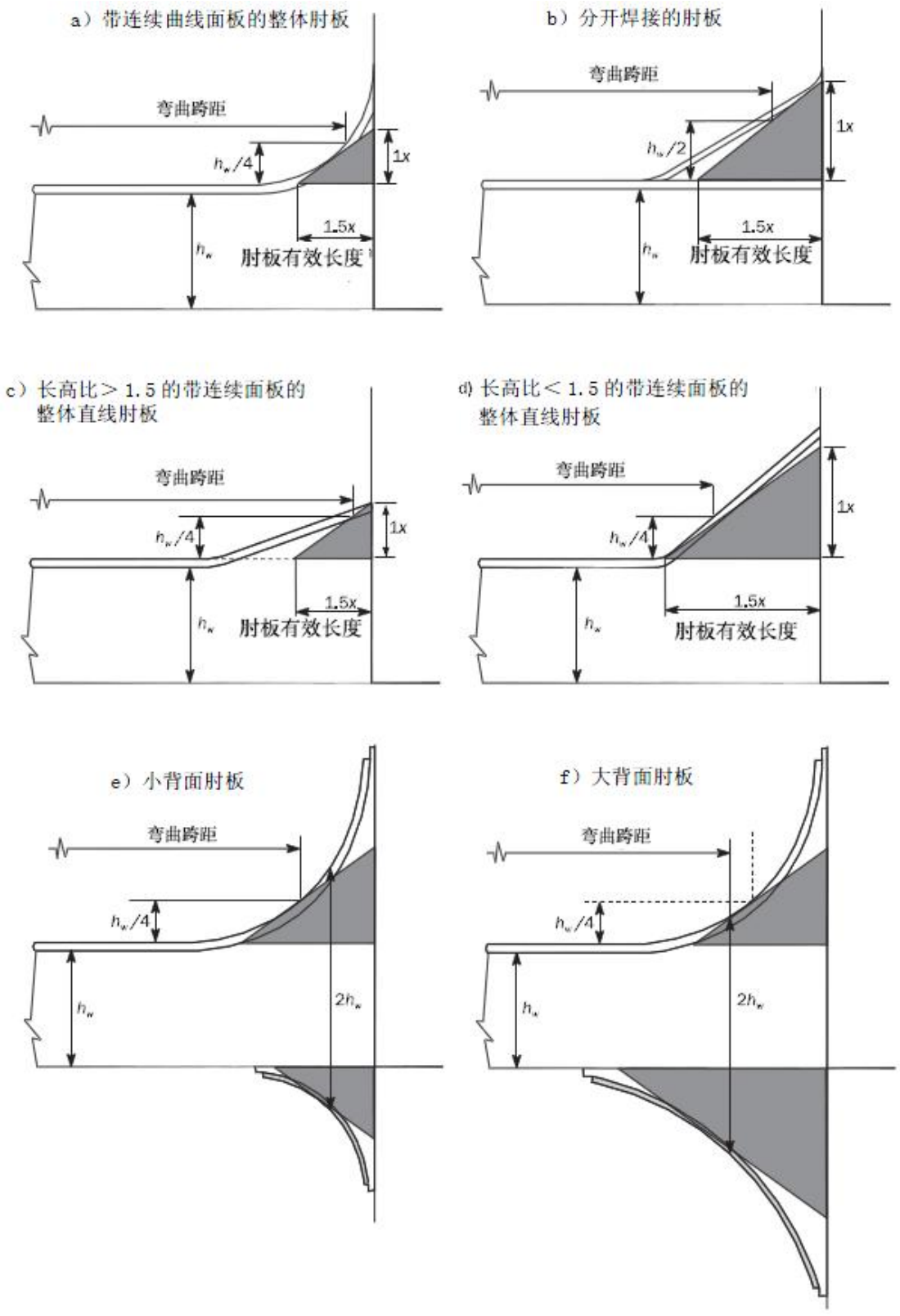


图 1.1.6 主要支撑构件有效弯曲跨距

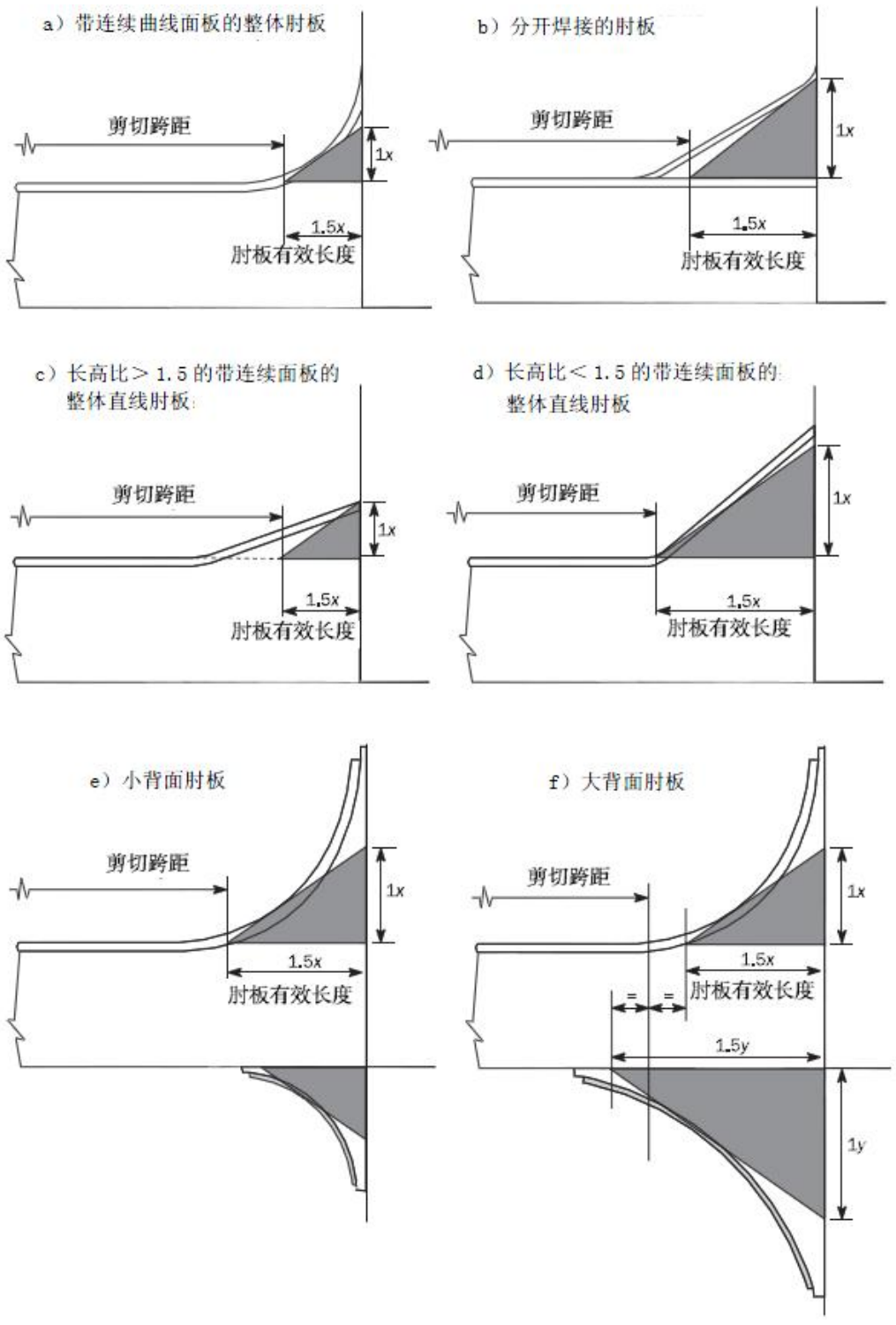


图 1.1.7 主要支撑构件有效剪切跨距

1.2 间距和载荷支撑宽度

1.2.1 骨材

计算骨材有效带板所用的骨材间距 *s*，mm，取为骨材之间的平均间距，见图 1.2.1。等于

$$s=\frac{b_1+b_2+b_3+b_4}{4}$$

式中：

b_1、b_2、b_3、b_4—— 在端部的骨材之间的间距，mm。

通常，骨材支撑的载荷宽度取为 s。

1.2.2 主要支撑构件

计算主要支撑构件有效带板所用的主要支撑构件间距，S，取为相邻主要支撑构件之间的平均间距，见图 1.2.1。

$$S=\frac{b_1+b_2+b_3+b_4}{4}$$

式中：

b_1、b_2、b_3、b_4—— 在端部的主要支撑构件之间的间距。

通常，主要支撑构件支撑的载荷宽度取为 S。

1.2.3 曲板的间距

对于曲形板，骨材间距 s 或主要支撑构件间距 S 应于构件之间的平均弦长处量取。

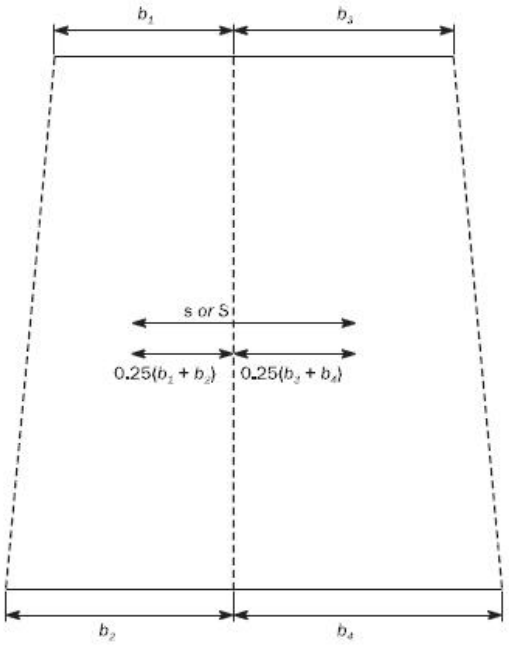


图 1.2.1 板的间距

1.3 有效宽度

1.3.1 骨材

骨材屈服验证中计算实际净剖面模数时所用的带板有效宽度 b_{eff}，mm，取为以下公式的值：

（1）当骨材两侧有板时：

$b_{eff}=200l$，或 $b_{eff}=s$ 取小者。

（2）当骨材仅一侧有板时（即骨材边界开口处）：

$b_{eff}=100l$，或 $b_{eff}=0.5\,s$ 取小者。

但是，当带板净厚度小于 8mm 时，有效宽度应取不大于 600mm。

骨材屈曲验证中所用的有效宽度 b_{eff}，mm，在第 9 章第 5 节中给出。

1.3.2 主要支撑构件

计算主要支撑构件的剖面模数和/或惯性矩时用的有效带板宽度 b_{eff}，m，取为：

$$b_{eff} = S\min\left[\frac{1.12}{1+\frac{1.75}{\left(\frac{l_{bdg}}{S\sqrt{3}}\right)^{1.6}}};1.0\right] \quad \text{对于} \quad \left(\frac{l_{bdg}}{S\sqrt{3}}\right)\geq 1$$

$$b_{eff} = 0.407\frac{l_{bdg}}{\sqrt{3}} \quad \text{对于}\left(\frac{l_{bdg}}{S\sqrt{3}}\right)<1$$

1.3.3 主要支撑构件的曲形面板和带板的有效面积

本条给出的有效净面积仅适用于主要支撑构件的曲形面板和曲形带板。有效净面积用于第 6 章主要支撑构件的尺度要求和第 7 章用梁单元建模的曲形面板的实际有效净面积。

（1）有效净面积 $A_{eff\text{-}n50}$，mm^2，取为：

$$A_{eff-n50} = C_f t_{f-n50} b_f$$

式中：C_f——翼板有效系数，按下列各式计算，但取不大于 1.0：

$$C_f = C_{f1}\frac{1.285}{\beta k_1} \quad \text{对于对称面板；}$$

$$C_f = 0.18+\frac{0.08}{\beta^2} \quad \text{对于非对称面板；}$$

$$C_f = C_{f1}\frac{1.285}{\beta} \quad \text{对于箱型纵桁的带板；}$$

C_{fl}——系数，取为：

- 对于对称面板，

$$C_{f1} = \frac{(\sinh k_1\beta\cosh k_1\beta+\sin k_1\beta\cos k_1\beta)}{(\cosh k_1\beta)^2+(\cos k_1\beta)^2}$$

- 对于有两个腹板的箱型纵桁的带板，

$$C_{f1} = \frac{0.78\ (\sinh\beta+\sin\beta)(\cosh\beta-\cos\beta)}{(\sinh\beta)^2+\sin^2\beta}$$

- 对于有多个腹板的箱型纵桁的带板，

$$C_{f1} = \frac{1.56\ (\cosh\beta-\cos\beta)}{\sinh\beta+\sin\beta}$$

k_1——系数，按如下计算：

$$k_1 = 1.4+1.25(1.4-\beta)^3 \quad \text{对于}\ \beta<1.4$$

$$k_1 = 1.4 \quad \text{对于}\ \beta\geq 1.4$$

β——系数，按如下计算：

$$\beta = \frac{1.285\ b_1}{\sqrt{r_f\ t_{f-n50}}}$$，单位：弧度

b_l——宽度，mm，取为：

- 对于对称面板，$b_1 = 0.5(b_f - t_{w\text{-}n50})$
- 对于非对称面板，$b_1 = b_f$
- 对于箱型纵桁带板，$b_1 = s_w - t_{w\text{-}n50}$

s_w —— 箱型纵桁的支撑腹板的间距，mm

$t_{f\text{-}n50}$ —— 翼板净厚度，mm。计算非对称面板的 C_f和β时 $t_{f\text{-}n50}$取值不大于 $t_{w\text{-}n50}$

$t_{w\text{-}n50}$—— 腹板净厚度，mm

r_f —— 曲形面板或带板的半径，mm，见图 1.3.3，在厚度中点处取值

b_f —— 面板或带板的宽度，mm，见图 1.3.3

（2）由径向肘板支撑的曲形面板或由圆柱骨材支撑带板的有效净面积，mm²，由下式得出：

$$A_{eff-n50} = \left(\frac{3r_f\, t_{f-n50} + C_f\, s_r^2}{3r_f\, t_{f-n50} + s_r^2} \right) t_{f-n50}\; b_f$$

式中：s_r—— 防倾肘板或腹板加强筋或垂直于腹板的骨材的间距，mm，见图 1.3.3

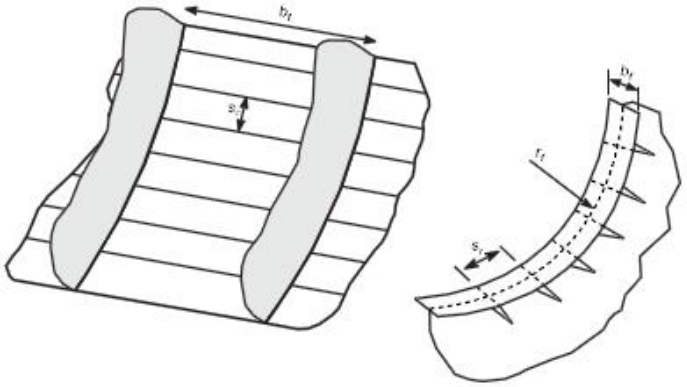


图 1.3.3 曲形船体板格和面板

1.4 骨材和主要支撑构件的几何特性

1.4.1 球扁钢形式的骨材

球扁钢剖面的特性应通过直接计算确定。

当直接计算剖面特性不可行时，球扁钢可取为等效的组合剖面。等效的组合剖面的净尺寸，mm，通过下列公式得到：

$$h_w = h'_w - \frac{h'_w}{9.2} + 2$$

$$b_f = \alpha\left(t'_w + \frac{h'_w}{6.7} - 2 \right)$$

$$t_f = \frac{h'_w}{9.2} - 2$$

$$t_w = t'_w$$

式中：h'_w, t'_w—— 球扁钢的高度和净厚度，mm，如图 1.4.1 所示

α —— 系数，取为：

$$\alpha = 1.1 + \frac{(120 - h'_w)^2}{3000} \quad \text{对于 } h'_w \le 120$$

$$\alpha = 1.0 \text{ 对} \qquad h'_w > 120$$

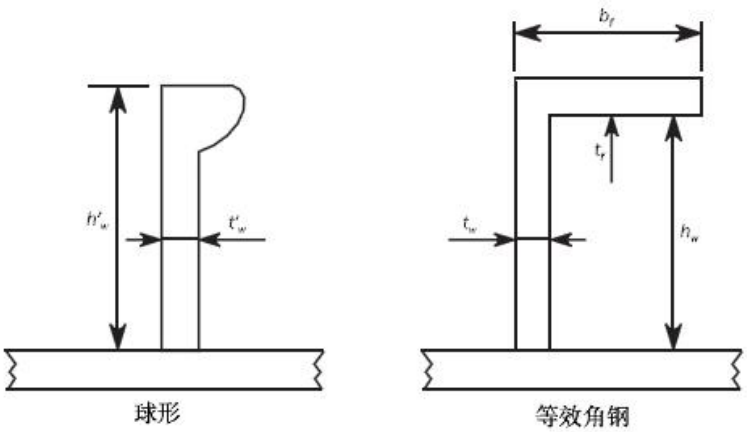


图 1.4.1 骨材尺寸

1.4.2 骨材的净弹性剪切面积

骨材的净弹性剪切面积，A_{shr}，cm^2，取为：

$$A_{sh} = d_{sh}\, t_w 10^{-2}$$

式中：d_{shr}—— 骨材的有效剪切高度，mm，见[1.4.3]定义；

t_w—— 骨材的净腹板厚度，mm，见第 3 章第 2 节定义；

1.4.3 骨材的有效剪切高度

骨材的有效剪切高度 d_{shr}，mm，取为：

$$d_{shr} = \left(h_{stf} - 0.5t_{c-stf} + t_p + 0.5t_{c-pl}\right)\sin\varphi_w$$

式中：h_{stf}—— 骨材高度，mm；

t_{c-stf} —— 骨材的腐蚀增量，mm；

t_p—— 骨材带板净厚度，mm；

t_{c-pl} —— 骨材带板的腐蚀增量，mm；

φ_w—— 角度，°，见图 1.4.3 定义。当角度大于等于 75° 时，φ_w 取为 90° 。

1.4.4 骨材的弹性净剖面模数

骨材的弹性净剖面模数 Z，cm^3，取为：

$$Z = Z_{stf}\sin\varphi_w$$

式中：Z_{stf}—— 假设骨材垂直于带板时的净剖面模数，cm^3，即φ_w=90°

φ_w—— 角度，°，见图 1.4.3 定义。当角度大于等于 75° 时，φ_w 取为 90° 。

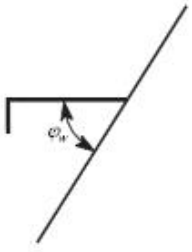


图 1.4.3 骨材腹板和带板夹角

1.4.5 骨材的有效净塑性剪切面积

用于评估抗冲击载荷能力的骨材的有效净塑性剪切面积 $A_{sh\text{-}pl}$，cm2，取为：

$$A_{sh\text{-}pl} = A_{sh}$$

式中：A_{sh}—— 净弹性剪切面积，cm^2，见[1.4.2]定义

1.4.6 骨材的有效净塑性剖面模数

用于评估抗冲击载荷能力的骨材的有效净塑性剖面模数 Z_{pl}，cm^3，

$$Z_{pl}=\frac{f_w\,h_w{}^2\,t_w}{2000}+\frac{(2\,\gamma-1)A_f\,h_{f-ctr}}{1000} \qquad \text{对于 } 75°\le\varphi_w\le 90°$$

$$Z_{pl}=\frac{f_w\,h_w{}^2\,t_w\sin\varphi_w}{2000}+\frac{(2\,\gamma-1)A_f\left(h_{f-ctr}\sin\varphi_w-b_{f-ctr}\cos\varphi_w\right)}{1000} \text{ 对于}\varphi_w< 75°$$

式中： f_w—— 腹板剪应力系数，取为：

- 对于 $n=1$ 或 2 的翼板型横剖面，$f_w=0.75$
- 对于 $n=0$ 的翼板型横剖面，$f_w=1.0$
- 对于扁钢，$f_w=1.0$

n —— 每个构件的端部支撑处的塑性铰链数量，取为 0、1 或 2

端部支撑处的塑性铰链可为：

- 骨材在支撑处连续；
- 骨材穿过支撑板，同时骨材在其终端处用短梁（或相当的结构）与相邻骨材连接；
- 骨材连至相邻的抗弯有效骨材（非屈曲骨材）
- 骨材连至抗弯有效肘板。当肘板与另一根骨材（非屈曲骨材）相连时，可认为其有效抗弯；

h_w —— 骨材腹板高度，mm，取为：

- 对于 T、L（轧制和组合）型材和扁钢，见本章第 2 节；
- 对于 L2 和 L3 型材，见本章第 2 节；
- 对于球扁钢，见[1.4.1]；

γ —— 系数，取为：

$$\gamma=\frac{1+\sqrt{3+12\beta}}{4}$$

β —— 系数，取为：

- $\beta=\dfrac{t_w^2 f_b l_{shr}{}^2}{80 b_f^2 t_f h_{f-ctr}}10^6+\dfrac{t_w}{2b_f}$ 对于跨中无防倾肘板的 L 型材，但不大于 0.5；
- $\beta=0.5$ 对于其他情况。

A_f —— 翼板的横剖面净面积 mm^2:

- $A_f=0$ 对于扁钢
- $A_f=b_f t_f$ 对于其他骨材

$b_{f\text{-}ctr}$—— 骨材腹板厚度中点处至翼板面积中心的距离：

- $b_{f\text{-}ctr}=0.5(b_f-t_{w\text{-}gr})$ 对于轧制角钢
- $b_{f\text{-}ctr}=0$ 对于 T 型材
- 球扁钢取表 1.4.6（1）和（2）给出的值

$h_{f\text{-}ctr}$—— 量至翼板厚度中点处的骨材高度：

- $h_{f\text{-}ctr}=h_w-0.5t_f$ 对于具有矩形翼板的型材，L3 型材除外
- $h_{f\text{-}ctr}=h_w-d_e-0.5t_f$ 对于 L3 型材
- 球扁钢取表 1.4.6（1）和（2）给出的值

d_e —— 腹板上边缘至翼板顶部的距离，mm。

f_b —— 系数，取为：

- $f_b = 0.8$ 对于翼板连续穿过主要支撑构件，且有端肘板
- $f_b = 0.7$ 对于主要支撑构件处翼板削斜或在支撑处终止而支撑的另一侧无对齐的结构，且有端肘板
- $f_b = 1.0$ 对于其他骨材

t_f —— 翼板净厚度，mm.

1.4.7 主要支撑构件腹板不垂直于带板

当主要支撑构件腹板不垂直于带板时，实际净剪切面积，cm^2，和实际净剖面模数，cm^3，可从下列公式获得：

- 实际净剪切面积：

$$A_{sh\text{-}n50} = A_{sh\text{-}0\text{-}n50} \sin \varphi_w \qquad \text{对于} \varphi_w < 75°$$

$$A_{sh\text{-}n50} = A_{sh\text{-}0\text{-}n50} \qquad \text{对于 } 75° \le \varphi_w \le 90°$$

- 实际净剖面模数：

$$Z_{n50} = Z_{perp\text{-}n50} \sin \varphi_w \qquad \text{对于} \varphi_w < 75°$$

$$Z_{n50} = Z_{perp\text{-}n50} \qquad \text{对于 } 75° \le \varphi_w \le 90°$$

式中：

$A_{sh\text{-}0\text{-}n50}$ —— 假设主要支撑构件与带板垂直时的实际净剪切面积，cm^2，取为：

$$A_{sh-0-n50} = \left(h_w + t_{f-n50} + t_{p-n50}\right) t_{w-n50} 10^{-2}$$

$Z_{perp\text{-}n50}$ —— 假设主要支撑构件与带板垂直时的连同带板的实际净剖面模数，cm^3

1.4.8 带腹板开孔的主要支撑构件剪切面积

计算有效净剪切面积 $A_{sh\text{-}n50}$ 时用的有效腹板高度 h_{eff}，mm，取为以下各式之小者：

$$h_{eff} = h_w$$

$$h_{eff} = h_{w3} + h_{w4}$$

$$h_{eff} = h_{w1} + h_{w2} + h_{w4}$$

式中：h_w —— 主要支撑构件腹板高度，mm

$h_{w1}, h_{w2}, h_{w3}, h_{w4}$—— 图 1.4.8 所示尺寸

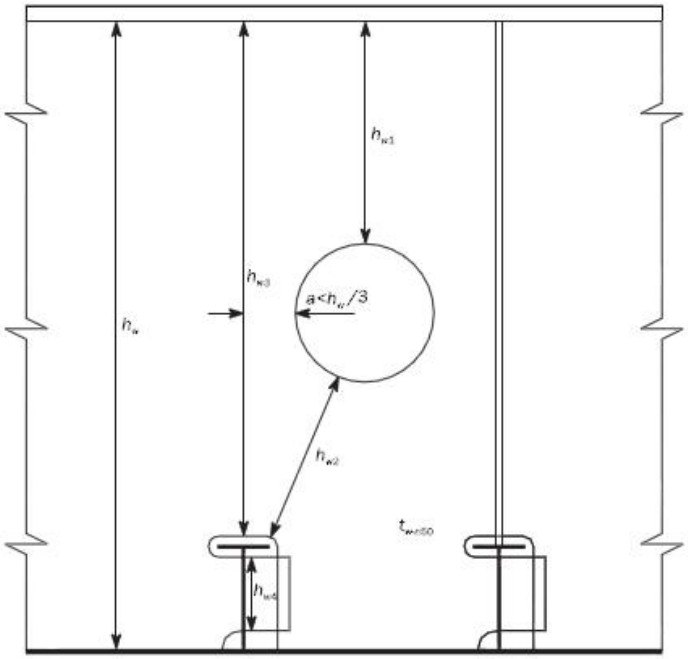


图 1.4.8 腹板开口处的有效剪切面积

2 板

2.1 EPP 的理想化

2.1.1 EPP

单元板格（EPP）是骨材和/或主要支撑构件之间的板的非加筋部分。EPP 的长为 *a*，宽为 *b*，分别对应于板的最长边和最短边，如图 2.1.1 所示。

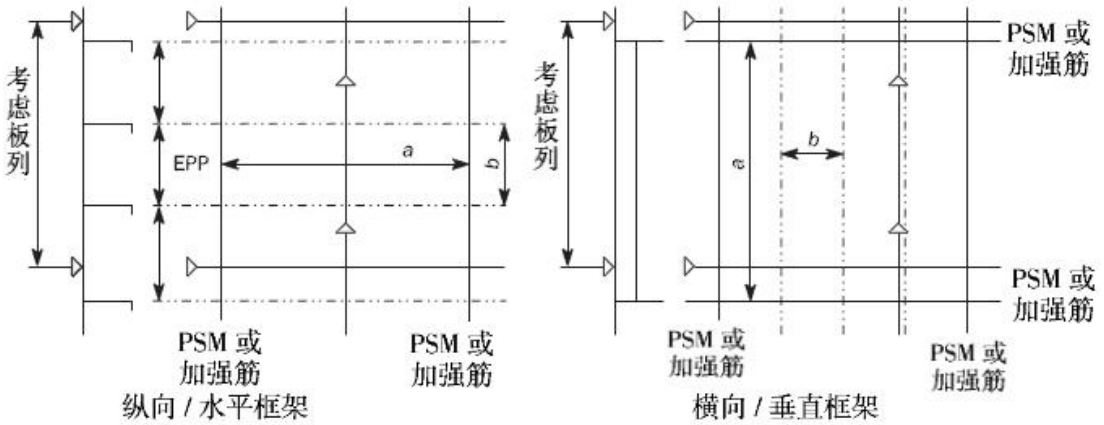


图 2.1.1 单元板格（EPP）定义

2.1.2 板列要求厚度

板列的要求厚度取为取为该板列内的每个 EPP 的要求值的最大值。选择板列应按照表 2.1.2 给出的要求，如图 2.1.2 所示。

应使用板列内的最大腐蚀增量，见第 3 章第 3 节。

给定的 EPP 中需考虑的板列　　表 2.1.2

	a/*b*>2	*a*/*b*≤2
a_l>*b* / 2	所有板列(St1、St2、St3、St4)	所有板列(St1、St2、St3、St4)
a_l≤*b* / 2	板列 St2 和 St4	所有板列(St1、St2、St3、St4)

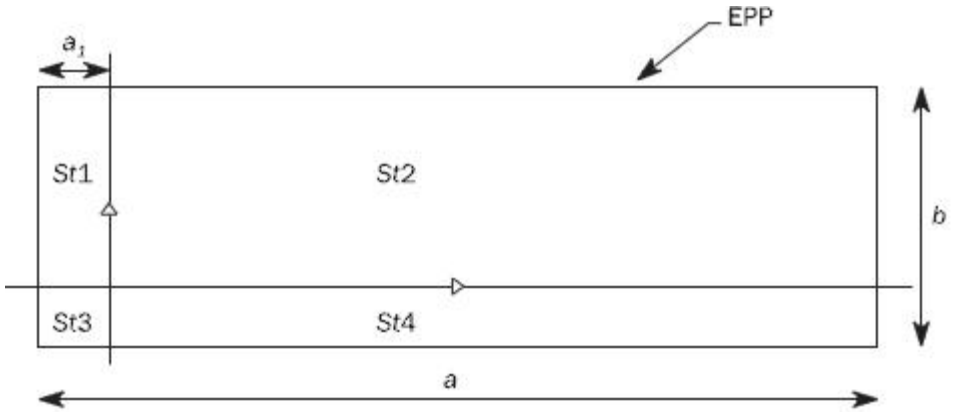


图 2.1.2 给定的 EPP 中需考虑的板列

式中：a_l——　在所考虑板列内，沿 EPP 长边方向，从板列边界焊缝至 EPP 边界的距离，mm

2.1.3 对于直接强度评估，EPP 通过有限元模型的网格布置进行理想化。

2.2 载荷计算点

2.2.1 屈服

对于屈服验证，局部尺寸要求计算用的局部压力和船体梁应力应取自载荷计算点（LCP），其 x、y 和 z 坐标值定义见表 2.2.1。

屈服的 LCP 坐标　　表 2.2.1

LCP 坐标	一般(1)		水平板		垂直横向结构和横向凳板	
	纵骨架式（图 2.2.1(1)）	横骨架式（图 2.2.1（2））	纵骨架式	横骨架式	水平框架（图 2.2.1（3））	垂直框架（图 2.2.1（4））
x 坐标	EPP 长度中点		EPP 长度中点		与 *y* 和 *z* 值对应	
y 坐标	与 *x* 和 *z* 值对应		EPP 靠舷侧的 *y* 值		在 *z* 值平面上，EPP 靠舷侧的 *y* 值(2)	
z 坐标	EPP 下沿	EPP 下沿或板列下沿的较大值	与 *x* 和 *y* 值对应		EPP 下沿	EPP 下沿或板列下沿的较大值
(1) 除水平板或垂直横向结构外的其他所有结构。 (2) 尾封板外载荷计算的 y 坐标取值。						

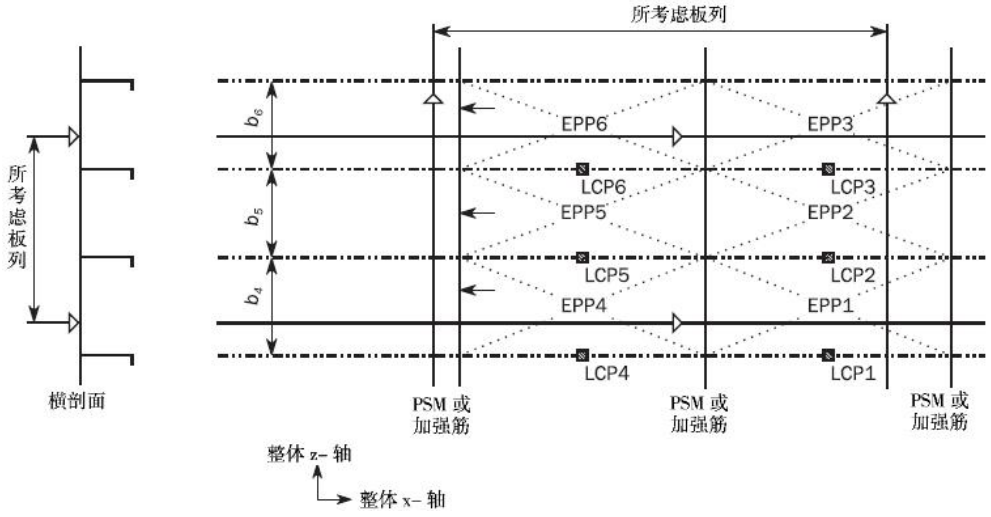


图 2.2.1（1） 纵骨架式的载荷计算点（LCP）

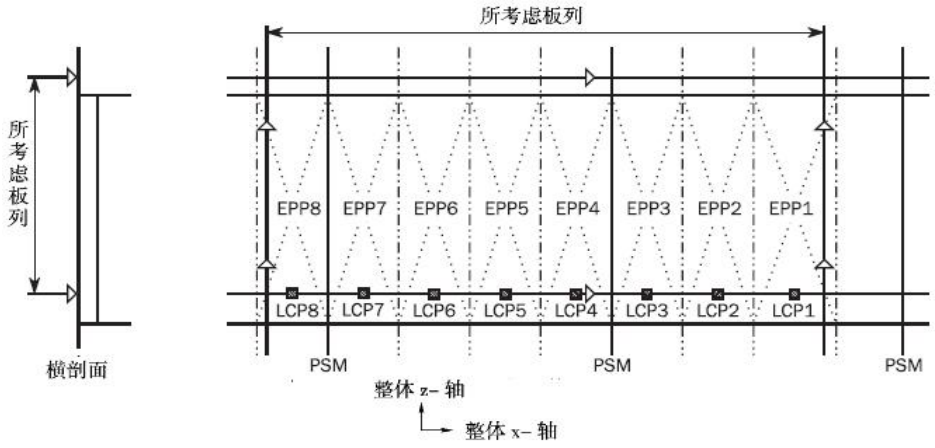


图 2.2.1（2） 横骨架式的载荷计算点（LCP）

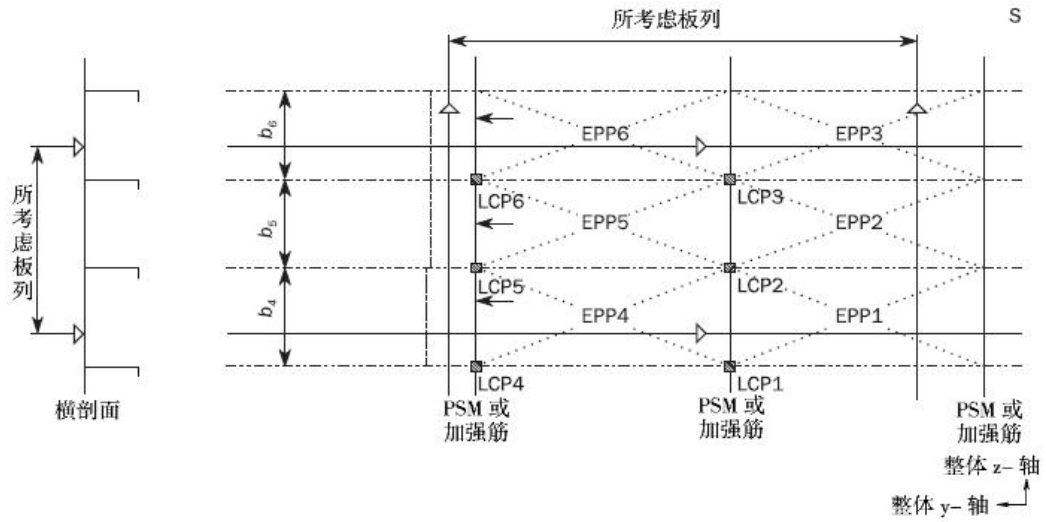


图 2.2.1（3） 横向垂直结构上的水平框架的载荷计算点

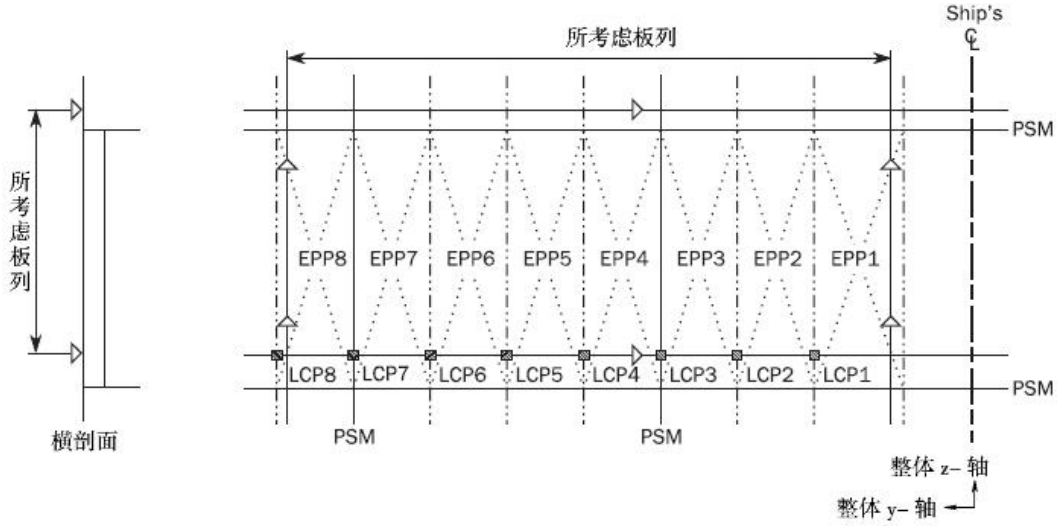


图 2.2.1（4） 横向垂直结构上的垂直框架的载荷计算点

2.2.2 屈曲

对于第 9 章第 3 节 EPP 的描述性屈曲验证，压力和船体梁应力的 LCP 如表 2.2.2 定义。对于有限元屈曲验证，应适用第 9 章第 4 节。

板屈曲的 LCP 坐标 **表 2.2.2**

<table>
<tr><td rowspan="2">LCP 坐标</td><td rowspan="2">压力计算的 LCP</td><td colspan="3">船体梁应力的 LCP（图 2.2.2）</td></tr>
<tr><td colspan="2">弯曲应力(1)</td><td rowspan="2">剪应力</td></tr>
<tr><td>非水平板</td><td>水平板</td></tr>
<tr><td>x 坐标</td><td rowspan="3">与屈服的 LCP 相同坐标</td><td colspan="3">EPP 长度中点</td></tr>
<tr><td>y 坐标</td><td>与 x 和 z 值对应</td><td>EPP 的舷侧和舷内端点
（点 A1 和 A2）</td><td>EPP 中点
（点 B）</td></tr>
<tr><td>z 坐标</td><td>EPP 的上端和下端端点
（点 A1 和 A2）</td><td colspan="2">与 x 和 y 值对应</td></tr>
<tr><td colspan="5">(1) 曲板板格的弯曲应力取 A1 和 A2 点处计算得到的应力的平均值。</td></tr>
</table>

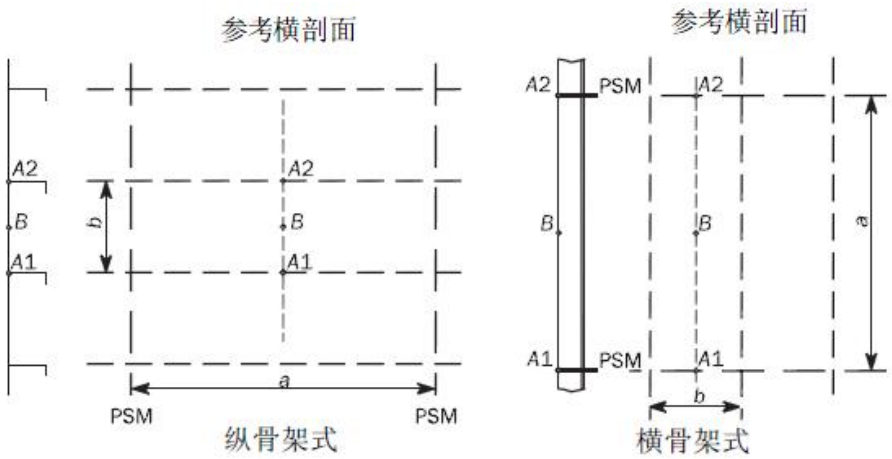


图 2.2.2 板屈曲的 LCP –船体梁应力

3 骨材

3.1 参考点

3.1.1 骨材的剖面模数要求应对应于得出最小剖面模数的参考点。对于典型型材，参考点一般位于如图 3.1.1 所示的位置。

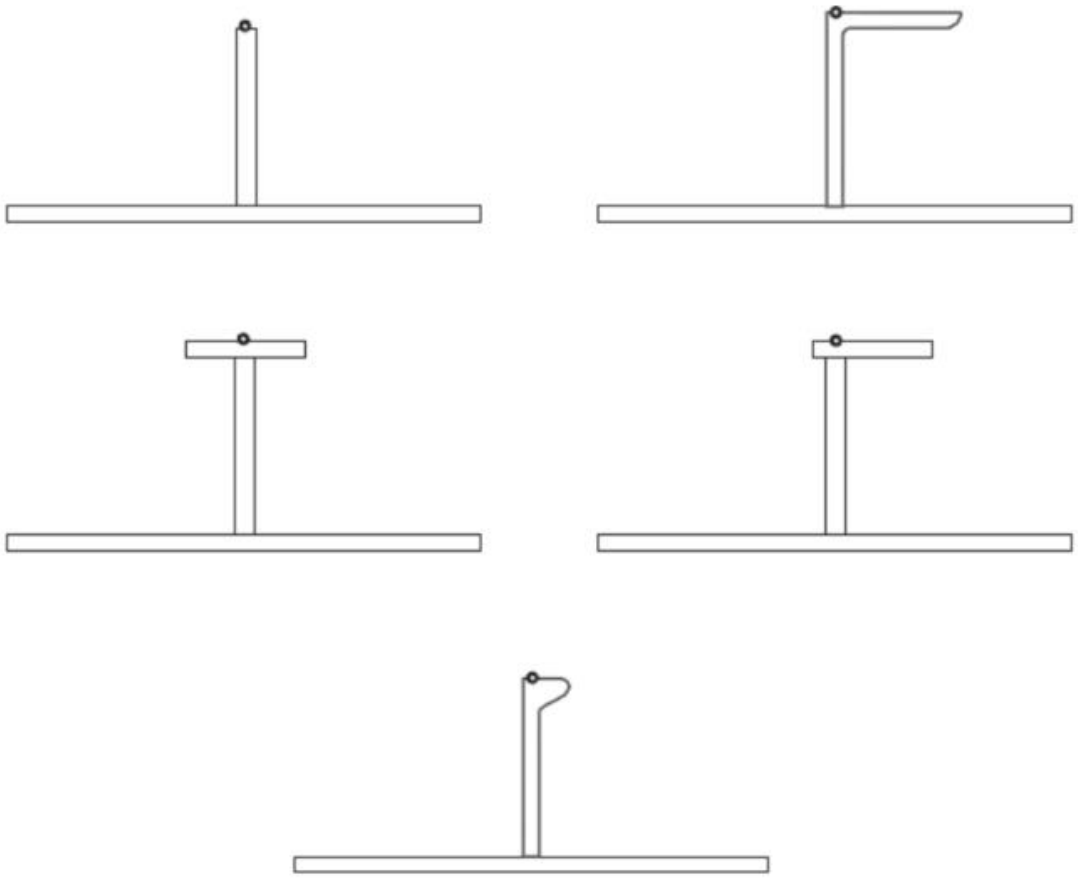


图 3.1.1 局部尺寸评估中计算剖面模数和船体梁应力的参考点

3.2 载荷计算点

3.2.1 压力的 LCP

压力计算的载荷计算点位于：

(1) 所考虑骨材的完整长度 *l* 的中点

(2) 骨材与带板的交点

对尾封板上的骨材，在计算外部海水动压力时，载荷计算点的 *y* 坐标取 z 水平舷侧外板处的 *y* 值。

3.2.2 船体梁弯曲应力的 LCP

船体梁弯曲应力的载荷计算点定义如下：

（1）按第 6 章进行屈服验证：

- 所考虑骨材的完整长度 *l* 的中点
- 图 3.1.1 给出的参考点

（2）第 9 章的描述性屈曲要求：

- 所考虑骨材的完整长度 *l* 的中点
- 骨材与带板的交点

3.2.3 非水平骨材

侧向压力 *P* 应取完整长度 *l* 中点处的压力与下列公式得出的值之间的大值：

$$p = \frac{p_U + p_L}{2}$$，当垂直骨材的上端在最低零压力线以下时

$$p = \frac{l_1}{l}\frac{p_L}{2}$$，当垂直骨材的上端在最低零压力线或之上时，见图 3.2.3

式中：

l_1 ——垂直骨材下端与最低零压力线之间的距离，m

p_U, p_L——分别为垂直骨材跨距 *l* 上下端的侧向压力

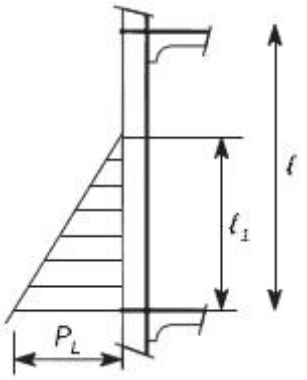


图 3.2.3 垂直骨材压力定义

4 主要支撑构件

4.1 载荷计算点

4.1.1 载荷计算点位于完整长度 ***l*** 中点处，主要支撑构件与带板的连接点。

对尾封板上的主要支撑构件，在计算外部海水动压力时，载荷计算点的 y 坐标取在 z 水平舷侧外板处的 y 值。

第4章 载　　荷

第1节　一般规定

符号

本节未定义的符号，参考第1章第4节。

S——系指静载荷工况。

S+D——系指静加动载荷工况。

1 一般要求

1.1 应用

1.1.1 应用范围

本章给出了用于强度评估与疲劳评估的设计载荷。

对于本章第7节规定的设计载荷场景，给出了载荷组合。本节采用设计载荷场景概念规定了与矿砂船适当营运模式一致的设计载荷组。

1.1.2 等效设计波

与每一动载荷工况相关的动载荷基于等效设计波概念。等效设计波概念是对船舶施加了一组协调的动载荷，使得指定的主导载荷响应等同于要求的长期响应值。

1.1.3 强度评估与疲劳评估的概率水平

本章的，相关评估应按如下理解：

（1）强度评估系指对应于 10^{-8} 概率水平的载荷、压载水置换、在港工况和进水工况的强度衡准的评估，不包括疲劳强度衡准的评估。

（2）疲劳评估系指对应于 10^{-2} 概率水平载荷的疲劳衡准的评估。

1.1.4 动载荷分量

每一动载荷工况计算得到的所有动载荷分量是同时发生的。

1.1.5 强度评估载荷

强度评估应对所有的设计载荷场景进行，最终的评估应基于最严格的强度要求。

强度评估的每一个设计载荷场景由一个静载荷工况（S）或者一个静+动载荷工况（S+D）组成，静载荷和动载荷取决于所考虑的装载工况。

静载荷在以下章节中定义：

（1）船体梁静水载荷在本章第4节定义。

（2）外部载荷在本章第5节定义。

（3）内部载荷在本章第6节定义。

强度评估的等效设计波以及总体载荷的动载荷组合系数在本章第2节2中列出。

动载荷分量在以下章节中定义：

（1）船体梁动载荷分量在本章第4节定义。

（2）外部载荷在本章第5节定义。

（3）内部载荷在本章第6节定义。

1.1.6 疲劳评估载荷

每一个疲劳评估的设计载荷场景由一个静+动（S+D）载荷工况组成，静载荷和动载荷取决于所考虑的装载工况。

静载荷在以下章节中定义：

（1）船体梁静水载荷在本章第4节定义。

（2）外部载荷在本章第 5 节定义。

（3）内部载荷在本章第 6 节定义。

疲劳评估的等效设计波在本章第 2 节[3]中列出。

动载荷分量在以下章节中定义：

（1）船体梁动载荷分量在本章第 4 节定义。

（2）外部载荷在本章第 5 节定义。

（3）内部载荷在本章第 6 节定义。

1.2 定义

1.2.1 坐标系

坐标系定义见第 1 章第 4 节。

1.2.2 船舶运动符号约定

船舶运动是相对于图 1.2.2 所示的船舶重心（COG）来定义的，其中：

- 正的纵荡为沿 X 轴方向的平动（向前为正）；
- 正的横荡为沿 Y 轴方向的平动（向左舷为正）；
- 正的垂荡为沿 Z 轴方向的平动（向上为正）；
- 正的横摇是绕通过重心的纵轴的正向旋转（右舷向下，左舷向上为正）；
- 正的纵摇是绕通过重心的横轴的正向旋转（艏向下，艉向上为正）；
- 正的艏摇是绕通过重心的垂向轴的正向旋转（艏向左舷，艉向右舷为正）

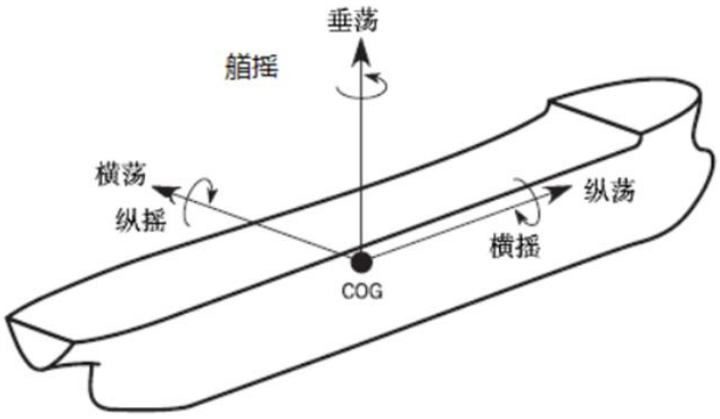


图 1.2.2 正向运动定义

1.2.3 船体梁载荷符号

船舶任意横剖面的垂向弯矩、垂向剪力、水平弯矩、水平剪力和扭矩的符号见图 1.2.3，说明如下：

(1) 垂向弯矩 M_{sw} 和 M_{wv} 在强力甲板产生拉应力（中拱弯矩）时为正，在底部产生拉应力（中垂弯矩）时为负。

(2) 垂向剪力 Q_{sw} 和 Q_{wv} 在所考虑的横剖面之后作用的合力向下或在所考虑的横剖面之前作用的合力向上时为正。

(3) 水平弯矩 M_{wh} 在右舷产生拉伸应力时为正，在左舷产生拉伸应力时为负。

(4) 扭矩 M_{wt} 在所考虑的横剖面之后合力矩绕 X 轴的负方向旋转或在横剖面之前合力矩沿 X 轴的正方向旋转时为正。

(5) 水平剪力 Q_{wh} 在所考虑的横剖面之后作用的合力向右舷或在所考虑的横剖面之前作用的合力向左舷时为正。

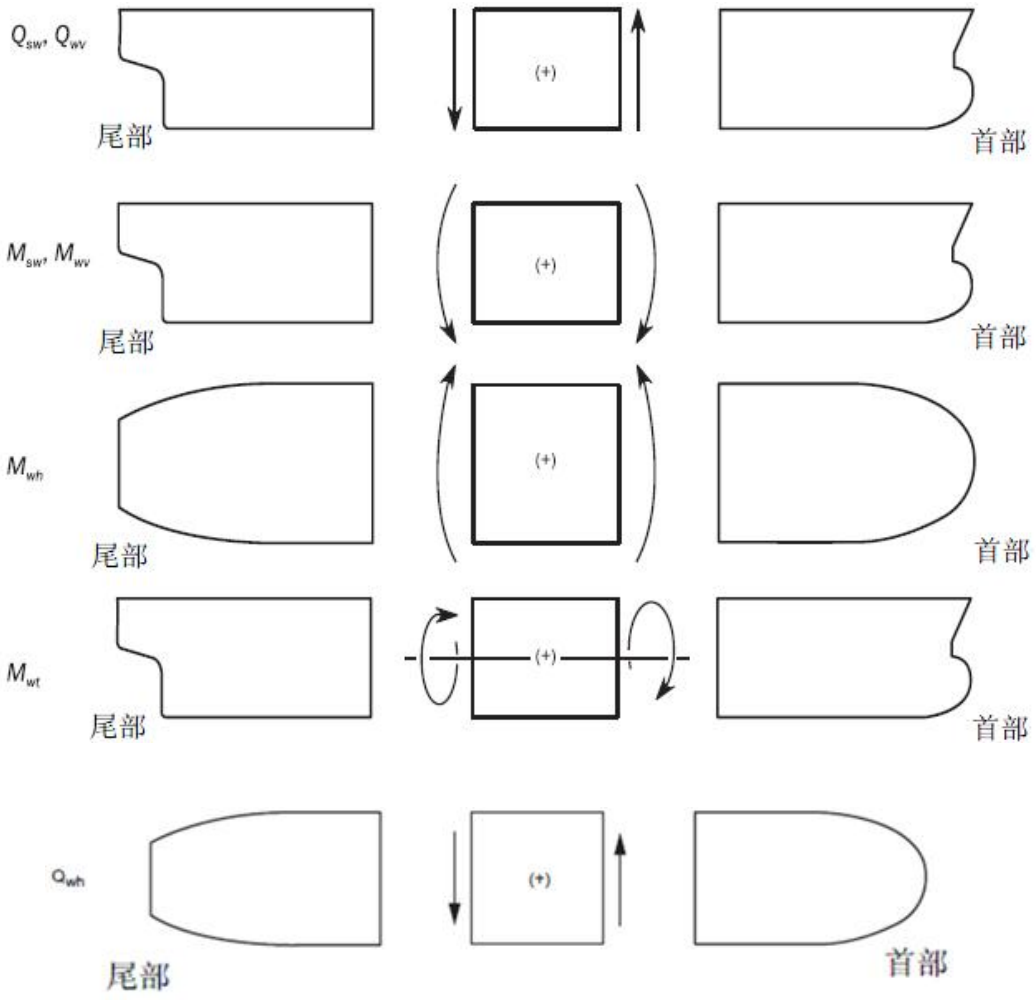


图 1.2.3 剪力 Q_{sw}、Q_{wv}、Q_{wh} 和弯矩 M_{sw}，M_{wv}，M_{wh}，M_{wt} 的符号

第 2 节　动载荷工况

符号

本节未定义的符号，见第 1 章第 4 节。

a_{surge}, $a_{pitch\text{-}x}$, a_{sway}, $a_{roll\text{-}y}$, a_{heave}, $a_{roll\text{-}z}$, $a_{pitch\text{-}z}$：加速度分量，定义见本章第 3 节。

f_{xL} ——载荷计算点的 X 坐标与 L 的比值，取为：

$$f_{xL} = \frac{x}{L}, \text{ 但不小于 } 0.0, \text{ 不大于 } 1.0$$

f_{TL} ——某一装载工况吃水与 L 的比值，取为：

$$f_{TL} = \frac{T_{LC}}{L}$$

f_{lp} ——和沿船长纵向位置相关的系数，取为：

$$f_{lp} = 1, \text{ 对于 } x/L \le 0.5$$

$$f_{lp} = -1, \text{ 对于 } x/L > 0.5$$

$f_{lp\text{-}OST}$——OST 载荷工况的扭矩纵向分布系数，取为：

$f_{lp\text{-}OST} = 5f_{xL}$，对于 $x/L < 0.2$

$f_{lp\text{-}OST} = 1.0$，对于 $0.2 \leqslant x/L < 0.4$

$f_{lp\text{-}OST} = -7.6f_{xL} + 4.04$，对于 $0.4 \leqslant x/L < 0.65$

$f_{lp\text{-}OST} = -0.9$，对于 $0.65 \leqslant x/L < 0.85$

$f_{lp\text{-}OST} = 6f_{xL} - 6$，对于 $0.85 \leqslant x/L$

$f_{lp\text{-}OSA}$——OSA 载荷工况的扭矩纵向分布系数，取为：

$f_{lp\text{-}OSA} = -(0.2 + 0.3f_T)$，对于 $x/L < 0.4$

$f_{lp\text{-}OSA} = (0.2 + 0.3f_T)(11.5f_{xL} - 5.6)$，对于 $0.4 \leqslant x/L < 0.6$

$f_{lp\text{-}OSA} = 1.3(0.2 + 0.3f_T)$，对于 $0.6 \leqslant x/L$

f_{BL}——B 与 L 的比，定义见本章第 3 节。

$C_{b\text{-}LC}$——所考虑装载工况的方形系数，定义见本章第 3 节。

$C_{W\text{-}LC}$——所考虑装载工况的水线面系数，定义见本章第 3 节。

WS——上风舷，船舶暴露于来浪的一侧。

LS——下风舷，船舶远离来浪的被遮蔽的一侧。

M_{wv}——垂向波浪弯矩，kNm，定义见本章第 4 节

Q_{wv}——垂向波浪剪力，kN，定义见本章第 4 节

M_{wh}——水平波浪弯矩，kNm，定义见本章第 4 节

M_{wt}——波浪扭矩，kNm，定义见本章第 4 节

LCF——动载荷工况组合系数

C_{WV}——应用于垂向波浪弯矩的载荷组合系数

C_{QW}——应用于垂向波浪剪力的载荷组合系数

C_{WH}——应用于水平波浪弯矩的载荷组合系数

C_{WT}——应用于波浪扭矩的载荷组合系数

C_{XS}——应用于纵荡加速度的载荷组合系数。

C_{XP}——应用于由纵摇加速度产生的纵向加速度的载荷组合系数。

C_{XG}——应用于纵摇运动产生的纵向加速度的载荷组合系数。

C_{YS}——应用于横荡加速度的载荷组合系数。

C_{YR}——应用于由横摇加速度产生的横向加速度的载荷组合系数。

C_{YG}——应用于由横摇运动产生的横向加速度的载荷组合系数。

C_{ZH}——应用于垂荡加速度的载荷组合系数。

C_{ZR}——应用于由横摇加速度产生的垂向加速度的载荷组合系数。

C_{ZP}——应用于由纵摇加速度产生的垂向加速度的载荷组合系数。

θ——横摇角，(°)，定义见本章第 3 节[2.1.1]。

φ——纵摇角，(°)，定义见本章第 3 节[2.1.2]。

ω_R——横摇角频率，取为：

$$\omega_R = \frac{2\pi}{T_\theta}，\text{rad/s}$$

T_R——横摇周期无量纲系数，取为：

$$T_R = T_\theta\sqrt{g/L}$$

T_θ——横摇周期，定义见本章第 3 节[2.1.1]。

1 一般要求

1.1 动载荷工况定义

1.1.1 下列等效设计波（EDW）为被用于结构评估的动载荷工况：

（1）HVM 载荷工况：

HVM-1 和 HVM-2：分别为垂向波浪弯矩在船中处最小和最大的迎浪等效设计波。

（2）HSA 载荷工况：

HSA-1 和 HSA-2：分别为迎浪时垂向加速度在艏部最大和最小的迎浪等效设计波。

（3）FVM 载荷工况：

FVM-1 和 FVM-2：分别为垂向波浪弯矩在船中处最小和最大的随浪等效设计波。

（4）BSR 载荷工况：

BSR-1P 和 BSR-2P：分别为波浪来自左舷时横摇运动最小（左舷向下）和最大（左舷向上）的横浪等效设计波。

BSR-1S 和 BSR-2S：分别为波浪来自右舷时横摇运动最大（右舷向下）和最小（右舷向上）的横浪等效设计波。

（5）BSP 载荷工况：

BSP-1P 和 BSP-2P：分别为左舷船中水线处水动压力最大和最小的横浪等效设计波。

BSP-1S 和 BSP-2S：分别为右舷船中水线处水动压力最大和最小的横浪等效设计波。

（6）OST 载荷工况：

OST-1P 和 OST-2P：分别为波浪来自左舷时距船尾 0.25L 处扭矩最小和最大时的斜浪等效设计波。

OST-1S 和 OST-2S：分别为波浪来自右舷时距船尾 0.25L 处扭矩最大和最小时的斜浪等效设计波。

（7）OSA 载荷工况：

OSA-1P 和 OSA-2P：分别为波浪来自左舷时纵摇加速度最大和最小时的斜浪等效设计波。

OSA-1S 和 OSA-2S：分别为波浪来自右舷时纵摇加速度最大和最小时的斜浪等效设计波。

注 1： 1 和 2 对应每一个等效设计波最大或最小的主导载荷分量。

注 2： P 和 S 分别对应于上风舷为左舷和右舷。

1.1.2 HSA 和 OSA 载荷工况不用于疲劳评估。

1.2 应用

1.2.1 本节动载荷工况应用于确定本章第 7 节设计载荷场景要求的动载荷。动载荷工况应用于如下的结构评估：

（1）强度评估：

- 板、骨材和主要支撑构件的描述性方法评估。
- 结构构件的直接强度方法（有限元分析）评估。

（2）疲劳评估：

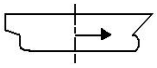
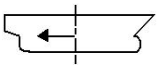
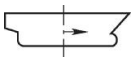
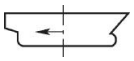
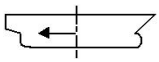
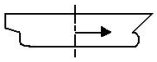
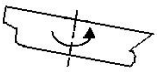
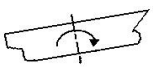
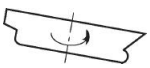
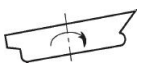
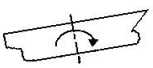
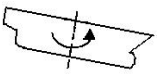
- 简化应力分析涵盖的结构节点。
- 有限元应力分析涵盖的结构节点。

2 强度评估的动载荷工况

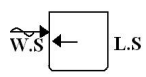
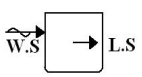
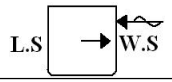
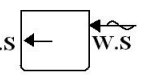
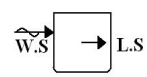
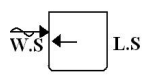
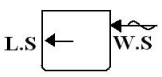
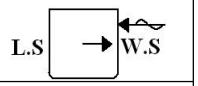
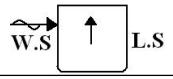
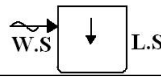
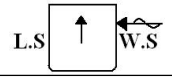
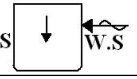
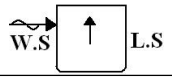
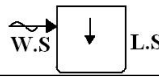
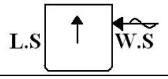
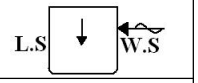
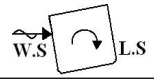
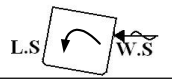
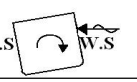
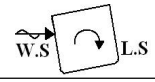
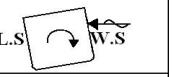
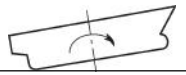
2.1 动载荷工况描述

2.1.1 表 2.1.1（1）至表 2.1.1（3）给出了强度评估应考虑的每一个动载荷工况相应的船舶运动响应和总体载荷。

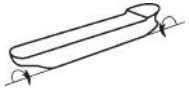
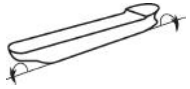
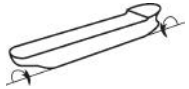
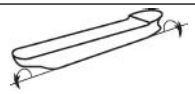
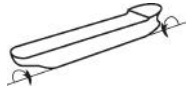
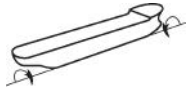
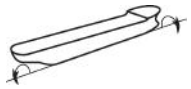
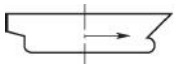
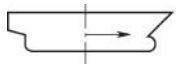
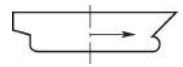
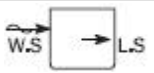
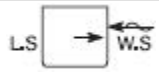
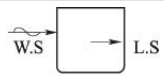
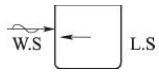
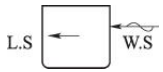
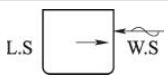
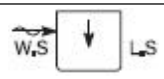
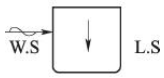
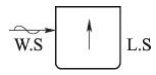
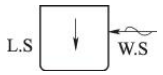
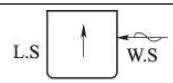
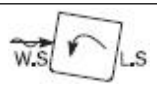
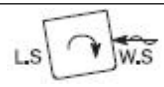
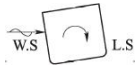
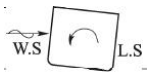
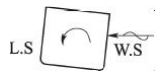
强度评估中用于HVM、HSA和FVM载荷工况的船舶响应　　表2.1.1（1）

载荷工况	HVM-1	HVM-2	HSA-1	HSA-2	FVM-1	FVM-2
等效设计波	HVM		HSA		FVM	
浪向	迎浪		迎浪		随浪	
作用	垂向弯矩最大		垂向加速度最大		垂向弯矩最大	
垂向波浪弯矩	中垂	中拱	中垂	中拱	中垂	中拱
垂向波浪剪力	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部
水平波浪弯矩	-	-	-	-	-	-
波浪扭矩	-	-	-	-	-	-
纵荡	向艉	向艏	向艉	向艏	向艏	向艉
纵荡加速度						
横荡	-	-	-	-	-	-
横荡加速度	-	-	-	-	-	-
垂荡	向下	向上	向下	向上	向下	向上
垂荡加速度						
横摇	-	-	-	-	-	-
横摇加速度	-	-	-	-	-	-
纵摇	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上	艏向上	艏向下
纵摇加速度						

强度评估中用于BSR和BSP载荷工况的船舶响应 **表2.1.1（2）**

载荷工况	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S	BSP-1P	BSP-2P	BSP-1S	BSP-2S
等效设计波	BSR		BSR		BSP		BSP	
浪向	横浪				横浪			
作用	横摇最大				水线处压力最大			
垂向波浪弯矩	-	-	-	-	中垂	中拱	中垂	中拱
垂向波浪剪力	-	-	-	-	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部
水平波浪弯矩	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉
波浪扭矩	-	-	-	-	-	-	-	-
纵荡	-	-	-	-	-	-	-	-
纵荡加速度	-	-	-	-	-	-	-	-
横荡	向右舷	向左舷	向左舷	向右舷	向左舷	向右舷	向右舷	向左舷
横荡加速度								
垂荡	向下	向上	向下	向上	向下	向上	向下	向上
垂荡加速度								
横摇	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上
横摇加速度								
纵摇	-	-	-	-	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上
纵摇加速度	-	-	-	-				

强度评估中用于OST和OSA载荷工况的船舶响应　　表2.1.1（3）

载荷工况	OST-1P	OST-2P	OST-1S	OST-2S	OSA-1P	OSA-2P	OSA-1S	OSA-2S
等效设计波	OST				OSA			
浪向	斜浪				斜浪			
作用	扭矩最大				纵摇加速度最大			
垂向波浪弯矩	中垂	中拱	中垂	中拱	中拱	中垂	中拱	中垂
垂向波浪剪力	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部
水平波浪弯矩	左舷受拉	右舷受拉	右舷受拉	左舷受拉	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉
波浪扭矩								
纵荡	向艏	向艉	向艏	向艉	向艏	向艉	向艏	向艉
纵荡加速度								
横荡	向右舷	向左舷	向左舷	向右舷	向左舷	向右舷	向右舷	向左舷
横荡加速度								
垂荡	向下	向上	向下	向上	向上	向下	向上	向下
垂荡加速度								
横摇	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上
横摇加速度								
纵摇	艏向上	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上	艏向下
纵摇加速度								

2.2 载荷组合系数

2.2.1 用于强度评估总体载荷及惯性载荷分量的载荷组合系数 LCF 的定义见：

表 2.2.1（1）：HVM、HSA 和 FVM 载荷工况的载荷组合系数。

表 2.2.1（2）：BSR 和 BSP 载荷工况的载荷组合系数。

表 2.2.1（3）：OST 和 OSA 载荷工况的载荷组合系数。

强度评估中用于HVM、HSA和FVM载荷工况的载荷组合系数　　表2.2.1（1）

载荷分量		LCF	HVM-1	HVM-2	HSA-1	HSA-2	FVM-1	FVM-2
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	-1	1	-0.7	0.7	-1	1
	Q_{wv}	C_{QW}	$-f_{lp}$	f_{lp}	$-0.6f_{lp}$	$0.6f_{lp}$	$-f_{lp}$	f_{lp}
	M_{wh}	C_{WH}	0	0	0	0	0	0
	M_{wt}	C_{WT}	0	0	0	0	0	0
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	$0.42-5.9f_{TL}$	$5.9f_{TL}-0.42$	$1.2-18.18f_{TL}$	$18.18f_{TL}-1.2$	$0.13-4.86\,f_{TL}$	$4.86\,f_{TL}-0.13$
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	-0.55	0.55	-1	1	0.1	-0.1
	$g\sin\varphi$	C_{XG}	0.5	-0.5	0.85	-0.85	-0.15	0.15
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	0	0	0	0	0	0
	a_{roll-y}	C_{YR}	0	0	0	0	0	0
	$g\sin\theta$	C_{YG}	0	0	0	0	0	0
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	$6.03f_{TL}-0.03$	$0.03-6.03f_{TL}$	$3.18C_{b-LC}-2.05$	$2.05-3.18C_{b-LC}$	0.15	-0.15
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0	0	0	0	0	0
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	-0.55	0.55	-1	1	0.1	-0.1

强度评估中用于BSR和BSP载荷工况的载荷组合系数　　表2.2.1（2）

载荷分量		LCF	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	0	0	0	0
	Q_{wv}	C_{QW}	0	0	0	0
	M_{wh}	C_{WH}	1.06-15.3f_{TL}	15.3f_{TL}-1.06	15.3f_{TL}-1.06	1.06-15.3f_{TL}
	M_{wt}	C_{WT}	0	0	0	0
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	0	0	0	0
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0	0	0	0
	gsinφ	C_{XG}	0	0	0	0
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	0.4	-0.4	-0.4	0.4
	a_{roll-y}	C_{YR}	1	-1	-1	1
	gsinθ	C_{YG}	-1	1	1	-1
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	0.71-5.35f_{TL}	5.35f_{TL}-0.71	0.71-5.35f_{TL}	5.35f_{TL}-0.71
	a_{roll-z}	C_{ZR}	1	-1	-1	1
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0	0	0	0

续上表

载荷分量		LCF	BSP-1P	BSP-2P	BSP-1S	BSP-2S
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	0.13-7.52f_{TL}	7.52f_{TL}-0.13	0.13-7.52f_{TL}	7.52f_{TL}-0.13
	Q_{wv}	C_{QW}	（0.13-7.52f_{TL}）f_{lp}	（7.52f_{TL}-0.13）f_{lp}	（0.13-7.52f_{TL}）f_{lp}	（7.52f_{TL}-0.13）f_{lp}
	M_{wh}	C_{WH}	0.64-8.76f_{TL}	8.76f_{TL}-0.64	8.76f_{TL}-0.64	0.64-8.76f_{TL}
	M_{wt}	C_{WT}	0	0	0	0
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	0	0	0	0
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0.09-4.57f_{TL}	4.57f_{TL}-0.09	0.09-4.57f_{TL}	4.57f_{TL}-0.09
	gsinφ	C_{XG}	4.57f_{TL}-0.09	0.09-4.57f_{TL}	4.57f_{TL}-0.09	0.09-4.57f_{TL}
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	-0.9	0.9	0.9	-0.9
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.3	-0.3	-0.3	0.3
	gsinθ	C_{YG}	-0.2	0.2	0.2	-0.2
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	1	-1	1	-1
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.5	-0.5	-0.5	0.5
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0.09-4.57f_{TL}	4.57f_{TL}-0.09	0.09-4.57f_{TL}	4.57f_{TL}-0.09

强度评估中用于OST和OSA载荷工况的载荷组合系数　　表2.2.1（3）

载荷分量		LCF	OST-1P	OST-2P	OST-1S	OST-2S
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	$0.9f_{TL}$-0.54	0.54-$0.9f_{TL}$	$0.9f_{TL}$-0.54	0.54-$0.9f_{TL}$
	Q_{wv}	C_{QW}	$(2.44f_{TL}$-0.67$)f_{lp}$	(0.67-$2.44f_{TL})f_{lp}$	$(2.44f_{TL}$-0.67$)f_{lp}$	(0.67-$2.44f_{TL})f_{lp}$
	M_{wh}	C_{WH}	-1	1	1	-1
	M_{wt}	C_{WT}	$-f_{lp\text{-}OST}$	$f_{lp\text{-}OST}$	$f_{lp\text{-}OST}$	$-f_{lp\text{-}OST}$
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	$10.94f_{TL}$-0.92	0.92-$10.94f_{TL}$	$10.94f_{TL}$-0.92	0.92-$10.94f_{TL}$
	$a_{pitch\text{-}x}$	C_{XP}	1-$5.1f_{TL}$	$5.1f_{TL}$-1	1-$5.1f_{TL}$	$5.1f_{TL}$-1
	gsinφ	C_{XG}	$5.6f_{TL}$-0.77	0.77-$5.6f_{TL}$	$5.6f_{TL}$-0.77	0.77-$5.6f_{TL}$
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	0.2	-0.2	-0.2	0.2
	$a_{roll\text{-}y}$	C_{YR}	0.24-$0.94f_{TL}$	$0.94f_{TL}$-0.24	$0.94f_{TL}$-0.24	0.24-$0.94f_{TL}$
	gsinθ	C_{YG}	$0.7f_{TL}$-0.15	0.15-$0.7f_{TL}$	0.15-$0.7f_{TL}$	$0.7f_{TL}$-0.15
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	0.32-$1.74f_{TL}$	$1.74f_{TL}$-0.32	0.32-$1.74f_{TL}$	$1.74f_{TL}$-0.32
	$a_{roll\text{-}z}$	C_{ZR}	0.24-$0.94f_{TL}$	$0.94f_{TL}$-0.24	$0.94f_{TL}$-0.24	0.24-$0.94f_{TL}$
	$a_{pitch\text{-}z}$	C_{ZP}	1-$5.1f_{TL}$	$5.1f_{TL}$-1	1-$5.1f_{TL}$	$5.1f_{TL}$-1

续上表

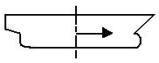
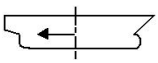
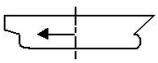
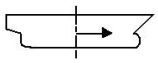
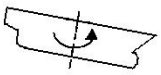
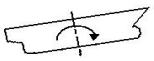
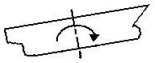
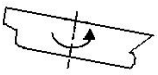
载荷分量		LCF	OSA-1P	OSA-2P	OSA-1S	OSA-2S
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	0.65-$3.18f_{TL}$	$3.18f_{TL}$-0.65	0.65-$3.18f_{TL}$	$3.18f_{TL}$-0.65
	Q_{wv}	C_{QW}	$(0.55\text{-}1.7f_{TL})f_{lp}$	$(1.7f_{TL}$-0.55$)f_{lp}$	$(0.55\text{-}1.7f_{TL})f_{lp}$	$(1.7f_{TL}$-0.55$)f_{lp}$
	M_{wh}	C_{WH}	0.2	-0.2	-0.2	0.2
	M_{wt}	C_{WT}	$-0.9f_{lp\text{-}OSA}$	$0.9f_{lp\text{-}OSA}$	$0.9f_{lp\text{-}OSA}$	$-0.9f_{lp\text{-}OSA}$
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	-0.3	0.3	-0.3	0.3
	$a_{pitch\text{-}x}$	C_{XP}	1	-1	1	-1
	gsinφ	C_{XG}	-0.7	0.7	-0.7	0.7
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	-0.19-$0.4f_{TL}$	0.19+$0.4f_{TL}$	0.19+$0.4f_{TL}$	-0.19-$0.4f_{TL}$
	$a_{roll\text{-}y}$	C_{YR}	0.1	-0.1	-0.1	0.1
	gsinθ	C_{YG}	-0.1	0.1	0.1	-0.1
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	$4.06f_{TL}$-0.31	0.31-$4.06f_{TL}$	$4.06f_{TL}$-0.31	0.31-$4.06f_{TL}$
	$a_{roll\text{-}z}$	C_{ZR}	0.1	-0.1	-0.1	0.1
	$a_{pitch\text{-}z}$	C_{ZP}	1	-1	1	-1

3 疲劳评估的动载荷工况

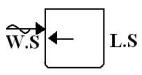
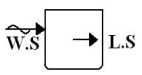
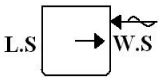
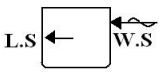
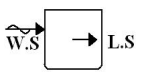
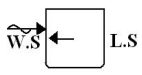
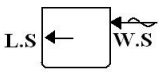
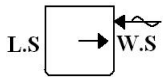
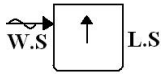
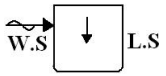
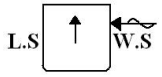
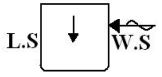
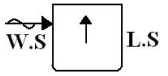
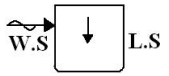
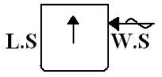
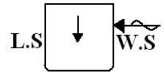
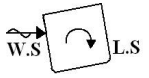
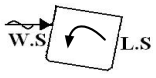
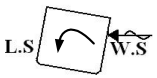
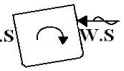
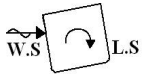
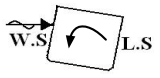
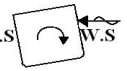
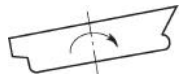
3.1 动载荷工况描述

3.1.1 表 3.1.1（1）至表 3.1.1（3）给出了对应于疲劳评估应考虑的每一个动载荷工况的船舶运动响应和总体载荷。

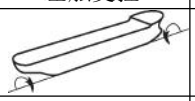
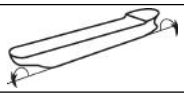
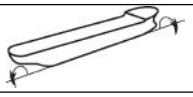
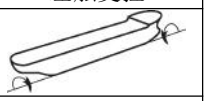
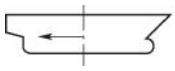
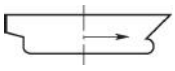
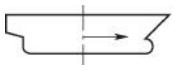
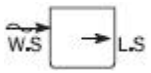
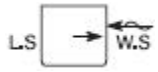
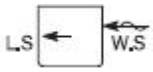
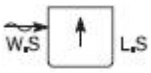
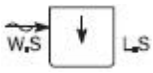
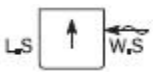
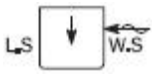
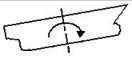
疲劳评估中用于 HVM 和 FVM 载荷工况的船舶响应　　表 3.1.1（1）

载荷工况	HVM-1	HVM-2	FVM-1	FVM-2
等效设计波	HVM		FVM	
浪向	迎浪		随浪	
作用	垂向弯矩最大		垂向弯矩最大	
垂向波浪弯矩	中垂	中拱	中垂	中拱
垂向波浪剪力	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部
水平波浪弯矩	-	-	-	-
波浪扭矩	-	-	-	-
纵荡	向艉	向艏	向艏	向艉
纵荡加速度				
横荡	-	-	-	-
横荡加速度	-	-	-	-
垂荡	向下	向上	向下	向上
垂荡加速度				
横摇	-	-	-	-
横摇加速度	-	-	-	-
纵摇	艏向下	艏向上	艏向上	艏向下
纵摇加速度				

疲劳评估中用于 BSR 和 BSP 载荷工况的船舶响应 **表 3.1.1（2）**

载荷工况	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S	BSP-1P	BSP-2P	BSP-1S	BSP-2S
等效设计波	BSR		BSR		BSP		BSP	
浪向	横浪				横浪			
作用	横摇最大				水线处压力最大			
垂向波浪弯矩	-	-	-	-	中垂	中拱	中垂	中拱
垂向波浪剪力	-	-	-	-	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部
水平波浪弯矩	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉	右舷受拉	左舷受拉	左舷受拉	右舷受拉
波浪扭矩	-	-	-	-	-	-	-	-
纵荡	-	-	-	-	-	-	-	-
纵荡加速度	-	-	-	-	-	-	-	-
横荡	向右舷	向左舷	向左舷	向右舷	向左舷	向右舷	向右舷	向左舷
横荡加速度								
垂荡	向下	向上	向下	向上	向下	向上	向下	向上
垂荡加速度								
横摇	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上
横摇加速度								
纵摇	-	-	-	-	艏向下	艏向上	艏向下	艏向上
纵摇加速度	-	-	-	-				

疲劳评估中用于 OST 载荷工况的船舶响应　　表 3.1.1（3）

载荷工况	OST-1P	OST-2P	OST-1S	OST-2S
等效设计波	OST			
浪向	斜浪			
作用	扭矩最大			
垂向波浪弯矩	中垂	中拱	中垂	中拱
垂向波浪剪力	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部	负-后部 正-前部	正-后部 负-前部
水平波浪弯矩	左舷受拉	右舷受拉	右舷受拉	左舷受拉
波浪扭矩				
纵荡	向艏	向艉	向艏	向艉
纵荡加速度				
横荡	向右舷	向左舷	向左舷	向右舷
横荡加速度				
垂荡	向下	向上	向下	向上
垂荡加速度				
横摇	左舷向下	左舷向上	右舷向下	右舷向上
横摇加速度				
纵摇	艏向上	艏向下	艏向上	艏向下
纵摇加速度				

3.2 动载荷组合系数

3.2.1 用于疲劳评估的总体载荷及惯性载荷分量的载荷组合系数 LCF 的定义见：

表 3.2.1（1）：HVM 和 FVM 载荷工况的载荷组合系数。

表 3.2.1（2）：BSR 和 BSP 载荷工况的载荷组合系数。

表 3.2.1（3）：OST 载荷工况的载荷组合系数。

疲劳评估中用于 HVM 和 FVM 载荷工况的载荷组合系数　　表 3.2.1（1）

载荷分量		LCF	HVM-1	HVM-2	FVM-1	FVM-2
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	-1	1	-1	1
	Q_{wv}	C_{QW}	$-f_{lp}$	f_{lp}	$-f_{lp}$	f_{lp}
	M_{wh}	C_{WH}	0	0	0	0
	M_{wt}	C_{WT}	0	0	0	0
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	$0.59-7.88f_{TL}$	$7.88f_{TL}-0.59$	$0.1-3.58f_{TL}$	$3.58f_{TL}-0.1$
	$a_{pitch\text{-}x}$	C_{XP}	$1.3C_{W\text{-}LC}-1.84$	$1.84-1.3C_{W\text{-}LC}$	0.1	-0.1
	gsinφ	C_{XG}	$0.97C_{W\text{-}LC}-0.25$	$0.25-0.97C_{W\text{-}LC}$	-0.12	0.12
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	0	0	0	0
	$a_{roll\text{-}y}$	C_{YR}	0	0	0	0
	gsinθ	C_{YG}	0	0	0	0
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	$10.43f_{TL}-0.01$	$0.01-10.43f_{TL}$	0.09	-0.09
	$a_{roll\text{-}z}$	C_{ZR}	0	0	0	0
	$a_{pitch\text{-}z}$	C_{ZP}	$1.3C_{W\text{-}LC}-1.84$	$1.84-1.3C_{W\text{-}LC}$	0.1	-0.1

疲劳评估中用于BSR和BSP载荷工况的载荷组合系数　　表3.2.1（2）

载荷分量		LCF	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	0	0	0	0
	Q_{wv}	C_{QW}	0	0	0	0
	M_{wh}	C_{WH}	0.92-12.8f_{TL}	12.8f_{TL}-0.92	12.8f_{TL}-0.92	0.92-12.8f_{TL}
	M_{wt}	C_{WT}	0	0	0	0
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	0	0	0	0
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0	0	0	0
	gsinφ	C_{XG}	0	0	0	0
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	1.43-18.6f_{TL}	18.6f_{TL}-1.43	18.6f_{TL}-1.43	1.43-18.6f_{TL}
	a_{roll-y}	C_{YR}	1	-1	-1	1
	gsinθ	C_{YG}	-1	1	1	-1
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	0.6-4.7f_{TL}	4.7f_{TL}-0.6	0.6-4.7f_{TL}	4.7f_{TL}-0.6
	a_{roll-z}	C_{ZR}	1	-1	-1	1
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0	0	0	0

续上表

载荷分量		LCF	BSP-1P	BSP-2P	BSP-1S	BSP-2S
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	0.19-9.32f_{TL}	9.32f_{TL}-0.19	0.19-9.32f_{TL}	9.32f_{TL}-0.19
	Q_{wv}	C_{QW}	（0.19-9.32f_{TL}）f_{lp}	（9.32f_{TL}-0.19）f_{lp}	（0.19-9.32f_{TL}）f_{lp}	（9.32f_{TL}-0.19）f_{lp}
	M_{wh}	C_{WH}	0.65-9.18f_{TL}	9.18f_{TL}-0.65	9.18f_{TL}-0.65	0.65-9.18f_{TL}
	M_{wt}	C_{WT}	0	0	0	0
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	0	0	0	0
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0	0	0	0
	gsinφ	C_{XG}	0	0	0	0
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	-0.56-5.1f_{TL}	0.56+5.1f_{TL}	0.56+5.1f_{TL}	-0.56-5.1f_{TL}
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.6	-0.6	-0.6	0.6
	gsinθ	C_{YG}	-0.4	0.4	0.4	-0.4
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	1	-1	1	-1
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.6	-0.6	-0.6	0.6
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0	0	0	0

疲劳评估中用于 OST 载荷工况的载荷组合系数　　表 3.2.1（3）

载荷分量		LCF	OST-1P	OST-2P	OST-1S	OST-2S
船体梁载荷	M_{wv}	C_{WV}	-0.5	0.5	-0.5	0.5
	Q_{wv}	C_{QW}	$-0.5f_{lp}$	$0.5f_{lp}$	$-0.5f_{lp}$	$0.5f_{lp}$
	M_{wh}	C_{WH}	-1	1	1	-1
	M_{wt}	C_{WT}	$-f_{lp\text{-}OST}$	$f_{lp\text{-}OST}$	$f_{lp\text{-}OST}$	$-f_{lp\text{-}OST}$
纵向加速度	a_{surge}	C_{XS}	$2.69-17.58f_{BL}$	$17.58f_{BL}-2.69$	$2.69-17.58f_{BL}$	$17.58f_{BL}-2.69$
	$a_{pitch\text{-}x}$	C_{XP}	$3.01C_{b\text{-}LC}-2.06$	$2.06-3.01C_{b\text{-}LC}$	$3.01C_{b\text{-}LC}-2.06$	$2.06-3.01C_{b\text{-}LC}$
	gsinφ	C_{XG}	$1.56-2.41C_{b\text{-}LC}$	$2.41C_{b\text{-}LC}-1.56$	$1.56-2.41C_{b\text{-}LC}$	$2.41C_{b\text{-}LC}-1.56$
横向加速度	a_{sway}	C_{YS}	0.2	-0.2	-0.2	0.2
	$a_{roll\text{-}y}$	C_{YR}	$1.43C_{b\text{-}LC}-0.92$	$0.92-1.43C_{b\text{-}LC}$	$0.92-1.43C_{b\text{-}LC}$	$1.43C_{b\text{-}LC}-0.92$
	gsinθ	C_{YG}	$0.24-8.23f_{TL}$	$8.23f_{TL}-0.24$	$8.23f_{TL}-0.24$	$0.24-8.23f_{TL}$
垂向加速度	a_{heave}	C_{ZH}	$4C_{b\text{-}LC}-3$	$3-4C_{b\text{-}LC}$	$4C_{b\text{-}LC}-3$	$3-4C_{b\text{-}LC}$
	$a_{roll\text{-}z}$	C_{ZR}	$1.43C_{b\text{-}LC}-0.92$	$0.92-1.43C_{b\text{-}LC}$	$0.92-1.43C_{b\text{-}LC}$	$1.43C_{b\text{-}LC}-0.92$
	$a_{pitch\text{-}z}$	C_{ZP}	$3.01C_{b\text{-}LC}-2.06$	$2.06-3.01C_{b\text{-}LC}$	$3.01C_{b\text{-}LC}-2.06$	$2.06-3.01C_{b\text{-}LC}$

第 3 节　船舶运动和加速度

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

a_0——加速度参数，取为：

$$a_0 = (1.58 - 0.47C_b)\left(\frac{2.4}{\sqrt{L}} + \frac{34}{L} - \frac{600}{L^2}\right)$$

T_θ——横摇周期，s，定义见[2.1.1]。

θ——横摇角，(º)，定义见[2.1.1]。

T_φ——纵摇周期，s，定义见[2.1.2]。

φ——纵摇角，(º)，定义见[2.1.2]。

R——船舶摇摆运动中心的垂向坐标，m，取为：

$$R = \min\left(\frac{D}{4} + \frac{T_{LC}}{2}, \frac{D}{2}\right)$$

C_{XG}, C_{XS}, C_{XP}, C_{YG}, C_{YS}, C_{YR}, C_{ZH}, C_{ZR} 和 C_{ZP}：本章，第 2 节定义的载荷组合系数。

$a_{roll\text{-}y}$——横摇引起的横向加速度，m/s²，定义见[3.3.2]。

$a_{pitch\text{-}x}$——纵摇引起的纵向加速度，m/s²，定义见[3.3.1]。

$a_{roll\text{-}z}$——横摇引起的垂向加速度，m/s²，定义见[3.3.3]。

$a_{pitch\text{-}z}$——纵摇引起的垂向加速度，m/s²，定义见[3.3.3]。

f_T——某一装载工况下吃水与结构吃水的比，取为：

$$f_T = \frac{T_{LC}}{T_{SC}}$$，但取不小于 0.5。

T_{LC}——所考虑装载工况的船中处的吃水，m。

f_{BL}——B 与 L 的比，取为：

$$f_{BL} = \frac{B}{L}$$

x, y, z——所考虑点在本章第 1 节 [1.2.1]所定义的坐标系下的 X，Y，Z 坐标，m。

$C_{b\text{-}LC}$——所考虑装载工况的方形系数，定义见表 2.1.1。

$C_{W\text{-}LC}$——所考虑装载工况的水线面系数，定义见表 2.1.1。

f_{ps}——与本章第 7 节规定的适用设计载荷场景所对应的强度评估系数，取为：

f_{ps} = 1.0，对于极端载荷设计载荷场景

f_{ps} = 0.8，对于压载水置换设计载荷场景

f_{ps} = 0.8，对于航行意外进水设计载荷场景

f_{ps} = 0.4，对于在港/遮蔽水域设计载荷场景

f_{fa}——疲劳系数，应采取为：

$$f_{fa} = 0.9$$

f_{nl}——非线性系数，取为 1.0。

1 一般要求

1.1 定义

1.1.1 假定船舶运动和加速度是正弦变化的。本节公式定义的运动值为单幅值，即峰值到谷值高度的一半。

2 船舶运动和加速度

2.1 船舶运动

2.1.1 横摇运动

横摇周期 T_θ，s，取为：

$$T_\theta = \frac{2.3\pi k_r}{\sqrt{gGM}}$$

横摇角θ，(°)，取为：

$$\theta = \frac{9000(1.25-0.025T_\theta)f_p f_{BK}}{(B+75)\pi}$$

式中：

f_p——系数，取为：

$f_p = f_{ps}$，对于强度评估

$f_p = f_{fa}(0.239-5.86f_T B\times 10^{-4})$，对于疲劳评估

f_{BK}——取为：

f_{BK} = 1.2，无舭龙骨的船舶

f_{BK} = 1.0，有舭龙骨的船舶

k_r——所考虑装载工况的横摇回转半径，m，除非在装载手册中提供，否则应取表 2.1.1 中的值。

GM——所考虑装载工况的初稳性高度，m，除非在装载手册中提供，否则应取表 2.1.1 中的值。

用于矿砂船的 k_r 值和 GM 值　　表 2.1.1

装载工况(1)		T_{LC}	k_r	GM	$C_{b\text{-}LC}$	$C_{W\text{-}LC}$
满载工况	均匀轻货	T_{SC}	0.25B	0.12B	C_b	C_W
	均匀重货		0.25B	0.25B	C_b	C_W
最大压载工况		$T_{BAL\text{-}H}$	0.40B	0.25B	$C_{b\text{-}BAL\text{-}H}$	$C_{W\text{-}BAL\text{-}H}$
正常压载工况		T_{BAL}	0.40B	0.33B	$C_{b\text{-}BAL}$	$C_{W\text{-}BAL}$

（1） 对于吃水大于等于 0.9T_{SC} 的多港装载工况，k_r 值、GM 值、$C_{b\text{-}LC}$ 值和 $C_{W\text{-}LC}$ 值除非在装载手册中提供，否则应从最适当的满载工况中选取。对于吃水在 $T_{BAL\text{-}H}$ 和 0.9T_{SC} 间的多港装载工况，k_r 值、GM 值、$C_{b\text{-}LC}$ 值和 $C_{W\text{-}LC}$ 值除非在装载手册中提供，否则应根据实际的吃水由最大压载工况和最适当的满载工况线性插值得到。对于吃水小于 $T_{BAL\text{-}H}$ 的多港装载工况，k_r 值、GM 值、$C_{b\text{-}LC}$ 值和 $C_{W\text{-}LC}$ 值应取最大压载工况所采用的值。

2.1.2 纵摇运动

纵摇周期 T_φ，s，取为：

$$T_\varphi = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_\varphi}{g}}$$

式中：$\lambda_\varphi = 0.6(1+f_T)L$

纵摇角φ，(°)，取为：

$$\varphi = 1350 f_{nl} f_p f_\varphi L^{-0.94} \left\{ 1.0 + \left(\frac{2.57}{\sqrt{gL}} \right)^{1.2} \right\}$$

式中：

f_p——系数，取为：

$f_p = f_{ps}$，　　对于强度评估

$f_p = f_{fa}$ [(0.27-0.02f_T)-(13-5f_T)Lx10^{-5}] ，　　对于疲劳评估

$f\varphi$——系数，取为：

$f\varphi$=1.66-0.92$C_{b\text{-}LC}$，　　对于强度评估

$f\varphi$=1.71-0.93$C_{b\text{-}LC}$，　　对于疲劳评估

2.2 船舶重心处加速度

2.2.1 纵荡加速度

由纵荡产生的纵向加速度，m/s^2，取为：

$$a_{surge} = 0.2 f_p f_{s1} f_{nl} a_0 g$$

式中：

f_p——系数，取为：

$f_p = f_{ps}$，　　对于强度评估

$f_p = f_{fa}$[0.27-(15+4f_T)Lx10^{-5})]，　　对于疲劳评估

f_{s1}——系数，取为：

f_{s1}=1.65-7.23f_{TL}，　　对于强度评估

f_{s1}=1.82-7.49f_{TL}，　　对于疲劳评估

2.2.2 横荡加速度

由横荡产生的横向加速度，m/s^2，取为：

$$a_{sway} = 0.3 f_p f_{s2} f_{nl} a_0 g$$

式中，

f_p——系数，取为：

$f_p = f_{ps}$，　　对于强度评估

$f_p = f_{fa}$[0.24-(5-2f_T)B×10^{-4}]，　　对于疲劳评估

f_{s2}——系数，取为：

f_{s2}=2.2-8.26$f_{TL}C_{W\text{-}LC}^{-3}$，　　对于强度评估

f_{s2}=2.46-10.24$f_{TL}C_{W\text{-}LC}^{-2}$，　　对于疲劳评估

2.2.3 垂荡加速度

由垂荡产生的垂向加速度，m/s^2，取为：

$$a_{heave} = f_p f_{s3} f_{nl} a_0 g$$

式中：

f_p——系数，取为：

$f_p = f_{ps}$，　　对于强度评估

$f_p = f_{fa}[(0.296+0.02f_T) - 18.7L\times10^{-5}]$，　　对于疲劳评估

f_{s3}——系数，取为：

$f_{s3}=0.825+1.86f_{TL}$，　　对于强度评估

$f_{s3}=1$，　　对于疲劳评估

2.2.4 横摇加速度

横摇加速度，a_{roll}，　rad/s^2，取为：

$$a_{roll} = f_p f_{s4} \theta \frac{\pi}{180}\left(\frac{2\pi}{T_\theta}\right)^2$$

式中：

θ——采用f_p等于 1.0 计算的横摇角

f_p——系数，取为：

$f_p = f_{ps}$，　　对于强度评估

$f_p = f_{fa}\left(0.23-4f_T B\times10^{-4}\right)$　　对于疲劳评估

f_{s4}——系数，取为：

$f_{s4}=1.0$，　　对于强度评估

$f_{s4}=1.0$，　　对于疲劳评估

2.2.5 纵摇加速度

纵摇加速度，a_{pitch}，rad/s^2，取为：

$$a_{pitch} = f_p f_{s5} f_{nl}\left(\frac{3.1}{\sqrt{gL}}+1.0\right)\varphi\frac{\pi}{180}\left(\frac{2\pi}{T_\varphi}\right)^2$$

式中：

φ——采用f_p等于 1.0 计算的纵摇角

f_p——系数，取为：

$f_p = f_{ps}$，　　对于强度评估

$f_p = f_{fa}\left[0.297-(5.3+6.36f_T)L\times10^{-5}\right]$，　　对于疲劳评估

f_{s5}——系数，取为：

$f_{s5}=0.796+5.95f_{TL}$，　　对于强度评估

$f_{s5}=0.9+6.34f_{TL}$，　　对于疲劳评估

3 任意位置处的加速度

3.1 一般规定

3.1.1 用于获得任意位置惯性载荷的加速度基于船舶固定坐标系定义。因此[3.2]和[3.3]定义的加速度值包括了由瞬时的横摇角和纵摇角产生的重力加速度分量。

3.1.2 用于本章第 2 节定义的动载荷工况的加速度在[3.2]给出。

3.1.3 [3.3]定义的加速度包络值为建议值，可用于需要提供最大设计加速度值的其他设计目的，如，起重机基座，机器基座等。

3.2 动载荷工况的加速度

3.2.1 一般规定

用于本章第 2 节定义的动载荷工况的加速度在[3.2.2]到[3.2.4]给出。

3.2.2 纵向加速度

用于动载荷工况的任意一点的纵向加速度，m/s^2，取为：

$$a_X = -C_{XG} g \sin\varphi + C_{XS} a_{surge} + C_{XP} a_{pitch} (z - R)$$

3.2.3 横向加速度

用于动载荷工况的任意一点的横向加速度，m/s^2，取为：

$$a_Y = C_{YG} g \sin\theta + C_{YS} a_{sway} - C_{YR} a_{roll} (z - R)$$

3.2.4 垂向加速度

用于动载荷工况的任意一位置处的垂向加速度，m/s^2，取为：

$$a_Z = C_{ZH} a_{heave} + C_{ZR} a_{roll} y - C_{ZP} a_{pitch} (x - 0.45L)$$

3.3 加速度包络值

3.3.1 纵向加速度

任意位置处的纵向加速度包络值，$a_{x\text{-}env}$，m/s^2，取为：

$$a_{x-env} = 0.7\sqrt{a_{surge}^2 + \left[\frac{L}{325}\left(g\sin\varphi + a_{pitch-x}\right)\right]^2}$$

式中：

$a_{pitch\text{-}x}$——由纵摇产生的纵向加速度，m/s^2

$$a_{pitch-x} = a_{pitch}(z - R)$$

3.3.2 横向加速度

任意位置处的横向加速度包络值，$a_{y\text{-}env}$，m/s^2，取为：

$$a_{y-env} = \sqrt{a_{sway}^2 + \left(g\sin\theta + a_{roll-y}\right)^2}$$

式中：

$a_{roll\text{-}y}$——由横摇产生的横向加速度，m/s^2

$$a_{roll-y} = a_{roll}(z - R)$$

3.3.3 垂向加速度

任意位置处的垂向加速度包络值，$a_{z\text{-}env}$，m/s^2，取为：

$$a_{z-env}=\sqrt{a_{heave}^2+\left(\left(0.3+\frac{L}{325}\right)a_{pitch-z}\right)^2+\left(1.2a_{roll-z}\right)^2}$$

式中：

$a_{pitch-z}$——由纵摇产生的垂向加速度，m/s^2

$$a_{pitch-z}=a_{pitch}\left(x-0.45L\right)$$

a_{roll-z}——由横摇产生的垂向加速度，m/s^2

$$a_{roll-z}=a_{roll}\,y$$

第 4 节　船体梁载荷

符号

本节未定义的符号参见第 1 章第 4 节。

x——计算点在本章第 1 节[1.2.1]定义的参考坐标系中的 X 坐标，m。

C_s——波浪系数，定义见本节[2.2.1]。

f_β——浪向修正系数，取为：

- 对于强度评估

  f_β=0.8 用于极限波浪载荷设计载荷场景的 BSR 和 BSP 载荷工况

  f_β=1.0 用于极限波浪载荷设计载荷场景的 HVM、HSA、FVM、OST 和 OSA 载荷工况

  f_β=1.0 用于航行压载水置换、在港/遮蔽水域和意外进水设计载荷场景

- 对于疲劳评估

  f_β=1.0

f_{ps}——系数，定义见本章第 3 节。

HVM、HSA、FVM、BSR、 BSP、OST 和 OSA——动载荷工况，定义见本章第 2 节。

1 应用

1.1 一般要求

1.1.1 用于静（S）设计载荷场景的船体梁载荷应取自[2] 定义的静水载荷。

1.1.2 用于静加动（S+D）设计载荷场景的船体梁载荷应由每一个动载荷工况获得，应取为[2] 定义的静水载荷和[3.5] 定义的动载荷之和。

2 船体梁静水载荷

2.1 一般要求

2.1.1 航行工况和在港/遮蔽水域工况

设计者应提供航行工况和在港/遮蔽水域工况的许用静水弯矩和许用静水剪力。

在货舱区域的各个横舱壁、货舱舱室中部、防撞舱壁、机舱前舱壁和机舱前后舱壁之间的中点位置处，应给出船体梁的许用静水载荷。其他位置处的船体梁许用弯矩和剪力可由线性插值得到。

注释 1：对于初步设计，建议船体梁许用中拱和中垂静水弯矩至少比装载手册中装载工况的最大静水

弯矩高出 5%，船体梁许用静水剪力至少比装载手册中装载工况的最大静水剪力高出 10%，以考虑船舶设计和建造阶段的增长和设计余量。

2.1.2 进水工况

设计者应提供进水工况（如适用）的许用静水弯矩和剪力。

2.1.3 疲劳评估的静水载荷

用于疲劳评估的静水弯矩和剪力值及其分布应取自船舶大部分营运周期内的装载工况最具代表性的值。矿砂船的典型工况为正常压载工况、均匀满载工况。采用的装载工况见本章第 8 节[5]的规定。

2.2 波浪系数 C_s

2.2.1 波浪系数按下列各式计算

$$C_s = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1.5}，\quad 对于\ 90\text{m} \leqslant L \leqslant 300\text{m}\ 的船舶$$

$$C_s = 10.75，\qquad 对于\ 300\text{m} < L \leqslant 350\text{m}\ 的船舶$$

$$C_s = 10.75 - \left(\frac{L - 350}{150}\right)^{1.5}，\quad 对于\ 350\text{m} < L \leqslant 500\text{m}\ 的船舶$$

2.3 垂向静水弯矩

2.3.1 航行工况静水弯矩

作为一个指导值，初期设计阶段，如设计者未提供，中拱和中垂状态下的静水弯矩 $M_{sw\text{-}h\text{-}min}$ 和 $M_{sw\text{-}s\text{-}min}$，kNm，分别取为：

中拱状态：

$$M_{sw-h-min} = f_{sw}\left(171 C_s L^2 B(C_b + 0.7)10^{-3} - M_{wv-h-mid}\right)$$

中垂状态：

$$M_{sw-s-min} = -0.85 f_{sw}\left(171 C_s L^2 B(C_b + 0.7)10^{-3} + M_{wv-s-mid}\right)$$

式中：

$M_{wv\text{-}h\text{-}mid}$ ——用于强度评估的中拱状态船中垂向波浪弯矩，定义见[3.2.1]，f_p 和 f_m 取 1.0。

$M_{wv\text{-}s\text{-}mid}$ ——用于强度评估的中垂状态船中垂向波浪弯矩，定义见[3.2.1]，f_p 和 f_m 取 1.0。

f_{sw}——沿船长的分布系数，见图 2.3.1，取为：

$f_{sw} = 0.0$，　对于 $x \leq 0$，

$f_{sw} = 0.15$，对于 $x = 0.1L$，

$f_{sw} = 1.0$，　对于 $0.3L \leq x \leq 0.7L$，

$f_{sw} = 0.15$，对于 $x = 0.9L$，

$f_{sw} = 0.0$，　对于 $x \geq L$

位于其间的 f_{sw} 值通过线性插值得到。

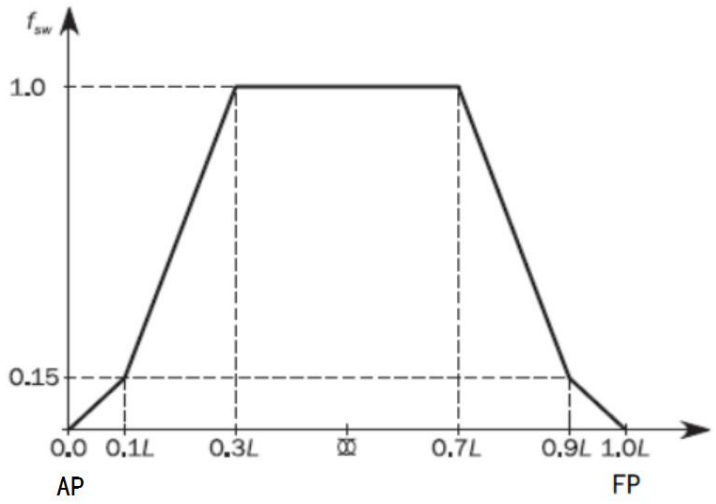


图 2.3.1 分布系数 f_{sw}

2.3.2 航行工况许用垂向静水弯矩

任一纵向位置航行工况的许用垂向静水弯矩，$M_{sw\text{-}h}$ 和 $M_{sw\text{-}s}$ 应包络以下值：

（1）对于本章第 8 节定义的航行装载工况，分别计算中拱和中垂状态下的最严重的静水弯矩。

（2）装载手册中定义的航行装载工况的最严重的静水弯矩。

2.3.3 在港/遮蔽水域工况和舱室试验工况许用垂向静水弯矩

任一纵向位置在港/遮蔽水域工况和舱室试验工况的许用垂向静水弯矩，$M_{sw\text{-}p\text{-}h}$ 和 $M_{sw\text{-}p\text{-}s}$ 应包络以下值：

（1）对于本章第 8 节定义的在港/遮蔽水域装载工况，分别计算中拱和中垂状态下的最严重的静水弯矩。

（2）装载手册中定义的在港/遮蔽水域装载工况的最严重的静水弯矩。

2.3.4 航行进水工况（如适用）许用垂向静水弯矩

- 任一纵向位置在航行进水工况下的许用垂向静水弯矩 $M_{sw\text{-}f}$ 应包络装载手册中定义的完整和进水航行装载工况的最严重的静水弯矩。

2.4 垂向静水剪力

2.4.1 航行工况静水剪力

作为一个指导值，初期设计阶段，如设计者未提供，中拱和中垂状态下的静水剪力 $Q_{sw\text{-}pos\text{-}min}$ 和 $Q_{sw\text{-}neg\text{-}min}$，kN，分别取为：

$$Q_{sw-pos-\min} = \frac{5 f_{qs} M_{sw-\min}}{L}$$

$$Q_{sw-neg-\min} = \frac{-5 f_{qs} M_{sw-\min}}{L}$$

$M_{\text{sw-min}}$——在 f_{sw} 取 1， $M_{\text{sw-h-min}}$ 和 $M_{\text{sw-s-min}}$ 绝对值的最大值。

f_{qs}——沿船长方向的分布系数，取为：

$f_{qs} = 0.0$, 对于 x $\leqslant$ 0，

$f_{qs} = 1.0$, 对于 $0.15\,L \leqslant$ x $\leqslant 0.3\,L$，

$f_{qs} = 0.8$, 对于 $0.4\,L \leqslant$ x $\leqslant 0.6\,L$，

$f_{qs} = 1.0$, 对于 $0.7\,L \leqslant$ x $\leqslant 0.85\,L$，

$f_{qs} = 0.0$， 对于 x $\geqslant L$

位于其间的 f_{qs} 值通过线性插值得到。

2.4.2 航行工况许用静水剪力

任一纵向位置航行工况的许用静水剪力，$Q_{sw\text{-}h}$ 和 $Q_{sw\text{-}s}$ 应包络以下值：

（1）本章第 8 节定义的航行装载工况的最严重的静水正剪力或负剪力的值。

（2）装载手册中定义的航行装载工况得到的最严重的静水剪力的值。

2.4.3 在港/遮蔽水域工况和舱室试验工况许用静水剪力

任一纵向位置在港/遮蔽水域和舱室试验工况下的许用静水剪力，$Q_{sw\text{-}p\text{-}h}$ 和 $Q_{sw\text{-}p\text{-}s}$ 应包络以下值：

（1）本章第 8 节定义的在港/遮蔽水域和舱室试验工况的最严重的静水正剪力或负剪力的值。

（2）装载手册中定义的在港/遮蔽水域载荷条件下得到的最严重的静水剪力的值。

2.4.4 航行进水工况（如适用）许用静水剪力

任一纵向位置进水工况的许用垂向静水剪力 $Q_{sw\text{-}f}$ 应包络装载手册中定义的航行进水工况经剪力修正后的最严重的静水剪力。

3 船体梁动载荷

3.1 垂向波浪弯矩

3.1.1 任一纵向位置的垂向波浪弯矩，kNm，应取为：

中拱状态

$$M_{wv\text{-}h}=0.19f_{nl\text{-}vh}f_mf_pC_sL^2BC_b$$

中垂状态

$$M_{wv\text{-}s}=-0.19f_{nl\text{-}vs}f_mf_pC_sL^2BC_b$$

式中：$f_{nl\text{-}vh}$——对中拱考虑非线性影响的系数，取为：

$f_{nl\text{-}vh}=1.0$ 对强度评估和疲劳评估

$f_{nl\text{-}vs}$——对中垂考虑非线性影响的系数，取为：

$f_{nl-vs}=0.58\dfrac{(C_b+0.7)}{C_b}$ ，对于强度评估

$f_{nl\text{-}vs}=1.0$ ，对于疲劳评估

f_p——系数，取为：

$f_p=f_{ps}$ ，对于强度评估

$f_p=0.9\,[\,0.269-(5.76+7.37f_T)\,L\times10^{-5}]$ ，对于疲劳评估

f_m——垂向波浪弯矩沿船长的分布系数，取为：

$f_m=0.0$，对于 $x\leqslant0$

$f_m=1.0$，对于 $0.4L\leqslant x\leqslant0.65L$

$f_m=0.0$，对于 $x\geqslant L$

位于其间的 f_m 值通过线性插值得到（见图 3.1.1）。

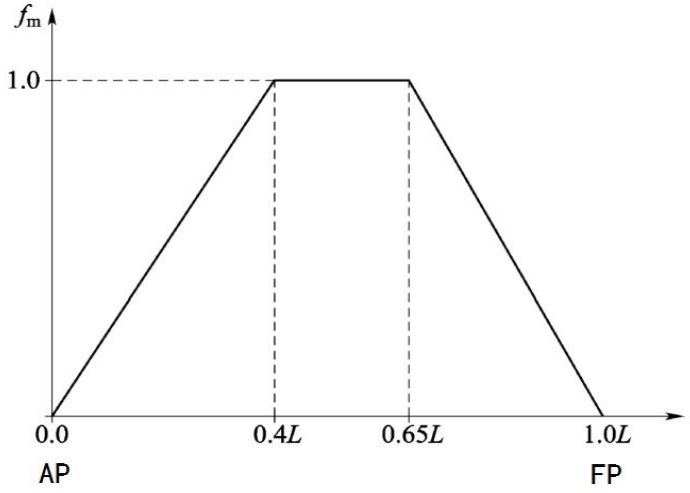


图 3.1.1　分布系数 f_m

3.2　垂向波浪剪力

3.2.1 任一纵向位置的垂向波浪剪力，kN，取为：

$$Q_{wv\text{-}pos}=0.52f_{q\text{-}pos}f_pC_sLBC_b$$

$$Q_{wv\text{-}neg}=-0.52f_{q\text{-}neg}f_pC_sLBC_b$$

式中：f_p——系数，取为：

$f_p=f_{ps}$，　　对于强度评估

$f_p=0.9[0.278-(17-3.3f_T)L\times10^{-5}]$，对于疲劳评估

$f_{q\text{-}pos}$——正波浪剪力沿船长的分布系数，取为：

$f_{q\text{-}pos}=0.0$，　　对于 $x\leqslant0$

$f_{q\text{-}pos}=0.92f_{nl\text{-}vh}$，　　对于 $0.2L\leqslant x\leqslant0.3L$

$f_{q\text{-}pos}=0.7$，　　对于 $0.4L\leqslant x\leqslant0.6L$

$f_{q\text{-}pos}=1.0f_{nl\text{-}vs}$，　　对于 $0.7L\leqslant x\leqslant0.85L$

$f_{q\text{-}pos}=0.0$，　　对于 $x\geqslant L$

位于其间的 $f_{q\text{-}pos}$ 值通过线性插值得到（见图 3.2.1（1））。

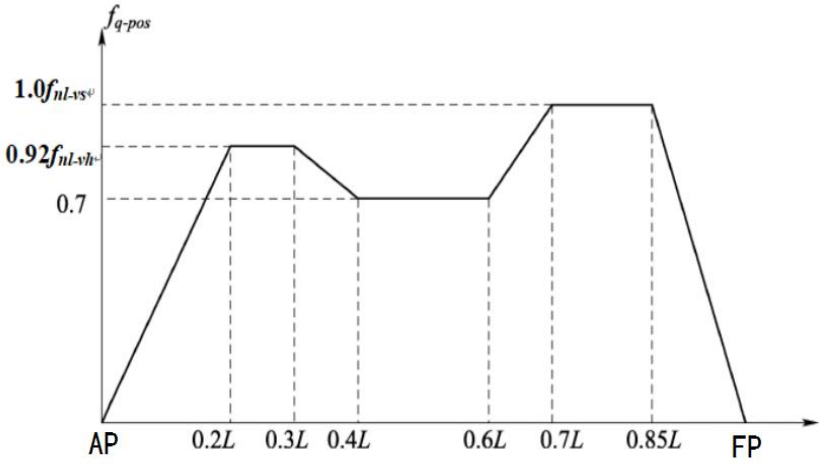


图 3.2.1（1）　正垂向剪力分布系数 $f_{q\text{-}pos}$

$f_{q\text{-}neg}$——负波浪剪力沿船长的分布系数，取为：

$f_{q\text{-}neg}$ = 0.0，　　对于 $x \leqslant 0$

$f_{q\text{-}neg} = 0.92 f_{nl\text{-}vs}$，　　对于 $0.2L \leqslant x \leqslant 0.3L$

$f_{q\text{-}neg}$ = 0.7，　　对于 $0.4L \leqslant x \leqslant 0.6L$

$f_{q\text{-}neg} = 1.0 f_{nl\text{-}vh}$，　　对于 $0.7L \leqslant x \leqslant 0.85L$

$f_{q\text{-}neg}$ = 0.0，　　对于 $x \geqslant L$

位于其间的 $f_{q\text{-}neg}$ 值通过线性插值得到（见图 3.2.1（2））。

$f_{nl\text{-}vh}$ 和 $f_{nl\text{-}vs}$——[3.1.1] 定义的考虑非线性影响的系数。

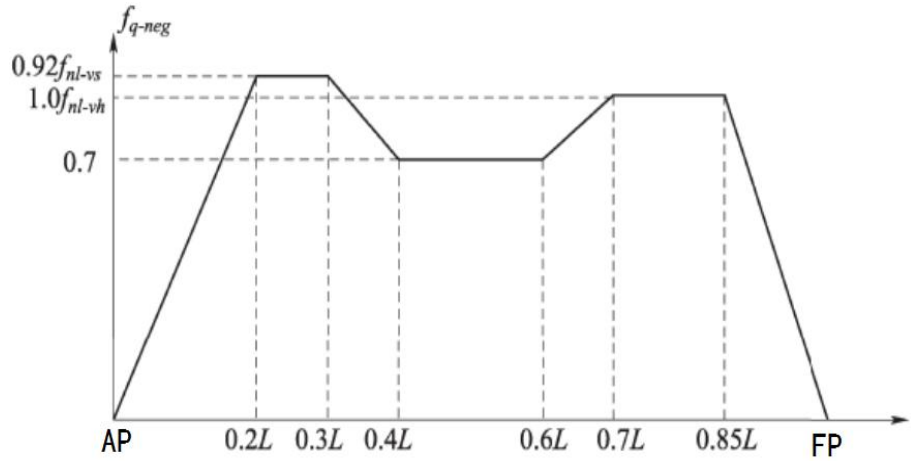


图 3.2.1（2）　负垂向剪力分布系数 $f_{q\text{-}neg}$

3.3 水平波浪弯矩

3.3.1 任一纵向位置的水平波浪弯矩 M_{wh}，kNm，取为：

$$M_{wh} = f_{nlh} f_p \left(0.31 + \frac{L}{2800}\right) f_m C_s L^2 T_{LC} C_b$$

式中：f_{nlh}——非线性影响系数，取为：

f_{nlh}=0.9，　　对于强度评估

f_{nlh}=1.0，　　对于疲劳评估

f_p——系数，取为：

$f_p = f_{ps}$，　　对于强度评估

$f_p = 0.9[(0.214+0.04f_T)+(11-13.56f_T)L\times10^{-5}]$，对于疲劳评估

f_m——[3.1.1] 定义的分布系数。

3.4 波浪扭矩

3.4.1 任一纵向位置的波浪扭矩 M_{wt}，kNm，取为：

$$M_{wt}=f_p(M_{wt1}+M_{wt2})$$

其中：

$$M_{wt1} = 0.4 f_{t1} C_s \sqrt{\frac{L}{T_{LC}}} B^2 D C_b$$

$$M_{wt2} = 0.22 f_{t2} C_s L B^2 C_b$$

式中：f_{t1}, f_{t2}——分布系数，取为：

f_{t1}=0，　　对于 $x<0$

$$f_{t1}=\left|\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)\right|$$，对于 $0\leqslant x\leqslant L$

f_{t1}=0，　　对于 $x>L$

f_{t2}=0，　　对于 $x<0$

$$f_{t2}=\sin^2\left(\frac{\pi x}{L}\right)$$，对于 $0\leqslant x\leqslant L$

f_{t2}=0，　　对于 $x>L$

f_p——系数，取为：

$f_p=f_{ps}$，　　对于强度评估

f_p=0.9[0.267-(11.68f_T)$L\times10^{-5}$]，对于疲劳评估

3.5 动载荷工况的船体梁载荷

3.5.1 总则

应用于本章第 2 节定义的动载荷工况的船体梁动载荷在[3.5.2]至[3.5.5]给出。

3.5.2 垂向波浪弯矩

应用于本章第 2 节定义的每一个动载荷工况的垂向波浪弯矩 $M_{wv\text{-}LC}$，kNm，定义见表 3.5.2。

应用于动载荷工况的垂向波浪弯矩　　表 3.5.2

载荷组合系数	$M_{wv\text{-}LC}$
$C_{WV}\geq 0$	$f_\beta C_{WV} M_{wv-h}$
$C_{WV}<0$	$f_\beta C_{WV}\lvert M_{wv-s}\rvert$

表中：

C_{WV}—— 垂向波浪弯矩的动载荷组合系数，取为本章第 2 节规定的值。

$M_{wv\text{-}h}, M_{wv\text{-}s}$——所考虑设计载荷场景的垂向中拱波浪弯矩和中垂波浪弯矩，定义见[3.1.1]。

3.5.3 垂向波浪剪力

应用于本章第 2 节定义的每一个动载荷工况的垂向波浪剪力 $Q_{wv\text{-}LC}$，kN，定义见表 3.5.3。

应用于动载荷工况的垂向波浪剪力　　表 3.5.3

载荷组合系数	$Q_{wv\text{-}LC}$
$C_{QW}\geq 0$	$f_\beta C_{QW} Q_{wv-pos}$
$C_{QW}<0$	$f_\beta C_{QW}\lvert Q_{wv-neg}\rvert$

表中：

C_{QW}——垂向波浪剪力的动载荷组合系数，取为本章第 2 节规定的值。

$Q_{wv\text{-}pos}$, $Q_{wv\text{-}neg}$——所考虑设计载荷场景的垂向波浪正剪力和垂向波浪负剪力，定义见[3.2.1]。

3.5.4 水平波浪弯矩

应用于本章第 2 节定义的每一个动载荷工况的水平波浪弯矩 $M_{wh\text{-}LC}$，kNm，取为：

$$M_{wh-LC} = f_\beta C_{WH} M_{wh}$$

式中：

C_{WH}—— 水平波浪弯矩的动载荷组合系数，取为本章第 2 节规定的值。

M_{wh}——考虑了适当的设计载荷场景的水平波浪弯矩，定义见[3.3.1]。

3.5.5 波浪扭矩

应用于本章第 2 节定义的每一个动载荷工况的波浪扭矩 $M_{wt\text{-}LC}$，kNm，取为：

$$M_{wt-LC} = f_\beta C_{WT} M_{wt}$$

式中：

C_{WT}—— 波浪扭矩的动载荷组合系数，取为本章第 2 节规定的值。

M_{wt}——考虑了适当的设计载荷场景的波浪扭矩，定义见[3.4.1]。

第 5 节　外部载荷

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

λ——波长，m。

B_x——所考虑横剖面在水线处的型宽，m。

x，y，z——载荷计算点在本章第 1 节[1.2.1]定义的参考坐标系下的 X，Y 和 Z 坐标，m。

f_{xL}——本章第 2 节定义的比例系数。

f_{yB}——载荷计算点 Y 坐标与 B_x 的比，取为：

$$f_{yB} = \frac{|2y|}{B_x}$$，但不大于 1.0，且 $B_x = 0.0$ 时 $f_{yB} = 1.0$。

f_{yB1}——载荷计算点 Y 坐标与 B 的比，取为：

$$f_{yB1} = \frac{|2y|}{B}$$，但不大于 1.0。

C_s——本章第 4 节定义的波浪系数。

f_T——本章第 3 节定义的比例系数。

$P_{W,WL}$——所考虑动载荷工况水线处的水动压力，kN/m^2。

$$P_{W,WL} = P_W$$ ，对于 $y=B_x/2$ 和 $z = T_{LC}$ 时。

h_W——等效于水线处压力的水压头，m，取为：

$$h_W = \frac{P_{W,WL}}{\rho g}$$

f_{ps}——本章第 3 节定义的用于强度评估的系数。

θ——本章第 3 节[2.1.1]定义的横摇角，(º)。

T_θ——本章第 3 节[2.1.1]定义的横摇周期，s。

f_{fa}——本章第 3 节定义的系数。

f_β——本章第 4 节定义的系数。

z_{SD}——骨材跨距中点或单元板格中点的 Z 坐标，m。

1 海水压力

1.1 总压力

1.1.1 用于静（S）设计载荷场景的外板上任意载荷点的外部压力 P_{ex}，kN/m²，取为：

$$P_{ex} = P_S \text{，但不小于 } 0。$$

用于静+动（S+D）设计载荷场景的外板上任意载荷点的外部总压力 P_{ex}，kN/m²，应由每一个动载荷工况得到，取为：

$$P_{ex} = P_S + P_W \text{，但不小于 } 0。$$

式中：

P_S——静水压力，kN/m²，定义见[1.2]。

P_W——水动压力，kN/m²，定义见[1.3]。

1.2 静水压力

1.2.1 任意载荷点的静水压力，P_S，kN/m²，由表 1.2.1 中得到，参见图 1.2.1。

静压力 P_S　　表 1.2.1

位　置	静水压力，P_S，kN/m²
$z \le T_{LC}$	$\rho g(T_{LC} - z)$
$z > T_{LC}$	0

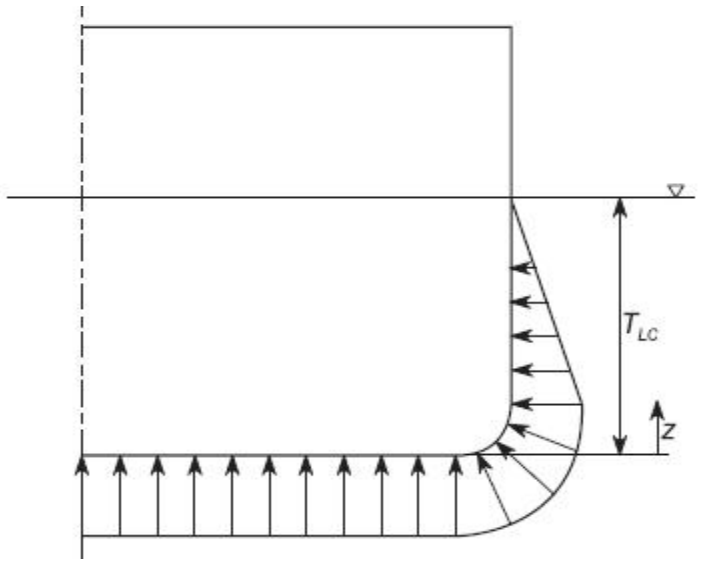


图 1.2.1 静水压力，P_S

1.3 用于强度评估的外部动压力

1.3.1 一般要求

用于本章第 2 节 [2] 定义的动载荷工况的水动压力定义见 [1.3.2] 至 [1.3.8] 。

1.3.2 用于 HVM 载荷工况的水动压力

用于 HVM-1 和 HVM-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 1.3.2（1）中得到，参见图 1.3.2（1）和图 1.3.2（2）。

HVM 载荷工况的水动压力　　表 1.3.2（1）

载荷工况	水动压力，kN/m^2		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
HVM-1	$P_W = \max(-P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0$
HVM-2	$P_W = \max(P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$		

式中：

$$P_{HS} = f_\beta f_{ps} f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{nl}——非线性影响系数，取为：

- 对于极端海况设计载荷场景

  $f_{nl} = 0.7$，在 $f_{XL} = 0.0$ 处

  $f_{nl} = 0.9$，在 $f_{XL} = 0.3$ 处

  $f_{nl} = 0.9$，在 $f_{XL} = 0.7$ 处

  $f_{nl} = 0.6$，在 $f_{XL} = 1.0$ 处

- 对于压载水置换设计载荷场景

  $f_{nl} = 0.85$，在 $f_{XL} = 0.0$ 处

  $f_{nl} = 0.95$，在 $f_{XL} = 0.3$ 处

  $f_{nl} = 0.95$，在 $f_{XL} = 0.7$ 处

  $f_{nl} = 0.80$，在 $f_{XL} = 1.0$ 处

中间值由线性插值获得。

f_{yz}——周长分布系数，取为：

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

f_h——系数，取为：

$$f_h = 3.0\,(1.21 - 0.66 f_T)$$

k_a——沿船舶纵向的幅值系数，取为：

$k_a = (0.5 + f_T)\left\{(3 - 2\sqrt{f_{yB}}) - \frac{20}{9} f_{xL}(7 - 6\sqrt{f_{yB}})\right\} + \frac{2}{3}(1 - f_T)$，对于 $f_{xL} < 0.15$

$k_a = 1.0$，对于 $0.15 \leqslant f_{xL} < 0.7$

$$k_a = 1 + (f_{xL} - 0.7)\left\{\left(\frac{40}{3} f_T - 5\right) + 2(1 - f_{yB})\left[\frac{18}{C_b} f_T (f_{xL} - 0.7) - 0.25(2 - f_T)\right]\right\},$$

对于 $f_{xL} \geqslant 0.7$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.6\,(1 + f_T)\,L$$

k_p——由表 1.3.2（2）得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

HVM 载荷工况的 k_p 值　　表 1.3.2（2）

f_{xL}	0	$0.3-0.1f_T$	$0.35-0.1f_T$	$0.8-0.2f_T$	$0.9-0.2f_T$	1.0
k_p	$-0.25f_T(1+f_{yB})$	-1	1	1	-1	-1

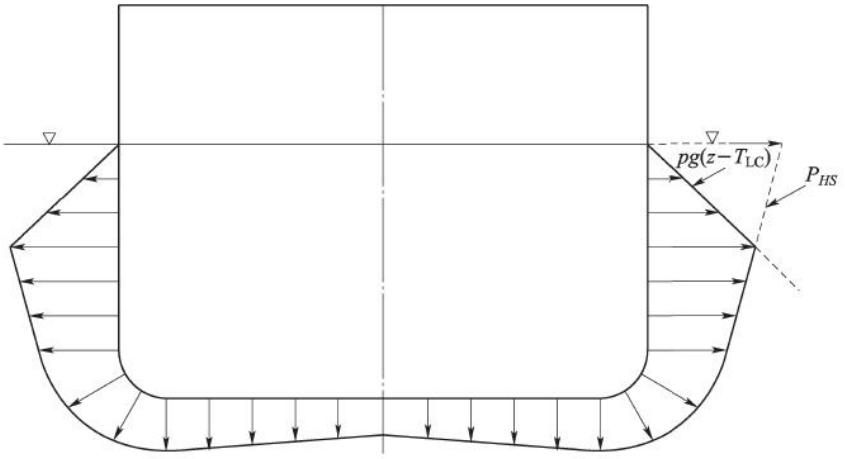


图 1.3.2（1）　HVM-1，HSA-1 和 FVM-1 载荷工况船中处动压力横向分布

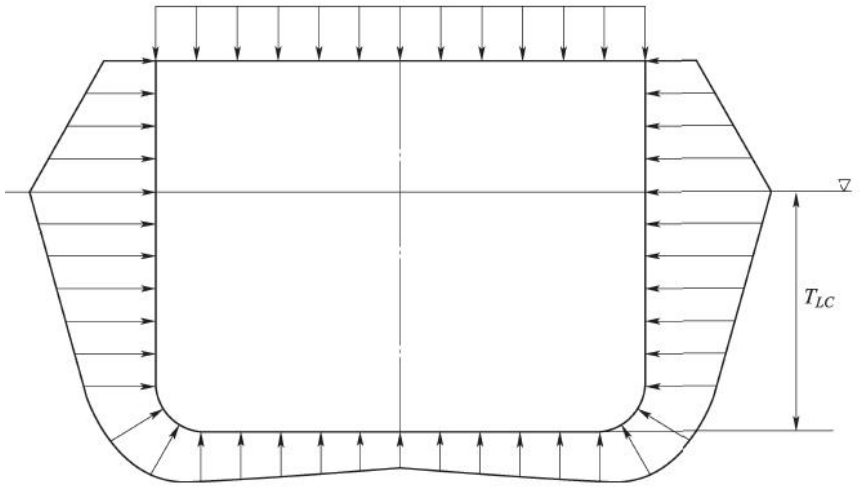


图 1.3.2（2）　HVM-2，HSA-2 和 FVM-2 载荷工况船中处动压力横向分布

1.3.3 用于 HSA 载荷工况的水动压力

用于 HSA−1 和 HSA−2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 1.3.3（1）中得到，并参见 1.3.2（1）和图 1.3.2（2）。

HSA 载荷工况的水动压力　　表 1.3.3（1）

载荷工况	水动压力，kN/m^2		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
HSA-1	$P_W = \max(-P_{HS}, \rho g(z-T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z-T_{LC})$	$P_W = 0$
HSA-2	$P_W = \max(P_{HS}, \rho g(z-T_{LC}))$		

其中：

$$P_{HS} = f_{ps} f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{nl}——非线性影响系数，按 [1.3.2] 中的定义取值。

f_{yz}——周长分布系数，取为：

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

f_h——系数，取为：

$$f_h = 2.4\ (1.21 - 0.66 f_T)$$

k_a——沿船舶纵向的幅值系数，按 [1.3.2] 中的定义取值。

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.6\ (1 + f_T)\ L$$

k_p——由表 1.3.3（2）得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

HSA 载荷工况的 k_p 值　　表 1.3.3（2）

f_{xL}	0	$0.3-0.1f_T$	$0.5-0.2f_T$	$0.8-0.2f_T$	$0.9-0.2f_T$	1.0
k_p	$1.5-f_T-0.5f_{yB}$	−1	1	1	−1	−1

1.3.4 用于 FVM 载荷工况的水动压力

用于 FVM -1 和 FVM-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 1.3.4（1）中得到，并参见图 1.3.2（1）和图 1.3.2（2）。

FVM 载荷工况的水动压力　　表 1.3.4（1）

载荷工况	水动压力，kN/m^2		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
FVM-1	$P_W = \max(-P_{FS}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0.0$
FVM-2	$P_W = \max(P_{FS}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中：

$$P_{FS} = f_\beta f_{ps} f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{nl}——非线性影响系数，取为：

$f_{nl} = 0.9$　　对于极端海况设计载荷场景

$f_{nl} = 0.95$　　对于用于压载水置换设计载荷场景

f_{yz}——周长分布系数，取为：

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

f_h——系数，取为：

$$f_h = 2.6$$

k_a——沿船舶纵向的幅值系数，取为：

$k_a = 1 + (3.75 - 2f_T)(1 - 5f_{xL})(1 - f_{yB})$，　对于 $f_{xL} < 0.2$

$k_a = 1.0$，　对于 $0.2 \leqslant f_{xL} < 0.9$

$k_a = 1 + 20\ (1 - f_{yB})\ (f_{xL} - 0.9)$，　对于 $f_{xL} \geqslant 0.9$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.6\ (1 + 2/3 f_T)\ L$$

k_p——由表 1.3.4（2）得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

FVM 载荷工况的 k_p 值　　表 1.3.4（2）

f_{xL}	0	$0.35-0.1f_T$	$0.5-0.2f_T$	0.75	0.8	1.0
k_p	$-0.75-0.25f_{yB}$	−1	1	1	−1	$-0.75-0.25f_{yB}$

1.3.5 用于 BSR 载荷工况的水动压力

用于 BSR -1 和 BSR-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 1.3.5（1）中得到，并参见图 1.3.5（1）和图 1.3.5（2）。

BSR 载荷工况的水动压力　　表 1.3.5（1）

载荷工况	水动压力，kN/m²		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
BSR-1P	$P_W = \max(P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0.0$
BSR-2P	$P_W = \max(-P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSR-1S	$P_W = \max(P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSR-2S	$P_W = \max(-P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中：

对于 BSR-1P 和 BSR-2P，

$$P_{BSR} = f_\beta f_{nl}\left(10y\sin\theta + 0.88 f_{ps} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}(f_{yB1} + 1)\right)$$

对于 BSR-1S 和 BSR-2S，

$$P_{BSR} = f_\beta f_{nl}\left(-10y\sin\theta + 0.88 f_{ps} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}(f_{yB1} + 1)\right)$$

f_{nl}——非线性影响系数，取为：

$f_{nl} = 1.0$　　对于极端海况设计载荷场景

$f_{nl} = 1.0$　　对于用于压载水置换设计载荷场景

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T_\theta^2$$

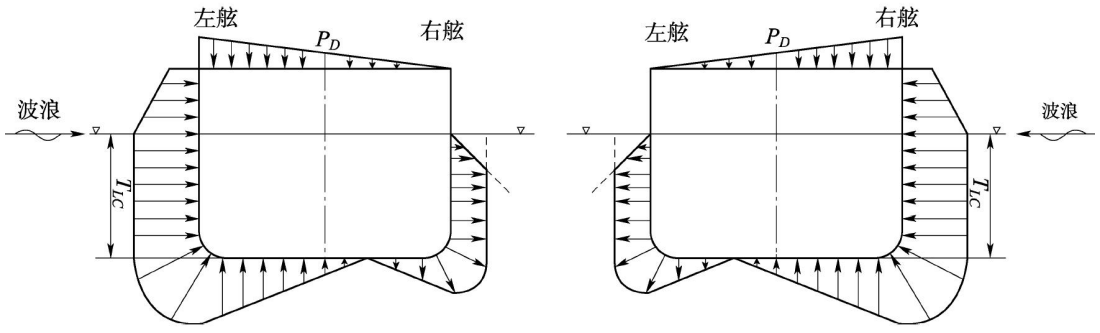


图 1.3.5（1）　BSR-1P（左）和 BSR-1S（右）载荷工况动压力横向分布

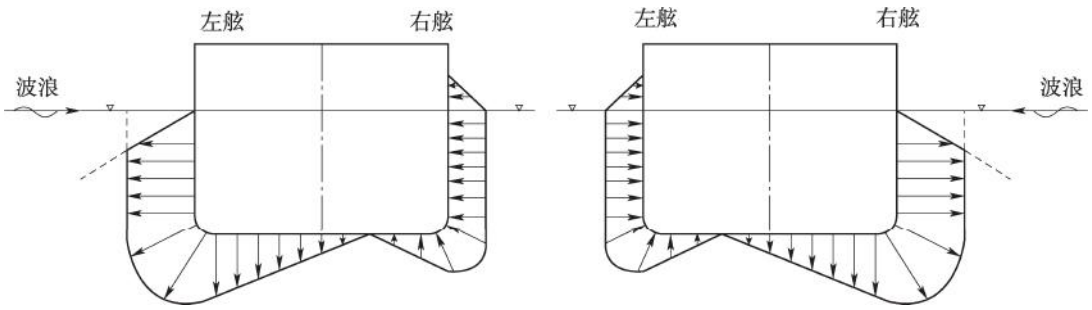


图 1.3.5（2） BSR-2P（左）和 BSR-2S（右）载荷工况动压力横向分布

1.3.6 用于 BSP 载荷工况的水动压力

用于 BSP -1 和 BSP-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 1.3.6（1）中得到，同时参见图 1.3.6（1）和图 1.3.6（2）。

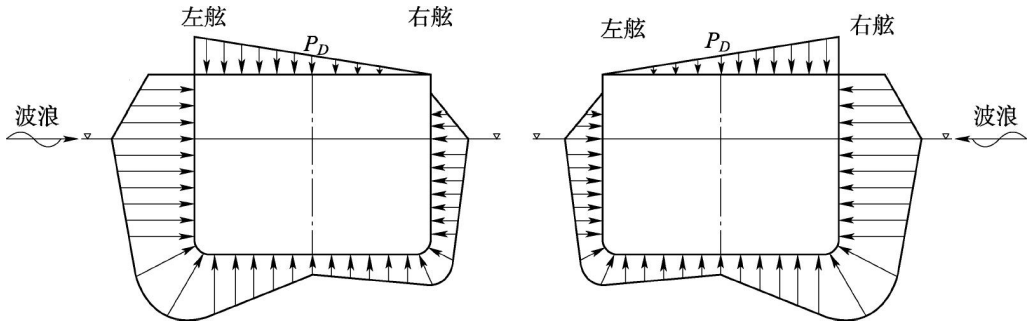


图 1.3.6（1） BSP-1P（左）和 BSP-1S（右）载荷工况动压力横向分布

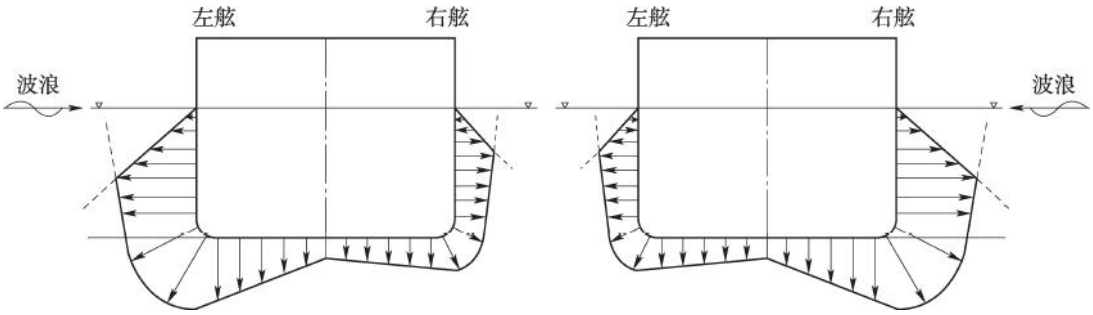


图 1.3.6（2） BSP-2P（左）和 BSP-2S（右）载荷工况动压力横向分布

BSP 载荷工况的水动压力 表 1.3.6（1）

载荷工况	水动压力，kN/m^2		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
BSP-1P	$P_W = \max(P_{BSP}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0.0$
BSP-2P	$P_W = \max(-P_{BSP}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSP-1S	$P_W = \max(P_{BSP}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSP-2S	$P_W = \max(-P_{BSP}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中：

$$P_{BSP} = 4.5 f_{BSP} f_{\beta} f_{ps} f_{nl} f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.2\,(1 + 2f_T)\,L$$

f_{BSP}——修正系数，取为：

$$f_{BSP} = 5.35\left(C_b f_T\right)^3 - 9.92\left(C_b f_T\right)^2 + 6.04\left(C_b f_T\right) - 0.43$$

f_{yz}——周长分布系数，由表 1.3.6（2）得到。

BSP 载荷工况的周长分布系数 f_{yz}　　表 1.3.6（2）

横向位置	BSP-1P，BSP-2P	BSP-1S，BSP-2S
$y \geqslant 0$	$f_{yz} = 2\dfrac{z}{T_{LC}} + 2.5 f_{yB1} + 0.5$	$f_{yz} = \dfrac{2}{3}\dfrac{z}{T_{LC}} + \dfrac{1}{2} f_{yB1} + 0.5$
$y<0$	$f_{yz} = \dfrac{2}{3}\dfrac{z}{T_{LC}} + \dfrac{1}{2} f_{yB1} + 0.5$	$f_{yz} = 2\dfrac{z}{T_{LC}} + 2.5 f_{yB1} + 0.5$

f_{nl}——非线性影响系数，取为：

- 对于极端海况设计载荷场景

  f_{nl} = 0.6，在 f_{xL}= 0.0 处

  f_{nl} = 0.8，在 f_{xL}= 0.3 处

  f_{nl} = 0.8，在 f_{xL}= 0.7 处

  f_{nl} = 0.6，在 f_{xL}= 1.0 处

- 对于压载水置换设计载荷场景

  f_{nl} = 0.6，在 f_{xL}= 0.0 处

  f_{nl} = 0.8，在 f_{xL}= 0.3 处

  f_{nl} = 0.8，在 f_{xL}= 0.7 处

  f_{nl} = 0.6，在 f_{xL}= 1.0 处

中间值由线性插值获得。

1.3.7 用于 OST 载荷工况的水动压力

用于 OST -1 和 OST-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 1.3.7（1）中得到，并参见图 1.3.7（1）和图 1.3.7（2）。

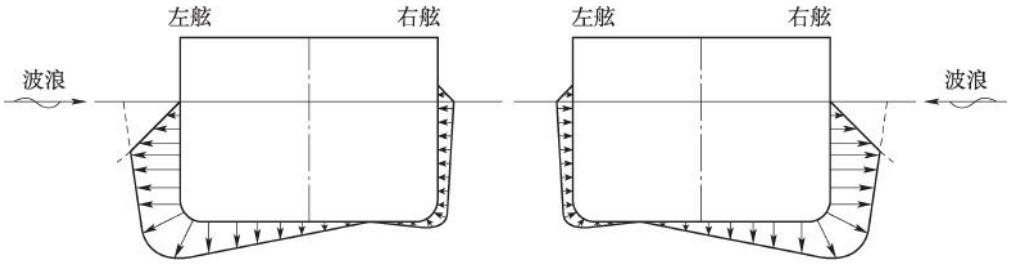


图 1.3.7（1）　OST-1P（左）和 OST-1S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

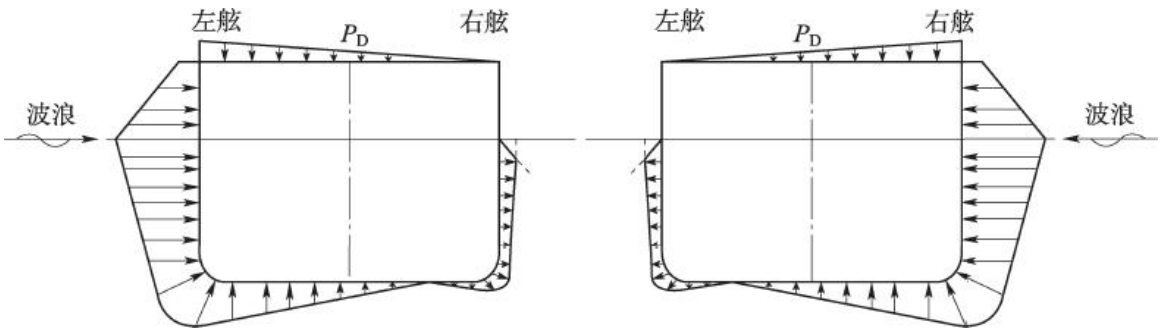


图 1.3.7（2） OST-2P（左）和 OST-2S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

OST 载荷工况的水动压力 表 1.3.7（1）

载荷工况	水动压力，kN/m²		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant h_W + T_{LC}$	$z > h_W + T_{LC}$
OST -1P	$P_W = \max(P_{OST}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0.0$
OST -2P	$P_W = \max(-P_{OST}, \rho g(z - T_{LC}))$		
OST -1S	$P_W = \max(P_{OST}, \rho g(z - T_{LC}))$		
OST -2S	$P_W = \max(-P_{OST}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中：

$$P_{OST} = 1.38 f_{ps} f_{nl} k_a k_p f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{yz}——周长分布系数，由表 1.3.7（2）得到。

f_{nl}——非线性影响系数，取为：

$f_{nl} = 0.8$ 对于极端海况设计载荷场景

$f_{nl} = 0.9$ 对于压载水置换设计载荷场景

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.45L$$

k_a——沿船舶纵向的幅值系数，由表 1.3.7（3）获得。

k_p——由表 1.3.7（4）得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

OST 载荷工况的周长分布系数 f_{yz} 表 1.3.7（2）

横向位置	OST-1P，OST-2P	OST-1S，OST-2S
$y \geqslant 0$	$5\frac{z}{T_{LC}} + 3.5 f_{yB} + 1.5$	$1.5\frac{z}{T_{LC}} + 1.5$
$y < 0$	$1.5\frac{z}{T_{LC}} + 1.5$	$5\frac{z}{T_{LC}} + 3.5 f_{yB} + 1.5$

OST 载荷工况的 k_a 值 表 1.3.7（3）

横向位置	纵向位置	OST-1P，OST-2P	OST -1S，OST -2S
$y \geqslant 0$	$f_{xL} \leqslant 0.2$	$1.0 + 3.5(1 - f_{yB})(1 - 5 f_{xL})$	$1.0 + [3.5 - (4 f_T - 0.5) f_{yB}](1 - 5 f_{xL})$
	$0.2 < f_{xL} \leqslant 0.8$	1.0	1.0
	$f_{xL} > 0.8$	1.0	$1.0 + 4(1 - f_T)(5 f_{xL} - 4) f_{yB}$

横向位置	纵向位置	OST-1P，OST-2P	OST -1S，OST -2S
$y<0$	$f_{xL}\leqslant 0.2$	$1.0+[3.5-(4f_T-0.5)f_{yB}](1-5f_{xL})$	$1.0+3.5(1-f_{yB})(1-5f_{xL})$
	$0.2<f_{xL}\leqslant 0.8$	1.0	1.0
	$f_{xL}>0.8$	$1.0+4(1-f_T)(5f_{xL}-4)f_{yB}$	1.0

OST 载荷工况的 k_p 值　　表 1.3.7（4）

横向位置	f_{xL}	OST-1P; OST-2P	OST-1S; OST-2S
$y\geqslant 0$	0.0	1.0	1.0
	0.2	1.0	$1.0+(0.75-1.5f_T)f_{yB}$
	0.45	$-0.85-0.3f_T$	$-1.0+(1.75-0.5f_T)f_{yB}$
	0.65	$-0.85-0.3f_T$	$-1.0+(1.75-0.5f_T)f_{yB}$
	0.8	$-0.1+(1.6f_T-1.5)f_{yB}$	$-0.1+(0.25-0.3f_T)f_{yB}$
	0.9	$0.8+0.2f_{yB}$	$0.8-(0.9f_T+0.85)f_{yB}$
	1.0	$-1.0+f_{yB}$	$-1.0+(0.5-0.5f_T)f_{yB}$
$y<0$	0.0	1.0	1.0
	0.2	$1.0+(0.75-1.5f_T)f_{yB}$	1.0
	0.45	$-1.0+(1.75-0.5f_T)f_{yB}$	$-0.85-0.3f_T$
	0.65	$-1.0+(1.75-0.5f_T)f_{yB}$	$-0.85-0.3f_T$
	0.8	$-0.1+(0.25-0.3f_T)f_{yB}$	$-0.1+(1.6f_T-1.5)f_{yB}$
	0.9	$0.8-(0.9f_T+0.85)f_{yB}$	$0.8+0.2f_{yB}$
	1.0	$-1.0+(0.5-0.5f_T)f_{yB}$	$-1.0+f_{yB}$

1.3.8 用于 OSA 工况的水动压力

用于 OSA-1 和 OSA-2 载荷工况的任一点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 1.3.8（1）中得到，并参见图 1.3.8（1）和图 1.3.8（1）。

OSA 载荷工况的水动压力　　表 1.3.8（1）

载荷工况	水动压力，kN/m^2		
	$z\leqslant T_{LC}$	$T_{LC}<z\leqslant h_W+T_{LC}$	$z>h_W+T_{LC}$
OSA -1P	$P_W=\max(P_{OSA},\rho g(z-T_{LC}))$	$P_W=P_{W,WL}-\rho g(z-T_{LC})$	$P_W=0.0$
OSA -2P	$P_W=\max(-P_{OSA},\rho g(z-T_{LC}))$		
OSA -1S	$P_W=\max(P_{OSA},\rho g(z-T_{LC}))$		
OSA -2S	$P_W=\max(-P_{OSA},\rho g(z-T_{LC}))$		

其中：

$$P_{OSA}=0.8f_{ps}f_{nl}k_ak_pf_{yz}C_s\sqrt{\frac{L_0+\lambda-125}{L}}(1+0.5f_T)$$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda=0.7L$$

f_{nl}——非线性影响系数，取为：

- 对于极端海况设计载荷场景

  $f_{nl}=0.5$，在 $f_{XL}=0.0$ 处

  $f_{nl}=0.8$，在 $f_{XL}=0.3$ 处

  $f_{nl}=0.8$，在 $f_{XL}=0.7$ 处

f_{nl} = 0.6，在 f_{XL}= 1.0 处

- 对于压载水置换设计载荷场景

f_{nl} = 0.75，在 f_{XL}= 0.0 处

f_{nl} = 0.9，在 f_{XL}= 0.3 处

f_{nl} = 0.9，在 f_{XL}= 0.7 处

f_{nl} = 0.8，在 f_{XL}= 1.0 处

中间值由线性插值获得。

f_{yz}——周长分布系数，由表 1.3.8（2）得到；

k_a——沿船舶纵向的幅值系数，由表 1.3.8（3）获得；

k_p——由表 1.3.8（4）得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

OSA 载荷工况的周长分布系数 f_{yz}　　表 1.3.8（2）

横向位置	OSA-1P，OSA-2P	OSA -1S，OSA -2S
$y \geqslant 0$	$5.5\frac{z}{T_{LC}}+5.3f_{yB}+2.2$	$0.9\frac{z}{T_{LC}}+0.4f_{yB}+2.2$
$y<0$	$0.9\frac{z}{T_{LC}}+0.4f_{yB}+2.2$	$5.5\frac{z}{T_{LC}}+5.3f_{yB}+2.2$

OSA 载荷工况的 k_a 值　　表 1.3.8（3）

横向位置	纵向位置	OSA-1P，OSA-2P	OSA-1S，OSA -2S
$y \geqslant 0$	$f_{xL} \leqslant 0.2$	$1.0+3(2-f_T)(1-5f_{xL})(1-f_{yB})$	$1.0+3(2-f_T)(1-5f_{xL})+\{(28f_{xL}-5)+3f_T(1-5f_{xL})\}f_{yB}$
	$0.2<f_{xL} \leqslant 0.5$	1.0	$1.0+(1-2f_{xL})f_{yB}$
	$0.5<f_{xL} \leqslant 0.8$	1.0	$1.0+1.5(2f_{xL}-1)f_{yB}$
	$f_{xL} > 0.8$	$1.0+(f_{xL}-0.8)(1-f_{yB})A$	$1.0+\{1.5(2f_{xL}-1)-(f_{xL}-0.8)A\}f_{yB}+(f_{xL}-0.8)A$
$y<0$	$f_{xL} \leqslant 0.2$	$1.0+3(2-f_T)(1-5f_{xL})+\{(28f_{xL}-5)+3f_T(1-5f_{xL})\}f_{yB}$	$1.0+3(2-f_T)(1-5f_{xL})(1-f_{yB})$
	$0.2<f_{xL} \leqslant 0.5$	$1.0+(1-2f_{xL})f_{yB}$	1.0
	$0.5<f_{xL} \leqslant 0.8$	$1.0+1.5(2f_{xL}-1)f_{yB}$	1.0
	$f_{xL} > 0.8$	$1.0+\{1.5(2f_{xL}-1)-(f_{xL}-0.8)A\}f_{yB}+(f_{xL}-0.8)A$	$1.0+(f_{xL}-0.8)(1-f_{yB})A$
其中：$A = 22-15f_T+3[22(f_{xL}-0.8)-0.25(2-f_T)]$			

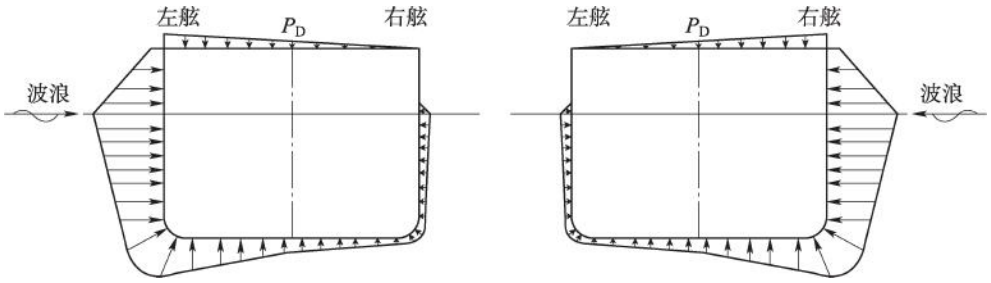


图 1.3.8（1） OSA-1P（左）和 OSA -1S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

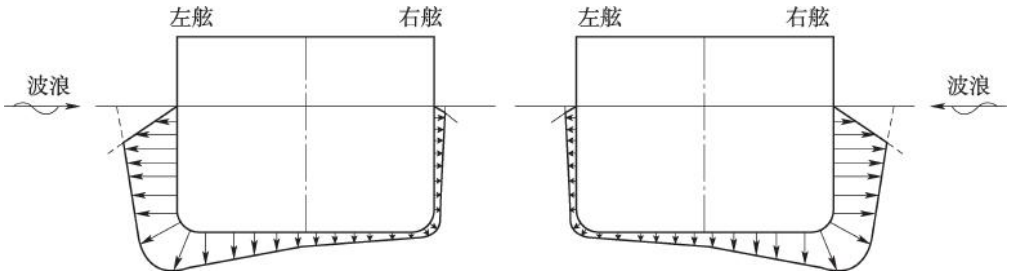


图 1.3.8（2） OSA -2P（左）和 OSA -2S（右）载荷工况船中处动压力横向分布

OSA 载荷工况的 k_p 值　　表 1.3.8（4）

横向位置	f_{xL}	OSA-1P; OSA-2P	OSA-1S; OSA-2S
$y \geqslant 0$	0.0	$0.75-0.5f_{yB}$	0.75
	0.2	$f_T-0.25+(1.25-f_T)f_{yB}$	$f_T-0.25+(0.35f_T-0.47)f_{yB}$
	0.4	1.0	$1.0+(2.7f_T-3.2)f_{yB}$
	0.5	$1.25-0.5f_T+(0.5f_T-0.25)f_{yB}$	$1.25-0.5f_T+(2.7f_T-3.2)f_{yB}$
	0.6	$1.5-f_T+(f_T-1.07)f_{yB}$	$1.5-f_T+(2.68f_T-3.19)f_{yB}$
	0.85	$0.5f_T-1.25+(0.25-0.5f_T)f_{yB}$	$0.5f_T-1.25+(0.2-0.1f_T)f_{yB}$
	1.0	$0.5f_T-1.25+(0.25-0.5f_T)f_{yB}$	$0.5f_T-1.25+(0.2-0.1f_T)f_{yB}$
$y<0$	0.0	0.75	$0.75-0.5f_{yB}$
	0.2	$f_T-0.25+(0.35f_T-0.47)f_{yB}$	$f_T-0.25+(1.25-f_T)f_{yB}$
	0.4	$1.0+(2.7f_T-3.2)f_{yB}$	1.0
	0.5	$1.25-0.5f_T+(2.7f_T-3.2)f_{yB}$	$1.25-0.5f_T+(0.5f_T-0.25)f_{yB}$
	0.6	$1.5-f_T+(2.68f_T-3.19)f_{yB}$	$1.5-f_T+(f_T-1.07)f_{yB}$
	0.85	$0.5f_T-1.25+(0.2-0.1f_T)f_{yB}$	$0.5f_T-1.25+(0.25-0.5f_T)f_{yB}$
	1.0	$0.5f_T-1.25+(0.2-0.1f_T)f_{yB}$	$0.5f_T-1.25+(0.25-0.5f_T)f_{yB}$

1.3.9 动压力包络值

任意一点的动压力包络值 $P_{ex\text{-}max}$ 应取为由 [1.3.2] 至 [1.3.8] 得到的任意动载荷工况的最大压力。

1.4 用于疲劳评估的外部动压力

1.4.1 一般要求

用于疲劳静+动（F：S+D）设计载荷场景的外板上任意载荷点的外部总压力 P_{ex}，kN/m²，应由每一个疲劳动载荷工况得到，取为：

$$P_{ex} = P_S + P_W \quad ，但不小于 0。$$

式中：

P_S—— 静压力，kN/m²，定义见[1.2]。

P_W—— 动压力，kN/m²，定义见[1.4.2]至[1.4.6]。

1.4.2 用于 HVM 载荷工况的水动压力

用于 HVM-1 和 HVM-2 载荷工况的任一载荷点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 1.4.2（1）中得到。

HVM 载荷工况的水动压力　　表 1.4.2（1）

载荷工况	水动压力，kN/m²		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant 2h_W + T_{LC}$	$z > 2h_W + T_{LC}$
HVM-1	$P_W = \max(-P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \frac{1}{2}\rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0.0$
HVM-2	$P_W = \max(P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中：

$$P_{HS} = f_p f_h k_a k_p f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{yz}——周长分布系数，取为：

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

f_h——系数，取为：

$$f_h = 2.75\,(\,1.21 - 0.66\,f_T\,)$$

f_p——系数，取为：

$$f_p = f_{fa}[(0.21 + 0.02 f_T) + (6 - 4 f_T) L \times 10^{-5}]$$

k_a——沿船舶纵向的幅值系数，取为：

$k_a = 1 + 3\,f_T - (\,1 + f_T\,)\,f_{yB} + [\,5\,(1 + f_T)\,f_{yB} - 15\,f_T\,]\,f_{xL}$，对于 $f_{xL} < 0.2$

$k_a = 1.0$，对于 $0.2 \leqslant f_{xL} < 0.6$

$k_a = 1 + (f_{xL} - 0.6)\,[\,(13.5 - 3.5\,f_T)\,f_{yB} + (14.5 f_T - 17) + 40\,(1 - f_{yB})(f_{xL} - 0.6)\,]$，对于 $f_{xL} \geqslant 0.6$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.6\,(\,1 + f_T\,)\,L$$

k_p——由表 1.4.2（2）得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

HVM 载荷工况的 k_p 值　　表 1.4.2（2）

f_{xL}	k_p
0	$(1.0 - f_T) + (\,0.5 - f_T\,)\,f_{yB}$
$0.3 - 0.1\,f_T$	−1

f_{xL}	k_p
0.5 − 0.2f_T	1
0. 9 − 0.4f_T	1
0.9 − 0.2f_T	−1
1.0	−1

1.4.3 用于 FVM 载荷工况的水动压力

用于 FVM-1 和 FVM-2 载荷工况的任一载荷点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 1.4.3（1）中得到。

FVM 载荷工况的水动压力　　表 1.4.3（1）

载荷工况	水动压力，kN/m²		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant 2h_W + T_{LC}$	$z > 2h_W + T_{LC}$
FVM-1	$P_W = \max(-P_{FS}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \frac{1}{2}\rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0$
FVM-2	$P_W = \max(P_{FS}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中：

$$P_{FS} = f_p f_h k_a k_p f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{yz}——周长分布系数，取为：

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

f_h——系数，取为：

$$f_h = 2.6$$

f_p——系数，取为：

$$f_p = f_{fa}[(0.21 + 0.02 f_T) + (6 - 4 f_T) L \times 10^{-5}]$$

k_a——沿船舶纵向的幅值系数，取为：

$k_a = 1 + (3.5 - 2 f_T)(1 - 5 f_{xL})(1 - f_{yB})$，对于 $f_{xL} < 0.2$

$k_a = 1.0$，对于 $0.2 \leqslant f_{xL} < 0.9$

$k_a = 1 + 15(1 - f_{yB})(f_{xL} - 0.9)$，对于 $f_{xL} \geqslant 0.9$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.6\left(1 + \frac{2}{3} f_T\right) L$$

k_p——由表 1.4.3（2）得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

FVM 载荷工况的 k_p 值　　表 1.4.3（2）

f_{xL}	k_p
0	−0.75 − 0.25f_{yB}
0.35−0.1f_T	−1
0.5−0.2f_T	1
0.75	1
0.9−0.1f_T	−1

f_{xL}	k_p
1.0	$-0.5-0.5f_{yB}$

1.4.4 用于 BSR 载荷工况的水动压力

用于 BSR-1 和 BSR-2 载荷工况的任一载荷点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 1.4.4（1）中得到。

BSR 载荷工况的水动压力　　表 1.4.4（1）

载荷工况	水动压力，kN/m²		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant 2h_W + T_{LC}$	$z > 2h_W + T_{LC}$
BSR-1P	$P_W = \max(P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \frac{1}{2}\rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0.0$
BSR-2P	$P_W = \max(-P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSR-1S	$P_W = \max(P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSR-2S	$p_W = \max(-P_{BSR}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中：

对于 BSR-1P 和 BSR-2P，

$$P_{BSR} = 10y\sin\theta + 0.88 f_p C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}(f_{yB1} + 1)$$

对于 BSR-1S 和 BSR-2S，

$$P_{BSR} = -10y\sin\theta + 0.88 f_p C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}(f_{yB1} + 1)$$

f_p——系数，取为：

$$f_p = f_{fa}[(0.21 + 0.04 f_T) - (12 f_T - 2) B \times 10^{-4}]$$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T_\theta^2$$

1.4.5 用于 BSP 载荷工况的水动压力

用于 BSP-1 和 BSP-2 载荷工况的任一载荷点的水动压力 P_W，kN/m²，应从表 1.4.5（1）中得到。

BSP 载荷工况的水动压力　　表 1.4.5（1）

载荷工况	水动压力，kN/m²		
	$z \leqslant T_{LC}$	$T_{LC} < z \leqslant 2h_W + T_{LC}$	$z > 2h_W + T_{LC}$
BSP-1P	$P_W = \max(P_{BSP}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \frac{1}{2}\rho g(z - T_{LC})$	$P_W = 0.0$
BSP-2P	$P_W = \max(-P_{BSP}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSP-1S	$P_W = \max(P_{BSP}, \rho g(z - T_{LC}))$		
BSP-2S	$P_W = \max(-P_{BSP}, \rho g(z - T_{LC}))$		

其中：

$$P_{BSP} = 4.5 f_p f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.2(1 + 2f_T)L$$

f_p——系数，取为：

$$f_p = f_{fa}[\,0.2 + (\,8 + 16 f_T)\times 10^{-3}\,]$$

f_{yz}——周长分布系数，由表 1.4.5（2）得到。

BSP 载荷工况的周长分布系数 f_{yz}　　表 1.4.5（2）

横向位置	BSP-1P，BSP-2P	BSP-1S，BSP-2S
$y\geqslant 0$	$f_{yz} = 2\dfrac{z}{T_{LC}} + 2.5 f_{yB1} + 0.5$	$f_{yz} = \dfrac{2}{3}\dfrac{z}{T_{LC}} + \dfrac{1}{2} f_{yB1} + 0.5$
$y<0$	$f_{yz} = \dfrac{2}{3}\dfrac{z}{T_{LC}} + \dfrac{1}{2} f_{yB1} + 0.5$	$f_{yz} = 2\dfrac{z}{T_{LC}} + 2.5 f_{yB1} + 0.5$

1.4.6 用于 OST 载荷工况的水动压力

用于 OST-1 和 OST-2 载荷工况的任一载荷点的水动压力 P_W，kN/m^2，应从表 1.4.6（1）中得到。

OST 载荷工况的水动压力　　表 1.4.6（1）

载荷工况	水动压力，kN/m^2		
	$z\leqslant T_{LC}$	$T_{LC}<z\leqslant 2h_W+T_{LC}$	$z>2h_W+T_{LC}$
BSP-1P	$P_W = \max(P_{OST}, \rho g(z-T_{LC}))$	$P_W = P_{W,WL} - \dfrac{1}{2}\rho g(z-T_{LC})$	$P_W = 0.0$
BSP-2P	$P_W = \max(-P_{OST}, \rho g(z-T_{LC}))$		
BSP-1S	$P_W = \max(P_{OST}, \rho g(z-T_{LC}))$		
BSP-2S	$P_W = \max(-P_{OST}, \rho g(z-T_{LC}))$		

其中：

$$P_{OST} = 1.38 f_p k_a k_p f_{yz} C_s \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

f_{yz}——周长分布系数，由表 1.4.6（2）得到。

用于 OST 载荷工况的周长分布系数 f_{yz}　　表 1.4.6（2）

横向位置	OST-1P；OST-2P	OST-1S；OST-2S
$y\geqslant 0$	$5\dfrac{z}{T_{LC}} + 3.3 f_{yB} + 1.7$	$\dfrac{z}{T_{LC}} + 0.3 f_{yB} + 1.7$
$y<0$	$\dfrac{z}{T_{LC}} + 0.3 f_{yB} + 1.7$	$5\dfrac{z}{T_{LC}} + 3.3 f_{yB} + 1.7$

f_p——系数，取为：

$$f_p = f_{fa}[\,(0.25 - 0.02 f_T) + (12 f_T - 9)\,B\times 10^{-4}\,]$$

λ——动载荷工况的波长，m，取为：

$$\lambda = 0.45L$$

k_a——沿船舶纵向的幅值系数，由表 1.4.6（3）得到。

k_p——由表 1.4.6（4）得到的相位系数，位于其间的值通过线性内插得到。

OST 载荷工况的 k_a 值　　表 1.4.6（3）

横向位置	纵向位置	OST-1P；OST-2P	OST-1S；OST-2S
$y\geqslant 0$	$f_{xL}\leqslant 0.2$	$1.0 + \{(3.5 - 2f_T) + (10 f_T - 17.5) f_{xL}\}(1 - f_{yB})$	$1.0+(3.5-2f_T-1.5f_{yB})+(10f_T-17.5+7.5f_{yB})f_{xL}$

横向位置	纵向位置	OST-1P；OST-2P	OST-1S；OST-2S
	$0.2<f_{xL}\leqslant 0.8$	1.0	1.0
	$f_{xL}>0.8$	1.0	$1.0+2(1-f_T)(5f_{xL}-4)f_{yB}$
$y<0$	$f_{xL}\leqslant 0.2$	$1.0+(3.5-2f_T-1.5f_{yB})+(10f_T-17.5+7.5f_{yB})f_{xL}$	$1.0+\{(3.5-2f_T)+(10f_T-17.5)f_{xL}\}(1-f_{yB})$
	$0.2<f_{xL}\leqslant 0.8$	1.0	1.0
	$f_{xL}>0.8$	$1.0+2(1-f_T)(5f_{xL}-4)f_{yB}$	1.0

OST 载荷工况的 k_p 值　　表 1.4.6（4）

横向位置	f_{xL}	OST-1P；OST-2P	OST-1S；OST-2S
$y\geqslant 0$	0.0	1.0	$1.0+(0.5-f_T)f_{yB}$
	0.2	1.0	$1.0+3(0.5-f_T)f_{yB}$
	0.45	$-0.85-0.3f_T$	$(2.7-2.4f_T)f_{yB}-1$
	0.65	$-0.85-0.3f_T$	$(2.8-2.6f_T)f_{yB}-1$
	0.8	$(f_T-0.62)f_{yB}-0.38$	$(2.38-3f_T)f_{yB}-0.38$
	0.9	$0.24+0.76f_{yB}$	$0.24-(0.24+f_T)f_{yB}$
	1.0	$-1.0+0.5f_{yB}$	−1.0
$y<0$	0.0	$1.0+(0.5-f_T)f_{yB}$	1.0
	0.2	$1.0+3(0.5-f_T)f_{yB}$	1.0
	0.45	$(2.7-2.4f_T)f_{yB}-1$	$-0.85-0.3f_T$
	0.65	$(2.8-2.6f_T)f_{yB}-1$	$-0.85-0.3f_T$
	0.8	$(2.38-3f_T)f_{yB}-0.38$	$(f_T-0.62)f_{yB}-0.38$
	0.9	$0.24-(0.24+f_T)f_{yB}$	$0.24+0.76f_{yB}$
	1.0	−1.0	$-1.0+0.5f_{yB}$

2 露天甲板外部压力

2.1 应用

2.1.1 露天甲板上的外部压力及集中力应只用于强度评估。

2.1.2 上浪压力应独立于由分布货物或其他设备载荷产生的压力和由货物或其他单位设备载荷产生的集中力。

2.2 上浪载荷

2.2.1 露天甲板上的压力

用于静+动（S+D）设计载荷场景的露天甲板上任意一点由于上浪载荷产生的外部动压力，P_D，kN/m²，应根据每一个动载荷工况获得，并按[2.2.3]和[2.2.4]的定义取值。用于静（S）设计载荷场景的露天甲板上任意一点由于上浪载荷产生的外部动压力 P_D，为零。

2.2.2 如果露天甲板设有挡浪板，挡浪板之后露天甲板的上浪压力不允许进行折减。

2.2.3 HVM，HSA，FVM 载荷工况

对于 HVM，HSA 和 FVM 载荷工况，露天甲板任何一载荷点的外部压力 P_D，kN/m²，应由下式得出，见图 1.3.2（1）和图 1.3.2（2）：

$$P_D = \chi P_W$$

式中：

$P_W = P_{W,D}$，但应不小于 $P_{D\text{-}min}$。

$P_{W,D}$——[1.3]定义的 HVM，HSA 和 FVM 载荷工况在露天甲板边线处得到的压力，kN/m²。

$P_{D\text{-}min}$——由表 2.2.3（1）中的公式的得到的最小的露天甲板压力，kN/m²，应取为：

- 对于根据第 7 章进行的货舱分析，$P_{D\text{-}min}$=0.0
- 对于其他情况，$P_{D\text{-}min}$ 的定义见表 2.2.3（1）

χ——　表 2.2.3（2）中定义的系数。

HVM，HSA 和 FVM 载荷工况露天甲板上的最小压力　　表 2.2.3（1）

位置	露天甲板上的最小压力 $P_{D\text{-}min}$, kN/m²	
	$L_{LL} \geq 100$m	$L_{LL} < 100$m
$x_{LL} / L_{LL} \leq 0.75$	34.3	$14.9 + 0.195\, L_{LL}$
$x_{LL} / L_{LL} > 0.75$	$34.3 + (14.8 + a(L_{LL} - 100))\left(4\frac{x_{LL}}{L_{LL}} - 3\right)$	$12.2 + \frac{L_{LL}}{9}\left(5\frac{x_{LL}}{L_{LL}} - 2\right) + 3.6\frac{x_{LL}}{L_{LL}}$
其中: a——　系数, 取为：a=0.0726 x_{LL}——　从载重线船长 L_{LL} 尾端量得的载荷点的 X 坐标。		

露天甲板上的压力系数　　表 2.2.3（2）

露天甲板位置	χ
干舷甲板	1.00
上层建筑甲板，包括首楼甲板	0.75
第 1 层甲板室	0.56
第 2 层甲板室	0.42
第 3 层甲板室	0.32
第 4 层甲板室	0.25
第 5 层甲板室	0.20
第 6 层甲板室	0.15
第 7 层甲板室及以上	0.10

2.2.4 BSR，BSP，OST 和 OSA 载荷工况

对于 BSR，BSP，OST 和 OSA 载荷工况，露天甲板任何一载荷点的外部压力 P_D，kN/m²，应由露天甲板左舷甲板边线处和右舷甲板边线处的压力线性插值得到：

$$P_{D,stb} = \chi P_{W,D-stb}$$

$$P_{D,pt} = \chi P_{W,D-pt}$$

式中：

$P_{W,D-stb}$—— [1.3]定义的 BSR，BSP，OST 和 OSA 载荷工况在右舷甲板边线处得到的压力。

$P_{W,D-pt}$—— [1.3]定义的 BSR，BSP，OST 和 OSA 载荷工况在左舷甲板边线处得到的压力。

χ—— 表 2.2.3（2）定义的系数。

2.2.5 露天甲板动压力包络值

露天甲板任意一点的动压力包络值，P_{D-max}，应取为由[2.2.3]和[2.2.4]确定的任一载荷工况获得的最大压力。

2.3 露天甲板的承载载荷

2.3.1 分布载荷引起的压力

如果露天甲板上承载分布载荷，例如甲板货物或其他设备，应考虑该分布载荷产生的静压力和动压力。

对于静（S）设计载荷场景，由该分布载荷产生的总压力，P_{dl}，kN/m²，应取为：

$$P_{dl} = P_{dl-s}$$

对于静+动（S+D）设计载荷场景，由该分布载荷产生的总压力，P_{dl}，kN/m²，应基于每一动载荷工况得到，取为：

$$P_{dl} = P_{dl-s} + P_{dl-d}$$

式中：

P_{dl-s}—— 由分布载荷产生的静压力，kN/m²，应由设计者定义，但一般不小于 10 kN/m²。

P_{dl-d}—— 由分布载荷产生的动压力，kN/m²，应取为：

$$P_{dl-d} = f_{\beta} \frac{a_Z}{g} P_{dl-s}$$

a_Z—— 所考虑载荷工况下分布载荷重心处的垂向加速度，m/s²，应根据本章第 3 节[3.2.4]得出。

2.3.2 单元载荷引起的集中力

如果露天甲板上承载单元载荷，例如甲板货物，应考虑由该单元载荷产生的静力和动力。

对于静（S）设计载荷场景，由该集中载荷产生的力，F_U，kN，应取为：

$$F_U = F_{U-s}$$

对于静+动（S+D）设计载荷场景，由该集中载荷产生的力，F_U，kN，应取为：

$$F_U = F_{U-s} + F_{U-d}$$

式中：

F_{U-s}—— 由单元载荷产生的静力，kN，应取为：

$$F_{U-s} = m_U g$$

$F_{U\text{-}d}$—— 由单元载荷产生的动力，kN，应取为：

$$F_{U-d} = m_U f_\beta a_Z$$

m_U——承载的单元载荷的质量，t。

a_Z—— 所考虑载荷工况下所承载的单元载荷重心处的垂向加速度，m/s²，应根据本章第 3 节[3.2.4]得出。

3 首部区域的外部冲击压力

3.1 应用

3.1.1 首部区域的冲击压力仅应用于强度评估。

3.2 底部砰击压力

3.2.1 砰击压力极值

选取距尾垂线 $0.85L_{PP}$ 剖面作为计算横剖面，底部砰击压力极值 P_{SE}，kN/m²，按下式计算：

$$P_{SE}(\alpha) = \frac{1}{2}\rho k_1 C_{ps}\left\{V_0^2 - 2E_v \ln\left[1-(1-\alpha)^{1/n}\right]\right\}$$

式中：ρ——海水密度，t/m³，取为 1.025；

k_1——砰击系数，按表 3.2.1 选取，中间值可采用线性插值法求得：

砰击系数 k_1 **表 3.2.1**

b_1/d_1	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0
k_1	4.0	9.5	20.0	26.0	28.5	29.6	30.0	29.6	28.8	28.0

注：d_1——$T_{SC}/10$ 吃水，m；

b_1——d_1 吃水下的计算横剖面水线半宽，m；

C_{ps}——系数，取为 0.44；

V_0——临界砰击速度，m/s，按下式计算：

$$V_0 = 0.07\sqrt{L}$$

α——保证率，取为 0.01；

n——砰击次数，取为 t_n 小时内平均砰击次数 N，按下式计算：

$$N = 3600\frac{t_n}{2\pi}\sqrt{\frac{E_v}{E_r}}\exp\left\{-\left(\frac{T_f^2}{2E_r}+\frac{V_0^2}{2E_v}\right)\right\}$$

其中：

t_n——计算航行时间，h，按下式选取：

$t_n = 41$　　对于 $L \le 77m$；

$t_n = 35$　　对于 $L \ge 160m$；

t_n 中间值可采用线性插值法求得。

T_f——最小首吃水航行工况下计算横剖面的吃水，m；

E_r、E_v——计算横剖面的垂向船波相对运动方差和相对速度方差，分别按下式计算：

$$E_r = 0.25(C_{pc}M_r)^2 / f_r$$

$$E_v = 0.25(\omega_e C_{pc} M_r)^2 / f_v$$

其中：C_{pc}——垂向相对运动概率修正系数，取为 1.2；

ω_e——遭遇频率，rad/s，按下式计算：

$$\omega_e = \omega(1 + \frac{0.4\omega V_c}{g})$$

ω——基于 80%船长 L 的有效波频，rad/s，按下式计算：

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{0.8L}}$$

V_c——计算航速，m/s，按下式计算：

$$V_c = 0.5144V$$

其中：M_r——计算剖面垂向船波相对运动，m，按下式计算：

$$M_r = H_{\min}\left[1 + \frac{4.5}{C_b + 0.2}\left(\frac{x_a}{L} - x_m\right)^2\right]$$

$H_{\min}$——最小计算波高，m，按下式计算：

$$H_{\min} = \frac{0.0545}{k_m} L\left(C_b + 0.2\right)^{0.3} \exp\left(-0.0044L\right)$$

x_a——计算剖面距尾垂线纵向位置，m；

x_m——系数，按下式计算，取不小于 0.2：

$$x_m = 0.45 - \frac{0.309V}{\sqrt{gL}}$$

k_m——系数，按下式计算：

$$k_m = 1 + \frac{4.5\left(0.5 - x_m\right)^2}{C_b + 0.2}$$

f_r、f_v——系数，按下式确定：

$$f_r = -0.000182L^2 + 0.1L - 9.45$$

$$f_v = -0.0000853L^2 + 0.0417L - 2.27$$

3.2.2 剖面砰击压力

各剖面砰击压力 P_{SL} 按下式计算：

$$P_{SL} = eP_{SE}$$

式中：e——砰击压力纵向修正系数，见表 3.2.2；

P_{SE}——底部砰击压力极值，kPa，见本节[3.2.1]；

修正系数 e　　**表** 3.2.2

位置	e
从距首垂线(X-0.125L)至距首垂线 X 之间	$\dfrac{2f-1}{0.05-C_b}$

位置	e
从首垂线至距首垂线(X-0.2L)之间	$0.5+\dfrac{f}{0.9-C_b}$
其余位置	1

注：C_b ——方形系数，当 C_b<0.7 时，C_b=0.7，当 C_b>0.8 时 C_b=0.8；

f——剖面位置至首垂线的距离与船长 L 之比；

X ——船首底部砰击加强范围，见第 6 章第 8 节[3.1.1]。

3.2.3 相对运动直接计算

剖面砰击压力计算时，计算横剖面的垂向船波相对运动方差 E_r 和相对速度方差 E_v 也可按本节规定进行直接计算确定，即等于按谱分析方法分别给出的运动响应 0 阶矩。此时，各计算剖面的 E_r 和 E_v 按直接计算方法分别给出，砰击压力 P_{SL} 以该剖面砰击压力极值 P_{SE} 实际计算值替代。

直接计算应采用根据装载手册确定的具有航行状态下最小首吃水的装载工况。

（1）海浪的功率谱密度函数 $S(\omega)$ 采用双参数 P-M 谱，按下式计算：

$$S(\omega)=\frac{124H_S^2}{T_Z^4}\omega^{-5}\exp(-\frac{496}{T_Z^4}\omega^{-4})f_0(\theta)$$

式中：H_S ——有义波高，m；

T_Z ——平均跨零周期，s；

ω ——波浪圆频率，rad/s；

$f_0(\theta)$ ——波浪扩散函数，按下式计算：

$$f_0(\theta)=\begin{cases}\dfrac{2}{\pi}\cos^2(\theta-\theta_m), & |\theta-\theta_m|<90\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

式中：θ ——扩展浪向, deg；

θ_m——主浪向, deg。

（2）砰击压力计算采用短期海况极值预报，有义波高 H_S 按下式计算：

$$H_S=8-0.6\left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5}\quad \text{m},\quad \text{对于}L<300m$$

$$H_S=8+0.6\left(\frac{L-300}{100}\right)^{1.5}\quad \text{m},\quad \text{对于}L\geq 300m$$

平均跨零周期 T_Z 及计算航行时间 t_n 按表 3.2.3 选取，中间值可采用线性插值法求得。

海浪条件选取 **表 3.2.3**

有义波高 H_S (m)	6.0	7.0	8.0	9.0
平均跨零周期 T_Z (s)	8.703	9.400	9.990	10.503
计算航行时间 t_n (h)	41	35	35	35

（3）计算航速采用 0.75V。

（4）计算航向角取顶浪和顶斜浪工况，浪向角间隔不大于 30 度。

（5）计算波浪频率范围取为 0.2 到 1.8rad/s，步长取 0.05rad/s。

（6）线性横摇阻尼可采用试验或经验公式确定，如无适用，可取为横摇临界阻尼值的 5%。

（7）当相对运动采用直接计算时，本节[3.1.1]中的砰击系数 k_1，按下式计算：

$$k_1 = \exp\left(1.377 + 2.419a_1 - 0.873a_3 + 9.624a_5\right)$$

式中：a_1, a_3, a_5 ——d_1 吃水下的计算横剖面按下式三参数保角变换方程映射到单位圆的系数：

$$Z_0 = U(\zeta + a_1\zeta^{-1} + a_3\zeta^{-3} + a_5\zeta^{-5})$$

Z_0 ——剖面坐标；

ζ ——圆的坐标；

U ——尺度比，$U = \dfrac{d_1}{1 - a_1 + a_3 - a_5}$。

3.3 舷侧冲击压力

3.3.1 设计压力

船首舷侧冲击压力 P_{FB}，kN/m²，按下式计算：

$$P_{FB} = 10C_{h1}(0.22 + 0.15\tan\alpha)(0.4V\sin\beta + 0.6\sqrt{L})^2$$

式中：$C_{h1} = 0.144(C_s - 0.5h_1)$，且不大于 0.8；

C_s——波浪系数，见第 4 节 2.2.1；

α——计算点处的外飘角，定义为在该处横剖面上，垂线与外板切线之间的夹角，(°)，见图 3.3.1；

β——计算点处的首尖角，定义为在该处水平面上，中心线与外板切线之间的夹角，(°)，见图 3.3.1；

L——船长，m，但计算时取值不必大于 250 m。

其中：h_1——夏季载重线与计算点之间的垂直距离，m，见图 3.3.1。对于外板，计算点取板格中心；对于构件，计算点取跨距中点。

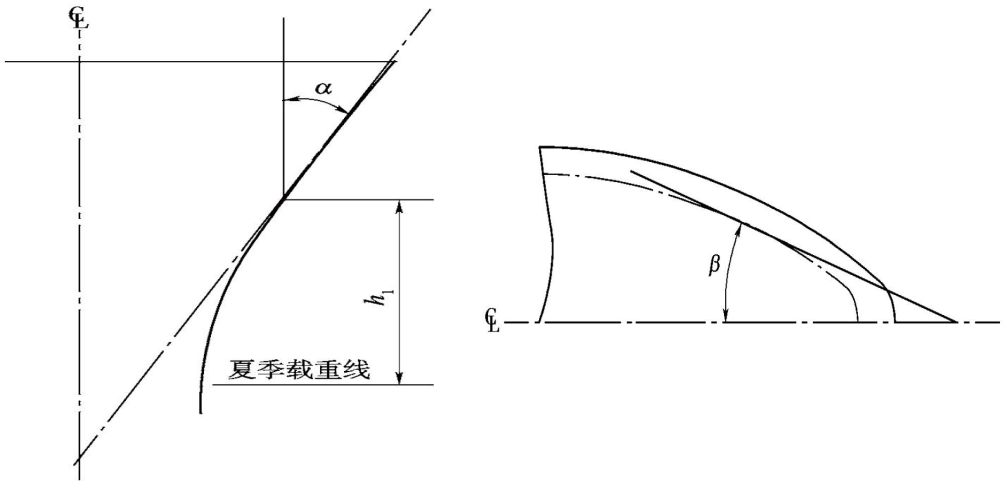


图 3.3.1 冲击角定义

4 上层建筑和甲板室外部压力

4.1 应用

4.1.1 上层建筑和甲板室外部压力仅应用于强度评估。仅考虑动压力应用于适当的结构，无静压力载荷分量。

4.1.2 动载荷工况概念不可用于上层建筑和甲板室的外部压力。

4.2 露天驾驶室顶

4.2.1 露天驾驶室顶的侧向压力 P_D，kN/m²，应取为：

$$P_D = 12.5$$

4.3 上层建筑侧壁

4.3.1 上层建筑外部侧壁的设计压力 P_{SI}，kN/m²，应取为：

$$P_{SI} = 2.1 C_s c_F \left(C_b + 0.7\right) \frac{20}{10 + z_{SD} - T_{SC}}$$

式中：

c_F—— 由表 4.3.1 得到的分布系数。

分布系数 c_F **表 4.3.1**

位置	c_F
$x/L < 0.2$	$1.0 + \frac{5}{C_b}\left(0.2 - \frac{x}{L}\right)$，$x/L$ 取不小于 0.1
$x/L \geq 0.2$	1.0

4.4 上层建筑和甲板室端部舱壁

4.4.1 上层建筑和甲板室外部后端部舱壁、前端部舱壁的设计压力 P_A，kN/m²，应取为：

$$P_A = f_n f_c \left[f_b f_d - \left(z_{SD} - T_{SC}\right)\right]$$，但应不小于 $P_{A\text{-}min}$。

式中：

f_n—— 表 4.4.1（1）定义的系数。

系数 f_n **表 4.4.1（1）**

舱壁类型	位置	f_n
无保护的前端舱壁(1)	最低层	$20 + \frac{L_2}{12}$
	第二层	$10 + \frac{L_2}{12}$
	三层及以上	$5 + \frac{L_2}{15}$

有保护的前端舱壁(1)	所有层	$5+\frac{L_2}{15}$
侧壁	所有层	$5+\frac{L_2}{15}$
后端舱壁	船中之后	$7+\frac{L_2}{100}-8\frac{x}{L_2}$
	船中之前	$5+\frac{L_2}{100}-4\frac{x}{L_2}$
(1) 当上层建筑或甲板室的前舱壁位于其他上层建筑或甲板室之后小于 B_x，所考虑的前舱壁宽度小于它之前的上层建筑或甲板室后舱壁的宽度，则该前舱壁可以考虑为受保护的。B_x 为前舱壁处的船舶宽度。 (2) 最低层甲板通常系指计量型深 D 的最上层连续甲板的正上面一层，但是，如果(D-T_{SC})超过根据修订的 ILLC 的最小未修正表列干舷至少一层标准上层建筑高度，该高度定义见第 1 章第 4 节[3.3]，则该层可以定义为第 2 层，其上面一层为第 3 层。		

f_c—— 系数，应取为：

$$f_c = 0.3 + 0.7\frac{b_1}{B_1}$$，但不小于 0.475。

b_1—— 所考虑位置处甲板室的宽度。

B_1—— 船舶的露天甲板在所考虑位置处的实际宽度。

对机舱棚的露天部分，f_c 应取不小于 1.0。

f_d—— 系数，应取为：

$$f_d = \frac{L}{10}e^{-(L/300)} - \left(1-\left(\frac{L}{150}\right)^2\right)$$，对于 $L < 150$ m

$$f_d = \frac{L}{10}e^{-(L/300)}$$，对于 150 m $\le L <$ 300 m

$f_d = 11.03$，对于 $L \ge 300$ m

f_b—— 表 4.4.1（2）定义的系数。

系数 f_b **表 4.4.1（2）**

舱壁位置(1)	f_b
$\frac{x}{L} < 0.45$	$1.0+\left(\frac{x/L-0.45}{C_{B1}+0.2}\right)^2$
$\frac{x}{L} \ge 0.45$	$1.0+1.5\left(\frac{x/L-0.45}{C_{B1}+0.2}\right)^2$
其中： C_{B1}—— 方形系数，取不小于 0.6 且不大于 0.8。当位于船中之前的甲板室后端壁，C_{B1} 可取为 0.8。 (1) 对于甲板室侧壁，甲板室应被分为长度近似相等的若干部分，每部分不超过 0.15L，x 取每部分中点的 x 坐标。	

$P_{A\text{-}min}$—— 最小侧向压力，kN/m2，定义见表 4.4.1（3）。

最小侧向压力 $P_{A\text{-}min}$ **表 4.4.1（3）**

	$P_{A-\min}$，kN/m²	
L	无保护前端的最底层	其他（1）
$90 < L \le 250$	$25+\frac{L}{10}$	$12.5+\frac{L}{20}$
$L > 250$	50	25
（1）对第 4 层及以上，P_{Amin} 应取等于 12.5 kN/m²。		

5 舱口盖上的外部压力

5.1 应用

5.1.1 舱口盖上的外部压力仅应用于强度评估。

5.2 上浪载荷

5.2.1 舱口盖上任一载荷点的上浪载荷 P_{HC}，kN/mm²，应按如下取值：

- 对于根据第 7 章进行的货舱分析：

  $P_{HC}=P_D-\rho g(z_{HC}-D)$，但不小于 0。

- 对于其他情况：$P_{HC}=P_{D,\min}$，见表 2.2.3（1）定义。

P_D——舱口盖处甲板的上浪压力，kN/mm²，按照 [2.2] 得到，取χ等于 1.0。

z_{HC}——舱口盖顶部的 z 坐标，m。

5.3 舱口盖上的承载载荷

5.3.1 如果舱口盖上承载分布载荷或单元载荷，压力应按照 [2.3] 得到。

第 6 节 内部载荷

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

a_X, a_Y, a_Z：x_G, y_G, z_G 点处的纵向、横向和垂向加速度，m/s²，定义见本章第 3 节[3.2]。

h_{air}—— 液舱顶以上的空气管或溢流管高度，m。

P_{drop}—— 在采用溢流法交换压载水期间，由于持续不变的液流通过空气管或溢流管而造成的过载压力，kN/m²。其值应由设计者提供，但应不小于 25 kN/m²。

P_{PV}—— 设计蒸汽压力，如设置压力释放阀，取为压力释放阀的设定压力，但不应小于 25 kN/m²。

x, y, z—— 载荷计算点基于本章第 1 节[1.2.1]定义的坐标系的 X，Y 和 Z 坐标，m。

x_G, y_G, z_G—— 基于本章第 1 节[1.2]定义的坐标系下的舱室重心，对于液舱，取为舱室形心。

Z_{top}—— 不包括小舱口的液舱最高点的 Z 坐标，m。

ρ_L—— 液舱的液体密度，t/m³，但不小于：

- 强度评估

  ρ_L=1.025，用于燃油在内的所有液体。如果 98%充满的液舱准备装载密度超过

1.025（即，$\rho_{\max\text{-}LM} > 1.025$）的重油，则 $\rho_L = \rho_{\max\text{-}LM}$

- 疲劳评估

  ρ_L=0.98 ，对于燃油

  ρ_L=1.025 ，对于其他液体

$\rho_{max\text{-}LM}$—— 对应于 98%充满的装载的最大燃油密度，t/m³，取自装载手册中的任意装载工况或设计者设定的值。

f_β—— 本章第 4 节定义的系数。

f_{dc}——干散货系数，取为：

- f_{dc} =1.0，对于强度评估
- f_{dc} =0.5，对于疲劳评估。

D_1——船中处从基线到干舷甲板边线处的距离，m。

h_{DB}——中纵剖线处的双层底高度，m，在货舱长度中点量取，见图 2.1.1。

h_{LS}——从内底量起的底凳的平均高度，m。

$K_{C\text{-}f}$——系数，取为：

$$K_{C-f} = \tan^2\left(45 - \frac{\Psi}{2}\right)$$

perm——货物渗透率，取为：

perm =0.3，对于铁矿砂、煤炭和水泥

perm =0.0，对于钢卷和钢制包装货

sc——槽条间距，m，定义见第 3 章第 5 节 [10.3.2] 。

h_C——内底至散货上表面的散装货物高度，m。

z_C——载荷计算点处基线到对应的货物上表面的高度，m，取为：

$$z_C = h_{DB} + h_C \text{ 。}$$

1 液体压力

1.1 应用

1.1.1 用于完整工况强度和疲劳评估的压力

本章第 7 节定义的静（S）设计载荷场景的作用在液舱边界任一载荷点的内部液体压力，kN/m²，应取为：

$$P_{in} = P_{ls} \text{，但不小于 0.}$$

本章第 7 节定义的静+动（S+D）设计载荷场景的作用在液舱边界任一载荷点的内部液体压力，kN/m²，应取为：

$$P_{in} = P_{ls} + P_{ld} \text{，但不小于 0.}$$

式中：

P_{ls}——液舱内液体产生的静压力，kN/m²，定义见[1.2]

P_{ld}——液舱内液体产生的动压力，kN/m²，定义见[1.3]

1.1.2 用于进水工况强度评估的压力

对于本章第 7 节定义的进水静（S）设计载荷场景，作用在干散货舱、液舱或其他处所水密边界任一载荷点进水工况的内部压力，kN/m²，应取为：

$P_{in} = P_{fs}$，但不小于 $\rho g d_0$.

对于本章第 7 节定义的进水静+动（S+D）设计载荷设定，作用在干散货舱、液舱或其他处所水密边界任一载荷点进水工况的内部压力，kN/m²，应取为：

$$P_{in} = P_{fs} + P_{fd}$$，但不小于$\rho g d_0$

d_0——距离，m，取为：$d_0 = 2.4$ 。

对于干散货舱垂直槽形舱壁的槽条，应采用 [3] 中规定的用于干散货的进水压力和力。

1.2 液体静压力

1.2.1 正常海上作业

正常海上作业中由液舱内液体产生的静压力 P_{ls}，kN/m²，应取为：

$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z) + P_{PV}$，对于设有压力释放阀的液舱

$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z + 0.5h_{air})$，对于其他情况。

1.2.2 港内/遮蔽水域作业

港内/遮蔽水域作业时由液舱内液体产生的静压力 P_{ls}，kN/m²，应取为：

$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z + h_{air}) + P_{drop}$，对于压载舱

$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z) + P_{PV}$，对于设有压力释放阀的液舱

$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z + 0.5h_{air})$，对于其他情况。

1.2.3 顺序法压载水置换

对于采用顺序法压载水置换作业的压载舱内液体产生的静压力 P_{ls}，kN/m²，应取为：

$$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z + 0.5h_{air})$$

1.2.4 溢流法压载水置换

对于采用溢流法压载水置换作业的压载舱内液体产生的静压力 P_{ls}，kN/m²，应取为：

$$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z + h_{air}) + P_{drop}$$

1.2.5 采用压载水处理系统压载

对于采用压载水处理系统进行压载作业的由液舱内液体产生的静压力 P_{ls}，kN/m²，应按[1.2.3]定义的顺序法压载水置换处理。如果压载水置换系统含有除[1.2.3]定义的压力外应考虑为 P_{drop} 等的额外压力，设计者应告知 CCS。

1.2.6 用于疲劳评估的液体静压力

用于疲劳评估的液舱内液体产生的静压力 P_{ls}，kN/m²，应取为：

$P_{ls} = \rho_L g(z_{top} - z)$ ，对于所有液舱（压载舱、燃油舱及其他液舱）

1.3 液体动压力

1.3.1 由液舱内液体产生的动压力 P_{ld}，kN/m²，应取为：

$$P_{ld} = f_\beta \rho_L [a_Z (z_0 - z) + a_X (x_0 - x) + a_Y (y_0 - y)]$$

式中：

x_0—— 参考点 X 坐标，m。

y_0—— 参考点 Y 坐标，m。

z_0—— 参考点 Z 坐标，m。

参考点取为液舱顶部边界所有点中使 V_j 的值最大对应的点。

$$V_j = a_X\left(x_j - x_G\right) + a_Y\left(y_j - y_G\right) + \left(a_Z + g\right)\left(z_j - z_G\right)$$

式中：

x_j—— 液舱顶部第 j 个点的 X 坐标，m。

y_j—— 液舱顶部第 j 个点的 Y 坐标，m。

z_j—— 液舱顶部第 j 个点的 Z 坐标，m。

1.4 进水工况下的静压力

1.4.1 进水舱室的静压力

进水舱室水密边界的静压力 P_{fs}，kN/m²，应取为：

$$P_{fs} = \rho g\left(z_{FD} - z\right)，但不小于 0.$$

式中：z_{FD}—— Z 坐标，m，取为所考虑横剖面在干舷甲板边线处的 Z 坐标和破损状态下最深平衡水线 Z 坐标的较大值。

1.5 进水工况的动压力

1.5.1 进水舱室的动压力

进水舱室水密边界的动压力 P_{fd}，kN/m²，应取为：

$$P_{fd} = f_\beta \rho\left[a_Z\left(z_{0FD} - z\right) + a_X\left(x_0 - x\right) + a_Y\left(y_0 - y\right)\right]$$

式中：z_{0FD}——进水舱室有效参考点的 Z 坐标，m，应取为：

当 $z_{FD} > z_0$ 时，$z_{0FD} = z_0$

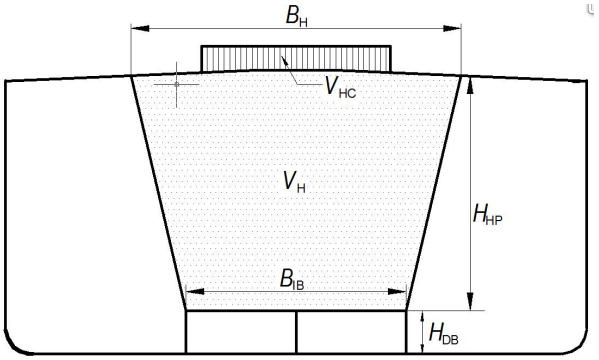
当 $z_{FD} \leqslant z_0$ 时，$z_{0FD} = z_{FD}$

如进水舱室为非密闭舱室，参考点可取为开口位置。

2 干散货压力和力

2.1 干散货舱特性

2.1.1 矿砂船干散货舱的主要几何参数见图 2.1.1。



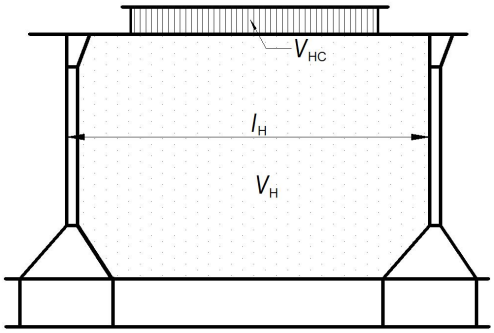


图 2.1.1 矿砂船货舱参数定义

B_H——货舱宽度，m，量自货舱中部纵舱壁顶部与主甲板连接处，见图 2.1.1。

l_H——横舱壁间在中纵剖线处的货舱长度，m，如设置槽型舱壁，应从槽条对应肋位量取。

B_{IB}——量自货舱中部内底宽度，m，见图 2.1.1。

D_1——船中处从基线到干舷甲板边的距离，m。

h_C——货物高度，m，取为内底至散货上表面的垂直距离。

h_{DB}——中纵剖线处的双层底高度，m，量自货舱中部，见图 2.1.1。

h_{HP}——所考虑货舱中部从中纵剖线处的内底至顶边舱与内壳上交点的垂直距离，m，见图 2.1.1。

V_{Full}——达到舱口围顶部的干散货舱容积，m^3，取为：

$V_{Full} = V_H + V_{HC}$

V_H——向上达到主甲板和舱口围相交水平面的货舱容积，m^3，不包括舱口围板所包围的容积，见图 2.1.1。

V_{HC}——舱口围体积，m^3，为从主甲板和舱口围侧板相交的水平面到舱口围顶部的部分，由船中货舱决定，见图 2.1.1。

V_{TS}——底凳体积，m^3，为横舱壁底凳在货舱长度 l_H 和底边舱内侧之间的体积。

x_G, y_G, z_G——舱室重心，对于液舱或者装满（即 V_{Full}）时的干散货舱，取为舱室型心；对于未装满的干散货舱，x_G, y_G 取为干散货舱的型心的 X 和 Y 坐标，z_G 按如下取值：

$$z_G = h_{DB} + h_{C-cl}/2$$

z_C——基线到载荷计算点对应的货物上表面的高度，m，取为：

$$z_C = h_{DB} + h_C。$$

α ——所考虑的板与水平面之间的夹角，(°)。

$\Psi = 30°$ ，对于一般情况

$\Psi = 35°$ ，对于铁矿砂

$\Psi = 25°$ ，对于水泥

K_C——系数，取为：

$K_C = \cos^2\alpha + (1 - \sin\psi)\sin^2\alpha$ 对内底、底边舱、横舱壁和纵舱壁、底凳、垂直顶凳。

$K_C = 0$ 对上甲板和倾斜顶凳。

ρ_c——干散货货物密度，除非在装载手册中限定了可替代的最大货物密度，一般来说，

重货取为 3.0，t/m³，轻货取为 M_{FULL}/V_{FULL}，t/m³。

ρ_L——液舱和干散货压载舱的液体密度，t/m³。

ρ_{ST}——钢材密度，取为 7.85，t/m³。

2.1.2 装满和部分装的干散货舱定义如下：

（1）装满货舱

干散货密度使货舱能够装载至舱口围顶部，如图 2.1.3 所示。

货物上表面及它在货舱内的有效高度 h_C 应根据[2.1.3]决定。

（2）部分装货舱

干散货密度使货舱不能够装载至舱口围顶部，如图 2.1.4（1）和图 2.1.4（2）所示。

货物上表面及它在货舱内的有效高度 h_C 应根据[2.1.4]决定。

2.1.3 装满货舱干散货上表面定义

对于[2.1.2]定义的装满货舱，包括非棱柱型货舱，货物有效的上表面为中纵剖面处内底向上 h_C 的一个等效的水平面。

h_C 的值由船中货舱的长度中点处计算得到，它在整个货舱区域保持不变，应由以下决定：

$$h_C = h_{HPU} + h_0$$

式中：

$$h_0 = \frac{S_A}{B_H}$$

$$S_A = S_0 + \frac{V_{HC}}{\ell_H}$$

S_0——从顶凳斜板下沿（视具体情况而定）至主甲板与舱口围交点的阴影面积，m²，由船中货舱决定，见图 2.1.3。

H_{HPU}——内底量至顶凳下沿的垂直距离，m。

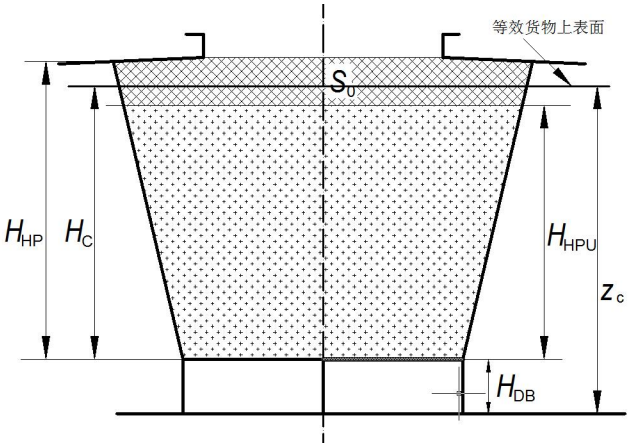


图 2.1.3 装满货舱有效货物上表面定义

2.1.4 部分装货舱干散货上表面定义

对于[2.1.2]定义的未装满货舱，包括非棱柱型货舱，货物有效的上表面由三部分组成。内底板之上 h_C 高度处宽度为 $B_H/2$ 的水平面

在中部水平面两侧和外壳或内壳之间，见图 2.1.4（1），或者可能为中部水平面两侧和底边舱斜板之间，见图 2.1.4（2），为 $\psi/2$ 度的斜面。

h_C 的值由所考虑货舱的长度中点处计算得到，它在整个货舱长度范围内保持不变，应由以下决定：

对于 $|y| \le \frac{B_H}{4}$：$h_C = h_{C-CL}$

对于 $\frac{B_H}{4} < |y| \le \frac{B_2}{2}$：$h_C = h_{C-CL} - \left(|y| - \frac{B_H}{2}\right)\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)$

对于 $|y| > \frac{B_2}{2}$：$h_C = 0$

式中：

h_1——高度，m，取为：

$$h_1 = \frac{M}{\rho_C \cdot B_H \ell_H} - \left(\frac{B_H + B_{IB}}{2B_H}\right)h_{HPL} - \frac{3}{16}B_H \tan\frac{\psi}{2} + \frac{V_{TS}}{B_H \ell_H}$$

对于 $h_1 \ge 0$，见图 2.1.4（1）：

$$h_{C-CL} = h_{HPL} + h_1 + h_2$$

$$h_2 = \frac{B_H}{4}\tan\frac{\Psi}{2}$$

$$B_2 = B_H$$

对于 $h_1 < 0$，见图 2.1.4（2）：

$$h_{C-CL} = h_{11} + h_{22}$$

$$h_{11} = h_{HP}\left(\frac{B_2 - B_{IB}}{B_H - B_{IB}}\right)$$

$$h_{22} = \left(\frac{B_2}{2} - \frac{B_H}{4}\right)\tan\frac{\Psi}{2}$$

$$B_2 = \sqrt{\frac{\frac{1}{l_H}\left(\frac{M}{\rho_C} + V_{TS}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{h_{HP} \cdot B_{IB}^2}{B_H - B_{IB}}\right) + \frac{B_H^2}{16}\tan\frac{\Psi}{2}}{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{h_{HP}}{B_H - B_{IB}}\right) + \frac{1}{2}\tan\frac{\Psi}{2}\right]}}$$

h_{C-CL}——中纵剖线处的货物表面高度，m，见图 2.1.4（1）和图 2.1.4（2）。

B_2——货物最大宽度，m，见图 2.1.4（1）和图 2.1.4（2）。

M——货舱装载货物重量，t。

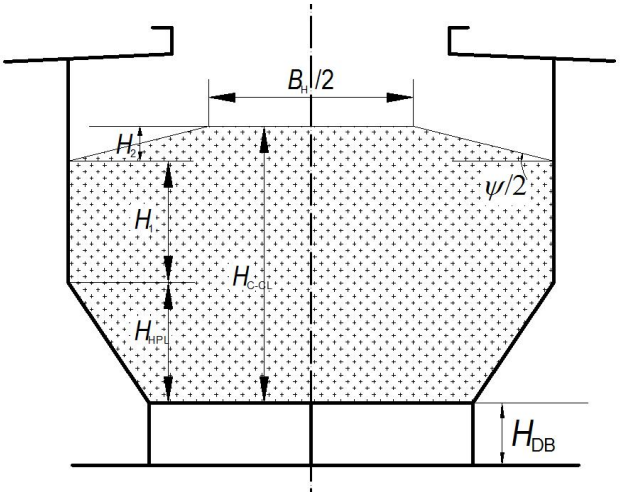


图 2.1.4（1） 部分装载货舱 $h_1 \ge 0$ 时有效货物上表面定义

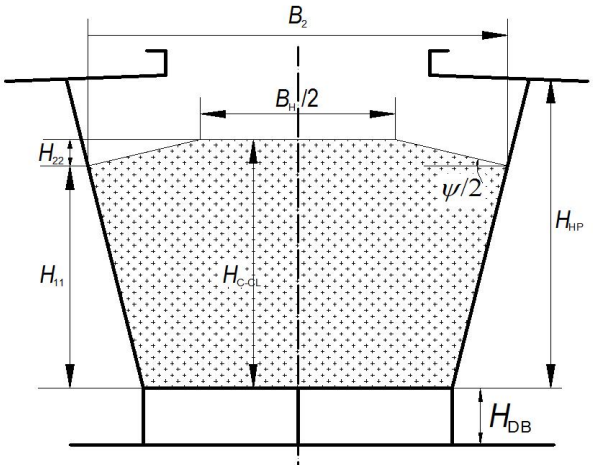


图 2.1.4（2） 部分装载货舱 $h_1 < 0$ 时有效货物上表面定义

2.1.5 有限元应用

有限元分析中用到的干散货压力应按如下的过程：

（1）决定货物高度 h_C，装满货舱根据[2.1.3]，部分装货舱根据[2.1.4]；

（2）根据[2.2.2]定义的静压力和[2.3]定义的静剪切分布力决定对应的静载荷，并应用于有限元模型；

（3）计算实际的货物质量 M_{actual}，t；

（4）决定有效的货物密度：

$$\rho_{eff} = \frac{M}{M_{actual}} \rho_C$$

（5）用 ρ_{eff} 替代 ρ_C 计算最终的压力分布和剪切载荷。

2.2 干散货压力

2.2.1 作用于货舱边界任一点由干散货产生的总压力，kN/m²，应取为：

$P_{in} = P_{bs}$，用于完整工况强度评估定义的静（S）设计载荷设定。

$P_{in} = P_{bs} + P_{bd}$，用于完整工况强度评估定义的静+动（S+D）设计载荷设定。

但不小于 0。

式中：

P_{bs}——干散货产生的静压力，kN/m²，定义见[2.2.2]。

P_{bd}——干散货产生的惯性动压力，kN/m²，定义见[2.2.3]。

决定在[2.2.2]和[2.2.3]中定义的用于有限元分析的静压力和动压力时，应该用 ρ_{eff} 替代 ρ_C。

2.2.2 干散货静压力

由干散货产生的静压力 P_{bs}，kN/m²，应取为：

$$P_{bs} = \rho_C g K_C (z_C - z) \text{但不小于 0。}$$

2.2.3 干散货动压力

任一载荷工况由干散货产生的动压力 P_{bd}，kN/m²，应取为：

$P_{bd} = f_\beta \rho_C [\, 0.25\, a_X (x_G - x) + 0.25\, a_Y (y_G - y) + f_{dc} K_C a_Z (z_C - z)\,]$，对于 $z \le z_C$；

$P_{bd} = 0.0$，对于 $z > z_C$。

2.3 干散货剪切载荷

2.3.1 对于有限元强度评估，当载荷计算点的 $z \le z_C$ 时，除[2.2]定义的干散货压力外，以下的剪切载荷压力应被考虑：

（1）对于静（S）设计载荷设定：由于重力作用于底边舱斜板和底凳板的静剪切载荷 $P_{bs\text{-}s}$，定义见[2.3.2]。

（2）对于静+动（S+D）设计载荷设定，考虑以下的动剪切载荷压力：

- $P_{bs\text{-}s} + P_{bs\text{-}d}$，用于底边舱斜板和底凳板，定义见[2.3.3]；
- $P_{bs\text{-}dx}$，用于内底板纵向，定义见[2.3.4]；
- $P_{bs\text{-}dy}$，用于内底板横向，定义见[2.3.4]；

（3）对于整船有限元强度评估的设计载荷设定，应考虑 x,y 方向加速度产生剪切载荷对斜板的作用，见[2.3.5]。

在[2.3.2]~ [2.3.5]中定义的用于有限元分析剪切载荷时，应该用 ρ_{eff} 替代 ρ_C。

2.3.2 底边舱斜板、倾斜纵舱壁和底凳板上的静剪切载荷

由干散货重力作用于底边舱斜板、倾斜纵舱壁和底凳板产生的静剪切载荷压力 $P_{bs\text{-}s}$，（沿板向下为正），kN/m^2，应取为：

$$P_{bs-s} = \rho_C g \frac{(1-K_C)(z_C - z)}{\tan\alpha}$$

2.3.3 底边舱斜板和底凳板上的动剪切载荷

任一动载荷工况由干散货力作用于底边舱斜板或倾斜纵舱壁和底凳板产生的动剪切载荷压力 $P_{bs\text{-}d}$，（沿板向下为正），kN/m^2，应取为：

$$P_{bs-d} = f_\beta \rho_C a_Z \frac{(1-K_C)(z_C - z)}{\tan\alpha}$$

2.3.4 用于有限元分析的沿内底板的动剪切载荷

任一动载荷工况由干散货力作用于内底板产生的纵向方向（向艏为正）的动剪切载荷压力 $P_{bs\text{-}dx}$，kN/m^2，应分别取为：

$$P_{bs-dx} = -0.75 f_\beta \rho_C a_X h_C$$

任一动载荷工况由干散货力作用于内底板产生的横向方向（向左舷为正）的动剪切载荷压力 $P_{bs\text{-}dy}$，kN/m^2，应分别取为：

$$P_{bs-dy} = -0.75 f_\beta \rho_C a_Y h_C$$

2.3.5 对于整船有限元强度评估，考虑载荷平衡的要求，对内底板、底边舱斜板或倾斜纵舱壁、底凳斜板上应考虑 x、y 方向加速产生的摩擦力。任意斜板上的摩擦力按以下要求计算：

（1）板的水平方向：

$$P = -0.75\rho_C a_X h_C \cos\alpha \cdot \cos\alpha_X - 0.75\rho_C a_Y h_C \cos\alpha \cdot \cos\alpha_Y$$

（2）板的垂直内底方向：

$$P = -0.75\rho_C a_X h_C \sin\alpha_X - 0.75\rho_C a_Y h_C \sin\alpha_Y$$

式中：α_X 为斜板水平方向 X 方向的夹角，α_Y 为斜板水平方向与 Y 方向的夹角。

3 晃荡载荷

3.1 一般要求

3.1.1 本条适用于压载舱和体积大于 100m³ 的其他液舱。

3.1.2 本条规定的晃荡运动及其载荷的计算，应满足 CCS《液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南》的要求。

4 非露天甲板和平台载荷

4.1 应用

4.1.1 一般要求

[4.2]和[4.3]定义的载荷适用于非露天甲板，起居甲板和平台。

4.2 分布载荷产生的压力

4.2.1 如果甲板上载有分布载荷，应考虑由此分布载荷产生的静压力和动压力。

静分布载荷应由设计者定义，但起居甲板不小于 3 kN/m²，其他甲板和平台不小于 10 kN/m²。

对于本章第 7 节给出的静（S）设计载荷场景，分布载荷产生的压力 P_{dl}，kN/m²，应取为：

$$P_{dl} = P_{dl-s}$$

对于静+动（S+D）设计载荷场景，分布载荷产生的压力 P_{dl}，kN/m²，应由动载荷工况的包络值获得，取为：

$$P_{dl} = P_{dl-s} + P_{dl-d}\text{，但不小于 0。}$$

式中：

P_{dl-s}—— 由分布载荷产生的静压力，kN/m²。

P_{dl-d}—— 由分布载荷产生的动压力，kN/m²，应取为：

$$P_{dl-d} = f_\beta \frac{a_{Z\text{-env}}}{g} P_{dl-s}$$

$a_{z\text{-}env}$—— 所考虑载荷位置动载荷工况的垂向加速度包络值，m/s²，见本章第 3 节[3.3.3]。

4.3 单元载荷产生的集中力

4.3.1 如果内部甲板上承载单元载荷，应考虑静力和动力。

对于本章第 7 节给出的静（S）设计载荷场景，集中载荷的力 F_U，kN，应取为：

$$F_U = F_{U-s}$$

对于静+动（S+D）设计载荷场景，集中载荷的力 F_U，kN，应由动载荷工况的包络值获得，取为：

$$F_U = F_{U-s} + F_{U-d}\text{，但不小于 0。}$$

式中：

$F_{U\text{-}s}$—— 单元载荷产生的静力，kN，应取为 $F_{U\text{-}s}=m_U g$。

$F_{U\text{-}d}$—— 单元载荷产生的动力，kN，应取为 $F_{U\text{-}d}=m_U f_\beta a_{z\text{-}env}$：

m_U—— 承载单元载荷的质量，t。

$a_{z\text{-}env}$—— 所承载单元载荷重心动载荷工况的垂向加速度包络值，m/s²，见本章第 3 节[3.3.3]。

5 用于液舱试验的设计压力

5.1 定义

5.1.1 实际的强度试验应根据第 1 章第 2 节执行，采用设计静压力进行结构评估。

液舱试验的设计压力 P_{ST}，kN/m²，应取为：

$$P_{ST}=10(z_{ST}-z)$$

式中：z_{ST}—— 设计试验载荷高度，m，按表 5.1.1 定义。

试验载荷高度 z_{ST} 表 5.1.1

舱室	z_{ST}
双层底液舱〔1〕	以下之大者： $z_{ST}=z_{top}+h_{air}$ $z_{ST}=z_{bd}$
双舷侧液舱〔1〕、用作液舱的首尾尖舱	以下之大者： $z_{ST}=z_{top}+h_{air}$ $z_{ST}=z_{top}+2.4$
液舱舱壁，深舱，燃油舱	以下之大者： $z_{ST}=z_{top}+h_{air}$ $z_{ST}=z_{top}+2.4$ $z_{ST}=z_{top}+0.1P_{PV}$
锚链舱（如在防撞舱壁之后）	$z_{ST}=z_{top}$
独立液舱	以下之大者： $z_{ST}=z_{top}+h_{air}$ $z_{ST}=z_{top}+0.9$
压载管隧	试验载荷高度对应于压载水泵最大压力
其中： z_{bd}——舱壁甲板 Z 坐标，m。 z_h——舱口顶端 Z 坐标，m。 （1） 对于与双舷侧液舱联通的双层底液舱，应采用对应于“双舷侧液舱、用作液舱的首尖舱和尾尖舱”的 z_{ST}。	

6 进水工况干货的压力和力

6.1 垂直槽形水密横舱壁

6.1.1 应用

本子条款定义的压力适用于矿砂船货舱垂直槽形水密横舱壁的进水工况评估。

每个货舱应按单独进水考虑，见图 6.1.4（1），（2）和（3）。

6.1.2 通则

作用于各舱壁的载荷，为货物载荷和所校核舱壁的相邻一个货舱进水产生载荷的组合。

在任何情况下，还应考虑无货物的进水载荷的压力。

应采用货物载荷和进水载荷的最不利组合校核各舱壁的尺寸，包含装载手册中的均匀装载工况和非均匀装载工况，并考虑载货舱和空货舱分别进水的情况。

为了本条款的目的，进行以下各项的定义：

（1）设计载荷限制：对货舱的特定设计载荷限制应由设计者在装载手册中定义的装载工况表示。

（2）应考虑的最大货物质量：除非船舶拟在非均匀装载工况下仅载运铁矿砂或密度为1.78 t/m^{3}及以上散货，货舱可以载运的最大货物质量还应按该舱装至舱口围顶端考虑。

（3）均匀装载工况：均匀装载工况系指按不同货物密度修正后，每个货舱的最高和最低装载水平之比不超过1.20的装载工况。

（4）包装货物：载运包装货物（如钢厂产品）的货舱应视为空舱。

（5）不考虑的装载条件：不必考虑在均匀装载工况下涉及多港装卸操作所造成的非均匀装载工况要求的验证。

6.1.3　进水液面

进水液面z_F是当船舶处于正浮位置时自基线垂直量取的距离，m，从表6.1.3中获得。

垂直槽形横舱壁的进水液面z_F，m　　表6.1.3

矿砂船类型	装 载 工 况	垂直槽形横舱壁位置	
		最前端	其他
载重量小于50,000吨的B型干舷矿砂船	货物密度小于1.78 t/m^{3}的非均匀装载工况	$z_F = 0.9D_1$	$z_F = 0.8\ D_1$
	其他工况	$z_F = 0.95\ D_1$	$z_F = 0.85\ D_1$
其他矿砂船	货物密度小于1.78 t/m^{3}的非均匀装载工况	$z_F = 0.95\ D_1$	$z_F = 0.85\ D_1$
	其他工况	$z_F = D_1$	$z_F = 0.9\ D_1$

6.1.4　进水方式

应考虑以下三种不同的进水方式：

- 进水液面在货物上表面之下，（见图6.1.4（1），$z_C > z_F$）；
- 进水液面在货物上表面之上，（见图6.1.4（2），$z_C \leqslant z_F$）；
- 进水货舱是空舱，（见图6.1.4（3），$z_C = h_{DB}$）。

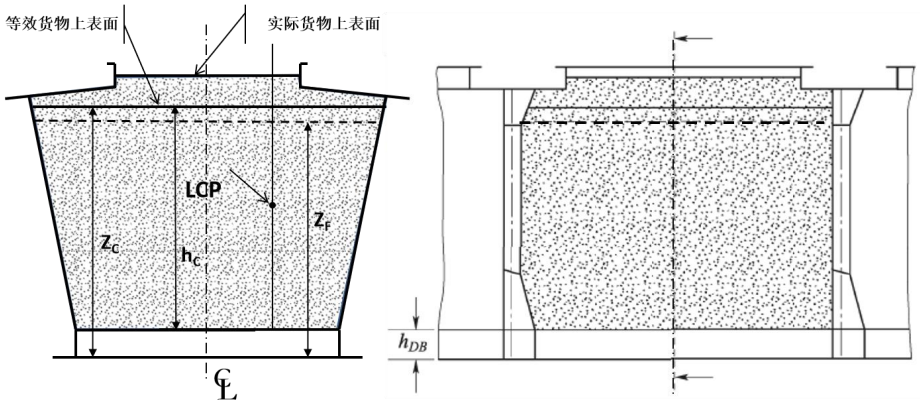


图6.1.4（1）　进水面位于货物上表面之下

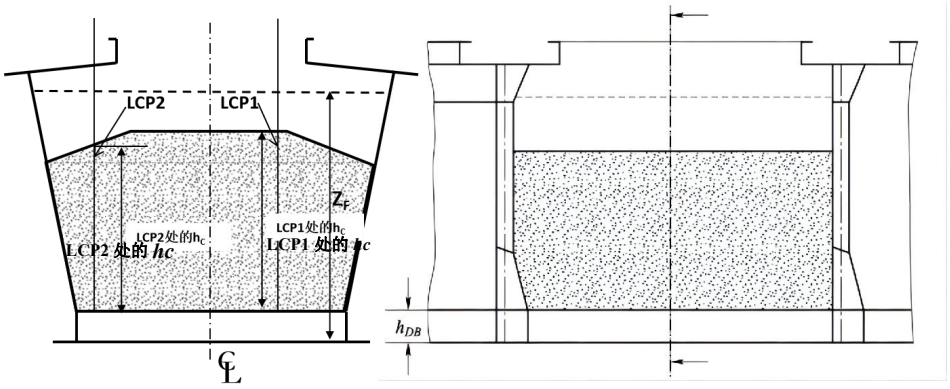


图 6.1.4（2） 进水面位于货物上表面之上

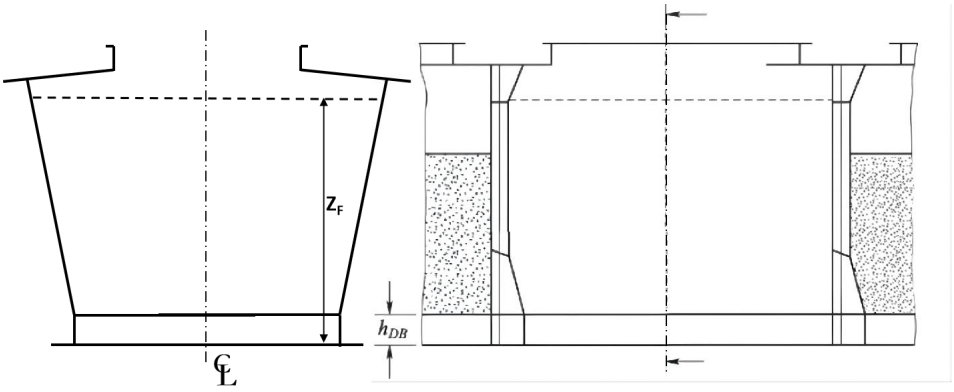


图 6.1.4（3） 空货舱进水

6.1.5 进水货舱垂直槽形横舱壁上的压力和力

在 [6.1.4] 定义的每一种进水方式下，距离基线 z 的垂直槽形横舱壁上任意一点的静压力 $P_{bf\text{-}s}$，kN/m^2，在表 6.1.5（1）中给出。

在 [6.1.4] 定义的每一种进水方式下作用于横舱壁槽条上的力 $F_{bf\text{-}s}$，kN，在表 6.1.5（2）中给出。

进水货舱垂直槽形横舱壁上的静压力 $P_{bf\text{-}s}$ 表 6.1.5（1）

进水工况	载荷点位置	压力 $p_{bf\text{-}s}$， kN/m^2
$z_C > z_F$	$z > z_C$	$P_{bf\text{-}s}=0$
	$z_C > z \geqslant z_F$	$P_{bf\text{-}s}=\rho_C g(z_C-z)K_{C\text{-}f}$
	$z_F > z \geqslant h_{DB}$	$P_{bf\text{-}s}=\rho g\,(z_F - z)+[\rho_C(z_C - z) - \rho(1-perm)(z_F-z)]\,g\,K_{C\text{-}f}$
$h_{DB} \leqslant z_C \leqslant z_F$	$z > z_F$	$P_{bf\text{-}s}=0$
	$z_F \geqslant z \geqslant z_C$	$P_{bf\text{-}s}=\rho g\,(z_F - z)$
	$z_C > z \geqslant h_{DB}$	$P_{bf\text{-}s}=\rho g\,(z_F - z)+[\rho_C - \rho(1- perm)]\,g\,(z_C - z)K_{C\text{-}f}$

作用于进水货舱槽条上的力 $F_{bf\text{-}s}$　　表 6.1.5（2）

进水工况	$F_{bf\text{-}s}$, kN
$z_C > z_F$	$F_{bf-s} = s_C \left\{ \rho_C g \frac{(z_C - z_F)^2}{2} K_{C-f} + \left[\frac{\rho_C g (z_C - z_F) K_{C-f} + p_{bf-s-LE}}{2} \right] (z_F - h_{DB} - h_{LS}) \right\}$
$z_F \geqslant z_C$	$F_{bf-s} = s_C \left\{ \rho g \frac{(z_C - z_F)^2}{2} + \left[\frac{\rho g (z_F - z_C) + p_{bf-s-LE}}{2} \right] (z_C - h_{DB} - h_{LS}) \right\}$

其中：$P_{bf\text{-}s\text{-}LE}$ 取为根据表 6.1.5（1）计算的用于 $z = h_{LS} + h_{DB}$ 处的静压力。

6.1.6　非进水货舱垂直槽形横舱壁上的压力和力

垂直槽形横舱壁上位于基线以上 z 水平的点，由横舱壁完整一侧（该横舱壁的另一侧货舱进水）未进水的货舱的干散货产生的静压力 P_{bs}，kN/m²，应取为：

$$P_{bs} = \rho_C g K_{C\text{-}f} (z_C - z)$$，但不小于 0。

作用在槽条上的合力 F_{bs}，kN，应取为：

$$F_{bs} = \rho_C g s_C \frac{(z_C - h_{DB} - h_{LS})^2}{2} K_{C\text{-}f}$$

6.1.7　进水货舱垂直槽形横舱壁上的合成压力与合成力

表 6.1.7 中给出的作用在舱壁上各点的合成压力 P_R，kN/m²，和作用在槽条上的合力 F_R，kN，用于垂直槽形横舱壁结构的进水工况评估，其中：

$P_{bf\text{-}s}$ ——进水货舱压力，kN/m²，定义见 [6.1.5] 。

P_{bs}——非进水货舱压力，kN/m²，定义见 [6.1.6] 。

$F_{bf\text{-}s}$ ——进水货舱内作用于槽条的力，kN，定义见 [6.1.5] 。

F_{bs}——非进水货舱内作用于槽条的力，kN，定义见 [6.1.6] 。

进水工况垂直槽形横舱壁上的合成压力 P_R 的合力 F_R　　表 6.1.7

装载方式	合成压力 P_R, kN/m²	合力 F_R, kN	适用性
均匀装载	$P_R = P_{bf\text{-}s} - 0.8 P_{bs}$	$F_R = F_{bf\text{-}s} - 0.8 F_{bs}$	所有矿砂船
非均匀装载	$P_R = P_{bf\text{-}s}$	$F_R = F_{bf\text{-}s}$	具有满载非均匀装载工况的矿砂船

6.2　进水工况的矿砂船货舱区域双层底

6.2.1　应用

每个货舱应按单独进水考虑。

6.2.2　通则

作用于双层底的载荷，为外部海水压力、货物载荷和双层底所在货舱进水产生载荷的组合。应采用货物载荷和进水载荷的最不利组合，该组合取决于装载手册中的装载工况：

- 均匀装载工况；
- 非均匀装载工况；
- 包装货物工况（例如钢厂产品）。

对各装载工况，在计算货舱允许装载量时应考虑所载运干散货的最大密度。

6.2.3　进水液面

进水液面 z_F 是当船舶处于正浮位置时自基线垂直量取的距离，m，从表 6.2.3 中获得。

矿砂船货舱区域双层底进水液面 z_F　　表 6.2.3

矿砂船类型	货　舱	
	最前端	其他
载重量小于 50,000 吨的 B 型干舷矿砂船	$z_F = 0.95D_1$	$z_F = 0.85D_1$
其他矿砂船	$z_F = D_1$	$z_F = 0.9D_1$

第 7 节　设计载荷场景

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

M_{sw}——航行工况船体梁许用中垂和中拱静水弯矩，kNm，按本章第 4 节[2.3.2]定义。

$M_{sw\text{-}p}$—— 在港/遮蔽水域工况船体梁许用中垂和中拱静水弯矩，kNm，按本章第 4 节[2.3.3]定义。

$M_{sw\text{-}t\text{-}p}$——在港/遮蔽水域工况船体梁许用静水扭矩，kNm，按本章第 4 节[2.4.1]定义。

$M_{sw\text{-}t\text{-}LC}$——航行工况船体梁许用静水扭矩，kNm，按本章第 4 节[2.4.1]定义。

$M_{wv\text{-}LC}$——所考虑动载荷工况的垂向波浪弯矩，kNm，按本章第 4 节[3.7.2]定义。

$M_{wh\text{-}LC}$——所考虑动载荷工况的水平波浪弯矩，kNm，按本章第 4 节[3.7.4]定义。

$M_{wt\text{-}LC}$——所考虑动载荷工况的波浪扭矩，kNm，按本章第 4 节[3.7.5]定义。

Q_{sw}——航行工况船体梁许用静水正剪力和负剪力限值，kN，按本章第 4 节[2.5.2]。

$Q_{sw\text{-}p}$——在港/遮蔽水域工况船体梁许用静水正剪力和负剪力限值，kN，按本章第 4 节[2.5.2]。

$Q_{wv\text{-}LC}$——所考虑动载荷工况的垂向波浪剪力，kN，按本章第 4 节[3.7.3]定义。

P_S——所考虑吃水的海水静水压力，kN/m^2，按本章第 5 节[1.2]定义。

P_W——所考虑动载荷工况的动压力，kN/m^2，按本章第 5 节[1.3]定义。

P_D——所考虑动载荷工况的上浪压力，kN/m^2，按本章第 5 节[2.2]定义。

P_{in}——设计内部压力，kN/m^2。

P_{ST}——液舱试验压力，kN/m^2，见本章第 6 节[5.1.1]定义。

P_{ls}——液舱内液体静压力，kN/m^2，按本章第 6 节[1.2]定义。

P_{ld}——所考虑动载荷工况的液舱内液体动压力，kN/m^2，按本章第 6 节[1.3]定义。

P_{bs}——干散货静压力，kN/m^2，按第本章第 6 节 [2.2] 定义。

P_{bd}——所考虑动载荷工况的干散货动压力，kN/m^2，按本章第 6 节 [2.2] 定义。

P_{fs}——进水工况舱室和液舱中的静压力，kN/m^2，按本章第 6 节[1.4]定义。

P_{fd}——进水工况舱室和液舱中的动压力，kN/m^2，按第本章第 6 节 [1.5] 定义。

$P_{dl\text{-}s}$——非露天甲板和平台的静压力，kN/m^2，按本章第 6 节[4.2.1]定义。

$P_{dl\text{-}d}$——所考虑动载荷工况的非露天甲板和平台的动压力，kN/m^2，按本章第 6 节[4.2.1]定义。

$F_{U\text{-}s}$——重单元载荷或货物、设备或结构构件作用在支撑结构和系固系统上的静载荷，kN，按本章第 5 节[2.3.2]定义。

$F_{U\text{-}d}$——重单元载荷或货物、设备或结构构件作用在支撑结构和系固系统上的动载荷，kN，按本章第 5 节[2.3.2]定义。

P_{SL}——底部砰击压力，kN/m^2，按本章第 5 节[3.2]定义。

P_{FB}——首部冲击压力，kN/m^2，按本章第 5 节[3.3]定义。

P_{slh}——晃荡压力，kN/m^2，按本章第 6 节[3]定义。

1 一般要求

1.1 应用

1.1.1 本节给出的设计载荷场景应用于：

（1）强度评估的描述性方法和直接分析（有限元方法，FEM）方法，见[2]。

（2）疲劳评估的描述性方法和直接分析方法，见[2]。

1.1.2 对于强度评估，主要的设计载荷场景包括 T（试验）载荷、S（静）载荷或 S+D（静+动）载荷。S 或 S+D 的前缀字母“A”表示为事故设计载荷场景。还应考虑与冲击载荷（I），晃荡载荷（SL）和疲劳载荷（F）相关的设计载荷场景。

2 强度评估设计载荷场景

2.1 主要设计载荷场景

2.1.1 主要的设计载荷场景在表 2.1.1 中给出。

主要设计载荷场景　　表 2.1.1

			设计载荷工况				
			在港/遮蔽水域和试验	航行工况下的极限载荷	压载水交换(3)	进水工况(3)	
			静(S)	静(S)+动(D)	静(S)+动(D)	静(A:S)	静 + 动(A：S+D)
船体梁载荷	设计垂向弯矩		$M_{sw\text{-}p}$	$M_{sw} + M_{wv\text{-}LC}$	$M_{sw} + M_{wv\text{-}LC}$	$M_{sw\text{-}f}$(1)	$M_{SW\text{-}f}$(1)+ $M_{WV\text{-}LC}$
	设计水平弯矩		-	M_{wh}-LC	M_{wh}-LC	-	M_{wh}-LC
	设计垂向剪力		$Q_{sw\text{-}p}$	$Q_{sw} + Q_{wv\text{-}LC}$	$Q_{sw} + Q_{wv\text{-}LC}$	-	$Q_{SW\text{-}f}$(2)+ $Q_{WV\text{-}LC}$
	设计扭矩		-	$M_{sw\text{-}t\text{-}LC}$+ $M_{wt\text{-}LC}$	$M_{sw\text{-}t\text{-}LC}$+ $M_{wt\text{-}LC}$	-	-
局部载荷	P_{ex}	露天甲板上浪	-	P_D	-	-	-
		船体外壳	P_S	$P_S + P_W$	$P_S + P_W$	-	-
	P_{in}	压载舱	Max（P_{ls}，P_{ST}）	$P_{ls} + P_{ld}$	$P_{ls} + P_{ld}$	-	-
		其他充装液体的舱室			-	-	
		水密边界	-	-	-	P_{fs}	P_{fs} + P_{fd}
		货舱	P_{bs}	$P_{bs} + P_{bd}$	-		
	P_{dk}	露天和非露天甲板上的均布载荷	$P_{dl\text{-}s}$	$P_{dl\text{-}s} + P_{dl\text{-}d}$	-	-	-
	F_U	露天和非露天甲板上的单元载荷	$F_{U\text{-}s}$	$F_{U\text{-}s}$+$F_{U\text{-}d}$	-	-	-

(1)当布置不满足第 6 章第 7 节 1.1 所述条件时，取 M_{sw}；

(2)当布置不满足第 6 章第 7 节 1.1 所述条件时，取 Q_{sw}；

(3)仅用于描述性评估。

2.2 附加设计载荷场景

2.2.1 用于考虑晃荡、底部砰击和首部冲击的设计载荷场景在表 2.2.1 中给出。

冲击和晃荡的设计载荷场景　　表 2.2.1

设计载荷场景 载荷分量			首部冲击	底部砰击	晃荡
			冲击 (I)	冲击 (I)	晃荡 (SL)
船体梁	设计垂向弯矩		-	-	M_{sw}
	设计水平弯矩		-	-	-
	设计垂向剪力		-	-	-
	设计扭矩		-	-	-
局部载荷	P_{ex}	露天甲板上浪	-	-	-
		船体外壳	P_{FB}	P_{SL}	-
	P_{in}	压载舱	-	-	P_{slh}
		其他充装液体的舱室			
		水密边界		-	-
		露天和非露天甲板上的均布载荷	-	-	-
		露天和非露天甲板上的单元载荷	-	-	-

3 疲劳评估设计载荷场景

3.1 设计载荷场景

3.1.1 用于疲劳评估的设计载荷场景在表 3.1.1 中给出。

疲劳评估的设计载荷场景　　表 3.1.1

设计载荷场景 载荷分量			疲劳 静+ 动 (F: S+D)
船体梁	设计垂向弯矩		$M_{sw} + M_{wv\text{-}LC}$
	设计水平弯矩		$M_{wh\text{-}LC}$
	设计垂向剪力		$Q_{sw} + Q_{wv\text{-}LC}$
	设计扭矩		$M_{sw\text{-}t\text{-}LC}+M_{wt\text{-}LC}$
局部载荷	P_{ex}	露天甲板上浪	-
		船体外壳	$P_S + P_W$
		上建和甲板室舷侧	-
	P_{in}	压载舱	$P_{ls} + P_{ld}$
		除压载舱外的其他液舱	
		水密边界	-
	P_{dk}	露天和非露天甲板上的均布载荷	-
	F_u	露天和非露天甲板上的单元载荷	-

第 8 节　装载工况

符号

本节未定义的符号参见第 1 章第 4 节。

1 应用

1.1 强度评估装载工况

1.1.1 用于总纵强度评估的装载工况见[2]。用于舱段和整船有限元结构强度评估的工况分别见[3]和[4]。

1.2 疲劳评估装载条件和工况

1.2.1 用于结构疲劳评估的装载工况见[5]

2 用于总纵强度评估的装载工况

2.1 定义

2.1.1 通常，基于出港和到港状态的燃料、淡水和备品数量的设计载货和压载工况，应在计算静水弯矩和静水剪力时考虑。如果认为任一航行中间阶段的消耗品数量和配置更加不利，则除了出港和到港工况计算外，还应提交该中间阶段的工况计算书。如拟在航行途中任一压载水舱进行压载或排压载，应提交压载或排压载前后的中间工况计算书，并纳入装载手册。

2.1.2 出港工况

出港工况基于燃油舱不小于 95%满，其他消耗备品 100%满。

2.1.3 到港工况

到港工况基于燃油、淡水和消耗备品的 10%满。

2.2 航行设计装载工况

2.2.1 以下装载手册中的航行工况应作为最小考虑的范围：

（1）结构吃水下的均匀满载工况。

（2）压载舱可为满载、部分装载或空舱时的正常压载工况。此时，所有货舱应为空舱，螺旋桨完全浸没。

（3）压载水交换（如有时）的过程工况，任一压载水舱的压载或排压载前/后的中间状态计算。

2.2.2 压载工况中部分压载的压载舱（有关建议见《钢质海船入级规范》第 2 篇第 2 章附录 3）：

压载工况中，出港、到港和中途工况下，首尾尖舱和/或其他压载舱的部分压载工况不应作为设计工况，除非满足下述要求：

- 上述压载舱在空舱与满舱之间的所有压载高度下，满足设计应力的限制
- 上述压载舱在空舱与满舱之间的所有压载高度下，仍满足航行进水工况总纵强度（如适用）

为了证明在空舱与满舱之间的所有压载高度下满足要求，对所有出港、到港工况以及本节 2.1.1 要求的中途工况，预期部分压载的压载舱应假定为：

- 空舱
- 满舱
- 预期高度的部分压载

如多个压载舱需部分压载，应考虑空舱、满舱和预期高度的部分压载的所有组合。当 1 对或最多 2 对压载舱为空舱或满舱，导致船舶纵倾超过下列条件之一时，只需证明这 1 对或最多 2 对压载舱在保证船舶状态不超过以下任一纵倾限制的最大、最小和预期高度时的强度满足要求。所有其他边压载舱的压载高度应考虑为空舱和满舱之间。上述纵倾条件为：

- 3%船长的尾倾，或
- 1.5％船长的首倾，或
- 不能保持螺旋桨浸深(I/D_p)不小于 25％的任何纵倾，其中

I = 螺旋桨中心线至水线的距离，m

D_p = 螺旋桨直径，m

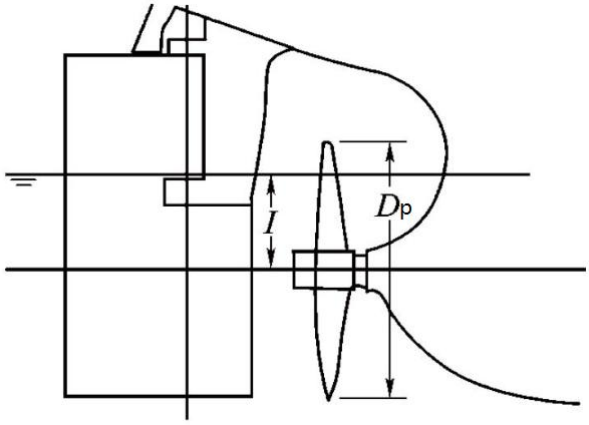


图 2.2.2：螺旋桨浸深(I/D_p)

上述提及的成对边压载舱的最大和最小压载高度应在装载手册说明。

2.3 港内和遮蔽水域工况

2.3.1 以下港内和遮蔽水域工况应包括在装载手册内：

（1）代表典型完全装卸工况；

（2）坞内起浮工况；

（3）螺旋桨检查起浮工况，螺旋桨轴中心线至少高于螺旋桨处水线 $D_p/4$，其中 D_p 为螺旋桨直径，m。具有吊舱式推进系统布置的船舶应由 CCS 单独考虑。

2.4 装载工况

2.4.1 可替代的设计

对于本节未涵盖的结构布置其装载工况，包括装载模式、及其对应的吃水、静水弯矩和静水剪力应提交 CCS 认可。

3 舱段有限元强度分析的设计装载工况

3.1 设计装载工况

3.1.1 舱段有限元屈服强度典型计算工况的选取按照表 3.1.1~3 的要求。

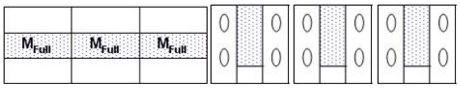
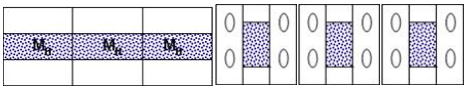
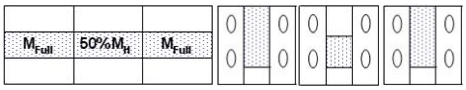
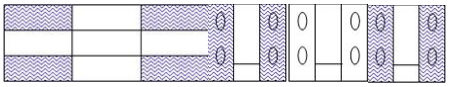
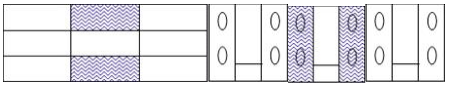
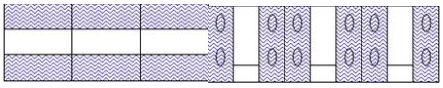
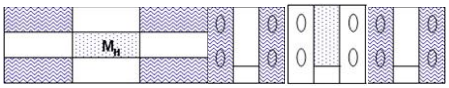
3.1.2 对于装载手册中设计有多港装载的船舶，应进行多港工况校核，根据实际装载模式，从“多港-1”~“多港-9”中选取对应的工况。

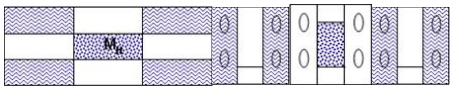
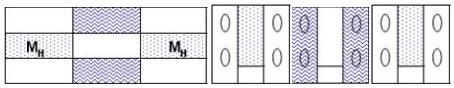
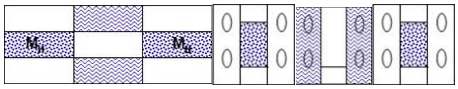
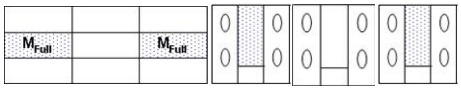
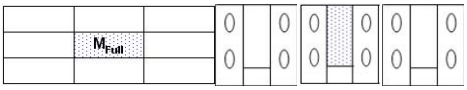
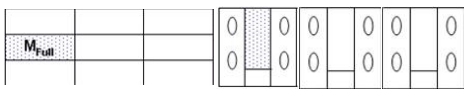
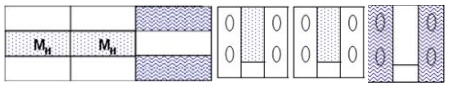
3.1.3 除表 3.1.1~表 3.1.3 规定的典型工况，还应考虑装载手册中其他特殊装载工况。

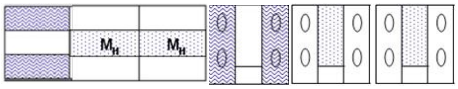
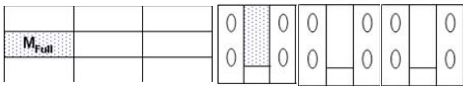
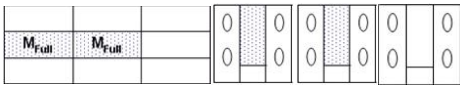
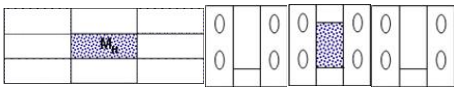
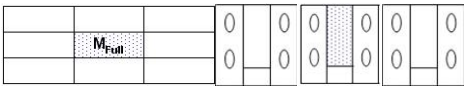
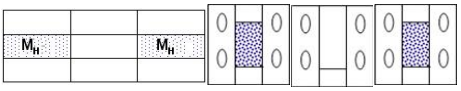
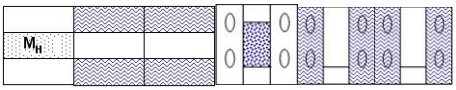
3.1.4 对于拟取得 EL100 附加标志的船舶，应补充快速装载过程中的港内工况；如快速装载手册中存在更为严重的其它装载工况，也应进行结构强度直接计算。

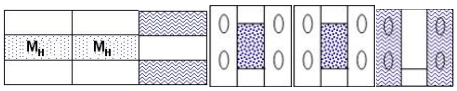
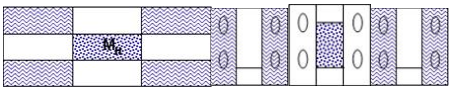
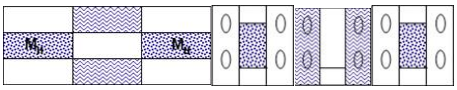
3.1.5 对于多港工况，实际装载手册中如吃水值比 0.67*T*s 和 0.75*T*s 更危险时，应取实际吃水值。

适用于船中货舱区域的有限元载荷组合　　表 3.1.1

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
1	均匀满载 - 轻货		T_{SC}	100%	100% SAG	HVM-1 BSP-1P OST-1P
2	均匀满载 - 重货		T_{SC}	100%	100% SAG	BSP-1P OST-1P
3	非满载		T_{SC}	100%	0	BSP-1P
				100%	100% SAG	HVM-1
4	压载-1		T_{BAL-N}	100% MAX SFLC	100% Hog	HVM-2 FVM-2
				100%	100% Hog	BSR-1P OST-1P
5	压载-2		T_{BAL-N}	N/A	100% Hog	FVM-2 BSR-1P OST-1P
6	压载-3		T_{BAL-H}	100%	100% SAG	HVM-1 BSR-1P BSP-1P
7	多港-1		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	HVM-1 FVM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	100% HOG	HVM-2 FVM-2 OST-2P

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
8	多港-2		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	HVM-1 FVM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	100% Hog	HVM-2 FVM-2 OST-2P
9	多港-3		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	HVM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	100% Hog	HVM-2 FVM-2 OST-2P
10	多港-4		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	HVM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	100% Hog	HVM-2 FVM-2 OST-2P
11	多港-5		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	BSP-1P OST-1P
				100% MAX SFLC	100% HOG	HVM-2 FVM-2
				100%	100% HOG	OST-2P
12	多港-6		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	BSP-1P OST-1P
				100% MAX SFLC	100% SAG	HVM1 FVM1
13	多港-7		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	BSP-1P BSR-1P OST-1P
				100%	100% HOG	HVM-2 FVM-2 BSR-1P OST-1P
14	多港-8 (4)		T_{MPLC}	100%	100% SAG (4)	BSP-1P BSR-1P OST-1P

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
			T_{MPLC}	100%	100% HOG（4）	HVM-2 FVM-2 BSR-2P OST-2P
15	多港-9（4）		T_{MPLC}	100%	100% SAG（4）	BSP-1P BSR-1P OST-1P
			T_{MPLC}	100%	100% HOG（4）	HVM-2 FVM-2 BSR-2P OST-2P
16	港内-1		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
17	港内-2		0.67 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% Hog	N/A
18	港内-3		0.67 T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
19	港内 4		0.67 T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
20	港内 5		0.83 T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
21	港内 6		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
				100%	100% HOG	N/A
22	港内 7		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
23	港内 8		0.75 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
24	港内 9		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A

注释：

（1） 静水剪力 100%MAX SFLC 为剪力调整工况。

（2） 静水剪力 100%为剪力判断工况，按照第 3 章的判断要求进行。

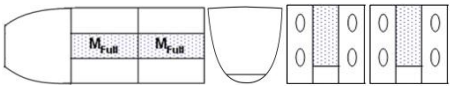
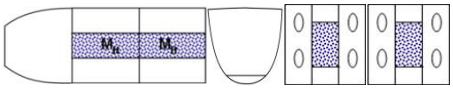
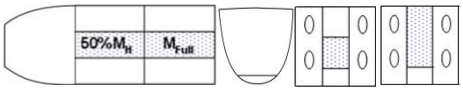
（3） 港内 4~9 工况为取得 EL100 附加标志的矿砂船应校核的工况。

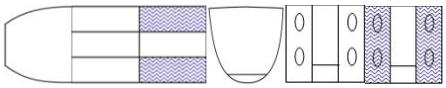
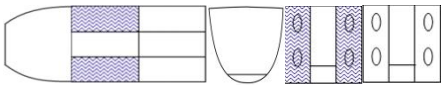
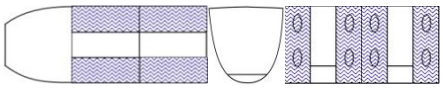
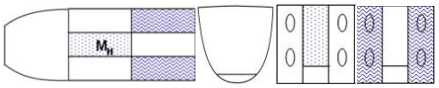
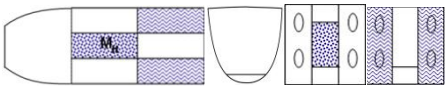
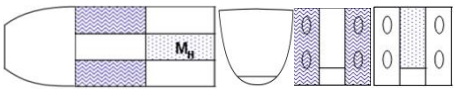
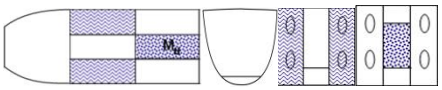
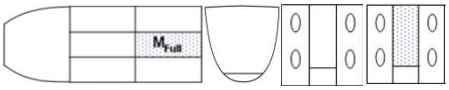
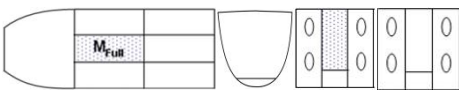
（4） 装载手册如有时，则评估该工况。

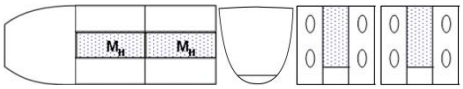
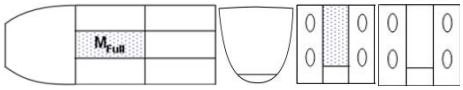
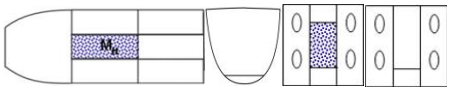
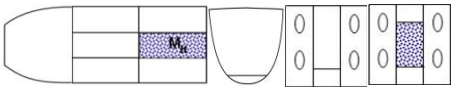
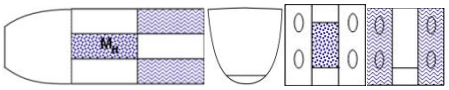
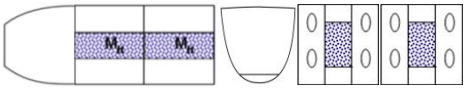
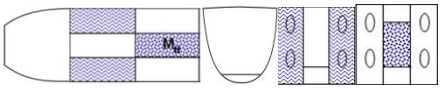
（5） 表中，T_{SC}—结构吃水；$T_{BAL\text{-}N}$—正常压载吃水；$T_{BAL\text{-}H}$—最大压载吃水；T_{MPLC}—装载手册中连舱装载的最小吃水；*HOG—中拱，HAG—中垂，* ▨ *—重货，* ▨ *—轻货，* ▨ *—压载水。*

（6） M_H:装载手册中最大吃水时货舱内货物装载量;M_{FULL}:货舱内均匀满载装至舱口围时的货物重量,数值取为 Max（M_H /V_{FULL},1.0）VFULL，且不小于 M_H；V_{FULL}：货舱体积。

适用于最艉货舱区域的有限元载荷组合 **表 3.1.2**

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
1	均匀满载 - 轻货		T_{SC}	100%	80% SAG	FVM-1 BSP-1P OST-1P OSA-1P
2	均匀满载 - 重货		T_{SC}	100%	80% SAG	FVM-1 BSP-1P OST-1P
3	非满载		T_{SC}	100%	100%	FVM-1 BSP-1P OST-1P

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
4	压载-1(1)		T_{BAL-N}	100%	100% Hog	HVM-2 FVM-1 BSP-1P OST-1P OSA-1P
5	压载-2(1)		T_{BAL-N}	100%	100% SAG	FVM-1 BSR-1P OST-1P
6	压载-3(1)		T_{BAL-H}	100%	100% SAG	HVM-1 BSR-1P BSP-1P
7	多港-1		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	HVM-1 BSP-1P OST-1P
				100%	50% HOG	HVM-1 OST-1P
8	多港-2		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	HVM-1 BSP-1P OSA-1P
				100%	50% Hog	HVM-1 OST-1P
9	多港-3		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	FVM-1 OST-1P
				100%	50% Hog	FVM-1 BSR-1P OSA-1P
10	多港-4		0.75 T_{SC}	100%	50% SAG	FVM-1 OST-1P
				100%	50% Hog	FVM-1 BSR-1P OSA-1P
11	多港-5		0.67 T_{SC}	100%	30% SAG	FVM-1 OST-1P
				100%	30% Hog	FVM-1 BSR-1P OSA-1P
12	多港-6		0.67 T_{SC}	100%	60% HOG	BSP-1P
				100% MAX SFLC	30% HOG	HVM-2

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
				100% MAX SFLC	0	HVM-1
13	多港-7（1）		T_{MPLC}	100%	80% SAG	BSP-1P BSR-1P OST-1P
14	港内-1		0.67 T_{SC}	100% MAX SFLC	50% SAG	N/A
				100%	100% Hog	N/A
15	港内-2		0.67 T_{SC}	100% MAX SFLC	50% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
16	港内-3		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	50% HOG	N/A
17	港内-4		0.83 T_{SC}	100%	50% SAG	N/A
				100%	50% HOG	N/A
18	港内-5		0.83 T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	50% HOG	N/A
19	港内 6		0.83 T_{SC}	100%	50% SAG	N/A
				100%	50% HOG	N/A

注：

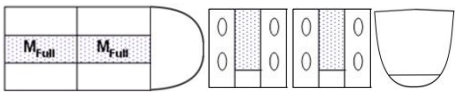
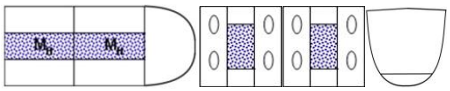
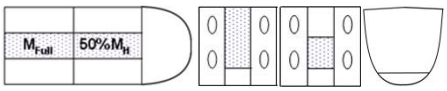
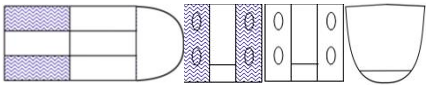
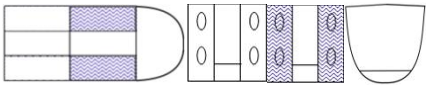
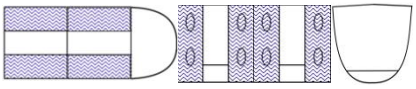
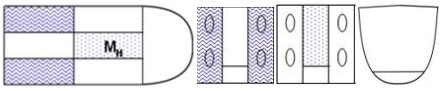
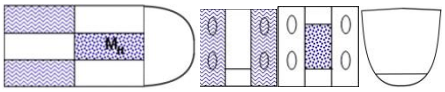
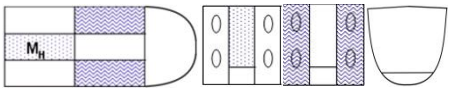
（1） 装载手册如有时，则评估该工况。

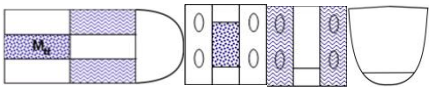
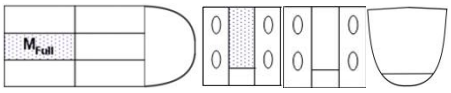
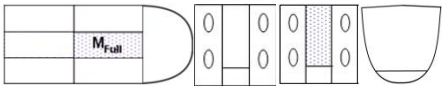
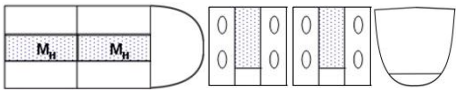
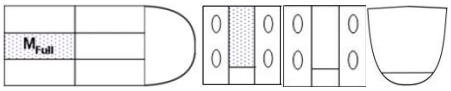
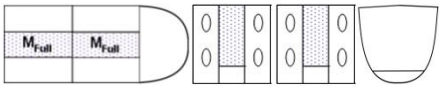
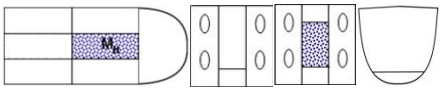
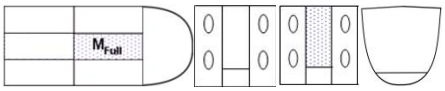
（2） 港内 4~ 6 为取得 EL100 的矿砂船应校核的工况。

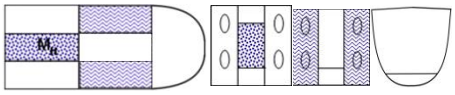
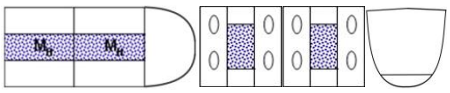
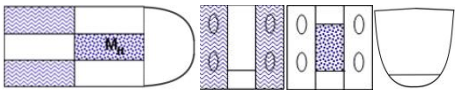
（7） 表中，T_{SC}—结构吃水；T_{BAL-N}—正常压载吃水；T_{BAL-H}—最大压载吃水；T_{MPLC}—装载手册中连舱装载的最小吃水；*HOG—中拱，HAG—中垂，* —*重货，* —*轻货，* —*压载水。*

（3） M_H:装载手册中最大吃水时货舱内货物装载量;$M_{FULL:}$ 货舱内均匀满载装至舱口围时的货物重量,数值取为 Max（M_H /V_{FULL},1.0）V_{FULL}，且不小于 M_H；V_{FULL}：货舱体积。

适用于最艏货舱区域的有限元载荷组合 **表 3.1.2**

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
1	均匀满载 - 轻货		T_{SC}	100%	60% SAG	HVM-1 BSP-1P OST-1P OSA-2P
2	均匀满载 - 重货		T_{SC}	100%	60% SAG	HVM-1 BSP-1P OST-1P OSA-2P
3	非满载		T_{SC}	100%	60% SAG	HVM-1 BSP-1P OSA-2P
4	压载-1(1)		T_{BAL-N}	100%	100% Hog	HVM-1 HVM-2 BSP-1P BSR-1P OSA-2P
5	压载-2(1)		T_{BAL-N}	100%	100% Sag	HVM-1 BSP-1P BSR-1P OSA-2P
6	压载-3(1)		T_{BAL-H}	100%	100% SAG	HVM-1 BSP-1P BSR-1P OSA-2P
7	多港-1		$0.75T_{SC}$	50%	100% SAG	HVM-1 FVM-1 BSP-1P OSA-2P
8	多港-2		$0.75T_{SC}$	50%	100% SAG	HVM-1 FVM-1 BSP-1P OSA-2P
9	多港-3		$0.75T_{SC}$	100%	50% SAG	HVM-1 FVM-1 BSP-1P OSA-2P

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
10	多港-4		0.75T_{SC}	100%	50% SAG	HVM-1 FVM-1 BSP-1P OSA-2P
11	多港-5		0.83T_{SC}	100%	60% SAG	HVM-1 FVM-1 BSP-1P OSA-2P
12	多港-6		0.67T_{SC}	100%	60% HOG	BSP-1P OST-2P OSA-2P
				100% MAX SFLC	60% HOG	HVM-2
				100% MAX SFLC	0	HVM-1
13	多港-7 (1)		T_{MPLC}	100%	60% SAG	BSP-1P BSR-1P OST-1P
14	港内-1		0.67T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
15	港内-2		0.67 $_{SC}$	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% Hog	N/A
16	港内-3		0.67T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
17	港内 4		0.67T_{SC}	100% MAX SFLC	100% SAG	N/A
				100% MAX SFLC	100% HOG	N/A
18	港内 5		0.83T_{SC}	100%	100%	N/A

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力	静水弯矩	波浪工况
					SAG	
				100%	100% HOG	N/A
19	港内 6		0.75T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
20	港内 7		0.83T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A
21	港内 8		0.75T_{SC}	100%	100% SAG	N/A
				100%	100% HOG	N/A

注：

（1） 装载手册如有时，则评估该工况。

（2） 港内 4~ 8 位取得 EL100 的矿砂船应校核的工况。

（8） 表中，T_{SC}—结构吃水；T_{BAL-N}—正常压载吃水；T_{BAL-H}—最大压载吃水；T_{MPLC}—装载手册中连舱装载的最小吃水；*HOG—中拱，HAG—中垂，* —*重货，* —*轻货，* —*压载水。*

（3） M_H:装载手册中最大吃水时货舱内货物装载量;M_{FULL}: 货舱内均匀满载装至舱口围时的货物重量,数值取为 Max（M_H/V_{FULL},1.0）V_{FULL}，且不小于 M_H；V_{FULL}：货舱体积。

4 整船有限元强度分析的设计装载工况

4.1 静水装载工况

4.1.1 分别选取装载手册中典型装载下中拱、中垂最大静水弯矩和静水剪力最大的工况作为装载工况，一般应计算的装载工况见表 4.1.1。

4.1.2 最大静水弯矩工况下，船舶应处于或接近正浮状态，达到或接近吃水 T_{sc}，且静水弯矩在船中 0.4L 区域达到最大值。

4.1.3 如装载手册中有多个装载工况满足 4.1.2 的条件，则选择压载水最少的装载工况。

4.1.4 如装载手册中存在更为严重的装载工况，也应予以考虑。

静水装载工况　　表4. 1. 1

工况	选取条件
满载	（1）中垂状态； （2）最大垂向静水弯矩或剪力； （3）最大、中间、最小载货密度。
正常压载	（1）中拱状态； （2）最大垂向静水弯矩或剪力。
重压载 （如有时）	（1）中垂状态； （2）最大垂向静水弯矩或剪力。

工况	选取条件
多港 （如有时）	（1）中拱或中垂状态； （2）最大垂向静水弯矩或剪力； （3）最大、中间、最小载货密度。

4.2 波浪载荷工况

4.2.1 根据[4.1]选定的装载工况，进行水动力载荷分析，确定设计波参数，每一个设计波对应一个波浪载荷控制参数达到最大的计算工况，以评估该计算工况下的载荷对船体结构强度的影响。计算工况由静水装载工况和波浪主导载荷工况的组合组成，波浪载荷工况应分别考虑一下载荷控制参数：

（1）垂向波浪弯矩；

（2）垂向波浪剪力（静水剪力最大处）；

（3）船首垂向加速度（计算点取 1 货舱前舱壁与中纵线面的交线顶端）；

（4）船首横向加速度（计算点同（3））；

（5）最大横摇角。

4.2.2 波浪载荷工况主导控制参数弯矩、剪力、扭矩，其幅值应不超过本章第 4 节船体梁载荷的许用值。

4.3 计算工况组合

4.3.1 根据本节 4.1 和 4.2 确定的静水装载工况和波浪载荷工况，得到计算工况组合见表 4.3.1。

计算工况组合 **表4.3.1**

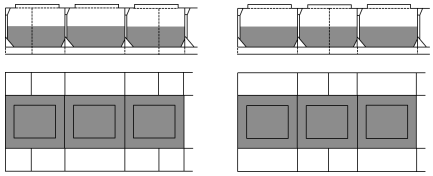
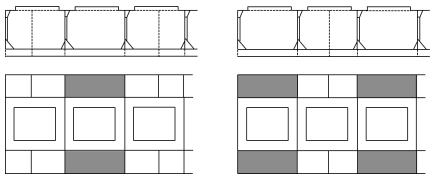
波浪载荷控制参数 装载工况	满载	正常压载	重压载（如有时）	多港（如有时）
垂向波浪弯矩	适用	适用	适用	-
垂向波浪剪力	适用	适用	适用	适用
船首垂向加速度	适用	适用	适用	适用
船首横向加速度	适用	适用	适用	适用
最大横摇角	-	适用	-	适用

5 疲劳评估的设计装载工况

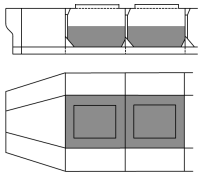
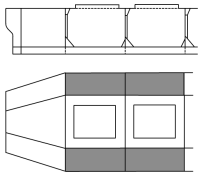
5.1 疲劳评估的设计工况

5.1.1 按照第 10 章第 1 节[6.2]中的要求，矿砂船舱段有限元疲劳强度评估的装载工况和设计载荷工况见本节表 5.1.1（1）~表 5.1.1（3），如需时，也可从装载手册中选择对应的装载工况。

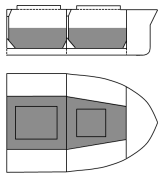
适用于除最首和最尾货舱以外的矿砂船疲劳评估的设计工况　　表 5.1.1（1）

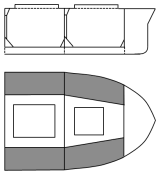
编号	描述	装载模式	静载荷			动载荷工况
			吃水	$C_{BM\text{-}LC}$：许用静水弯矩%	$C_{SF\text{-}LC}$：许用静水剪力%	
1(1)	满载		T_{SC}	80%（中垂）	--	HVM、FVM、BSR、BSP、OST
2(1)	正常压载		T_{BAL}	75%（中拱）	100%	HVM、FVM、BSR、BSP、OST
（1） 应使用施加在有限元模型上的局部静、动载荷产生的实际剪力。当该剪力超出目标值时，应施加修正的垂向载荷将剪力下调至目标值。						

适用于最尾货舱的矿砂船疲劳评估的设计工况　　表 5.1.1（2）

编号	描述	装载模式	吃水	$C_{BM\text{-}LC}$：许用静水弯矩%	$C_{SF\text{-}LC}$：许用静水剪力%	动载荷工况
1(1)	满载		T_{SC}	80%（中垂）	100%	HVM、FVM、BSR、BSP、OST
2(1)	正常压载		T_{BAL}	75%（中拱）	100%	HVM、FVM、BSR、BSP、OST
(1) 应使用施加在有限元模型上的局部静、动载荷产生的实际剪力。当该剪力超出目标值时，应施加修正的垂向载荷将剪力下调至目标值。						

适用于最首货舱的矿砂船疲劳评估的设计工况　　表 5.1.1（3）

编号	描述	装载模式	吃水	$C_{BM\text{-}LC}$：许用静水弯矩%	$C_{SF\text{-}LC}$：许用静水剪力%	动载荷工况
1(1)	满载		T_{SC}	80%（中垂）	100%	HVM、FVM、BSR、BSP、OST

编号	描述	装载模式	吃水	$C_{BM\text{-}LC}$： 许用静水弯矩%	$C_{SF\text{-}LC}$： 许用静水剪力%	动载荷工况
2(1)	正常压载		T_{BAL}	75% （中拱）	100%	HVM、FVM、 BSR、BSP、OST
(1) 应使用施加在有限元模型上的局部静、动载荷产生的实际剪力。当该剪力超出目标值时，应施加修正的垂向载荷将剪力下调至目标值。						

附录 1　基于等效设计波法的波浪载荷直接计算方法

符号

$\mathbf{V}$—— 流场中任一点 x、y 和 z 三个方向的速度矢量，m/s。

Φ—— 流场中任一点的速度势。

p —— 流场中任一点的压力，N/m^2。

t—— 时间，s。

U—— 计算航速，m/s。

x，y，z—— 任意一点的 X，Y，Z 坐标，m。

L—— 船长，m。

ω_e—— 遭遇频率。

$\eta_i(i=1,6)$—— 船舶六自由度运动。

θ—— 横摇幅值，rad。

φ—— 纵摇幅值，rad。

a_X，a_Y，a_Z—— 任意一点的加速度。

f_S—— 符号系数，对于垂向弯矩，中拱为正，中垂为负，对于水平弯矩，右舷受拉为正，右舷受压为负。

M_{wv}—— 给定装载和等效设计波下的垂向波浪弯矩，kNm。

Q_{wv}—— 给定装载给定等效设计波下的垂向波浪剪力，kN。

M_{wh}—— 给定装载给定等效设计波下的水平波浪弯矩，kNm。

M_{wt}—— 给定装载给定等效设计波下的波浪扭矩，kNm。

P_{ex}—— 给定装载给定等效设计波下的舷外水总压力，kN/m^2。

P_{es}—— 给定装载给定等效设计波下的舷外水静压力，kN/m^2。

P_{ed}—— 给定装载给定等效设计波下的舷外水动压力，kN/m^2。

P_{in}—— 给定装载给定等效设计波下的舱室内部总压力，kN/m^2。

1 一般规定

1.1 适用范围

本附录适用于在全球航行的矿砂船的波浪载荷直接计算。

1.2 参照坐标系统

本附录中参照坐标系统见第 1 章第 1 节[2.18]。

2 等效设计波法原理

2.1 波浪载荷直接计算方法

波浪载荷直接计算方法基于三维线性势流理论。

根据伯努利方程，只要求得流体与船体交界点的流体速度势及其对空间坐标的偏导数，就可以求得流体与船体的相互作用力，进而求得船体运动响应及剖面载荷。

速度势求解主要是求解满足域内条件，自由面条件，物面条件，底部条件和远方辐射条件等定解条件，见图 2.1 的边界积分方程，目前的求解方法主要包括频域自由面格林函数法、时域自由面格林函数法和简单格林函数法等。

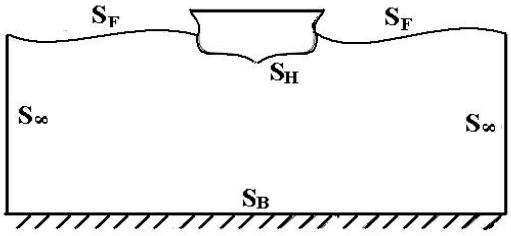


图 2.1 船体速度势定解边界示意图

在求得速度势后，根据伯努利方程，求的船体受到的绕射压力响应函数和水动力系数，进而求得船体的运动、加速度及辐射压力响应函数，获得剖面载荷的响应函数。

2.2 线性波浪载荷长短期预报

2.2.1 线性波浪载荷的短期预报

短期海浪可视为均值为零的平稳正态随机过程,由随机过程理论可知，在海浪的作用下（输入），其响应波浪载荷（输出）亦将是均值为零的平稳正态随机过程。输入海浪谱 S_ζ 与输出响应谱 S_w 之间是通过如下公式联系着：

$$S_W\left(\omega,H_{1/3},T_Z,V,\beta+\theta\right)=H^2\left(\omega,V,\beta+\theta\right)S_\zeta\left(\omega,H_{1/3},T_Z,\theta\right)$$

这里，ω 为波浪频率，$H_{1/3}$ 为有义波高，T_Z 为平均过零周期，U 为航速，β 为航向，θ 为浪向角。

对于一个均值为零的平稳正态随机过程，在窄谱假定下，其幅值 X 服从 Rayleigh 分布，对应的概率密度为：

$$f_0\left(x\right)=\frac{2x}{E\left[\left(H_{1/3},T_Z\right),V,\beta\right]}\exp\left[-\frac{x^2}{E\left[\left(H_{1/3},T_Z\right),V,\beta\right]}\right]$$

其中 E 为两倍的波浪载荷方差，表达式如下：

$$E\left[\left(H_{1/3},T_Z\right),V,\beta\right]=2\int_{-\pi/2}^{+\pi/2}\int_0^\infty S_W\left(\omega,H_{1/3},T_Z,V,\beta+\theta\right)d\omega d\theta$$

根据载荷响应函数、波浪参数得到载荷的分布函数，得到载荷的 1/3 有义值，1/10 有义值等。

2.2.2 线性波浪载荷的长期预报

假设由各种不同海况、不同航行状态所组成的短期彼此相互独立，那么长期概率分布将是各短期概率分布的加权组合，亦即波浪载荷幅值 X 大于某一定值 x 的超越概率为：

$$Q(x)=P\{X\geq x\}=\sum_i\sum_j\sum_k p_i\left(H_{1/3},T_Z\right),p_j\left(\beta\right),p_k\left(V\right)\exp\left\{\frac{-x^2}{E\left[\left(H_{1/3},T_Z\right)_i,\beta_j,V_k\right]}\right\}$$

航向角出现的概率按在 0 到 2π 之间均匀分布的原则确定。海况出现的概率取决于船舶实际运行海域的海浪统计资料，目前无限制航区取为北大西洋海况。确定船舶的运行海域和概率水平之后，即可按上式求得所对应的波浪载荷特征最大值。此值表示船舶在循环次数为 n 的整个使用期中，平均可能出现一次的最大波浪载荷。

2.3 等效设计波方法

2.3.1 一般原理

在船舶与海洋工程结构强度评估中，各载荷分量之间的组合，是个比较复杂的问题。等效设计波法是把实际的不规则波问题化为一个等效的规则波，假定组合载荷的最大值出现在可变载荷中的一个达到使用期中的最大值，而其他的可变载荷采用相应的瞬时值。该方法又称为动态载荷法。选定对结构强度起决定作用的波浪载荷分量一般包括船舶运动及加速度，波浪弯矩、扭矩及剪力，舷外水压力等。

2.3.2 相关参数的确定

确定等效设计波参数的主要步骤如下，见图 2.3.2:

（1）选定目标载荷，进行水动力分析，计算不同浪向、频率下目标载荷的响应函数；

（2）确定主导载荷及其概率水平，进行谱分析，求解主导载荷在该概率水平下的长期分布值；

（3）根据长期统计值和响应函数确定等效设计波的浪向、频率和相位，计算设计波波高；（4）根据等效设计波的浪向、频率、相位和波高，计算该等效设计波的相关载荷分量；

（5）应用该等效设计波的相关载荷进行结构分析。

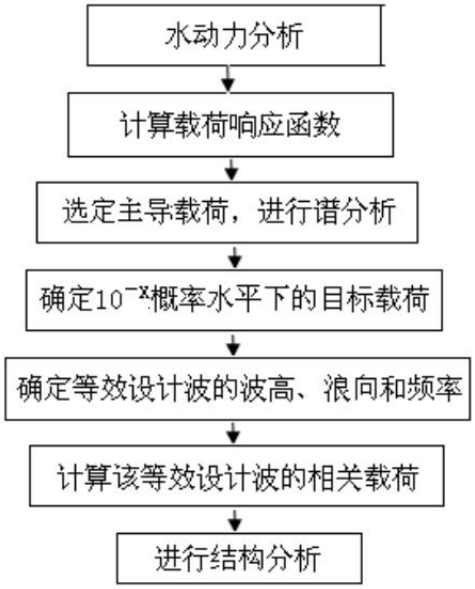


图 2.3.2 等效设计波方法计算波浪载荷流程图

3 基于等效设计波法的波浪载荷计算及应用

3.1 基本假定及规定

3.1.1 总述

本部分内容规定了基于等效设计波法波浪载荷计算的基本假定、基本计算步骤、计算模型要求和计算软件要求四个内容，相关计算应满足小节规定。

3.1.2 相关假定

基于等效设计波法波浪载荷计算应基于以下假定：

(1) 基于三维线性势流理论；

(2) 基于北大西洋海洋环境，波浪散布图及波浪载荷的短期和长期预报基于 IACS Rec. 34；

(3) 海浪谱选用 IACS Rec. 34 推荐的双参数 P-M 谱；

(4) 浪向以 30 度步进，所有浪向出现的概率相等；

(5) 计算频率为 0.2rad/s 到 1.2rad/s，频率间隔为 0.05rad/s；

(6) 波浪的能量传递函数选用 $\cos^2$；

(7) 强度评估基于 10^{-8} 概率水平，航速取 5 节；

(8) 疲劳评估基于 10^{-2} 概率水平，航速取 75%的计算航速。

3.1.3 计算步骤

基于等效设计波法波浪载荷计算的主要步骤如下：

(1) 选定装载模式，建立水动力模型、质量分布模型（其中，空船质量可以通过调整各部分的材料密度来模拟钢料、舾装和小的设备的质量。货物、大的设备、压载水采用质量单元来模拟）；

(2) 计算各个浪向的波浪载荷响应函数；

(3) 选定海浪环境对目标波浪载荷进行长期预报，获得相关目标载荷的极值和相位；

(4) 确定等效设计波的波高、浪向、频率和相位等参数；

(5) 计算出相关等效设计波的船体梁载荷、船舶重心处加速度以及舷外水压力分布，根据舱室位置和所装载的货物计算内部压力。

3.1.4 计算模型要求

基于等效设计波法波浪载荷计算的模型应满足以下要求：

(1) 质量模型应足够精细，确保质量与实船的误差不大于 0.1%，重心位置与实船的误差不大于 0.1%L；

(2) 湿表面模型应尽可能模拟实船的形状，排水量与实船的误差不大于 0.1%，浮心位置与实船的误差不大于 0.1%L；

(3) 湿表面模型的网格数应足够多，网格长度一般不大于船长 L 的一百分之一。

3.1.5 计算软件要求

用于等效设计波法波浪载荷计算的软件应基于三维势流理论，并得到 CCS 的认可。

3.2 装载工况

3.2.1 一般要求

对于结构强度评估的装载工况见第 8 章的相关规定。

对于疲劳强度评估的装载工况见第 10 章的相关规定；除非有更准确的数据，相对应装载工况的时间比例因子见第 10 章。

3.2.2 强度评估应考虑的装载工况

(1) 最大静水弯矩的装载工况；

(2) 最大静水剪力的装载工况

3.2.3 疲劳评估应考虑的装载工况

(1) 压载工况（到港）；

(2) 满载（出港）。

3.3 等效设计波

3.3.1 概述

应计算的等效设计波应能代表相关结构最危险状态对应的动载荷工况。

3.4 载荷分量及其施加

3.4.1 静水压力应按计算工况的吃水，作用在船体外部湿表面上；

3.4.2 波浪压力应按等效设计波方法进行计算，作用在船体外部湿表面上；

3.4.3 惯性载荷应基于按等效设计波方法计算所得的惯性加速度，作用在整船结构模型上。

附录 2　载货量曲线

符号

h——在船舶中纵剖面处从内底板顶部到上甲板最低点的垂直距离，m。

h_a——两相邻货舱中的后货舱在中纵剖面处从内底板顶部到上甲板最低点的垂直距离，m。

h_f——两相邻货舱中的前货舱在中纵剖面处从内底板顶部到上甲板最低点的垂直距离，m。

M_H——货物质量，定义见第 4 章第 8 节表 3.1.1。

M_{Full}——货物质量，定义见第 4 章第 8 节表 3.1.1。

T_i——第 i 装载工况下单个货舱长度中点处或两相邻货舱中点处的吃水，m。

T_{MPLC}——航行工况两相邻货舱中的每个货舱装载 M_{Full} 时的最小许用吃水，如装载手册中多港工况无该装载模式，取结构吃水 T_{sc}，m。

T_{H1}——港内工况两相邻货舱中的每一货舱装载 M_{Full} 时的最小许用吃水，m，取为：

- 对授予 No MP 标志的船舶：

$$T_{H1}=\min\begin{cases}0.67T_{SC}\\ T_{SC}-\dfrac{0.15\sum M_{Full}}{1.025\left(\dfrac{V_f}{h_f}+\dfrac{V_a}{h_a}\right)}\end{cases}$$

- 对未授予 No MP 标志的船舶：

$$T_{H1}=\min\begin{cases}0.67T_{SC}\\ T_{MPLC}-\dfrac{0.15\sum M_{Full}}{1.025\left(\dfrac{V_f}{h_f}+\dfrac{V_a}{h_a}\right)}\end{cases}$$

T_{H2}——港内工况任一货舱装载 M_{Full} 时的最小许用吃水，m，取：

- 对授予 No MP 标志的船舶：

$$T_{H2}=\min\begin{cases}0.67T_{SC}\\ T_{SC}-\dfrac{0.15M_{Full}}{1.025\dfrac{V_H}{h}}\end{cases}$$

- 对未授予 No MP 标志船舶的载货舱：

$$T_{H2}=0.67T_{SC}-\frac{0.15M_{Full}}{1.025\dfrac{V_H}{h}}$$

- 对未授予 No MP 标志船舶的可空舱：

$$T_{H2}=T_{SC}-\frac{0.15M_{Full}}{1.025\dfrac{V_H}{h}}$$

T_{H3}——航行工况两相邻货舱均为空舱时的最大许用吃水，m，取：

$$T_{H3} = \max(0.67T_{SC}, T_{BAL\text{-}H})$$

V_H——体积，m^3，定义见第 4 章第 6 节[2.1.1]。

V_a——两相邻货舱的后部货舱容积，m^3，不包括舱口围板包围的容积。

V_f——两相邻货舱的前部货舱容积，m^3，不包括舱口围板包围的容积。

∑——两相邻货舱的质量之和。

EA ——隔舱装载工况的可空舱。

FA ——隔舱装载工况的载货舱。

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本附录要求适用于船长 *L* 为 150m 及以上矿砂船。

1.1.2 本附录所述步骤用于确定以下内容：

- 每个货舱的最大和最小载货量与货舱中部吃水的函数关系；
- 每两个相邻货舱的最大和最小载货量与这两个相邻货舱中点处吃水的函数关系。

1.1.3 通则

[2] 和 [3] 中定义的航行和港内工况下单个货舱或两相邻货舱的载货量曲线基于第 4 章第 8 节[3]所考虑的装载工况。但是，如果采用比第 4 章第 8 节[3]更严重的装载工况对船舶结构进行了校核，则最小要求载货量对应的曲线拐点吃水可基于实际校核工况进行增大，最大允许载货量对应的曲线拐点吃水可基于实际校核工况进行减小。

1.1.4 港内装载/卸载工况

对任何矿砂船，与港口装/卸货工况吃水相应的单个货舱或两相邻货舱的最大允许载货量和最小要求载货量可以增加或减少航行工况下最大吃水时的最大允许载货量的 15%。但在任何情况下，每个货舱最大允许载货量应不大于设计最大吃水时的最大允许载货量。

1.1.5 最大和最小许用质量表述

不同吃水（T_i）时，航行工况的最大和最小许用载货量（W_{maxS}（T_i），W_{minS}（T_i））以及港内工况的最大和最小许用载货量（W_{maxH}（T_i），W_{minH}（T_i））， t，由 [2] 和 [3] 中的表给出的公式得到：

- 未授予 No MP 标志的矿砂船
- 授予 No MP 标志的矿砂船

2 每个货舱的最大和最小载货量

2.1 单个货舱的最大允许载货量和最小要求载货量

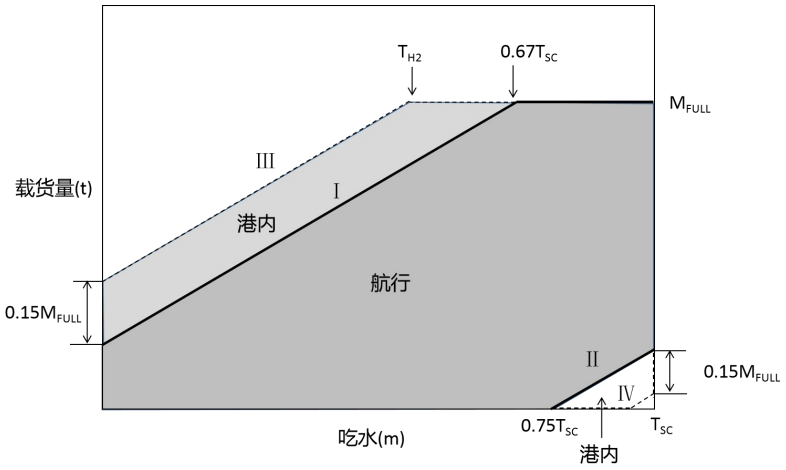
2.1.1 未授予 No MP 标志的矿砂船

未授予 No MP 标志的矿砂船（载货舱 FA hold） 表 2.1.1

装载工况	最大/最小曲线	曲线	参考
航行	最大：$W_{maxS}(T_i) = M_{Full} - 1.025V_H \dfrac{(0.67T_{SC} - T_i)}{h} \le M_{Full}$	I	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minS}(T_i) = 1.025V_H \dfrac{(T_i - 0.75T_{SC})}{h} \ge 0$	II	第 4 章第 8 节[3]

装载工况	最大/最小曲线	曲线	参考
港内	最大：$W_{maxH}(T_i)=W_{maxS}(T_i)+0.15M_{Full}\le M_{Full}$	Ⅲ	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minH}(T_i)=W_{minS}(T_i)-0.15M_{Full}\geqslant 0$	Ⅳ	第 4 章第 8 节[3]

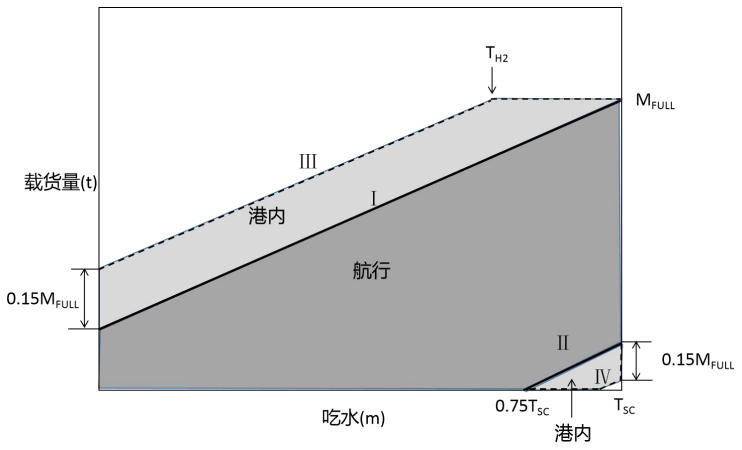
未授予 No MP 标志的矿砂船（载货舱 FA hold）示例



未授予 No MP 标志的矿砂船（可空舱 EA hold） 表 2.1.2

装载工况	最大/最小曲线	曲线	参考
航行	最大：$W_{maxS}(T_i)=M_{Full}-1.025V_H\dfrac{(T_{SC}-T_i)}{h}\le M_{Full}$	I	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minS}(T_i)=1.025V_H\dfrac{(T_i-0.75T_{SC})}{h}\ge 0$	II	第 4 章第 8 节[3]
港内	最大：$W_{maxH}(T_i)=W_{maxS}(T_i)+0.15M_{Full}\le M_{Full}$	III	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minH}(T_i)=W_{minS}(T_i)-0.15M_{Full}\geqslant 0$	Ⅳ	第 4 章第 8 节[3]

未授予 No MP 标志的矿砂船（可空舱 EA hold）示例

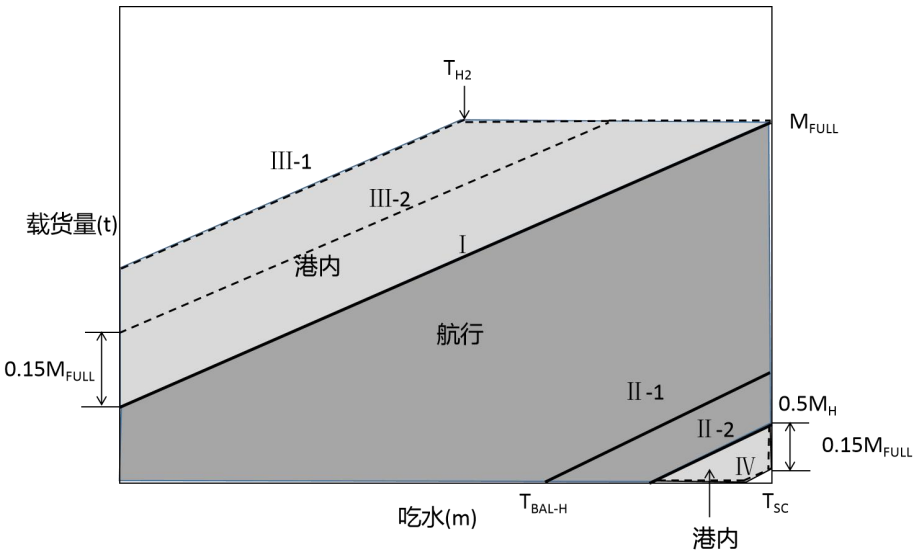


2.1.2　授予 No MP 标志的矿砂船

授予 No MP 标志的矿砂船　　表 2.1.2

装载工况	最大/最小曲线	曲线	参考
航行	最大：$W_{maxS}(T_i) = M_{Full} - 1.025V_H \frac{(T_{SC} - T_i)}{h} \le M_{Full}$	I	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minS}(T_i) = \min \begin{cases} 1.025V_H \frac{(T_i - T_{BAL-H})}{h} \ge 0 \\ 0.5M_H - 1.025V_H \frac{(T_{SC} - T_i)}{h} \ge 0 \end{cases}$	Ⅱ-1 Ⅱ-2	第 4 章第 8 节[3]
港内	最大：$W_{maxH}(T_i) = \max \begin{cases} M_{Full} - 1.025V_H \frac{(0.67T_{SC} - T_i)}{h} \le M_{Full} \\ W_{maxS}(T_i) + 0.15M_{Full} \le M_{Full} \end{cases}$	Ⅲ-1 Ⅲ-2	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minH}(T_i) = W_{minS}(T_i) - 0.15M_{Full} \ge 0$	Ⅳ	第 4 章第 8 节[3]

授予 No MP 标志的矿砂船



3 两个相邻货舱的最大和最小载货量

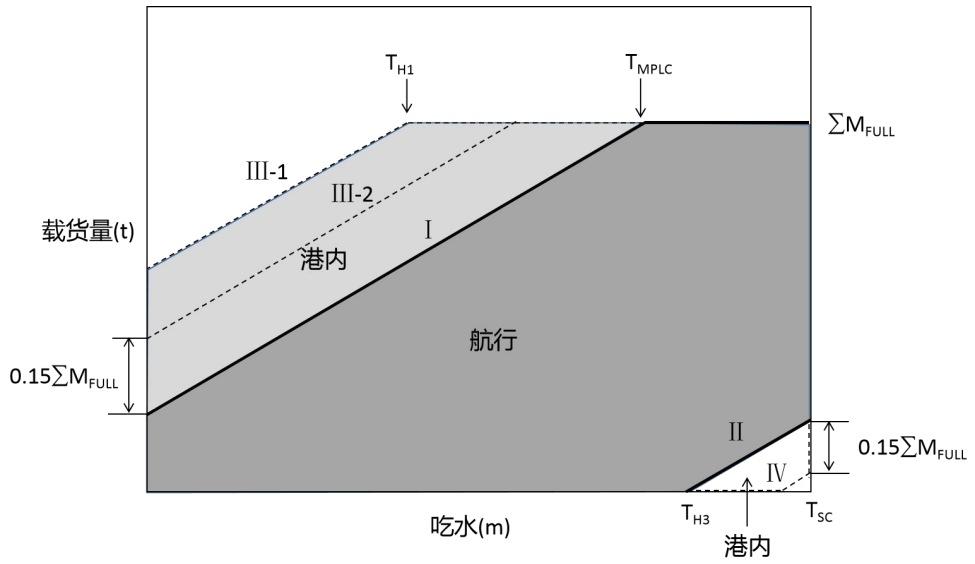
3.1 两个相邻货舱的最大允许载货量和最小要求载货量

3.1.1 未授予 No MP 标志的矿砂船

表 3.1.1

装载工况	最大/最小曲线	曲线	参考
航行	最大：$W_{maxS}(T_i)=\sum M_{Full}-1.025\left(\frac{V_f}{h_f}+\frac{V_a}{h_a}\right)(T_{MPLC}-T_i)\le\sum M_{Full}$	I	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minS}(T_i)=1.025\left(\frac{V_f}{h_f}+\frac{V_a}{h_a}\right)(T_i-\max(0.67T_{SC},T_{BAL\text{-}H}))\ge 0$	II	第 4 章第 8 节[3]
港内	最大：$W_{maxH}(T_i)=\max\begin{pmatrix}\sum M_{Full}-1.025\left(\frac{V_f}{h_f}+\frac{V_a}{h_a}\right)(0.67T_{SC}-T_i)\le\sum M_{Full}\\ W_{maxS}(T_i)+0.15\sum M_{Full}\le\sum M_{Full}\end{pmatrix}$	III-1 III-2	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minH}(T_i)=W_{minS}(T_i)-0.15\sum M_{Full}\ge 0$	IV	第 4 章第 8 节[3]

未授予 No MP 标志的矿砂船两个相邻货舱示例

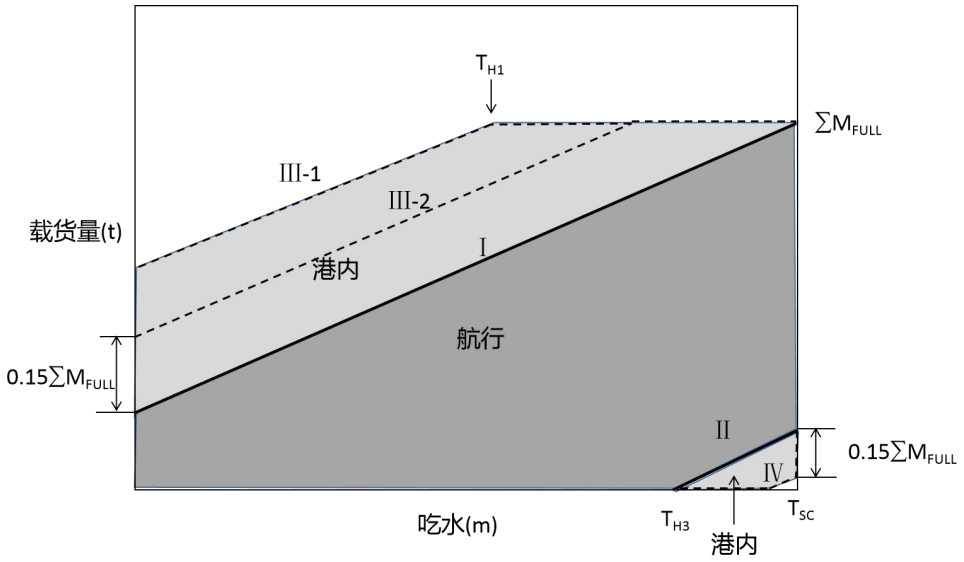


3.1.2 授予 No MP 标志的矿砂船

表 3.1.2

装载工况	最大/最小曲线	曲线	参考
航行	最大：$W_{maxS}(T_i)=\sum M_{Full}-1.025\left(\frac{V_f}{h_f}+\frac{V_a}{h_a}\right)(T_{SC}-T_i)\le\sum M_{Full}$	I	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minS}(T_i)=1.025\left(\frac{V_f}{h_f}+\frac{V_a}{h_a}\right)(T_i-\max(0.67T_{SC},T_{BAL\text{-}H}))\ge 0$	II	第 4 章第 8 节[3]
港内	最大：$W_{maxH}(T_i)=\max\begin{pmatrix}\sum M_{Full}-1.025\left(\frac{V_f}{h_f}+\frac{V_a}{h_a}\right)(0.67T_{SC}-T_i)\le\sum M_{Full}\\ W_{maxS}(T_i)+0.15\sum M_{Full}\le\sum M_{Full}\end{pmatrix}$	III-1 III-2	第 4 章第 8 节[3]
	最小：$W_{minH}(T_i)=W_{minS}(T_i)-0.15\sum M_{Full}\ge 0$	IV	第 4 章第 8 节[3]

授予 No MP 标志的矿砂船两个相邻货舱示例



第 5 章　船体梁强度

第 1 节　一般要求

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

M_{sw} ——所考虑船体横剖面处完整航行工况下垂向许用中拱与中垂静水弯矩，kNm。

M_{sw-p} ——所考虑船体横剖面处港内/遮蔽水域垂向许用中拱与中垂静水弯矩，kNm。

M_{sw-f} ——所考虑船体横剖面处进水工况垂向许用中拱与中垂静水弯矩，kNm。

M_{wv} ——所考虑船体横剖面处完整航行工况下或进水工况垂向波浪弯矩，kNm，见第 4 章第 4 节[3.1.1]。

M_{wh} ——所考虑船体横剖面处水平波浪弯矩，kNm，见第 4 章第 4 节[3.3.1]。

Q_{sw} ——所考虑船体横剖面处航行工况下正的或负的许用静水剪力，kN。

Q_{wv} ——所考虑船体横剖面处完整航行工况下垂向波浪剪力，kN，见第 4 章第 4 节[3.2.1]。

z ——第 1 章第 4 节所定义的参考坐标系下计算点的 z 坐标，m。

z_n ——第 1 章第 4 节所定义的参考坐标系下根据第 3 章第 2 节定义的船体净尺寸的横剖面水平中和轴的 z 坐标，m。

I_{y-n50} ——船体横剖面对其水平中和轴的净惯性矩，m^4。

I_{z-n50} ——船体横剖面对其垂直中和轴的净惯性矩，m^4。

q_v ——所考虑剖面处的垂向剪流。

q_h ——所考虑剖面处的水平剪流。

V_D ——[1.4.3]定义的等效甲板线的垂直距离，m。

z_{VD} ——z 坐标，m，等于 $V_D + z_n$。

1 船体梁横剖面强度特性

1.1 一般要求

1.1.1 本条结合第 4 章第 4 节规定的船体梁载荷，规定了用于本章第 2 节船体梁强度特征的计算准则。

1.2 船体梁横剖面

1.2.1 一般要求

船体梁横剖面应考虑由对船体梁总纵强度起作用的构件组成，即包括[1.3]所定义的强力甲板及其以下的全部纵向连续构件，并考虑到[1.2.2]至[1.2.10]的要求。

1.2.2 净尺度

当船体梁强度特性用于船体梁屈服、极限强度和残存强度校核时，对船体梁总纵强度有贡献的构件应采用按总提供尺寸减去第 3 章第 2 节表 1.3.2 规定的腐蚀增量的净提供尺寸。

1.2.3 大开口，人孔和相邻的小开口

在计算船体梁惯性矩和剖面模数时，大开口和人孔应从剖面面积中扣除。当小开口在船的横向/垂向与大开口或人孔的间隔小于 1m 时，其总宽度应从剖面面积中扣除。

1.2.4 独立小开口

在横剖面内强力甲板或船底区域上的独立小开口，如满足如下条件，则不必从船体梁横

剖面面积内扣除：

$$\sum b_s \le 0.06(\mathrm{B}-\sum b)$$

式中：$\sum b_s$ ——所考虑横剖面内强力甲板或船底区域独立小开口的总宽度，m，按图 1.2.4 所示确定，未按[1.2.3]扣除剖面面积；

$\sum b$ ——所考虑横剖面内大开口的总宽度，m，按图 1.2.4 所示确定，按[1.2.3]的规定扣除剖面面积。

独立小开口的总宽度 $\sum b_s$，如不符合以上准则，仅从船体梁横剖面面积中扣除超出宽度的部分。

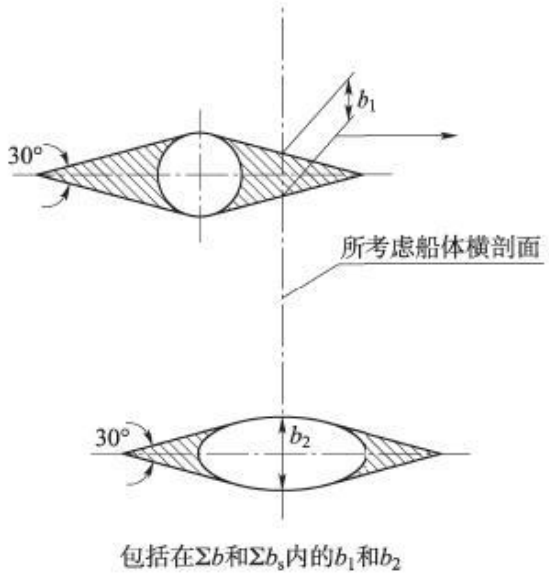


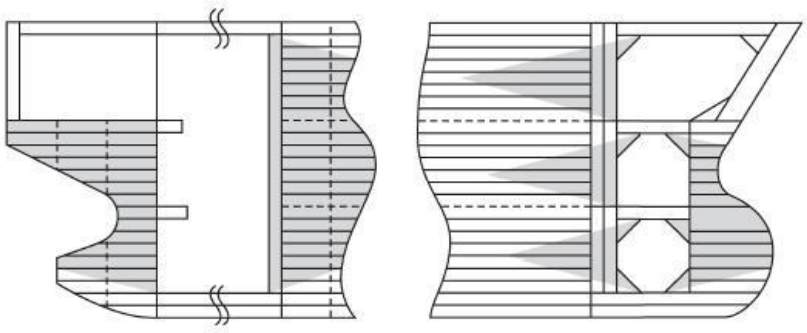
图 1.2.4 $\sum b_s$ 和 $\sum b$ 的计算

1.2.5 减轻孔、排水孔和单个扇形孔

如纵骨内的减轻孔、排水孔和单个扇形孔高度小于 $0.25h_w$，则不必扣除，h_w 为纵骨腹板高度，mm。否则超出部分应从剖面面积中扣除或予以补偿。

1.2.6 非连续甲板和纵舱壁

当计算非连续甲板和纵舱壁处的有效面积时，所取有效面积如图 1.2.6 所示。表示非有效面积的阴影区域是通过画两条与船舶纵轴成 15° 的切线得到的。



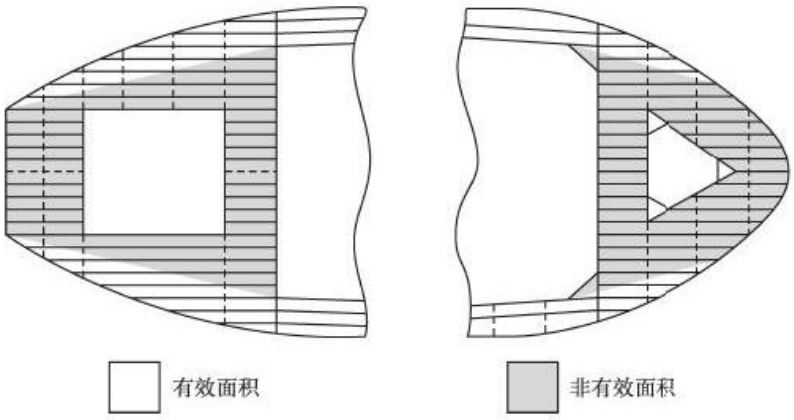


图 1.2.6 非连续甲板处的有效面积

1.2.7 对船体梁剖面面积不起作用的构件

以下构件对船体梁剖面面积不起作用，计算时不考虑

（1）不构成强力甲板的上层建筑

（2）甲板室

（3）[1.2.10]定义的垂直槽形舱壁

（4）不连续的舷墙和槽板

（5）舭龙骨

（6）销斜或不连续的纵向加强筋

（7）不连续的舱口围

1.2.8 连续的凸形甲板和纵向连续的舱口围

如连续的凸形甲板和纵向连续的舱口围由纵舱壁或主要支承构件有效支持，可将其计入船体梁横剖面。

1.2.9 焊接在强力甲板上方的纵骨或纵桁

焊接在强力甲板、按 [1.2.8] 设置的任何凸形甲板上方的纵骨或纵桁，应计入船体梁横剖面。

1.3 强力甲板

1.3.1 强力甲板一般为最上层连续甲板。若上层建筑或甲板室对总纵强度有贡献，强力甲板为该上层建筑的甲板或最上层甲板室的甲板。

1.4 剖面模数

1.4.1 任一点的剖面模数，m^3，按下式计算：

$$Z_{A-n50}=\frac{I_{y-n50}}{|Z-Z_n|}$$

1.4.2 船底处的剖面模数，m^3，按下式计算：

$$Z_{B-n50}=\frac{I_{y-n50}}{Z_n}$$

1.4.3 甲板处的剖面模数，m^3，按下式计算：

$$Z_{D-n50}=\frac{I_{y-n50}}{V_D}$$

式中：V_D ——等效甲板线的垂直距离，m。等于：

当强力甲板边线处与船中线向上偏离水平中和轴 $(Z_D-Z_n)/0.9$ 处连线的上方没有

[1.2.8]和[1.2.9]所述的纵向构件时：

$$V_D = Z_D - Z_n$$

当强力甲板边线处与船中线向上偏离水平中和轴$(Z_D - Z_n)/0.9$处连线的上方有[1.2.8]和[1.2.9]所述的纵向构件时：

$$V_D = (Z_T - Z_n)(0.9 + 0.2\frac{Y_T}{B_1}) \geq Z_D - Z_n$$

式中：Z_D——[1.3]定义的强力甲板边线的 Z 坐标，m；

Z_T，Y_T——连续凸形甲板、舱口围板、纵骨或纵桁顶部的 Y 坐标和 Z 坐标，m，从使V_D值达到最大的点量取。

B_1——计算剖面处的船宽，m。

2 强度评估范围

2.1 一般要求

2.1.1 本章的强度评估应包括船体梁刚度、屈服强度、船体梁极限强度和残存强度。

3 高强度钢范围

3.1 垂向范围

3.1.1 用于甲板区域或船底区域的高强度钢垂向范围$z_{hts,i}$，分别从型甲板边线或基线起量应不得小于下式计算值，m，见图 3.1.1：

$$z_{hts,i} = z_1(1 - \frac{\sigma_{perm,i}}{\sigma_L})$$

式中：z_1——从水平中和轴到型甲板边线或基线的距离，m；

$\sigma_{perm,i}$——所考虑钢材的船体梁许用弯曲应力，N/mm²，在第 2 节[4.1.1]和图 3.1.1 中给出。

σ_L——船体梁弯曲应力，对于型甲板边线和基线分别取 dk 和 bl，N/mm²，见表 3.1.1。

表 3.1.1

	基线处	型甲板边线处
航行	$\sigma_{bl} = \frac{\lvert M_{sw} + M_{wv} \rvert}{I_{y-n50}} z_n 10^{-3}$	$\sigma_{dk} = \frac{\lvert M_{sw} + M_{wv} \rvert}{I_{y-n50}} (z_{dk-s} - z_n) 10^{-3}$
港内/遮蔽水域	$\sigma_{bl} = \frac{\lvert M_{sw-p} \rvert}{I_{y-n50}} z_n 10^{-3}$	$\sigma_{dk} = \frac{\lvert M_{sw-p} \rvert}{I_{y-n50}} (z_{dk-s} - z_n) 10^{-3}$
航行进水工况（1）	$\sigma_{bl} = \frac{\lvert M_{sw-f} + M_{wv} \rvert}{I_{y-n50}} z_n 10^{-3}$	$\sigma_{dk} = \frac{\lvert M_{sw-f} + M_{wv} \rvert}{I_{y-n50}} (z_{dk-s} - z_n) 10^{-3}$
z_{dk-s}：基线到型甲板边线的距离，m		

注（1）：仅适用于船长 *L* 为 150m 及以上，装运密度为 1.0t/ m3 及以上固体散货的矿砂船，且其纵舱壁的任一部分位于舷内 B/5 或者 11.5m（取小者）范围内（在核定的夏季载重线处自舷侧向船内垂直于中心线方向量取）

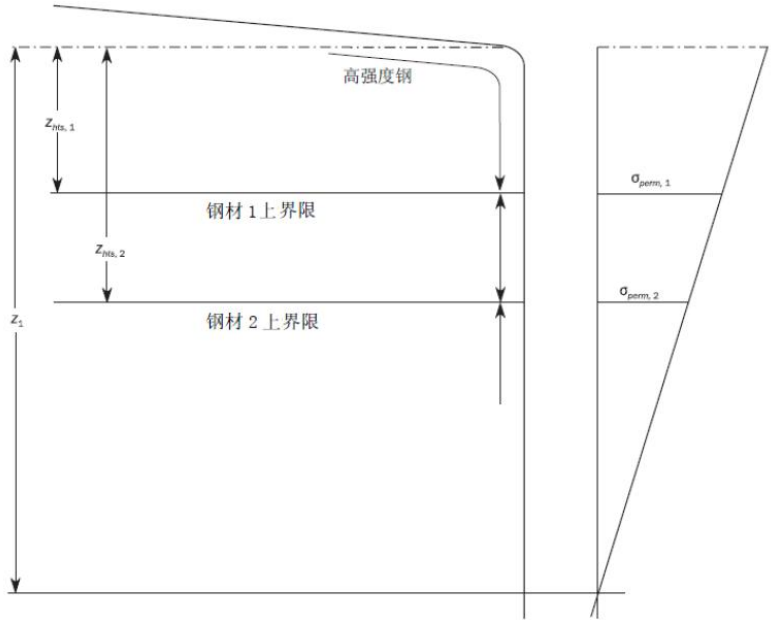


图 3.1.1　高强度钢垂向范围

3.2 纵向范围

3.2.1 如采用，高强度钢的应用范围应沿船长方向延续至总纵应力水平在普通强度钢许用范围内的位置，如图 3.2.1 所示。

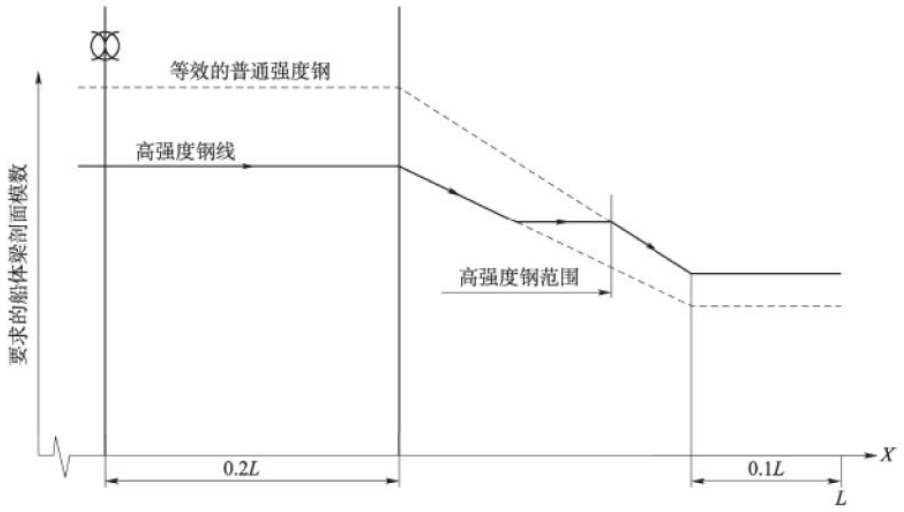


图 3.2.1 高强度钢的纵向范围

第 2 节　船体梁屈服强度

1 剖面模数

1.1 最小净剖面模数

1.1.1 船中部分横剖面甲板和船底处的船体梁垂向净剖面模数，Z_{D-n50} 和，Z_{B-n50}，m^3，不得小于如下要求：

$$Z_R = 0.9kC_sL^2B(C_B + 0.7)10^{-6}$$

2 船体梁刚度

2.1 船中剖面的最小净惯性矩

2.1.1 船中部分横剖面对其水平中和轴的净惯性矩 I_{y-n50} ，m^4，不得小于如下要求：

$$I_{yR} = 2.7C_sL^3B(C_B + 0.7)10^{-8}$$

2.1.2 计入船中最小净剖面模数和最小净惯性矩的纵向连续构件尺寸应在船中 0.4L 区域内保持不变。

3 船体梁应力

3.1 正应力

3.1.1 船体梁正应力按表 3.1.1 计算， N/mm^2，：

正应力 σ_L 表 3.1.1

营运状态	正应力 σ_L		
	z_{VD} 以下的任一点	船底处（1）	甲板处（1）
航行	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wv}}{Z_{A-n50}}10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wv}}{Z_{B-n50}}10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wv}}{Z_{D-n50}}10^{-3}$
港内/遮蔽水域	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{A-n50}}10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{B-n50}}10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{D-n50}}10^{-3}$
航行进水工况	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wv}}{Z_{A-n50}}10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wv}}{Z_{B-n50}}10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wv}}{Z_{D-n50}}10^{-3}$

注：（1）船底和甲板任一点的 σ_L 在基线和等效甲板线处计算。

3.2 剪切应力

3.2.1 船体梁剪切应力按如下计算， N/mm^2：

航行工况：

$$\tau_L = \frac{Q_{sw} + Q_{wv}}{t_{n50} / q_v}10^3$$

港内/遮蔽水域工况：

$$\tau_L = \frac{Q_{sw-p}}{t_{n50} / q_v}10^3$$

进水工况：

$$\tau_L = \frac{Q_{sw-f} + Q_{wv}}{t_{n50} / q_v}10^3$$

式中：t_{n50}——板的净厚度，mm。对于货舱区舷侧和纵舱壁，t_{n50} 取作 $t_{sfi-n50}$，见[4.2.4]；

q_v——基于净尺度的每毫米船体梁剪应力分布因子，等于每毫米的单位剪流，可根据本章附录 1 剪流的直接计算得到。

4 屈服强度评估

4.1 弯曲强度评估

4.1.1 应校核船长 L 范围内中拱和中垂两种状态的弯曲强度，船体梁横剖面位于 V_D 以下的任一点正应力 σ_L 应满足下式：

$$\sigma_L \le \sigma_{perm}$$

式中： σ_L ——[3.1.1]定义的正应力，N/mm^2；

σ_{perm} ——船体梁许用弯曲应力，N/mm^2，见表4.1.1。

船体梁许用弯曲应力　　表4.1.1

营运状态	设计载荷	船体梁许用弯曲应力，σ_{perm}				
		$\frac{x}{L} \le 0.1$	$0.1 < \frac{x}{L} < 0.3$	$0.3 \le \frac{x}{L} \le 0.7$	$0.7 < \frac{x}{L} < 0.9$	$\frac{x}{L} \ge 0.9$
航行	(S+D)	140/k	线性插值	190/k	线性插值	140/k
港内/遮蔽水域	(S)	105/k	线性插值	143/k	线性插值	105/k
航行进水工况(1)	(A：S+D)	140/k	线性插值	190/k	线性插值	140/k

注（1）：仅适用于纵舱壁的任一部分位于舷内B/5或者11.5m（取小者）范围内（在核定的夏季载重线处自舷侧向船内垂直于中心线方向量取）。

4.2 剪切强度评估

4.2.1 应校核船长 L 范围内船体梁剪切强度。

4.2.2 船体梁垂向总剪切能力，Q_R ，取对所考虑剖面的船体梁剪切有贡献的所有板单元 i 中的最小计算值，kN ,按下式计算：

$$Q_R = \min_i \left(\frac{\tau_{i-perm} t_{i-n50}}{q_{vi}} 10^{-3} \right)$$

式中：t_{i-n50} ——板 i 的净厚度，mm。对于货舱区舷侧和纵舱壁，t_{n50} 取作 $t_{sfi-n50}$，见[4.2.4]；

q_{vi} ——基于净尺度板 i 的每毫米船体梁剪应力分布因子，等于每毫米的单位剪流，可根据本章附录 1 剪流的直接计算得到。

τ_{i-perm} ——板 i 的许用剪切应力，N/mm^2，见表 4.2.2。

船体梁许用剪切应力　　表 4.2.2

营运状态	设计载荷	船体梁许用剪切应力，τ_{i-perm}
航行	(S+D)	120/k
港内/遮蔽水域	(S)	105/k
航行进水工况(1)	(A：S+D)	120/k

注（1）：同 4.1.1 的注（1）。

4.2.3 许用垂向正剪力和负剪力应满足如下要求：

航行工况：

$$|Q_{sw}| \le Q_R - |Q_{wv}|$$

港内/遮蔽水域工况：

$$|Q_{sw-p}| \le Q_R$$

航行进水工况：

$$\left|Q_{sw-f}\right| \le Q_R - \left|Q_{wv}\right|$$

式中：Q_R ——[4.2.2]定义的船体梁垂向总剪切能力，kN 。

剪力Q_{wv}分别与所考虑的剪力Q_{sw}和Q_{sw-f}采用相同的符号。

4.2.4 货舱区舷侧和纵舱壁的有效净厚度

货舱区舷侧和纵舱壁在内底板以上的板 *i* 的净厚度$t_{sfi-n50}$ ，mm，按下式计算：

$$t_{sfi-n50} = t_{i-n50} - t_{\Delta i}$$

式中：$t_{\Delta i}$——板*i*的折减厚度，mm。

对于舷侧，剪力修正的厚度折减垂向分布如图4.2.4（1）所示。板*i*的剪力修正的折减厚度$t_{\Delta i}$，mm，按下式计算：

$$t_{\Delta i} = f(1 - \frac{x_{blk}}{0.5l_h})\frac{\delta Q_3}{D\tau_{i-perm}}$$

对于纵舱壁，剪力修正的厚度折减垂向分布如图4.2.4（2）所示。板*i*的剪力修正的折减厚度$t_{\Delta i}$，mm，按下式计算：

$$t_{\Delta i} = 2f(1 - \frac{x_{blk}}{0.5l_h})\frac{\delta Q_3}{h_{blk}\tau_{i-perm}}$$

式中：δQ_3——舷侧或纵舱壁的剪力修正，kN ，见[4.2.5]；

l_h——在0.5D处槽形舱壁间的货舱长度，m；

h_{blk}——纵舱壁的高度，从内底板至纵舱壁顶部甲板的距离，m，见图4.2.4（1）和（2）；

x_{blk}——计算剖面到最近货舱横舱壁的最小纵向距离，m。取正值且不大于0.5l_h；

z_p——从板下缘到基线的垂直距离，m，但不小于h_{db}；

h_{db}——双层底的高度，m，见图4.2.4（1）和（2）；

τ_{i-perm}——板*i*的船体梁许用剪切应力，N/mm^2，取120/k;

f——垂向分布系数，取作：

舷侧：$f = \min(1, 1 - \frac{z_p - 0.5D}{5D})$

纵舱壁：$f = 1 - \frac{(z_p - h_{db})}{h_{blk}}$

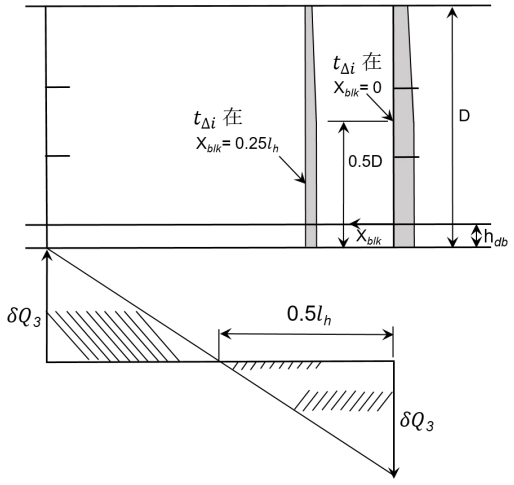


图4. 2. 4（1） 舷侧的剪力修正

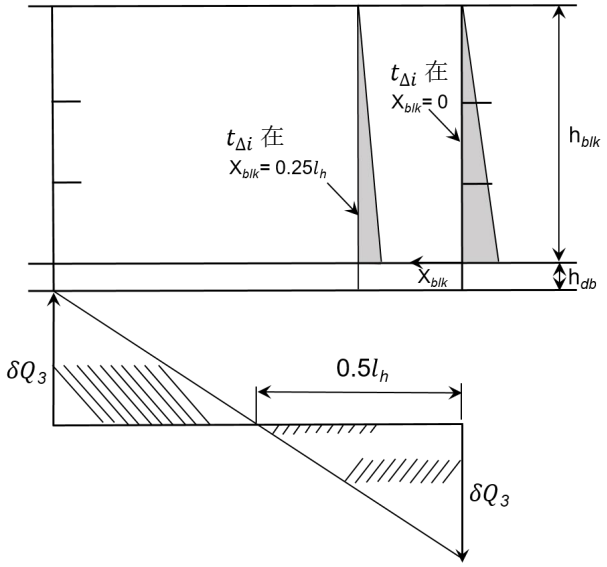


图4. 2. 4（2） 纵舱壁的剪力修正

4.2.5 货舱区的剪力修正δQ_3，kN，按下式计算：

$$\delta Q_3 = 0.5K_sK_3F_{db}$$

式中：F_{db} ——货舱双层底上的最大垂向作用力，kN ,见[4.2.6]

K_s——支撑系数，货舱纵向范围内的边舱设有横向制荡舱壁/水密舱壁时，取 0.8，否则取 1.0；

K_3——修正因子，取作：

$$\text{对于舷侧：}\ K_3 = \left|0.5(1-\frac{1}{1+n_f})(1-C_T)\frac{r}{r+1}-f_{31}\right|$$

$$\text{对于纵舱壁：}\ K_3 = \left|0.5(1-\frac{1}{1+n_f})(1-C_T)\frac{1}{r+1}-f_{32}\right|$$

式中： C_T——由纵桁传递到横舱壁上的货舱载荷的比例，可通过直接计算得到。当没有确切数值时，可取$n_g/(n_g+n_f)$；

n_f——货舱肋板数量，不包括底凳区域的肋板；

n_g——货舱纵桁数量；

r——从纵舱壁至舷侧间的横向制荡舱壁/水密舱壁（如有）、横向主要支撑构件承载的货舱载荷部分与纵舱壁承载的货舱载荷部分的比例，按下式计算；

$$r = \frac{1}{\dfrac{A_{2-n50}}{A_{1-n50}} + \dfrac{2\times10^4 b(n_s+1)A_{2-n50}}{l_{tk}(n_sA_{T-n50}+R)}}$$

l_{tk}——与货舱横舱壁对齐的边舱横舱壁之间的长度，m；

b——边舱内主要支撑构件的平均跨长，包括肘板，m；

A_{T-n50}——边舱内横向制荡舱壁/水密舱壁的净剪切面积，cm^2，取垂向剖面的最小面积；

A_{1-n50}、A_{2-n50}——净面积，定义见表 4.2.5，m^2；

f_{31}——剪力分布因子，定义见表 4.2.5，或基于剪流计算，取横剖面一舷的舷侧承受的船体梁剪力的比例，包括舭列板的垂直投影；

f_{32}——剪力分布因子，定义见表 4.2.5，或基于剪流计算，取横剖面一舷的纵舱壁承受的船体梁剪力的比例，包括与纵舱壁对齐的纵桁；

n——边舱中沿货舱长度 l_h 内的强框架的数量；

n_s——边舱中沿货舱长度 l_h 内的横向制荡舱壁/水密舱壁的数量；

R——边舱内横向主要支撑构件的总有效性，cm²；

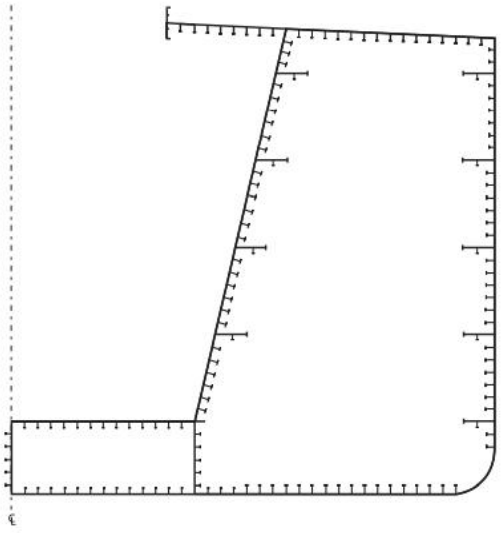
$$R = (\frac{n}{2} - 1)\frac{A_{Q-n50}}{\gamma}$$

$$\gamma = 1 + \frac{300b^2 A_{Q-n50}}{I_{psm-n50}}$$

A_{Q-n50}——边舱内横向强框架的净剪切面积，cm²，取肋板、横撑和甲板强横梁的净剪切面积之和。在构件跨距中点计算净剪切面积；

$I_{psm-n50}$——边舱内横向强框架的净惯性矩，cm⁴，取肋板、横撑和甲板强横梁的净惯性矩之和。取包括宽度等于横向强框架间距的带板在内的构件跨距中点计算净惯性矩；

矿砂船剪力分布因子 表 4.2.5

船体形式	f_3 因子
	$f_{31} = 0.1919 + 0.0222\frac{A_{1-n50}}{A_{2-n50}}$ $f_{32} = 0.3081 - 0.0022\frac{A_{1-n50}}{A_{2-n50}}$
式中： A_{1-n50}、A_{2-n50}——舷侧和纵舱壁在垂直平面上分别基于净厚度 t_{n50} 的净投影面积，计算时仅考虑剖面一舷相应构件的面积。A_{1-n50} 包括舭部板在内的舷侧外板的净面积。A_{2-n50} 包括纵舱壁板以及与纵舱壁板对齐的船底纵桁。	

4.2.6 货舱双层底的最大垂向作用力 F_{db}，kN，取下列中的大者：

纵舱壁上最大净垂向向下作用力：

$$F_{db+} = g\left|f_c M_H - \rho b_2 l_m T_{mean}\right|$$

舷侧和纵舱壁上最大净垂向向上作用力：

$$F_{db-} = g\left|\rho b_2 l_m T_{mean}\right|$$

式中：M_H——装载手册中最大吃水时货舱内货物装载量，t；

f_c——系数，取

$$f_c = \frac{l_m b_2 H}{V_{Full}}$$

式中：H——货舱高度，从内底板量至舱口围顶，m；

V_{Full}——达到舱口围顶部的货舱舱容，m^3；

b_2——内底处货舱的平均宽度，m；

l_m——货舱平均长度，取 0.5D 处的货舱长度与内底处货舱长度的平均值，m；

T_{mean}——表 4.2.6 中所考虑的装载工况下货舱舱中处的吃水。

装载工况下货舱舱中处的吃水 T_{mean}　　表 4.2.6

营运状态	F_{db}	T_{mean}（1）	
		授予 No MP 标志船舶	未授予 No MP 标志船舶
航行状态	最大净垂向向下作用力，F_{db+}	T_{SC}	$T_{S,MIN,SEA}$
	最大净垂向向上作用力，F_{db-}	T_{HB}	$T_{S,MAX,SEA}$
港内/遮蔽水域	最大净垂向向下作用力，F_{db+}	$T_{S,MIN,FULL,HAR}$	
	最大净垂向向上作用力，F_{db-}	$T_{S,MAX,EMPTY,HAR}$	

注（1）：

T_{mean} 应基于单个货舱装载的载货量曲线的拐点，载货量曲线及符号定义见第 4 章附录 2；

T_{HB}：单个货舱装载货舱舱中处的最深压载吃水，m；

$T_{S,MIN,SEA}$：航行工况下单舱装载 M_H 时舱中处的最小吃水，从装载手册中读取；

$T_{S,MAX,SEA}$：航行工况下单舱空舱的舱中处的最大吃水，从装载手册中读取；

$T_{S,MIN,FULL,HAR}$ 港内工况单舱装载 M_H 时舱中处的最小吃水，从装卸货程序中读取；

$T_{S,MAX,EMPTY,HAR}$：港内工况单舱空舱时舱中处最大吃水，从装卸货程序中读取。

第 3 节　船体梁极限强度

1 一般要求

1.1 一般要求

1.1.1 本节给出的衡准适用于完整船体结构。

1.1.2 应校核货舱区域和机舱的船体梁极限弯曲强度。

1.1.3 船长 L 为 250m 及以上的矿砂船，应按本规范附录 A 的规定考虑砰击颤振的影响。

2 船体梁极限弯矩

2.1 船体梁极限弯矩

2.1.1 极限强度校核时，中拱与中垂工况所采用的船体梁垂向极限弯矩 M 取：

$$M = \gamma_s M_{sw} + \gamma_w M_{wv}$$

式中：M_{sw} ——垂向许用静水弯矩，kN·m， 见表2.1.1；

M_{wv} ——垂向波浪弯矩，kN·m，见第4章第4节；

γ_s ——静水弯矩的分项安全因子，取：

γ_s = 1.0

γ_w ——垂向波浪弯矩的分项安全因子，取：

γ_w = 1.2

设计工况组合 表2.1.1

设计工况	垂向许用静水弯矩，M_{sw}
（S+D）	M_{sw-h} 或 M_{sw-s}
（S）	M_{sw-p-h} 或 M_{sw-p-s}
（A：S+D）(1)	M_{sw-f}

注（1）：同4.1.1的注（1）。

3 船体梁极限弯曲能力

3.1 一般要求

3.1.1 船体梁横剖面的极限弯曲能力 M_U，系指船体梁发生崩溃失效时的最大弯曲能力。

3.2 船体梁极限弯曲能力的确定

3.2.1 在中拱和中垂工况下，船体梁横剖面的极限弯曲能力，定义为所考虑横剖面的弯曲能力与曲率χ曲线的最大值（M_{UH}为中拱工况，M_{US}为中垂工况，见图 3.2.1）。曲率χ对于中拱工况为正值，对于中垂工况为负值。

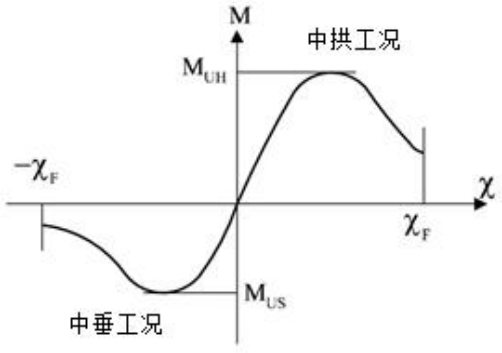


图 3. 2. 1 弯曲能力 M 与曲率 χ

船体梁极限弯曲能力 M_U 按本章附录 2[2]中的增量-叠代法计算，或采用附录 2[3]中的替代方法。

4 验收衡准

4.1 验收衡准

4.4.1 任一横剖面的船体梁极限弯曲能力应满足下述衡准：

$$M \leqslant \frac{M_U}{\gamma_M \gamma_{DB}}$$

式中：M——垂向弯矩，kN·m，应按[2.1]计算

M_U——船体梁极限弯曲能力，kN·m，按[3.2]计算

γ_M——涵盖材料、几何、强度不确定性的分项安全因子，取为：

$$\gamma_M = 1.05$$

γ_{DB}——涵盖双层底弯曲效应的分项安全因子，取为：

- 对于除进水工况外的中拱工况：$\gamma_{DB} = 1.10$
- 对于除进水工况外的中垂工况：$\gamma_{DB} = 1.0$
- 对于中拱和中垂的进水工况外：$\gamma_{DB} = 1.0$

对于双层底宽度小于船中处的横剖面，或双层底结构形式不同于船中处的横剖面（如机舱横剖面），中拱工况下γ_{DB}可以减小，但应取得CCS的同意。

第 4 节　船体梁残存强度

1 一般规定

1.1 规范要求

1.1.1 应校核货舱区和机舱的船体梁残存强度，以确保船舶航行时在[2]规定的破损工况下具有足够的残存强度。

2 破损范围

2.1 碰撞破损范围

2.1.1 假定碰撞破损发生一舷，纵向破损范围取 1 个横向强框架间距，垂向和横向破损范围为以强力甲板上缘与舷侧型线的交点为参考点，分别垂直向下和水平向舷内平移 h 和 d 所围成的区域（包括强力甲板），h 和 d 的定义见表 2.1.1 和图 2.1.1。

碰撞破损范围　　**表 2.1.1**

高度，h	0.60D
深度，d	B / 16

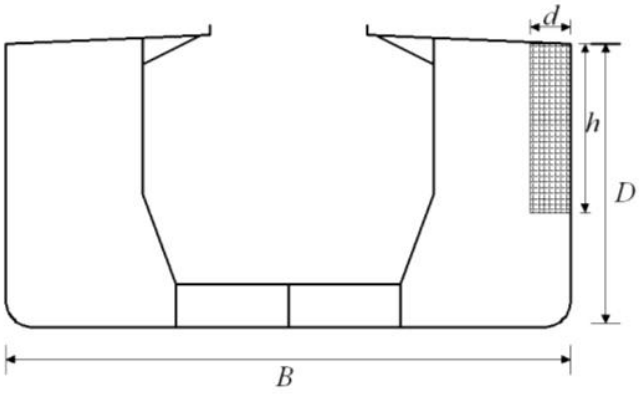


图 2.1.1 碰撞破损范围

2.2 搁浅破损范围

2.2.1 对所考虑的破损横剖面进行搁浅评估时，破损位于船底对结构最不利的横向位置。假定搁浅纵向破损范围取 1 个横向强框架间距，垂向和横向破损范围见表 2.2.1 和图 2.2.1。

搁浅破损范围 **表 2.2.1**

高度，h	$B/20$ 和 2m 的小者
宽度，b	$0.60B$

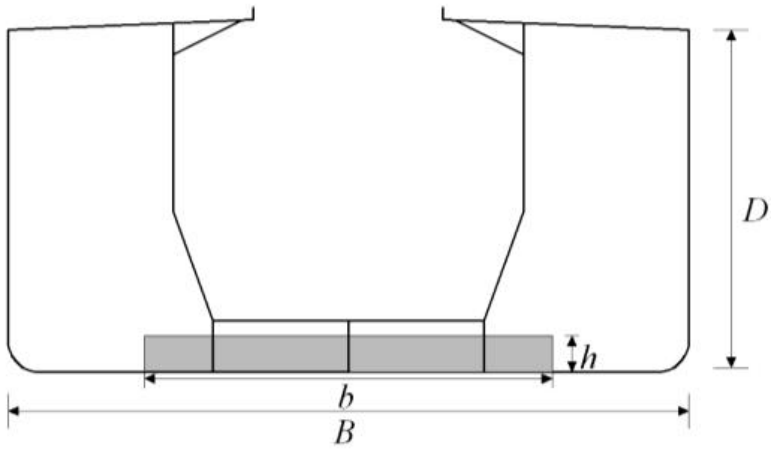


图 2.2.1 搁浅破损范围

3 残存强度衡准

3.1 一般要求

3.1.1 船体梁任一横剖面处的极限弯曲能力应满足以下衡准：

$$\gamma_{SD}M_{SW}+\gamma_{WD}M_{WV}\le\frac{M_{UD}}{\gamma_{RD}\cdot C_{NA}\cdot\gamma_{NF}}$$

式中：

M_{SW} ——船体梁计算横剖面的许用静水弯矩，kN·m，见表 3.1.1；

M_{WV} ——船体梁计算横剖面的波浪弯矩，kN·m；

M_{UD} ——碰撞/搁浅破损后船体梁计算横剖面的极限弯曲能力，kN·m，按[3.2]计算；

γ_{SD} ——破损后静水弯矩的分项安全因子，γ_{SD}=1.1；

γ_{WD} ——破损后波浪弯矩的分项安全因子，γ_{WD}=0.67；

γ_{RD} ——碰撞/搁浅破损后船体梁极限弯曲能力的分项安全因子，γ_{RD}=1.0；

C_{NA} —— 中和轴系数，取以下值：

碰撞时，C_{NA}=1.1；

搁浅时，C_{AN}=1.0；

γ_{NF} ——非线性有限元方法的影响因子，取以下值：

采用附录 2 的单跨模型，γ_{NF}=1.05；

采用附录 2 的增量-迭代法与舱段模型，γ_{NF}=1.0。

设计工况组合 表 3.1.1

	设计工况	垂向许用静水弯矩，M_{sw}
碰撞	（A：S+D）	M_{sw-h} 或 M_{sw-s}
搁浅	（A：S+D）	M_{sw-h} 或 M_{sw-s}

3.2 破损状态下的船体梁极限弯曲能力

3.1.1 破损状态下的船体梁极限弯曲能力根据本章附录 2 计算，假定破损部分对船体梁强度无贡献。当评估破损船体剖面的极限弯曲能力 M_{UD} 时，[2.2]所定义的破损区域不承受载荷并从能力模型中扣除。

3.1.2 用于船体梁极限强度能力评估的完整部分有效区域见本章附录 2 中的规定。

附录 1　剪流直接计算

1．一般规定

本附录描述了由船体梁垂向剪力引起的作用于船舶横剖面的剪流的直接计算方法。横剖面每一处的剪流 q_v 按剖面在 Z 坐标方向上承受 1N 单位垂向剪力计算。

每毫米的单位剪流 q_v，N/mm，等于：

$$q_v = q_D + q_l$$

式中：　q_D ——定剪流，如 2 定义；

q_l ——环绕封闭单元的不定剪流，如 3 定义：

计算单位剪流 q_v 时，需计入纵向骨材。

2．定剪流

横剖面每一处的定剪流 q_D，N/mm，可按以下线性积分求得：

$$q_D(s) = -\frac{1}{10^6 I_{y-n50}} \int_0^s (z - z_n) t_{n50} ds$$

式中：　s ——沿横剖面的流动坐标的坐标值，m

$I_{y\text{-}n50}$ ——横剖面的惯性矩，m^4

T_{n50}——板的净厚度，mm

z_n——水平中和轴的垂向坐标，m

假设剖面由图 1 所示的线段组成，线段内的板厚为定值，定剪流可以根据下式计算：

$$q_{DK} = -\frac{t_{n50} l}{2 \bullet 10^6 I_{y-n50}} (z_k + z_i - 2z_n) + q_{Di}$$

式中：　q_{Dk}, q_{Di} ——节点 k 和节点 i 处的定剪流，N/mm；

l ——线段的长度，m：

y_k, y_i——线段端点的 Y 坐标，m，如图 1 定义；

z_k, z_i ——线段端点的 Z 坐标，m，如图 1 定义；

当横剖面包含闭室时，闭室应采用图 2 所示虚拟缝隙进行切割，以获得定剪流。

但是，虚拟缝隙不允许设置在约束其它闭室的边界上。

分叉点处定剪流的计算可按图 2 所示的类似水流计算的方式进行。

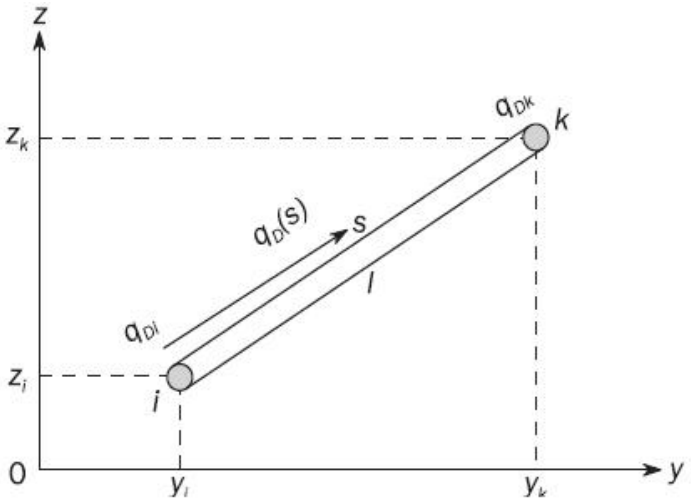


图 1 线段的定义

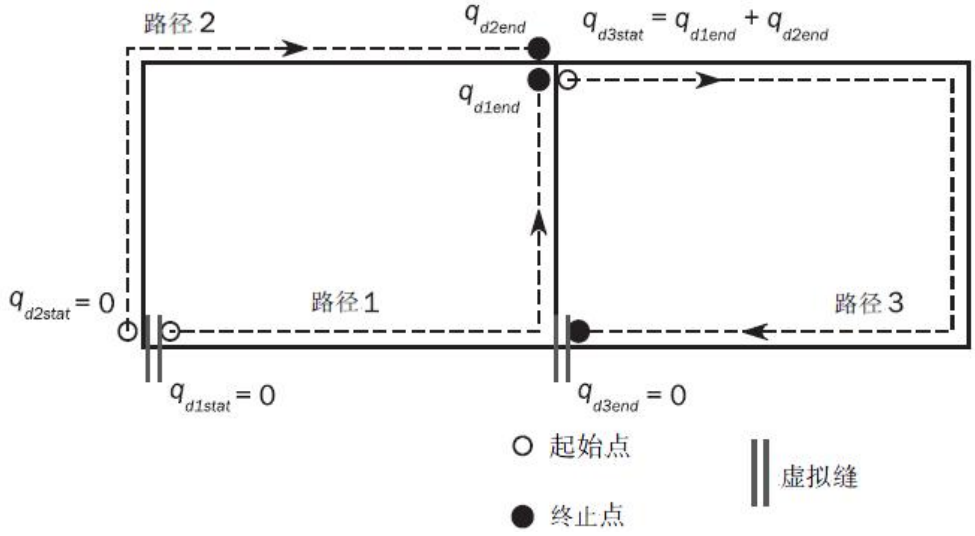


图 2 分叉点处定剪流的计算

3. 不定剪流

不定剪流环绕闭室起作用并在同一闭室中视为定值。可按下列方程确定不定剪流。在方程中对多个参数环绕所有闭室进行边界积分。

$$q_{lc}\oint_c \frac{1}{t_{n50}}ds - \sum_{m=1}^{N_w}(q_{lm}\oint_{c\&m}\frac{1}{t_{n50}}ds) = -\oint_c \frac{q_D}{t_{n50}}ds$$

式中： N_w——闭室 c 和其他单元间公共边界的数量

$c\&m$——闭室 c 和 m 的公共边界

q_{Ic}, q_{Im}——分别环绕闭室 c 和闭室 m 的不定剪流，N/mm；

假定由图 1 所示的线段组合而成，且每段内的板厚相同，上式可以表示为：

$$q_{lc}\sum_{j=1}^{N_c}(\frac{l}{t_{n50}})_j - \sum_{m=1}^{N_w}\left\{q_{lm}\left[\sum_{j=1}^{N_m}(\frac{l}{t_{n50}})_j\right]_m\right\} = -\sum_{j=1}^{N_c}\phi_j$$

$$\phi_j = \left[-\frac{l^2}{6\bullet 10^3 I_{y-n50}}(z_k + 2z_i - 3z_n) + \frac{l}{t_{n50}}q_{Di}\right]_j$$

式中： N_c——闭室 c 的线段数量

N_m——闭室 c 和 m 的公共边界数量

q_{Di}——根据 2 计算的定剪流，N/mm；

需考虑 2 及本条所规定的流动坐标方向的差异。

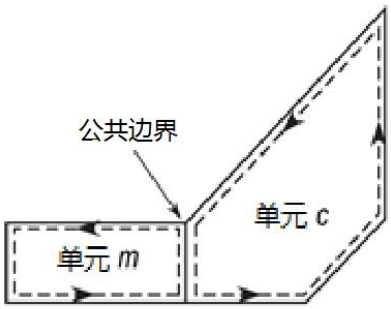


图 3 闭室和公共边界

4. 剖面特性的计算

当剖面假定由线段构成时，剖面特性可根据下式获得：

$$l = \sqrt{(y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}$$

$$a_{n50} = 10^{-3} t_{n50} \qquad A_{n50} = \sum a_{n50}$$

$$s_{y-n50} = \frac{a_{n50}}{2}(z_k + z_i) \qquad S_{y-n50} = \sum s_{y-n50}$$

$$i_{y0-n50} = \frac{a_{n50}}{3}(z_k^2 + z_k z_i + z_i^2) \qquad I_{y0-n50} = \sum i_{y0-n50}$$

式中： A_{n50}, A_{n50}——分别为线段和横剖面的面积，m^2；

s_{y-n50}, S_{y-n50}——线段和横剖面对于基线的一阶矩，m^3；

i_{y0-n50}, I_{y0-n50}——线段和横剖面对于基线的惯性矩，m^4；

水平中和轴的高度z_n，m，可按如下获得：

$$z_n = \frac{S_{y-n50}}{A_{n50}}$$

关于水平中和轴的惯性矩，m^4，可按以下求得：

$$I_{y-n50} = I_{y0-n50} - z_n^2 A_{n50}$$

附录 2　船体梁极限弯曲能力

符号

$I_{y\text{-}n50}$　：　船体横剖面对其水平中和轴的惯性矩，m^4

$Z_{B\text{-}n50}$, $Z_{D\text{-}n50}$　：　船底和甲板处的剖面模数，m^3，按第 5 章第 1 节定义

R_{eH_S}　：　所考虑骨材材料的最小屈服应力，N/mm^2

R_{eH_P}　：　所考虑板材料的最小屈服应力，N/mm^2

$A_{s\text{-}n50}$　：　骨材的净剖面面积，cm^2，不计及带板

$A_{p\text{-}n50}$　：　带板的净剖面面积，cm^2

1 一般假定

1.1 船体梁极限能力的计算方法应能识别出所有主要纵向构件的关键失效模式。

1.2 如果结构受压超出了其屈曲极限，其承载能力将降低。为确定横框架之间的最弱失效模式，需考虑各个构件的所有相关失效模式，如：板材屈曲、骨材扭转屈曲、骨材腹板屈曲、骨材侧向或总体屈曲以及它们的相互作用。

2 增量—叠代方法

2.1 假定

应用增量-迭代方法时，一般应遵循以下假定：

- 在两个相邻横框架之间的船体剖面进行；
- 船体梁剖面在各曲率增量下保持平面；
- 船体材料认为具有弹性—塑性特性；
- 船体梁剖面划分为一系列单元，见[2.2.2]，单元之间无相互作用。

根据叠代方法，每一曲率χi 下作用于横剖面的弯矩 M_i 通过对作用于所有单元上的应力σ求和获得。每一曲率增量下相应于单元应变ε的应力σ通过单元的非线性载荷—端缩曲线σ—ε获得。

根据单元的失效机理，这些曲线按照本附录[2.3]所规定的公式进行计算。应力σ取所考虑的各条载荷—端缩曲线σ—ε结果的最小值。

重复该流程，直至所取曲率值在中拱与中垂状态下达到由下式求得的值χ_F，m^{-1}：

$$\chi_F = \pm 0.003 \frac{M_y}{EI_{y-n50}}$$

式中：　M_Y——M_{Y1} 和 M_{Y2} 的小者，kNm；

$M_{Y1} = 10^3 R_{eH} Z_{B\text{-}n50.}$

$M_{Y2} = 10^3 R_{eH} Z_{D\text{-}n50.}$

如χ_F 的值不足以评估 M-χ曲线的峰值，应重复此流程，直至所取曲率值允许对该曲线进行最大弯矩的计算。

2.2 计算流程

2.2.1 一般要求

M-χ曲线应通过增量—叠代方法求得，概况见图 1 的流程。

本方法中，船体梁极限弯矩能力 M_U 的定义为船体横剖面垂向弯矩 M 与曲率χ关系曲线

的峰值，如图 1 所示。该曲线应通过增量—叠代方式求得。

增量程序的每一步由作为强制曲率χ_i结果的作用于船体横剖面上的计算弯矩 M_i 表征。

每一步的χ_i值，应将曲率的增量$\Delta\chi$与前一步的曲率值χ_{i-1}相加而求得。此曲率增量对应于船体梁横剖面对其水平中和轴的转角增量。

这一转角增量在每个船体结构单元中引起轴向应变ε，其值与单元的位置相关。在中拱工况下，中和轴上方的结构单元被拉长，中和轴下方的单元被压缩；在中垂工况下正相反。

应变ε引起的各结构单元应力σ，应从各单元的载荷—端缩曲线σ—ε得出，该曲线计入各单元在非线性弹性—塑性区域的特性。

对于每一步，由于σ—ε为非线性关系，在构成船体横剖面的所有单元中的应力分布确定了中和轴位置的变化。对于所考虑的计算步骤，中和轴的新位置应通过叠代过程求得，以使得作用于所有船体单元的应力达到平衡。

一经知道中和轴的位置且求得剖面结构单元的相关应力分布，则与当前计算步骤曲率χ_i相对应的、绕中和轴新位置的剖面弯矩 M_i 应通过总和各单元的应力而求得。

上述增量—叠代方法的主要步骤概括如下（参见图 1）：

第 1 步：将船体横剖面划分为加筋板单元；

第 2 步：按表 1 所示对所有单元的应力—应变关系作出定义；

第 3 步：对于具有曲率增量值（即该曲率引起强力甲板的应力等于 1%的屈服强度）的第 1 增量步，初始化曲率χ_1和中和轴；

$$\chi_1=\Delta\chi=0.01\frac{R_{eH}}{E}\frac{1}{z_D-z_n}$$

式中： z_D——强力甲板边线的 Z 坐标，m，

z_n：横剖面中和轴的Z坐标, m，在第1章第1节 [2.18]所定义的坐标系下的坐标系。

第 4 步：计算各单元相应的应变$\varepsilon_i=\chi(z_i-z_n)$和相应的应力$\sigma$；

第 5 步：通过建立整个横剖面的力平衡来确定各增量步的中和轴 z_{NA_cur}

$$\Sigma_{A_{i-n50}}\sigma_i=\Sigma_{A_{j-n50}}\sigma_j$$（第 i 单元受压，第 j 单元受拉）

第 6 步：通过合计所有单元的贡献计算相应的弯矩：

$$M_U=\sum\sigma_{Ui}A_{i-n50}\left|(z_i-z_{NA_cur})\right|$$

第 7 步：比较当前增量步与前一增量步的弯矩。如 M-χ关系中的斜率小于一个固定负值，则结束此过程并定义 M_U 的峰值。否则，增加曲率$\Delta\chi$量并转到第 4 步。

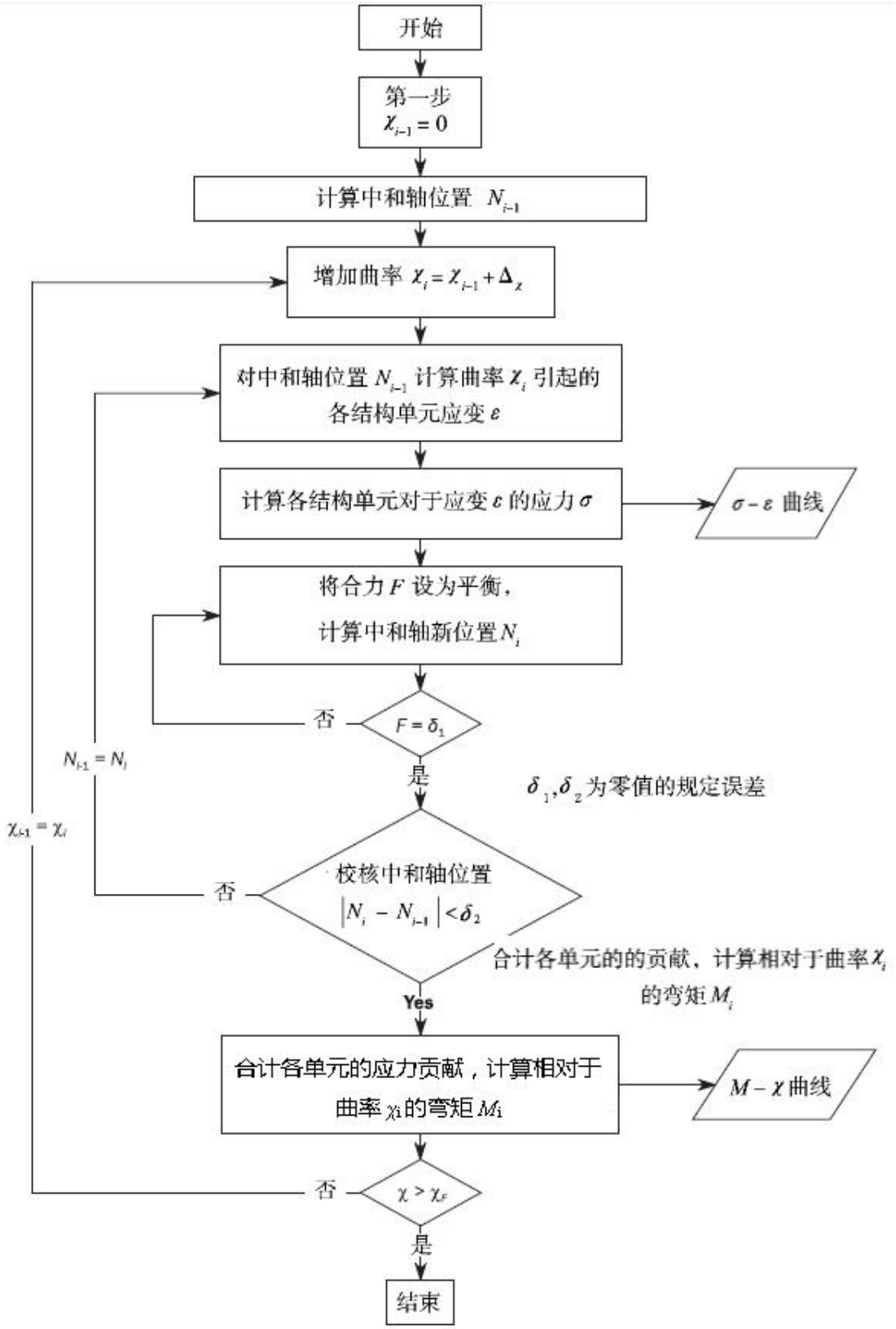


图 1　*M*-χ曲线计算程序流程图

2.2.2 船体梁横剖面建模

船体梁横剖面由对船体梁极限强度有贡献的构件构成。

两端削斜扶强材也应建模，但不应考虑其对船体梁强度的贡献。

构件分为扶强材单元、加筋板单元或硬角单元。

将包括纵桁或舷侧纵桁腹板的板格理想化为加筋板单元、扶强材单元的带板或硬角单元。

板格分为如下两类：

——纵向加筋板格，长边沿纵向；

——横向加筋板格，长边沿与纵向垂直的方向；

- 硬角单元

硬角单元是构成船体梁横剖面的较坚固的单元，主要按弹性—塑性失效模式损坏（材料屈服），这些单元一般由两块不共面的板组成。

硬角单元离板交点的范围是在横向加筋板上取 20 t_{n50}，在纵向加筋板上取 0.5s，见图 2。其中： t_{n50}——板的净厚度，mm；

s——相邻纵向扶强材的间距，m；

舭部，舷顶列板—甲板边板单元，纵桁—甲板的连接和大纵桁的面板—腹板连接都是典型的硬角。

- 扶强材单元

扶强材构成了包括带板的扶强材单元。

原则上带板宽度是：

——当扶强材两侧的板格是纵向加筋时，等于普通扶强材的平均间距；

——当扶强材一侧的板格是纵向加筋，另一侧是横向加筋时，等于纵向加筋板格的宽度，见图 2。

- 加筋板单元

扶强材单元之间，扶强材单元与硬角单元之间或硬角单元之间的板作为加筋板单元，见图 2。

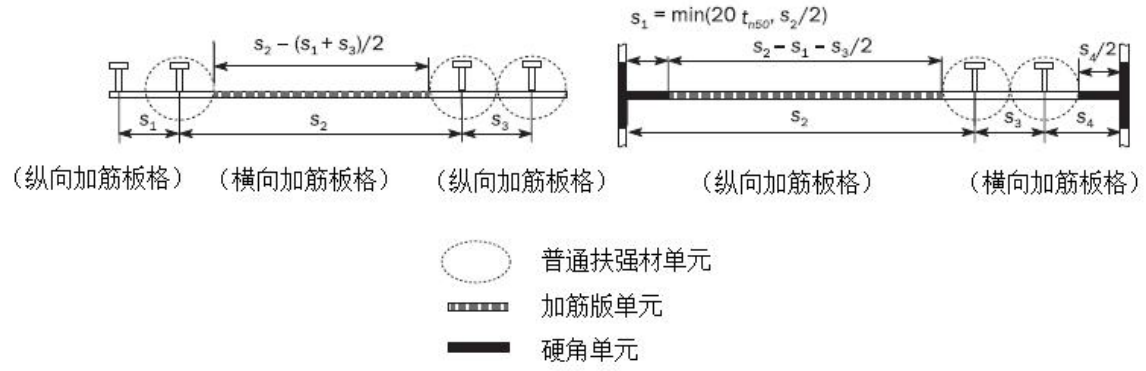


图 2 带板和硬角单元的宽度范围

船体梁剖面建模的典型示例如图 3 所示。

尽管有前面的建模原则，这些图应用于上甲板、舷顶列板和舱口旁纵桁附近的建模。

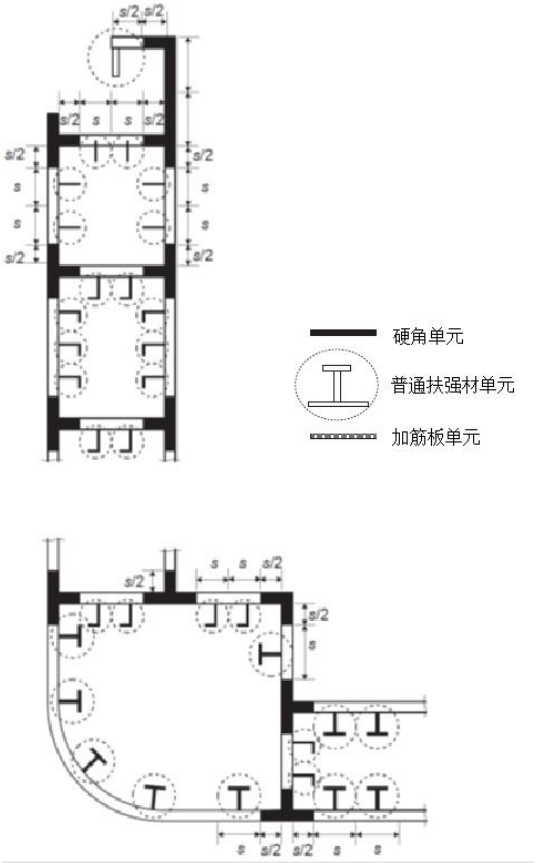


图 3 船体剖面上加筋板单元、扶强材单元和硬角单元的示例

注：

（1）如图 4 所示的折角点，角度大于 30°的折角区域附近板定义为硬角的一侧的范围是从折角点起在横向加筋板上取 $20t_{n50}$，在纵向加筋板上取 $0.5s$。

（2）当板由纵向不连续扶强材加强时，仅认为纵向不连续扶强材将板分成不同的基本板格。

（3）当加筋板单元上有开孔时，开孔应根据本章第 1 节[1.2.4]所示的方法进行扣除。

（4）当带板由不同厚度和/或屈服应力的钢材组成时，由下式得出的平均厚度和/或平均屈服应力用于计算。

$$t_{n50} = \frac{t_{1-n50}s_1 + t_{2-n50}s_2}{s}$$

$$R_{eH_P} = \frac{R_{eH_P1}t_{1-n50}s_1 + R_{eH_P2}t_{2-n50}s_2}{t_{n50}s}$$

式中：R_{eH_P1}, R_{eH_P2}, $t_{1\text{-}n50}$,$t_{2\text{-}n50}$, s_1, s_2 和 s 如图 5 所示。

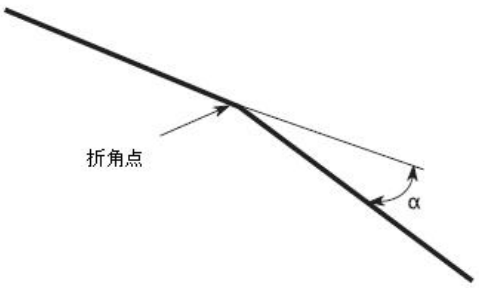


图 4 有折角点的板

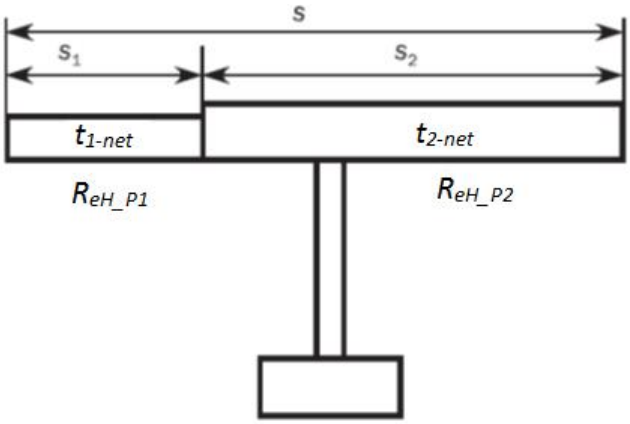


图 5 有不同厚度和屈服强度的单元

2.3 载荷—端缩曲线

2.3.1 加筋板单元和普通扶强材单元

构成船体梁横剖面的加筋板单元和扶强材单元可按表 1 所规定的失效模式之一崩溃破坏。

- 若板由纵向不连续扶强材加强，单元的应力应根据本附录[2.3.2]至[2.3.7]获得，考虑纵向不连续构件在为校核船体梁极限强度而计算总力时，纵向不连续扶强材的面积设为零。
- 若加筋板单元上有开孔，则在为校核船体梁极限强度而计算总力时，加筋板单元的面积应从板中减去开孔的面积。
- 对加筋板单元，计算应力—应变曲线的载荷端缩比例时，板的有效宽度应取全板宽，即：到与其它板和纵向扶强材的交点，既不是到硬角单元的端点也不是到扶强材单元的带板。在为校核船体梁极限强度而计算总力时，加筋板单元的面积应取硬角单元和普通扶强材单元之间的面积或硬角单元之间的面积。

加筋板单元和扶强材单元失效模式　　表 2.3.1

单元	失效模式	σ—ε曲线定义见
拉长的加筋板单元或扶强材单元	弹塑性崩溃	本附录[2.3.2]
缩短的扶强材单元	梁柱屈曲 扭转屈曲 折边型材的腹板局部屈曲 扁钢的腹板局部屈曲	本附录[2.3.3] 本附录[2.3.4] 本附录[2.3.5] 本附录[2.3.6]
缩短的加筋板单元	板屈曲	本附录[2.3.7]

2.3.2 结构单元的弹塑性崩溃破坏

对于组成船体梁横剖面的结构单元，描述其弹塑性崩溃破坏的载荷—端缩曲线σ—ε的方程由下式得出。

$$\sigma = \Phi R_{eHA}$$

式中：　R_{eHA}——所考虑单元的等效最小屈服强度，N/mm2，由以下公式得到：

$$R_{eHA}=\frac{R_{eH_P}A_{p-n50}+R_{eH_S}A_{s-n50}}{A_{p-n50}+A_{s-n50}}$$

Φ——边缘函数，等于：

$$\Phi=-1 \text{ 对 } \varepsilon<-1$$
$$\Phi=\varepsilon \text{ 对 } -1\le\varepsilon\le 1$$
$$\Phi=1 \text{ 对 } \varepsilon>1$$

ε——相对应变，等于：

$$\varepsilon=\frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_Y}$$

ε_ε——单元应变

ε_Y——单元达到屈服应力时的应变，等于：

$$\varepsilon_Y=\frac{R_{eHA}}{E}$$

2.3.3 梁柱屈曲

对于组成船体梁横剖面的扶强材的梁柱屈曲，描述其载荷—端缩曲线σ_{CR1}—ε的方程由下式得出：

$$\sigma_{CR1}=\Phi\sigma_{C1}\frac{A_{s-n50}+A_{pE-n50}}{A_{s-n50}+A_{p-n50}}$$

式中： Φ——本附录[2.3.2]所定义的边缘函数

σ_{C1}——临界应力，N/mm^2，等于：

$$\sigma_{C1}=\frac{\sigma_{E1}}{\varepsilon} \text{ 对于 } \sigma_{E1}\le\frac{R_{eHB}}{2}\varepsilon$$

$$\sigma_{C1}=R_{eHB}\left(1-\frac{R_{eHB}\varepsilon}{4\sigma_{E1}}\right) \text{ 对于 } \sigma_{E1}>\frac{R_{eHB}}{2}\varepsilon$$

R_{eHB}——所考虑单元的等效最小屈服强度，N/mm^2，由下式获得：

$$R_{eHB}=\frac{R_{eH_P}A_{pEI-n50}l_{pE}+R_{eH_S}A_{s-n50}l_{sE}}{A_{pEI-n50}l_{pE}+A_{s-n50}l_{sE}}$$

$A_{pEI-n50}$——有效面积，cm^2，等于：

$$A_{pEI-net}=10b_{E1}t_{net}$$

l_{pE}——扶强材（带板宽度 b_{E1}）中和轴距带板底部的距离，mm

l_{sE}——扶强材（带板宽度 b_{E1}）中和轴距扶强材顶部的距离，mm

ε——本附录[2.3.3]定义的相对应变

σ_{E1}——柱屈曲欧拉应力，N/mm^2，等于：

$$\sigma_{E1}=\pi^2E\frac{I_{E-n50}}{A_{E-n50}l^2}10^{-4}$$

I_{E-n50}——扶强材的净惯性矩，cm^4，且带板宽度为 b_{E1}

A_{E-n50}——扶强材的净面积, cm², 带板宽度为 b_{E1}

b_{E1}——带板相对应变修正有效宽度，m，等于：

$$b_{E1}=\frac{s}{\beta_E} \text{ 对于 } \beta_E>1.0$$

$$b_{E1}=s \text{ 对于 } \beta_E\le 1.0$$

$$\beta_E=10^3\frac{s}{t_{n50}}\sqrt{\frac{\varepsilon R_{eH-P}}{E}}$$

$A_{pE\text{-}n50}$——宽度为 b_E 的带板的净剖面面积，cm^2，等于：

$$A_{pE-n50}=10b_E t_{n50}$$

b_E——有效带板宽度，m，等于：

$$b_E=\left(\frac{2.25}{\beta_E}-\frac{1.25}{\beta_E^2}\right)s \text{ 对于 } \beta_E>1.25$$

$$b_E=s \text{ 对于 } \beta_E\le 1.25$$

2.3.4 扭转屈曲

对于组成船体梁横剖面的扶强材的弯扭屈曲，描述其载荷—端缩曲线σ_{CR2}—ε的方程由下式得出。

$$\sigma_{CR2}=\Phi\frac{A_{s-n50}\sigma_{c2}+A_{p-n50}\sigma_{CP}}{A_{s-n50}+A_{p-n50}}$$

式中：Φ——本附录[2.3.2]所定义的边缘函数

σ_{C2}——临界应力，N/mm^2，等于：

$$\sigma_{C2}=\frac{\sigma_{E2}}{\varepsilon} \quad \text{当}\sigma_{E2}\le\frac{R_{eH_S}}{2}\varepsilon\text{时}$$

$$\sigma_{C2}=R_{eH_S}\left(1-\frac{R_{eH_S}\varepsilon}{4\sigma_{E2}}\right) \quad \text{当}\sigma_{E2}>\frac{R_{eH_S}}{2}\varepsilon\text{时}$$

ε——本附录[2.3.2]定义的相对应变

σ_{E2}——扭转屈曲欧拉应力，N/mm^2，取本章附录 4 的[4.4.4]定义的σ_{ET}

σ_{CP}——带板屈曲应力，N/mm^2，等于

$$\sigma_{CP}=\left(\frac{2.25}{\beta_E}-\frac{1.25}{\beta_E^2}\right)R_{eH_P} \text{ 对于 } \beta_E>1.25$$

$$\sigma_{CP}=R_{eH_P} \text{对于 } \beta_E\le 1.25$$

β_E——本附录[2.3.3]定义的系数。

2.3.5 由折边型材制成的扶强材的腹板局部屈曲

对于组成船体梁横剖面的折边扶强材的腹板局部屈曲，描述其载荷—端缩曲线σ_{CR3}—ε的方程由下式得出：

$$\sigma_{CR3}=\Phi\frac{10^3 b_E t_{n50}R_{eH_P}+(h_{we}t_{n50}+b_f t_{f-n50})R_{eH_s}}{10^3 s t_{n50}+h_w t_{w-n50}+b_f t_{f-n50}}$$

式中： Φ——本附录[2.3.2]所定义的边缘函数

b_E——本附录[2.3.3]定义的船壳带板有效宽度，m

h_{we}——腹板有效高度，mm，等于

$$h_{we}=\left(\frac{2.25}{\beta_w}-\frac{1.25}{\beta_w^2}\right)h_w \text{ 对于 } \beta_w\geq 1.25$$

$$h_{we}=h_w \text{ 对于 } \beta_w<1.25$$

$$\beta_w=\frac{h_w}{t_{w-n50}}\sqrt{\frac{\varepsilon R_{eH_S}}{E}}$$

ε——本附录[2.3.2]定义的相对应变

2.3.6 扁钢制成的扶强材的腹板局部屈曲

对于组成船体梁横剖面的扁钢扶强材的腹板局部屈曲，描述其载荷—端缩曲线σ_{CR4}—ε的方程由下式得出。

$$\sigma_{CR4}=\Phi\frac{A_{p-n50}\sigma_{CP}+A_{s-n50}\sigma_4}{A_{p-n50}+A_{s-n50}}$$

式中： Φ——本附录[2.3.2]所定义的边缘函数

σ_{CP}——本附录[2.3.4]定义的带板屈曲应力，N/mm^2，

σ_{C4}——临界应力，N/mm^2，等于：

$$\sigma_{C4}=\frac{\sigma_{E4}}{\varepsilon} \qquad \text{当}\sigma_{E4}\leq\frac{R_{eH_S}}{2}\varepsilon$$

$$\sigma_{C4}=R_{eH_S}\left(1-\frac{R_{eH_S}\varepsilon}{4\sigma_{E4}}\right) \qquad \text{当}\sigma_{E4}>\frac{R_{eH_S}}{2}\varepsilon$$

σ_{E4}——局部屈曲欧拉应力，N/mm^2，等于：

$$\sigma_{E4}=160000\left(\frac{t_{w-n50}}{h_w}\right)^2$$

ε——本附录[2.3.2]定义的相对应变

2.3.7 板屈曲

对于组成船体梁横剖面的横向加筋板格的屈曲，描述其载荷—端缩曲线σ_{CR5}—ε的方程由下式得出：

$$\sigma_{CR5}=min\left\{\begin{matrix}R_{eH_P}\Phi\\ \Phi R_{eH_P}\left[\frac{s}{\ell}\left(\frac{2.25}{\beta_E}-\frac{1.25}{\beta_E^2}\right)+0.1\left(1-\frac{s}{\ell}\right)\left(1+\frac{1}{\beta_E^2}\right)^2\right]\end{matrix}\right.$$

式中： Φ——本附录[2.3.2]所定义的边缘函数

β_E——本附录[2.3.3]所定义的系数

s——板的宽度，m，取为扶强材间距

l——板的长边长度，m

3 替代方法

3.1 一般要求

3.1.1 当采用替代方法时，在计算开始前应取得 CCS 的许可。应将分析方法所基于的原理及详细的结果对比提交 CCS 审核。根据采用的方法，可能需要对分项安全系数进行校准。

3.1.2 弯矩曲率关系 M-χ可由其他方法建立。该模型应考虑对非线性响应具有重要影响的所有相关效应，包括：

（a） 几何非线性特性；

（b） 材料非弹性特性；

（c） 几何缺陷和残余应力（板材和加强筋的几何不平度）；

（d） 同步作用载荷：

- 双轴向受压；
- 双轴向拉伸；
- 剪切和侧向压力；

（e） 边界条件；

（f） 屈曲模式之间的相互作用；

（g） 结构构件（如板材、扶强材、桁材等）之间的相互作用；

（h） 后屈曲能力；

（i） 船体梁横剖面受压侧的过载单元可能导致板、扶强材等的局部永久屈曲破坏（双层底效应或类似情况）。

3.2 非线性有限元分析

3.2.1 高级非线性有限元分析可采用单跨模型或舱段模型用于船体梁极限弯曲能力的评估。模型应考虑与非线性响应相关的重要影响，并适当考虑本附录[3.1.2]所列各项。

3.2.2 对于几何缺陷的形状和尺度，在建模时应特别予以注意。应保证几何缺陷的形状和尺度能引发最严重的失效模式。

3.2.3 单跨模型的纵向范围取 1 个横向强框架间距，横向范围取整个船宽，垂向范围取整个型深，应包括所有纵向连续构件、肋骨以及局部加强筋。

3.2.4 舱段模型的纵向范围取 1 个货舱舱段长度，横向范围取整个船宽，垂向范围取整个型深，应包括所有纵向连续构件和除横舱壁、舱口间甲板以外的所有横向构件以及局部加强筋。

第 6 章　船体局部构件尺寸要求

第 1 节　一般规定

1 适用范围

1.1 应用

1.1.1 本章适用于全船范围的船体结构。

1.1.2 本章给出了承受侧向压力、局部载荷和船体梁载荷的板、骨材和主要支撑构件的要求，及与定义的设计载荷组无关的其他要求。

1.1.3 要求尺度

基于本章提供的尺度要求，净提供尺度应大于或等于要求尺度。

1.1.4 附加局部强度要求

本章给出了进水工况下的局部强度要求，及晃荡载荷、船首底部砰击载荷及舷侧冲击载荷下的附加局部强度要求。

1.2 验收衡准

1.2.1 基于设计载荷选择如下验收衡准组：

- AC-S 对于设计载荷 *S*；静载荷。
- AC-SD 对于设计载荷 *S*+*D*；静载荷和动载荷组合。

2 载荷组合

2.1 船体梁

2.1.1 船体梁应力

在所考虑位置处由作用的垂直和水平弯矩引起的正应力σ_{hg}，N/mm^2，如下所示。在计算该应力时应考虑[2.4]中定义的每一个设计载荷组，覆盖第 4 章定义的所有动载荷工况，并与中拱和中垂工况（如适用）的 M_{sw} 组合。

$$\sigma_{hg}=\left(\frac{M_{sw}+M_{wv-LC}}{I_{y-n50}}(z-z_n)-\frac{M_{wh-LC}}{I_{z-n50}}y\right)10^{-3}$$

式中：M_{sw}——根据第 4 章第 7 节表 2.1.1 的设计载荷设定，由第 4 章第 4 节 [2.3] 定义的中拱或中垂（视具体情况）静水弯矩，kNm。

$M_{wv\text{-}LC}$——在所考虑纵向位置处，根据第 4 章第 7 节表 2.1.1 的设计载荷设定，由第 4 章第 4 节 [3.5.2] 定义的所考虑动载荷工况的垂向波浪弯矩，kNm。

$M_{wh\text{-}LC}$——在所考虑纵向位置处，根据第 4 章第 7 节表 2.1.1 的设计载荷设定，由第 4 章第 4 节 [3.5.4] 定义的所考虑动载荷工况的水平波浪弯矩，kNm。

$I_{y\text{-}n50}$——所考虑纵向位置处的垂向船体梁净惯性矩，m^4。

$I_{z\text{-}n50}$——所考虑纵向位置处的水平船体梁净惯性矩，m^4。

y——载荷计算点的横向坐标，m。

z——所考虑载荷计算点的垂向坐标，m。

z_n——从基线到水平中和轴的距离，m。

1.1 2.2 侧向压力

2.2.1 完整工况下的静压力和动压力

应考虑由海水和各种类型的货物、压载水和其他液体引起的完整工况下的侧向静压力和侧向动压力。采用的载荷与所考虑构件的位置和相邻舱室类型相关。

2.2.2 进水工况下的侧向压力

不拟载运液体的舱室的水密边界（不包括外壳）进水工况下应承受侧向压力。如载运液体的舱室的溢流管高度低于干舷甲板，则仍需考虑进水工况下的侧向压力。

2.3 压力组合

2.3.1 外壳构件

若邻接外壳的舱室拟装载液体，所考虑的侧向静压力和侧向动压力为对应吃水的内部压力和外部海水压力之差。

若邻接外壳的舱室不拟装载液体，应分别单独考虑内部压力和外部海水压力。

2.3.2 非外壳构件

除[2.3.1]中所述，对于分隔两个相邻舱室的构件，作用于该构件的侧向静压力和动压力应是考虑这两个舱室分别单独被装载时的压力。

2.4 设计载荷组

2.4.1 载荷成分的应用：

（1）全船范围内的板和骨材。

（2）货舱区域外的主要支撑构件。

2.4.2 载荷成分

静载荷和动载荷成分应根据第 4 章第 7 节确定。

本节表 2.4.3 设计载荷组中所规定的装载工况对应的横摇回转半径 *kr* 和稳心高度 *GM* 应根据第 4 章第 3 节来确定。

2.4.3 板、骨材和主要支撑构件的设计载荷组

板、骨材和主要支撑构件的设计载荷组在表 2.4.3 中给出。

设计载荷组　　表 2.4.3

项　目	设计载荷组	载荷成分	吃水	设计载荷	装 载 工 况
外壳板和露天甲板	SEA-1	P_{ex} , P_D	T_{SC}	S+D	满载工况(1)
	SEA-2	P_{ex}	T_{SC}	S	在港工况(2)
压载水舱	WB-1	P_{in}– P_{ex}(3)	T_{BAL}	S+D	正常压载工况
	WB-2	P_{in}– P_{ex}(3)	T_{BAL}	S+D	正常压载工况 压载水交换
	WB-3	P_{in}– P_{ex}(3)	$0.25T_{SC}$	S	在港/试验工况
	WB-4	P_{in}– P_{ex}(3)	T_{BAL-H}(4)	S+D	最大压载工况
	WB-5	P_{in}– P_{ex}(3)	T_{BAL-H}(4)	S+D	最大压载工况 压载水交换
货舱	OC-1	P_{in}	T_{SC}	S+D	均匀轻货，满载
	OC-2	P_{in}	–	S	
	OC-3	P_{in}	T_{SC}	S+D	均匀重货，部分装载
	OC-4	P_{in}	–	S	
	OC-5(5)(6)	P_{in}	T_{SC}	S+D	均匀轻货，满载 进水工况
	OC-6(5)(6)	P_{in}	T_{SC}	S+D	均匀重货，部分装载

项　目	设计载荷组	载荷成分	吃水	设计载荷	装 载 工 况
					进水工况
	OC-7(5)(6)	P_{in}	–	S	进水工况
其他液舱（燃油舱，淡水舱）	TK-1	$P_{in}-P_{ex}$(3)	T_{BAL}	S+D	正常压载工况
	TK-2	$P_{in}-P_{ex}$(3)	$0.25T_{SC}$	S	在港/试验工况
不载运液体舱室（除货舱外）	FD-1(7)	P_{in}	T_{SC}	S+D	进水工况
	FD-2(7)	P_{in}	–	S	进水工况
露天甲板，内部甲板或平台	DL-1(8)	P_{dl} , F_U	T_{SC}	S+D	满载工况
	DL-2(8)	P_{dl} , F_U	–	S	在港工况

(1)满载工况指均匀重货。
(2)仅适用于外壳板。
(3)仅外壳板考虑 P_{ex}。
(4)使用最大压载工况中的最小吃水。
(5)仅货舱布置满足本章第 7 节 1.1 条件时适用。
(6)OC-5，OC-6 和 OC-7 不适用于分隔货舱的垂直槽形横舱壁的槽条。槽形横舱壁的进水工况要求在本章第 7 节中给出。当适用时，强力甲板应考虑 OC-5，OC-6 和 OC-7。
(7)FD -1 和 FD -2 不适用于外壳板。当适用时，强力甲板应考虑 FD-1 和 FD-2。
(8)仅考虑分布或集中载荷，不必与同时出现的上浪压力组合。

第 2 节　最小厚度

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

1 板

1.1 最小厚度要求

1.1.1 板的净厚度，mm，应符合表 1.1.1 中给出的适当的最小厚度要求。

板的最小净厚度　　表 1.1.1

构件	位　置	区　域	净 厚 度
外板	平板龙骨	–	$7.5+0.03L_2$
	船底板 舷侧外板 舭列板	艏部	$5.0+0.03L_2$
		机器处所、艉部	$4.5+0.03L_2$
		其他处所	$4.5+0.03L_2$
强胸框架		艏部	9.0
甲板	露天甲板，强力甲板，内部液舱边界	–	$4.0+0.02L_2$
	舱口间甲板	–	$3.0+0.02L_2$
	平台甲板	机器处所	$2.8+0.0067s$
		其他处所	6.5
内底板(1)	–	机器处所	$6.6+0.024L_2$
		其他处所	$1.5+0.03L_2$

构件	位　置	区　域	净 厚 度
纵舱壁	内壳纵舱壁	货舱区域	0.7 $L_2^{1/2}$-2.5
舱壁	内部液舱边界，水密横/纵舱壁	–	3.0+0.02 L_2
	非密性舱壁，制荡舱壁，干舱间舱壁	–	4.5+0.01 L_2
	首、尾尖舱的支柱舱壁	–	7.5
其他构件	底/顶凳内横隔板	–	5.0 + 0.015L_2
	机舱棚（位于货舱区域）	货舱区域	5.5
	机舱棚（位于居住舱室处）	居住舱室	4.0
	其他普通板	–	4.5+0.01 L_2
(1)适用于密性或非密性构件			

2 骨材和防倾肘板

2.1 最小厚度要求

2.1.1 骨材和防倾肘板腹板和面板的净厚度，mm，应符合表 2.1.1 中的最小净厚度。此外，骨材和防倾肘板腹板的净厚度，mm，应：

（1）不小于根据本章第 4 节确定的带板净要求厚度的 40%

（2）小于带板净提供厚度的 2 倍

骨材和防倾肘板的最小净厚度　　表 2.1.1

构　件	位　置	净 厚 度
骨材和连接的端部肘板	水密边界	3.0+0.015L_2
	其他结构	2.0+0.015L_2
防倾肘板		5.0+0.015L_2

3 主要支撑构件

3.1 最小厚度要求

3.1.1 主要支撑构件腹板和翼板的净厚度，mm，应符合表 3.1.1 中的最小净厚度。

主要支撑构件最小净厚度　　表 3.1.1

构　　件	位　　置	净 厚 度
双层底中纵桁	机器处所	1.55 $L_2^{1/3}$+3.5
	其他处所	5.5+0.025L_2
其它船底纵桁	机器处所	1.7 $L_2^{1/3}$+1.0
	艏部	0.7 $L_2^{1/2}$-0.5
	其他处所	5.5+0.02L_2
箱型龙骨边界桁材	机器处所	0.8 $L_2^{1/2}$+2.5
船底肋板	机器处所	1.7 $L_2^{1/3}$
	艏部	0.7 $L_2^{1/2}$-0.5
	其他处所	0.7 $L_2^{1/2}$-0.5

构　　件	位　　置		净 厚 度
货舱边舱强框架腹板	-		0.6 $L_2^{1/2}$-0.5
尾尖舱肋板	-		0.6 $L_2^{1/2}$-0.5
其它主要支撑构件	艉部/艏部		0.7 $L_2^{1/2}$-2.5
	其他处所	其他情况	0.6 $L_2^{1/2}$-1.5

第 3 节　板

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

α_p——板格边长比的修正因子，如下所示，但取不大于 1.0。

$$\alpha_p = 1.2 - \frac{b}{2.1a}$$

a——第 3 章第 6 节定义的板格长度，mm。

b——第 3 章第 6 节定义的板格宽度，mm。

P——按第 6 章第 1 节所考虑设计载荷组、在第 3 章第 6 节定义的载荷计算点处算得的设计压力，kN/m^2。

σ_{hg}——第 6 章第 1 节[2.1]定义的船体梁应力，N/mm^2，在第 3 章第 6 节定义的载荷计算点处算得。

χ——系数，取：

（1）完整工况

- χ=1.00

（2）进水工况

- χ=1.00　对于验收衡准组为 AC-S 时的防撞舱壁；
- χ=0.95　对于验收衡准组为 AC-SD 时的防撞舱壁；
- χ=1.15　对于其他舱室水密边界。

1 承受侧向压力的板

1.1 屈服校核

1.1.1 承受侧向压力的板净厚度 t，mm，应不小于本章第 1 节[2.4.3]中所有设计载荷组相应计算所得结果的最大值：

$$t = 0.0158\,\alpha_p\, b\sqrt{\frac{|P|}{\chi C_a R_{eH}}}$$

式中：

C_a——　板的许用弯曲应力系数，取：

$$C_a = \beta - \alpha\frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}$$，取不大于 $C_{a\text{-}max}$；

β——　表 1.1.1 中定义的系数；

α——　表 1.1.1 中定义的系数；

$C_{a\text{-}max}$——表 1.1.1 中定义的最大许用弯曲应力系数。

β、α和 $C_{a\text{-}max}$ 的定义 **表 1.1.1**

验收衡准组	结 构 构 件		β	α	$C_{a\text{-}max}$
AC-S	纵向强力构件	纵向加筋板	0.9	0.5	0.8
		横向加筋板	0.9	1.0	0.8
	其他构件		0.8	0	0.8
AC-SD	纵向强力构件	纵向加筋板	1.05	0.5	0.95
		横向加筋板	1.05	1.0	0.95
	其他构件		1.0	0	1.0

1.2 槽形舱壁板

1.2.1 冷/热成型和组合型槽条

槽形舱壁的腹板和翼板净厚度 t，mm，应不小于本章第 1 节[2.4.3]中定义的所有适用设计载荷组算得的最大值：

$$t = 0.0158 b_p \sqrt{\frac{|P|}{C_{CB} R_{eH}}}$$

式中：b_p——槽形板宽度：

$b_p = a$ 对于第 3 章第 5 节图 10.3.2 定义的翼板，mm；

$b_p = c$ 对于第 3 章第 5 节图 10.3.2 定义的腹板，mm。

C_{CB}——槽形舱壁板许用弯曲应力系数，取为：

- 对于验收衡准组为 AC-S 时的槽形横舱壁

C_{CB}=0.75

- 对于验收衡准组为 AC-SD 时的槽形横舱壁

C_{CB}=0.90

1.2.2 组合型槽条

对于组合型槽条，腹板与翼板厚度不同，净厚度 t_1，mm，应取为本章第 1 节[2.4.3]中定义的所有适用设计载荷组算得的最大值：

$$t_1 = \sqrt{\frac{0.0005 b_P{}^2 |P|}{C_{CB}\ R_{eH}} - t_2{}^2}$$

式中：t_1——翼板或腹板中较厚板的净厚度，mm；

t_2——翼板或腹板中较薄板的净厚度，mm；

b_P——翼板或腹板中较厚板宽度，mm；

C_{CB}—— [1.2.1] 中定义的许用弯曲应力系数。

2 特殊要求

2.1 龙骨板最小厚度

2.1.1 龙骨板的净厚度应不小于从龙骨板边缘量起的相邻 2m 宽船底板的净提供厚度。

龙骨板宽度在第 3 章第 5 节[7.1.5]中定义。

2.2 舭部板

2.2.1 舭部板一般系指船中 0.4*L* 区域在船底外壳和舷侧外壳间的曲线型板。圆形舭部板取为自船底处舭部曲线下缘至曲线的上缘，其他舭部板为自船底处曲线下缘至曲线的上缘或舷侧外板上位于基线以上 0.2*D*，取小者。

2.2.2 舭部板厚度

a) 舭部板的净厚度应不小于相邻的船底或相邻的舷侧板的净提供厚度，取其大者。

b) 圆弧形舭部板净厚度 *t*，mm，应不小于：

$$t = 6.45 \cdot 10^{-4} (P_{ex} s_b)^{0.4} R^{0.6}$$

式中：

P_{ex}——本章第 1 节[2.4.3]定义的设计载荷组 SEA-1 在舭部圆弧下缘计算所得的设计海水压力，kN/m^2；

R ——有效舭部半径，mm，$R = R_0 + 0.5(\Delta s_1 + \Delta s_2)$；

R_0 ——曲率半径，mm，见图 2.2.3；

Δs_1——舭部圆弧下缘与最外侧船底纵骨间的距离，mm，见图 2.2.3。当最外侧船底纵骨在舭部圆弧内时，此距离取为零；

Δs_2——舭部圆弧上缘与舷侧最下端纵骨间的距离，mm，见图 2.2.3。当舷侧最下端纵骨在舭部圆弧内时，此距离取为零；

s_b ——横向骨材、框架或舭部肘板间距离，mm。

c) 纵骨架式舭部板应作为规则的加筋板评估，舭部厚度不小于[1.1.1]和[2.2.2] b)得到的小者。舭龙骨不应作为有效的纵向加强构件考虑。

2.2.3 舭部最小板厚的横向延伸

当板缝线位于舷侧最下端纵骨下方的平板上时，若板缝线距舷侧最下端纵骨的距离不大于 s_2/4,则对于舭部板的任何要求增加的厚度不必延伸至舭列板之上相邻的板。同样地对于相邻的船底板平面部分，若板缝线距最外侧船底纵骨的距离不大于 s_1/4,则舭列板的任何增加的厚度不必延伸至相邻的板。s_1、s_2 的定义见图 2.2.3。

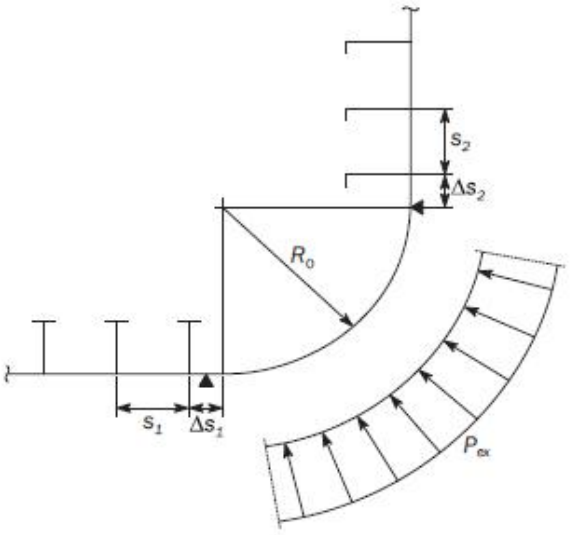


图 2.2.3 横向加筋舭列板

2.2.4 舭部区域的船体外壳骨架

对横骨架式舭部板，应在船底和舷侧靠近舭部圆弧起始的位置设置纵骨。这些纵骨的尺度应不小于最近相邻纵骨的尺度。舭部圆弧下缘与船底最外侧纵骨间的距离Δs_1，一般应不大于船底最外侧两根纵骨间距 s_1 的 1/3；同样地，舭部圆弧上缘与舷侧最下端纵骨间的距离Δs_2，一般应不大于舷侧最下端两根纵骨间距 s_2 的 1/3。见图 2.2.3。

2.3 舷侧板

2.3.1 护舷材接触区域

位于[2.3.2]规定的护舷材接触区域内的舷侧板净厚度 t，mm，应不小于：

$$t = 26\left(\frac{b}{1000} + 0.7\right)\left(\frac{BT_{SC}}{R_{eH}{}^2}\right)^{0.25}$$

2.3.2 护舷材接触区域要求的适用范围

本要求适用于货舱区域，从压载吃水 T_{BAL} 到吃水 T_{SC} 以上 $0.25T_{SC}$（最小 2.2m）。

2.4 舷顶列板

2.4.1 舷顶列板的最小宽度按第 3 章第 5 节[8.3]要求。

2.4.2 焊接的舷顶列板的净厚度应不小于相邻的 2m 宽舷侧板的净提供厚度。

2.4.3 圆弧舷顶列板的净厚度应不小于以下要求的较大者：

（1）相邻 2m 宽甲板板的净提供厚度，或者

（2）相邻 2m 宽舷侧板的净提供厚度。

2.5 甲板边板

2.5.1 甲板边板的最小宽度按第 3 章第 5 节[9.1.2]要求。

2.5.2 在船中 0.6L 区域内，甲板边板的净厚度应不小于相邻甲板板材的净提供厚度。

2.6 槽形舱壁处的支撑结构

2.6.1 第 3 章第 5 节[10.4]中给出的舱壁布置要求应与[2.6.2]至[2.6.4]一并考虑。

2.6.2 底凳

(1) 底凳顶板的净厚度应不小于相连槽形舱壁的要求厚度，其材料屈服强度应至少与相连槽形相同。顶板延伸到槽形外的范围应不小于槽形翼板的建造厚度。

(2) 从底凳顶板起一个槽形深度的范围内，底凳侧板净厚度应不小于底端处槽形舱壁的翼板净要求厚度，并且至少应有相同的材料屈服强度。如果结构可保证槽形腹板和底凳内支撑肘板间的连续性，做为替代，底凳内支撑肘板应与槽形腹板的每一个折角点对齐。底凳侧板净厚度可降低至底端处槽形舱壁翼板厚度的 90%

(3) 支撑肘板净厚度应不小于槽形舱壁腹板净要求厚度的 80%，并且至少应具有相同的材料屈服强度

(4) 支持肋板至少应与连接内底板的底凳侧板有相同的材料屈服强度。如底凳侧板为垂直型，支持肋板的净厚度还应不小于连接内底板的底凳侧板的净要求厚度（不包括抓斗要求）。若采用不同屈服强度的材料，则所要求的厚度通过两个材料系数 k（如第 3 章第 1 节[2.2.1]定义）的比率来调整。

(5) 设置槽形舱壁底凳时，在舱壁凳与内底板连接处，应特别注意贯穿厚度特性和强度连续性的布置。对于有规定贯穿厚度特性的板的要求，见第 3 章第 1 节[2.5] 。

2.6.3 顶凳

(1) 顶凳底板的净厚度不小于相连槽形舱壁的要求厚度，且至少有与相连槽形相同的材料屈服强度。底板延伸到槽形外的范围应不少于槽形舱壁翼板的建造厚度。

(2) 顶凳侧板下部净厚度应不小于以下的较大值：

- 按[1.1]得到的净厚度；
- 按以下要求的舱壁上部净厚度的 80%：
  - [1.2] ；
  - 当采用相同材料时，根据适用情况，第 6 章第 7 节。

若使用不同屈服强度的材料，要求厚度应根据第 3 章第 1 节[2.2.1]定义的二者材料系数 k 的比值做调整。

2.6.4 未设底凳的槽形舱壁处的局部支持结构

(1) 槽形舱壁处支持肋板和管隧横梁的净厚度应不小于槽形舱壁翼板净要求厚度，且至少有相同的材料屈服强度。槽形处的内底与底边舱斜板至少有与相连槽形相同的材料屈服强度，且除非材料的贯穿厚度特性说明文件已提交批准，否则应使用第 3 章第 1 节[2.5.1]定义的 Z 级钢。

(2) 与槽形腹板对齐布置的肘板/短纵梁的深度应不小于 0.5 倍槽形深度并且净厚度不小于槽形舱壁腹板净厚度的 80％，至少应具有相同的材料屈服强度。在由有卸货板的封槽板，而非肘板/短纵梁提供支撑处，第 6 章第 7 节图 2.3.4（1）中的封槽板高度 h_G 至少等于槽形深度。封槽板应安装在槽形翼板间并与其对齐。封槽板与卸货板的净厚度应分别不小于 100％和 80%的槽形翼板厚度，并且至少应具有相同的材料屈服强度。

2.7 尾尖舱壁

2.7.1 尾轴穿透处的尾尖舱舱壁板净厚度应至少为舱壁板要求厚度的 1.6 倍。

第 4 节 骨　　材

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节

d_{shr} —— 有效剪切高度，mm，定义见第 3 章第 6 节

l_{bdg} —— 有效弯曲跨距，m，定义见第 3 章第 6 节

l_{shr} —— 有效剪切跨距，m，定义见第 3 章第 6 节

P —— 本章第 2 节定义的设计载荷组的设计压力，kN/m^2，在第 3 章第 6 节的载荷计算点处计算

χ —— 系数取为：

（1）完整工况下：

- χ=0.90，对于货舱内的内底板上的骨材；
- χ=1.00，对于其他情况。

（2）进水工况下：

- 对进水工况χ如本章第 3 节的定义。

1 承受侧向压力的骨材

1.1 屈服校核

1.1.1 腹板

腹板最小净厚度 t_w，mm，应不小于本章第 1 节[2.4.3]所定义的所有适用设计载荷组计算得到的最大值：

$$t_w = \frac{f_{shr}|P|sl_{shr}}{d_{shr}\chi C_t \tau_{eH}}$$，且 χC_t 取不大于 1.0

式中： f_{shr}——剪力分布因子：

对于端部固定的连续骨材，f_{shr} 不得小于：

f_{shr}=0.5，对于水平骨材和垂直骨材的上端；

f_{shr}=0.7，对于垂直骨材的下端。

对减弱端部约束、可变载荷或者作为板架的一部分的骨材，按[1.2]的要求执行；

C_t——所考虑设计载荷组的许用剪应力系数，取为：

C_t=0.75，对于验收衡准 AC-S；

C_t=0.90，对于验收衡准 AC-SD。

1.1.2 剖面模数

最小净剖面模数 Z，cm³，应不小于本章第 1 节[2.4.3]所定义的所有适用设计载荷组计算得到的最大值：

$$Z = \frac{|P|sl_{bdg}^2}{f_{bdg}\chi C_s R_{eH}}$$，且 χC_s 取不大于 1.0

式中： f_{bdg}——弯矩因子：

对于端部固定的连续骨材，f_{bdg} 不得大于：

f_{bdg}=12，对于水平骨材和垂直骨材的上端；

f_{bdg}=10，对于垂直骨材的下端；

端部约束减弱、载荷变化或者作为板架的一部分的骨材，按[1.2]的要求执行；

C_s——所考虑设计载荷组的许用弯曲应力系数，如表 1.1.2(1)定义；

σ_{hg}——第 6 章第 1 节[2.1]定义的船体梁应力，N/mm²，在第 3 章第 6 节所定义的载荷计算点处计算；

β_s——表 1.1.2(2)所定义的系数；

α_s——表 1.1.2(2)所定义的系数；

$C_{s\text{-}max}$——表 1.1.2(2)所定义的系数。

C_s 的定义 **表 1.1.2(1)**

船体梁弯曲应力σ_{hg}符号	侧向压力作用在	系数 C_s
拉（正）	骨材一侧	$C_s = \beta_s - \alpha_s \frac{\lvert\sigma_{hg}\rvert}{R_{eH}}$ 但取不大于 $C_{s\text{-}max}$
压（负）	板一侧	
拉（正）	板一侧	$C_s = C_{s-max}$
压（负）	骨材一侧	

β_s，α_s 和 $C_{s\text{-}max}$ 的定义 **表 1.1.2(2)**

验收衡准	结构构件	β_s	α_s	$C_{s\text{-}max}$
AC-S	纵向构件	0.85	1.0	0.75
	横向或垂向构件	0.75	0	0.75
AC-SD	纵向构件	1.0	1.0	0.9
	横向或垂向构件	0.9	0	0.9

1.1.3 骨材组

基于[1.1.1]和[1.1.2]的要求，可将一块加筋板上相同尺度顺序排列的骨材作为一组来决定骨材的尺度。骨材组的尺度取以下的大者：

（1）组内所有骨材要求尺度的平均值；

（2）组内任一骨材最大要求尺度的 90%。

1.1.4 不同材料的板和骨材

当骨材的最小屈服强度超过带板的最小屈服强度 35%时，需满足以下衡准：

$$R_{eH-S} \le \left(R_{eH-P} - \frac{\alpha_S |\sigma_{hg}|}{\beta_S} \right) \frac{Z_P}{Z} + \frac{\alpha_S |\sigma_{hg}|}{\beta_S}$$

式中： R_{eH-S}——骨材材料的最小屈服强度，N/mm^2；

R_{eH-P}——带板材料的最小屈服强度，N/mm^2；

σ_{hg}——船体梁弯曲应力，N/mm^2，如本章第 1 节[2.1]定义，σ_{hg} 的绝对值取不小于 0.4 R_{eH-P}；

Z——骨材面板或自由边处的净剖面模数，cm^3；

Z_P——骨材带板处的净剖面模数，cm^3；

α_s, β_s——表 1.1.2(2)所定义的系数。

1.2 梁系分析

1.2.1 直接分析

如骨材端部端部约束减弱，载荷变化或者作为板架一部分，则其在净尺度特性下的最大弯曲正应力σ和剪应力τ由直接计算确定，计及：

（1）静态和动态压力及力的分布（如有时）；

（2）中间支撑的数量和位置（例如甲板、桁材等）；

（3）骨材端部和中间支撑的约束条件；

（4）中间跨距的骨材几何特性。

1.2.2 应力衡准

应力需满足以下衡准，其中系数 C_t 和 C_s 如[1.1.1]和[1.1.2]定义。

$$\tau \le \chi C_t \tau_{eH}$$

$$\sigma \le \chi C_s R_{eH}$$

第 5 节　主要支撑构件和支柱、横撑材

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节

P —— 本章第 1 节[2.4.3]定义的设计载荷组相应的设计压力，kN/m^2，在第 3 章第 6 节定义的载荷计算点处计算

l_{bdg} —— 有效弯曲跨距，m，定义见第 3 章第 6 节

l_{shr} —— 有效剪切跨距，m，定义见第 3 章第 6 节

χ —— 系数，见本章第 3 节的定义。

1 应用

1.1 适用范围

本节要求适用于承受侧向压力和集中载荷的主要支撑构件以及承受轴向压缩载荷的支柱、横撑材。承受特定载荷的构件也应进行屈服校核。

1.2 设计载荷组

横撑材评估所用的设计载荷组如表 1.2 所示。

横撑材评估设计载荷组　　表 1.2

构件	设计载荷组	载荷分量	吃水	设计载荷	装载工况
横撑材	OC-1	$\frac{P_{in}+P_{ex}}{2}$	T_{sc}	S+D	均匀轻货，货舱满载，边舱空舱
	OC-2	$\frac{P_{in}+P_{ex}}{2}$	T_{sc}	S	
	OC-3	$\frac{P_{in}+P_{ex}}{2}$	T_{sc}	S+D	均匀重货，货舱部分装载，边舱空舱
	OC-4	$\frac{P_{in}+P_{ex}}{2}$	T_{sc}	S	

2 货舱区域的主要支撑构件

2.1 一般规定

2.1.1 货舱区域的主要支撑构件尺度应经有限元结构分析验证。

2.2 双层底纵桁

2.2.1 对于货舱区双层底的中桁材的净厚度 t 应不小于：

$$t = f_{db}\left(0.0077h_0 + 2.5\right)\sqrt{K}\ \text{mm}$$

非水密旁桁材的净厚度 t 应不小于按下式计算所得之值：

$$t = f_{db}\left(0.0077h_0 - 2\right)\sqrt{K}\ \text{mm}$$

水密旁纵桁净厚度较上式计算所得之值增厚 1mm。

式中：

f_{db}——双层底高度修正系数，$f_{db}= h_0/h_a$，但取不小于 0.85；

h_0——双层底计算高度，mm，h_0=25B_e+42T_{sc}+300，且取不小于 760mm；

B_e——在 D/2 处舷侧外板与纵舱壁中点之间的距离，m，B_e 的取值应不小于 0.8B；

h_a——双层底实际高度，mm。

3 货舱区域外的主要支撑构件

3.1 应用

3.1.1 本条要求适用于首部、尾部和机舱承受侧向压力的主要支撑构件。

3.2 尺度要求

3.2.1 净剖面模数

承受侧向压力的主要支承构件的净剖面模数 Z_{n50}，cm^3，应不小于本章第 1 节[2.4.3]所定义的所有适用设计载荷组下的最大值，由下式给出：

$$Z_{n50}=1000\frac{|P|Sl_{bdg}{}^{2}}{\chi f_{bdg}C_sR_{eH}}$$

式中： f_{bdg}——表 3.2.2(2)所定义的弯矩分布系数；

C_s ——表 3.2.2(1)所定义的验收衡准组对应的许用弯曲应力系数。

3.2.2 净剪切面积

承受侧向压力的主要支撑构件的净剪切面积 $A_{shr\text{-}n50}$，cm^2，应不小于本章第 1 节[2.4.3]所定义的所有适用设计载荷组下的最大值，由下式给出：

$$A_{shr-n50}=10\frac{f_{shr}|P|Sl_{shr}}{\chi C_t\tau_{eH}}$$

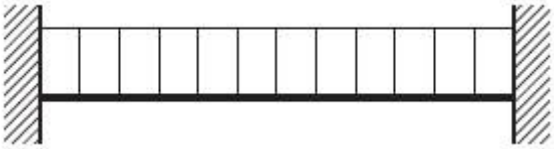
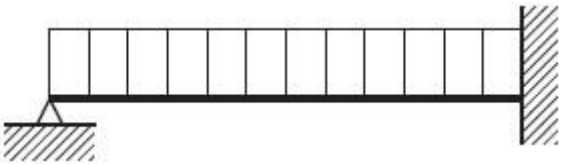
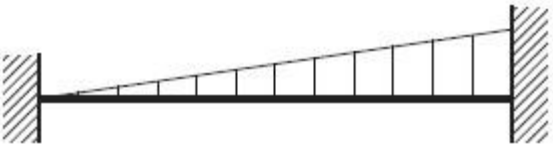
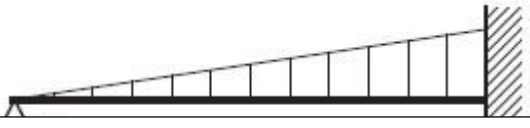
式中： f_{shr}——表 3.2.2(2)所定义的剪力分布系数；

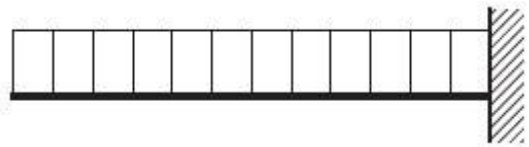
C_t ——表 3.2.2(1)所定义的验收衡准组对应的许用剪应力系数。

主要支撑构件的许用弯曲和剪切应力系数 表 3.2.2(1)

验收衡准组	主要支撑构件所支撑的结构	C_s 和 C_t
AC-S	所有边界，包括甲板和平台	0.70
AC-SD	所有边界，包括甲板和平台	0.85

弯矩和剪力系数 f_{bdg} 和 f_{shr} 表 3.2.2(2)

载荷和边界条件				弯曲和剪力分布系数（当载荷变化时，基于跨距中点的载荷）		
位置				1	2	3
载荷模型	1 支撑	2 力场	3 支撑	f_{bdg1} f_{shr1}	f_{bdg2} -	f_{bdg3} f_{shr3}
A				12.0 0.50	24.0 -	12.0 0.50
B				- 0.38	14.2 -	8.0 0.63
C				- 0.50	8.0 -	- 0.50
D				15.0 0.30	23.3 -	10.0 0.70
E				- 0.20	16.8 -	7.5 0.80

F		- -	- -	2.0 1.0

说明：1. 结构支撑点的弯矩分布系数 f_{bdg} 适用于距主要支承构件有效弯曲跨距端 $0.2l_{bdg}$ 距离内；

2. 结构支撑点的剪力分布系数 f_{shr} 适用于距主要支承构件有效剪切跨距端 $0.2l_{shr}$ 距离内；

3. f_{bdg} 和 f_{shr} 的应用：

(1)距有效跨距端部 $0.2l_{bdg}$ 范围内的剖面模数要求应采用 f_{bdg1} 和 f_{bdg3} 来确定，但 f_{bdg} 取不大于 12；

(2)跨中范围的剖面模数应采用 f_{bdg}=24 或者表中 f_{bdg2} 来确定，取较小者；

(3)距有效跨距端部 $0.2l_{shr}$ 范围内的端部连接的剪切面积要求应采用 f_{shr}=0.5 或者适用的 f_{shr1} 或 f_{shr3} 的较大者确定；

(4)从模型 A 到模型 F，f_{shr} 的值在 $0.2l_{shr}$ 外逐渐向跨距中点处的 $0.5f_{shr}$ 减小，其中 f_{shr} 取 f_{shr1} 和 f_{shr3} 的较大值。

3.3 直接计算强度评估

3.3.1 直接计算

当主要支撑构件组成较为复杂的交叉系统时，其尺度可通过直接计算确定，计算时应考虑如下方面：

（1）静水以及波浪压力和集中力（如有时）；

（2）中间支撑点的数量和位置（如甲板、纵桁等）；

（3）在主要支撑构件的端部和中部的约束程度；

（4）主要支撑构件跨距中部的几何特性。

3.3.2 评估衡准

直接计算评估衡准应满足如下要求，其中 C_t 和 C_s 的定义见本节[3.2]：

$$\sigma \le \chi C_s R_{eH}$$

$$\tau \le \chi C_t \tau_{eH}$$

式中：

σ——基于 t_{n50} 得到的正应力，N/mm^2；

τ——基于 t_{n50} 得到的剪应力，N/mm^2。

4 支柱

4.1 承受轴向压缩载荷的支柱

4.1.1 支柱承受的最大轴向压缩载荷 F_{pill}，kN，应取本章第 1 节[2.4.3]所定义的所有适用设计载荷组计算得到的最大值，并按下式给出：

$$F_{pill} = Pb_{a\text{-}sup} l_{a\text{-}sup} + F_{pill\text{-}upr}$$

式中： $b_{a\text{-}sup}$——支撑区域的平均宽度，m；

$l_{a\text{-}sup}$——支撑区域的平均长度，m；

$F_{pill\text{-}upr}$——支柱及来自上方支柱（如有时）的轴向载荷，kN；

$A_{pill\text{-}n50}$——支柱的净剖面面积，cm^2。

支柱应按第 9 章第 3 节[3.4]的要求进行屈曲校核，其中σ_{av} 按下式得到，N/mm^2：

$$\sigma_{av} = 10\frac{F_{pill}}{A_{pill-n50}}$$

4.2 承受轴向拉伸载荷的支柱

4.2.1 承受轴向拉伸载荷的支柱和主要支撑构件应满足[3.3.2]的衡准。

5 横撑材

5.1 最大设计轴向载荷

5.1.1 横撑材所承受的最大设计轴向载荷 W_{ct} 应小于或等于下列公式给出的许用载荷 $W_{ct\text{-}perm}$：

$$W_{ct} \leqslant W_{ct\text{-}perm}$$

式中：W_{ct}——承受的轴向载荷，kN：

$$W_{ct} = Pb_{ct}S$$

$W_{ct\text{-}perm}$——许用载荷，kN：

$$W_{ct\text{-}perm} = 0.12\, A_{ct\text{-}n50}\, \eta_{all}\, \sigma_{cr}$$

P——在表 1.2 中所考虑所有适用设计载荷组的最大设计压力，货舱中部横撑材支撑面积的中点处计算，kN/m^2；

b_{ct}——跨距，m，取为：

- b_{ct} = 0.5 $l_{bdg\text{-}vw}$ 对货舱的设计货物压力；
- b_{ct} = 0.5 $l_{bdg\text{-}st}$ 对设计海水压力；

$l_{bdg\text{-}vw}$——纵舱壁垂直桁的垂向有效弯曲跨距，m，见第 3 章第 6 节定义和图 5.1.1（1）、（2）；

$l_{bdg\text{-}st}$——舷侧垂直桁的垂向有效弯曲跨距，m，见第 3 章第 6 节定义和图 5.1.1（1）、（2）；

η_{all}——许用屈曲利用因子，见第 9 章第 1 节 [3.1.1] 定义；

σ_{cr}——根据第 9 章第 5 节[6.1.1] 的净剖面特性计算的横撑材压缩临界屈曲应力，N/mm^2；

$A_{ct\text{-}n50}$——横撑材横剖面净面积，cm^2。

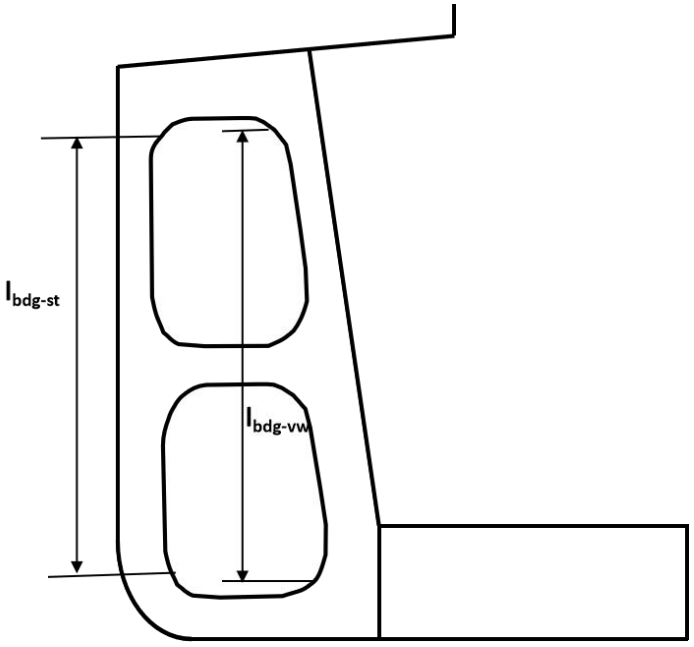


图 5.1.1（1）舷侧垂直桁和纵舱壁垂直桁有效跨距（一道横撑）

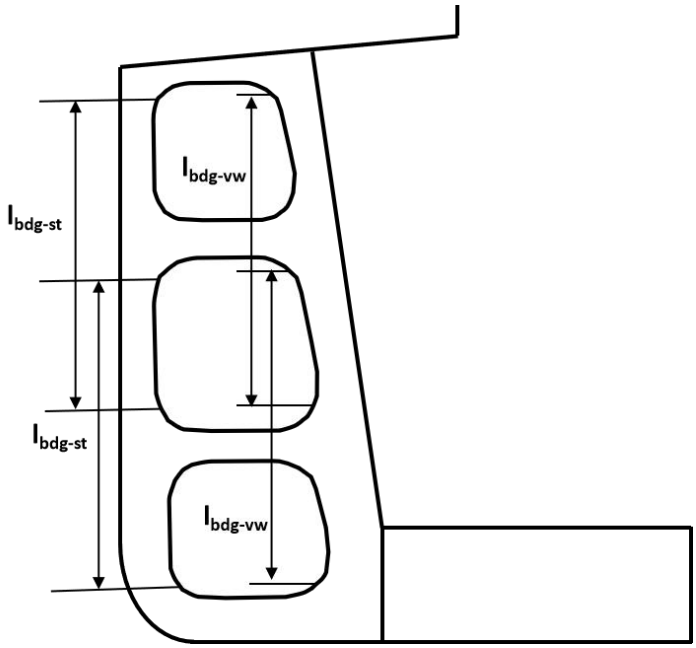


图 5.1.1（2）舷侧垂直桁和纵舱壁垂直桁有效跨距（两道横撑）

5.2 焊接连接

5.2.1 应重视焊接连接保证受力传递，并且要重视加强结构的布置，以保证压力有效地向腹板传递。

5.2.2 对横撑材端部肘板的趾部焊接应特别注意。

5.3 水平骨材

5.3.1 横撑材一般应在垂向腹板上下居中位置设水平骨材，使得横撑材结构上下对称。

5.3.2 水平骨材应与横撑材端部的纵骨对齐并连接。

第 6 节　首部、机器处所、尾部

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

1 首部

1.1 一般要求

1.1.1 适用范围

本条要求适用于首尖舱结构、首柱以及承受冲击载荷的结构，包括：

（1）船底前端平坦区域，见本章第 8 节[3.2]；

（2）首部区域，见本章第 8 节[3.3]。

1.2 结构布置

1.2.1 肋板和船底桁材

(1) 肋板

对于横骨架式结构，应每档强框架处设置实肋板。

对于纵骨架式结构，实肋板间距应不大于 3.5m 或 4 个肋骨间距，取小者。

在中线处的肋板最小高度应不小于最前货舱双层底要求的高度。见第 2 章第 3 节

(2) 船底纵桁

应通过将中桁材延伸至船首或提供高腹板桁材或中纵舱壁的方式，在中心线处提供支撑结构。

如果设置中桁材，其最小高度和厚度不得小于相邻货舱区域双层底的高度要求，且上端边缘应加强。

对于横骨架式结构，船底纵桁间距不超过 2.5m。

对于纵骨架式结构，船底纵桁间距不超过 3.5m。

(3) 替代设计验证

如果设计者通过板架分析或有限元分析对船底结构进行验证并提交所有文档，(1)和(2)中定义的间距可以增加。验收衡准的定义见本章第 5 节[3.3]。

1.2.2 制荡舱壁

如果设置中纵制荡舱壁，最底部列板的厚度不得小于中纵桁的要求。

在纵向制荡舱壁支撑底部横梁时，舱壁上开孔的细节和布置应避免在制荡舱壁与底部横梁连接位置出现高应力区。

1.2.3 舷侧外壳支撑结构

(1) 强框架

强框架间距 S，单位 m，应取为：

$$S = 2.6 + 0.005L$$，但不得大于 3.5m。

应设置开孔平台以限制强框架有效跨距不超过 10m。

(2) 水平桁

位于防撞舱壁水平桁材之前的横向骨架的间距应近似取为 3.5m。水平桁材的有效跨距不得超过 10m，且应得到强框架结构的充分支撑。

(3) 替代设计验证

如果设计者通过梁分析或有限元分析对舷侧支撑结构进行验证并提交所有文档，强框架和水平桁的间距可以增加。验收衡准的定义见本章第 5 节[3.3]。

1.2.4 防倾肘板

对于防撞舱壁以及垂直框架之前的舷侧外壳和液舱周界，在主要支撑构件，甲板和/或平台之间应按图 1.2.4 设置间距不超过 2.6m 的防倾肘板。

防倾肘板的建造厚度应不小于所连接的舷侧肋骨腹板的建造厚度。

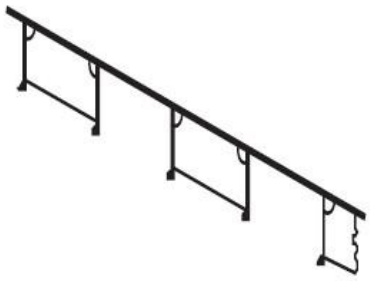


图 1.2.4 防倾肘板

1.2.5 球鼻首

(1) 如果设置球鼻首，则结构布置应确保球鼻得到足够支撑且与首尖舱结构相连接。

(2) 在球鼻的前端，结构通常通过与中心线高腹板相连的间距大约为 1m 的水平隔板进行支撑。通常，从尖舱框架到球鼻骨架的过渡区域应布置垂直横向隔板。

(3) 对于宽球鼻，通常应安装中线制荡舱壁进行额外加强；对于长球鼻，应安装横向制荡舱壁或强框架进行额外加强。

2 机器处所

2.1 一般要求

2.1.1 本条适用于位于机器处所结构的尺寸和布置。

2.2 机器处所布置

2.2.1 结构布置

(1) 当机器处所的甲板/舱壁上有开孔时，结构布置应确保甲板、舷侧和底部结构的支撑。

(2) 机器和轴等所有部件应有足够支撑，将所受载荷分散到船舶结构上，附近的结构也应适当加强。

(3) 主要支撑构件的位置应充分考虑骨材贯穿以及支柱支撑的同轴性，以形成有效的结构设计。

(4) 横骨架式机器处所的强框架间距通常不得超过横向骨架间距的 5 倍。强框架上下两端应与足够刚度的构件相连，并得到甲板强横梁的支撑。

(5) 舷侧纵骨在横舱壁处的端部连接应进行固定和侧向支撑，当其不连续时要安装软趾肘板。不得设置与纵骨搭接的肘板。

(6) 如果采用横骨架式，则应采用与支柱或支柱舱壁相连的纵向桁材的合适布置对甲板骨材进行支撑，若设置甲板强横梁，则其布置应与强框架对齐，以提供端部固定以及强度的横向连续性。

如果采用纵骨架式，则应采用与支柱或支柱舱壁相连的甲板强横梁对甲板纵骨进行支撑。

(7) 机舱棚应通过与支柱或支柱舱壁相连的甲板强横梁及纵向桁材的合适布置进行支撑。如果机舱棚的开孔很大，则可要求使用横撑材。这些布置都应与甲板强横梁对齐。

(8) 主推进装置、减速齿轮箱、轴和推力轴承的基座以及支撑这些基座的结构，应在所有预期载荷条件下保持对中性和刚度。应考虑提交下列图纸给机器制造商以供审核：

（a） 主推进装置的基座；

（b） 减速齿轮箱的基座；

（c） 推力轴承的基座；

（d） 支撑 （a)、（b）和（c）项的结构。

2.2.2 双层底

(1) 双层底高度

不论机器处所的位置，中线处的双层底高度应不小于第 2 章第 3 节定义的值。根据主机基座的类型和高度，双层底高度可能需要大幅度增加。

如果机器处所内的双层底高度与邻近处所的双层底高度不同，纵向构件的结构连续性应通过在适当的纵向范围倾斜内底来予以确保。倾斜的内底中的折角应位于肋板处。若双层底结构总强度不削弱，则局部区域的双层底高度可以适当减小。

(2) 中桁材

双层底应安装中纵桁。仅在双层底通道和维护保养所绝对需要的情况下才允许中桁材上有作人孔的开口，且在开口处应布置局部加强。

(3) 船底旁桁材

机器处所内，就相邻区域而言，应适当增加船底旁桁材的数量以确保结构的足够刚度。纵向加强双层底的船底旁桁材应是邻近机器处所的区域内任何船底纵骨的连续，其间距一般不大于纵骨间距的 3 倍且应不大于 3m。

(4) 机器基座处的旁桁材

机器基座处应设有附加船底旁桁材。

(5) 纵骨架式双层底中的肋板

对于纵向加强的双层底，应在主机和推力轴承下每个肋位上设置肋板。主机和轴承基座以外的位置，可隔档设置肋板。

(6) 横骨架式双层底中的肋板

如果机器处所双层底为横向加强，应在每个肋位设置肋板。

(7) 人孔和阱

基座和相邻区域的肋板上的人孔数量和尺寸应保持在双层底通道和维护保养所需要的最小值。

通常，人孔边缘应采用翼板加强；若此要求不能满足，肋板应采用扁钢在人孔边缘适当加强。

带有穿孔活动板的人孔应设在靠近机舱后舱壁阱附近的内底。

位于管弄后端的阱应布置管弄的排水系统。

(8) 内底板

当主机或推力轴承直接通过螺栓固定在内底时，内底板的净厚度应至少为 19mm。地脚螺栓的布置应尽可能靠近肋板和纵向桁材。板厚和地脚螺栓的布置也要考虑制造商的建议。

(9) 重型设备

如果重型设备直接安置在内底，则应相应增加肋板和桁材的厚度。

2.3 机器基座

2.3.1 一般要求

(1) 主机和推力轴承应通过基座有效固定在船体结构上，基座应具备足够强度承受变化的重力、推力、扭力、动力以及振动力。

(2) 如果是大功率内燃机或涡轮机装置，其基座通常为双层底结构的一部分。主机基座板或涡轮机齿轮箱以及推力轴承处的内底板材厚度应得到实质性加强，见图 2.3.1(1)。

(3) 如果主机是由图 2.3.1(2)中的类型 2 基座进行支撑，从主机传递到相连结构的力尽可能均匀地分布。支撑基座的纵向构件应与双层底的桁材对齐，且横向加强应与肋板对齐，见图 2.3.1(2)。

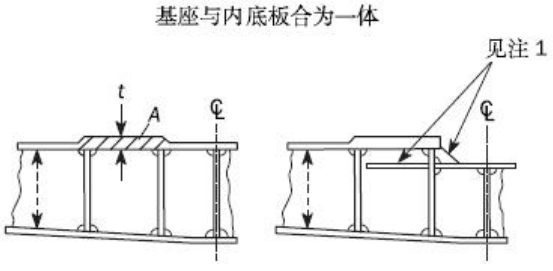


图 2.3.1(1) 基座类型 1

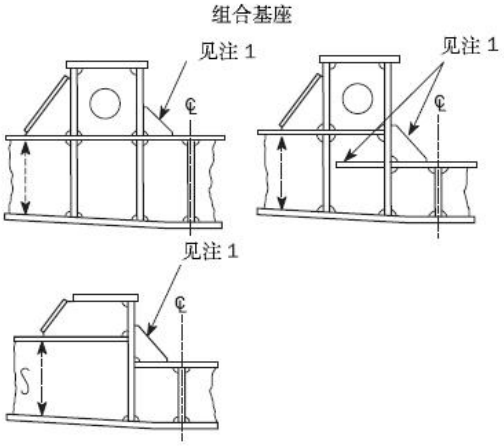


图 2.3.1(2) 基座类型 2

注 1：肘板应尽可能大。根据机器制造商的建议，可以免设肘板以避免与机器基座桁材的冲突。

2.3.2 内燃机和推力轴承的基座

在确定内燃机和推力轴承的基座尺度时，应考虑主机整体刚度以及其平衡力以外的设计特征。通常在内燃机和推进轴承的基座处应安装两根桁材。

2.3.3 辅机基座

辅机应固定在基座上，基座应有合适的大小和布置以将机器的载荷均匀分布到支撑结构中。

3 尾部

3.1 一般要求

3.1.1 适用范围

本条要求适用于尾尖舱舱壁向船尾方向的结构尺寸和布置。

3.2 尾尖舱

3.2.1 结构布置

(1) 肋板

肋板应设置在艉尖舱每一肋位上并至少达到尾轴管之上的高度。如果肋板没有延伸至平台或甲板，其上端应用翼板进行加强。

重型肋板板材应安装在挂舵臂的后面并与挂舵臂的腹板对齐。有可能要求其延伸到第一甲板或平台。应将该区域内的切口、扇形孔或其他开孔减至最少。

(2) 平台和舷侧纵桁

尖舱内的平台和舷侧纵桁的布置应与前方紧邻区域内的平台和舷侧纵桁对齐。

如果由于船体形状和通道需要而使这种布置不可能，则应采用宽过渡肘板确保尖舱和前方紧邻区域结构之间的结构连续性。

如果艉尖舱邻接具有纵骨架式舷侧的机器处所，艉尖舱内应设置具有过渡肘板的舷侧纵桁。

如果尖舱顶部至露天甲板的高度大于 3.5m 且舷侧为横骨架式，应设有一个或一个以上舷侧纵桁，最好与前方的相似结构对齐。

(3) 纵舱壁

在船舶中线上应设有非密性纵舱壁，一般在尖舱的上部并在每档肋位处予以加强。

如果船尾外伸部分很大或由水密和制荡舱壁分隔的处所的最大宽度大于 20m，可要求额外的纵向制荡舱壁。

(4) 替代设计验证

如果设计者采用板架分析或有限元分析进行验证并提交所有文档，(1)、(2)和(3)所定义的间距可以增加。验证准则的定义见本章第 5 节[3.3]。

3.2.2 尾尖舱内肋板和桁材的加强

(1) 肋板和桁材的骨材的高度 h_{stf} 不得小于：

$$h_{stf} = 80 l_{stf} \quad \text{对于扁钢骨材}$$

$$h_{stf} = 70 l_{stf} \quad \text{对于球扁钢和有翼板的骨材}$$

式中：

l_{stf}——图 3.2.2 中所示的骨材长度，m，取不大于 5m。

(2) 艉尖舱压载舱或淡水舱内位于螺旋桨以上的肋板和桁材的骨材应设置端部肘板。这也适用位于纵向延伸介于舵柱前缘和螺旋桨桨毂后端，横向在螺旋桨直径以内的区域内的骨材。端部肘板按以下要求设置：

- $l_{stf\text{-}t}$ 超过 4m 时，上下两端应设置端部肘板；
- $l_{stf\text{-}t}$ 超过 2.5m 时，下端应设置端部肘板。

其中：

$l_{stf\text{-}t}$——如图 3.2.2 所示的骨材总长度，m。

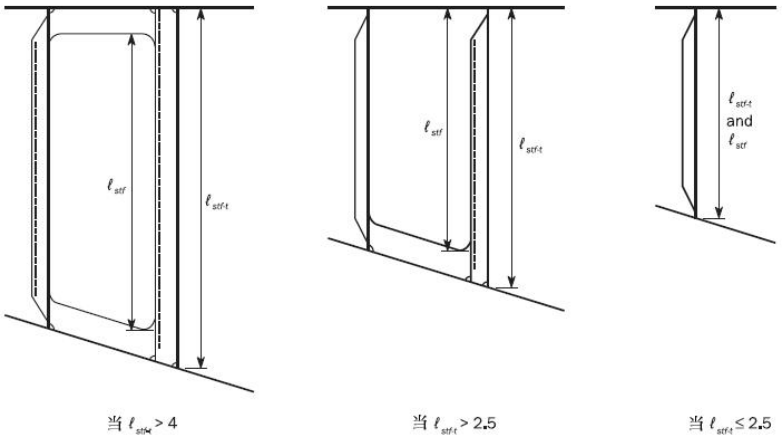


图3.2.2 艉尖舱内肋板和桁材的加强

3.3 尾框架

3.3.1 一般要求

(1) 尾框架可以用组合钢板或具有空心剖面的铸钢制成。适用材料的规格和钢材等级见第 3 章第 1 节。其他材料或构造的尾框架要特殊考虑。

(2)铸钢和组合的尾框架应由适当间隔的水平板加强。铸造时应避免剖面的突然变化；所有剖面应有适当的过渡半径。

(3) 在螺旋桨框架上部，若船形丰满并有中心支撑，尾框架厚度可以折减到 3.3.2(1)要求厚度的 80%。

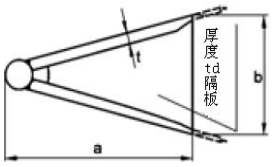
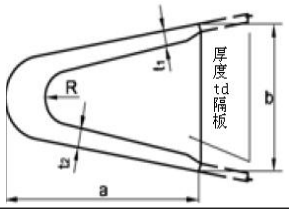
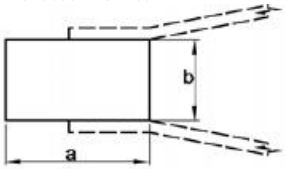
3.3.2 螺旋桨柱

(1) 螺旋桨柱的总尺寸

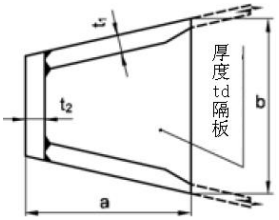
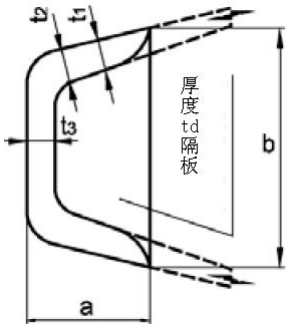
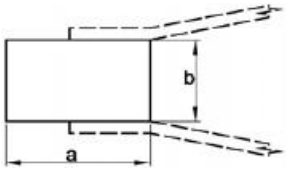
单螺旋桨船和双螺旋桨船的螺旋桨柱的总尺度应分别不小于按表 3.3.2(1)和表 3.3.2(2)中公式算得的值。

若螺旋桨柱剖面对其纵轴的剖面模数不小于用表 3.3.2(1)和表 3.3.2(2)，如适用，中的螺旋桨柱尺寸计算的值，可考虑接受与表 3.2.2(1)和表 3.2.2(2)不同的螺旋桨柱的尺寸和比例。

单螺旋桨船 – 螺旋桨柱的总尺度 表 3.3.2(1)

螺旋桨柱的总尺寸 mm	组合的螺旋桨柱	铸造的螺旋桨柱	方形螺旋桨柱，铸造或锻造，且具有矩形剖面
			
a	50 $L_1^{1/2}$	33 $L_1^{1/2}$	$10\sqrt{7.2L-256}$
b	35 $L_1^{1/2}$	23 $L_1^{1/2}$	$10\sqrt{4.6L-164}$
t_1	2.5 $L_1^{1/2}$	3.2 $L_1^{1/2}$	-
t_2	-	4.4 $L_1^{1/2}$	-
t_d	1.3 $L_1^{1/2}$	2.0 $L_1^{1/2}$	-
R	-	50mm	-

双螺旋桨船 – 螺旋桨柱的总尺度 表 3.3.2(2)

螺旋桨柱的总尺寸 mm	组合的螺旋桨柱	铸造的螺旋桨柱	方形螺旋桨柱，铸造或锻造，且具有矩形剖面
			
a	25 $L_1^{1/2}$	12.5 $L_1^{1/2}$	$2.4L+6$
b	25 $L_1^{1/2}$	25 $L_1^{1/2}$	$0.8L+2$
t_1 (1)	2.5 $L_1^{1/2}$	2.5 $L_1^{1/2}$	-
t_2 (1)	3.2 $L_1^{1/2}$	3.2 $L_1^{1/2}$	-
t_3	-	4.4 $L_1^{1/2}$	-
t_d	1.3 $L_1^{1/2}$	2.0$L_1^{1/2}$	-

(2) 轴毂

对单螺旋桨船，螺旋桨柱所包含的轴毂，其厚度应不小于[3.3.2(1)]要求的具有矩形剖面螺旋桨柱尺寸“b”的 60%。

3.3.3 连接

(1) 与船体结构连接

尾框架应与船尾结构有效连接，尾框架的下部应向螺旋桨柱前方延伸不小于 1500+6L_2 mm 的长度，以与龙骨有效连接。但尾框架不必延伸至艉尖舱舱壁以外。

(2) 与龙骨板连接

尾框架下部的厚度应逐渐过渡至实心龙骨或龙骨板的厚度。

如设有龙骨板，尾框架下部的设计应确保与龙骨的有效连接。

(3) 与尾肋板连接

承舵柱和螺旋桨柱应与尾肋板连接，所连接的尾肋板的高度应不小于双层底的高度，净厚度不小于按下式求得的值，mm：

$$t = 9 + 0.023L_1$$

(4)与中内龙骨连接

如果尾框架由铸铁制成，尾框架的下部应尽可能设置一纵向腹板以与中内龙骨连接。

3.4 船壳结构的特殊尺寸要求

3.4.1 与尾框架连接的外板净厚度，mm，应不小于下列公式的值：

$$t = 0.094(L_2 - 43) + 0.009b$$

在螺旋桨桨毂和踵板上，外板净厚度 t，mm，不得小于：

$$t = 0.105(L_2 - 47) + 0.011b$$

式中：

b——板格宽度，mm，定义见第 3 章第 6 节。

第 7 节　进水强度要求

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

P_R——合压力，kN/m^2，见第 4 章第 6 节表 6.1.7。

s_{CW}——板宽，mm，取槽条翼板 *a* 或腹板 *c* 宽度的大者，见第 3 章第 5 节图 10.3.2。

s_C——槽条翼板半宽，mm，见第 3 章第 5 节图 10.3.2。

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本节适用于装运密度为 1.0t/ m^3 及以上固体散货的矿砂船，且其纵舱壁的任一部分位于舷内 B/5 或者 11.5m（取小者）范围内（在核定的夏季载重线处自舷侧向船内垂直于中心线方向量取）。

2 进水工况下分隔货舱的垂直槽形水密横舱壁

2.1 槽条净厚度

2.1.1 冷成型槽条

分隔货舱的垂直槽形水密横舱壁的板材净厚度 *t*，mm，应不小于：

$$t = 14.9 \cdot 10^{-3} s_{CW} \sqrt{\frac{1.05P_R}{R_{eH}}}$$

净厚度也应满足本章第 3 节 [1.2.1] 的要求。

2.1.2 组合型槽条

对于分隔货舱的垂直槽形水密横舱壁，若组合型槽条的翼板和腹板的厚度不同时，净板厚应不小于如下公式所得值。

较窄的板材的净厚度 t_N，mm，应不小于：

$$t_N = 14.9 \cdot 10^{-3} s_N \sqrt{\frac{1.05 P_R}{R_{eH}}}$$

式中：s_N——窄板的板宽，mm；

较宽的板材的净厚度 t_W，mm，应不小于下列公式中获得之值的大者：

$$t_W = 14.9 \cdot 10^{-3} s_{CW} \sqrt{\frac{1.05 P_R}{R_{eH}}}$$

$$t_W = \sqrt{\frac{4.40 s_{CW}^2 P_R}{R_{eH} 10^4} - t_{NO}^2}$$

式中：t_{NO}——较窄板材的提供净厚度，mm，取不大于：

$$t_{NO} = 14.9 \cdot 10^{-3} s_{CW} \sqrt{\frac{1.05 P_R}{R_{eH}}}$$

净厚度也应满足本章第 3 节 [1.2.2] 的要求。

2.1.3 槽条下部

槽条下部的净厚度应从内底（如果不设底凳）或底凳顶部向上不小于 $0.15 l_C$ 距离的范围内保持不变。槽条跨距 l_C，m，按第 3 章第 5 节[10.3.5] 选取。

2.1.4 槽条中部

槽条中部的净厚度应从甲板（如果不设顶凳）或顶凳底部向下不大于 $0.3 l_C$ 范围内保持不变。净厚度还应满足[2.2.1]和第 6 章第 3 节[1.2]的要求。

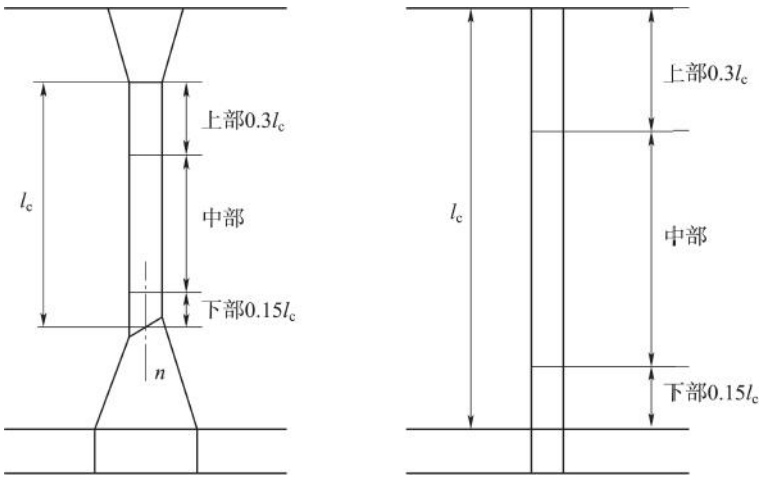


图 2.1.4　槽条各部分

2.2 弯曲、剪切和屈曲校核

2.2.1 弯曲能力和剪切能力

分隔货舱的水密槽形横舱壁的槽条的弯曲能力和剪切能力应符合下列公式：

$$0.5W_{LE}R_{\mathrm{eH},LE}+W_M R_{eH,M}\geq\frac{M}{0.95}10^3$$

$$\tau\leq\frac{R_{eH,LE}}{2}$$

式中：M——从下列公式中获得的槽条弯矩，kNm：

$$M=\frac{F_R l_C}{8}$$

F_R——按第 4 章第 6 节[6.1.7]计算的合成力，kN；

l_C——槽条跨距，m，根据按第 3 章第 5 节 [10.3.5]获得；

$R_{eH,LE}$——槽条下端材料的最小屈服强度，N/mm²；

$R_{eH,M}$——槽条跨距中点处材料的最小屈服强度，N/mm²；

W_{LE}——槽条半宽的净剖面模数，cm³，应按 [2.3] 在槽条的下端计算，取不大于从下列公式中获得之值：

$$W_{LE,M}=W_G+\frac{Qh_G10^3-0.5h_G^2s_C p_R}{R_{eH}}$$

W_G——槽条半宽的净剖面模数，cm³，应按[1.3]在卸货板或封槽板（如适用）的上端处计算；

Q——从下列公式获得的槽条下端处的剪切力，kN：

$$Q=0.8F_R$$

h_G——卸货板或封槽板（如适用）的高度，m，见图 2.3.3 至图 2.3.4(1)；

p_R——合成压力，kN/m²，应按第 4 章第 6 节表 6.1.7 在卸货板或封槽板（按适用情况）的中间处计算；

W_M——槽条半宽的净剖面模数，cm³，应按[2.3]在槽条的跨距中点计算，取不大于 $1.15W_{LE}$；

τ——槽条的剪切应力，N/mm²，按下式求得：

$$\tau=10\frac{Q}{A_{shr}}$$

A_{shr}——槽条半宽的剪切面积，cm²。考虑到槽条腹板与翼板不垂直，则剪切面积应予减少。一般情况下，减少后的剪切面积可用腹板剖面面积乘以 $\sin\varphi$；

φ——为腹板与翼板之间的夹角，见第 3 章第 5 节图 10.3.2。

图 2.1.4 定义的舱壁上部槽条的净剖面模数应不小于本条及第 6 章第 3 节[1.2] 对槽条中部要求的剖面模数的 75%，并应考虑不同最小屈服应力的修正。

2.2.2　舱壁槽条腹板的剪切屈曲校核

按 [2.2.1] 计算的剪应力τ应符合下列公式：

$$\tau\leqslant\tau_C$$

式中：τ_C——临界剪切屈曲应力，N/mm²，取为：

$\tau_C=\tau_E$，对于 $\tau_E\leq\dfrac{R_{eH}}{2\sqrt{3}}$

$\tau_c=\dfrac{R_{eH}}{\sqrt{3}}\left(1-\dfrac{R_{eH}}{4\sqrt{3}\tau_E}\right)$，对于 $\tau_E>\dfrac{R_{eH}}{2\sqrt{3}}$

τ_E——欧拉剪切屈曲应力，N/mm²，取为：

$$\tau_E = 0.9k_t E(\frac{t_w}{c})^2$$

k_t ——系数，取为 6.34；

t_w ——槽条腹板的净厚度，mm；

c ——槽条腹板的宽度，mm，见第 3 章第 5 节图 10.3.2。

2.3 槽条下端的净剖面模数

2.3.1 有效翼板宽度

槽条下端的净剖面模数应按具有不大于下式计算值的受压有效翼板宽度 b_{eff} 计算：

$$b_{eff} = C_E a$$

式中：C_E——系数，取为：

$$C_E = \frac{2.25}{\beta} - \frac{1.25}{\beta^2} \text{ 对于} \beta > 1.25$$

$$C_E = 1.0 \text{ 对于} \beta \le 1.25$$

β——系数，取为：

$$\beta = \frac{a}{t_f}\sqrt{\frac{R_{eH}}{E}}$$

a——槽条翼板的宽度，mm，见第 3 章第 5 节图 10.3.2；

t_f——翼板净厚度，mm。

2.3.2 不被局部肘板支撑的腹板

除非如[2.3.5]所述焊接在倾斜的底凳顶板上，否则如下部槽条腹板不被底凳顶板（或内底）下面的局部肘板支撑，则计算槽条剖面模数时应考虑槽条腹板 30%有效。

2.3.3 有效卸货板

如按图 2.3.3 设置有效的卸货板，则计算槽条下端（图 2.3.3 中横剖面 1）的剖面模数时，槽条翼板净面积（cm^2）可增加如下式所得的 I_{SH}：

$$I_{SH} = 2.5 \cdot 10^{-3} a\sqrt{t_f t_{SH}}$$，但取不大于 $2.5at_f10^{-3}$

式中：a ——槽条翼板宽度，mm，见第 3 章第 5 节图 10.3.2；

t_{SH}——卸货板净厚度，mm；

t_f——翼板净厚度，mm。

有效卸货板应：

- 无折角；
- 按第 13 章的要求与槽条和底凳顶板焊接；
- 安装的最小倾斜角为 45°，且其下边缘与底凳侧板对齐；
- 净厚度不小于槽条翼板要求净厚度的 75%；
- 材料特性不低于翼板的要求。

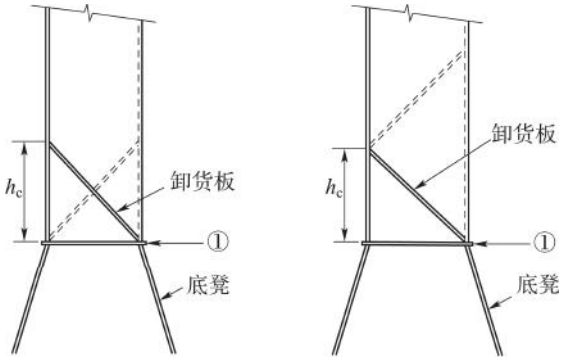


图 2.3.3　对称和非对称卸货板

2.3.4　有效封槽板

如设置有效封槽板，则计算槽条下端（图 2.3.4(1)和图 2.3.4(2)中横剖面 1）的净剖面模数时，槽条翼板净面积可增加如下式所得的 I_G，cm^2：

$$I_G = 7h_G t_f$$

式中：h_G——封槽板的高度，m，见图 2.3.4(1)和 2.3.4(2)，应取不大于$(10/7)S_{GU}$；

S_{GU}——封槽板的宽度，m；

t_f——翼板净厚度，mm。

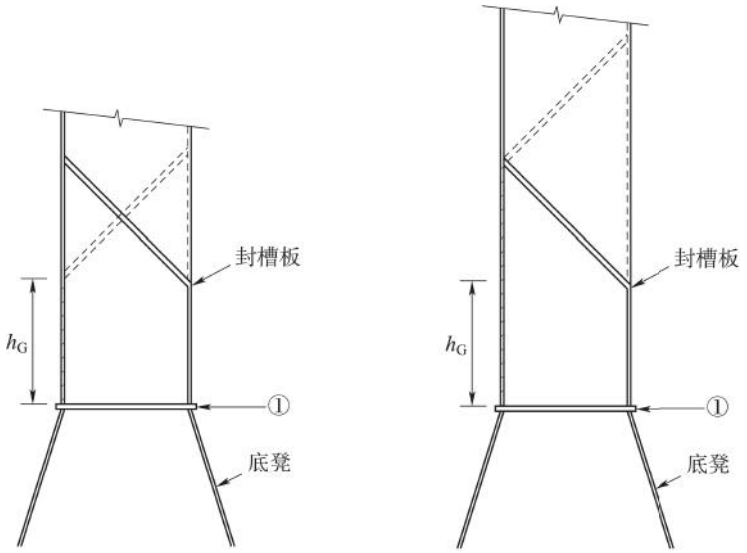


图 2.3.4(1)　对称和非对称封槽板/卸货板

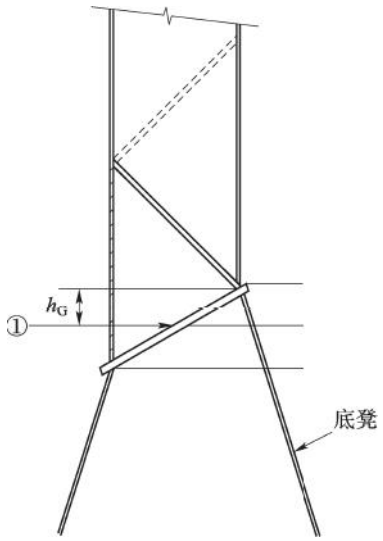


图 2.3.4(2)　非对称封槽板/卸货板

有效封槽板系指：

- 与满足[2.3.3]中厚度、材料特性和焊接要求的卸货板组合；
- 高度不小于翼板宽度的一半；
- 与底凳侧板安装对齐；
- 按第 13 章第 3 节[2.4.6]的要求与底凳顶板、槽条和卸货板焊接；
- 净厚度和材料特性不低于对翼板的要求值。

2.3.5　凳斜顶板

若槽条腹板和与水平面夹角不小于 45°的凳斜顶板焊接，则在计算槽条的剖面模数时认为槽条腹板完全有效。当夹角小于 45°时，槽条腹板的有效程度由 0º 时为 30%与 45° 时为 100%之间线性插值求得。

若设有有效封槽板时，则在计算槽条的净剖面模数时翼板的净面积可按上述[2.3.4]中的规定增加。仅设有卸货板时可不增加翼板的面积。

2.4 腐蚀增量和换新

2.4.1 腐蚀增量

本节槽形舱壁计算的总腐蚀增量 t_c 取 3.5mm。

2.4.2 换新

当测量厚度小于 t_{net}+0.5mm 时要求换新。当测量厚度大于等于 t_{net}+0.5mm 且小于 t_{net}+1.0mm 时，可通过采用涂装或年度测厚的措施替代换新。

3　进水工况的货舱许用装载

3.1　双层底能力和货舱许用装载评估

3.1.1　双层底剪切能力

双层底剪切能力应按以下各构件端部剪切强度之和计算：

- 连接底边舱的肋板，邻近每个舱壁凳或横舱壁（若未设凳）的两个肋板中，取剪切强度较小的一半，见图 3.1.1。肋板剪切强度按[3.1.2]计算；
- 连接舱壁凳或横舱壁（如不设凳）的双层底纵桁。桁材剪切强度按[3.1.3]计算。

在计算双层底剪切能力时，所计及的肋板和桁材是底边舱和凳或横舱壁（如不设凳）构

成的货舱限界以内的肋板和桁材。若纵桁或肋板的两端没有直接与货舱边界连接，则强度仅按连接的一端评估。

底边舱旁桁材与直接位于凳或横舱壁（如不设凳）与内底连接处以下的肋板不可计入。

对特殊的双层底设计，双层底剪切能力应在适用情况下按第 7 章的要求以直接计算确定。

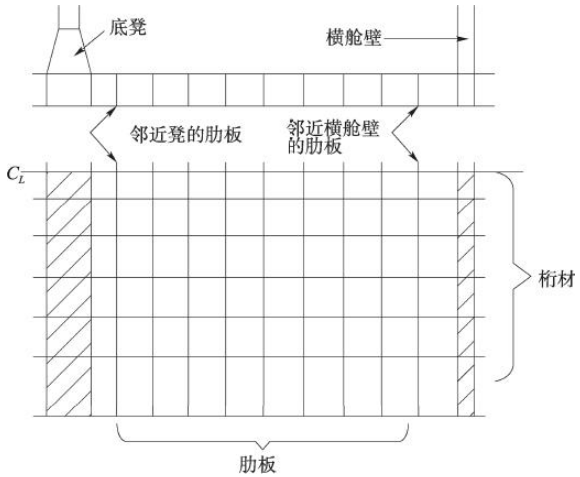


图 3.1.1　双层底结构

在计算抗剪能力时，应采用实肋板和纵桁的净厚度，总腐蚀增量 t_c 按 2.5mm 取值。

3.1.2 肋板剪切强度

肋板剪切强度应从下列公式获得，kN：

- 位于邻近底边舱的肋板板格处：

$$S_{f1} = A_f \frac{\tau_A}{\eta_1} 10^{-3}$$

- 位于最外格（即较靠近底边舱的格）的开口处：

$$S_{f2} = A_{f,h} \frac{\tau_A}{\eta_2} 10^{-3}$$

式中：A_f——邻近底边舱的肋板板格的净剖面积，mm^2；

$A_{f,h}$——位于最外格（即较靠近底边舱的格）的开口处的肋板板格的净剖面积，mm^2；

τ_A——许用剪切应力，N/mm^2，取下列二值中的小者：

$$\tau_A = 0.645 \frac{R_{eH}^{0.6}}{(s/t)^{0.8}} \quad 和 \quad \tau_A = \frac{R_{eH}}{\sqrt{3}}$$

对邻近舱壁凳或横舱壁的肋板，τ_A 取为：

$$\frac{R_{eH}}{\sqrt{3}}$$

t——肋板腹板净厚度，mm；

s——所计及板格的骨材的间距，m；

η_1——系数，等于 1.1；

η_2——系数，等于1.2，若在最外格的开口处采取适当加强的措施，如，开口内缘加环形扁钢或开口四周设置加强筋等，可取1.1。

3.1.3 桁材剪切强度

桁材剪切强度应从下列公式获得，kN：

- 邻近凳或横舱壁（如无凳）的桁材板格处：

$$S_{g1} = A_g \frac{\tau_A}{\eta_1} 10^{-3}$$

- 最外格（即较靠近凳，或如无凳则较靠近横舱壁）的最大开口处：

$$S_{g2} = A_{g,h} \frac{\tau_A}{\eta_2} 10^{-3}$$

A_g——邻近凳（或横舱壁，如无凳）的桁材板格的净剖面面积，mm^2；

$A_{g,h}$——位于最外格（即较靠近凳，或如无凳则较靠近横舱壁）的最大开口处的桁材板格的净剖面积，mm^2；

τ_A—— [3.1.2]定义的许用剪切应力，N/mm^2，其中 t 是桁材腹板的净厚度；

η_1——系数，等于 1.1；

η_2——系数，等于1.15，若在最外格的开口处采取适当加强的措施，如，开口内缘加环形扁钢或开口四周设置加强筋等，可取1. 1。

3.1.4 许用货舱装载

许用货舱装载，t，应从下列公式获得：

$$W = \rho_C V \frac{1}{F}$$

式中：ρ_C——干散货密度，t/m^3，见第 4 章第 6 节；

V——水平面 h_B 处以下的货物的体积，m^3；

F——系数，等于：

$F = 1.1$，一般货物

$F = 1.05$，对于钢材产品

h_B——从下列公式获得的货物水平，m；

$$h_B = \frac{P}{\rho_C g}$$

P——从下列公式获得的压力，kN/m^2：

- 对于干散货，取下列小者：

$$P = \frac{Z + \rho g(z_F - 0.1D_1 - h_F)}{1 + \frac{\rho}{\rho_C}(perm - 1)}$$

$$P = Z + \rho g(z_F - 0.1D_1 - h_F perm)$$

- 对于钢材产品：

$$P = \frac{Z + \rho g(z_F - 0.1D_1 - h_F)}{1 - \frac{\rho}{\rho_{st}}}$$

D_1——在船中舷侧处，从基线量至干舷甲板的距离，m；

h_F——内底进水高度，此系当船舶在正浮状态时从内底垂直量至进水水位 z_F 处的距离，

m；

z_F——进水水位，m，定义见第 4 章第 6 节 [6.1.3] ；

perm——货物的渗透率，不必取大于 0.3；

ρ_{st}——钢材密度，t/m^3，取 7.85。

Z——压力，kN/m^2，取下列二值中的小者：

$$Z = \frac{C_H}{A_{DB,H}}$$

$$Z = \frac{C_E}{A_{DB,E}}$$

C_H——双层底的剪切能力，kN，按[3.1.1]计算，对每个肋板计及剪切强度 S_{f1} 和 S_{f2}（见[3.1.2]）中的小者，对每个桁材计及剪切强度 S_{g1} 和 S_{g2}（见[3.1.3]）中的小者；

$A_{DB,H}$——面积，m^2，等于：

$$A_{DB,H} = \sum_{i=1}^{n} S_i B_{DB,i}$$

C_E——双层底的剪切能力，kN，按[3.1.1]计算，对每个肋板计及剪切强度 S_{f1}（见[3.1.2]），对每个桁材计及剪切强度 S_{g1} 和 S_{g2}（见[3.1.3]）中的小者；

$A_{DB,E}$——面积，m^2，等于：

$$A_{DB,E} = \sum_{i=1}^{n} S_i (B_{DB} - s)$$

n——凳（或横舱壁，如无凳）之间的肋板数量；

S_i——第 i 个肋板的间距，m；

$B_{DB,\,i}$——长度，m，等于：

$B_{DB,\,i} = B_{DB} - s$，对于 $S_{f1} < S_{f2}$ 的肋板

$B_{DB,\,i} = B_{DB,\,h}$，对于 $S_{f1} \geq S_{f2}$ 的肋板

B_{DB}——底边舱之间双层底的宽度，m，见图 3.1.4；

$B_{DB,\,h}$——所考虑的两个开口之间的距离，m，见图 3.1.4；

s——邻近底边舱的内底纵向普通骨材的间距，m。

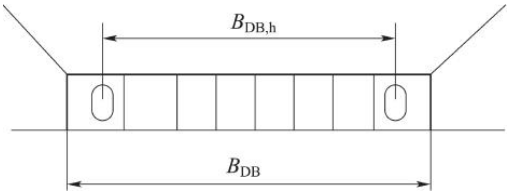


图 3.1.4　B_{DB} 和 $B_{DB,h}$ 尺寸示意图

第 8 节　其他要求

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本节[2]要求适用于所有液舱的局部晃荡加强要求。

1.1.2 本节[3]适用于承受冲击载荷的结构：

（1）船底前端平坦区域加强，按[3.2]；

（2）首部区域加强，按[3.3]。

2 晃荡载荷下结构强度

2.1 一般要求

2.1.1 对满足下列条件之一的液舱，可不必进行晃荡载荷下结构强度评估：

（1）容积不大于 100m^3；

（2）设置在双层底或双壳内的液舱或其他格形构造液舱；

（3）不存在部分装载的液舱。

2.1.2 针对含内部构件的液舱，部分装载一般系指液体装载高度大于 10%舱深且小于 90%舱深；针对无内部构件的光滑液舱，部分装载一般系指液体装载高度大于 5%舱深且小于 95%舱深。

2.2 强度评估

2.2.1 应对液舱下列构件进行晃荡载荷下结构强度评估：

（1）构成液舱边界的板、扶强材；

（2）液舱内制荡舱壁板、扶强材；

（3）液舱内主要构件的腹板及加强筋。

2.2.2 晃荡载荷下强度评估应满足 CCS《液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南》的要求，但腐蚀增量 t_c 应按本规范第 3 章第 3 节的规定。

3 船首区域冲击载荷下结构强度

3.1 一般要求

3.1.1 船首底部加强范围

当航行中最小首吃水小于 0.04L 时，应对其从首垂线向后的底部平坦部分进行加强。横向加强范围的边线高于基线应不小于 0.014B（B 为船宽），但不必大于 0.28m。纵向加强范围的端线距首垂线的长度 X，m，应不小于按下式计算所得之值：

$$X = \left(0.65 - \frac{C_b}{2}\right)L$$

式中：

C_b ——方形系数，当 C_b<0.7 时，C_b=0.7，当 C_b>0.8 时 C_b=0.7；

3.1.2 船首舷侧加强范围

船首部舷侧结构(包括首楼舷侧结构)应予以加强。加强范围自首垂线起向后 0.1L 之间与夏季载重线以上区域。如距首垂线 0.15L 处的最大外飘角α（见第 4 章第 5 节）大于 40°，则加强的纵向范围应延伸至距首垂线 0.15L 处。在该加强区域内舷侧构件的尺寸应符合本节的要求。

3.2 船首底部砰击加强

3.2.1 外板

在加强范围内，对首部船底板应作下列加强：

(1) 首部船底板净厚度 t，mm，应不小于按下式计算所得之值：

$$t = 5.95\sqrt{P_{SL}Kb^2\left[3 - \frac{2}{\beta^2}\left(\sqrt{1+3\beta^2} - 1\right)\right]} \times 10^{-4}$$

式中：

P_{SL}——剖面砰击压力，kN/m²，见第 4 章第 5 节[3.2.2]或采用该节[3.2.3]直接计算给出；

K——材料系数；

a——板长边长度，mm；

b——板短边长度，mm；

β——板的边长比，$\beta = a/b$。

(2) 对于与加强范围相邻的船底板和外板，应予以逐渐过渡。

3.2.2 船底纵骨

在加强范围内，首部船底纵骨净剖面模数Z，cm³，应不小于按下式计算所得之值：

$$Z = 1.86 P_{SL} K s l^2 \times 10^{-10}$$

式中：

P_{SL}——剖面砰击压力，kN/m²，见第 4 章第 5 节[3.2.2]或采用该节[3.2.3]直接计算给出；

s——纵骨间距，mm；

l——纵骨跨距，mm。

3.2.3 底部板架

对首底砰击加强区域板架结构，应进行有限元强度直接计算校核。

（1）有限元结构模型

- 模型的纵向范围应包括本节[3.1.1]规定的计算范围并至少向前后延伸一个强框架距离；横向范围的选取应充分考虑降低边界条件对底部板架结构响应的影响。
- 模型的单元选取和网格划分应符合第 7 章的要求。
- 应对首部船底加强范围内的所有主要构件进行强度评估。
- 当主要构件的开孔影响到构件的应力分布或刚度时，应按第 7 章的要求处理。
- 应采用净尺寸模型。

（2）边界条件

模型边界处的肋板和纵桁刚性固定。

（3）计算载荷

根据砰击原理，认为砰击压力是作用在中纵桁处的肋板上，其作用面积为边长S_1的正方形，S_1，m，按下式计算：

$$S_1 = \sqrt{1.1 C_B L B \times 10^{-3}}$$

船首各站处的砰击压力的极限值不出现在同一时刻，所以必须对各站处作用极值砰击压力分别进行计算，求得底部板架的最大压力，砰击压力在肋板上的分布按下述三种情况确定：

1）$S_1 < S$：

砰击压力仅作用在一块肋板上，见图 3.2.3(1)，单位长度肋板上作用力Q，kN/m，按下式计算：

$$Q = P_{SL} S_1$$

式中：

S——肋板间距，m；

P_{SL}——剖面砰击压力，kN/m²，见第 4 章第 5 节[3.2.2]或采用该节[3.2.3]直接计算给出；

2）$S < S_1 < 2S$：

砰击压力作用在二块肋板上，见图 3.2.3(2)，单位长度肋板上作用力Q，kN/m，按下式计算：

$$Q = 0.5 P_{SL} S_1$$

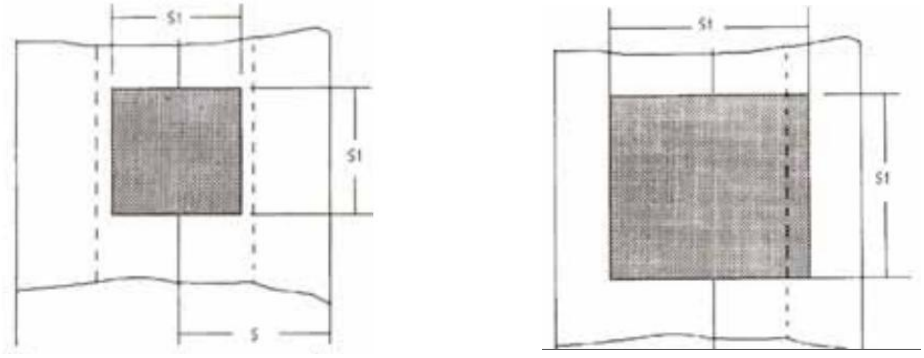
3）$S_1 > 2S$：

砰击压力作用在三块肋板上，中间肋板单位长度肋板上作用力Q_C，kN/m，按下式计算：

$$Q_C = P_{SL} S$$

边肋板单位长度上的作用力Q_S，kN/m，按下式计算

$$Q_S = 0.5 P_{SL} \left(S_1 - S \right)$$



(1)　　(2)

图 3.2.3

（4）许用应力

板架砰击强度直接计算的许用应力按表 3.2.3 确定。

许用应力　　**表 3.2.3**

构件	内底板处正应力 σ（N/mm²）	外底板处正应力 σ（N/mm²）	剪切应力 τ（N/mm²）	相当应力 σ_e（N/mm²）
纵桁	136/*K*	124/*K*	120/*K*	200/*K*
肋板	147/*K*	147/*K*	109/*K*	218/*K*

3.3 船首舷侧冲击加强

3.3.1 外板

舷侧外板的净厚度 *t*，mm，应不小于按下式计算所得之值：

$$t = 3.1 b_{r1} s \sqrt{P_{FB} K / 10}$$

式中：

s——次要构件间距，m；

b_{r1}——系数，按以下取用，且不小于 0.72：

$b_{r1} = 1.0 \quad \frac{s}{l} \le 0.4$ ；

$b_{r1} = 1.187 - 0.467 \frac{s}{l} \quad \frac{s}{l} > 0.4$ ；

l——次要构件跨距，m；

P_{FB}——舷侧冲击压力，见第 4 章第 5 节[3.3.1]。

3.3.2 次要构件

（1）舷侧纵骨或舷侧肋骨等次要构件的净剖面模数 Z，cm³，和腹板净剖面积 A，cm²，应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 0.243 s P_{FB} l^2 K$$

$$A = 0.0327 b_{r2} l s P_{FB} K$$

式中：$b_{r2} = 1 - \frac{s}{2l}$；

s ——次要构件间距，m；

P_{FB}——舷侧冲击压力，见第 4 章第 5 节[3.3.1]；

l ——次要构件跨距，m。

（2）防倾肘板

当舷侧纵骨或舷侧肋骨等次要构件的腹板与外板的夹角小于 70°时，应在构件跨距中点设置防倾肘板，以加强板格的横向稳定。

3.3.3 主要构件

舷侧水平桁材或垂直桁材等主要构件的净剖面模数 Z，cm^3，和腹板净剖面积 A，cm^2，应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 0.2SP_{FB}l^2K$$

$$A = 0.0252SP_{FB}lK$$

式中：S ——桁材间距，m；

P_{FB}——舷侧冲击压力，见第 4 章第 5 节[3.3.1]；

l ——桁材跨距，m。

4 结构尺度附加要求

4.1 平板艏柱

4.1.1 平板艏柱净厚度 t_{Stm}，mm，不小于：

$$t_{Stm} = (0.6 + 0.4S_B)(0.08L + 2.7)\sqrt{k}\text{，但不必大于}22\sqrt{k} - 1.5$$

式中：S_B——水平纵桁（部分或全部）、强胸横梁或等效水平加强构件的间距，m。

从载重水线以上 0.6m 至 $T_{SC}+Cs$，净厚度可逐渐减至 $0.8t_{Stm}$。

4.1.2 强胸横梁和隔板

[3.3.1]定义的船首冲击加强区域处的强胸横梁/隔板的净厚度 t_w，mm,不应小于：

$$t_w = \frac{s}{70}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

式中：s——腹板加强筋的间距，mm，见第 1 章第 4 节表 2.4.1。如果没有安装骨材，s 取腹板的高度值。

4.2 侧推管隧

4.2.1 管隧板的净厚度 t_{tun}，mm，不应小于首侧推器周围外板的要求净厚度。

此外，t_{tun} 不应小于：

$$t_{tun}=0.008d_{tun}+1.8$$

式中：d_{tun}——管隧的内径，mm，但不应小于 970mm。

当管隧舷外侧端有撑杆或格栅时，撑杆或格栅应作有效固定。

第 7 章　舱段直接强度分析

符号

对于本节中未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

M_{sw}——　许用垂向静水弯矩，kNm，定义见第 1 章第 4 节。

M_{wv}——　垂向中拱或中垂波浪弯矩，kNm，定义见第 4 章第 4 节。

M_{wh}——　水平波浪弯矩，kNm，定义见第 4 章第 4 节。

M_{wt}——　航行工况时的波浪扭矩，kNm，定义见第 4 章第 4 节。

Q_{sw}——　所考虑舱壁处的许用静水剪力，kN，定义见第 4 章第 4 节。

Q_{wv}——　垂向波浪剪力，kN，定义见第 4 章第 4 节。

$X_{b\text{-}fwd}$ ——　中间货舱前舱壁的 X 坐标，m

$X_{b\text{-}aft}$ ——　中间货舱后舱壁的 X 坐标，m

X_{aft}——　有限元模型尾端支座的 X 坐标，m

X_{fore}——　有限元模型首端支座的 X 坐标，m

x_i——　第 i 站横框架的 X 坐标，m

Q_{aft}——　中间货舱后舱壁的垂向剪力，kN，定义见[3.4.6]

Q_{fwd}——　中间货舱前舱壁的垂向剪力，　kN，定义见[3.4.6]

$Q_{targ\text{-}aft}$——　中间货舱后舱壁的目标剪力，kN，定义见[3.3.3]

$Q_{targ\text{-}fwd}$——　中间货舱前舱壁的目标剪力，kN，定义见[3.3.3]

第 1 节　强度评估

1 一般规定

1.1 一般要求

1.1.1 本章适用于矿砂船货舱区主要构件的直接强度评估。

1.1.2 有限元分析包括以下两部分：

（1）评估船体梁纵向构件、主要支撑构件和舱壁的货舱舱段分析。

（2）评估局部结构细节详细应力水平的细化网格分析。

1.1.3 分析应验证以下内容：

（1）应力水平满足屈服验收衡准。

（2）板和加筋板的屈曲能力满足屈曲验收衡准。

1.1.4 有限元分析流程图见图 1.1.4。

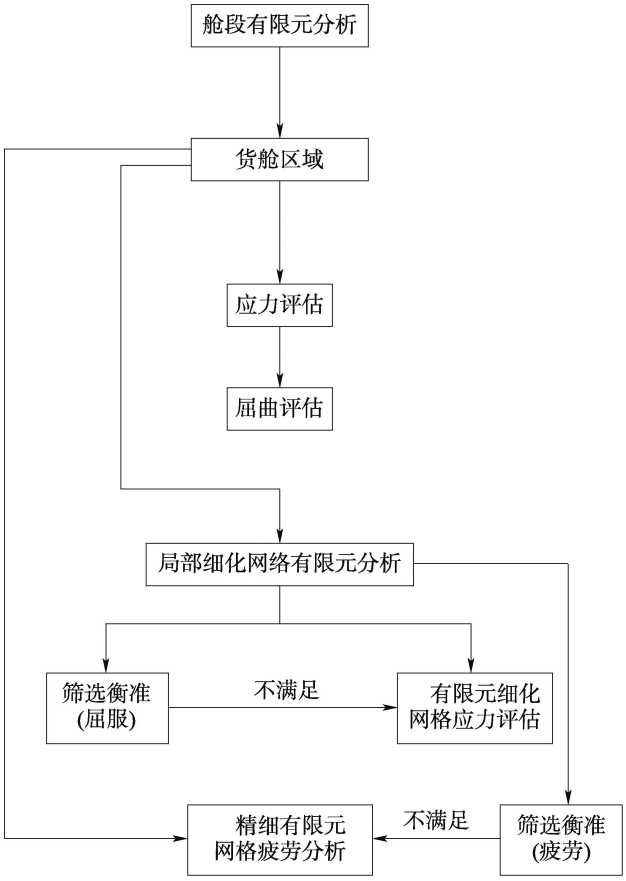


图 1.1.4 有限元分析流程图

2 净尺寸

2.1 净尺寸应用

2.1.1 用于舱段有限元分析和局部细化网格有限元分析的有限元模型应基于净尺寸方法，扣除的腐蚀增量为 $0.5t_c$，所有的屈曲能力评估扣除的腐蚀增量为t_c，见第 3 章第 3 节表 1.2.1。

3 单元类型

3.1 使用的单元类型

3.1.1 结构评估基于三维结构模型的线性有限元分析。在有限元分析中，通常使用的单元类型如表 3.1.1 所示。

单元类型 **表 3.1.1**

单元类型	描述
杆（或桁架）单元	线单元，仅具有轴向刚度，且沿单元长度其横剖面积不变
梁单元	线单元，具有轴向刚度、扭转刚度、双向剪切和弯曲刚度，且沿单元长度其属性不变
壳（或板）单元	板单元，具有面内刚度和面外弯曲刚度，且厚度不变

3.1.2 有关网格的要求是基于使用两节点的线单元和四节点的壳单元建立有限元模型的条件下给出的。

第 2 节　舱段结构强度分析

1 目标和范围

1.1 评估目标

1.1.1 舱段结构强度分析用来对货舱区域的纵向船体梁构件、主要支撑结构和舱壁的尺寸进行评估。本节规定了对于货舱结构强度分析的要求。

1.1.2 进行有限元结构评估和载荷施加的货舱区域包括以下货舱范围。货舱范围据船长和舱室布置的不同可能有所不同。

- 中部货舱区域：舱室布置与结构尺寸相同可选其一作为目标舱
- 最首货舱
- 最尾货舱

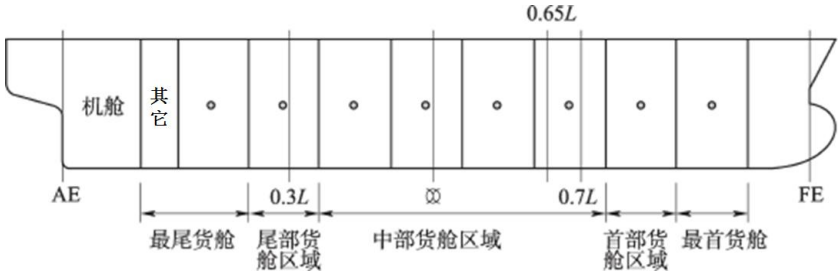


图 1.1.2　有限元结构评估的货舱区域定义

1.1.3 三个货舱长度的有限元模型的中间舱定义为中舱进行有限元分析。对于最首货舱和最尾货舱的评估，中舱分别指最首货舱和最尾货舱。

1.1.4 对于每个货舱，应采用第 4 章第 8 节定义的适用于相应货舱的有限元载荷组合，按照本章要求进行尺寸评估。

1.2 应建模的构件

1.2.1 货舱段模型纵向范围一般应至少覆盖船中货舱区域三个完整货舱范围；垂向应取至舱口围范围；横向应取全宽范围。如果评估区域上方有上层建筑，可考虑上层建筑结构对船体结构强度的影响。

1.2.2 所有主要构件均应建模，包括：

- 外壳
- 甲板
- 内底板
- 双层底实肋板和纵桁
- 横向和垂向强框架
- 舱口围板
- 水平桁材
- 横向和纵向舱壁结构
- 其它主要支撑构件
- 其它计入船体梁强度的结构构件

1.2.2 结构上的所有板和骨材，包括腹板骨材，均应建模。对主要支撑构件强度起作用且其尺寸不小于[1.4.2]中定义的典型网格尺寸（s×s）的肘板应建模。

1.3 模型范围

1.3.1 除最首货舱模型和最尾货舱模型外，货舱有限元模型沿纵向应覆盖三个货舱长度。模型两端应包括横舱壁。当设置槽型型舱壁时，模型前后端部还应包括槽型横舱壁凳结构，以及压载舱横舱壁的水平桁结构。

1.3.2 最首货舱和最尾货舱应尽量位于有限元模型的中间，如下所述：

- 最首货舱段：自第 2 货舱后舱壁至最前端的加强环或强框架所在的横剖面，该加强环框架或强框架从基线至强力甲板保持连续。
- 最尾货舱段：自机舱后舱壁至第 N-1 货舱的前舱壁，其中 N 指货舱的数量或由首至尾数的货舱或货舱组编号。
- 如果相邻货舱长度大于等于 1.5 倍目标货舱长度，应将相邻货舱适当截断，使相邻舱室的舱长与目标货舱长度相当。
- 如果相邻舱室长度小于等于 0.7 倍目标货舱长度，如首货舱与首尖舱，则应对相邻舱室进行合理的拉伸，如对首尖舱以其舱长中间位置横剖面，向首拉伸至与目标舱长度相当。对拉伸区域结构建模应符合 1.4 的要求。

1.3.3 一般情况下，有限元模型应表达船体外壳的几何形状。对于船中货舱区域，如果中舱是棱柱形，有限元模型可以是棱柱形的。

1.3.4 对于最首货舱模型，如果相邻首尖舱的长度小于等于 0.7 倍最首货舱长度，则位于首尖舱中间位置处的横剖面向前至模型端部的船体线型应使用简化的几何建模——由首尖舱中间位置处的横剖面向前拉伸至与首货舱长度相当处。如果相邻首尖舱的长度大于 0.7 倍最首货舱长度，则可考虑按照实际结构建模或者由首尖舱中间位置处的横剖面向前拉伸至首垂线处。以上两种情况，舱段模型的端部边界条件均应施加于最首端面处。

1.3.5 对于最尾舱模型，位于机舱中间向后的船体外壳可以使用简化几何建模。可以由机舱中间剖面向后拉伸至后舱壁。

1.3.6 如果船体外壳使用拉伸的方法建模，应将对应处所（首部或机舱处所）中间位置的横剖面的几何属性沿简化模型进行复制。拉伸部分的横向强框架与首部或机舱的横向强框架的属性相同，并保持纵向构件的连续性。

1.3.7 船舶的左舷和右舷都应建模。

1.3.8 船舶的全深范围内都应建模，如有时，包括上甲板上的主要支撑构件、管隧、首楼和/或舱口围板。机器处所的上层建筑或甲板室以及挡浪板不要求建模。

1.4 有限元模型要求

1.4.1 长宽比

通常，壳单元的长宽比应不超过 3。尽量少使用三角形壳单元。对于可能出现高应力或高应力梯度的区域，壳单元的长宽比应尽量接近于 1 且避免使用三角形单元。

1.4.2 网格要求

壳单元的网格应尽可能与骨材布置保持一致，以反映骨材间的实际板格。通常，壳单元网格应符合以下要求：

（1）每相邻纵骨间一个单元。在纵向，单元长度不应大于 2 倍的纵骨间距且主要支撑构件间至少应有三个单元。

（2）平面横舱壁上每相邻骨材间一个单元。槽型舱壁以槽条为基准，垂向以骨材间距为一个单元。

（3）横向和垂向强框架、横撑和水平桁材上每相邻腹板加强筋之间一个单元。

（4）双层底纵桁、实肋板、横向强框架、垂向强框架以及横舱壁水平桁材沿其高度方向至少 3 个单元。

（5）横舱壁垂直桁和水平桁上的网格应能够表达其上的开孔大小和位置。

（6）应模拟主要支撑构件大肘板自由边的曲率，以避免几何不连续造成不真实的高应力。

1.4.3 开孔

表达主要支撑构件腹板上开孔和人孔的方法见表 1.4.1 的要求。任何尺寸的人孔都应通过去除适当的单元的方式进行建模。

主要支撑构件腹板上开孔的表达　　表 1.4.3

衡准	建模结果
$h_0/h < 0.5$ 且$g_0 < 2.0$	开孔不需建模
人孔	应通过去除适当的单元进行开孔几何的建模
$h_0/h \geq 0.5$ 或$g_0 \geq 2.0$	开孔应建模

其中：

$$g_0 = \left(1 + \frac{l_0^2}{2.6(h-h_0)^2}\right)$$

l_0——　平行于主要支撑构件腹板方向的开孔长度，m，如图 1.4.1 所示。对于间距d_0小于 $0.25h$ 的连续开孔，l_0取所有开孔跨过的长度，如图 1.4.2 所示。

h_0——　平行于腹板高度方向的开孔高度，m，如图 1.4.3(1)和图 1.4.3(2)所示。

h——　开孔处主要支撑构件的腹板高度，m，如图 1.4.3(1)和图 1.4.3(2)所示。

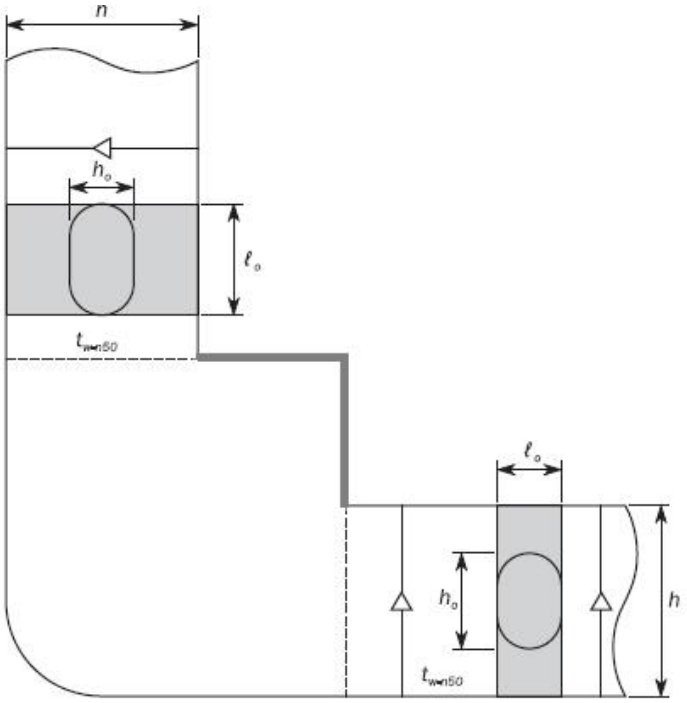


图 1.4.3(1) 腹板上的开孔

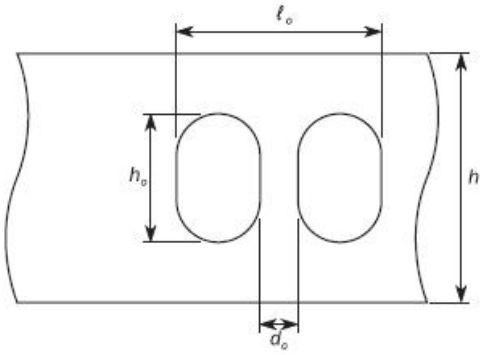


图 1.4.3(2) $d_0 < h/4$ 的连续开孔的长度l_0

1.5 边界条件

1.5.1 一般要求

（1）本节所规定的所有边界条件都基于第 1 章第 2 节定义的总体坐标系。

（2）本节所规定的所有边界条件适用于货舱区域的舱段有限元模型分析。

1.5.2 边界条件

（1）边界条件包括模型端部的刚性连接、单点约束和端部梁。刚性连接将模型端部的纵向构件的节点连接到中纵剖面上中和轴处的独立点上。边界条件应施加在舱段有限元模型的端部，除最首货舱外的边界条件见表 1.5.2(1)。对于最首货舱分析，施加在最首舱段有限元模型端部的边界条件见表 1.5.2(2)。

非最首货舱的模型端部边界条件　　表 1.5.2(1)

位置	平移			转动		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
后端						
独立点	—	固定	固定	M_{T-end}	—	—
横剖面	—	刚性连接	刚性连接	刚性连接	—	—
	端部梁，见[1.5.4]					
前端						
独立点	—	固定	固定	固定	—	—
中剖面和内底板的交点	固定	—	—	—	—	—
横剖面	—	刚性连接	刚性连接	刚性连接	—	—
	端部梁，见[1.5.4]					
注 1：[—]表示不需施加约束（自由） 注 2：见图 1.5.2						

最首舱段模型的端部边界条件　　表 1.5.2(2)

位置	平移			转动		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
后端						
独立点	—	固定	固定	固定	—	—
中剖面和内底板的交点	固定	—	—	—	—	—
横剖面	—	刚性连接	刚性连接	刚性连接	—	—
	端部梁，见[1.5.4]					
前端						

横剖面	—	刚性连接	刚性连接	刚性连接	—	—
独立点	—	固定	固定	M_{T-end}	—	—
注 1：[—]表示不需施加约束（自由） 注 2：见图 1.5.2 注 3：前端的边界条件应施加在最前端的从基线至强力甲板保持连续的加强环框架或强框架上。						

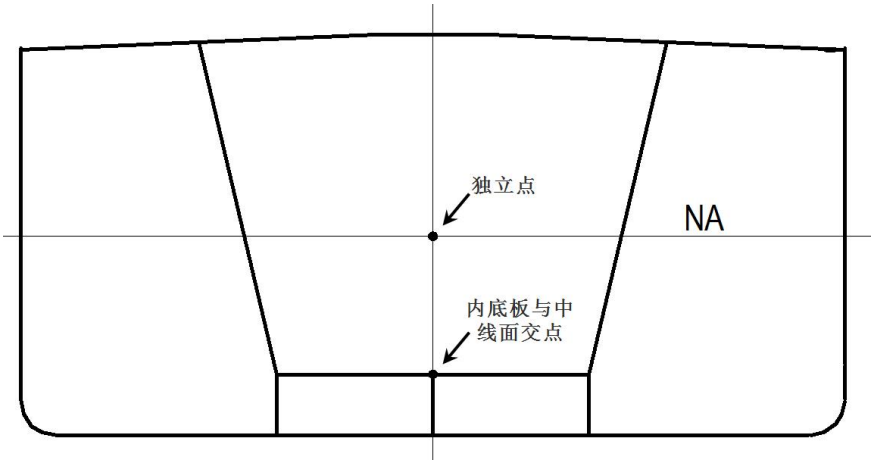


图 1.5.2 施加于模型端面的边界条件

1.5.3 端部约束梁

（1）应在模型两个端面上所有的纵向连续结构和舱口间甲板板上建立端部约束梁。图 1.5.3 是一个典型矿砂船端面的端部约束梁的示例。

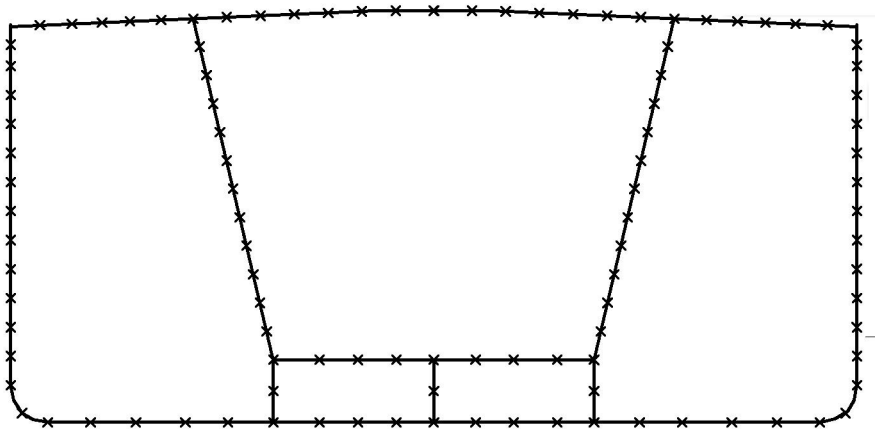


图 1.5.3 端部约束梁

（2）每个端面内的所有梁单元的属性应相同，首端和尾端端面的梁的属性应按照以下要求分别计算：

- 剖面惯性矩：$I_{yy} = I_{zz} = I_{xx}(J) = 1/25$ 倍的首/尾端横剖面基于有限元模型的船体梁垂向惯性矩。
- 横剖面面积：A_y和$A_z = 1/80$ 倍的首/尾端横剖面基于有限元模型的横剖面积。

其中：

I_{yy}—— 梁的局部坐标系下关于 Y 轴的惯性矩，m^4

I_{zz}—— 梁的局部坐标系下关于 Z 轴的惯性矩，m^4

$I_{xx}(J)$—— 扭转惯性矩，m^4

A_y—— 梁的局部坐标系下 Y 方向的剪切面积，m^2

A_z—— 梁的局部坐标系下 Z 方向的剪切面积，m^2

2 有限元载荷组合

2.1 设计载荷组合

2.1.1 有限元载荷组合定义

有限元载荷组合定义为装载模式、吃水、静水弯矩和剪力与给定的动载荷工况组合。

2.1.2 强制载荷组合

对于舱段结构强度分析，应根据不同货舱区域选取第 4 章第 8 节定义的设计载荷组合。

第 4 章第 8 节规定的每个设计载荷组合由一个装载模式和第 4 章第 7 节中给出的动载荷工况组成。每一个载荷组合都要求施加结构自重、内部压力、外部压力和船体梁载荷。航行工况需同时施加静载荷分量和动载荷分量（S+D）。港内工况只需施加静载荷分量。

2.1.3 附加载荷工况

如果设计者定义的装载工况未被第 4 章第 8 节给出的载荷组合覆盖，这些附加装载工况应根据第 4 章和本章的程序要求进行评估。

3 载荷施加

3.1 一般规定

3.1.1 结构重量

船体结构的重量应计入静载荷中，但动载荷中不应计入。钢材密度应按第 4 章第 6 节选取。

3.1.2 符号约定

除非本节中另有规定，弯矩和剪力的符号应与第 4 章第 1 节中定义的符号约定一致。

3.2 外部和内部载荷

3.2.1 外部压力

每个载荷工况的外部压力应根据第 4 章第 5 节计算。外部压力包括海水静压力、波浪压力。

对于按照本章第 2 节 1.3.2 要求对首货舱舱段的首尖舱或尾货舱舱段的机舱进行拉伸至实船船长之外时，延伸区域的外部压力取规范船长端部处单元的压力，沿船长方向做等值处理。

3.2.2 内部压力

内部压力应对于每个载荷工况，根据第 4 章第 6 节的规定计算。内部压力包括压载水和其它液体静压力、压力释放阀设定压力以及由于加速度引起的压载水和其它液体的动压力。

3.2.3 施加在单元上的压力

在单元形心处计算的压力值作为常量施加在受压面的壳单元上，例如，承受外部压力的外壳和甲板，承受内部压力的舱室边界。

3.3 船体梁载荷

3.3.1 一般规定

每个装载工况都有其相应的船体梁载荷，其中，船体梁剪力和弯矩应按照[3.4]规定的程序施加。船体梁载荷是船体梁静水载荷和第 4 章第 8 节定义的船体梁波浪载荷的组合。对于每一个要求的有限元载荷组合，船体梁波浪载荷应使用第 4 章第 2 节规定的载荷组合系数（LCF）计算。

3.3.2 船体梁垂向目标弯矩

对于给定的有限元载荷组合，在某一纵向位置的船体梁垂向目标弯矩M_{v-targ}，kNm，按下式计

$$M_{v-targ} = C_{BM-LC} M_{sw} + M_{wv-LC}$$

式中：

C_{BM-LC}—— 对应载荷组合的许用静水弯矩百分比，见第 4 章第 8 节。

M_{sw}—— 航行工况和港内工况下指定纵向位置处的许用静水弯矩，kNm，定义分别见第 4 章第 4 节。

M_{wv-LC}—— 动载荷工况下的垂向波浪弯矩，kNm，计算方法见第 4 章第 4 节

M_{v-targ} ——取值如下：

- 船中货舱区域：对于第 4 章第 8 节定义的每个有限元载荷组合，取每个舱段的中舱范围内的最大船体梁弯矩。
- 船中货舱区域以外：所要考虑的有限元模型中所有横框架和横舱壁的弯矩值。当按照第 7 章第 2 节 1.3.2 要求对首货舱舱段的首尖舱或尾货舱舱段的机舱进行拉伸至实船船长之外时，对于超出规范船长的延伸区域，各个强框架处目标弯矩值取为 0。

根据第 4 章第 8 节的表给定的有限元载荷组合，$C_{BM-LC}M_{sw}$和M_{wv-LC}同时取中垂状态或中拱状态。

3.3.3 船体梁目标剪力

对于给定的有限元载荷组合，中间货舱后舱壁和前舱壁处的船体梁目标剪力$Q_{targ-aft}$和$Q_{targ-fwd}$由下式确定：

- $Q_{fwd} \geq Q_{aft}$：

$$Q_{targ-aft} = C_{SF-LC} \cdot Q_{sw-neg} - \Delta Q_{swa} + f_\beta |C_{QW}| Q_{wv-neg}$$

$$Q_{targ-fwd} = C_{SF-LC} \cdot Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swf} + f_\beta |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

- $Q_{fwd} < Q_{aft}$：

$$Q_{targ-aft} = C_{SF-LC} \cdot Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swa} + f_\beta |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

$$Q_{targ-fwd} = C_{SF-LC} \cdot Q_{sw-neg} - \Delta Q_{swf} + f_\beta |C_{QW}| Q_{wv-neg}$$

式中：

Q_{fwd}—— 局部载荷在中间货舱前舱壁位置处产生的垂向剪力，kN。

Q_{aft}—— 局部载荷在中间货舱后舱壁位置处产生的垂向剪力，kN。

Q_{sw-pos}—— 航行工况时在任意纵向位置处正的许用静水剪力，kN。

Q_{sw-neg}—— 航行工况时在任意纵向位置处负的许用静水剪力，kN。

C_{QW}—— 垂向波浪剪力的载荷组合系数，见第 4 章第 2 节。

Q_{wv-pos}—— 正的垂向波浪剪力，kN，见第 4 章第 4 节[3.2]。

Q_{wv-neg}—— 负的垂向波浪剪力，kN，见第 4 章第 4 节[3..2]。

$Q_{targ-aft}$和$Q_{targ-fwd}$应在所考虑的中间货舱的后舱壁和前舱壁处取值。

式中：

Q_{fwd}，Q_{aft}—— 中舱前舱壁和后舱壁位置处由于局部载荷分别产生的垂向剪力，kN，定义见[3.4.3]。

C_{SF-LC} —— 对于给定的有限元载荷组合的许用静水剪力比例，见第 4 章第 8 节。

Q_{sw-pos}，Q_{sw-neg}—— 航行和港内工况时在任意纵向位置的正许用静水剪力的负许用静水剪力，kN。

ΔQ_{swf}——对于许用静水剪力未考虑不均匀装载引起的剪力修正，取ΔQ_{swf}=0；
对于许用静水剪力已进行不均匀装载引起的剪力修正，则考虑的有限元装载模式，前舱壁处的剪力修正值，kN，取值如下：
以下两个位置处计算所得的ΔQ_{mdf}的绝对值的小者：中舱的前舱壁、前舱的后舱壁，计算公式如下所示，

$$\Delta Q_{swf} = \mathrm{Min}(\left|\Delta Q_{mdf}\right|_{Mid}, \left|\Delta Q_{mdf}\right|_{Fwd})$$

式中，ΔQ_{mdf}按下式计算：

$$\Delta Q_{mdf} = C_d \alpha \left(\frac{M}{B_H l_H} - \rho T_{LC,mn} \right)$$

式中，C_d ------分布系数，取作：

对于所考虑货舱的后端舱壁，除最后端货舱，$C_d = -1$；
对于所考虑货舱的前端舱壁，除最前端货舱，$C_d = 1$；
对于所考虑货舱的内部，C_d 按线性分布；
对于货舱的中间位置，$C_d = 0$；
对于最前端货舱的前端舱壁，$C_d = 0$
对于最后端货舱的后端藏壁，$C_d = 0$
其它位置处，C_d 线性分布

α——系数，取做：

$$\alpha = g \frac{l_0 b_0}{2 + \varphi \frac{l_0}{b_0}}$$

M——货舱内所考虑横剖面在所考察的装载工况下的质量，t。M包括内底平面部分下方的压载水和燃油质量，不包括舱壁凳部分；
B_H——货舱宽度，m；
l_H——货舱长度，m；
l_0, b_0——分别为所考虑货舱的双层底平面部分的长度和宽度，m；b_0 应在货舱中间的船体横剖面量取；

$\varphi = 1.38 + 1.55 g \frac{l_0}{b_0}$，但不大于 3.7

$T_{LC,mh}$——吃水，m，在所考虑货舱中间的船体横剖面处，自基线垂直量至所考虑装载工况的水线；
ΔQ_{CF}——满舱的剪力修正量；
ΔQ_{CE}——空舱的剪力修正量；

ΔQ_{swa}——对于许用静水剪力未考虑不均匀装载引起的剪力修正，取ΔQ_{swa}=0；
对于许用静水剪力已进行不均匀装载引起的剪力修正，则
对于考虑的有限元装载模式，后舱壁处的剪力修正值，kN，取值如下：
以下两个位置处计算所得的ΔQ_{mdf}的绝对值的小者：中舱的后舱壁、后舱的前舱壁，计算公式如下所示，其中ΔQ_{mdf}的定义见上式定义：

$$Q_{swa} = \mathrm{Min}(\left|\Delta Q_{mdf}\right|_{Mid}, \left|\Delta Q_{mdf}\right|_{Aft})$$

f_β——浪向因子，见第 4 章第 4 节。

C_{QW}—— 垂向波浪剪力的载荷组合因子，见第 4 章第 4 节。

$Q_{wv\text{-}pos}$，$Q_{wv\text{-}neg}$—— 正向和负向的垂向波浪剪力，kN，见第 4 章第 4 节[3.2.1]。

$Q_{targ-aft}$和$Q_{targ-fwd}$应在所考虑的中舱的后舱壁和前舱壁处取得。

3.3.4 船体梁水平目标弯矩

给定有限元载荷组合的船体梁水平目标弯矩M_{h-targ}，kNm，取值如下：

$$M_{h-targ} = M_{wh-LC}$$

式中：

$M_{wh\text{-}LC}$—— 所考虑动载荷工况的水平波浪弯矩，kNm，按照第 4 章第 4 节[3.3.1]计算，为所考虑货舱的中间位置的计算值。

$M_{wh\text{-}LC}$的取值如下：

- 船中货舱区域：所考虑货舱的中间位置的计算值。
- 船中货舱区域以外：所要考虑的有限元模型中所有强框架和横舱壁的弯矩值。当按照本章第 2 节 1.3.2 要求对首货舱舱段的首尖舱或尾货舱舱段的机舱进行拉伸至实船船长之外时，对于超出规范船长的延伸区域，各个强框架处目标弯矩值取为 0。

3.3.5 船体梁目标扭矩

对于动载荷工况 OST 和 OSA 在目标位置处的船体梁目标扭矩$\mathrm{M}_{\mathrm{wt-targ}}$，kNm，取值如下：

$$\mathrm{M}_{wt-targ} = M_{wt-LC}(x_{targ})$$

式中：

$M_{wt-LC}(x)$—— 在x位置处计算的动载荷工况 OST、OSA（定义见第 4 章第 4 节[3.4.1]）的波浪扭矩，kNm。

x_{targ}—— 船体梁扭矩的目标位置，按如下确定：

- 如果 $\mathrm{x}_{\mathrm{mid}} \le 0.531\mathrm{L}$：中间货舱后舱壁。
- 如果 $\mathrm{x}_{\mathrm{mid}} > 0.531\mathrm{L}$：中间货舱前舱壁。

x_{mid}—— 中间货舱舱中心处的 X 坐标，m。

x_{bhd}—— 中间货舱前舱壁或后舱壁的 X 坐标，m。

根据第 4 章第 8 节给定的有限元载荷组合，波浪扭矩M_{wt-LC}和静水扭矩M_{st}同时取正值或负值。

对于非 OST、OSA 的动载荷工况，船体梁扭矩$\mathrm{M}_{\mathrm{wt-targ}}$在中间货舱的中点处应调整为 0。

3.4 调整船体梁剪力和弯矩的程序

3.4.1 一般要求

弯矩剪力调整程序描述了如何对三舱段有限元模型的船体梁水平弯矩、垂向剪力和垂向弯矩分布进行调整，使其在要求的位置达到要求的目标值。

船体梁剪力的目标位置在中间货舱的横舱壁处。目标位置处调整后得到的最终船体梁剪力不应超过船体梁目标剪力。

通常，船体梁弯矩的目标位置在中间舱的中心。如果最大弯矩不在中间货舱中心处，中间货舱范围内最终调整后的最大弯矩应不超过船体梁目标弯矩。

3.4.2 局部载荷分布

使用以下局部载荷计算船体梁剪力和弯矩：

（1）舱段模型全长范围内的船体结构钢材重量分布（静载）。船体结构钢材重量基于扣除 $0.5t_c$后的净厚度有限元模型，与舱段有限元模型一致。

（2）货物和压载水重量（静载）。

（3）海水静压力、波浪动压力以及上浪压力（如适用）。对于港内/舱室试验工况，只

需施加海水静压力。

（4）航行工况的货物和压载的动载荷。

上述局部载荷施加到有限元模型后，可以通过有限元加载程序得到有限元节点力。将每个纵向站位上的三维节点力累加生成局部载荷一维分布。纵向站位位于横舱壁/横框架处以及根据舱段模型网格尺寸要求位于横框架间的有限元模型典型纵向节点位置处。任何用于结构细节建模的中间节点不能作为计算局部载荷分布的纵向站位。处于纵向站位前后 1/2 站距范围内的节点力都应累加至该站上。应对于垂向和水平节点力分别累加，得到第 i 站位处的合成的垂向和水平局部载荷：f_{vi}和f_{hi}。

3.4.3 局部载荷产生的船体梁力和弯矩

假定模型两端简支，通过局部载荷分布得到船体梁载荷的纵向分布。模型两端的支反力和每个纵向站位处由局部载荷产生的船体梁剪力和弯矩沿纵向的分布可由下式确定：

$$R_{V_fore} = -\frac{\sum_i (x_i - x_{aft}) f_{vi}}{x_{fore} - x_{aft}} \qquad R_{V_aft} = \sum_i f_{vi} + R_{V_fore}$$

$$R_{H_fore} = \frac{\sum_i (x_i - x_{aft}) f_{hi}}{x_{fore} - x_{aft}} \qquad R_{H_aft} = -\sum_i f_{hi} + R_{H_fore}$$

$$F_l = \sum_i f_{li}$$

$$Q_{V_FEM}(x_j) = R_{V_aft} - \sum_i f_{vi} \quad \text{当} x_i < x_j \text{时}$$

$$Q_{H_FEM}(x_j) = R_{H_aft} + \sum_i f_{hi} \quad \text{当} x_i < x_j \text{时}$$

$$M_{V-FEM}(x_j) = (x_j - x_{aft}) R_{V_aft} - \sum_i (x_j - x_i) f_{vi} \quad \text{当} x_i < x_j \text{时}$$

$$M_{H-FEM}(x_j) = (x_j - x_{aft}) R_{H_aft} + \sum_i (x_j - x_i) f_{hi} \quad \text{当} x_i < x_j \text{时}$$

式中：

R_{V_aft}——在后端处的垂向反作用力，kN。

R_{V_fore}——在前端处的垂向反作用力，kN。

R_{H_aft}——在后端处的水平反作用力，kN。

R_{H_fore}——在前端处的水平反作用力，kN。

x_{aft}—— 尾端支撑处的 X 坐标，m。

x_{fore}—— 首端支撑处的 X 坐标，m。

f_{vi}—— 纵向站位 i 处的合成垂向局部载荷，定义见[3.4.2]，kN。

f_{hi}—— 纵向站位 i 处的合成水平局部载荷，定义见[3.4.2]，kN。

F_l—— 模型中总净纵向力，kN。

f_{li}—— 纵向站位 i 处的合成纵向局部载荷，定义见[3.4.2]，kN。

x_j—— 所考虑的纵向站位 j 处的 X 坐标，m。

x_i—— 纵向站位 i 的 X 坐标，m。

$Q_{V_FEM}(x_j)$、$Q_{H_FEM}(x_j)$、$M_{V-FEM}(x_j)$、$M_{H-FEM}(x_j)$：由施加在有限元模型中的局部载荷在纵向站位x_j处产生的垂向和水平剪力(kN)和弯矩(kNm)。支座反力的符号约定以产生正剪力为正。

3.4.4 纵向不平衡力

对于模型中的总净纵向力F_l不等于 0 的情况，应在 X 方向平移自由度δ_x被约束的模型一端施加纵向反力$(F_x)_j$，这可以通过对船体梁弯曲有效的所有纵向构件上施加分布的纵向轴向节点力来实现，如下所示：

$$(F_x)_j = \frac{F_l}{A_{x-n50}} \frac{A_{j-n50}}{n_j}$$

式中：

$(F_x)_j$—— 施加于第 j 个单元的一个节点上的轴向力，kN。

F_l—— 模型中净纵向力的和，定义见[3.4.3]，kN。

A_{j-n50}—— 第 j 个单元的净剖面面积，m^2。

A_{x-n50}—— 首端面的净剖面面积，m^2。

$$A_{x-n50} = \sum_j A_{j-n50}$$

n_j—— 横剖面上第 j 个单元的节点数，对于梁单元$n_j = 1$，对于 4 节点壳单元$n_j = 2$。

3.4.5 船体梁剪力调整程序

本要求定义的船体梁剪力调整程序适用于第 4 章第 8 节定义的所有有限元载荷组合。对于第 4 章第 8 节载荷组合表中未直接覆盖的载荷组合应逐个考虑。

以下两种方法应用于剪力调整：

（1）方法 1（M1）：在中间货舱的一个舱壁上进行剪力调整，见 [3.4.6]。

（2）方法 2（M2）：在中间货舱的两个舱壁上进行剪力调整，见 [3.4.7]。

对于所考虑的有限元载荷组合，应按如下方法选择适用的方法：

（1）对于最大剪力载荷组合（MAX SFLC），如果使用方法 1 对表 3.4.5(1)中定义的舱壁进行剪力调整后，另一个舱壁处的剪力不超过目标值，则使用方法 1 进行剪力调整，否则使用方法 2 进行调整。

（2）对于其它剪力载荷组合：

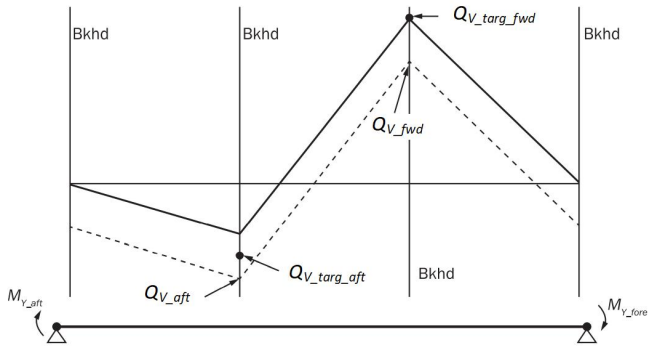
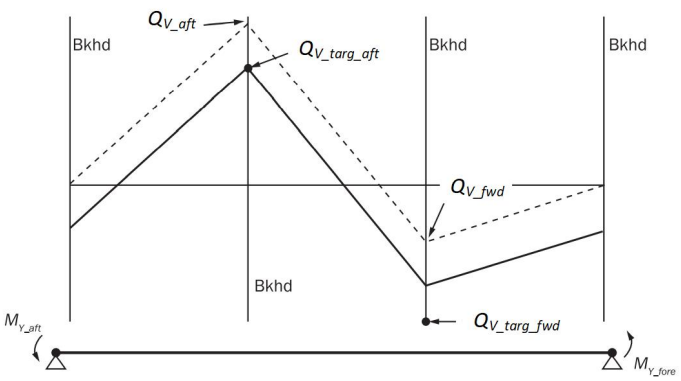
- 如果剪力值在两个舱壁处均小于或等于目标值则不需进行剪力调整。这适用于除最尾和最首货舱外的整个货舱区域的舱段分析。
  对于最尾和最首货舱舱段分析，应按照方法 1 进行剪力调整。后部和前部横舱壁处的船体梁垂向剪力目标值 $Q_{targ\text{-}aft}$ 和 $Q_{targ\text{-}fwd}$ 应分别按照局部载荷产生的剪力 Q_{aft} 和 Q_{fwd} 取值：
  $Q_{targ\text{-}fwd}=Q_{fwd}$
  $Q_{targ\text{-}aft}=Q_{aft}$
- 如果剪力值在一个舱壁处超过目标值且使用方法 1 进行剪力调整后另一个舱壁处的剪力值不超过目标值，则使用方法 1 进行调整，否则使用方法 2 进行调整。
- 如果两个舱壁处的剪力值均超过目标值则使用方法 2 进行调整。

剪力调整的中舱舱壁位置 **表 3.4.5(1)**

设计装载工况	舱壁位置	$M_{wv\text{-}LC}$	Q_{fwd} 状态	需进行剪力调整的中舱舱壁
航行工况	$X_{b-aft} > 0.5L$	<0（中垂）	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Fwd
			$Q_{fwd} \le Q_{aft}$	Aft
		>0（中拱）	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Aft
			$Q_{fwd} \le Q_{aft}$	Fwd
	$X_{b-fwd} < 0.5L$	<0（中垂）	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Aft
			$Q_{fwd} \le Q_{aft}$	Fwd
		>0（中拱）	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Fwd
			$Q_{fwd} \le Q_{aft}$	Aft
	$X_{b-aft} \le 0.5L$和$X_{b-fwd} \ge 0.5L$	-	-	Fwd 和 Aft

港内工况和试验工况	任意位置	-	-	Fwd 和 Aft
Fwd：前舱壁；Aft：后舱壁。				

方法 1 通过施加垂向弯矩M_{Y_aft}和M_{Y_fore}进行垂向剪力调整　　表 3.4.5(2)

垂向剪力图	中间货舱目标位置
	前舱壁
	后舱壁
调整后的垂向剪力 局部载荷产生的垂向剪力	

3.4.6 在一个舱壁上进行垂向剪力调整的方法 1

在中舱的下述横舱壁位置的剪力调整值由下列公式取得：

- 后舱壁

$$M_{Y_aft} = M_{Y_fore} = \frac{(X_{fore} - X_{aft})}{2}(Q_{targ-aft} - Q_{aft}) - M'_{1-aft}$$

$$\Delta Q_{aft} = \Delta Q_{fwd} = 0$$

$$\delta w'_1 = \frac{Q_{targ\text{-}aft} - Q_{aft} + R_{v_aft}}{(n_1 - 1)}$$，仅对最尾货舱模型

$$\delta w'_3 = \frac{Q_{targ\text{-}aft} - Q_{aft} + R_{v_fore}}{(n_3 - 1)}$$，仅对最首货舱模型

- 前舱壁

$$M_{Y_aft} = M_{Y_fore} = \frac{(X_{fore} - X_{aft})}{2}(Q_{targ-fwd} - Q_{fwd}) - M'_{1-fwd}$$

$\Delta Q_{aft} = \Delta Q_{fwd} = 0$

$\delta w'_1 = \dfrac{Q_{targ\text{-}fwd} - Q_{fwd} + R_{v_aft}}{(n_1 - 1)}$，仅对最尾货舱模型

$\delta w'_3 = \dfrac{Q_{targ\text{-}fwd} - Q_{fwd} + R_{v_fore}}{(n_3 - 1)}$，仅对最首货舱模型

式中：

M_{Y_aft}—— 为使船体梁垂向剪力发生如表 3.4.5 所示的调整而据[3.4.10]在尾端施加的垂向弯矩，kNm。符号按有限元模型的轴向确定。

M_{Y_fore}—— 为使船体梁垂向剪力发生如表 3.4.5 所示的调整而据[3.4.10]在首端施加的垂向弯矩，kNm。符号按有限元模型的轴向确定。

Q_{V_aft}—— 局部载荷产生的在中舱后舱壁位置处X_{b_aft}的垂向剪力值，kN，按[3.4.3]计算的局部载荷合力。

由于垂向剪力在横舱壁位置处不连续，Q_{V_aft}是中舱后舱壁前后位置处最大的剪力绝对值。

Q_{V_fwd}—— 局部载荷产生的在中舱前舱壁位置处X_{b_fwd}的垂向剪力值，kN，按[3.4.3]计算的局部载荷合力。

由于垂向剪力在横舱壁位置处不连续，Q_{V_fwd}是邻接中舱前舱壁前后站位处的最大的剪力绝对值。

$M'_{1\text{-}aft}$，$M'_{1\text{-}fwd}$——附加垂向弯矩，kNm，仅适用于最尾和最首货舱分析，取为：

- 最尾货舱模型

$$M'_{1-aft} = \frac{l_1}{4}(Q_{targ\text{-}aft} - Q_{aft} + R_{v_aft})$$

$$M'_{1-fwd} = \frac{l_1}{4}(Q_{targ\text{-}fwd} - Q_{fwd} + R_{v_aft})$$

- 最首货舱模型

$$M'_{1-aft} = \frac{l_3}{4}(Q_{targ\text{-}aft} - Q_{aft} + R_{v_fore})$$

$$M'_{1-fwd} = \frac{l_3}{4}(Q_{targ\text{-}fwd} - Q_{fwd} + R_{v_fore})$$

$\delta w'_1$——最尾货舱模型中的机舱强框架处的分布载荷，kN，见表 3.4.7（3）；

$\delta w'_3$——最首货舱模型中的艏尖舱强框架处的分布载荷，kN，见表 3.4.7（3）；

ΔQ_{aft}、ΔQ_{fwd}——表 3.4.7（3）给出的剪力调整值。

R_{v_aft}、R_{v_fore}——后端和前端处的反力，kN ；

l_1——最尾货舱模型中的机舱长度，m，见表 3.4.7（3）；

l_3——最首货舱模型中的艏尖舱长度，m，见表 3.4.7（3）；

n_1、n_3——强框架间距的数量，见表 3.4.7（3）。

3.4.7 在两个舱壁上进行垂向剪力调整的方法 2

在中舱的两个横舱壁处要求的剪力调整值应采用以下要求：

- 模型端部的垂向弯矩 M_{Y_aft}，M_{Y_fore}，以及
- 为得到横舱壁位置处的垂向剪力 ΔQ_{aft} 和 ΔQ_{fwd}，如表 7 所示横框架位置处施加垂向载荷。
- 对于最尾货舱和最首货舱模型，应在如表 3.4.7(2)所示的横框架处施加下列附

加垂向载荷：

- $\delta_{w'1}$：最尾货舱模型
- $\delta_{w'3}$：最首货舱模型

表 3.4.7 给出了由垂向弯矩和垂向载荷进行的剪力调整应用示例。

$$M_{Y_aft} = M_{Y_fore} = \frac{(X_{fore} - X_{aft})}{2} \cdot \frac{(Q_{targ\text{-}fwd} - Q_{fwd} + Q_{targ\text{-}aft} - Q_{aft})}{2} - M_2^{'}$$

$$\Delta Q_{fwd} = \frac{Q_{targ-fwd} - Q_{fwd} - (Q_{targ-aft} - Q_{aft})}{2}$$

$$\Delta Q_{aft} = -\Delta Q_{fwd}$$

- 最尾货舱模型

$$\delta w'_1 = \left(\frac{(Q_{targ-aft} - Q_{aft})(l - l_2 - l_1) + (Q_{targ-fwd} - Q_{fwd})(l - l_2 - l_3)}{2l - l_1 - 2l_2 - l_3} + R_{v_aft} \right) \frac{1}{(n_1 - 1)}$$

- 最首货舱模型

$$\delta w'_3 = \left(\frac{(Q_{targ-fwd} - Q_{fwd})(l - l_2 - l_3) + (Q_{targ-aft} - Q_{aft})(l - l_2 - l_3)}{2l - l_1 - 2l_2 - l_3} + R_{v_fore} \right) \frac{1}{(n_3 - 1)}$$

式中：M_{Y_aft}，M_{Y_fore}——为进行船体梁垂向剪力调整按[3.4.10]在后端和前端施加的垂向弯矩，kNm。符号与有限元模型坐标轴方向一致；

ΔQ_{aft}——中间货舱后舱壁处的剪力调整值，kN；

ΔQ_{fwd}——中间货舱前舱壁处的剪力调整值，kN。

M'_2 ——附加垂向弯矩，kNm，仅适用于最尾和最首货舱分析，取为：

- 最尾货舱模型

$$M'_2 = \frac{l_1(n_1 - 1)\delta w'_1}{4}$$

- 最首货舱模型

$$M'_2 = \frac{l_3(n_3 - 1)\delta w'_3}{4}$$

$\delta_{w'1}$——最尾货舱模型中的机舱强框架处的分布载荷，kN，见表 3.4.7（3）；

$\delta_{w'3}$——最首货舱模型中的艏尖舱强框架处的分布载荷，kN，见表 3.4.7（3）；

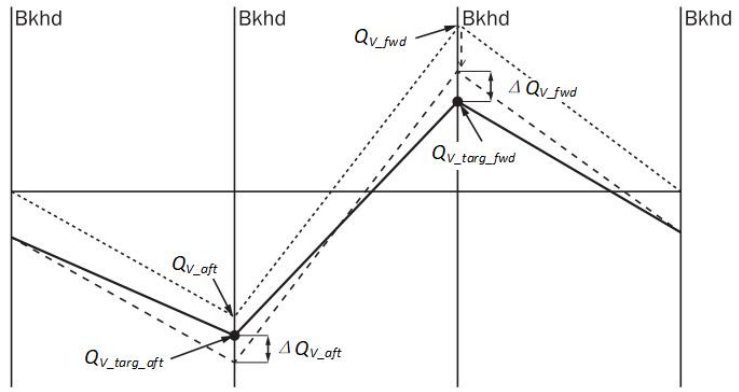
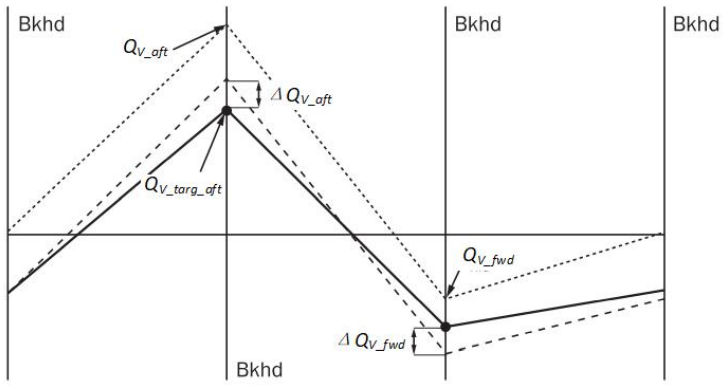
R_{v_aft}、R_{v_fore}——后端和前端处的反力，kN，定义见[3.4.3]；

l_1——最尾货舱模型中的机舱模型长度，m，也可见表 3.4.7（3）；

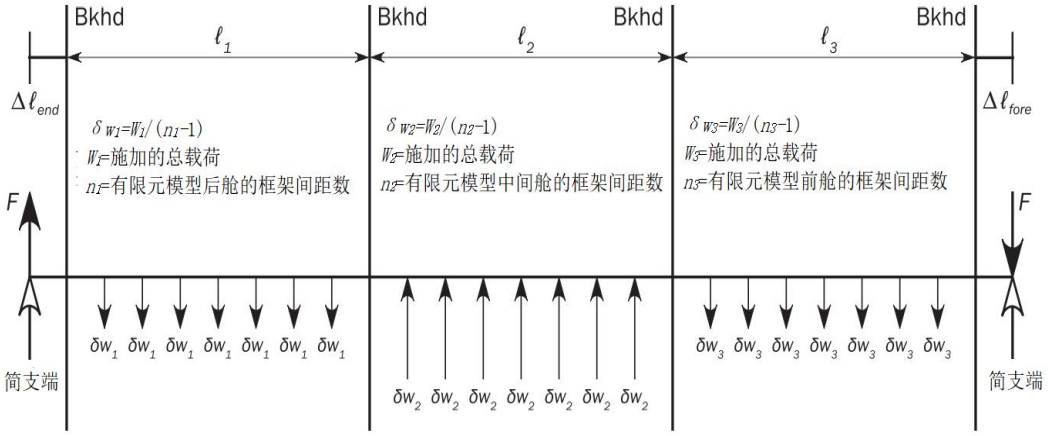
l_3——最首货舱模型中的艏尖舱模型长度，m，也可见表 3.4.7（3）；

n_1、n_3——强框架间距的数量，见表 3.4.7（3）。

通过施加垂向节点力调整的目标剪力和要求剪力　　表 3.4.7(1)

垂向剪力图	后舱壁 剪力目标值	前舱壁 剪力目标值
	$Q_{V_targ_aft}$ (-ve)	$Q_{V_targ_fwd}$ (+ve)
	$Q_{V_targ_aft}$ (+ve)	$Q_{V_targ_fwd}$ (-ve)
——— 两次调整后的垂向剪力 – – – – – – – – 使用M_{Y-aft}和M_{Y-fore}调整后的垂向剪力 ---------- 局部载荷产生的剪力		
注 1：-ve 指负向。 注 2：+ve 指正向。		

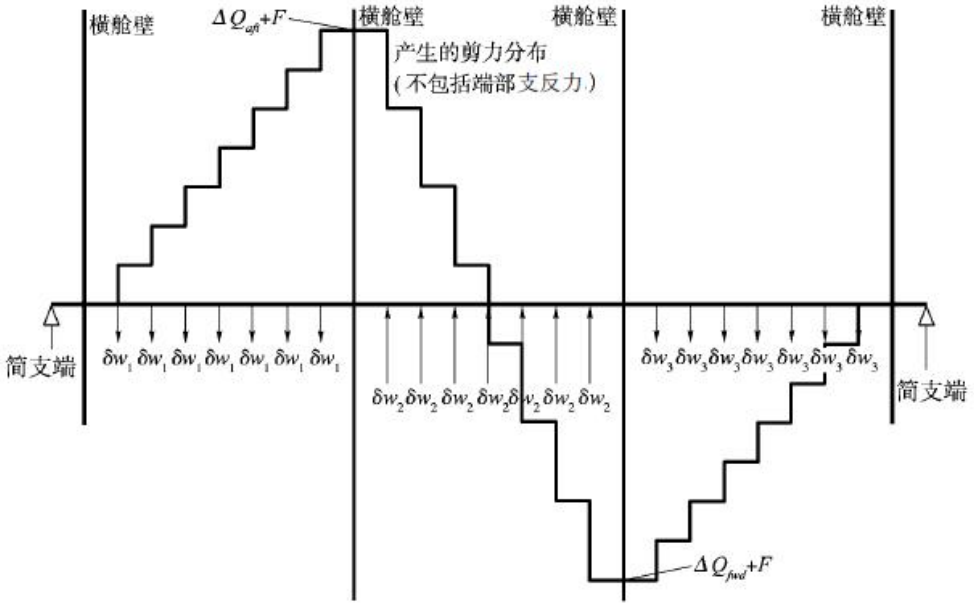
框架处垂向调整力的分布和结果剪力分布　　表 3.4.7(2)



注：横舱壁框架处不施加

最尾舱后端横舱壁和最首舱前端横舱壁之外的框架不加载

F 为支承端产生的反作用力



由于在框架处调整垂向力产生的剪力分布



注：如 $l_1=l_3$，$\Delta l_{fore}=\Delta l_{end}$，且载荷关于模型中点对称，则 F=0。

注 1：符号定义见表 3.4.7(3)。

用于垂向剪力调整的垂向载荷计算公式　　表 3.4.7(3)

$\delta w_1 = \frac{\Delta Q_{V_aft}(2l-l_2-l_3)+\Delta Q_{V_fwd}l_2+l_3}{(n_1-1)(2l-l_1-2l_2-l_3)} + \delta w'_1$

$\delta w2 = \frac{(W1+W3)}{(n_2-1)} = \frac{(\Delta Q_{V_aft}-\Delta Q_{V_fwd})}{(n_2-1)}$

$\delta w3 = \frac{-\Delta Q_{V_fwd}(2l-l_1-l_2)-\Delta Q_{V_aft}(l_1+l_2)}{(n_3-1)(2l-l_1-2l_2-l_3)} + \delta w'_3$

一般情况

$$F = F_{aft} = F_{fwd} = 0.5\left(\frac{W1(l_2+l_1)-W3(l_2+l_3)}{l}\right)$$

对最尾和最首货舱 FE 模型

$$F = F_{aft} = \left(\frac{W1(\Delta l_{fore}+l_3+l_2+0.5l_1)+W2(\Delta l_{fore}+l_3+0.5l_2)+W3(\Delta l_{fore}+0.5l_3)}{l}\right)$$

其中：

l_1——　模型后货舱长度。

l_2——　模型中货舱长度。

l_3——　模型前货舱长度。

ΔQ_{V_aft}——　中舱后舱壁处要求的剪力调整值，参见[3.4.7],kN。

ΔQ_{V_fwd}—　中舱前舱壁处要求的剪力调整值，参见[3.4.7], kN。

F——　由于在框架处施加垂向力而引起的端部反作用力，kN。

$W1$——　平均分布于有限元模型后舱的垂向力的和，$(n_1-1)\delta w_1$，kN。

$W2$——　平均分布于有限元模型中舱的垂向力的和，$(n_2-1)\delta w_2$，kN。

$W3$——　平均分布于有限元模型前舱的垂向力的和，$(n_3-1)\delta w_3$，kN。

n_1——　有限元模型后舱框架间距数。

n_2——　有限元模型中舱框架间距数。

n_3——　有限元模型前舱框架间距数。

δw_1——　分布力，作用在有限元模型后舱框架处，kN。

$\delta w2$——　分布力，作用在有限元模型中舱框架处，kN。

$\delta w3$——　分布力，作用在有限元模型前舱框架处，kN。

$\delta_{w'_1}$——　最尾货舱模型中的机舱强框架处的附加分布载荷，kN。[3.4.6] 和 [3.4.7] 给出了方法 1 和方法 2 剪力调整相应的$\delta_{w'_1}$的公式。

$\delta_{w'_3}$——　最首货舱模型中的艏尖舱强框架处的附加分布载荷，kN。[4.4.6] 和 [4.4.7] 给出了方法 1 和方法 2 剪力调整相应的$\delta_{w'_3}$的 公式。

Δl_{end}——　有限元模型后舱后舱壁距后端的距离。

Δl_{fore}——　有限元模型前舱前舱壁距前端的距离。

l——　包括超出端部舱壁以外部分在内的有限元模型的总长：$= l_1 + l_2 + l_3 + \Delta l_{end} + \Delta l_{fore}$

注 1：公式中载荷、载力以及剪力调整的正方向与表 3.4.7(1)和表 3.4.7(2)中的一致。

注 2:：W1 + W3＝W2(不适用于最首和最尾货舱 FE 模型)

注 3：上述公式仅适用于在各自舱内具有等框架间距的情况。各舱的长度和框架间距可以不相同。

对于在各个货舱内存在不均匀框架间距的情况，按照表 3.4.7（3）使用平均框架间距 $l_{av\text{-}i}$ 计算平均框架分布载荷 $\delta w_{av\text{-}i}$，其中 i=1，2，3 代表各个货舱。然后， $\delta w_{av\text{-}i}$ 按下式重新分布至不均匀的框架上：

$$\delta w_i^k = \delta w_{av-i} \frac{l_{av-i}^k}{l_{av-i}} \qquad k=1,2,\ldots,n_i\text{-}1$$，对于货舱 i 的每个框架，i=1，2，3

式中：

l_{av-i}—— 平均框架间距，在货舱 i 中使用 l_i/n_i 计算得到，其中 i=1，2，3。

l_i—— 货舱 i 的长度，m，其中 i=1，2，3，定义见表 3.4.7(3)。

n_i—— 货舱 i 中的框架间距数，，其中 i=1，2，3，定义见表 3.4.7(3).

δw_{av-i}—— 在货舱 i 内，按表 3.4.7(3)使用平均框架间距 $l_{av\text{-}i}$ 计算得出的平均一致框架间距（m）分布力，其中 i=1，2，3。

δw_i^k—— 在货舱 i 内不均匀框架 k 上的分布力，kN。

l_{av-i}^k—— 货舱 i 内框架 k 的等效框架间距按下式取，m，其中 k=1,2,…,n_i-1。

$$l_{av-i}^k = l_i^1 - \frac{l_{av-i} l_i^1}{l_i^1 + l_i^{n_i}} + \frac{l_i^2}{2}$$ 对于货舱 i 中的 k=1(第一个框架)

$$l_{av-i}^k = \frac{l_i^k}{2} + \frac{l_i^{k+1}}{2}$$ 对于货舱 i 中的 k=2,3,…,n_i-2

$$l_{av-i}^k = l_i^{n_i} - \frac{l_{av-i} l_i^{n_i}}{l_i^1 + l_i^{n_i}} + \frac{l_i^{n_i-1}}{2}$$ 对于货舱 i 中的 k=n_i-1(最后一个框架)

l_i^k—— 货舱 i 中框架 k-1 和框架 k 间的间距，m。

均匀框架间距所要求的垂向载荷δw_i或非均匀框架间距所要求的垂向载荷δw_i^k应通过第 5 章附录 1 所述的剪流分布方法施加到指定的横剖面上。对于垂向载荷δw_i作用下的框架剖面，在单元中点处计算的剪流q_f为：

$$q_{f-k} = \frac{\delta w_i}{I_{y-n50}} Q_{k-n50}$$

式中：

q_{f-k}—— 在横框架的第 k 个单元的中点处计算的剪流，N/mm.

δw_i—— 第 i 货舱每个横框架上的分布力，见表 3.4.7(3)，N，其中 i=1，2，3。

I_{y-n50}—— 船体梁横剖面惯性矩，mm^4。

Q_{k-n50}—— 由横剖面的开口端（剪应力自由端）开始至剪流 $q_{f\text{-}k}$ 的点 s_k 的累积剖面积关于中和轴的一次矩，mm^3，计算公式如下：

$$Q_{k-n50} = \int_0^{S_k} z_{neu} t_{n50} ds$$

z_{neu}—— 由积分点 s 至垂向中性轴垂向距离。

t_{n50}—— 横剖面积分点处的板净厚度，mm。

横框架处第 j 个有限元网格点处的分布剪力，F_{grid}由连接单元的剪流按下式获得：

$$F_{j-grid} = \sum_{k=1}^{n} q_{f-k} \frac{l_k}{2}$$

式中：

l_k—— 横框架上连接到节点 j 的第 k 个单元的长度，mm。

n——　连接到节点 j 的单元总数。

剪流在横剖面上具有方向，因而分布力F_{grid}是一个向量力。对于垂向船体梁剪力修正，需将上述剪流方法算得的垂向力和水平力分量施加至横剖面。

3.4.8 调整船中货舱区域垂向和水平弯矩的程序

对于需要达到垂向弯矩目标值的情况，应在舱段有限元模型的两端施加一个附加的垂向弯矩，以便在模型中间货舱达到此目标值。端部垂向弯矩按下式计算：

$$M_{v-end} = M_{v-targ} - M_{v-peak}$$

其中：

M_{v-end}——　根据[3.4.7]应施加于有限元模型两端的附加垂向弯矩，kNm。

M_{v-targ}——　中拱（正）或中垂（负）垂向弯矩，定义见[3.3.2]，kNm。

M_{v-peak}——　[3.4.3]所述局部载荷和[3.4.5]所定义剪力调整在中间货舱范围内产生的最大或最小弯矩，kNm。

如果 $M_{v\text{-}targ}$ 中拱（正）弯矩，则 $M_{v\text{-}peak}$ 取最大值;如果 $M_{v\text{-}targ}$ 为中垂（负）弯矩，则 $M_{v\text{-}peak}$ 取最小值。$M_{v\text{-}peak}$ 的计算基于简支梁模型，具体计算如下：

$$\mathrm{M_{v-peak}} = Extremum\left\{M_{v_FEM}(x) + M_{lineload} + M_{Y_aft}\left(2\frac{x-x_{aft}}{x_{fore}-x_{aft}} - 1\right)\right\}$$

$M_{v_FEM}(x)$——　[3.4.3]所述局部载荷在 x 位置处产生的垂向弯矩，kNm。

M_{Y_aft}——　端部弯矩，kNm，如下述取值：

使用方法 1：按[3.4.6]取值。

使用方法 2：按[3.4.7]取值。

其它情况：$M_{Y_{aft}}$=0

$M_{lineload}$——　按方法 2 在框架处施加的垂向线载荷在 x 位置处产生的垂向弯矩，kNm，按下式计算：

$$M_{lineload} = -\left(x - x_{aft}\right)F - \sum_i (x - x_i)\,\delta w_i，\ 当x_i < x时$$

F——　如表 3.4.7(2)所示的在横框架处施加的垂向载荷在模型端部产生的支反力，kN。

X——　中间货舱横框架的 x 坐标，m。

δw_i——　为产生要求的剪力而在横框架i处施加的垂向载荷。

对于需要达到水平弯矩目标值的情况，应在舱段有限元模型的两端施加一个附加的水平弯矩，以便在模型中货舱内达到目标值。附加水平弯矩按下式计算：

$$M_{h-end} = M_{h-targ} - M_{h-peak}$$

M_{h-end}——　据[3.4.8]应施加于有限元模型两端的附加水平弯矩，kNm。

M_{h-targ}——　水平弯矩目标值，见[3.3.4]。

M_{h-peak}——　[3.4.3]所述局部载荷在中间货舱长度范围内产生的最大或最小水平弯矩，kNm。

如果 $M_{h\text{-}targ}$ 为正（右舷处于受拉状态），则 $M_{h\text{-}peak}$ 取最大水平弯矩；如果 $M_{h\text{-}targ}$ 为负（左舷处于受拉状态），则 $M_{h\text{-}peak}$ 取最小水平弯矩。$M_{h\text{-}peak}$ 的计算基于简支梁模型，如下式：$M_{h-peak} = Extremum\{M_{H_FEM}(x)\}$

$M_{H_FEM}(x)$——　[3.4.3]所述局部载荷在 x 位置处产生的水平弯矩，kNm。

垂向和水平弯矩应在中间货舱长度范围内进行计算以便确定每一个最大/最小弯矩所在的位置和值。

3.4.9 调整船中货舱区域外垂向和水平弯矩的程序

如[4.3.2]所述，为了在每一个框架和横舱壁位置处达到船体梁垂向目标值，在有限元模型的强框架和横舱壁位置上施加垂向弯矩调整值 m_{vi}，如图 3.4.9 所示。在每个纵向位置 i 处的垂向弯矩调整值应按下式计算：

$$f(i) = M_{v\text{-}targ}(i) - M_{v\text{-}FEM}(i) - M_{lineload}(i) - M_{Y_aft} \cdot \left(2\frac{x_i - x_{aft}}{x_{fore} - x_{aft}} - 1 \right)$$

$$m_{vi} = \frac{f(i) + f(i+1)}{2} - \sum_{j=0}^{i-1} m_{vj}$$

$$m_{v-end} = -\sum_{j=0}^{n_t} m_{vj}$$

式中：i ——对应于第 i 站的索引，由尾端面从 1 开始至 n_t。

n_t——施加垂向调整弯矩 m_{vi} 的纵向站位总数。

m_{vi} ——施加于处于站位 i 处的横框架或横舱壁上的垂向弯矩调整值，kNm。

$m_{v\text{-}end}$——施加在模型前端面（n_t+1 站位）处的垂向弯矩调整值，kNm。

m_{vj}——求和参数，按如下取值：

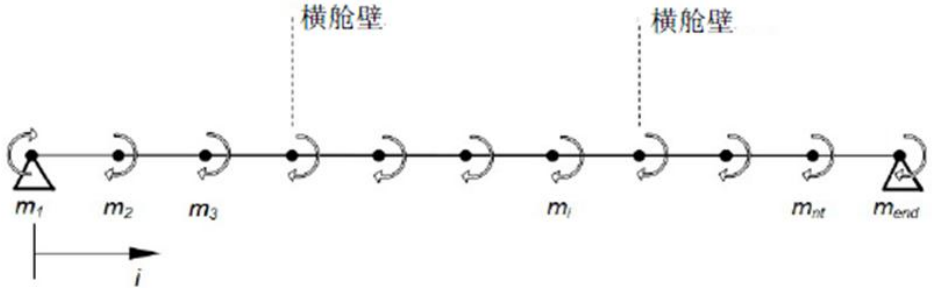
m_{v0}=0　　当 j=0

m_{vi}= m_{hi}　当 j=i

$M_{v\text{-}targ}(i)$ ——站位 i 处要求的垂向目标弯矩，kNm，按[3.3.2]计算。

$M_{v\text{-}FEM}(i)$　——局部载荷在站位 i 处产生的垂向弯矩分布，kNm，按[3.4.3]计算。

$M_{lineload}(i)$ ——为进行垂向剪力修正而施加的线载荷在站位 i 处产生的垂向弯矩，kNm，见[3.4.8]。



此图中 m_{hi} 可以替换为 m_{vi}，m_i 是有限元坐标系下的正弯矩。

图 3.4.9 船中货舱区域外的弯矩调整

为了在[3.3.4]中定义的每个横框架和横舱壁位置处达到船体梁水平目标值，应在有限元模型的横框架和横舱壁位置处施加水平弯矩调整值 m_{hi}，如图 3.4.9 所示。在每个纵向位置 i 处的水平弯矩调整值应按下式计算：

$$f(i) = M_{h\text{-}targ}(i) - M_{H-FEM}(i)$$

$$m_{hi} = \frac{f(i) + f(i+1)}{2} - \sum_{j=0}^{i-1} m_{hj}$$

$$m_{h-end} = -\sum_{j=0}^{n_t} m_{hj}$$

式中：i——弯矩调整值 m_{hi} 的纵向位置。

n_t——施加水平调整弯矩 m_{hi} 的纵向站位总数。

m_{hi}——应施加于站位 i 处的横框架或横舱壁上的水平弯矩调整值，kNm。

$m_{h\text{-}end}$——施加在模型前端面（n_t+1 站位）处的水平弯矩调整值，kNm。

m_{hj}——求和参数，按如下取值：

m_{h0}=0　当 j=0

m_{hj}= m_{hi}　当 j=i

$M_{h\text{-}targ}(i)$——站位 i 处要求的水平目标弯矩，kNm，按[4.3.4]计算。

$M_{H\text{-}FEM}(i)$　——局部载荷在站位 i 处产生的水平弯矩分布，kNm，按[3.4.3]计算。

垂向和水平弯矩调整值，m_{vi} 和 m_{hi}，应施加在有限元模型的所有横框架和横舱壁位置处。通过在船体梁纵向有效抗弯单元上沿纵向分配轴向节点力的方法将调整值施加到有限元模型上，如[3.4.10]所述。

3.4.10 在有限元模型上施加弯矩调整值

采用在横剖面所有船体梁总纵弯曲有效单元上分布沿纵向的轴向力的方法，将要求的垂向和水平弯矩调整值施加到所考虑的舱段模型横剖面上，如下：

- 对于垂向弯矩：

$$(\mathrm{F_x})_i = \frac{M_v}{I_{y-n50}} \frac{A_{i-n50}}{n_i} z_i$$

- 对于水平弯矩：

$$(\mathrm{F_x})_i = \frac{M_h}{I_{z-n50}} \frac{A_{i-n50}}{n_i} y_i$$

式中：

M_v——　施加在模型所考虑剖面上的垂向弯矩调整值，kNm。

M_h——　施加在模型端部所考虑剖面上的水平弯矩调整值，kNm。

$(F_x)_i$——　施加在第 i 个单元节点上的轴向力，kN。

I_{y-n50}——　所考虑横剖面关于其水平中和轴的船体梁垂向惯性矩，m^4。

I_{z-n50}——　所考虑横剖面关于其垂直中和轴的船体梁水平惯性矩，m^4。

z_i——　中和轴至第 i 单元横剖面形心处的垂向距离，m。

y_i——　中和轴至第 i 单元横剖面形心处的横向距离，m。

A_{i-n50}——　第 i 个单元的横剖面面积，m^2。

n_i——　横剖面上第 i 个单元的节点数，对于梁单元，n_i=1，对于 4 节点壳单元，n_i=2。

对于非模型端部的横剖面，应使用所考虑横剖面前后相应第 i 个单元的剖面积的平均值。

3.5 调整船体梁扭矩的程序

3.5.1 一般要求

本子条款描述了调整有限元舱段模型的船体梁扭矩分布以使在目标位置处达到目标扭矩的程序。船体梁扭矩目标值在[3.3.5]中给出。

3.5.2 局部载荷产生的扭矩

由于局部载荷在纵向站位 i 处产生的扭矩，$\mathrm{M_{T-FEMi}}$，kNm，由下述公式确定（见图 3.5.2）：

$$\mathrm{M}_{T-FEMi} = \sum_k [f_{hik}(z_{ik} - z_r)] - \sum_k (f_{vik} y_{ik})$$

式中：

M_{T-FEMi}——　局部载荷在纵向站位 i 处产生的累积扭矩，kNm。

z_r—— 扭转参考点的垂向坐标，m，取第 4 章第 4 节[3.5.1]中的 Z_{SC}。

f_{hik}—— 纵向站位 i 处节点 k 的水平节点力，kN。

f_{vik}—— 纵向站位 i 处节点 k 的垂向节点力，kN。

y_{ik}—— 纵向站位 i 处节点 k 的 Y 坐标，m。

z_{ik}—— 纵向站位 i 处节点 k 的 Z 坐标，m。

$\mathrm{M}_{T-\mathrm{FEM0}}$—— 局部载荷在有限元模型尾端处产生的累积扭矩，kNm，按下式取值：

$$M_{T-FEM0} = \sum_k [f_{h0k}(z_{0k} - z_r)] - \sum_k f_{v0k} y_{0k} + R_{H_{aft}}(z_{ind} - z_r)$$

$\mathrm{R}_{\mathrm{H_fwd}}$—— 前端处的水平反作用力，kN，定义见[3.4.3]。

$\mathrm{R}_{\mathrm{H_aft}}$—— 尾端处的水平反作用力，kN，定义见[3.4.3]。

$\mathrm{z}_{\mathrm{ind}}$—— 独立点的垂向坐标，m，定义见[1.5.2]。

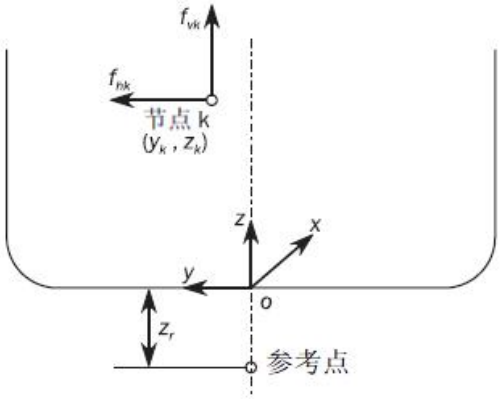


图 3.5.2 站位扭矩的力和作用位置

3.5.3 船体梁扭矩

船体梁扭矩，$M_{T\text{-}FEM}(x_j)$，kNm，通过由后端面开始累积每一站上的扭矩得到，如下式所示：

$$\mathrm{M}_{T-FEM}(x_j) = \sum_i M_{T-FEMi}$$

- 对于最首舱段模型，$x_i \geqslant x_j$
- 其它情况：$x_i < x_j$

式中：

$\mathrm{M}_{T-FEM}(x_j)$—— 纵向站位 x_j 处的船体梁扭矩，kNm。

x_j—— 纵向站位 j 处的 X 坐标，m。

扭矩分布在[3.5.2]中给出，在每一个纵向站位处有一个陡变。

3.5.4 调整船体梁扭矩至目标值的程序

船体梁扭矩应通过在模型后端面的独立点上施加船体梁扭矩 $M_{T\text{-}end}$(kNm)来调整，如下式所示：

$$M_{T-end} = M_{wt-targ} - M_{T-FEM}(x_{targ})$$

式中：

x_{targ}—— 船体梁扭矩目标位置处的 X 坐标，m，定义见[3.3.5]。

$M_{wt-targ}$—— 在目标位置处应达到的船体梁目标扭矩，kNm，详见[3.3.5]。

$M_{T-FEM}(x_{targ})$——　目标位置处由于局部载荷产生的船体梁扭矩，kNm。

由于在每个纵向站位处船体梁扭矩分布有陡变，船体梁扭矩应据目标位置处前后的值来确定：正扭矩取最大值，负扭矩取最小值。

4 分析衡准

4.1 一般要求

4.1.1 结构构件

评估区域中的下述结构构件应按[4.2]和[4.3]中的衡准进行验证：

(1) 所有船体梁纵向结构构件，

(2) 所有主要支撑构件和中间货舱内的舱壁，

(3) 组成横舱壁的所有结构构件。

(4) 凳结构及与其相连的纵桁和双层底实肋板，以及局部纵桁

(5) 边舱平面舱壁的水平桁及其相连的横向结构

(6) 组成机器处所前端横舱壁的所有结构构件和此横舱壁之后 15%的最尾货舱舱长范围内的所有船体梁纵向结构构件。

4.1.2 评估区域

针对验收衡准的结果验证应在中舱长度范围内进行，如图 4.1.1 所示。

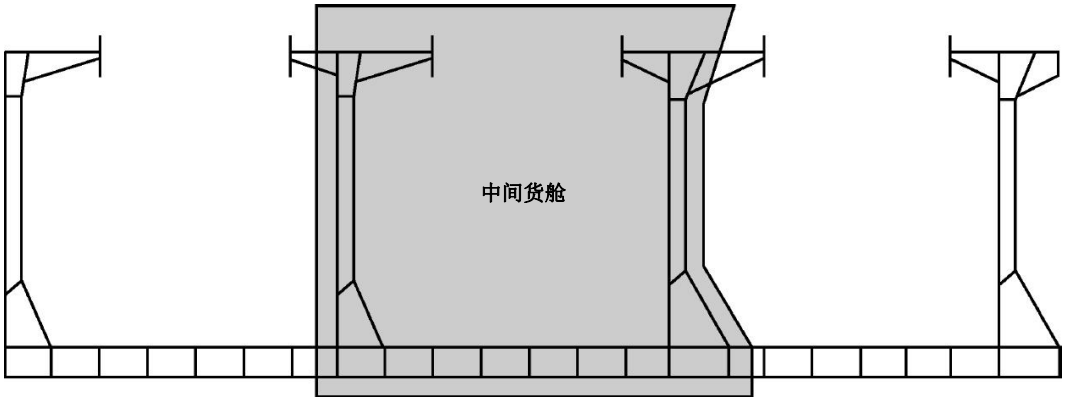


图 4.1.1 评估区域的纵向范围

4.2 屈服强度评估

4.2.1 Von Mises 应力

对于[4.1.2]中定义结构构件的所有板，其 Von Mises 应力σ_{vm}（N/mm^2）应基于壳单元的膜正应力和剪应力进行计算。应采用单元中心的中面应力进行评估，如下式：

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

式中：

σ_x——　单元膜 x 方向正应力，N/mm^2。

σ_y——　单元膜 y 方向正应力，N/mm^2。

τ_{xy}——　单元剪应力，N/mm^2。

4.2.2 梁和杆单元的轴向应力

对于梁单元和杆单元，轴向应力σ_{axial}（N/mm^2）应只基于轴向力计算。应采用单元长度中点处的轴向应力进行评估。

4.2.3 粗网格许用屈服利用因子

表 4.2.3 给出的粗网格许用屈服利用因子λ_{yperm}是基于[1.2]和[1.5]所述的网格尺寸和单元类型。

每个结构构件的单元应力计算出的屈服利用因子不应超过表 4.2.3 中的许用值。

粗网格许用屈服利用因子　　表 4.2.3

结构构件	粗网格许用屈服利用因子，λ_{yperm}
所有纵向船体梁结构构件、主要支撑构件和舱壁的板。 使用壳或杆单元建模的主要支撑构件的面板。	1.0（航行工况）
所有纵向船体梁结构构件、主要支撑构件和舱壁的板。 使用壳或杆单元建模的主要支撑构件的面板。	0.8（港内工况）

4.2.4 屈服衡准

结构单元应符合以下衡准：

$$\lambda_y \le \lambda_{yperm}$$

式中：

λ_y——　屈服利用因子。

一般情况下，对于板单元：$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_y}$。

一般情况下，对于杆单元或梁单元：$\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y}$

σ_{vm}——　Von Mises 应力，N/mm^2。

σ_{axial}——　杆或梁单元的轴向力，N/mm^2。

R_y——　许用应力，取$R_y = 235/K$

λ_{yperm}——　粗网格的许用屈服利用因子，定义见表 4.2.3。

对于应进行细化网格分析的区域，如果其舱段有限元分析的单元 Von Mises 应力超过了屈服衡准，则细化网格分析中，在等效于舱段有限元分析模型网格尺寸面积范围内的平均 Von Mises 应力应满足上述屈服衡准。

4.2.5 开孔的剪应力修正

除[4.2.6]中所示以外，腹板开孔处的单元剪切应力应根据下式对其因剪切面积的损失进行修正。用于计算按屈服衡准进行验证的单元的 Von Mises 应力应采用修正后的单元剪切应力。

$$\tau_{cor} = \frac{h\, t_{mod-n50}}{A_{shr-n50}} \tau_{elem}$$

式中：

τ_{cor}——　修正后的单元剪切应力，N/mm^2。

h——　开孔处桁材腹板高度，mm，如表 1.5.4 所示。对于开孔几何已建模的情况，h取桁材腹板高度减去已建模开孔高度后的高度。

$t_{mod-n50}$——　开孔处的腹板建模厚度，mm。

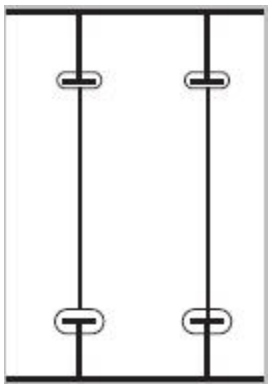
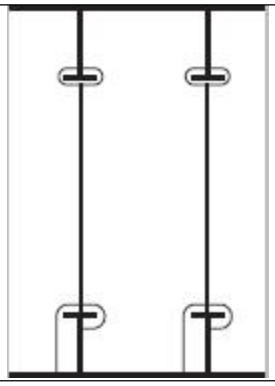
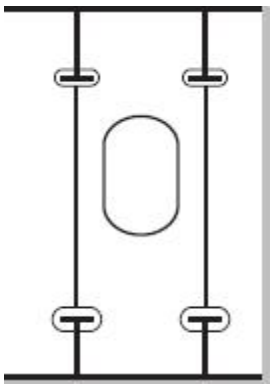
$A_{shr-n50}$——　腹板的有效净剪切面积，mm，应取腹板面积减去因开孔（包括骨材开孔）损失的面积后的面积，具体计算按第 3 章第 7 节[1.4.8]进行。

τ_{elem}——　修正前的单元剪切应力，N/mm^2。

4.2.6 开孔剪应力修正的免除

对于表 4.2.6 中列出的情况，若λ_y/C_r符合[4.2.4]中的衡准，则不要求进行开孔的单元剪应力修正。

剪切修正的免除 **表 4.2.6**

标识	图形	建模剪切面积与有效净剪切面积的差占建模剪切面积的百分比 $\frac{A_{FEM-n50}-A_{shr-n50}}{A_{FEM-n50}}\cdot 100\%$	屈服衡准折减因子，c_r
安装有补板或领板的局部支撑骨材的上下开孔		$<15\%$	0.85
安装有补板或领板的局部支撑骨材的上下开孔		$<20\%$	0.80
开孔处，安装有领板的局部支撑骨材的上下开孔		$<40\%$	0.60
$A_{shr-n50}$——腹板的有效净剪切面积，mm^2，应取腹板面积减去所有开孔面积和骨材通焊孔的面积后的面积，按第 3 章第 7 节[1.4.8]进行。			

4.3 屈曲强度评估

4.3.1 所有按本节要求进行有限元分析的结构单元均应按第 9 章第 4 节进行屈曲强度评估。

第 3 节　局部结构细化分析

1 适用范围

1.1 一般要求

1.1.1 结构细节处的局部强度分析应按照本节的要求进行。

1.1.2 用于细化分析的结构构件上关键部位的选择应按本节的要求进行。

1.1.3 细网格分析程序

细网格分析的细节位置应按照本节[4]的要求进行建模，使用[5]定义的有限元载荷组合，并应符合[6]中的衡准。

1.1.4 局部结构强度验证范围

细网格验证应按下述要求进行：

（1）结构细节处的细网格分析按[2]进行。

（2）筛选程序如[3]所述。

2 评估区域

2.1 评估细节列表

2.1.1 在货舱区域，以下结构细节应根据[1.1.3]中定义的细网格分析程序进行评估：

（1）纵舱壁与内底板相交处；

（2）槽型横舱壁与底凳相交处；

（3）底凳与内底相交处。

对于上述每一个结构细节，应选择具有最大屈服因子 λ_y 的结构进行细化分析。

3 筛选程序

3.1 结构细节列表

3.1.1 下述结构细节和区域应按[3.2]进行筛选评估。

（1）纵舱壁折角处；

（2）纵舱壁与甲板相交处；

（3）舱口角隅处；

（4）平面横舱壁水平桁的趾端；

（5）平面横舱壁垂直扶强材与甲板纵骨、外底纵骨相交处；

（6）高应力区域开孔处。

对于在货舱区域内具有相同几何和相对位置的各组结构细节，筛选验证可仅对具有最大屈服利用因子 λ_y 的结构细节进行。

3.2 筛选衡准

3.2.1 筛选因子和许用筛选因子

[3.1]所定义结构区域，按照所有适用的有限元载荷组合计算得到的应力，按以下筛选衡准进行验证：

$$\lambda_{sc} \leq \lambda scperm$$

式中：λ_{sc}—筛选因子。

$\lambda scperm$—许用筛选因子。

对于不满足筛选衡准的位置，相应结构细节应根据[1.1.3]进行细化网格分析。

筛选因子和许用筛选因子　　表 3.2.1(1)

细节类型	筛选因子，λ_{sc}	许用筛选因子，λ_{scperm}
开孔或人孔（1）	λ_y	$0.85\,\lambda_{yperm}$
舱口角区域	λ_y	$0.95\,\lambda_{yperm}$
主要支撑构件肘板趾端	表 3.2.1(2)	1.50
主要支撑构件连接处	λ_y	$0.9\,\lambda_{yperm}$

其中：

λ_y——　粗网格的屈服利用因子，定义见第 7 章第 2 节[4.2.3]。

λ_{yperm}——　粗网格的许用屈服利用因子，定义见第 7 章第 2 节[4.2.3]。

（1）应使用人孔和大开口周围的具有最大屈服利用因子的典型单元进行衡准验证。

主要支撑构件肘板趾端的筛选因子　　表 3.2.1(2)

λ_{SC}——　筛选因子，按下式取值：

$$\lambda_{sc} = C_a\left(0.68\left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{0.5}\sigma_{vm} + 0.50\left(\frac{A_{beam-n50}}{b_1 t_{n50}}\right)^{0.5}|\sigma_{beam}|\right)\frac{k}{235}$$

C_a——　系数，按下式取值：

$$C_a = 1.0 - 0.2\left(\frac{R_a}{1400}\right)^2$$

b_1、b_2——　舱段有限元模型肘板趾端处壳单元的高度，mm。

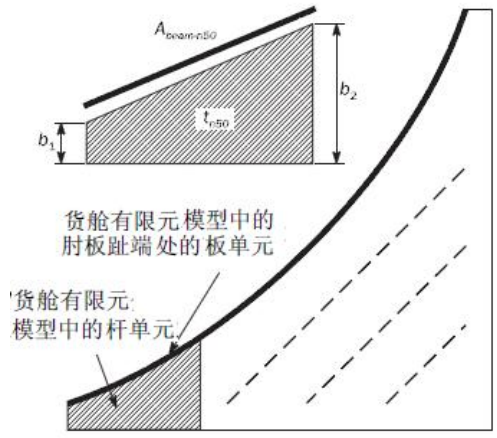
$A_{beam\text{-}n50}$——　舱段有限元模型中代表肘板面板的梁或杆单元的剖面积，mm^2。

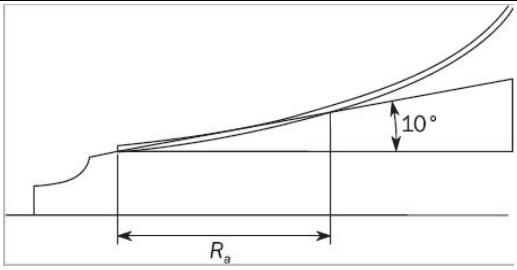
σ_{beam}——　舱段有限元分析确定的梁或杆单元的轴向应力，N/mm^2。

σ_{vm}——　舱段有限元分析确定的肘板趾端处的壳单元的 Von Mises 应力，N/mm^2。

t_{n50}——　肘板趾端处的壳单元的净厚度，mm。

R_a——　臂长，mm，取值应不大于 1400mm。





4 结构建模

4.1 一般要求

4.1.1 细节处的应力评估要求在高应力区域使用细化的有限元网格。这种细化网格分析可以通过在舱段模型中嵌入细化网格区域的方法进行。另外，也可以使用单独的包含细化网格区域的局部有限元模型，其边界条件从舱段模型中获取。

4.2 模型范围

4.2.1 如果使用独立的局部细化网格模型，其范围设置应保证校核区域计算的应力受施加的边界条件的显著影响。细化网格模型的边界应位于舱段模型的主要支撑构件处，如横框架、桁材、水平桁和实肋板等。

4.3 网格尺寸

4.3.1 细网格区域的网格尺寸应不大于 $50 \times 50\text{mm}$。

4.3.2 细化网格区域的范围应由校核区域向各个方向延伸不少于 10 个单元。细网格区域至细网格模型的边界应保持网格密度光滑过渡。

4.4 单元

4.4.1 细网格区域中的所有板应使用壳单元表示。细网格区域中的单元长宽比应尽可能接近 1。在细网格区域中应避免网格密度变化和三角形单元的使用。在任何情况下，细网格模型中的单元的长宽比都不应超过 3。应避免使用单元角度小于 45 度和大于 135 度的扭曲单元。细网格区域中的骨材应使用壳单元建模。细网格区域外的骨材可以使用梁单元建模。

4.4.2 对于要求进行细网格分析的主要肘板端部连接，包括舱口围板趾端连接，细网格区域应由评估区域向周围各个方向延伸至少 10 个单元。

4.4.3 对于需进行细网格分析的开孔位置，开孔周围的最内两层单元的网格尺寸应不大于 $50 \times 50mm$。由细网格至较粗网格应保持光滑过渡。直接焊接在开孔边缘的边缘骨材应使用壳单元建模。在距离开孔边缘至少 50mm 以外的腹板骨材可以使用杆单元或梁单元建模。开孔周围的细网格区域示例如图 4.4.3 所示。

4.4.4 开孔、主要支撑构件及其相连肘板的面板应在其每侧沿宽度方向至少划分两个单元。

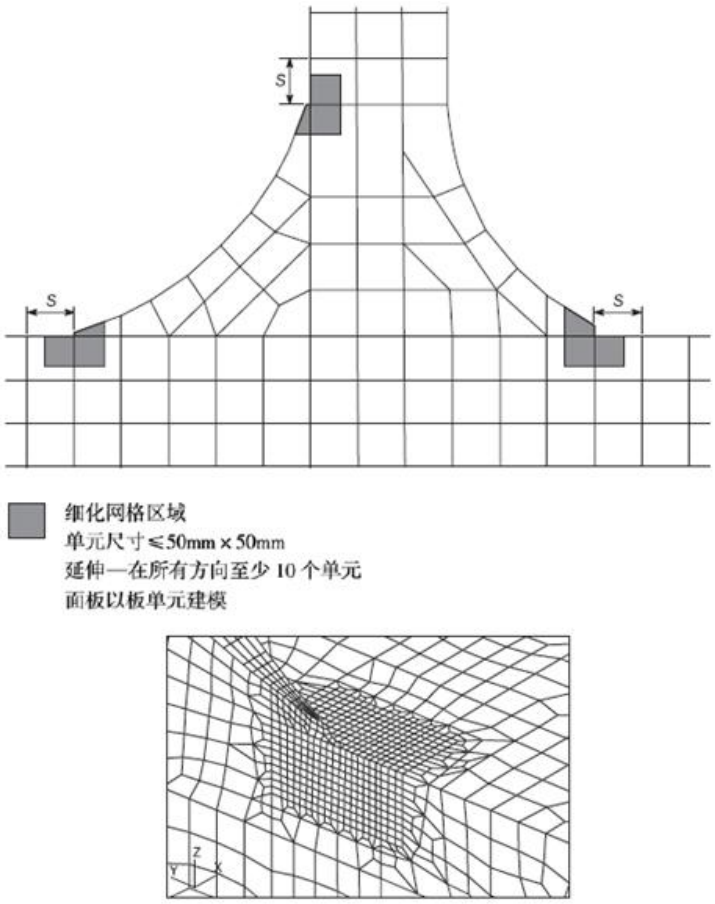


图 4.4.2(1) 肘板趾端的细网格区域

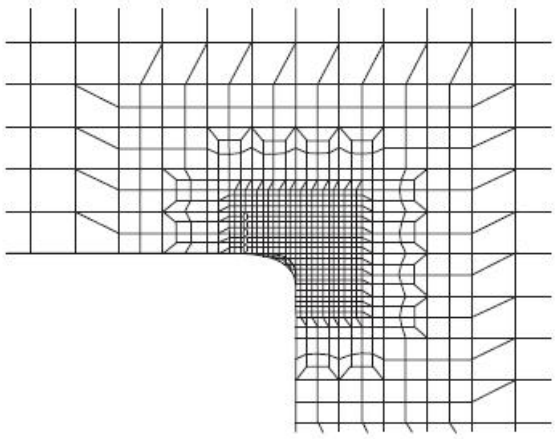


图 4.4.2(2) 舱口结构分析的局部模型示例

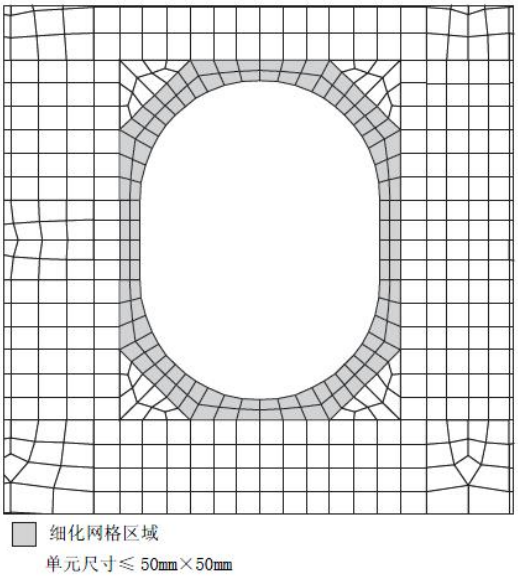


图 4.4.3 开孔周围的细网格区域

5 载荷和边界条件

5.1 载荷组合

5.1.1 应对所有适用于相应舱段分析的有限元载荷组合进行细网格应力分析。

5.2 载荷和边界条件的施加

5.2.1 如使用独立的局部模型做细化网格应力分析，应将舱段模型的节点位移施加于局部模型相应的边界节点上作为强制位移。作为替代方案，可将货舱段模型上的等效节点力施加于局部模型的边界节点上。

5.2.2 对于局部模型边界上的节点与舱段模型中的节点不一致的情况，可以使用多点约束将位移施加于这些节点上。可使用线性多点约束方程连接相邻的两个一致节点。

5.2.3 在独立的局部有限元模型所表达的结构处，模型上应施加所有局部载荷，包括任何用于船体梁弯矩和/或剪力调整而施加的载荷。

6 分析衡准

6.1 应力评估

6.1.1 一般要求

应对第 2 节中定义的有限元载荷组合进行细化网格的应力评估。

6.1.2 参考应力

使用 Von Mises 应力 σ_{vm} 作为参考应力，Von Mises 应力的计算基于壳单元中心点处的膜正应力和剪应力。应使用单元的中面应力进行评估。

6.1.3 许用应力

最大许用应力基于[4.1]至[4.3]所规定的 $50 \times 50\text{mm}$ 的网格尺寸。如果使用了更小的网格尺寸，可以用等效于要求的所规定网格尺寸的面积范围内使用算得的面积加权 Von Mises 应力方法计算所得的应力与许用应力做对比。用于平均的单元的所有边界必须完全落在要求的范围之内。平均应力应基于单元中心点的应力计算，不应使用通过内插/外插方法得到的应力值。跨越结构不连续处和对接焊接结构处不应进行应力平均。

$$\sigma_{vm-av} = \frac{\sum_1^n A_i \sigma_{vm-i}}{\sum_1^n A_i}$$

σ_{vm-av}—— Von Mises 平均应力

σ_{vm-i}—— 考虑区域的第 i 个板单元的 Von Mises 应力

A_i—— 考虑区域内第 i 个板单元的面积

n—— 考虑区域内板单元的个数

6.2 验收衡准

6.2.1 应根据[6.1]的规定按照验收衡准进行应力结果验证。结构评估应表明应力符合如下衡准：

$$\lambda_f \leq \lambda_{fperm}$$

式中：

λ_f—— 细化网格屈服利用因子。

一般情况下对于壳单元：$\lambda_f = \frac{\sigma_{vm}}{R_Y}$

一般情况下对于杆或梁单元：$\lambda_f = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_Y}$

σ_{vm}—— Von Mises 应力， N/mm^2。

σ_{axial}—— 杆或梁单元的轴向应力， N/mm^2。

λ_{fperm}—— 细化网格许用利用因子，按下式取值：

（1）不邻近焊缝的单元：$\lambda_{fperm} = 1.70$ 对于航行工况

$\lambda_{fperm} = 1.36$ 对于港内工况

（2）邻近焊缝的单元：$\lambda_{fperm} = 1.50$ 对于航行工况

$\lambda_{fperm} = 1.20$ 对于港内工况

对于符合第 10 章第 2 节使用精细网格评估疲劳强度的位置，细化网格分析衡准可取放大 1.2 倍。

第 4 节　机舱结构舱段直接强度分析

1 一般规定

1.1 一般要求

1.1.1 本附录适用于船长 L 为 350 米及以上的超大型矿砂船的机舱结构强度直接计算。

1.1.2 机舱结构强度直接计算适用于对以下结构的强度评估：

（1）机舱区域内的船体梁纵向构件；

（2）机舱区域内的横向构件；

（3）机舱区域内的其他主要支撑构件。

2 结构建模

2.1 模型范围

2.1.1 机舱结构强度直接计算采用三舱段模型，一般包括艉部、机舱及与机舱相邻的最艉货舱，如图 2.1.1。对于最艉货舱特殊布置的矿砂船，模型范围另行考虑。

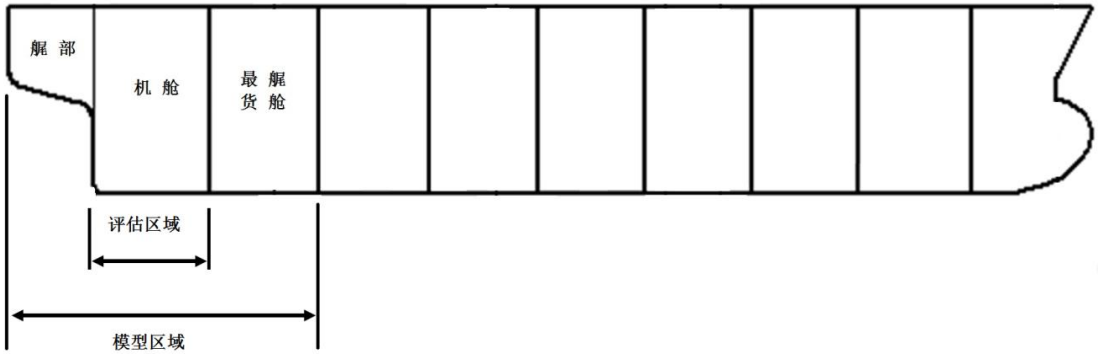


图 2.1.1　机舱结构强度直接计算模型范围

2.2 建模要求

2.2.1 机舱模型应根据实际的船体结构进行建模，位于主甲板以上的上层建筑、甲板室及烟囱等结构可不建模，但需要考虑自重对舱段模型的影响。

2.2.2 机舱应参照本章第 2 节[1.4]规定的货舱区结构建模要求进行建模。

（1）有限元单元类型要求，见本章第 1 节[3.1.1]；

（2）单元尺寸要求，见本章第 2 节[1.2.2]；

（3）有限元建模要求，见本章第 2 节[1.4]；

（4）结构净尺寸要求，见本章第 1 节[2.1.1]。

2.2.3 边界条件

对于机舱结构强度直接计算，边界条件见表 2.2.3。

机舱模型端部边界条件　　表 2.2.3

位置		平移			转动		
		δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
模型前端：纵向构件节点		固定	-	固定	-	固定	固定
		端部梁（见本章第 2 节[1.5.3]					
模型后端：	独立点（总纵剖面中和轴高度处）	-	固定	-	固定	M_{T-end}	-

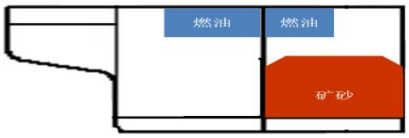
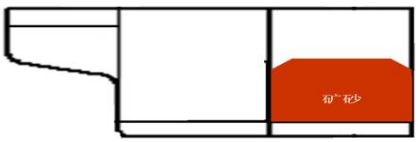
	纵向构件节点	刚性连接	刚性连接	刚性连接	-	-	-
独立点 （机舱前舱壁处总纵剖面与内底的交点）		-	固定	-	-	-	-
注释： （1）[-]表示不施加约束； （2）刚性连接指将模型端部纵向构件的节点与相应独立点连接； （3）M_{T-end} 见本章第 2 节[3.5.4]。							

3 工况及载荷

3.1 模型载荷工况组合

3.1.1 机舱结构强度直接计算需考核表 3.1.1 中的载荷工况组合。若矿砂船三舱段范围内有特殊舱室布置或装载手册定义了特殊的装载工况，应另行考虑。

机舱舱段直接计算载荷工况组合　　表 3.1.1

序号	名称	装载模式	吃水	静水剪力 C_{SF_LC}	静水弯矩 C_{BM_LC}	设计波
1	满载出港		T_{SC}	100%	100%	HVM-2 BSP-2P BSP-1P
2	满载到港		T_{SC}	100%	100%	HVM-2 BSP-2P BSP-1P
3	压载到港		T_{BAL}	100%	100%	HVM-2 BSP-2P BSP-1P

3.1.2 在每种载荷工况组合中，适用于的载荷包括：

（1）海水压力，见第 4 章第 5 节[1.1.1]；

（2）矿砂载荷，见第 4 章第 6 节[2.1]；

（3）压载水、燃油及其他大型液舱内部载荷，见第 4 章第 6 节[1.1]；

（4）非露天甲板及平台均布载荷产生的压力 P_{dl}，kN/m^2，计算公式如下，

$$P_{dl} = \left(1_f_{\beta}\frac{a_{z-env}}{g}\right)P_{dl-s}$$

式中：

f_{β}：浪向修正系数，见第 4 章第 4 节符号定义；

a_{z-env}：垂向加速度包络值，见第 4 章第 3 节[3.3.3]，m/s^2；

P_{dl-s}：局部静压力，kN/m^2。

（5）机舱内重型机器产生的集中载荷F_U，KN，计算公式如下：

$$F_U = \left(1 + f_\beta \cdot a_{z-env}\right) m_U$$

式中：

m_U——机器重量，t。

（6）船体及上建，只考虑静载荷。若主甲板以上上层建筑、甲板室及烟囱结构未建模，其自重可以按照均布载荷的形式施加在支此类结构的上甲板支撑强构件上。

3.2 船体梁目标载荷调整

3.2.1 每一工况组合下，船体梁垂向弯矩及剪力均应调整至目标值。步骤为先调整垂向剪力，再调整垂向弯矩。

3.2.2 船体梁目标剪力的位置应取在机舱区域的每个强框架处，包含机舱前后舱壁，并在机舱区域往外延伸两个强框架。每档强框架处的目标剪力Q_{targ}为：

$$Q_{t\text{arg}} = C_{SF_LC} \cdot Q_{sw} + f_\beta \cdot C_{QW} \cdot Q_{wv}$$

式中：

$C_{\text{SF_LC}}$——静水剪力系数，见第 4 章第 8 节载荷工况表；

Q_{sw}——航行工况下，许用静水剪力，kN；

C_{QW}——波浪剪力组合系数，见第 4 章第 4 节[3.5.3]；

Q_{wv}——航行工况下，波浪剪力，见第 4 章第 4 节[3.2]，kN。

3.2.3 船体梁目标垂向弯矩的位置应取在机舱前壁处，且目标垂向弯矩$M_{\text{v-targ}}$为：

$$M_{v-t\text{arg}} = C_{BM_LC} \cdot M_{sw} + f_\beta \cdot C_{WV} \cdot M_{wv}$$

式中：

C_{BM_LC}——静水弯矩系数，见表第 4 章第 8 节载荷工况表；

M_{sw}——航行工况下，许用垂向静水弯矩，kN.m；

C_{WV}——波浪弯矩组合系数，见第 4 章第 4 节[3.5.2]；

M_{wv}——航行工况下，波浪弯矩，见第 4 章第 4 节[3.1.1]，kN.m。

3.2.4 为了使船体梁剪力达到目标值，需在 3.2.2 中定义的强框架处施加垂向剪力调整值Q_{i}。参照本章第 3 节[3.4.7]，Q_{i}通过剪流分布法施加到相应的横剖面上。目标剪力调整见图 3.2.4。

$$Q_1 = Q_{targ-1} - Q_{fem-1}$$
$$Q_i = Q_{targ-i} - Q_{fem-i} - \sum_{j<i} Q_j$$

式中：

Q_{i}——第 i 强框架处的剪力调整值，kN;

Q_{targ-i}——第 i 强框架处的目标剪力值，见本章第 3 节[3.4.7]，kN；

Q_{fem-i}——第 i 强框架处局部载荷产生的剪力值，kN。

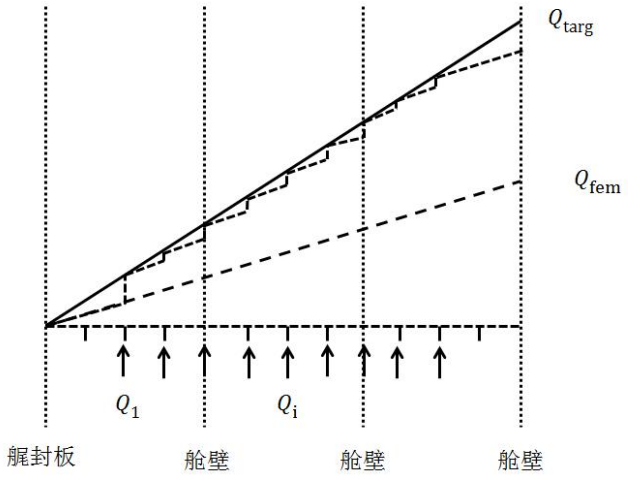


图 3.2.4 船体梁目标剪力调整

3.2.5 为了使船体梁垂向弯矩在目标位置处达到目标值，需在模型端部施加调整弯矩 M_{T-end}。目标垂向弯矩调整见图 3.2.5

$$M_{T-end} = M_{v-targ} - M_{fem} - \sum Q_i \cdot l_i$$

其中：

M_{T-end}——模型端部的垂向弯矩调整值，kN.m；

$M_{v-\text{targ}}$——垂向弯矩目标值，见本章第 3 节[3.3.2]，kN.m；

M_{fem}——机舱前壁处局部载荷产生的垂向弯矩，kN.m；

Q_{i}——第 i 强框架处的剪力调整值，见本章第 3 节[3.4.5]，kN;

l_i——第 i 强框架距离模型尾端的距离，m。

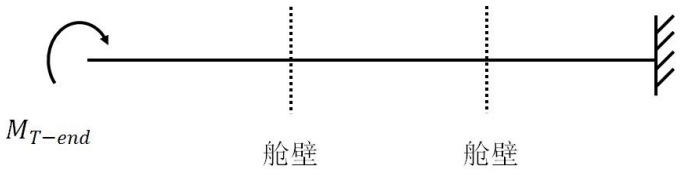


图 3.2.5 船体梁目标弯矩调整

4 分析衡准

4.1 评估区域

4.1.1 评估区域见图 2.1.1 机舱主要构件应按照[4.1.2]及[4.1.3]的要求进行屈服及屈曲强度评估。

4.1.2 机舱主要构件的屈服强度评估应按照本章第 4 节[4.2]的相关要求进行。

4.1.3 机舱主要构件的屈曲强度评估参照第 9 章的相关要求进行。

第 8 章　整船有限元强度评估

第 1 节　一般规定

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本章给出了矿砂船整船有限元强度评估要求，包括有限元建模、计算工况及载荷施加、屈服强度和屈曲强度评估。

1.1.2 船长在 350 米及以上或结构布置非常规形式的矿砂船应按本章要求进行整船有限元强度评估并授予 GFE 附加标志。

1.1.3 除 1.1.2 以外的其他矿砂船，如按本章的要求进行整船有限元强度评估可授予 GFE 附加标志。

2 有限元建模

2.1 结构建模要求

2.1.1 整船有限元结构的单元选择、网格密度、开孔模拟等要求参见第 7 章第 2 节[1]的有关内容。

2.2 净尺寸应用

2.2.1 模型基于净尺寸方法，扣除的腐蚀增量为 $0.5t_c$，所有的屈曲能力评估扣除的腐蚀增量为 t_c，见第 3 章第 3 节表 1.2.1。

2.3 模型范围

2.3.1 整船有限元模型包括所有的船体结构，如机舱棚，上层建筑等，舱口盖可以忽略，整船有限元模型如图 2.3.1 所示。

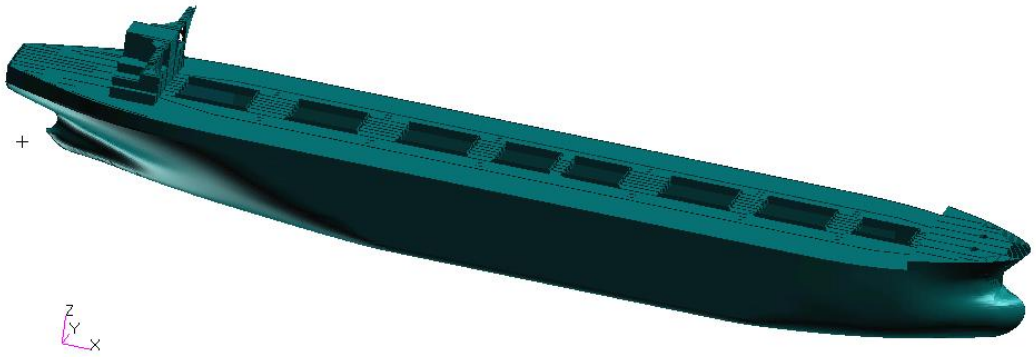


图 2.3.1 典型矿砂船整船结构有限元模型

2.4 空船重量和货物重量

2.4.1 整船有限元模型应能正确反映钢料结构、矿砂和液货的重量以及惯量的分布，可通过改变材料密度的方法来调整重量分布。对于主机等大型设备的重量，可以采用质量单元模拟。

2.5 整船有限元模型边界条件

2.5.1 采用惯性释放功能进行结构强度分析时，通过设定参考点进行边界约束，如图

2.5.1 所示，一般将邻近船中位置的实肋板与纵中剖面相交处（节点 1）选取为“虚支座”。

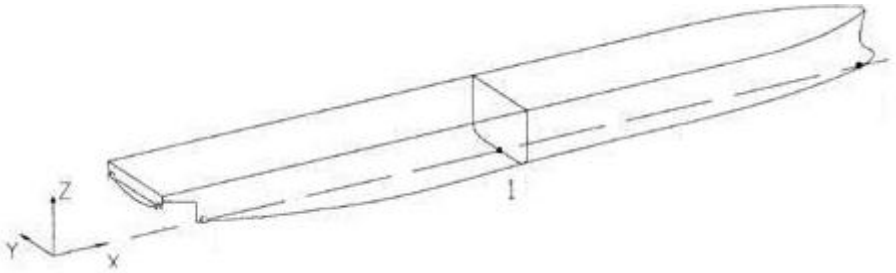


图 2.5.1　边界条件示意图

3 计算工况

3.1 通则

3.1.1 整船有限元强度评估的计算工况系指装载工况和一系列波浪载荷主导工况的组合。

3.1.2 装载工况的选取参见第 4 章第 8 节[4.1]。

3.1.3 波浪载荷工况参见第 4 章第 8 节[4.2]。

4 载荷施加

4.1 惯性载荷

4.1.1 对于船体结构自重和设备等的惯性载荷，根据结构和设备所在位置处的实际加速度进行计算得到。加速度包括静态的重力加速度和波浪诱导的加速度，波浪诱导加速度应根据第 4 章附录 1 进行计算确定。

4.2 外部压力

4.2.1 外部压力包括舷外静水压力和波浪动压力，静水压力按照第 4 章第 5 节的计算；波浪动态压力应根据第 4 章附录 1 进行计算。

4.3 内部压力

4.3.1 内部压力为货舱内矿砂的静态和动态压力、摩擦力，液舱的静态和动态压力，按照第 4 章第 6 节的规定计算。

4.5 波浪主导载荷目标值

4.5.1 对于每个装载工况，应按照第 4 章第 8 节的要求确定等效设计波。等效设计波的主导载荷目标值应满足第 4 章第 8 节[4.2]的要求。

4.5.2 当某个等效设计波引起的非主导载荷超过了相应的规范值，应重新确定等效设计波的参数，使该等效设计波的非主导载荷不超过相应的规范值乘以表 4.5.2 中的系数。

等效设计波非主导载荷最大允许系数　　表 4.5.2

载荷类型	系数
波浪弯矩和扭矩	1.1
波浪剪力	1.4
横摇角、加速度	1.1
波浪动压力	1.2

4.6 模型平衡检查

4.6.1 对每一个计算工况，在完成整船载荷加载后应计算和检查模型在 x、y 和 z 轴三个方向上的不平衡力的大小。在迎浪工况下，各个方向上的不平衡力应不超过排水量的 1%；对于横浪和斜浪工况，不平衡力应不超过排水量的 2%。

5 屈服强度评估

5.1 评估区域

5.1.1 整船有限元屈服强度评估的区域为整个模型范围内的主要构件。

5.2 Von Mises 应力

5.2.1 对于[2.2]中定义的所有结构构件板，其 von Mises 应力σ_{vm}（N/mm^2）应基于壳单元中心的膜正应力和剪应力，按如下公式算得：

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

式中：

σ_x—— 单元膜 x 方向正应力，N/mm^2。

σ_y—— 单元膜 y 方向正应力，N/mm^2。

τ_{xy}—— 单元剪应力，N/mm^2。

5.3 梁和杆单元的轴向应力

5.3.1 对于梁单元和杆单元，轴向应力σ_{axial}（N/mm^2）应只基于轴向力计算。轴向应力应采用单元长度中点处的应力。

5.4 屈服衡准

5.4.1 整船有限元结构单元应符合以下衡准：

$$\lambda_y \leq \lambda_{yperm}$$

式中：

λ_y——屈服利用因子。

对于板单元：$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_Y}$ 。

对于杆单元或梁单元：$\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_Y}$

λ_{yperm}——粗网格的许用屈服利用因子，取为 1.0

6 屈曲强度评估

6.1 对于整船有限元分析，应按以下要求进行屈曲强度评估：

6.1.1 对一些关键结构区域（重点包括舱段有限元分析中发现的屈曲利用因子较高的区域，如屈曲利用因子大于衡准的 90%以上）进行屈曲评估，并满足相关的衡准要求。

6.1.2 对于舱段有限元评估区域未覆盖的船体结构区域，在整船有限元分析中应进行屈曲评估。

第 2 节　整船有限元局部细化分析

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 结构细节处的局部强度分析应按照本节的要求进行。

1.1.2 用于细化分析的结构构件上关键部位的选择应按本节的要求进行。

1.1.3 细网格分析程序

进行细网格分析的细节位置应按照第 7 章第 3 节[4]的要求进行建模，使用第 7 章第 3 节[5]定义的有限元载荷组合，并应符合第 7 章第 3 节[6]中的衡准。

2 评估区域

2.1 评估结构细节

2.1.1 整船有限元计算下列区域应力结果超过本章第 1 节 5.4 规定的许用应力的 95%时，则应予以细化网格分析：

（1）双层底、边压载舱内的横向主要支撑构件；

（2）横舱壁与底凳的连接处、底凳与内底的连接处；

（3）内底与内壳纵舱壁的连接部应力最大处；

（4）甲板舱口角隅处。

2.2 其它结构细节

如果认为必要，除 2.1 定义的结构细节也可进行细网格分析。

3 结构模型

3.1 细网格建模要求

3.1.1 细网格分析建模要求见第 7 章第 3 节。

3.2 有限元载荷组合

3.2.1 细网格应力分析应对所有适用于相应整船分析的有限元载荷组合进行。

3.3 载荷和边界条件的施加

3.3.1 如使用独立的局部模型做细化网格详细应力分析，应将整船模型的节点位移施加于局部模型相应的边界节点上作为强制位移。作为替代方案，可使用整船模型上的等效节点力施加于局部模型的边界节点上。

3.3.2 对于局部模型边界上的节点与整船模型中的节点不一致的情况，可以使用多点约束将位移施加于这些节点上。使用线性多点约束方程连接相邻的两个一致节点就已足够。

3.3.3 在局部有限元模型所表达的结构处的所有局部载荷都应施加于模型上。

4 分析衡准

4.1 整船有限元强度评估的细化分析参考应力、许用应力以及验收衡准见第 7 章第 3 节[6.1]和[6.2]。

第 9 章　屈　　曲

符号：

x 轴——　平行于矩形屈曲板格长边方向的局部坐标轴。

y 轴——　垂直于矩形屈曲板格长边方向的局部坐标轴。

σ_x——　施加在板格边缘上沿 x 轴方向的应力，N/mm^2。

σ_y——　施加在板格边缘上沿 y 轴方向的应力，N/mm^2。

τ ——　施加的剪应力，N/mm^2。

σ_a——　加强筋上的轴向应力，N/mm^2。

σ_b——　加强筋上的弯曲应力，N/mm^2。

σ_w——　加强筋上的翘曲应力，N/mm^2。

$\sigma_{cx},\sigma_{cy},\tau_c$——　结构屈曲的临界应力，N/mm^2，对于板结构，其计算公式见第 5 节[3.1.3]。

R_{eH_S}——　加强筋的最小屈服强度，N/mm^2。

R_{eH_P}——　板的最小屈服强度，N/mm^2。

a——　板格长边长度，mm，如第 5 节表 3.1.3 所示。

b——　板格短边长度，mm，如第 5 节表 3.1.3 所示。

d——　如第 5 节表 3.1.5 中曲板板格平行于圆柱轴一边的长度，mm。

σ_E——　弹性屈曲参考应力，N/mm^2，定义为：

（1）对于第 5 节[3.1.1]的平面板格极限状态方程的应用：

$$\sigma_E=\frac{\pi^2E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t_p}{b}\right)^2$$

（2）对于第 5 节[3.1.6]的曲面板格方程的应用：

$$\sigma_E=\frac{\pi^2E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t_p}{d}\right)^2$$

ν——　泊松比，取 0.3。

t_p——　板格的净厚度，mm。

t_w——　加强筋的腹板净厚度，mm。

t_f——　加强筋的翼板净厚度，mm。

b_f——　加强筋的翼板宽度，mm。

h_w——　加强筋的腹板高度，mm，如第 2 节图 3.1.1 所示。

e_f——　从带板到翼板中心的距离，mm，如第 2 节图 3.1.1，取为：

$$e_f=\begin{cases}h_w & \text{对　扁钢}\\ h_w-0.5t_f & \text{对　球扁钢}\\ h_w+0.5t_f & \text{对　角钢和}T\text{型材}\end{cases}$$

α——　板格的长宽比，取为：

$$\alpha=\frac{a}{b}$$

β——　系数，取为：

$$\beta=\frac{1-\psi}{\alpha}$$

ψ —— 边缘应力比，定义为

$$\psi=\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

σ_1 —— 最大应力，N/mm^2。

σ_2 —— 最小应力，N/mm^2。

R —— 曲面板格的曲率半径，mm。

ℓ —— 加强筋跨距，m，等于支撑构件之间的距离。

s —— 加强筋间距，mm。

ω —— 系数，取为：ω=min(3; α)

第 1 节　一般规定

1 一般要求

1.1 屈曲定义

1.1.1 屈曲作为一个描述结构强度的广义名词，一般用以描述结构在面内压应力和/或剪应力以及侧向载荷作用下的强度。根据载荷状态、长细比和结构类型，屈曲强度或能力可计及载荷的内部重新分布。

1.2 屈曲能力

1.2.1 基于本原则的屈曲能力给出了结构极限能力的下限估计值，或者不遭受较大永久变形时板格所能承受的最大载荷。

屈曲能力评估利用了板的弹性后屈曲实际效应，并考虑到了结构构件之间，如板和加强筋之间的载荷重新分布。对于柔性较大的结构，基于该方法计算给出的能力值通常会高于理想弹性屈曲应力（最小特征值）。若接受细长的加筋板结构构件发生弹性屈曲，意味着在较高的屈曲利用水平下，将会发生弹性大挠曲且面内刚度会降低。

1.3 评估方法

1.3.1 考虑不同的边界条件类型，应按如下两种方法之一进行屈曲评估：

（1）方法 A：受到周围结构/邻接板的约束作用，基本板格的所有边界都强迫保持直线（但可以在面内各方向上自由移动）。

（2）方法 B：由于边界处的面内刚度较小和/或没有周围结构/邻接板的约束作用，基本板格的边界不是强迫保持直线。

1.3.2 经 CCS 同意，也可接受按照其他技术标准进行屈曲校核的方法及结论。

1.4 基本假设

1.4.1 对于各结构构件，其特征屈曲强度应取最不利／临界的屈曲失效模式。

1.4.2 除另有规定外，本章中对结构构件的尺度要求应基于从总提供厚度中扣除 t_c 后得到的净尺度，其中，t_c 见第 3 章第 3 节定义。

1.4.3 本章中将压应力、剪应力取为正值，拉应力取为负值。

2 屈曲利用因子

2.1 屈曲利用因子定义

2.1.1 屈曲利用因子η定义为施加的载荷与对应的极限能力或屈曲强度之比。

2.2 屈曲利用因子计算

2.2.1 对于组合载荷，屈曲利用因子η_{act}定义为施加的等效应力与对应的屈曲能力之比，如图 2.2.1 所示，计算公式如下：

$$\eta_{act}=\frac{W_{act}}{W_u}=\frac{1}{\gamma_c}$$

式中：W_{act}——施加的等效应力；

W_u——等效屈曲能力；

γ_c——结构失效时的应力倍增因子。

对于每一种典型的失效模式，对应的板格能力应基于施加的实际应力组合，按照比例增大或者减小应力直至垮塌进行计算。

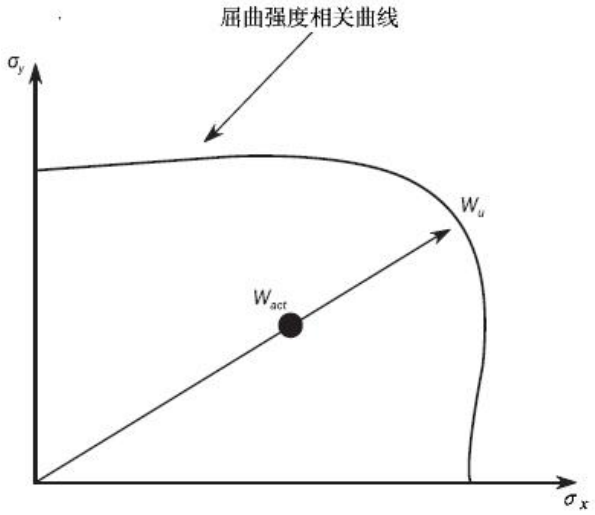


图 2.2.1 屈曲能力和屈曲利用因子示例

3 许用屈曲利用因子

3.1 许用屈曲利用因子计算

3.1.1 许用屈曲利用因子η_{all}的定义如表 3.1.1 所示。

许用屈曲利用因子η_{all} 表 3.1.1

结构构件	许用屈曲利用因子η_{all}
板（包括开口处腹板） 加强筋 加筋板格	1.0 （航行工况、进水工况），以及 0.8 （港内工况）
支杆、支柱、横撑材 按杆件屈曲模式校核的支撑舱壁水平/垂直桁	0.75 （航行工况、进水工况），以及 0.65 （港内工况）

4 屈曲接受衡准

4.1 屈曲利用因子衡准

4.1.1 如果一个结构屈曲评估单元满足如下衡准，则认为其具有可接受的屈曲强度：

$$\eta_{act} \le \eta_{all}$$

式中：η_{act} —— 基于所施加应力的屈曲利用因子，定义见[2]；

η_{all} —— 许用屈曲利用因子，定义见[3]。

5 应用

5.1 实施要求

5.1.1 屈曲评估应根据如下要求实施：

(1) 本章第 2 节用于板、纵向和横向加强筋、主要支撑构件和肘板的长细比要求；

(2) 本章第 3 节用于板、纵向和横向加强筋、槽形舱壁、主要支撑构件和其他结构的描述性屈曲要求；

(3) 本章第 4 节用于板、加筋板、槽形舱壁和其他结构的有限元分析屈曲要求；

(4) 本章第 5 节用于描述性和有限元屈曲评估的屈曲能力。

5.1.2 本章中提到的加强筋的屈曲校核适用于沿着屈曲板格长边方向的加强筋。

5.1.3 加大型加强筋

用作永久通道（PMA）的加大型加强筋（设有或未设腹板加强筋），均须满足以下要求：

（1）主要支撑构件的以下长细比要求：

- 对加大型加强筋的腹板，见本章第 2 节[4.1.1](1)；
- 对加大型加强筋的翼板，见本章第 2 节[4.1.1](2)和第 2 节[5.1]；
- 对加大型加强筋腹板上设置的加强筋，见本章第 2 节[3.1.1]和第 2 节[3.1.3]。

（2）下列描述性要求的屈曲强度：

- 对加大型加强筋的腹板，见本章第 3 节[3.2]；
- 对加大型加强筋腹板上设置的加强筋，见本章第 3 节[3.1]和第 3 节[3.3]。

（3）用作 PMA 的所有结构单元，如适用，应满足本章第 4 节中给出有限元分析的屈曲要求。

（4）加大型加强筋腹板上未设加强筋的纵向 PMA 平台的屈曲强度应采用本章第 3 节[3.1]和第 3 节[3.3]中的局部支撑构件的衡准进行校核。

第 2 节　长细比要求

符号：

除非特别说明，以下符号适用于本节。

b_{f-out} —— 腹板厚度中面到翼板边缘处的最大距离，mm，如图 3.1.1 所示；

h_w —— 加强筋腹板高度，mm，如图 3.1.1 所示；

ℓ_b —— 肘板边缘的有效长度，其定义见表 5.2.1；

s_{eff} —— 加强筋带板的有效宽度，mm，取为：

$$s_{eff} = 0.8s$$

R_{eH} —— 所计算的板材或加强筋的材料最小屈服强度，N/mm^2。

1 一般要求

1.1 所有结构单元均应满足[2]~[4]中给出的适用的长细比和尺度比要求。

2 板

2.1 板格的净厚度

2.1.1 板格的净厚度应满足以下衡准：

$$t_p \geq \frac{b}{C}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

式中：C —— 长细比系数，取为：

C=100，船壳外板和货/液舱边界；

C=125，其他结构；

R_{eH} ——板材的最小屈服强度，N/mm^2

如果某列板假设采用较低的屈服应力值能够满足第3节和第4节的要求，则在应用该长细比要求校核时，也可以采用该较低的屈服应力值。本要求不适用于船舶柱形区域内舭列板和圆弧舷缘。

3 加强筋

3.1 加强筋的尺度比

3.1.1 所有加强筋类型的净厚度

加强筋的净厚度应满足如下衡准：

（1）加强筋腹板

$$t_w \geq \frac{h_w}{C_w}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

（2）翼板

$$t_f \geq \frac{b_{f-out}}{C_f}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

式中：C_w, C_f —— 长细比系数，由表3.1.1给出。

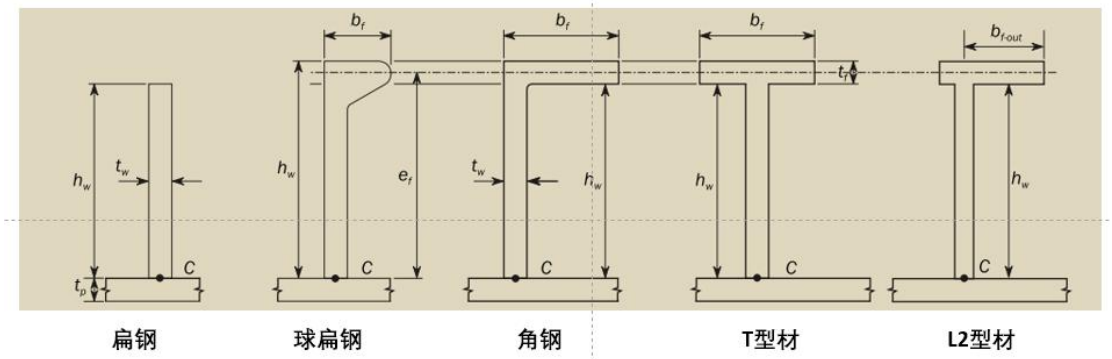


图 3.1.1 加强筋的尺度参数

长细比系数　　表 3.1.1

加强筋类型	C_w	C_f
角钢和 L2 型材	75	12
T 型材	75	12
球扁钢	45	—
扁钢	22	—

3.1.2 角钢和 T 型材的净尺寸

角钢和 T 型材的翼板总宽度 b_f，（mm），应满足如下衡准：

$$b_f \geq 0.2h_w$$

3.1.3 加强筋的弯曲刚度

含有效带板宽度的加强筋平行于带板的中和轴的净惯性矩，cm^4，应不小于：

$$I_{st} \geq C\ell^2 A_{eff} \frac{R_{eH}}{235}$$

式中：

A_{eff} ——包括有效带板 s_{eff} 的加强筋净横截面积，cm^2；

R_{eH} ——取带板的 R_{eH} 之值；

C——长细比系数，取为：

C=1.43，对于纵向加强筋，包括削斜加强筋；

C=0.72，其他加强筋。

4 主要支撑构件

4.1 尺度比和刚度

4.1.1 腹板和翼板的尺度比

主要支撑构件腹板和翼板的净厚度应满足以下衡准：

（1）腹板

$$t_w \geq \frac{s_w}{C_w}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

（2）翼板

$$t_f \geq \frac{b_{f-out}}{C_f}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

式中：s_w —— 板格宽度，mm，取腹板加强筋的间距；

C_w —— 腹板的长细比系数，取为：

$$C_w = 100$$

C_f —— 翼板的长细比系数，取为：

$$C_f = 12$$

4.1.2 甲板横向主要支撑构件

对承受船体梁轴向压应力的甲板纵骨起支持作用的甲板横向主要支撑构件，在其中部半个弯曲跨距范围内的净惯性矩 $I_{psm\text{-}n50}$，cm^4，应满足以下衡准：

$$I_{psm-n50} \geq 300 \frac{\ell_{bdg}^4}{S^3 s} I_{st}$$

式中：$I_{psm-n50}$——含 0.8S 有效带板宽度的甲板横向主要支撑构件的净惯性矩 ，cm^4；

ℓ_{bdg}——甲板横向主要支撑构件的有效弯曲跨距，m，其定义见第 3 章第 6 节；

S——甲板横向主要支撑构件的间距，m，其定义见第 3 章第 6 节；

I_{st}——甲板横向主要支撑构件跨中的半个弯曲跨距范围内甲板纵骨的惯性矩，cm^4，其定义可参考[3.1.3]。

4.2 主要支撑构件的腹板加强筋

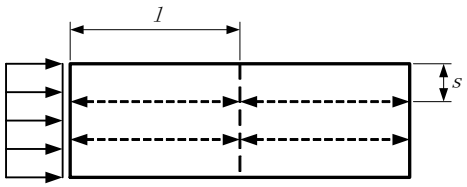
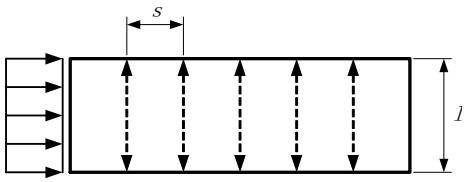
4.2.1 腹板加强筋的尺度比

设置在主要支撑构件上的腹板加强筋的腹板和翼板的净厚度应满足[3.1.1]和[3.1.2]中给出的要求。

4.2.2 腹板加强筋的弯曲刚度

设置在主要支撑构件上的腹板加强筋，连同有效带板 S_{eff} 的净惯性矩 I_{st}，cm^4，应不小于表 4.2.2 中给出的最小惯性矩。

腹板加强筋的刚度衡准 **表 4.2.2**

加强筋布置形式		腹板加强筋的最小惯性矩（cm^4）
A	腹板加强筋沿着 PSM 跨距方向布置 	$I_{st} \geq C\ell^2 A_{eff} \frac{R_{eH}}{235}$
B	腹板加强筋垂直于 PSM 跨距方向布置 	$I_{st} \geq 1.14\ell s^2 t_w \left(2.5\frac{1000\ell}{s} - 2\frac{s}{1000\ell}\right)\frac{R_{eH}}{235} \cdot 10^{-5}$

式中，C ——长细比系数，取为：

C=1.43，对于纵向加强筋，包括削斜筋；

C=0.72，其他加强筋；

ℓ ——腹板加强筋的长度，m

（1）对焊接在局部支撑构件上的腹板加强筋，长度在局部支撑构件翼板之间量取；

（2）对削斜的腹板加强筋，长度在侧向支撑之间量取，例如主要支撑构件翼板之间的总距离，如加强筋布置 B 所示；

A_{eff} ——含有效带板宽度 s_{eff} 的腹板加强筋净横截面积，cm^2；

t_w ——主要支撑构件的腹板净厚度，mm；

R_{eH} ——取主要支撑构件腹板的 R_{eH} 之值，N/mm^2。

5 肘板

5.1 防倾肘板

5.1.1 翼板的无支撑长度

主要支撑构件翼板的无支撑长度，m，即防倾肘板之间的距离，应不大于：

$$s_b = b_f C \sqrt{\frac{A_{f-n50}}{\left(A_{f-n50} + \frac{A_{w-n50}}{3}\right)}\left(\frac{235}{R_{eH}}\right)}$$，但不必小于 $s_{b\text{-}min}$

式中：b_f ——支撑构件翼板宽度，mm；

C ——长细比系数，取为：

（1）0.022，对于对称翼板；

（2）0.033，对于非对称翼板；

A_{f-n50} ——翼板净横截面积，cm^2；

A_{w-n50} ——腹板净横截面积，cm^2；

R_{eH} ——主要支撑构件材料的最小屈服强度，N/mm^2；

$S_{b-\min}$ ——翼板的最小无支撑长度；

（1）对货舱区域、液舱/货舱边界或船体外板包括外部甲板上的主要支撑构件，$S_{b-\min}$ =3.0m；

（2）对其他区域，$S_{b-\min}$ =4.0m。

5.1.2 边缘加强筋

如果主要支撑构件上的防倾肘板的边缘有效长度，如表 5.2.1 中定义的 ℓ_b，mm，大于以下值时，应设翼板或边缘加强筋对防倾肘板进行加强：

$$\ell_b = 75 t_b$$

式中：t_b —— 肘板的腹板净厚度，mm。

5.2 端肘板

5.2.1 尺度比

承受压应力的端肘板的腹板净厚度，mm，应不小于：

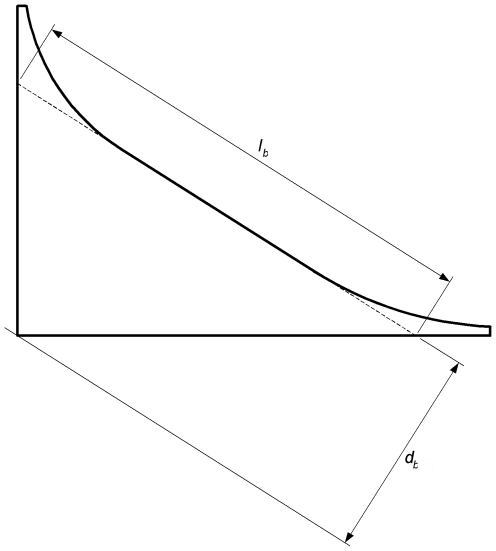
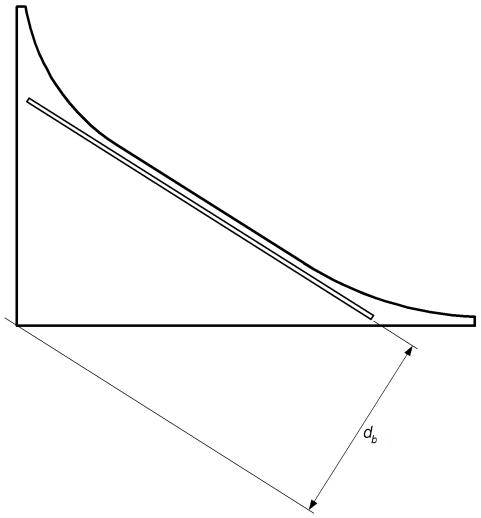
$$t_b = \frac{d_b}{C}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

式中：d_b —— 肘板高度，mm，定义见表 5.2.1；

C —— 长细比系数，定义见表 5.2.1；

用于肘板尺度比的屈曲系数，*C* **表 5.2.1**

模式	*C*
边缘未设加强筋的肘板	$C = 20\left(\frac{d_b}{\ell_b}\right) + 16$ 式中， $0.25 \le \frac{d_b}{\ell_b} \le 1.0$

模式	C
	
边缘设置加强筋的肘板 	C = 70

5.3 边缘加强

5.3.1 肘板边缘加强

肘板边缘处的边缘加强筋的腹板高度，h_w，mm，应不小于：

$$h_w = C\ell_b\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$ ，或 50mm，取大者

式中：C —— 长细比系数，取为：

（1）对端肘板，C =75；

（2）对防倾肘板，C =50；

5.3.2 边缘加强筋的尺度比

边缘加强筋的腹板和翼板的净厚度应满足[3.1.1]和[3.1.2]中给出的要求。

6 其他结构

6.1 支柱

6.1.1 I 形截面支柱的尺度比

对于 I 形截面，腹板和翼板的厚度应满足[3.1.1]和[3.1.2]中给出的要求。

6.1.2 箱形截面支柱的尺度比

薄壁箱形截面的壁厚应满足[3.1.1](1)的要求。

6.1.3 圆管截面支柱的尺度比

圆管截面支柱的净厚 t，mm，应满足以下衡准：

$$t \geq \frac{r}{50}$$

式中：r —— 圆管中面处的半径，mm。

6.2 开口处的边缘加强

6.2.1 边缘加强筋的腹板高度

如果在开口处安装了如图 6.2.1 所示的边缘加强筋，则腹板高度 h_w，mm，应不小于：

$$h_w = C\ell\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$，或 50mm，取大者

式中：C —— 长细比系数，取为：C =50；

6.2.2 边缘加强筋的尺度比要求

边缘加强筋的腹板和翼板的净厚度应满足[3.1.1]和[3.1.2]中给出的要求。

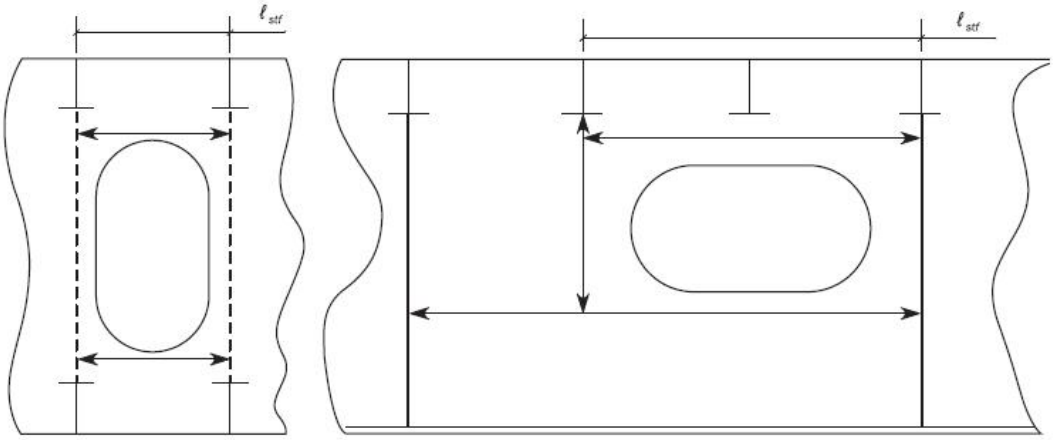


图 6.2.1 典型的边缘加强

第 3 节 描述性屈曲要求

符号：

η_{a11} ——许用屈曲利用因子，定义见第 1 节[3.1]。

EPP ——基本板格，定义见第 3 章第 6 节[2.1]。

LCP ——载荷计算点，定义见第 3 章第 6 节[2.2.2]和第 3 章第 6 节[3.2]。

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本节适用于承受船体梁压应力和剪应力的板格（包括平板、曲板）和加强筋。此外，承受压应力的下述结构也应予以校核：

① 支杆

② 支柱；

③ 横撑材。

1.1.2 船体梁屈曲强度要求适用于整个船长范围。

1.1.3 设计载荷组

对于第 6 章第 1 节[2]中定义的所有完整工况下的设计载荷组和进水工况下的 S+D 设计载荷组，都应进行屈曲校核，并采用第 6 章第 1 节[2.3]定义的压力组合。

对于每一个设计载荷组，针对所有的动载荷工况，侧向压力应根据第 4 章的要求，在第 3 章第 6 节中定义的载荷计算点处计算得到，并与 [2.2] 中给出的船体梁应力组合一起施加到板格上。

1.2 等效板格

1.2.1 对于纵向加筋布置，如果基本板格的板厚沿着宽度 b 方向上有变化，则应将板格等效后再进行屈曲校核。等效板格的板厚取为 t_1，板格宽度 b_{eq}，mm，定义如下：

$$b_{eq} = \ell_1 + \ell_2\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1.5}$$

式中：ℓ_1 ——— 板格中较小板厚 t_1 部分的宽度，mm，定义见图 1.2.1；

ℓ_2 —— 板格中较大板厚 t_2 部分的宽度，mm，定义见图 1.2.1。

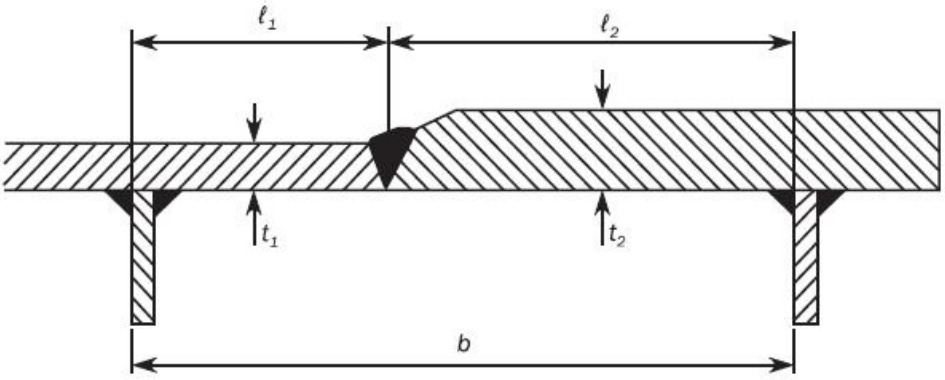


图 1.2.1 在宽度跨区上的板厚变化

1.2.2 对于横向加筋布置，如果基本板格内板厚有所不同，则板和加强筋的屈曲校核应针对每个板厚分别进行，并视其为在整个板格范围内保持不变。所施加的应力和侧向压力应取自板格的载荷计算点。

1.2.3 材料

如果一个板格是由不同材料的板构成的，则在其屈曲评估中应采用各种材料中最小的屈服强度。

2 船体梁应力

2.1 一般要求

2.1.1 船体梁弯曲应力σ_{hg} N/mm²，应根据第 6 章第 1 节[2.1.1]确定。

2.1.2

对于板 *i* 的船体梁剪应力τ_{hg}，N/mm²，应根据下式确定：

$$\tau_{hg}=\frac{Q_{Tot}(x)q_{vi}}{t_{i-n50}}10^3$$

式中：

$Q_{Tot}(x)$——在船舶纵向 *x* 位置处总的垂向剪力，kN，按下列取值：

- 对于设计载荷组 S+D
  - 对航行工况：

$$Q_{Tot}(x)=\left|Q_{sw}+Q_{wv-LC}\right|$$

  - 对于海上进水工况：

$$Q_{Tot}(x)=\left|Q_{sw-f}+Q_{wv-LC}\right|$$

- 对于设计载荷组 S
  - 对在港/遮蔽水域工况：

$$Q_{Tot}(x)=\left|Q_{sw-p}\right|$$

q_{vi}——板 *i* 处的贡献比例，定义见第 5 章第 2 节[4.2.2]；

t_{i-n50}——板 *i* 的净厚度，mm，定义见第 5 章第 2 节[4.2.2]，用于剪应力计算；

Q_{sw}——所考虑船体梁横剖面航行工况下正或负的许用静水剪力，kN，定义见第 4 章第 4 节[2.4.2]；

Q_{sw-p}——所考虑船体梁横剖面在港/遮蔽水域工况下正或负的许用静水剪力，kN，定义见第 4 章第 4 节[2.4.3]；

Q_{sw-f}——所考虑船体梁横剖面海上进水工况下正或负的许用静水剪力，kN，定义见第 4 章第 4 节[2.4.4]；

Q_{wv-LC}——对应于所考虑的动载荷工况，所考虑船体梁横剖面在航行状态完整或进水工况的垂向波浪剪力，kN，定义见第 4 章第 4 节[3.5.3]。

2.2 应力组合

2.2.1 针对如下应力组合，每一基本板格和加强筋都需要满足[3]的衡准：

（1）纵骨架式布置：

应力组合 1：

$$\sigma_x = \sigma_{\mathrm{hg}}$$
$$\sigma_y = 0$$
$$\tau = 0.7\tau_{\mathrm{hg}}$$

应力组合 2：

$$\sigma_x = 0.7\sigma_{\mathrm{hg}}$$
$$\sigma_y = 0$$
$$\tau = \tau_{\mathrm{hg}}$$

（2）横骨架式布置：

应力组合 1：

$$\sigma_x = 0$$

$$\sigma_y = \sigma_{hg}$$

$$\tau = 0.7\tau_{hg}$$

应力组合 2：

$$\sigma_x = 0$$

$$\sigma_y = 0.7\sigma_{hg}$$

$$\tau = \tau_{hg}$$

式中：σ_{hg} ——— 基本板格或加强筋的船体梁弯曲应力，N/mm²，定义见[2.1.1]。

τ_{hg} ——— 基本板格或加强筋的船体梁剪应力，N/mm²，定义见[2.1.2]。

3 屈曲衡准

3.1 整体加筋板结构

3.1.1 加筋板的整体屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{Overall} \leq \eta_{all}$$

式中：$\eta_{Overall}$ ——— 本章第 5 节[2.1.1]中定义的最大屈曲利用因子。

3.2 板

3.2.1 基本板格的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{Plate} \leq \eta_{all}$$

式中：η_{Plate} ——— 根据本章第 5 节[3.1.1]中定义的屈曲能力方程，由方法 SP-A 计算的板的最大屈曲利用因子。

3.3 加强筋

3.3.1 加强筋的屈曲强度应满足如下衡准：

$$\eta_{Stiffener} \leq \eta_{all}$$

式中：$\eta_{Stiffener}$ ——— 根据本章第 5 节[4.4]中定义的能力方程，计算的加强筋的最大屈曲利用因子。

注释 1：该项能力校核仅当本章第 5 节[2.1.1]中定义的加筋板的整体屈曲强度满足后才进行。

3.4 支杆、支柱和横撑材

3.4.1 支杆、支柱和横撑材结构的屈曲强度应满足如下衡准：

$$\eta \leq \eta_{all}$$

式中：η ——— 支杆、支柱或横撑材的最大屈曲利用因子，定义见本章第 5 节[6.1]。

第 4 节　直接强度分析屈曲要求

1　屈曲强度评估

1.1　一般要求

1.1.1 按照第 7 章和第 8 章进行有限元分析的所有结构单元都应分别进行屈曲评估。下列结构单元都应进行屈曲校核：

（1）加筋和非加筋板格，包括曲板；

（2）开口处腹板；

（3）槽形舱壁；

（4）支杆、支柱和横撑材。

1.1.2 本节要求适用于直接强度分析中承受压应力、剪应力和侧向压力的屈曲评估。

2 加筋和非加筋板格

2.1 一般要求

2.1.1 评估方法

船体结构中的板格应模拟成加筋或非加筋板格。针对矿砂船船体结构的加筋/非加筋板格的定义及适用的评估方法模型见表 2.1.1 和图 2.1.1（1）～图 2.1.1（6）。

板格类型及对应的评估方法模型　　表 2.1.1

结构单元	评估方法	常规板格定义
纵向结构，见图 2.1.1（1）		
外壳板 甲板 内壳 底边舱斜板 纵舱壁	SP-A	长度：强框架之间 宽度：主要支撑构件之间
舱口围侧板	SP-A 或 UP-A	长度：舱口围板撑板之间 宽度：支撑构件之间（或整个侧板高度）
与纵舱壁对齐或与底边舱斜板相连的双层底纵桁	SP-A	长度：强框架之间 宽度：整个腹板高度
不与纵舱壁对齐或与底边舱斜板相连的双层底纵桁腹板	SP-B⑤	长度：强框架之间 宽度：整个腹板高度
双壳边舱内，与底边舱斜板相连的纵向平台板	SP-A	长度：强框架之间 宽度：整个腹板高度
双壳边舱内，不与底边舱斜板相连的纵向平台板	SP-B	长度：强框架之间 宽度：整个腹板高度
横向结构，见图 2.1.1（2）		
甲板之下和船底板之上的横向强框架腹板，包括规则网格形状的肘板	SP-A⑥	局部加强筋 / 面板 /主要支撑构件之间
横撑材腹板	SP-B⑤	局部加强筋 / 面板 /主要支撑构件之
非规则的加筋板格，如边舱和舭部处的腹板板格（连续排列布置）	UP-A	局部加强筋 / 面板 /主要支撑构件之间

结构单元	评估方法	常规板格定义
非规则的加筋板格，如边舱和舭部处的腹板板格（非连续排列布置）	UP-B ⑤	局部加强筋 / 面板 /主要支撑构件之间
双层底肋板	SP-A⑥	长度：整个腹板高度 宽度：主要支撑构件之间
横舱壁，见图 2.1.1（3）		
所有规则的舱壁加筋板格，包括与常规加强筋垂直的次要屈曲加强筋（如短梁）	SP-A	长度：主要支撑构件之间 宽度：主要支撑构件之间
所有非规则的舱壁加筋板格，如边舱和舭部处的腹板板格	UP-B	局部加强筋 / 面板之间
舱壁水平桁腹板，包括规则板格形状的肘板	SP-B⑤	局部加强筋 / 面板之间
舱壁垂直桁腹板，包括规则板格形状的肘板	SP-B⑤	局部加强筋 / 面板之间
非规则板格形状的肘板	UP-B	局部加强筋 / 面板之间
顶 / 底凳，包括加强筋	SP-A	长度：隔板之间 宽度：凳的边长
凳的隔板	UP-B	局部加强筋 / 面板 /PSM 之间
舱口间甲板，见图 2.1.1（4）		
舱口间甲板板格	SP-A	局部加强筋 /主要支撑构件之间

注：① SP 表示加筋板格

② UP 表示非加筋板格；

③ A 表示方法 A；

④ B 表示方法 B；

⑤对于主要支撑构件腹板板格的某一长边，如沿着面板，或沿着不具有“边缘支持”特性的附连带板，如：“向内受拉”的特性，应选择方法 B（SP-B 或 UP-B）。对于其他情况，则应选择方法 A（SP-A 或 UP-A）；

⑥对于板的短边缘与铺板（带板翼缘）相连的典型情况，应选择方法 A（SP-A 或 UP-A），但如果板格某一长边不具有“边缘支持”特性，且能够被“向内受拉”，应选择方法 B（SP-B 或 UP-B）；

⑦ “边缘支持”——系指板格的某一边缘（一直）受到邻接板格和/或边缘加强筋的结构支持或约束；

⑧ “向内受拉”——系指板格的某一边缘能够被自由地拉着朝向板中心。

本表中，“边缘支持”和“向内受拉”所表征的力学特性互为相反。

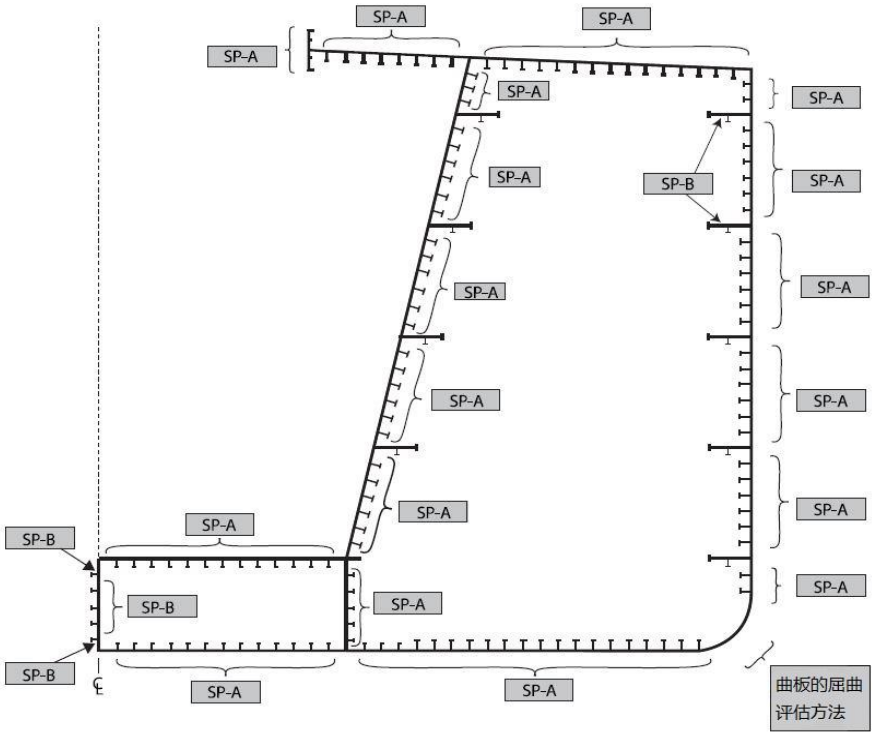


图 2.1.1(1)　典型矿砂船的纵向板格

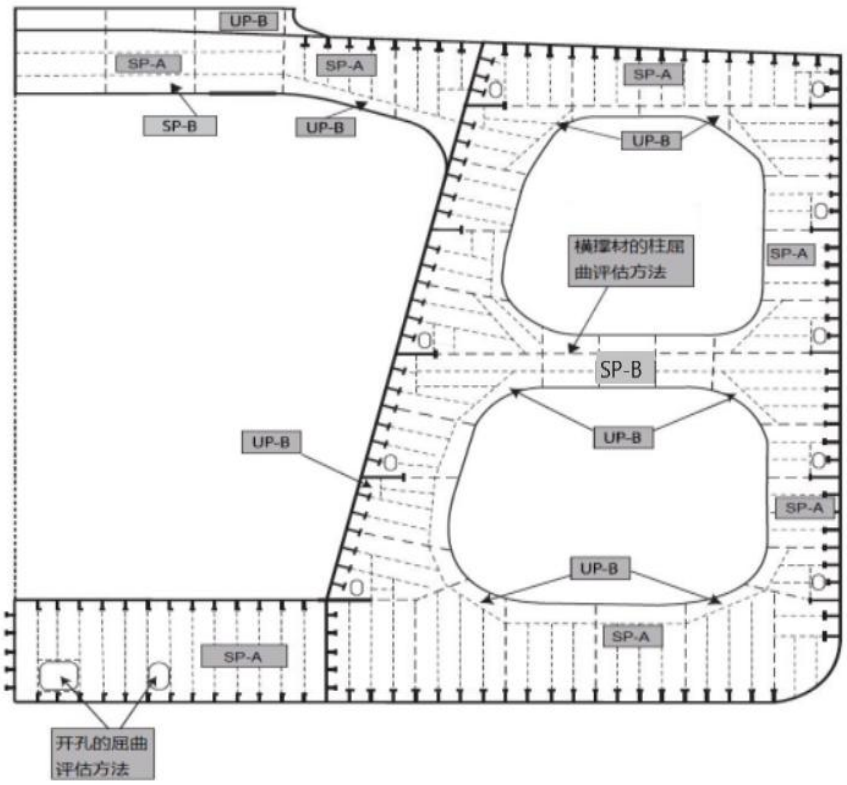


图 2.1.1(2)　典型矿砂船的横向强框架

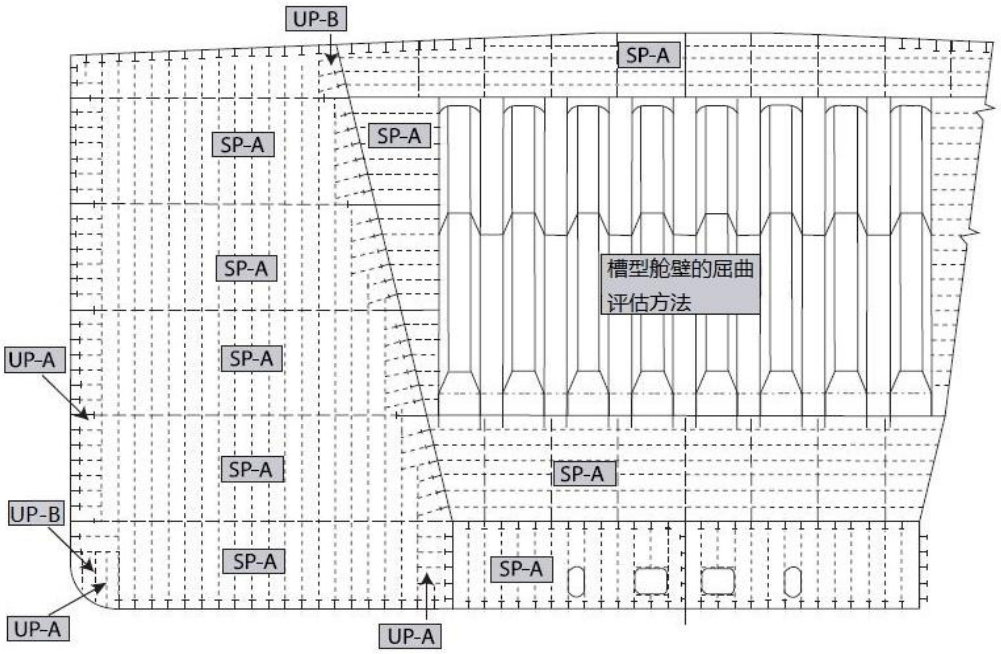


图 2.1.1(3)　典型矿砂船的横舱壁

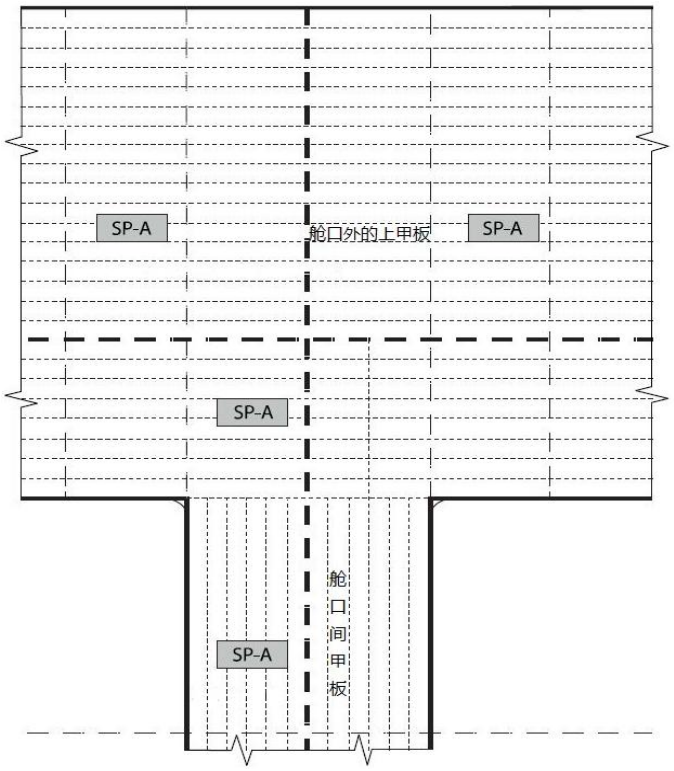


图 2.1.1(4)　舱口间甲板

2.1.2 板格的平均厚度

如果板格内厚度不均匀，屈曲评估时应采用如下加权平均板厚：

$$t_{avr} = \frac{\sum_{1}^{n} A_i t_i}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

式中：A_i ——— 第 i 个板单元的面积；

t_i ——— 第 i 个板单元的净厚度；

n ——— 构成屈曲板格的有限单元（板单元）个数。

2.1.3 板格的屈服应力

板格的屈服应力 R_{eH_P} 取为板格内所有单元的屈服应力的最小值。

2.2 加筋板格

2.2.1 为了表征整体屈曲行为，每一个加强筋连同带板应模拟成一个加筋板格，其尺寸范围定义见表 2.1.1。

2.2.2 如果一个加筋板架结构内的加强筋属性或者加强筋间距有变化，则应对所有的板格构造（每一个加强筋和加强筋间的板）分别进行计算。计算位置处的板厚、加强筋属性和加强筋间距假设应用于整个板架结构。

2.3 非加筋板格

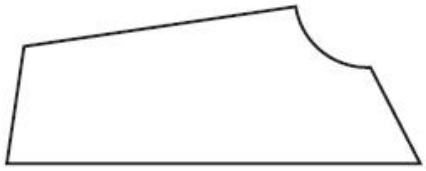
2.3.1 非规则板格

在强框架、水平桁材和肘板处，板格的几何形状（即由腹板加强筋/面板围成的边界）有可能为非矩形形状。对此，应分别根据[2.3.2]和[2.3.3]将非规则几何形状和三角形形状的板格定义为等效的矩形板格，并应满足屈曲评估。

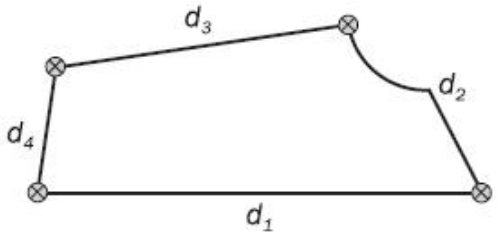
2.3.2 非规则几何形状板格的模拟

为了进行屈曲评估，对于非规则几何形状的非加筋板格，应根据如下步骤理想化为等效板格。

（1） 确定板格多边形边界上的最接近直角（90°）的四个角。

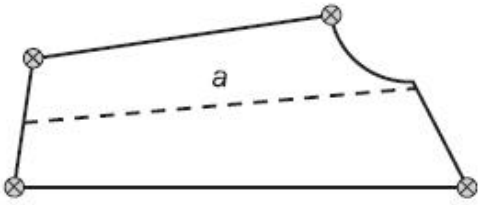


（2） 计算角与角之间沿板格多边形边界的距离，即端点之间所有直线线段的总和。



（3） 确定总长度最小的对边，即 d_1+d_3 和 d_2+d_4 的最小值；

（4） 在选定的对边的中点作连线（中点定义为距一端点为一半距离的点）。该线定义了能力模型的纵向。其长度定义为该能力模型的长度 a 。

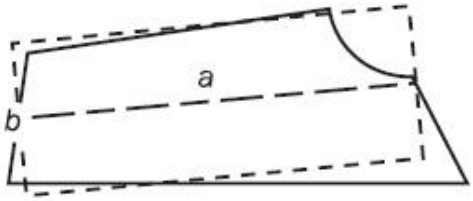


（5） 短边长度 b，mm，应取为：

$$b = A / a$$

式中：A ——　板的面积，mm²；

a ——　上述(4)中定义的长度，mm。

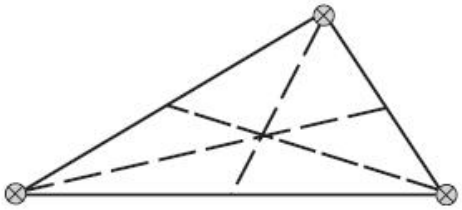


（6） 直接强度分析得到的应力，应先转化到等效矩形板格的局部坐标系统中，再用于屈曲评估。

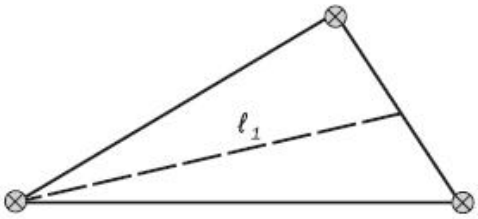
2.3.3 三角形板格的模拟

为了进行屈曲评估，对于三角形形状的非加筋板格，应根据如下步骤理想化为等效板格。

（1） 画出如下所示的中线。



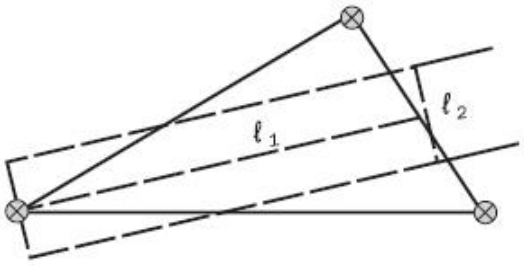
（2） 找出最长的中线。该中线的长度设为 ℓ_1，mm，则由其定义了能力模型的纵向。



（3） 模型的宽度 ℓ_2，mm，按下式计算：

$$l_2 = A / l_1$$

式中：A——　板的面积，mm²



（4） 等效矩形板格的短边长度 b 和长边长度 a，mm，分别按下列各式计算：

$$b=\frac{l_2}{C_{tri}}$$

$$a=l_1 C_{tri}$$

式中：

$$C_{tri}=0.4\frac{l_2}{l_1}+0.6$$

（5） 直接强度分析得到的应力，应先转化到等效矩形板格的局部坐标系统中，再用于屈曲评估。

2.4 参考应力

2.4.1 应力分布应取自直接计算分析，并施加到屈曲模型上。

2.4.2 参考应力用附录 1 中基于应力的参考应力计算方法得到。

2.5 侧向压力

2.5.1 直接计算分析中施加在结构上的侧向压力也应施加到屈曲评估模型中。

2.5.2 如果在由几个有限板单元构成的屈曲板格范围内所受的侧向压力不为常量，则应根据如下公式计算得到一个平均侧向压力，N/mm^2 ，并施加到屈曲评估模型中：

$$P_{avr}=\frac{\sum_1^n A_i P_i}{\sum_1^n A_i}$$

式中：A_i ——— 第 i 个板单元的面积，mm^2；

P_i ——— 第 i 个板单元的侧向压力，N/mm^2；

n ——— 屈曲板格内有限单元的个数。

2.6 屈曲衡准

2.6.1 UP-A

UP-A 方法的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{UP-A} \le \eta_{all}$$

式中：η_{UP-A} 根据本章第 5 节[3.1]中定义的方法 A 计算得到的板的最大屈曲利用因子。

2.6.2 UP-B

UP-B 方法的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{UP-B} \le \eta_{all}$$

式中：η_{UP-B} 根据本章第 5 节[3.1]中定义的方法 B 计算得到的板的最大屈曲利用因子。

2.6.3 SP-A

SP-A 方法的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{SP-A} \le \eta_{all}$$

式中：η_{SP-A} ——— 加筋板格的最大屈曲利用因子，取为下列各项的最大值：

（1）本章第 5 节[2.1]中定义的整体加筋板屈曲能力；

（2）根据本章第 5 节[3.1]中定义的方法 A 计算得到的板的屈曲能力；

（3）本章第 5 节[4.4]中定义的加强筋的屈曲强度，且对于加强筋两侧的基本板格，分别单独考虑其属性（厚度、尺寸）、[2.5.2]中定义的侧向压

力和参考应力。

注：仅当本章第 5 节[2.1]中定义的加筋板的整体屈曲强度满足后才进行加强筋的屈曲能力校核。

2.6.4 SP-B

SP-B 方法的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{SP-B} \leq \eta_{a11}$$

式中：η_{SP-B} —— 加筋板格的最大屈曲利用因子，取为下列各项的最大值：

（1） 本章第 5 节[2.1]中定义的整体加筋板屈曲能力；

（2） 根据本章第 5 节[3.1]中定义的方法 B 计算得到的板的屈曲能力；

（3） 本章第 5 节[4.4]中定义的加强筋的屈曲强度，且对于加强筋两侧的基本板格，分别单独考虑其属性（厚度、尺寸）和参考应力。

注：只有当本章第 5 节[2.1]中定义的加筋板的整体屈曲强度满足后才进行加强筋的屈曲能力检查。

3 槽形舱壁

3.1 屈曲失效模式

3.1.1 对于垂直横向槽形舱壁，应对其如下三种屈曲失效模式进行评估：

（1） 槽条的整体柱屈曲，适用于当承受局部垂向力(如起重机载荷)时；

（2）槽条翼板的屈曲；

（3）槽条腹板的屈曲。

3.2 整体柱屈曲

3.2.1 轴向受压槽形舱壁的整体屈曲失效模式应按柱屈曲（承受局部垂向力的垂直槽形舱壁）进行校核。

3.2.3 每一个由 1/2 翼板+1 个腹板＋1/2 翼板构成的槽条单元（即，如图 3.1.3 中灰色区域所示的单个槽条）应满足以下衡准：

$$\eta_{Overall} \leq \eta_{all}$$

式中：$\eta_{Overall}$ —— 本章第 5 节 [6.1.1] 和 [6.1.2] 定义的最大整体柱屈曲利用因子，且将其作为无支撑长度取为槽条长度的支柱。

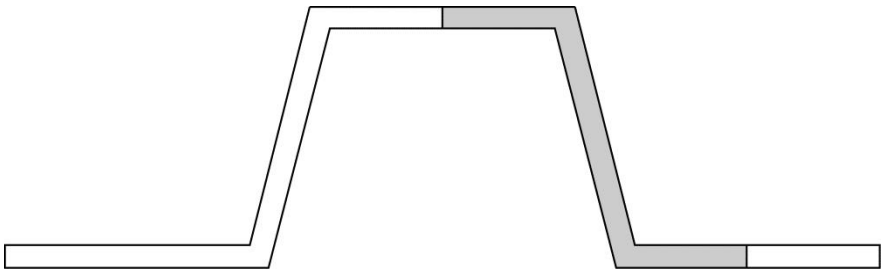


图 3.1.3 单个槽条

3.2.3 关于端部约束因子 f_{end}，如果凳的宽度超过了槽深的 2 倍，则取为与端部固支相对应的值，否则应取为与简支相对应的值。

3.3 局部屈曲

3.3.1 槽形舱壁每一个翼板和每一个腹板的压缩屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{Corr} \leqslant \eta_{all}$$

式中：η_{Corr}——根据本章第 5 节[7.1]定义的单元翼板或单元腹板的最大利用因子。

上述衡准应考虑两种应力组合：

（1）平行于槽条的最大正应力σ_x，以及在平行于槽条的最大正应力位置处的垂直于槽条方向的应力σ_y和剪应力τ；

（2）最大剪应力τ，以及在最大剪应力位置处的平行于槽条方向的正应力σ_x和垂直于槽条方向的应力σ_y。

屈曲评估中应选取长宽比α=2，并采用最大压应力/剪应力位置（见 [3.4.4] ）处的构件厚度。

3.4 参考应力

3.4.1 对于每个槽条翼板和腹板，都应进行屈曲评估；

3.4.2 应采用单元中心膜应力，并将实际应力按照[2.4.2]进行修正后用于屈曲评估；

3.4.3 平行于槽条方向的最大正应力应取为如下两个应力的最大值：

（1）在距离槽形舱壁端部 *b*/2 处平行于槽条方向的正应力；

（2）在槽条中部区域平行于槽条方向的正应力；

由于距离槽条端部很近的区域具有较大的应力梯度，因此在进行屈曲校核时对于应力取值点采用了 *b*/2 位置处的代表应力，而不是局部的高应力。

如果槽条端部安装有卸货板，则对于端部位置处平行于槽条方向的正应力，应取为按照如下方法定义位置处的应力值：首先，分别找出卸货板和翼板(或腹板)在各自宽度方向的中线，并求得其交点；然后在沿着翼板(或腹板)宽度方向中线上，距离该点 *b*/2 位置处即为取值点。图 3.4.3(1)和图 3.4.3(2)为一些典型结构的示例。

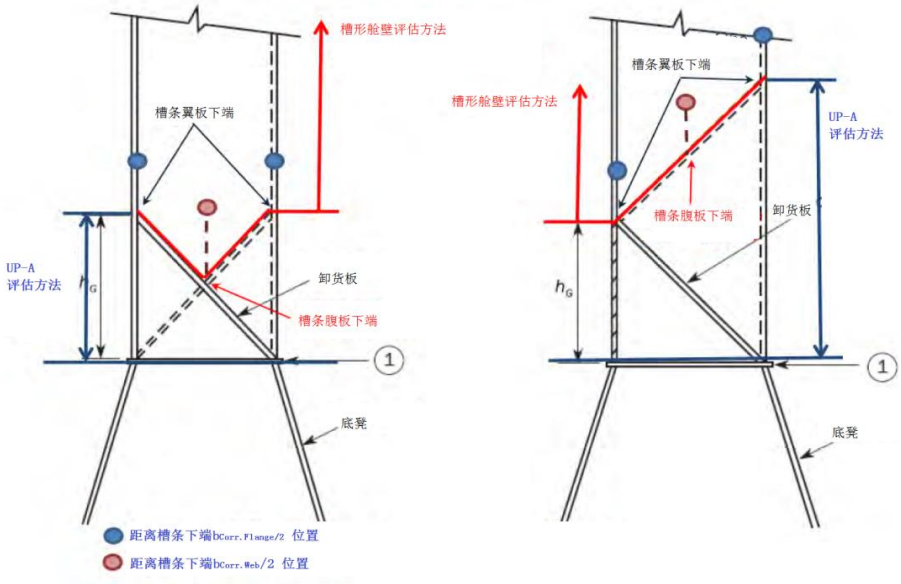


图 3.4.3(1) 对于对称和非对称卸货板在 b/2 的读取点

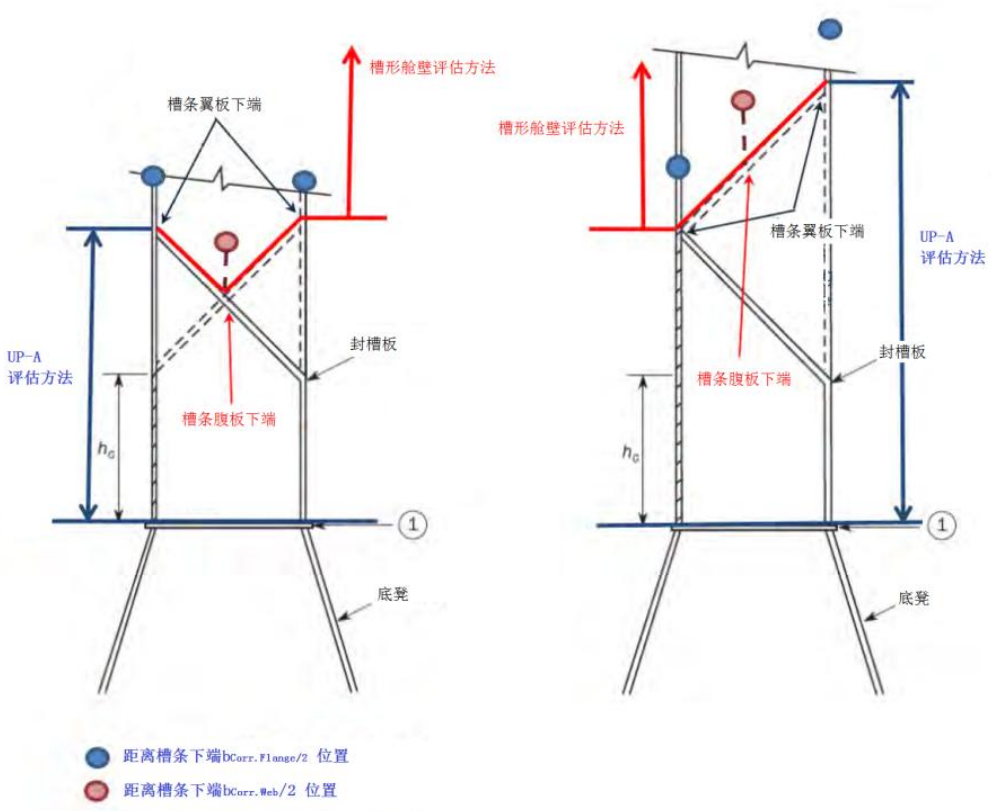


图 3.4.3(2) 对于对称和非对称卸货板/封槽板在 *b*/2 的读取点

最大剪应力是指槽条翼板(或腹板)上在上述针对正应力所定义的取值位置处的最大值。面内应力 σ_x 、 σ_y 和剪应力 τ 应取为槽条翼板或腹板上所考虑位置处沿着宽度方向的单元应力的平均值。

如果距离端部 *b*/2 处的应力值不能从有限单元中直接得到，则该位置处的应力应针对该区域内的单元通过插值得到。这一插值应针对距离槽条端部 3*b* 范围内的单元，在从翼板或腹板宽度方向中线量起、距离槽条端部或者卸货板(如安装)的交界位置 *b*/2 处插值得到。平行于槽条方向的面内应力 σ_x 、 σ_y 应根据本章附录 1 中[2.1]给出的方法插值得到。

在 b/2 处的剪应力应在最接近 b/2 处的单元通过线性插值得到。此处所指 b 为所计算的翼板(或腹板)的宽度。

3.4.4 如果翼板采用了一种以上的板厚，则对于每个不同的板厚区域，都应该取其最大应力，并分别进行屈曲评估。

4 支杆、支柱及横撑材

4.1 屈曲衡准

4.1.1 支杆、支柱及横撑材结构的屈曲强度应满足如下衡准：

$$\eta_{pillar} \leq \eta_{all}$$

式中：η_{pillar} —— 支杆、支柱及横撑材的最大屈曲利用因子，定义见本章第 5 节[6.1]。

第 5 节　屈曲能力

符号：

本节中未定义的符号，参见本章及第 1 章第 4 节的符号说明。

A_p—— 加强筋带板的净横截面积，mm²。

A_s —— 不包括带板的加强筋净横截面积，mm²。

b_{eff} —— 加强筋的有效带板宽度，mm，定义见[4.3.3]。

b_{eff1} —— 不考虑剪滞效应的加强筋有效带板宽度，mm，取为：

（1）如果$\sigma_x > 0$，

对描述性评估：

$$b_{eff1} = \frac{C_{x1}b_1 + C_{x2}b_2}{2}$$

对有限元分析

$$b_{eff1} = C_x b$$

（2）如果$\sigma_x \le 0$，

$$b_{eff1} = b$$

b_f —— 加强筋的翼板宽度，mm。

b_1, b_2 —— 所考虑的加强筋每一侧的板格宽度。

C_{x1}, C_{x2} —— 对于所考虑的加强筋，针对每一侧板格 EPP1 和 EPP2，根据表 3.1.3 工况 1 所定义的折减因子。

F_{long} —— [3.1.4]中定义的系数。

F_{tran} —— [3.1.5]中定义的系数。

S—— 分项安全因子，取为：

S=1.1，对于承受局部集中载荷的结构；

S=1.15，对于舱口围板、内底板、纵舱壁板、加筋横舱壁（如有时）和横舱壁的顶凳和底凳侧板上的常规加强筋；

S=1.0，对于其他结构。

γ —— 应力倍增因子，当该因子使得载荷达到相关方程成立时，$\gamma = \gamma_c$。

γ_c —— 失效时的应力倍增因子。

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本节给出了用于确定板格、加强筋、主要支撑构件、支杆和支柱结构、槽形舱壁结构的屈曲能力的方法。

1.1.2 应用本节规范时，施加在结构构件上的应力σ_x、σ_y和τ 定义如下：

（1）对于描述性屈曲要求，参见本章第 3 节。

（2）对于有限元分析屈曲要求，参见本章第 4 节。

1.1.3 极限屈曲能力

计算极限屈曲能力，首先要施加实际的应力组合，然后再按比例增加或者减小应力，直到[2.1.1]、[3.1.1]、[4.4.1]中定义的相关方程等于 1.0 为止。

1.1.4 屈曲利用因子

结构构件的屈曲利用因子为其不同屈曲模式得到的利用因子的最大值。

1.1.5 侧向压力

在屈曲强度评估中，侧向压力应视为常量。

2 加筋板的整体屈曲能力

2.1 加筋板整体弹性屈曲

2.1.1 加筋板格的整体弹性屈曲能力分析应基于以下相关方程：

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_{GEB}} = 1$$

相应的屈曲利用因子：$\eta_{overall} = \frac{1}{\gamma_c}$

式中，相应于整体弹性屈曲能力的应力倍增因子γ_{GEB}应根据下列公式进行计算：

$\gamma_{GEB} = \gamma_{GEB,bi+\tau}$　　对于 $\tau \neq 0$，且$\sigma_x > 0$ 或$\sigma_y > 0$

$\gamma_{GEB} = \gamma_{GEB,bi}$　　对于 $\tau = 0$，且$\sigma_x > 0$ 或$\sigma_y > 0$

$\gamma_{GEB} = \gamma_{GEB,\tau}$　　对于 $\tau \neq 0$，且$\sigma_x \leq 0$ 且$\sigma_y \leq 0$

其中，$\gamma_{GEB,bi+\tau}$、$\gamma_{GEB,bi}$ 和$\gamma_{GEB,\tau}$ 为相应于不同载荷组合情况的应力倍增因子，分别按照[2.1.2]，[2.1.3] 和[2.1.4]中给出的公式进行计算，而且计算采用的σ_x和σ_y应不小于0.

2.1.2 对于承受双轴向载荷的加筋板，其应力倍增因子$\gamma_{GEB,bi}$为：

$$\gamma_{GEB,bi} = \frac{\pi^2}{L_{B1}^2 L_{B2}^2} \frac{\left[D_{11}L_{B2}^4 + 2(D_{12} + D_{33})n^2 L_{B1}^2 L_{B2}^2 + n^4 D_{22} L_{B1}^4\right]}{L_{B2}^2 N_x + n^2 L_{B1}^2 K_{tran} N_y}$$

式中：

N_x——作用在板格短边边缘单位长度上，沿着板格x轴方向的等效力，N/mm，计算公式如下：

$$N_x = \sigma_{x,av}(A_p + A_s)/s$$

对于设置 U 型材的加筋板格，加强筋间距 s 取为：

$$s = b_1 + b_2$$

式中 b_1和 b_2的定义见本节图 3.1.4。

N_y——作用在板格长边边缘单位长度上，沿着板格y轴方向的等效力，N/mm，计算公式如下：

$$N_y = c\sigma_y t_p$$

L_{B1}——加强筋跨距，mm，等于主要支撑构件之间的距离，即$L_{B1} = l$。

L_{B2}——加筋板的宽度，mm，取为 6 倍的加强筋间距，即$L_{B2} = 6s$。

n——与加强筋垂直方向的半波数，应使得计算得到的$\gamma_{GEB,bi}$为大于 0 的最小值。

K_{tran}——系数，取为0.9。

c—— 考虑作用在板格边界上与加强筋方向垂直的应力影响系数，取为

$c = 0.5(1+\Psi)$ 对于 $0 \le \Psi \le 1$

$c = \frac{1}{2(1-\Psi)}$ 对于 $\Psi < 0$

ψ—— 表 3.1.3 中工况 2 所示的边缘应力比。

$\sigma_{x,av}$—— 泊松修正后板和加强筋的平均应力，MPa，取为：

$\sigma_{x,av} = \sigma_x - \nu c \sigma_y A_s/(A_p + A_s) \ge 0$ 对于 $\sigma_x > 0$，且$\sigma_y > 0$

$\sigma_{x,av} = \sigma_x$ 对于 $\sigma_x \le 0$，或 $\sigma_y \le 0$

$D_{11}, D_{12}, D_{22}, D_{33}$ —— 加筋板的弯曲刚度系数，$N \cdot mm$，一般定义为：

$$\left.\begin{aligned} D_{11} &= \frac{EI_{eff}10^4}{s} \\ D_{12} &= \frac{Et_p^3\nu}{12(1-\nu^2)} \\ D_{22} &= \frac{Et_p^3}{12(1-\nu^2)} \\ D_{33} &= \frac{Et_p^3}{12(1+\nu)} \end{aligned}\right\}$$

对于设置 U 型材的加筋板格，D_{12} 和 D_{22} 定义为：

$$D_{22} = \frac{Et_p^3}{12(1-\nu^2)}\left[1.2 + 4.8 \times \mathrm{Min}\left(1.0, \frac{b_1^2}{h_w(b_1+b_2)}\right) \times \mathrm{Min}\left(1.0, \left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3\right)\right]$$

$$D_{12} = \nu D_{22}$$

h_w ——U 型材的腹板宽度，定义见本节图 3.1.4。

I_{eff}——加强筋连同有效带板宽度的截面惯性矩，cm^4，与[4.3.7]中的 I 相同。

2.1.3 对于承受纯剪切载荷的加筋板，其应力倍增因子 $\gamma_{GEB,\tau}$ 为：

$$\gamma_{GEB,\tau} = \frac{\sqrt[4]{D_{11}^3 D_{22}}}{(L_{B1}/2)^2 N_{xy}}\left[8.125 + 5.64\sqrt{\frac{(D_{12}+D_{33})^2}{D_{11}D_{22}}} - 0.6\frac{(D_{12}+D_{33})^2}{D_{11}D_{22}}\right] \quad \text{对于 } D_{11}D_{22} \ge (D_{12}+D_{33})^2$$

$$\gamma_{GEB,\tau} = \frac{\sqrt{2D_{11}(D_{12}+D_{33})}}{(L_{B1}/2)^2 N_{xy}}\left[8.3 + 1.525\frac{D_{11}D_{22}}{(D_{12}+D_{33})^2} - 0.493\frac{D_{11}^2 D_{22}^2}{(D_{12}+D_{33})^4}\right] \quad \text{对于 } D_{11}D_{22} < (D_{12}+D_{33})^2$$

其中，$N_{xy} = \tau t_p$

2.1.4 对于承受组合载荷的加筋板，其应力倍增因子$\gamma_{GEB,bi+\tau}$为：

$$\gamma_{GEB,bi+\tau}=\frac{1}{2}\gamma_{GEB,\tau}{}^{2}\left[-\frac{1}{\gamma_{GEB,bi}}+\sqrt{\frac{1}{\gamma_{GEB,bi}{}^{2}}+4\frac{1}{\gamma_{GEB,\tau}{}^{2}}}\right]$$

其中，$\gamma_{GEB,bi}$和$\gamma_{GEB,\tau}$的定义分别见[2.1.2]和[2.1.3]。

3 板的屈曲能力

3.1 板的极限能力

3.1.1 板的极限能力应基于如下相关方程：

$$\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma_{cx}}\right)^{e_0}-B\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma_{cx}}\right)^{e_0/2}\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma_{cy}}\right)^{e_0/2}+\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma_{cy}}\right)^{e_0}+\left(\frac{\gamma_{c1}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{e_0}=1$$

$$\left(\frac{\gamma_{c2}\sigma_x S}{\sigma_{cx}}\right)^{2/\beta_p^{0.25}}+\left(\frac{\gamma_{c2}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{2/\beta_p^{0.25}}=1 \quad \text{对}\sigma_x\geq 0$$

$$\left(\frac{\gamma_{c3}\sigma_y S}{\sigma_{cy}}\right)^{2/\beta_p^{0.25}}+\left(\frac{\gamma_{c3}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{2/\beta_p^{0.25}}=1 \quad \text{对}\sigma_y\geq 0$$

$$\frac{\gamma_{c4}|\tau|S}{\tau_c}=1$$

由此得到：

$$\gamma_c=\min(\gamma_{c1},\gamma_{c2},\gamma_{c3},\gamma_{c4})$$

相应的屈曲利用因子：

$$\eta_{plate}=\frac{1}{\gamma_c}$$

式中：

σ_x,σ_y ___ 施加在板格边界上的正应力，N/mm²，定义见[3.1.6]。

τ ___ 施加在板格边界上的剪应力，N/mm²，定义见[3.1.6]。

σ_{cx} ___ 沿着与屈曲板格长边平行的方向的极限屈曲应力，N/mm², 定义见[3.1.3]。

σ_{cy} ___ 沿着与屈曲板格短边平行的方向的极限屈曲应力，N/mm², 定义见[3.1.3]。

τ_c ___ 极限屈曲剪应力，N/mm², 定义见[3.1.3]。

$\gamma_{c1},\gamma_{c2},\gamma_{c3},\gamma_{c4}$ 对于上面每一个不同极限状态在失效时的应力倍增因子。γ_{c2}和γ_{c3}仅分别在$\sigma_x\geq 0$和$\sigma_y\geq 0$成立时才考虑。

B —— 系数，定义见表 3.1.1。

e_0 —— 系数，定义见表 3.1.1。

β_p ___ 板的长细比参数，定义为：

$$\beta_p=\frac{b}{t_p}\sqrt{\frac{R_{eH_P}}{E}}$$

系数 B 和 e_0 的定义　　表 3.1.1

施加的应力	B	e_0
$\sigma_x \geq 0$ 且 $\sigma_y \geq 0$	0.7-0.3β_p/α^2	$2/\beta_p^{0.25}$
$\sigma_x < 0$ 或 $\sigma_y < 0$	1.0	2.0

3.1.2 参考细长度定义为：

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_{eH_P}}{K\sigma_E}}$$

式中：K　——屈曲因子，定义见表 3.1.3 和表 3.1.6。

3.1.3 极限屈曲应力

板格的极限屈曲应力，N/mm^2，取为：

$$\sigma_{cx} = C_x R_{eH_P}$$

$$\sigma_{cy} = C_y R_{eH_P}$$

受剪板格的极限屈曲应力，N/mm^2，取为：

$$\tau_c = C_\tau \frac{R_{eH_P}}{\sqrt{3}}$$

式中：C_x, C_y, C_τ　——折减因子，定义见表 3.1.3。

对于[3.1.1]中的第一个方程，当 $\sigma_x < 0$ 或 $\sigma_y < 0$ 时，折减因子应取为：$C_x = C_y = C_\tau = 1$

对于表 3.1.3 中工况②：

（1）对 SP-A 和 UP-A，应采用如下 c_1 计算 C_y

$$c_1 = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \geq 0$$

（2）对 SP-B 和 UP-B，应采用如下 c_1 计算 C_y

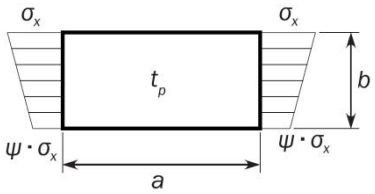
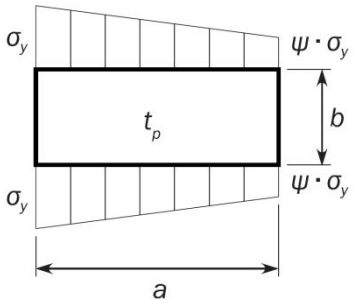
$$c_1 = 1$$

（3）对于槽形舱壁的槽条，应采用如下 c_1 计算 C_y

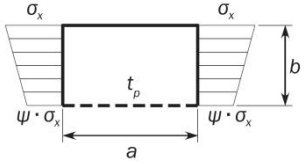
$$c_1 = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \geq 0$$

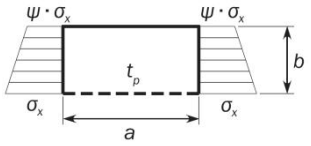
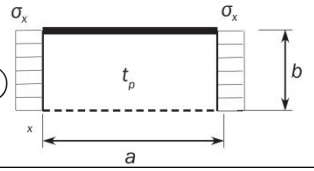
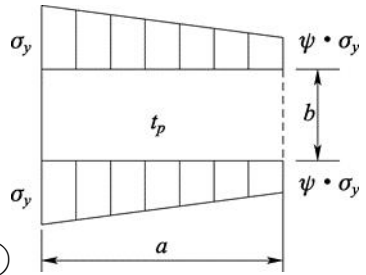
板的边界条件应视为简支（参见表 3.1.3 中的工况①、②和⑮）。如果板的边界条件与简支相差很大，可以在 CCS 同意的前提下，根据表 3.1.3 的不同工况，采用更恰当的边界条件。

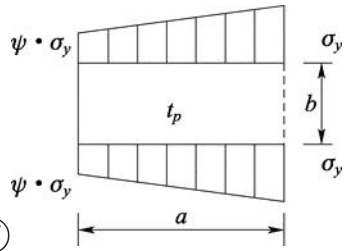
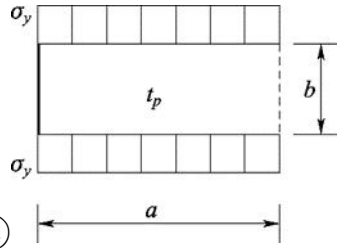
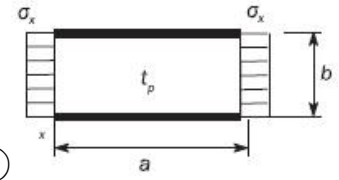
平面板格的屈曲因子和折减因子 **表3.1.3**

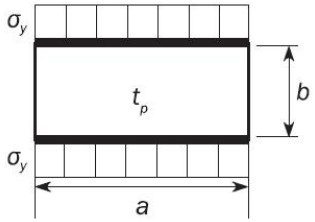
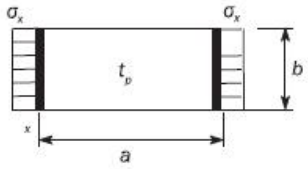
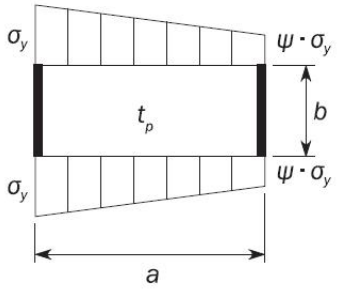
<table>
<tr><th>工况</th><th>应力比 ψ</th><th colspan="2">长宽比 α</th><th>屈曲因子 K</th><th>折减因子 C</th></tr>
<tr><td rowspan="3">①

</td><td>$1 \ge \psi \ge 0$</td><td colspan="2" rowspan="2">$K_x = F_{long}\dfrac{8.4}{\psi+1.1}$</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3">当 $\sigma_x \le 0$ 时， $C_x = 1$；
当 $\sigma_x > 0$ 时：
$C_x = 1$ 对 $\lambda \le \lambda_c$
$C_x = c\left(\dfrac{1}{\lambda}-\dfrac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对 $\lambda > \lambda_c$
其中：
$c = (1.25-0.12\psi) \le 1.25$
$\lambda_c = \dfrac{c}{2}\left(1+\sqrt{1-\dfrac{0.88}{c}}\right)$</td></tr>
<tr><td>$0 > \psi > -1$</td></tr>
<tr><td>$\psi \le -1$</td><td colspan="2">$K_x = F_{long}\left[5.975(1-\psi)^2\right]$</td></tr>
<tr><td rowspan="4">②

</td><td rowspan="3">$1 \ge \psi \ge 0$</td><td colspan="2">$K_y = F_{tran}\dfrac{2\left(1+\dfrac{1}{\alpha^2}\right)^2}{1+\psi+\dfrac{(1-\psi)}{100}\left(\dfrac{2.4}{\alpha^2}+6.9f_1\right)}$</td><td rowspan="3">当 $\sigma_y \le 0$ 时， $C_y = 1$；
当 $\sigma_y > 0$ 时：
$C_y = c\left(\dfrac{1}{\lambda}-\dfrac{R+F^2(H-R)}{\lambda^2}\right)$
其中：
$c = (1.25-0.12\psi) \le 1.25$
$R = \lambda(1-\lambda/c)$ 对 $\lambda < \lambda_c$
$R = 0.22$ 对 $\lambda \ge \lambda_c$
$\lambda_c = 0.5c(1+\sqrt{1-0.88/c})$
$F = \left(1-\left(\dfrac{K}{0.91}-1\right)\Big/\lambda_p^2\right)c_1 \ge 0$</td></tr>
<tr><td>$\alpha \le 6$</td><td>$f_1 = (1-\psi)(\alpha-1)$</td></tr>
<tr><td>$\alpha > 6$</td><td>$f_1 = 0.6(1-\dfrac{6\psi}{\alpha})(\alpha+\dfrac{14}{\alpha})$
但不大于 $14.5-\dfrac{0.35}{\alpha^2}$</td></tr>
<tr><td>$1-\dfrac{4\alpha}{3} \le \psi < 0$</td><td colspan="2">$K_y = \dfrac{200F_{tran}\left(1+\beta^2\right)^2}{(1-f_3)(100+2.4\beta^2+6.9f_1+23f_2)}$</td></tr>
</table>

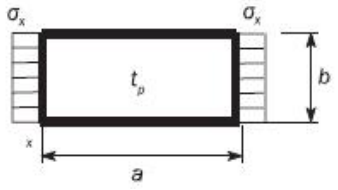
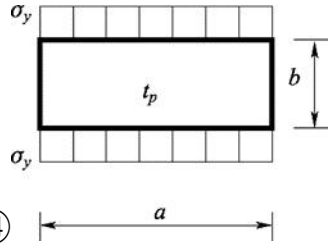
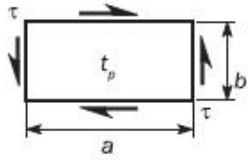
工况	应力比 ψ	长宽比 α	屈曲因子 K	折减因子 C
		$\alpha > 6(1-\psi)$	$f_1 = 0.6(\frac{1}{\beta}+14\beta)$ 但不大于 $14.5-0.35\beta^2$ $f_2 = f_3 = 0$	$\lambda_p^2 = \lambda^2 - 0.5$ 且 $1 \le \lambda_p^2 \le 3$ c_1 的定义见 3.1.3。 $H = \lambda - \frac{2\lambda}{c(T+\sqrt{T^2-4})} \ge R$ $T = \lambda + \frac{14}{15\lambda} + \frac{1}{3}$
		$3(1-\psi) \le \alpha \le 6(1-\psi)$	$f_1 = \frac{1}{\beta} - 1$ $f_2 = f_3 = 0$	
		$1.5(1-\psi) \le \alpha < 3(1-\psi)$	$f_1 = \frac{1}{\beta} - (2-\omega\beta)^4 - 9(\omega\beta-1)(\frac{2}{3}-\beta)$ $f_2 = f_3 = 0$	
		$1-\psi \le \alpha < 1.5(1-\psi)$	如果 $\alpha > 1.5$，则 $f_1 = 2\left(\frac{1}{\beta} - 16\left(1-\frac{\omega}{3}\right)^4\right)(\frac{1}{\beta}-1)$ $f_2 = 3\beta - 2$； $f_3 = 0$ 如果 $\alpha \le 1.5$，则 $f_1 = 2\left(\frac{1.5}{1-\psi}-1\right)\left(\frac{1}{\beta}-1\right)$ $f_2 = \frac{\psi(1-16f_4^2)}{1-\alpha}$； $f_3 = 0$ $f_4 = \left[1.5 - Min(1.5;\alpha)\right]^2$	

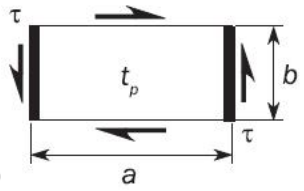
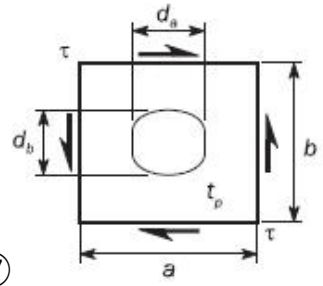
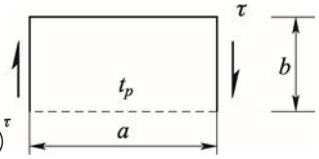
工况	应力比 ψ	长宽比 α	屈曲因子 K	折减因子 C
		$0.75(1-\psi) \le \alpha < (1-\psi)$	$f_1 = 0$ $f_2 = 1 + 2.31(\beta - 1) - 48\left(\frac{4}{3} - \beta\right) f_4^2$ $f_3 = 3 f_4 (\beta - 1)\left(\frac{f_4}{1.81} - \frac{\alpha - 1}{1.31}\right)$ $f_4 = \left[1.5 - \mathrm{Min}(1.5;\alpha)\right]^2$	
	$\psi < 1 - \frac{4\alpha}{3}$	$K_y = 5.972 F_{tran} \frac{\beta^2}{1 - f_3}$ 式中， $f_3 = f_5\left(\frac{f_5}{1.81} + \frac{1 + 3\psi}{5.24}\right)$ $f_5 = \frac{9}{16}\left[1 + Max(-1;\psi)\right]^2$		
③ 	$1 \ge \psi \ge 0$	$K_x = \frac{4(0.425 + 1/\alpha^2)}{3\psi + 1}$		$C_x = 1$ 对 $\lambda \le 0.7$
	$0 > \psi > -1$	$K_x = 4(0.425 + 1/\alpha^2)(1 + \psi) - 5\psi(1 - 3.42\psi)$		$C_x = \frac{1}{\lambda^2 + 0.51}$ 对 $\lambda > 0.7$

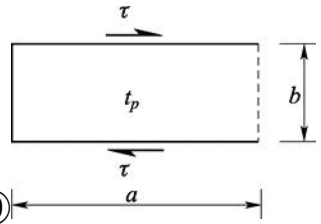
工况	应力比 ψ	长宽比 α	屈曲因子 K	折减因子 C
④ 	$1 \geq \psi \geq -1$	$K_x = \left(0.425 + \frac{1}{\alpha^2}\right)\frac{3-\psi}{2}$		
⑤ 	-	$\alpha \geq 1.64$	$K_x = 1.28$	
		$\alpha < 1.64$	$K_x = \frac{1}{\alpha^2} + 0.56 + 0.13\alpha^2$	
⑥ 	$1 \geq \psi \geq 0$	$K_y = \frac{4(0.425+\alpha^2)}{(3\psi+1)\alpha^2}$		$C_y = 1$ 对 $\lambda \leq 0.7$ $C_y = \frac{1}{\lambda^2 + 0.51}$ 对 $\lambda > 0.7$
	$0 > \psi \geq -1$	$K_y = 4\left(0.425+\alpha^2\right)\left(1+\psi\right)\frac{1}{\alpha^2} - 5\psi\left(1-3.42\psi\right)\frac{1}{\alpha^2}$		

工况	应力比 ψ	长宽比 α	屈曲因子 K	折减因子 C
⑦ 	$1 \geq \psi \geq -1$	$K_y = \left(0.425 + \alpha^2\right)\frac{3-\psi}{2\alpha^2}$		
⑧ 	--	$K_y = 1 + \frac{0.56}{\alpha^2} + \frac{0.13}{\alpha^4}$		
⑨ 	—	$K_x = 6.97$		$C_x = 1$ 对$\lambda \leq 0.83$ $C_x = 1.13\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda > 0.83$

工况	应力比ψ	长宽比α	屈曲因子 K	折减因子 C
⑩ 	—	$K_y=4+\frac{2.07}{\alpha^2}+\frac{0.67}{\alpha^4}$		$C_x=1$ 对$\lambda\le 0.83$ $C_x=1.13\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda>0.83$
⑪ 	—	$\alpha\ge 4$	$K_x=4$	$C_x=1$ 对$\lambda\le 0.83$ $C_x=1.13\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda>0.83$
		$\alpha<4$	$K_x=4+2.74\left[\frac{4-\alpha}{3}\right]^4$	
⑫ 	-	K_y与工况②中的相同。		如果$\alpha<2$，则$C_y=C_{y2}$； 如果$\alpha\ge 2$，则 $C_y=\left(1.06+\frac{1}{10\alpha}\right)C_{y2}$； 上式中，$C_{y2}$是指根据工况②计算的$C_y$。

工况	应力比 ψ	长宽比 α	屈曲因子 K	折减因子 C
⑬ 	—	$\alpha \geq 4$	$K_x = 6.97$	$C_x = 1$ 对$\lambda \leq 0.83$ $C_x = 1.13\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda > 0.83$
		$\alpha < 4$	$K_x = 6.97 + 3.1\left[\frac{4-\alpha}{3}\right]^4$	
⑭ 	—	$K_y = \frac{6.97}{\alpha^2} + \frac{3.1}{\alpha^4}\left(\frac{4-1/\alpha}{3}\right)^4$		$C_y = 1$ 对$\lambda \leq 0.83$ $C_y = 1.13\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda > 0.83$
⑮ 	—	$K_\tau = \sqrt{3}\left[5.34 + \frac{4}{\alpha^2}\right]$		$C_\tau = 1$ 对$\lambda \leq 0.84$ $C_\tau = \frac{0.84}{\lambda}$ 对$\lambda > 0.84$

工况	应力比 ψ	长宽比 α	屈曲因子 K	折减因子 C
⑯ 	—	$K_\tau = \sqrt{3}\left[5.34 + \text{Max}\left[\frac{4}{\alpha^2};\frac{7.15}{\alpha^{2.5}}\right]\right]$		
⑰ 	—	$K_\tau = K_{\tau case15} r$ $K_{\tau case15}$ 是指按工况⑮计算得到的 K_τ r=开口折减因子，取作： $r = \left(1-\frac{d_a}{a}\right)\left(1-\frac{d_b}{b}\right)$ $\frac{d_a}{a} \le 0.7$ 且 $\frac{d_b}{b} \le 0.7$		
⑱ 	—	$K_\tau = \sqrt{3}\left(0.6 + \frac{4}{\alpha^2}\right)$		$C_\tau = 1$ 对 $\lambda \le 0.84$ $C_\tau = \frac{0.84}{\lambda}$ 对 $\lambda > 0.84$

工况	应力比 ψ	长宽比 α	屈曲因子 K	折减因子 C
⑲ 	—	K_τ= 8		
边缘的边界条件：- - - - - - - - - - - - 板边缘自由 ； ——————板边缘简支; ▬▬▬▬ 板边缘夹紧				
注(1)：表中列出的是一般工况，其中的应力分量 (σ_x,σ_y) 应理解为在局部坐标系中。				

3.1.4 修正因子 F_{long}

修正因子 F_{long} 依赖于屈曲板格长边边缘上的加强筋类型，其定义参见表 3.1.4。对于具有不同边缘加强筋的板格，应采用 F_{long} 的平均值。对于表 3.1.4 中以外的加强筋类型，采用的 C 值应得到 CCS 认可。对于该种情况，如果能够用非线性有限元分析对其进行屈曲强度校核，且 CCS 也认可，则选用的 C 值可大于表 3.1.4 中给出的数值。

修正因子 F_{long}　　表 3.1.4

<table>
<tr><th colspan="3">结构单元类型</th><th>F_{long}</th><th>C</th></tr>
<tr><td colspan="3">非加筋板格</td><td>1.0</td><td>N/A</td></tr>
<tr><td rowspan="7">加筋板</td><td colspan="2">两端都不固支的加强筋</td><td>1.0</td><td>N/A</td></tr>
<tr><td rowspan="6">两端固支的加强筋</td><td>扁钢(1)</td><td rowspan="4">如果 $\frac{t_w}{t_p} > 1$，则 $F_{long} = C + 1$；
如果 $\frac{t_w}{t_p} \le 1$，则 $F_{long} = C\left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3 + 1$</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td>球扁钢</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>角钢</td><td>0.4</td></tr>
<tr><td>T 型材</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>刚度较大的桁材（如底肋板）</td><td>1.4</td><td>N/A</td></tr>
<tr><td>安装在舱口盖上的 U 型材(2)</td><td>（1）对于安装 U 型材的板，包括 EPP b_1 和 EPP b_2：
● 对于 $b_2 < b_1$：　$F_{long}=1$；
● 对于 $b_2 \geqslant b_1$：
$F_{long} = \left(1.55 - 0.55\frac{b_1}{b_2}\right)\left[1 + C\left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3\right]$
（2）对于 U 型材的其他板：$F_{long}=1$</td><td>0.2</td></tr>
<tr><td colspan="5">注（1）：t_w 为腹板净厚度，mm，且不按照[4.3.5]中的定义进行修正。
注（(2)：　b_1 和 b_2 的定义见图 3.1.4。</td></tr>
</table>

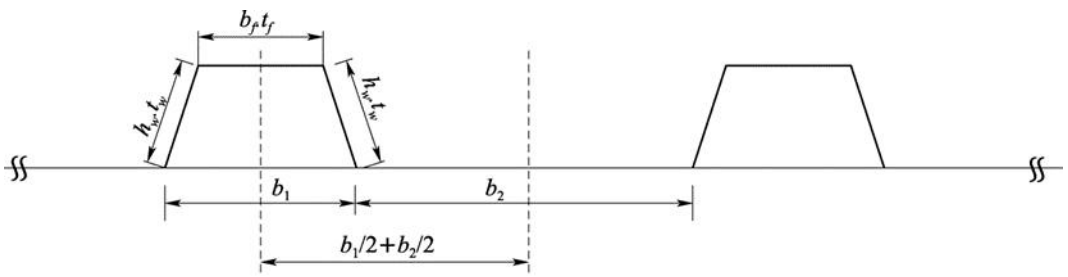


图 3.1.4 舱口盖 U 型材示意图

3.1.5 修正因子 F_{tran}

● （1）对于设置在舱口盖的 U 型材的带板：

$$F_{tran} = \mathrm{Max}\left(3 - 0.08(F_{tran0} - 6)^2, 1.0\right) \le 2.25$$

式中：

$$F_{tran0} = \mathrm{Min}\left(\frac{b_2}{b_1} + \frac{6b_2^2}{\pi^2 h_w (b_1 + b_2)}\left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3, 6\right)$$ ，对 EPP b_2

$$F_{tran0} = \mathrm{Min}\left(\frac{b_1}{b_2} + \frac{6b_1^2}{\pi^2 h_w (b_2 + b_1)}\left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3, 6\right)$$ ，对 EPP b_1

式中：b_1、b_2 和 h_w 的定义见本节图 3.1.4。

表 3 中工况 2 所定义的参数 F 应替换为以下公式：

$$F = \left[1 - \left(\frac{K_y}{0.91F_{tran}} - 1\right) / \lambda_p^2\right] c_1 \ge 0$$

修正因子 F_{tran} 应取为 1.0。

3.1.6 曲面板格

对于 $R / t \le 2500$的曲板板格适用如下要求，否则应适用[3.1.1]给出的平板的极限能力要求。

曲面板格极限状态应基于如下相关方程：

$$\left(\frac{\gamma_c \sigma_{ax} S}{C_{ax} R_{eH_P}}\right)^{1.25} - 0.5 \cdot \left(\frac{\gamma_c \sigma_{ax} S}{C_{ax} R_{eH_P}}\right)\left(\frac{\gamma_c \sigma_{tg} S}{C_{tg} R_{eH_P}}\right) + \left(\frac{\gamma_c \sigma_{tg} S}{C_{tg} R_{eH_P}}\right)^{1.25} + \left(\frac{\gamma_c \tau \sqrt{3} S}{C_\tau R_{eH_P}}\right)^2 = 1.0$$

相应的屈曲利用因子：

$$\eta_{curve-plate} = \frac{1}{\gamma_c}$$

式中：

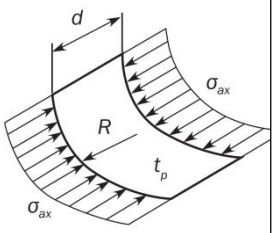
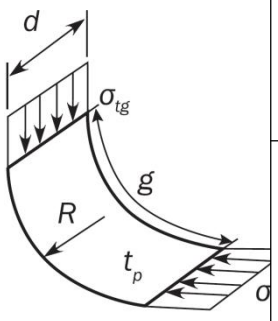
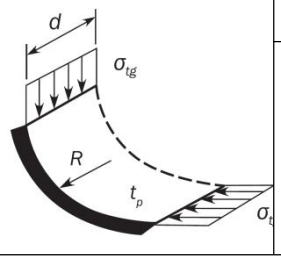
σ_{ax} —— 施加在曲板板格所对应圆柱的轴向应力，N/mm²。对于轴向拉应力情况，应取为 $\sigma_{ax} = 0$；

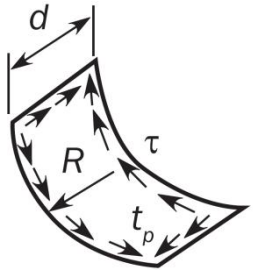
σ_{tg} —— 施加在曲板板格上的切向应力，N/mm²。对于环向拉应力情况，应取为 $\sigma_{tg} = 0$；

C_{ax}, C_τ —— 曲面板格的屈曲折减因子，定义见表 3.1.6。

曲面板格的应力倍增因子 γ_c 不必小于将其伸展为平面板格按照[3.1.1]所给出的 γ_c 值。

满足 $R/t_p \le 2500$ 的曲面板格的屈曲因子和折减因子 **表 3.1.6**

工况	长宽比	屈曲因子*K*	折减因子 *C*
1  	$\frac{d}{R} \le 0.5\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 1 + \frac{2}{3}\frac{d^2}{Rt_p}$	对于一般性应用： $C_{ax} = 1$，对 $\lambda \le 0.25$ $C_{ax} = 1.233 - 0.933\lambda$，对 $0.25 < \lambda \le 1$ $C_{ax} = 0.3/\lambda^2$，对 $1 < \lambda \le 1.5$ $C_{ax} = 0.2/\lambda^2$，对 $\lambda > 1.5$ 对于单个曲面区域，如舭列板,其边界由平面板格所围，则 $C_{ax} = \frac{0.65}{\lambda^2} \le 1.0$
	$\frac{d}{R} > 0.5\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 0.267\frac{d^2}{Rt_p}\left[3 - \frac{d}{R}\sqrt{\frac{t_p}{R}}\right] \ge 0.4\frac{d^2}{Rt_p}$	
2  	..	$K = \frac{d}{\sqrt{Rt_p}} + 3\frac{(Rt_p)^{0.175}}{d^{0.35}}$	对于一般性应用： $C_{tg} = 1$，对 $\lambda \le 0.4$ $C_{tg} = 1.274 - 0.686\lambda$，对 $0.4 < \lambda \le 1.2$ $C_{tg} = \frac{0.65}{\lambda^2}$，对 $\lambda > 1.2$ 对于单个曲面区域，如舭列板,其边界由平面板格所围，则 $C_{tg} = \frac{0.8}{\lambda^2} \le 1.0$
	$\frac{d}{R} > 1.63\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 0.3\frac{d^2}{R^2} + 2.25\left(\frac{R^2}{dt_p}\right)^2$	
3  	$\frac{d}{R} \le \sqrt{\frac{R}{t_p}}$	..	同工况 2
	$\frac{d}{R} > \sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 0.3\frac{d^2}{R^2} + 0.291\left(\frac{R^2}{dt_p}\right)^2$	

工况	长宽比	屈曲因子K	折减因子 C
4  	$\frac{d}{R}\le 8.7\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K=\sqrt{3}\sqrt{28.3+\frac{0.67d^3}{R^{1.5}t_p^{1.5}}}$	$C_\tau=1$,对 $\lambda\le 0.4$ $C_\tau=1.274-0.686\cdot\lambda$,对 $0.4<\lambda\le 1.2$ $C_\tau=\frac{0.65}{\lambda^2}$,对 $\lambda>1.2$
	$\frac{d}{R}>8.7\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K=\sqrt{3}\frac{0.28d^2}{R\sqrt{Rt_p}}$	
边缘的边界条件： - - - - - - - - - - - - 板边缘自由； ———————— 板边缘简支； ▬▬▬▬▬▬▬▬ 板边缘夹紧。			

3.1.7 施加在板格上的正应力和剪应力

施加在板格上用于[2.1.1]中加筋板格的整体弹性屈曲能力及[3.1.1]中板格能力计算的双正应力 σ_x 和 σ_y，N/mm²，应取为：

（1） 对于有限元分析，见第 4 节[2.4]中的参考应力定义；

（2） 对于整体加筋板格能力和板格能力的描述性要求，轴向或横向压应力应根据第 3 节[2.2.1]进行计算，所考虑的加强筋或所考虑的单元板格的载荷计算点定义分别见第 3 章第 6 节的[3.2.2]和[2.2.2]。但对于横向加筋布置，用于评估整体加筋板格能力的横向压应力应取为骨材带板按第 3 章第 6 节[3.2.2]和[2.2.2]定义的载荷计算点处计算得到的压应力；

（3） 对于梁系分析，其应力根据梁理论得到，应根据下式计算得到：

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{xb} + \nu\sigma_{yb}}{1-\nu^2}$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{yb} + \nu\sigma_{xb}}{1-\nu^2}$$

式中：

σ_{xb}, σ_{yb} ——根据交叉梁系分析得到的分别沿着带板的 x 和 y 方向的应力，N/mm²；

用于[2.1.1]中加筋板格的整体弹性屈曲能力及[3.1.1]板格屈曲能力计算的剪应力 τ，N/mm²，应取为：

（1）对于有限元分析，第 4 节[2.4]中定义的参考剪应力；

（2）描述性要求中，对于板格屈曲能力计算，应根据第 3 节[2.2.1]计算得到的剪应力，板格载荷计算点定义见第 3 章第 6 节[2]；

（3）描述性要求中，对于加筋板格的整体弹性屈曲能力计算，应根据第 3 节[2.2.1]计算得到的剪应力，载荷计算点的定义如下：

① 对于所分析的加强筋，在其整体跨距l的中间位置；

② 在加强筋与其带板的交线处的点；

（3）对于梁系分析，PSM 腹板带板的剪应力$\tau = 0$。

4 加强筋的屈曲能力

4.1 屈曲模式

4.1.1 应对下列屈曲模式进行校核：

（1） 加强筋失效导致的结构屈曲（*SI*）；

（2） 带板失效导致的结构屈曲（*PI*）；

4.2 侧向压力

4.2.1 在加强筋的屈曲评估中，侧向压力按常量考虑。

4.3 加强筋理想化

4.3.1 加强筋的有效长度ℓ_{eff}

加强筋的有效长度ℓ_{eff}，mm，取为：

（1）对于两端固支的加强筋，$\ell_{eff} = \dfrac{\ell}{\sqrt{3}}$；

（2）对于一端简支、一端固支的加强筋，$\ell_{eff} = 0.75\ell$；

（3）对于两端简支的加强筋，$\ell_{eff} = \ell$；

4.3.2 有效带板宽度 b_{eff1}

不考虑剪滞效应的加强筋有效带板宽度，mm，取为：

（1）如果$\sigma_x > 0$，

对描述性评估：

$$b_{eff1} = \frac{C_{x1}b_1 + C_{x2}b_2}{2}$$

对有限元分析：

$$b_{eff1} = C_x b$$

（2）如果$\sigma_x \le 0$，

$$b_{eff1} = b$$

式中：

C_{x1}, C_{x2}——所定义的加强筋两侧板格在表3.1.1中工况①下分别对应的折减系数C_x；

b_1, b_2——加强筋两侧板格的宽度，mm。

4.3.3 有效带板宽度 b_{eff}

加强筋的有效带板宽度b_{eff}，mm，应取为：

（1） 当$\sigma_x > 0$时：

对于有限元分析：$b_{eff} = \min\left(C_x b , \chi_s s\right)$

对于描述性评估：$b_{eff} = \min\left(\frac{C_{x1}b_1 + C_{x2}b_2}{2} , \chi_s s\right)$

（2） 当$\sigma_x \leq 0$时：

$$b_{eff} = \chi_s s$$

式中：χ_s——有效宽度系数，取为：

如果$\frac{\ell_{eff}}{s} \geq 1$，则：

$$\chi_s = \min\left[\frac{1.12}{1+\frac{1.75}{\left(\frac{\ell_{eff}}{s}\right)^{1.6}}};1.0\right]$$

如果$\frac{\ell_{eff}}{s} < 1$，则：

$$\chi_s = 0.407\frac{\ell_{eff}}{s}$$

ℓ_{eff} —— 加强筋有效长度，mm，取为：

（1）对于两端固支的加强筋，$\ell_{eff} = \frac{\ell}{\sqrt{3}}$；

（2）对于一端简支、一端固支的加强筋，$\ell_{eff} = 0.75\ell$；

（3）对于两端简支的加强筋，$\ell_{eff} = \ell$；

4.3.4 带板净厚度 t_p

板的净厚度 t_p，mm，取为：

（1）对描述性要求：两个带板板格的平均厚度；

（2）对有限元分析：所考虑的加强筋一侧基本板格的厚度；

4.3.5 扁钢的有效腹板厚度

为计及局部侧向变形引起的刚度降低影响，对于扁钢加强筋，在[2.1]和[4.4]中计算其截面积 A_s 、模量 Z 和惯性矩 I 时，应该采用以下定义的有效腹板厚度，mm

$$t_{w_red} = t_w\left(1-\frac{2\pi^2}{3}\left(\frac{h_w}{s}\right)^2\left(1-\frac{b_{eff1}}{s}\right)\right)$$

4.3.6 加强筋的净剖面模数 Z

加强筋的净剖面模数 Z，计入带板有效宽度 b_{eff} 计算，cm^3，取为：

（1）对于加强筋导致的失效（*SI*），取加强筋翼板顶面处计算得到的剖面模数；

（2）对于带板导致的失效（*PI*），取带板底面处计算得到的剖面模数。

4.3.7 加强筋的惯性矩 I

加强筋的惯性矩 I，cm^4，计入带板有效宽度 b_{eff} 计算，应符合如下要求：

$$I \geq \frac{st_p^3}{12}\times 10^{-4}$$

4.3.8 球扁钢的理想化

球扁钢应视为等效的角钢，定义见第 3 章第 6 节[1.4.1]。

4.4 极限屈曲能力

4.4.1 加强筋的极限状态

当$\sigma_a+\sigma_b+\sigma_w>0$，且初始设置γ = 1 时，加强筋的极限屈曲能力应根据以下相关方程进行校核：

$$\frac{\gamma_c\sigma_a+\sigma_b+\sigma_w}{R_{eH}}S=1$$

相应的屈曲利用因子：

$$\eta_{stiffener}=\frac{1}{\gamma_c}$$

式中：

σ_a ——加强筋跨中位置处的有效轴向应力，N/mm²，定义见[4.4.2]

σ_b ——加强筋上的弯曲应力，N/mm²，定义见[4.4.3],

σ_w ——扭转引起的应力，N/mm²，定义见[4.4.4]

R_{eH} ——最小屈服强度，N/mm²

（1）对于加强筋导致的失效（*SI*），$R_{eH}=R_{eH_S}$

（2）对于带板导致的失效（*PI*），$R_{eH}=R_{eH_P}$

4.4.2 有效轴向应力σ_a

作用在加强筋及其带板上的位于跨中位置的有效轴向应力σ_a，N/mm²，取为:

$$\sigma_a=\sigma_x\frac{st_p+A_s}{b_{eff1}t_p+A_s}$$

式中：

σ_x —— 对于有限元分析，是指带板中沿着加强筋轴向方向的应力，按[4.4.5]修正后的应力；
对于描述性屈曲评估，是指施加在加强筋及其带板上的名义轴向应力，N/mm²，根据第 3 节[2.2.1]计算；
对于交叉梁系分析，是指作用在所连接屈曲板格 *x* 方向的应力。

4.4.3 弯曲应力σ_b

加强筋的弯曲应力，N/mm²，按下式计算：

$$\sigma_b=\frac{M_o+M_1}{1000Z}$$

式中：

M_1 —— 由于侧向压力 P 引起的弯矩，N·mm，按如下计算：

（1）对于连续加强筋

$$M_1=C_i\frac{|P|sl^2}{24\times10^3}$$

（2）对于两端削斜的加强筋

$$M_1=C_i\frac{|P|sl^2}{8\times10^3}$$

（3）对于一端连续/固支，一端削斜的加强筋

$$M_1 = C_i \frac{|P| s l^2}{14.2 \times 10^3}$$

P—— 侧向压力，kN/m²

（1）对于有限元屈曲分析，P 是指第 4 节[2.5.2]中定义的带板上的平均压力；

（2）对于描述性屈曲评估，P 是指在第 3 章第 6 节[3]中定义的加强筋载荷计算点处计算得到的静压力。

C_i—— 压力系数：

（1）对于加强筋导致的失效（*SI*），$C_i = C_{SI}$；

（2）对于带板导致的失效（*PI*），$C_i = C_{PI}$；

C_{PI}—— 带板导致的失效模式的压力系数：

（1）如果侧向压力施加在加强筋背侧，则 $C_{PI} = 1$；

（2）如果侧向压力施加在与加强筋同侧，则 $C_{PI} = -1$；

C_{SI}—— 加强筋导致的失效模式的压力系数

（1）如果侧向压力施加在加强筋背侧，则 $C_{SI} = -1$；

（2）如果侧向压力施加在与加强筋同侧，则 $C_{SI} = 1$；

M_0—— 由于加强筋的侧向变形 w 引起的弯矩，N·mm

$$M_0 = F_E \frac{\gamma}{\gamma_{GEB} - \gamma} w_0，且 \gamma_{GEB} - \gamma > 0$$

γ_{GEB}—— 相应于整体弹性屈曲能力的应力倍增因子γ_{GEB}，见[2.1.1]；

F_E—— 加强筋的理想弹性屈曲力，N：

$$F_E = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 EI \times 10^4$$

I—— 加强筋的惯性矩，cm⁴，定义见[4.3.7]；

w_0—— 假定的缺陷，mm，取为：

（1） 一般情况，$w_0 = \ell / 1000$；

（2） 对两端削斜的加强筋，考虑加强筋导致的失效（*SI*）

$$W_0 = -W_{na}$$

（3） 对两端削斜的加强筋，考虑带板导致的失效（*PI*）

$$W_0 = W_{na}$$

W_{na}—— 带板中点至计及带板有效宽度的加强筋中和轴的距离。

4.4.4 扭转变形引起的应力σ_w

扭转变形引起的应力，N/mm²，取为：

（1）对于加强筋导致的失效（*SI*）

① $\sigma_a > 0$，取为：

$\sigma_w = E y_w e_f \Phi_0 \left(\frac{m_{tor}\pi}{l_{tor}}\right)^2 \left(\frac{1}{1-\frac{\gamma\sigma_a}{\sigma_{ET}}} - 1\right)$，前提条件为：$\sigma_{ET} - \gamma\sigma_a > 0$

② 对于$\sigma_a \leqslant 0$

$$\sigma_w = 0$$

（2）对于带板导致的失效（*PI*）

$$\sigma_w = 0$$

式中：

l_{tor}—— 加强筋跨距，mm，等于主要支撑构件之间的距离，即$l_{tor} = l$。当加强筋有防倾肘

板支撑时，l_{tor}应取为相邻的主要支撑构件和防倾肘板之间的最大距离。

y_w ——— 从加强筋横截面中心到加强筋翼板自由边缘的距离，mm，取为：

（1）对扁钢，$y_w = \frac{t_w}{2}$；

（2）对角钢和球扁钢，$y_w = b_f - \frac{h_w t_w^2 + t_f b_f^2}{2A_s}$；

（3）对 L2 型材，$y_w = b_{f-out} + 0.5t_w - \frac{h_w t_w^2 + t_f(b_f^2 - 2b_f d_f)}{2A_S}$

（4）对 T 型材，$y_w = \frac{b_f}{2}$。

Φ_0 ——— 系数，取为：

$$\Phi_0 = \frac{l_{tor}}{m_{tor} h_w} \times 10^{-4}$$

σ_{ET} ——— 扭转屈曲参考应力，N/mm²

$$\sigma_{ET} = \frac{E}{I_p}\left[\left(\frac{m_{tor}\pi}{l_{tor}}\right)^2 I_w \times 10^2 + \frac{1}{2(1+\nu)} I_T + \left(\frac{l_{tor}}{m_{tor}\pi}\right)^2 \varepsilon \times 10^{-4}\right]$$

I_p ——— 加强筋关于点 C 的净极惯性矩，cm⁴，按表 4.4.4 定义，点 C 如图 1.1.1 所示。

I_T ——— 加强筋的净圣维南惯性矩，cm⁴，按表 4.4.4 定义。

I_ω ——— 加强筋关于点 C 的净剖面扇形惯性矩，cm⁶，按表 4.4.4 定义，点 C 如图 1.1.1 所示。

m_{tor}——— 在l_{tor}范围内的半波数，其取值应使得扭转屈曲参考应力取为不小于 0 的最小值。

ε ——— 固定度，取为：

$\varepsilon = \left(\frac{3b}{t_p^3} + \frac{2h_w}{t_w^3}\right)^{-1}$　　对于球扁钢、角钢、L2 型材及 T 型材；

$\varepsilon = \left(\frac{t_p^3}{3\mathrm{b}}\right)$　　对于扁钢。

惯性矩　　**表 4.4.4**

横截面特性	扁钢	球扁钢、角钢、L2 型材和 T 型材
I_P	$\frac{h_w^3 t_w}{3 \times 10^4}$	$\left(\frac{A_w(e_f - 0.5t_f)^2}{3} + A_f e_f^2\right) \times 10^{-4}$
I_T	$\frac{h_w t_w^3}{3 \times 10^4}\left(1 - 0.63\frac{t_w}{h_w}\right)$	$\frac{(e_f - 0.5t_f)t_w^3}{3 \times 10^4}\left(1 - 0.63\frac{t_w}{e_f - 0.5t_f}\right) + \frac{b_f t_f^3}{3 \times 10^4}\left(1 - 0.63\frac{t_f}{b_f}\right)$
I_ω	$\frac{h_w^3 t_w^3}{36 \times 10^6}$	对球扁钢和角钢： $\frac{A_f^3 + A_w^3}{36 \times 10^6} + \frac{e_f^2}{10^6}\left(\frac{A_f b_f^2 + A_w t_w^2}{3} - \frac{(A_f b_f + A_w t_w)^2}{4(A_f + A_w)}\right)$ 对 T 型材：

横截面特性	扁钢	球扁钢、角钢、L2 型材和 T 型材
		$\frac{b_f^3 t_f e_f^3}{12\times 10^6}$
(1) t_w 为腹板净厚度，mm，本表不用 [2.3.2] 中定义的 t_{w_red}； (2) 对于球扁钢和角钢 d_f 取为 0； (3) A_w 为腹板净面积，mm^2； (4) A_f 为翼板净面积，mm^2。		

4.4.5 针对加强筋屈曲能力评估的有限元应力修正

当有限元分析得到的参考应力 σ_x 和 σ_y 均为压应力时，σ_x 应根据下列公式进行修正：

如 $\sigma_x < \nu\sigma_y$，则：

$$\sigma_{xcor} = 0$$

如 $\sigma_x \geq \nu\sigma_y$，则：

$$\sigma_{xcor} = \sigma_x - \nu\sigma_y$$

5 主要支撑构件腹板的屈曲能力

5.1 开口腹板

5.1.1 开口腹板的屈曲评估

对于主要支撑构件开口腹板的屈曲评估，应考虑轴向压应力和剪切应力的联合作用。

与开口两边邻接的腹板应作为单独的非加筋板格，如表 5.1.2 所示。

应采用 3.1.1 的相关方程，且：

$$\sigma_x = \sigma_{av}$$
$$\sigma_y = 0$$
$$\tau = \tau_{av}$$

屈曲利用因子：

$$\eta_{opening} = \frac{1}{\gamma_c}$$

式中：σ_{av} ——按表 3.1.3 中的工况①及②或③，所计算的腹板区域内的加权平均压应力，N/mm^2；

γ_c ——参见[3.1.1]。

在应用表 5.1.2 时，加权平均剪应力按如下取用：

①如果模型中建立了主要支撑构件上的开口模型，则：

τ_{av} ——计算的腹板面积，如表 5.1.2 中的 P1、P2、P3 上的加权平均剪切应力，N/mm^2；

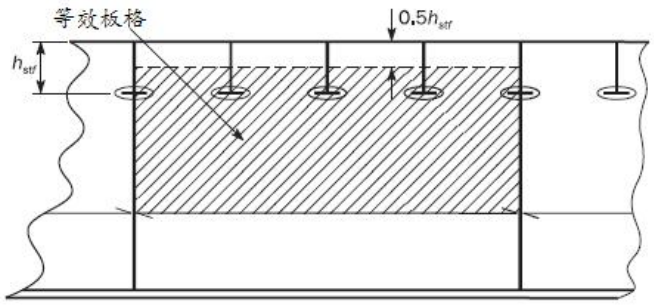
②如果模型中没有建立主要支撑构件上开口的模型，则：

τ_{av} ——表 3.4.2 中给出的加权平均剪切应力，N/mm^2。

5.1.2 开口腹板的折减因子

与开口邻接的腹板板格的折减因子 C_x 或 C_y 与 C_τ 组合，应按表 5.1.2 所示选取。

5.1.3 主要支撑构件的腹板若有与之垂直的加强筋穿过，则应根据图 5.1.3，将其理想化为等效板格。

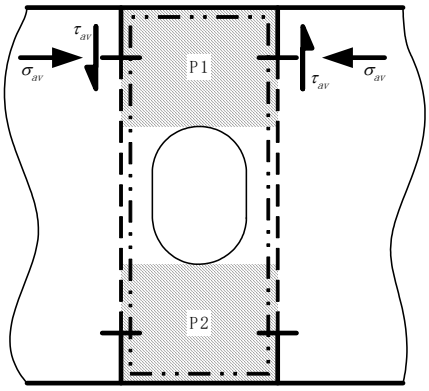


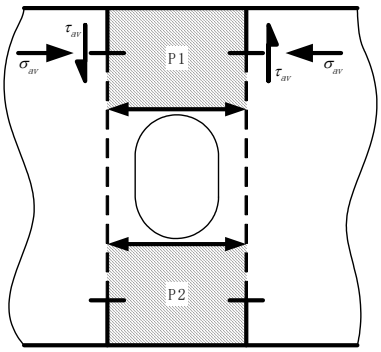
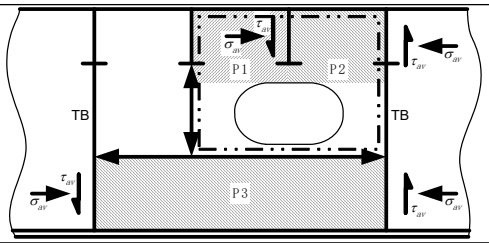
注：板格宽度的修正也适用于其他开孔构造，只要腹板和顿板至少与穿过加强筋的一侧相连。

图 5.1.3 主要支撑构件腹板的理想化

5.1.4 对于[5.1.1]情况之外的主要支撑构件的腹板屈曲评估，除第 4 节表 2.1.1 和图 2.1.1（1）～图 2.1.1（6）中指明之外，一般采用 UP-B 的方法。也可根据结构实际布置情况，经 CCS 同意，采用更为合适的板格屈曲评估方法。

开口腹板的屈曲折减因子　　表 5.1.2

结构布置		C_x，C_y	C_τ	
			支撑构件上的开口已建在模型中	支撑构件上的开口未建在模型中
(a) 边缘未加强		对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 3.1.3 中的工况 ③ 或 ⑥ 选取，且板边应力比取 ψ = 1.0。	对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 3.1.3 中的工况⑱或⑲选取。	对于表 3.1.3 中的工况⑰适用的情况，P1 和 P2 区域应采用共同的折减因子，按工况⑰选取，且 $\tau_{av} = \tau_{av}(web)$； 对于表 3.1.3 中的工况⑰不适用的情况，P1 和 P2 区域应采用各自的折减因子，按工况⑱或⑲选取，且 $\tau_{av} = \tau_{av}(web)h/(h-h_0)$

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">结构布置</td><td rowspan="2">C_x，C_y</td><td colspan="2">C_τ</td></tr>
<tr><td>支撑构件上的开口已建在模型中</td><td>支撑构件上的开口未建在模型中</td></tr>
<tr><td>(b) 边缘有加强</td><td>
</td><td>对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 3.1.3 选取，且为：
C_x，按工况①；或 C_y，按工况②。
且板边应力比取ψ＝1.0。</td><td>对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 3.1.3 中的工况⑮选取。</td><td>对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 3.1.3 中的工况⑮选取，且：
$\tau_{av}=\tau_{av}(web)h/(h-h_0)$</td></tr>
<tr><td>(c) 腹板上开口示例</td><td>
</td><td colspan="3">板格 P1 和 P2 应按照(a)评估；板格 P3 应按照(b)评估。</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="4">注：1. 开口腹板屈曲评估应考虑的板格如图中阴影所示，编号为 P1、P2 等。</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="4">式中：h ——主要支撑构件开口腹板的高度，m；
h_0 ——沿着腹板高度方向量得的开口高度，m；
$\tau_{av}(web)$ ——本表中，腹板上用点划线标识的矩形区域的加权平均剪应力，N/mm²。</td></tr>
</table>

6 支杆、支柱及横撑材结构的屈曲能力

6.1 屈曲利用因子

6.1.1 对于轴向受压的支杆、支柱及横撑材，其杆件屈曲的利用因子η_{pillar}，按下式计算：

$$\eta_{pillar}=\frac{\sigma_{av}}{\sigma_{cr}}$$

式中：σ_{av}——构件中的平均压应力，N/mm²；

σ_{cr}——最小临界屈曲应力，N/mm²，按如下取用：

①$\sigma_{cr}=\sigma_E$，对$\sigma_E\le 0.5R_{eH_S}$

②$\sigma_{cr}=\left(1-\frac{R_{eH_S}}{4\sigma_E}\right)R_{eH_S}$，对$\sigma_E>0.5R_{eH_S}$

σ_E——最小弹性受压屈曲应力，N/mm²，由各个屈曲模式分别得出，分别对应于[6.1.2]至[6.1.4]中的σ_{EC}、σ_{EI}和σ_{ETF}；

R_{eH_S}——材料屈服应力，N/mm²。对于组合构件，应采用各构件材料屈服应力的小者。

6.1.2 弹性柱屈曲应力

轴向受压构件的弹性柱屈曲应力σ_{EC}，N/mm²，按下式计算：

$$\sigma_{EC} = \pi^2 E f_{end} \frac{I}{A l_{pill}^2} \times 10^{-4}$$

式中：I——横截面的最小惯性矩，cm^4；

A——构件的横截面积，cm^2；

l_{pill}——构件的无支撑长度，m，取为：

（1）对于支杆和支柱：构件的无支撑长度；

（2）对于横撑材：横撑材连接的相邻舱壁板、船壳板之间的距离。

f_{end}——端部约束因子，按如下取用：

（1）对于支杆和支柱：

$f_{end} = 1.0$，两端简支；

$f_{end} = 2.0$，一端简支，另一端固定；

$f_{end} = 4.0$，两端固定；

（2）对于横撑材：$f_{end} = 2.0$。

如支柱的端部装设有效的肘板，则可视为固定。该肘板应由比支柱弯曲刚度大的构件支撑。

6.1.3 弹性扭转屈曲应力

轴向受压构件的弹性扭转屈曲应力σ_{ET}，N/mm^2，按下式计算：

$$\sigma_{ET} = \frac{G I_{sv}}{I_{pol}} + \frac{\pi^2 f_{end} E c_{warp}}{I_{pol} l_{pill}^2} \times 10^{-4}$$

式中：I_{SV}——圣维南惯性矩，cm^4，对于一些横截面的示例见表 6.1.3；

I_{pol}——关于横截面剪切中心的极惯性矩，cm^4，按下式计算：

$$I_{pol} = I_y + I_z + A\left(y_0^2 + z_0^2\right)$$

c_{warp}——翘曲常数，cm^6，对于一些横截面的示例见表 6.1.3；

ℓ_{pill}——构件长度，m，定义见[6.1.2]；

y_0——相对于横截面形心的剪切中心位置 y 坐标，cm，对于一些横截面的示例见表 6.1.3；

z_0——相对于横截面形心的剪切中心位置 z 坐标，cm，对于一些横截面的示例见表 6.1.3；

A——横截面积，cm^2，定义见[6.1.2]；

I_y——关于 y 轴的惯性矩，cm^4；

I_z——关于 z 轴的惯性矩，cm^4。

6.1.4 弹性扭转/柱屈曲应力

对于形心和剪切中心不重合的横截面，应校核扭转和柱屈曲模式之间的相互作用。对应于轴向受压的弹性扭转/柱屈曲应力σ_{ETF}，按下式计算：

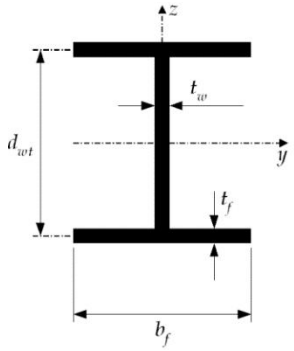
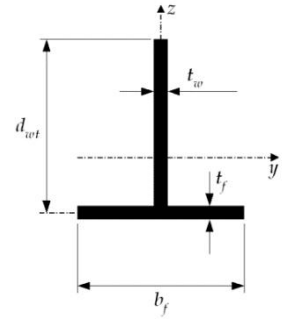
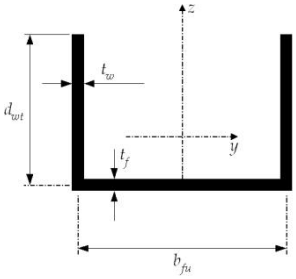
$$\sigma_{ETF} = \frac{1}{2\varsigma}\left[\left(\sigma_E + \sigma_{ET}\right) - \sqrt{\left(\sigma_E + \sigma_{ET}\right)^2 - 4\varsigma\sigma_E\sigma_{ET}}\right] \qquad N/mm^2$$

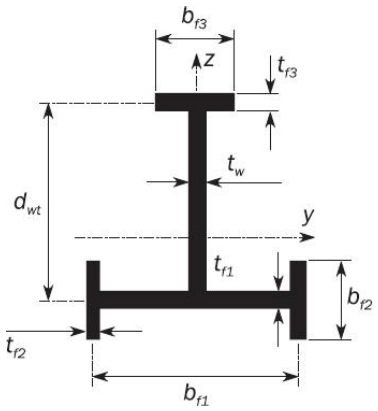
式中：ζ——系数，按下式计算：

$$\varsigma = 1 - \frac{\left(y_0^2 + z_0^2\right)A}{I_{pol}}$$

其余符号——见[6.1.2]和[6.1.3]。

典型横截面的属性 表 6.1.3

	$I_{Sv} = \frac{1}{3}\left(2b_f t_f^3 + d_{wt} t_w^3\right) \times 10^{-4}$ cm⁴
	$C_{warp} = \frac{d_{wt}^2 b_f^3 t_f}{24} \times 10^{-6}$ cm⁶
	$I_{Sv} = \frac{1}{3}\left(b_f t_f^3 + d_{wt} t_w^3\right) \times 10^{-4}$ cm⁴
	$y_0 = 0$ cm $Z_0 = -\frac{0.5 d_{wt}^2 t_w}{d_{wt} t_w + b_f t_f} \times 10^{-1}$ cm $C_{warp} = \frac{b_f^3 t_f^3 + 4 d_{wt}^3 t_f^3}{144} \times 10^{-6}$ cm⁶
	$I_{Sv} = \frac{1}{3}\left(b_{fu} t_f^3 + 2 d_{wt} t_w^3\right) \times 10^{-4}$ cm⁴
	$y_0 = 0$ cm $Z_0 = -\frac{d_{wt}^2 t_w \times 10^{-1}}{2 d_{wt} t_w + b_f t_f} - \frac{0.5 d_{wt}^2 t_w \times 10^{-1}}{d_{wt} t_w + b_{fu} t_f / 6}$ cm $C_{warp} = \frac{b_{fu}^2 d_{wt}^3 t_w \left(3 d_{wt} t_w + 2 b_{fu} t_f\right)}{12\left(6 d_w t_w + b_{fu} t_f\right)} \times 10^{-6}$ cm⁶

	$I_{Sv} = \frac{1}{3}\left(b_{f1}t_{f1}^3 + 2b_{f2}t_{f2}^3 + b_{f3}t_{f3}^3 + d_{wt}t_w^3\right) \times 10^{-4}$ cm^4
	$y_0 = 0$ cm $Z_0 = Z_S - \frac{\left(b_{f3}d_{wt}t_{f3} + 0.5d_{wt}^2t_w\right) \times 10^{-1}}{d_{wt}t_w + b_{f1}t_{f1} + 2b_{f2}t_{f2} + b_{f3}t_{f3}}$ cm $C_{warp} = \left[I_{f1}Z_S^2 + \frac{I_{f2}b_{f1}^2}{200} + I_{f3}\left(\frac{d_{wt}}{10} - Z_S\right)^2\right]$ cm^6 $I_{f1} = \left[\frac{\left(b_{f1}-t_{f2}\right)^3 t_{f1}}{12} + \frac{b_{f2}t_{f2}b_{f1}^2}{2}\right] \times 10^{-4}$ cm^4 $I_{f2} = \frac{b_{f2}^3 t_{f2}}{12} \times 10^{-4}$ cm^4 $I_{f3} = \frac{b_{f3}^3 t_{f3}}{12} \times 10^{-4}$ cm^4 $Z_S = \frac{I_{f3}d_{wt}}{I_{f1} + I_{f3}} \times 10^{-1}$ cm
注：（1）所有尺寸单位为 mm； （2）给出了几种典型横截面的属性，其他类型横截面的属性应根据直接计算确定。	

7 槽形舱壁

7.1 屈曲利用因子

7.1.1 槽形舱壁的面板和腹板的屈曲利用因子应基于面内应力和剪应力的组合计算给出。

应根据 3.1.1 给出的相关曲线，并采用下列系数：

$$\alpha = 2$$

$$\psi_x = \psi_y = 1$$

附录 1　基于应力的参考应力

符号说明：

本节中未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

a——　本章第 5 节中定义的板格长边长度，mm。

b——　本章第 5 节中定义的板格短边长度，mm。

A_i——　屈曲板格中第 i 个板单元的面积，mm^2。

n——　屈曲板格中的板单元数。

σ_{xi}——　作用　在屈曲板格短边方向，在第 i 个板单元的形心位置沿着 x 方向的实际应力，N/mm^2。

σ_{yi}——　作用在屈曲板格长边方向，在第 i 个板单元的形心位置沿着 y 方向的实际应力，N/mm^2。

ψ——　边缘应力比，定义见本章第 5 节。

τ_i——　屈曲板格第 i 个板单元形心位置处的实际膜剪应力，N/mm^2。

1　基于应力的方法

1.1　引言

1.1.1 本附录给出了一种根据线性最小二乘法计算屈曲板格边缘应力的方法。该方法称为应力法。

参考应力是指将板单元中心处的应力变换到所考虑屈曲板格局部坐标系下的应力分量。

1.1.2 定义

规则板格是指形状为矩形的板格。非规则板格是指不规则的板格，详见本章第 4 节[2.3.1]。

1.2　应力施加

1.2.1 规则板格

如果一个规则板格满足如下条件，则其参考应力应按照[2.1]针对规则板格的定义进行选取：

- 在规则板格长边 a 的每 1/3 部分中，都至少包括一个板单元的形心；
- 在沿着板格的局部 x 坐标方向，该单元的形心与相邻的 1/3 板格部分中的至少一个单元形心的距离应不小于 $a/4$。

否则，其参考应力应按照[2.2]针对非规则板格的定义进行选取。

1.2.2 非规则板格和曲板板格

非规则板格的参考应力应按照[2.2]的定义进行选取。

2　参考应力

2.1　规则板格

2.1.1 纵向应力

作用在屈曲板格短边上的纵向应力 σ_x 应根据如下方法进行计算：

对于板的屈曲校核，将 $\sigma_x(x)$ 的分布假设为如下二阶多项式曲线形式：

$$\sigma_x = Cx^2 + Dx + E$$

应力$\sigma_x(x)$的最佳拟合曲线可以考虑将各个单元的面积作为加权因子的面积加权平方差Π为最小得到：

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} A_i\left[\sigma_{xi} - (Cx^2 + Dx + E)\right]^2$$

上式中的未知系数 C、D 和 E 应使得Π分别对 C、D 和 E 的第一阶偏导数为零，即

$$\frac{\partial \Pi}{\partial C} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i x_i^2\left[\sigma_{xi} - (Cx_i^2 + Dx_i + E)\right] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial D} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\left[\sigma_{xi} - (Cx_i^2 + Dx_i + E)\right] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial E} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i\left[\sigma_{xi} - (Cx_i^2 + Dx_i + E)\right] = 0$$

未知系数 *C*、*D* 和 *E* 可以通过联立求解上述方程组得到。

$$\sigma_{x1} = \frac{1}{b}\int_0^b \sigma_x(x)dx = \frac{b^2}{3}C + \frac{b}{2}D + E$$

$$\sigma_{x2} = \frac{1}{b}\int_{a-b}^{a} \sigma_x(x)dx = \left(a^2 - ab + \frac{b^2}{3}\right)C + \left(a - \frac{b}{2}\right)D + E$$

如果$-D/2C < b/2$或者$-D/2C > a - b/2$，则σ_{x3}应予以忽略。否则，σ_{x3}应取为：

$$\sigma_{x3} = \frac{1}{b}\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sigma_x(x)dx = \frac{b^2}{12}C - \frac{D^2}{4C} + E$$

式中，

$$x_{\min} = -\frac{b}{2} - \frac{D}{2C}$$

$$x_{\max} = \frac{b}{2} - \frac{D}{2C}$$

纵向应力应为：

$$\sigma_x = \max(\sigma_{x1};\sigma_{x2};\sigma_{x3})$$

边缘应力比应为：

$$\psi_x = 1$$

对于加筋板的整体弹性屈曲评估及加强筋的屈曲评估，作用在带板短边上的应力$\sigma_x(x)$应为：

$$\sigma_x = \frac{\sum_1^n A_i\sigma_{xi}}{\sum_1^n A_i}$$

应力σ_x的边缘应力比等于 1.0。

2.1.2 横向应力

施加在屈曲板格长边上的横向应力σ_y，应通过对所考虑屈曲板格内的所有单元的横向应力进行插值计算到短边边缘上得到。

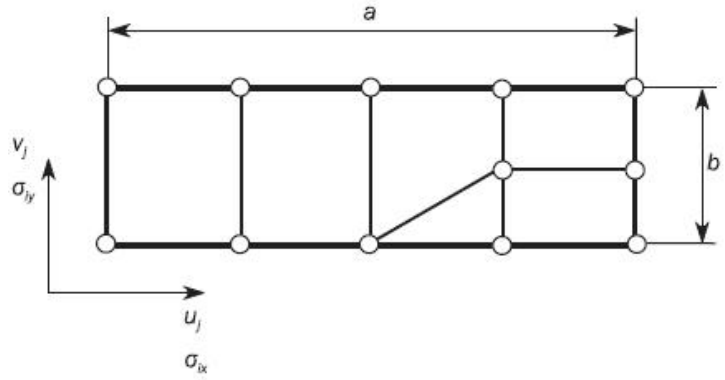


图 2.1.2 屈曲板格

$\sigma_y(x)$的分布假设为直线，即

$$\sigma_y(x) = A + Bx$$

$\sigma_y(x)$的最佳拟合曲线应通过最小二乘法，考虑将各个单元的面积作为加权因子的面积加权平方差Π为最小得到

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} A_i\left[\sigma_{yi} - (A + Bx_i)\right]^2$$

未知数 A 和 B 应使得Π分别对 A 和 B 的第一阶偏导数为零。

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i\left[\sigma_{yi} - (A + Bx_i)\right] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial B} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\left[\sigma_{yi} - (A + Bx_i)\right] = 0$$

求解上述两个方程，可以得到未知数 A 和 B 如下：

$$\begin{cases} A = \dfrac{\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,\sigma_{iy}\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i\,\sigma_{iy}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i\right)^2} \\ B = \dfrac{\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i\,\sigma_{iy}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,\sigma_{iy}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} A_i\,x_i\right)^2} \end{cases}$$

$$\sigma_y = max\,(A, A + Ba)$$

如果$\sigma_y \geq 0$，则$\psi_y = \dfrac{\min(A, A + Ba)}{\max(A, A + Ba)}$

如果$\sigma_y < 0$，则$\psi_y = 1$

2.1.3 剪应力

剪应力τ应采用面积加权平均方法，根据下式计算得到：

$$\tau = \frac{\sum_{1}^{n} A_i \tau_i}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

2.2 非规则板格和曲板板格

2.2.1 参考应力

纵向、横向和剪应力都应采用面积加权平均方法，根据下式计算得到：

$$\sigma_x = \frac{\sum_{1}^{n} A_i \sigma_{xi}}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

$$\sigma_y = \frac{\sum_{1}^{n} A_i \sigma_{yi}}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

$$\tau = \frac{\sum_{1}^{n} A_i \tau_i}{\sum_{1}^{n} A_i}$$

边缘应力比为：

$$\psi_x = 1$$

$$\psi_y = 1$$

第 10 章　疲　　劳

第 1 节　一般规定

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

T_{DF}　——设计者指定的设计疲劳寿命，年，不少于 25 年。

1 一般要求

1.1　适用范围

1.1.1 本章要求适用于结构细节疲劳强度评估，评估的结构细节要求见本章第 2 节。

1.1.2 应进行结构细节的疲劳强度评估，以防止如下疲劳失效：

（1）从焊趾处形成并扩展至板的疲劳裂纹；

（2）从非焊接结构细节的自由边缘形成的疲劳裂纹。

1.1.3 应根据本章第 6 节结构细节设计标准及焊接要求，以防止如下疲劳失效：

（1）从焊趾处形成并扩展到母材的疲劳裂纹；

（2）从焊根处形成并扩展到焊缝下板材的疲劳裂纹；

（3）从焊根处形成并贯穿到焊喉的疲劳裂纹；

（4）从自由边的不规则表面或切口处形成并扩展到母材的疲劳裂纹。

1.1.4 在疲劳强度评估时，应按本规范附录 A 的规定考虑线性波激振动的影响，或非线性砰击颤振和波激振动的影响。

1.2　附加标志

1.2.1 按本章的简化应力分析方法、舱段有限元应力分析法进行疲劳强度评估，授予附加标志 FL（XX、YY），其中后缀标志的说明如下：

XX——船舶运营波浪环境条件，如基于全球波浪谱的环境条件取为 WW，如基于北大西洋波浪谱的环境条件取为 NA；

YY——设计疲劳寿命（年），最小设计疲劳设计寿命至少为 25 年，可从 25 年开始计以 5 年为间隔。

1.2.2 如申请 SFA（XX，YY）附加标志，应按本章附录 1 的要求进行基于谱分析的疲劳强度评估，其中，后缀标志的说明同 1.2.1。

2　定义

2.1　热点

2.1.1 热点指在名义结构应力波动和由焊接形状或母材切口引起应力增加的组合影响下可能形成疲劳裂纹的位置。

热点可能位于：

（1）焊趾。

（2）部分熔透焊或填角焊的焊根。

（3）母材板的自由边。

2.2 名义应力

2.2.1 名义应力系指构件中考虑宏观几何影响但不考虑结构不连续性和焊缝存在引起的

应力集中的应力。名义应力采用本章第 5 节、第 6 节规定的粗网格或细网格有限元分析方法获得，或采用本章第 4 节规定的基于梁理论的分析计算获得。

2.3 热点应力

2.3.1 热点应力系指在焊趾处的应力，该应力考虑结构不连续和焊接附件引起的应力集中影响，但不考虑焊趾处切口的非线性应力峰值。热点应力为焊趾处板表面的两个相应主应力，第一主应力作用于焊缝的垂直方向正负 45°范围内，第二主应力作用于焊缝的垂直方向正负 45°范围外。

热点应力应采用本章第 4 节[3]和[4]的名义应力乘以应力集中系数（SCF），或本章第 5 节[3]和[4]规定的精细网格有限元分析获得。

2.4 自由边局部应力

2.4.1 自由边局部应力是采用本章第 5 节[3.2]的有限元分析得到的板自由边处的应力。

2.5 疲劳应力

2.5.1 疲劳应力为用于疲劳评估的相关应力，即：

（1）考虑平均应力和厚度影响修正的焊趾处的最大热点主应力。

（2）考虑母材表面处理、平均应力影响、厚度影响和材料强度修正的自由边的局部应力。

3 假定

3.1 一般要求

3.1.1 疲劳评估使用下列假定：

（1）采用线性累积损伤模型，即本章第 3 节[5]中的 Palmgren-Miner 准则结合本章第 3 节[4]中的设计 S-N 曲线。

（2）设计疲劳寿命，T_{DF}，不少于 25 年。

（3）规范的准静态波浪载荷是基于北大西洋波浪环境。由 10^{-2} 超越概率水平的等效设计波（EDW）概念确定。如船舶主要营运于非北大西洋波浪环境时，本章第 3 节环境因子 f_e 可取 0.8。

（4）根据本节[5]使用净厚度 t_{n50} 方法。

（5）裂纹形成于焊趾处时，应力类型为热点应力。裂纹形成于非焊接结构细节自由边时，应力类型为自由边局部应力。

（6）疲劳应力范围 $\Delta\sigma_{FS}$ 可采用简化应力分析或对具有更为复杂几何的结构细节的有限元应力分析方法得到。

（7）结构细节的应力范围长期分布服从双参数 Weibull 分布。其形状参数ξ取为 1.0，疲劳应力范围 $\Delta\sigma_{FS}$ 对应 10^{-2} 超越概率水平。

（8）按照本章第 3 节[2]的要求，疲劳校核衡准为设计疲劳寿命内累积损伤 D 小于 1。

4 方法

4.1 原则

4.1.1 以下措施可保障结构细节适当的疲劳强度：

（1）本章第 6 节中结构细节设计标准规定的具体设计要求。

（2）疲劳强度评估时可采用以下两种方法计算热点应力：简化应力分析和舱段有限元应力分析。

4.2 简化应力分析

4.2.1 本章第 4 节要求的简化应力分析方法，用于确定本章第 2 节[1.1]中的纵骨端部连接焊趾的热点应力。

根据本章第 4 节[3]和[4]，采用基于梁理论的分析方法计算名义应力。根据本章第 4 节[5.2]，名义应力乘以应力集中系数（SCF）得到热点应力。

4.3 舱段有限元应力分析

4.3.1 舱段有限元应力分析方法见本章第 5 节，结构细节处的热点应力由精细网格分析得出。

4.3.2 热点的类型及热点应力计算方法见表 4.3.2。

热点应力类型及计算方法　　表 4. 3. 2

热点类型	热点应力计算方法
非腹板加强十字接头的焊趾处	本章第 5 节[3.1]
腹板加强十字接头翼板连接处	本章第 5 节[4.2]
腹板加强十字接头腹板连接处	本章第 5 节[4.3]
母材自由边	本章第 5 节[3.2]

4.4 疲劳设计标准

4.4.1 本章第 6 节中规定的结构细节设计标准保证了关键结构细节具有更好的疲劳性能。如具有满意的疲劳性能证明，可接受替代的结构细节设计。

5 腐蚀模型

5.1 净厚度

5.1.1 应基于第 3 章第 2 节的净厚度进行疲劳评估。

5.2 应力修正

5.2.1 将简化应力分析的船体梁应力和有限元分析计算得到的应力乘以 f_c 进行修正，修正因子 f_c 取值为 0.95。

6 装载工况

6.1 疲劳评估标准装载工况

6.1.1 应根据[6.1.2]给出的船舶营运中有代表性的装载工况进行疲劳分析。

6.1.2 表 6.1.2 定义了矿砂船疲劳强度计算时的装载工况和每种装载工况相应时间比 $\alpha_{(j)}$。第 4 章第 8 节规定了矿砂船疲劳评估的标准装载工况。

矿砂船装载工况时间比　　表 6. 1. 2

装载工况	$\alpha_{(j)}$
满载工况（均匀）	0.5
正常压载工况	0.5

7 载荷工况

7.1 假定

7.1.1 第 4 章第 2 节规定了疲劳评估的载荷工况。第 4 章第 6 节规定了疲劳评估的设计载荷场景。对本节[6]中的每种装载工况，疲劳评估的动载荷组合应考虑所有的疲劳载荷工况。

7.1.2　主导载荷工况

每一装载工况(j)的主导载荷工况定义为关键位置处所有疲劳载荷工况中最大疲劳应力范围对应的载荷工况。

第 2 节　评估的结构细节

1　简化应力分析

1.1　评估的结构细节

1.1.1 采用本章第 4 节的简化应力分析对整个货舱区域进行疲劳评估校核的关键结构细节为：

（1）纵骨与横舱壁的端部连接，

（2）纵骨与肋板或强框架的端部连接。

2　有限元应力分析

2.1　评估的结构细节

2.1.1　舱段有限元疲劳评估的结构细节

舱段有限元疲劳评估应至少包含的关键结构细节见表 2.1.1，且不考虑这些细节是否符合本章第 6 节的设计标准。

舱段有限元疲劳评估的结构细节　　表 2.1.1

序号	关键结构位置	评估的结构细节及热点	适用范围
1	货舱中部焊接型边舱下折角连接（边舱斜板、内底板、纵桁、实肋板和横向强框架的交点）	见表 2.1.3（1）热点 1、热点 2、热点 3、热点 4、热点 5、热点 6	中间货舱
2	货舱中部纵舱壁折角连接（纵舱壁折角位置、边舱水平桁、横向强框架的交点），如有时	见表 2.1.3（2）热点 1、热点 2、热点 3、热点 4、热点 5、热点 6	中间货舱
3	位于双层底桁材处的横舱壁底凳与内底板连接处	见表 2.1.3（3）热点 1、热点 2、热点 3、热点 4、热点 5	中间货舱
4	槽形舱壁与底凳的连接处	见表 2.1.3（4）热点 1~热点 10 表 2.1.3（5） 表 2.1.3（6）	中间货舱
5	槽形舱壁与顶凳的连接处	参考表 2.1.3（4）、表 2.1.3（6）	中间货舱
6	横舱壁与纵舱壁、边舱水平桁的相交处	见表 2.1.3（7）热点 1、热点 2、热点 3、热点 4、热点 5	中间货舱
7	舱口角隅和纵向舱口围端部肘板趾部，含舱口角隅	见表 2.1.3（8）热点 1、热点 2、热点 3、热点 4	最后两个货舱、船中货舱和最前两个货舱

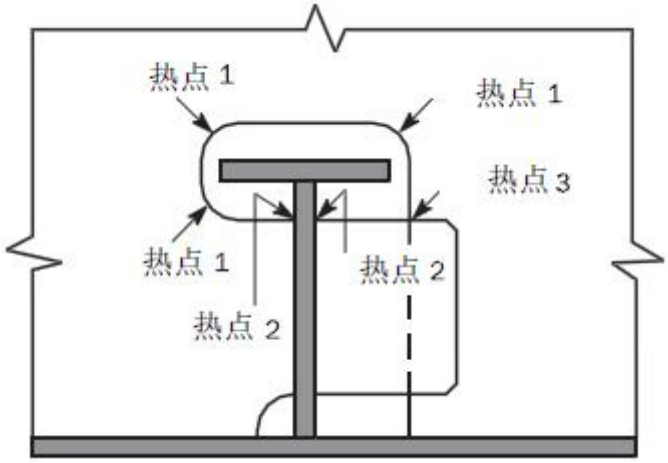
2.1.2　符合细节设计标准的细节

表 2.1.2（1）列出的纵骨穿越孔和分段扇形孔的结构细节，应满足本章第 6 节的结构细节设计标准，否则应进行有限元疲劳评估，热点位置及疲劳强度评估见表 2.1.2（2）和（3）。

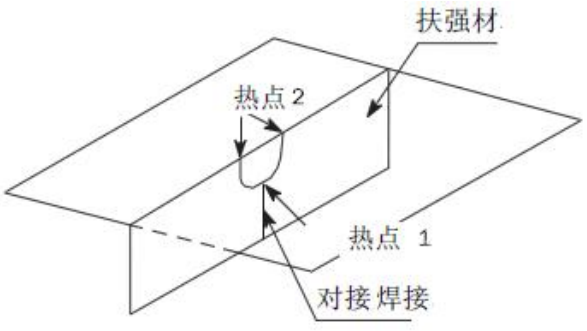
纵骨穿越孔和分段扇形孔的结构细节　　表 2.1.2（1）

序号	关键结构位置	结构细节设计标准	适用范围
1	无腹板加强筋纵骨的穿越孔，具体热点见表 2.1.3（2）	本章第 6 节[2.1]	货舱
2	甲板分段连接处扇形孔，具体热点见表 2.1.3（3）	本章第 6 节[3]	船中货舱及相邻的货舱（甲板以下 0.1D 范围内）

无腹板加强筋纵骨的穿越孔热点位置及疲劳强度评估　　表 2.1.2（2）

热点位置		疲劳强度评估
每个设计的关键热点必须获得 CCS 同意，考虑三种典型热点	热点 1：穿越孔边缘的角隅	按本章第 6 节[2]进行疲劳强度评估，其中热点应力按第 5 节[3.2]计算。
	热点 2：位于开口处横向强框架/补板与纵骨腹板的连接	按本章第 6 节[2]进行疲劳强度评估，热点应力按第 5 节[3.1]，类型‘b’计算。
	热点 3：横向强框架和补板的搭接连接	
		

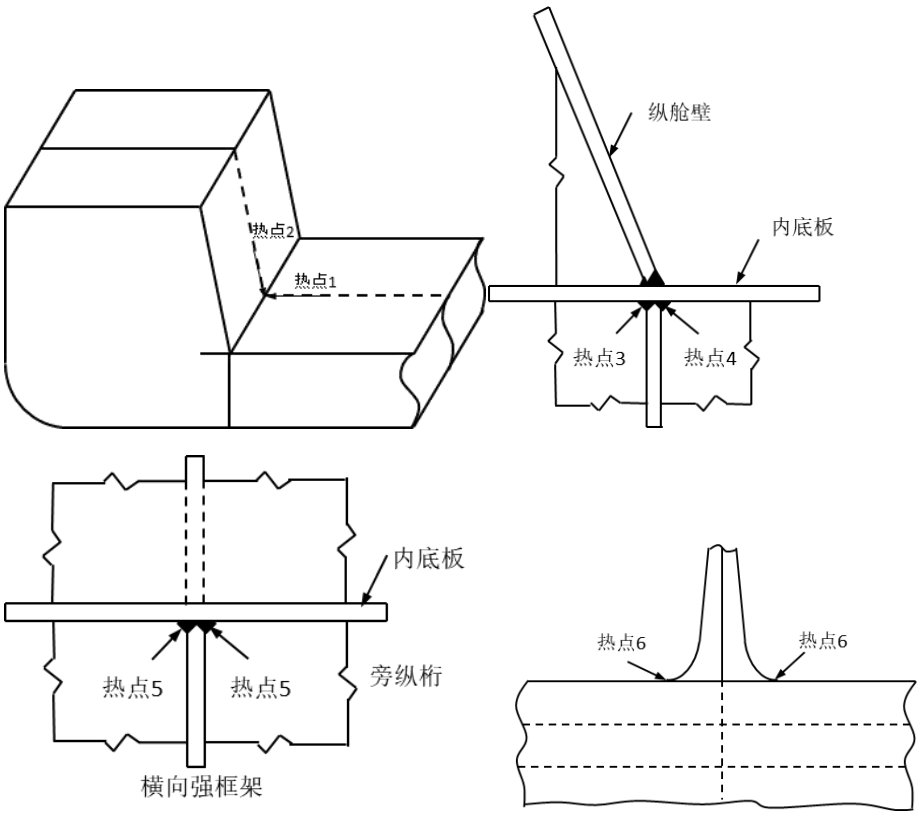
位于甲板分段连接处扇形孔的热点及疲劳强度评估　　表 2.1.2（3）

热点位置	疲劳强度评估
热点 1：位于扇形孔处的纵骨腹板对接焊接处	按本章第 5 节进行疲劳强度评估，热点类型按第 5 节[3.1]，类型‘b’计算。
热点 2：位于扇形孔处的甲板板	按本章第 5 节进行疲劳强度评估，热点类型按第 5 节[3.1]，类型‘a’计算。
	

2.1.3　关键结构细节及热点见 2.1.3（1）~表 2.1.3（8）。

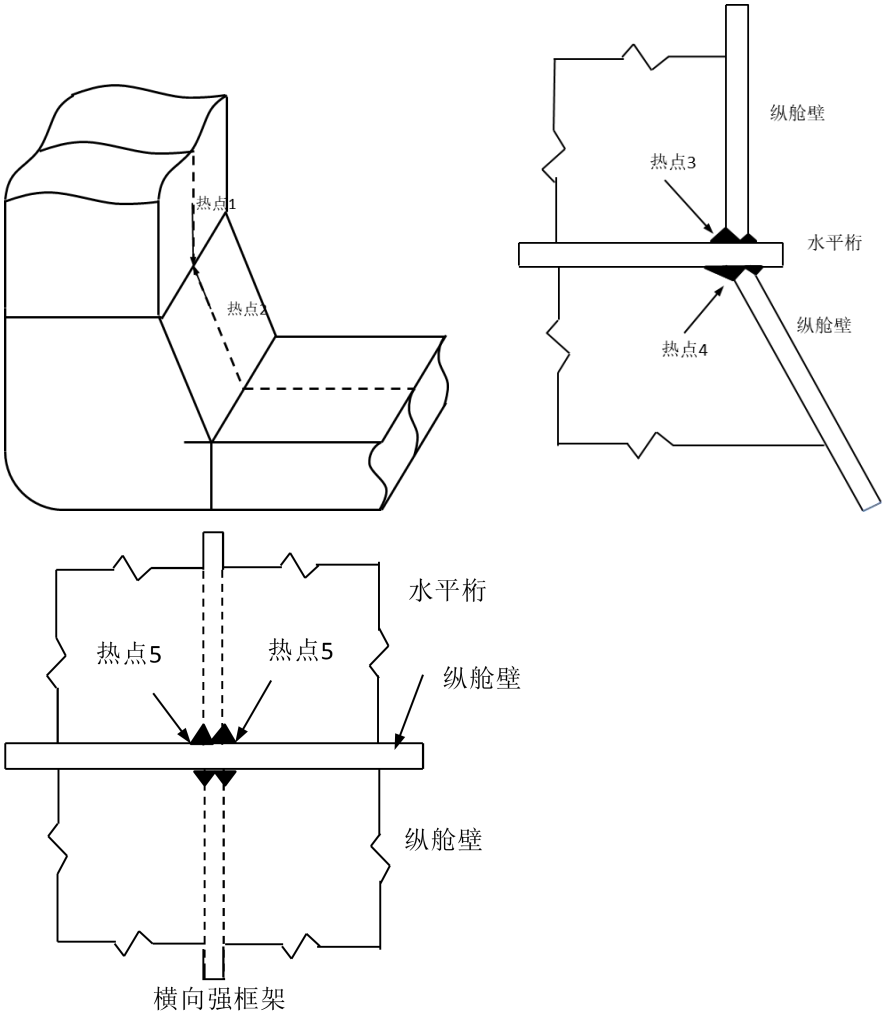
焊接型边舱下折角连接处热点　　表 2.1.3（1）

热 点 位 置	热点应力计算程序
热点 1：货舱边侧的内底板 热点 2：货舱边侧的边舱斜板	本章第 5 节 [4.2]
热点 3：旁纵桁外侧的边舱横隔板 热点 4：旁纵桁内侧的双层底实肋板 热点 5：旁桁材	本章第 5 节 [4.3]
热点 6：内底板的嵌接肘板	本章第 5 节 [3.1]，类型‘b’



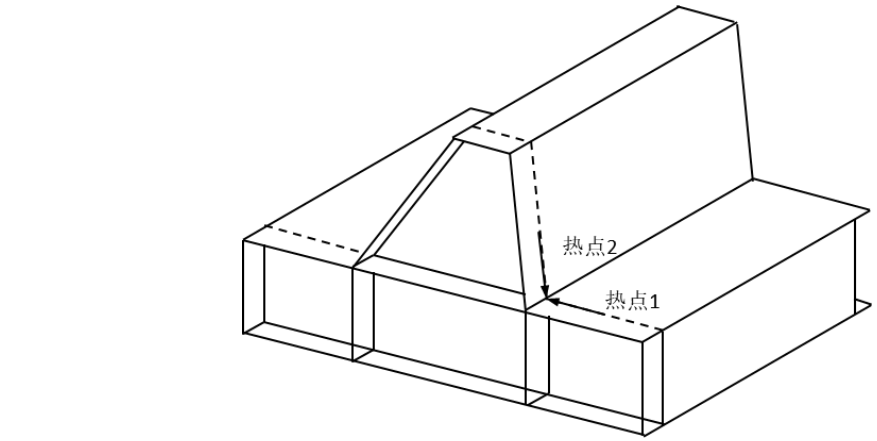
折角型纵舱壁折角连接处热点　　**表 2.1.3（2）**

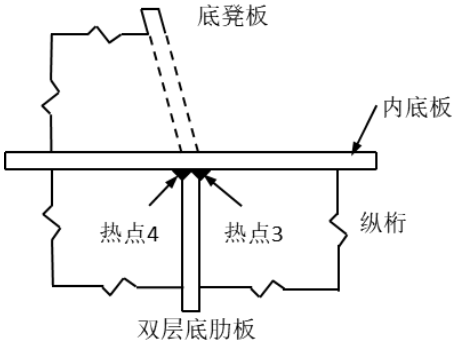
热 点 位 置	热点应力计算程序
热点 1：压载舱边侧的垂直舱壁 热点 2：压载舱边侧的边舱斜板	本章第 5 节 [4.2]
热点 3：水平桁材下面的横向强框架 热点 4：水平桁材上面的横向强框架 热点 5：压载舱边侧的水平桁	本章第 5 节 [4.3]

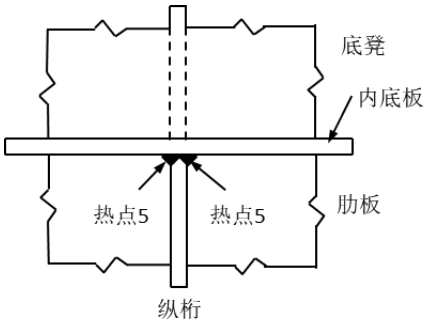


位于双层底纵桁处的横舱壁底凳与内底板连接处热点　　表 2.1.3（3）

热 点 位 置	热点应力计算程序
热点 1：货舱边侧的内底板 热点 2：货舱边侧的凳斜板	本章第 5 节 [4.2]
热点 3：货舱下，与凳板对齐的支撑实肋板相连的纵桁 热点 4：底凳下，与凳板对齐的支撑实肋板相连的纵桁 热点 5：与底凳板对齐的双层底支撑实肋板	本章第 5 节 [4.3]

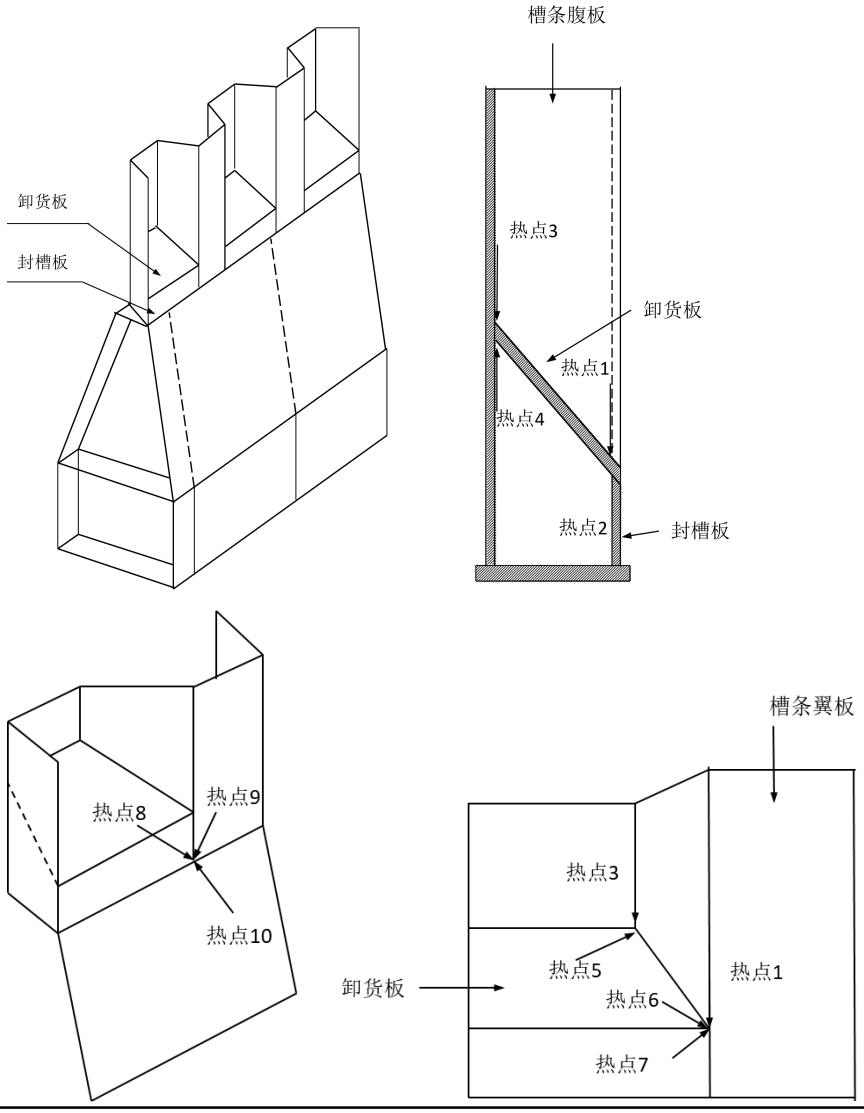




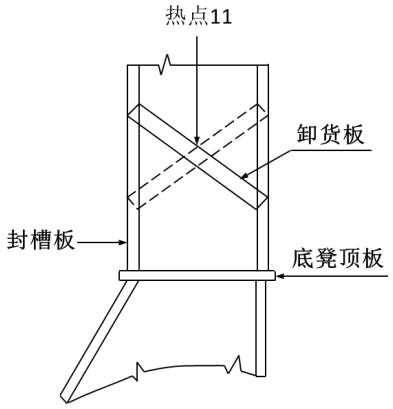
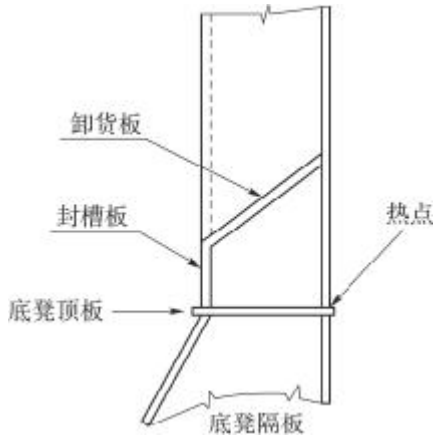


槽形舱壁与底凳连接处热点　　表 2.1.3（4）

热 点 位 置	热点应力计算程序
热点 1 和 3：卸货板上表面的槽条边缘 热点 2 和 4：卸货板下表面的槽条边缘 热点 10：与底凳顶板相连的底凳侧板	本章第 5 节 [3.1]，类型‘a’
热点 5 和 6：卸货板 热点 7 和 8：封槽板 热点 9：槽条翼板	本章第 5 节 [4.3]

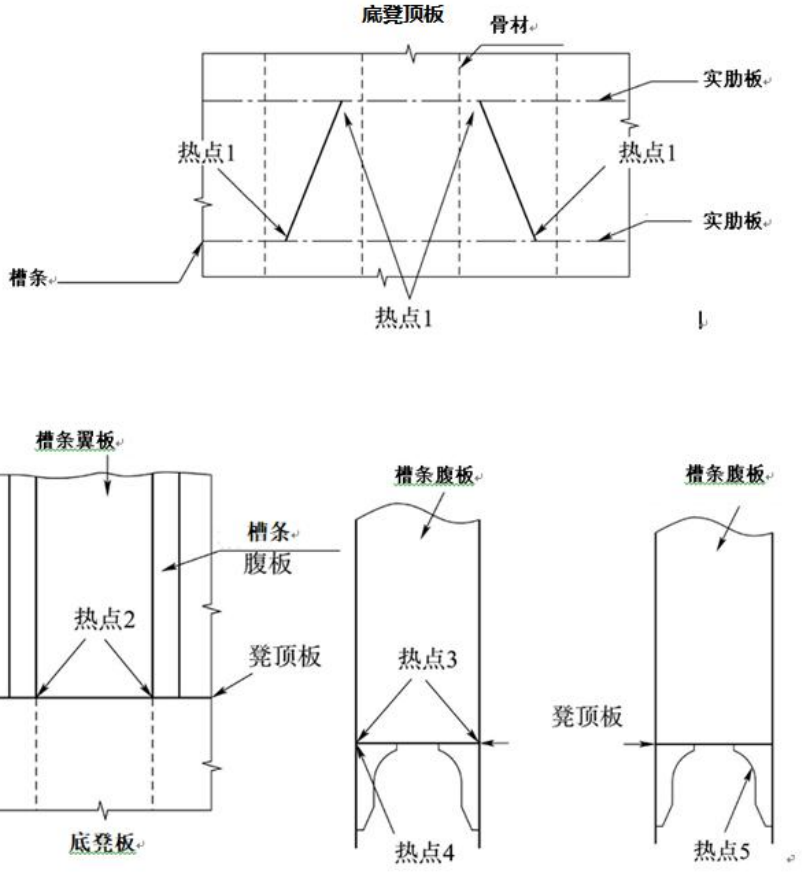


槽形舱壁与底凳连接—交叉卸货板和单面卸货板处热点　　表 2.1.3（5）

热 点 位 置	热点应力计算程序
交叉卸货板	
热点 11：卸货板交叉处	本章第 5 节 [3.1] ，类型‘a’
	
单面卸货板	
槽条腹板和翼板与底凳顶部的焊接连接 热点细节见表 2.1.3（6）的热点 1-3 如设置支撑肘板，见表 2.1.3（6）的热点 4	本章第 5 节[3.1]，类型‘a’
	

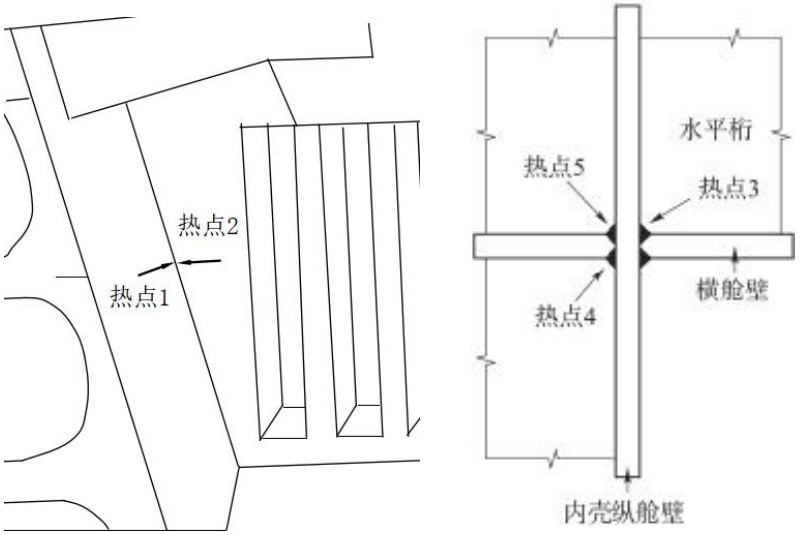
槽形舱壁与底凳连接处热点　　表 2.1.3（6）

热 点 位 置	热点应力计算程序
热点 1：底凳顶部 热点 2：位于底凳顶部的槽条翼板角隅 热点 3：位于底凳顶部的槽条腹板角隅 热点 4：位于支撑槽条腹板的肘板处的底凳顶部	本章第 5 节 [3.1]，类型‘a’
热点 5：支撑肘板边缘	本章第 5 节 [3.2]



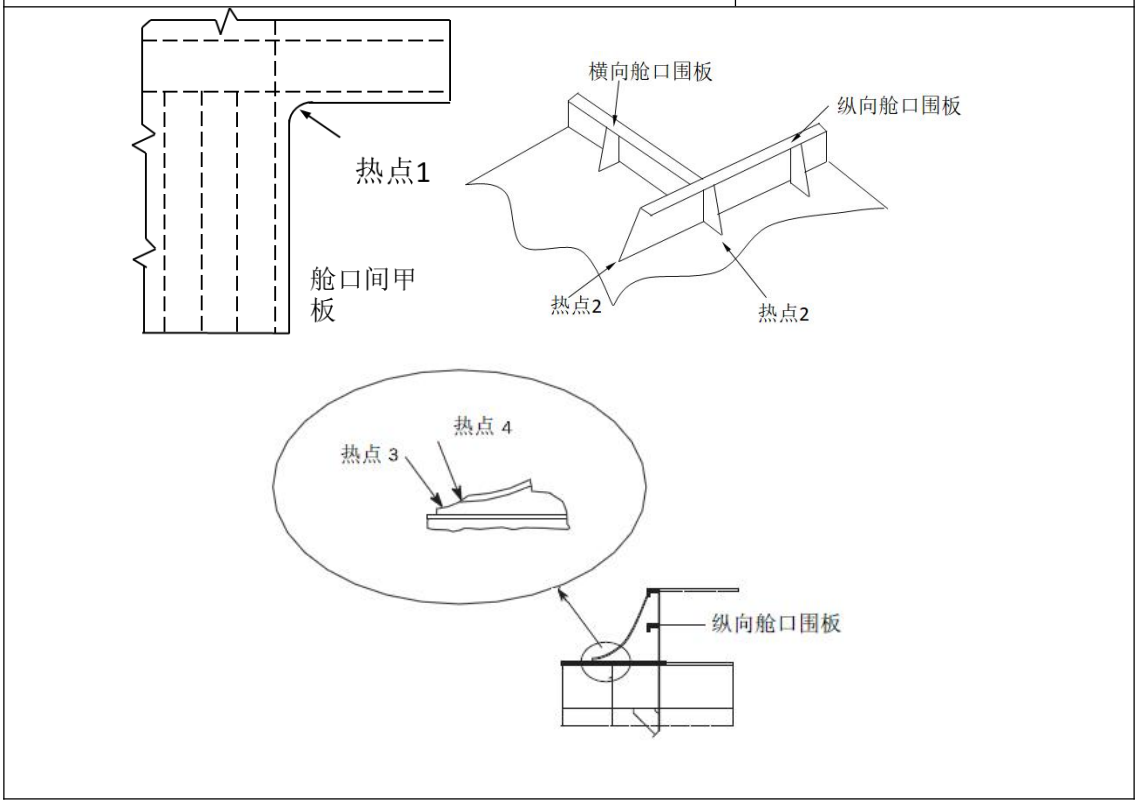
横舱壁与纵舱壁、边舱水平桁的相交处热点　　表 2.1.3（7）

热 点 位 置	热点应力计算程序
热点 1：横舱壁水平桁材根部处与横舱壁平面连接的纵舱壁板 热点 2：横舱壁水平桁材根部处横舱壁板	第 10 章第 5 节 [4.2]
热点 3：横舱壁水平桁材根部 热点 4：与水平桁斜对角的双舷侧内舷侧纵桁 热点 5：与水平桁对齐的双舷侧内舷侧纵桁	第 10 章第 5 节 [4.3]



舱口角隅和舱口围板端部肘板趾部的热点　　表 2.1.3（8）

热点位置	热点应力计算程序
热点 1：舱口角隅弧形边缘	本章第 5 节[3.2]
热点 3：舱口围肘板趾部的弧形	
热点 2：位于舱口围肘板趾部处的甲板板	本章第 5 节[3.1]，类型‘a’
热点 4：当肘板设有面板时，在面板终止位置处的面板与肘板的焊接连接	本章第 5 节[3.1]，类型‘b’



第 3 节　疲劳评估

符号

本节未定义的符号，见第 1 章第 4 节。

（i）—— 下标，表示第 4 章第 2 节规定的载荷工况 HVM、FVM、BSR-P、BSR-S、BSP-P、BSP-S、OST-P、OST-S。

‘*i1*’代表载荷工况：HVM-1、FVM-1、BSR-1P、BSR-1S、BSP-1P、BSP-1S、OST-1P 或 OST-1S。

‘*i2*’代表载荷工况：HVM-2、FVM-2、BSR-2P、BSR-2S、BSP-2P、BSP-2S、OST-2P 或 OST-2S。

（j）—— 下标，表示装载工况：满载或正常压载，见本章第 1 节[6.1]的定义。

T_C—— 腐蚀环境时间，年，见表 5.3.1。

T_D—— 设计寿命，年，取 25 年。

T_{DF}—— 设计疲劳寿命，年，见本章第 1 节的定义。

T_F—— 疲劳寿命，年，根据[5]计算。

m—— 设计 *S-N* 曲线的反斜率，空气环境中的值见表 4.1.4，腐蚀环境中的值见表 4.1.5。

对应 N=10^7 循环，空气环境中 *S-N* 曲线的反斜率从 m 变为 m+2。

n_{LC}—— 适用装载工况数，见本章第 1 节[6.1]。

f_c—— 修正因子，见本章第 1 节[5.2.1]。

f_{thick}—— 板厚影响修正因子，见[3.3]。

$f_{mean,\,i\,(j)}$—— 平均应力影响修正因子，见[3.2]。

1　疲劳分析

1.1　累积损伤

1.1.1 结构的疲劳评估基于 Palmgren-Miner 累积损伤方法，D 由下式求得：

$$D=\sum_{i=1}^{n_{tot}}\frac{n_i}{N_i}$$

式中：

n_i—— 应力范围$\Delta\sigma_i$的循环次数。

N_i—— 应力范围$\Delta\sigma_i$的失效循环次数。

n_{tot}—— 应力范围块总数。

i—— 应力范围块下标。

1.1.2 按照本章第 1 节[3.1.1]所述，船舶结构细节的长期应力范围分布采用双参数 Weibull 分布描述，疲劳损伤通过[5]中规定的闭合方程求得。

1.2 疲劳强度评估

1.2.1 按照[2]中规定，结构构件的疲劳强度评估分为以下三个步骤：

（1）按照[3]计算应力范围。

（2）按照[4]选择设计 S-N 曲线。

（3）按照[5]计算累积损伤和疲劳寿命。

2 衡准

2.1 疲劳寿命和衡准

2.1.1 计算的疲劳寿命，T_F，应满足下式：

$$T_F \geq T_{DF}$$

3 疲劳评估参考应力

3.1 疲劳应力范围

3.1.1 [3.1.2]和[3.1.3]分别规定了焊接接头和母材自由边各装载工况下的每种载荷工况的疲劳应力范围。

按照本章第 1 节[7.1.2]的规定，各装载工况(j)的应力范围取主导载荷工况的值。

$$\Delta\sigma_{FS,(j)} = \max_i\left(\Delta\sigma_{FS,i(j)}\right)$$

式中：

$\Delta\sigma_{FS,\,i\,(j)}$—— 装载工况($j$)下载荷工况($i$)的疲劳应力范围，N/mm^2，焊接接头按照[3.1.2]的规定，母材自由边按照[3.1.3]的规定。

3.1.2 焊接接头

平均应力影响、厚度影响修正后的焊接接头疲劳应力范围$\Delta\sigma_{FS,\,i\,(j)}$，N/mm^2，如下：

（1） 简化应力分析：

$$\Delta\sigma_{FS,i(j)} = f_e \cdot f_{mean,i(j)} \cdot f_{thick} \cdot f_{warp} \cdot \Delta\sigma_{HS,i(j)}$$

（2）有限元分析：

对于腹板加强的十字接头：$\Delta\sigma_{FS,i(j)} = f_e \cdot f_w \cdot f_s \cdot \max(\Delta\sigma_{FS1,i(j)}, \Delta\sigma_{FS2,i(j)})$

对于其他接头：$\Delta\sigma_{FS,i(j)} = f_e \cdot \max(SideL, SideR)[\max(\Delta\sigma_{FS1,i(j)}, \Delta\sigma_{FS2,i(j)})]$

式中：

f_e—— 环境因子，当船舶主要营运于北大西洋波浪环境时，取为 1；当船舶主要营运于非北大西洋波浪环境时，取为 0.8。

f_w—— 焊缝应力梯度影响的修正因子，当热点位于腹板加强的十字接头翼板时取为 0.96，当热点位于腹板时，取为 1。

f_s—— 支撑构件影响的修正因子，当热点位于腹板加强的十字接头翼板时取为 0.95，当热点位于腹板时，取为 1。

$\Delta\sigma_{HS,\,i\,(j)}$—— 热点应力范围，N/mm^2，由本章第 4 节[2.1.1]中装载条件(j)下载荷工况(i)的动载荷确定。

$\Delta\sigma_{FS1,\,i\,(j)}$—— 疲劳应力范围，N/mm^2，由热点主应力范围$\Delta\sigma_{HS1,\,i\,(j)}$确定。

$$\Delta\sigma_{FS1,(j)} = f_{mean1,i(j)} \cdot f_{thick} \cdot f_c \cdot \Delta\sigma_{HS1,i(j)}$$

$\Delta\sigma_{FS2,\,i\,(j)}$—— 疲劳应力范围，N/mm^2，由热点主应力范围$\Delta\sigma_{HS2,\,i\,(j)}$确定。

$$\Delta\sigma_{FS2,i(j)} = 0.9 \cdot f_{mean2,i(j)} \cdot f_{thick} \cdot f_c \cdot \Delta\sigma_{HS2,i(j)}$$

SideL,SideR—— 本章第 5 节图 3.1.3（1）和图 3.1.3（2）中 A-A 线的左侧和右侧。

$f_{mean1,i(j)}$—— [3.2]给定的平均应力影响修正因子。

$f_{mean2,i(j)}$—— [3.2]给定的平均应力影响修正因子。

f_{warp}—— 翘曲影响修正因子，取为：

f_{warp}=1.21，OST 工况，对于矿砂船舱口角隅处最靠近纵向舱口围板的甲板纵骨，如图 3.1.2 所示；

f_{warp}=1.12，OST 工况，对于如下所述的甲板纵骨：

位于舱口开口范围内，距舱口角隅一个强框架距离，与纵向舱口围板最近的骨材，如图 3.1.2 所示。

舱口角隅处最靠近纵向舱口围板的第二根骨材，如图 3.1.2 所示。

f_{warp}=1.0，其他。

$\Delta\sigma_{HS1,i(j)}$—— 热点主应力范围，N/mm^2，由装载工况(j)下载荷工况(i)的动载荷确定，其作用于垂直于焊趾±45°范围内，见本章第 5 节[3.1.2]、[3.3.2]和[4.2.3]中对两类壳单元的规定（4 节点或 8 节点）。

$\Delta\sigma_{HS2,i(j)}$—— 热点主应力范围，N/mm^2，由装载工况(j)下载荷工况(i)的动载荷确定，其作用于垂直于焊趾±45°范围外，见本章第 5 节[3.1.2]、[3.3.2]和[4.2.3]中对两类壳单元的规定（4 节点或 8 节点）。

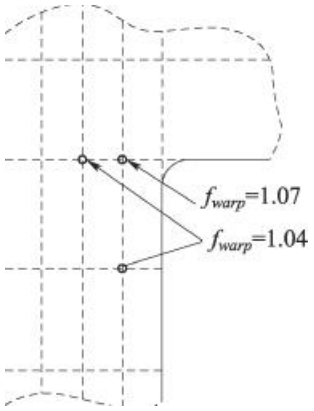


图 3.1.2　甲板纵骨翘曲影响

3.1.3　母材自由边

母材自由边疲劳应力范围$\Delta\sigma_{FS,i(j)}$，N/mm^2，取本章第 1 节[2.4]定义的自由边局部应力范围$\Delta\sigma_{BS,i(j)}$，并计及修正因子：

$$\Delta\sigma_{FS,i(j)} = f_e \cdot K_{sf} \cdot f_{material} \cdot f_{mean,i(j)} \cdot f_{thick} \cdot f_c \cdot \Delta\sigma_{BS,i(j)}$$

式中：

K_{sf} —— [4.2.3]中定义的母材表面处理因子。

$f_{material}$—— 材料强度修正因子，取为：

$$f_{material} = \frac{1200}{965 + R_{eH}}$$

$\Delta\sigma_{BS,i(j)}$—— 局部应力范围，N/mm^2，由装载工况(j)下载荷工况(i)的动载荷确定：

$$\Delta\sigma_{BS,i(j)} = \left|\sigma_{BS,i1(j)} - \sigma_{BS,i2(j)}\right|$$

$\sigma_{BS,i1(j)}$,$\sigma_{BS,i2(j)}$—— 装载工况(j)下载荷工况‘i_1‘和‘i_2‘的局部应力，N/mm^2，通过本章第 5 节精细网格有限元分析得到。

3.2 平均应力影响

3.2.1 平均应力影响修正因子

焊接接头各热点主应力范围$\Delta\sigma_{HS,\,i\,(j)}$或自由边的局部应力范围$\Delta\sigma_{BS,\,i\,(j)}$应计入的平均应力修正因子取为：

(1)焊接接头

$$f_{mean,i(j)}=\begin{cases}\min[1.0,0.9+0.2\dfrac{\sigma_{mCor,i(j)}}{2\Delta\sigma_{HS,i(j)}}] & \text{当}\sigma_{mCor,i(j)}\geq 0\text{时}\\ \max[0.3,0.9+0.8\dfrac{\sigma_{mCor,i(j)}}{2\Delta\sigma_{HS,i(j)}}] & \text{当}\sigma_{mCor,i(j)}<0\text{时}\end{cases}$$

(2)母材：

$$f_{mean,i(j)}=\begin{cases}\min[1.0,0.8+0.4\dfrac{\sigma_{mCor,i(j)}}{2\Delta\sigma_{BS,i(j)}}] & \text{当}\sigma_{mCor,i(j)}\geq 0\text{时}\\ \max[0.3,0.8+\dfrac{\sigma_{mCor,i(j)}}{2\Delta\sigma_{BS,i(j)}}] & \text{当}\sigma_{mCor,i(j)}<0\text{时}\end{cases}$$

式中：

$$\sigma_{mCor,i(j)}=\begin{cases}\sigma_{mean,i(j)} & \text{当}\sigma_{max}\leq R_{eEq}\\ R_{eEq}-\sigma_{max}+\sigma_{mean,i(j)} & \text{当}\sigma_{max}>R_{eEq}\end{cases}$$

$$\sigma_{\max}=\begin{cases}\max_{i,(j)}(\Delta\sigma_{HS,i(j)}+\sigma_{mean,i(j)}) & \text{对于焊接接头}\\ \max_{i,(j)}(\Delta\sigma_{BS,i(j)}+\sigma_{mean,i(j)}) & \text{对于母材}\end{cases}$$

$$R_{eEq}=\max(315;R_{eH})$$

$\sigma_{mean,\,i\,(j)}$——疲劳平均应力，N/mm²，根据[3.2.2]中对母材或焊接接头的规定计算。

3.2.2 母材自由边平均应力

装载工况(j)下载荷工况“$i1$”和“$i2$”的静载荷和动载荷产生的母材自由边的疲劳平均应力$\sigma_{mean,\,i\,(j),}$ N/mm²，通过基于局部应力的以下公式计算：

$$\sigma_{mean,i(j)}=\frac{\sigma_{BS,i1(j)}+\sigma_{BS,i2(j)}}{2}$$

3.2.3 简化应力分析方法的平均应力

简化应力分析评估的焊接接头疲劳平均应力根据本章第 4 节[2.2]计算。

3.2.4 有限元分析的平均应力

装载工况(j)下载荷工况“$i1$”和“$i2$”的静载荷和动载荷在两个热点主应力方向 pX 和 pY 上引起的焊接接头疲劳平均应力 $\sigma_{\,mean,i(j),pX}$和 $\sigma_{\,mean,i(j),pY}$，N/mm²，按照本章第 5 节[3.1.2]、[3.3.2]和[4.2.3]定义的基于热点应力分量的如下公式计算：

$$\sigma_{mean,i(j)pX}=\frac{(\sigma_{HS,i1(j)})_{xx}+(\sigma_{HS,i2(j)})_{xx}+(\sigma_{HS,i1(j)})_{yy}+(\sigma_{HS,i2(j)})_{yy}}{4}+$$
$$(\frac{(\sigma_{HS,i1(j)})_{xx}+(\sigma_{HS,i2(j)})_{xx}-(\sigma_{HS,i1(j)})_{yy}-(\sigma_{HS,i2(j)})_{yy}}{4})\cdot\cos 2\theta+(\frac{(\sigma_{HS,i1(j)})_{xy}+(\sigma_{HS,i2(j)})_{xy}}{2})\cdot\sin 2\theta$$

$$\sigma_{mean,i(j)pY}=\frac{(\sigma_{HS,i1(j)})_{xx}+(\sigma_{HS,i2(j)})_{xx}+(\sigma_{HS,i1(j)})_{yy}+(\sigma_{HS,i2(j)})_{yy}}{4}-$$
$$(\frac{(\sigma_{HS,i1(j)})_{xx}+(\sigma_{HS,i2(j)})_{xx}-(\sigma_{HS,i1(j)})_{yy}-(\sigma_{HS,i2(j)})_{yy}}{4})\cdot\cos 2\theta-(\frac{(\sigma_{HS,i1(j)})_{xy}+(\sigma_{HS,i2(j)})_{xy}}{2})\cdot\sin 2\theta$$

θ—— 单元坐标系 x 方向与热点主应力范围坐标系（本章第 5 节[3.1.2]和[4.2.3]）pX 方向的夹角。单元坐标系 x 方向与焊趾垂直。

在两个平均应力$\sigma_{mean,i(j),pX}$和$\sigma_{mean,i(j),pY}$中，主应力方向绝对值小于 45° 的一个为$\sigma_{mean1,i(j)}$，与$\Delta\sigma_{HS1,i(j)}$对应。另一个为$\sigma_{mean2,i(j)}$，与$\Delta\sigma_{HS2,i(j)}$对应。

3.3 厚度影响

3.3.1 板厚主要是通过几何形状和厚度方向的应力分布影响疲劳强度。板厚影响的修正因子，f_{thick}，取为：

当 $t_{n50}\leqslant 22$ mm，$f_{thick}=1.0$。

当 $t_{n50}>22$ mm，$f_{thick}=(t_{n50}/22)^{n}$。

式中：

t_{n50}—— 焊接接头热点或母材自由边处构件的净厚度，mm。

简化应力分析中骨材净厚度取为：

扁钢或球扁钢：无修正；

角钢和 T 型材：翼板净厚度。

有限元分析中，净厚度为裂纹可能形成和扩展的构件的净厚度。

对于成 90°连接的构件，即，十字接头、T 型接头和有横向附件的板，净厚度取为：

$$t_{n50}=\min\left(\frac{d}{2},t_{1n50}\right)$$

n—— 表 3.3.1 和表 4.2.3 的厚度指数，分别用于焊接和非焊接接头。根据应力方向选取 n。对应于$\Delta\sigma_{HS1}$和$\Delta\sigma_{HS2}$分别选取垂直于和平行于焊缝的值。

d—— 焊趾距离，mm，如图 3.3.1 所示，取为：

$d=t_{2n50}+2\,l_{leg}$

t_{1n50}—— 净厚度，mm，如图 3.3.1 所示的连续板。

t_{2n50}—— 净厚度，mm，如图 3.3.1 所示，评估热点处的横向附连板。

l_{leg}—— 角焊缝焊脚长度，mm。

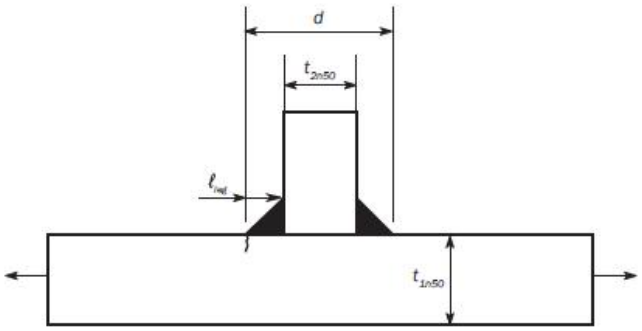
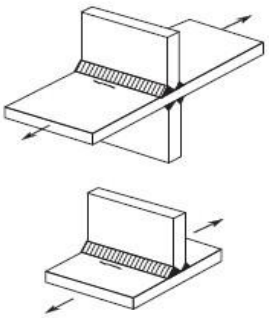
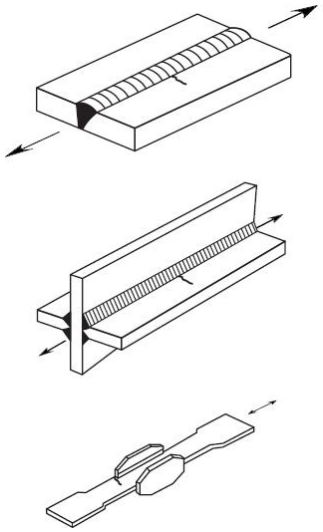
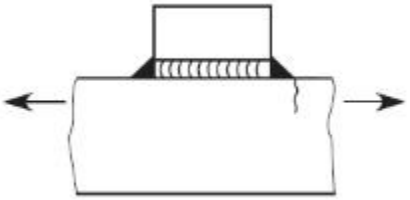
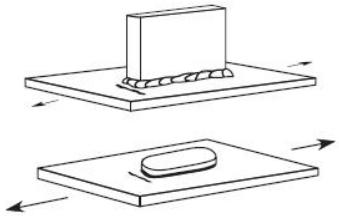
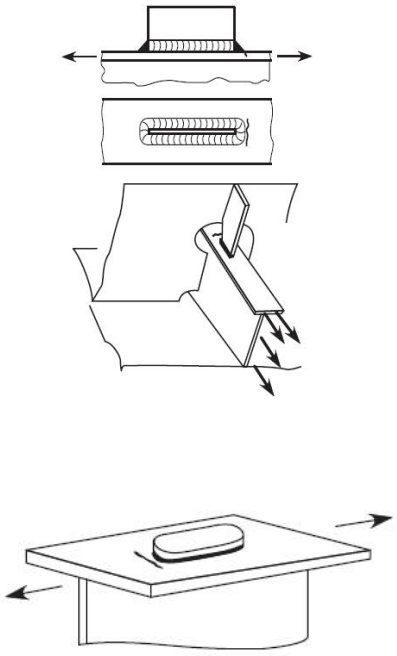


图 3.3.1 十字焊接接头、横向 T 型接头和有横向附连板的焊趾距离

焊接接头：板厚指数　　表 3. 3. 1

序号	接头分类描述	几何图例	条件	*n*
1	十字形接头、横向 T 型接头、有横向构件的板		未经处理的焊后状态	0.25
			使用焊接后处理方法处理过的焊趾	0.2
2	横向对接焊		未经处理的焊后状态	0.2
			打磨或使用焊接后处理方法处理过的焊趾	0.1
3	纵向焊缝或构件与板边缘的连接		未经处理的焊后状态	0.1
			使用焊接后处理方法处理过的焊趾	0.1

序号	接头分类描述	几何图例	条件	*n*
4	扁钢或球扁钢上的纵向构件		未经处理的焊后状态	0
			使用焊接后处理方法处理过的焊趾	0
5	覆板上的纵向构件		未经处理的焊后状态	0.2
			使用焊接后处理方法处理过的焊趾	0.1
6	纵向支撑的纵向附件和覆板		未经处理的焊后状态	0.1
			使用焊接后处理方法处理过的焊趾 (1)	0
注释（1）纵向端部连接的焊接后处理没有改进效果。				

4 S-N 曲线

4.1 基本 S-N 曲线

4.1.1 能力

钢质焊接接头和母材的疲劳强度的能力以 S-N 曲线表征，该曲线给出了施加到结构细节的应力范围和恒幅载荷下失效循环数之间的关系。

4.1.2　设计 S-N 曲线

疲劳评估是基于疲劳试验得到的 S-N 曲线。设计 S-N 曲线基于试验数据得到 50%存活概率的平均 S-N 曲线以下两倍标准差制定。表 4.1.4 和表 4.1.5 中的设计 S-N 曲线的相应存活概率为 97.7%。

4.1.3　S-N 曲线的适用范围

S-N 曲线适用于最小屈服强度不大于 390N/mm^2 的普通钢和高强度钢，对最小屈服强度高于 390N/mm^2 的钢材或具有改善疲劳性能的钢材，使用的 S-N 曲线应特殊考虑。

4.1.4　空气环境

空气环境中的基本设计曲线由 log($\Delta\sigma$)和 log(N)之间的线性关系表达，如图 4.1.4 所示，表示如下：

$$\log(N)=\log(K_2)-m\cdot\log(\Delta\sigma)$$

式中：

$$\log(K_2)=\log(K_1)-2\delta$$

K_1——　与平均 *S-N* 曲线有关的常数，由表 4.1.4 给出。

K_2——　与设计 *S-N* 曲线有关的常数，由表 4.1.4 给出。

δ——　log(N)的标准差，由表 4.1.4 给出。

$\Delta\sigma_q$——　与设计 *S-N* 曲线 N=10^7 循环对应的应力范围，N/mm^2，由表 4.1.4 给出。

空气环境中的基本 *S-N* 曲线数据　　表 4.1.4

等级	K_1		m	标准差，δ	K_2	10^7 循环对应的设计应力范围	2×10^6 循环对应的设计应力范围
	K_1	$\log_{10}K_1$		$Log_{10}\delta$	K_2	$\Delta\sigma_q$ N/mm^2	N/mm^2
B	2.343×10^{15}	15.3697	4.0	0.1821	1.01×10^{15}	100.2	149.9
C	1.082×10^{14}	14.0342	3.5	0.2041	4.23×10^{13}	78.2	123.9
D	3.988×10^{12}	12.6007	3.0	0.2095	1.52×10^{12}	53.4	91.3

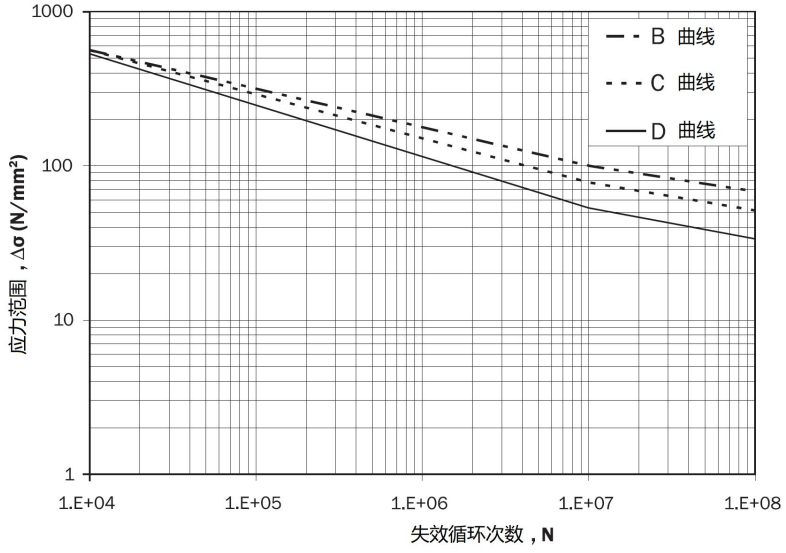


图 4.1.4　空气环境中的基本设计 S-N 曲线

4.1.5　腐蚀环境

腐蚀环境中的基本设计曲线由 log(Δσ)和 log(*N*)之间的线性关系表达，如图 4.1.5 所示，可表示如下：

$$\log(N)=\log(K_2)-m\cdot\log(\Delta\sigma)$$

N—　　应力范围Δσ下预计的失效循环次数。

K_2—　　与表 4.1.5 给出的设计 *S-N* 曲线有关的常数。

腐蚀环境中的基本 S-N 曲线数据　　表 4.1.5

等级	K_2	*m*	2×10⁶ 循环对应的设计应力范围，N/mm²
B_{corr}	5.05×10^{14}	4.0	126.1
C_{corr}	2.12×10^{13}	3.5	101.6
D_{corr}	7.60×10^{11}	3.0	72.4

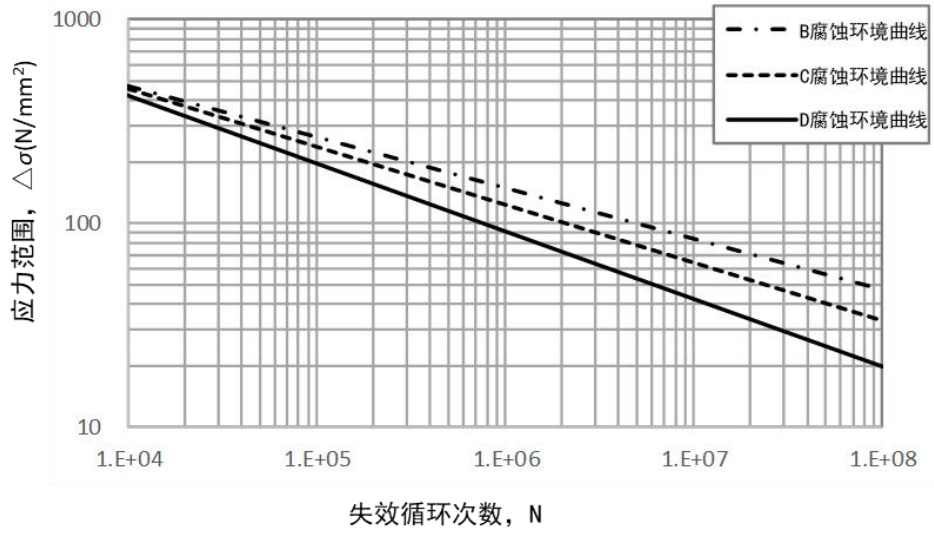


图 4.1.5 腐蚀环境中基本设计 *S-N* 曲线

4.2　*S-N* 曲线的选取

4.2.1　焊接接头

空气环境中焊接接头疲劳评估使用表 4.1.4 中定义的 D 曲线。腐蚀环境中使用表 4.1.5 定义的 D_{corr} 曲线。

4.2.2　母材自由边

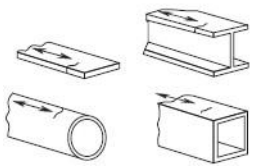
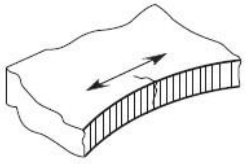
空气环境中母材自由边疲劳评估使用表 4.1.4 中定义的 B 或 C 曲线。腐蚀环境中使用表 4.1.5 定义的 B_{corr} 或 C_{corr} 曲线。

4.2.3　表面处理因子

C 级 S-N 曲线结合表 4.2.3 给出的表面处理因子适用于大多数非焊接位置的结构，考虑了使用中由于腐蚀、磨损和撕裂可能引起的切口。

在采用防磨损、防撕裂和防腐蚀的充分保护措施的条件下，并且按照本章第 5 节有限元分析之后，应用表 4.2.3 中 B 曲线时可应使用更高的表面处理质量。

非焊接接头：厚度指数和表面处理因子　　表 4. 2. 3

接头形状，疲劳裂纹位置和应力方向		边缘切割方法	边缘处理	表面处理	n	K_{sf}	S-N 曲线
1	轧制或挤压成型板和型材，以及无缝钢管，结构无表面或轧制缺陷 	N/A	N/A	无表面和轧制缺陷(1).(2)	0	0.94	B
2	切边 	机器切割，如，采用热处理方法，或剪切的边缘切口	使用光滑打磨方法使切口边缘削边或磨圆，凹槽方向平行于载荷方向	表面光滑，无裂纹和切口(1).(2)	0.1	1.00	B
			切边倒角或磨圆	表面光滑，无裂纹和切口(1).(2)	0.1	1.07	B
			无边缘处理	表面无裂纹和严重切口（检查程序）(1).(2)	0.1	1.0	C
		手工热切割，如，火焰切割	无边缘处理	表面无裂纹和严重切口（检查程序）(1).(2)	0.1	1.24	C
注 1：考虑由于切口形状引起的应力增加。 注 2：按照第 5 节[2]进行有限元分析。							

5　疲劳损伤计算

5.1　一般要求

5.1.1 按照不同的装载工况和腐蚀保护极限，将设计疲劳寿命划分成各时间段。

假定腐蚀保护（即，涂层系统）仅在一定年限内有效，在此期间内结构细节受保护，即，在空气环境中。在表 5.3.1 中所列设计寿命的剩余时间内，结构细节暴露在没有保护的腐蚀环境中。

5.1.2 [5.2]中的基本疲劳损伤是特定装载工况(j)在保护条件（即空气环境）或无保护条件（即腐蚀环境）这样的特定环境条件下的累积损伤。

[5.3]中的组合疲劳损伤是特定装载工况(j)在空气和腐蚀环境时间内累积损伤的组合。

[5.4]中的总疲劳损伤是所有装载工况组合疲劳损伤的总和。

5.2　基本疲劳损伤

5.2.1 按照空气环境中有保护和腐蚀环境中无保护两种情况，基于主导载荷工况获得的

疲劳应力范围，由下式计算每种疲劳装载工况(j)的基本疲劳损伤：

$$D_{E(j)}=\frac{\alpha_{(j)}\cdot N_D}{K_2}\frac{\Delta\sigma_{FS,(j)}^{m}}{\left(\ln N_R\right)^{m/\xi}}\cdot\mu_{(j)}\cdot\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

式中：

N_D—— 设计疲劳寿命内船舶经历的波浪循环总次数，取为：

$$N_D=31.557\times10^6(f_0T_D)/(4\log L)$$

f_0—— 考虑海上航行时间的因子，不包括装卸货、维修等时间。

f_0=0.85。

$\alpha_{(j)}$—— 各装载工况时间比例系数，见本章第 1 节表 6.2.1

$\Delta\sigma_{FS,(j)}$—— 对应参考超越概率水平 10^{-2} 的疲劳应力范围，N/mm^2。

N_R—— 与参考超越概率 10^{-2} 对应的循环次数。

N_R =100。

ξ—— Weibull 形状参数。

ξ=1。

$\Gamma(x)$—— 完整 Gamma 函数。

K_2—— 设计 *S-N* 曲线常数，空气环境见表 4.1.4，腐蚀环境见表 4.1.5。

$\mu_{(j)}$—— 计入 *S-N* 曲线斜率 *m* 变化的系数。

- 空气环境中：

$$\mu_{(j)}=1-\frac{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\nu_{(j)}\right)-\nu_{(j)}^{-\Delta m/\xi}\cdot\gamma\left(1+\left(\frac{m+\Delta m}{\xi}\right),\nu_{(j)}\right)}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

$$\nu_{(j)}=\left(\frac{\Delta\sigma_q}{\Delta\sigma_{FS,(j)}}\right)^{\xi}\ln N_R$$

- 腐蚀环境中：

$\mu_{(j)}$=1.0

$\gamma(a,x)$—— 不完整 Gamma 函数。

$\Delta\sigma_q$ —— 设计 *S-N* 曲线在循环次数 N=10^7 时，两线段交点处的应力范围值，N/mm^2，见表 4.1.4。

Δm —— N=10^7 循环处 *S-N* 曲线斜率倒数的变化

Δm = 2

5.3 组合疲劳损伤

5.3.1 各装载工况(*j*)有保护空气环境中和无保护腐蚀环境中的组合疲劳损伤按照下式计算：

$$D_{(j)}=D_{E,air(j)}\cdot\frac{T_D-T_C}{T_D}+D_{E,corr(j)}\cdot\frac{T_C}{T_D}$$

式中：$D_{E,\ air(j)}$ ——按照[5.2.1]规定的装载工况(*j*)的空气环境中的基本疲劳损伤。

$D_{E,\,corr(j)}$ ——按照[5.2.1]计算的装载工况(j)的腐蚀环境中的基本疲劳损伤。

腐蚀环境的时间，T_C 表 5.3.1

焊接接头或结构细节位置	腐蚀环境中时间，T_C，年
压载水舱	10
货舱的下部(1)	
货舱不包括下部(1)	5
其他区域	
(1)货舱下部是指货舱内底板以上 3m 范围内区域。	

5.4 总疲劳损伤

5.4.1 所有适用装载工况的总疲劳损伤按照下式计算：

$$D=\sum_{j=1}^{n_{LC}} D_{(j)}$$

式中：$D_{(j)}$ —— 各适用装载工况的组合疲劳损伤，见[5.3]。

5.5 疲劳寿命计算

5.5.1 疲劳寿命，T_F，取为：

$$T_F=\frac{T_D}{D_{air}} \qquad \text{如果} \frac{T_D}{D_{air}} \le \left(T_D-T_C\right)$$

$$T_F=T_D-T_C+\left(\frac{T_D}{D_{air}}-T_D+T_C\right)\frac{D_{air}}{D_{corr}} \qquad \text{其它}$$

式中：D_{air} —— 空气环境中所有装载工况的总疲劳损伤，取为：

$$D_{air}=\sum_{j=1}^{n_{LC}} D_{E,air(j)}$$

D_{corr}—— 腐蚀环境中所有装载工况的总疲劳损伤，取为：

$$D_{corr}=\sum_{j=1}^{n_{LC}} D_{E,corr(j)}$$

6 焊接改善方法

6.1 一般要求

6.1.1 焊接后处理改善疲劳强度的方法应视为一种达到要求疲劳寿命的补救办法，应满足质量控制程序要求和第三章第 4 节的腐蚀防护要求。

6.1.2 焊接后处理有利影响的限制

考虑焊接后处理的有利影响时，设计阶段结构细节计算疲劳寿命在不考虑焊接后处理影响的条件下不应小于 T_{DF}/1.47。对于货舱的内部的结构细节，设计阶段不含焊接后处理影响的计算疲劳寿命不应小于 25 年。

注 1：当 T_{DF} 取 25 年时，所考虑的结构细节在设计阶段不含焊接后处理影响的疲劳寿命不应小于 17 年。

6.1.3　建造阶段焊接后处理

在建造阶段，本规范考虑一种改善疲劳强度的焊接后处理基本方法，即，焊缝几何形状控制和打磨消除缺陷方法。

6.1.4　焊趾

改善方法应用于焊趾处。该方法针对焊趾处疲劳失效的可能性，目的是提高焊缝的疲劳寿命。其他位置引起的疲劳失效同样应考虑。如果应用焊接后处理使疲劳失效从焊趾转移到焊根，焊接接头的整体疲劳性能没有显著改善。焊趾的后处理方法不能改善焊根处的疲劳性能。

焊接后处理方法的简要描述及其改善程度见[6.2]。

6.1.5　焊接后处理的焊接类型

如果考虑计划改善焊缝，焊接后处理方法，应使用第 13 章第 3 节[2.4]中具有较小的钝边全焊透或部分焊透的焊缝以减轻或消除焊根处产生裂纹的可能性。

6.2　焊趾打磨

6.2.1 焊接部位可用机械打磨工具将焊趾打磨出合适的几何形状以降低应力集中和去除焊趾缺陷，见图 6.2.1。为消除缺陷，如杂质，咬边和冷隔，应去除焊趾处的材料。打磨深度应比任何可见的咬边至少低 0.5mm。打磨总深度应不大于 2mm 和打磨板局部总厚度 7%的较小者。应采用批准的方法对任何不满足该要求的咬边进行修理。

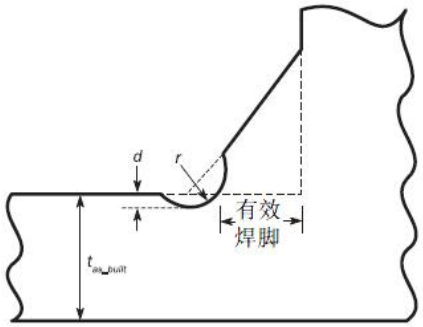


图 6.2.1 打磨焊趾几何形状示意图

6.2.2 为避免小半径凹槽产生有害的切口效应，打磨直径应与所打磨焊趾处的板厚相当。10 到 50mm 板厚的焊接接头对应的打磨直径应在 10 至 25mm 范围。打磨后凹槽半径不应小于 $0.25t_{as\text{-}built}$。打磨后的焊喉厚度和焊脚长度须满足规范要求或审批图纸上任何增加的焊缝尺寸。

检验程序应包括核查焊趾处的半径、打磨深度，以及确认完全去除焊趾处的咬边。

6.3　疲劳改善因子

6.3.1 打磨将使疲劳强度有效应力范围降低 1.3，即使空气中损伤减少为 $D_{air}/2.2$，式中：

D_{air} ——　空气中疲劳损伤，见本章第 3 节[5.3.1]。

6.4　适用范围

6.4.1 本节所述焊接后处理改善和疲劳改善因子的应用应符合以下条件：

（1）焊缝类型满足[6.1.5]。

（2）焊缝改善对于改进高周疲劳条件下的结构细节疲劳强度有效，所以疲劳改善因子不适用于低周疲劳，即，$N \leqslant 5\times10^4$，N 为疲劳失效的循环次数。

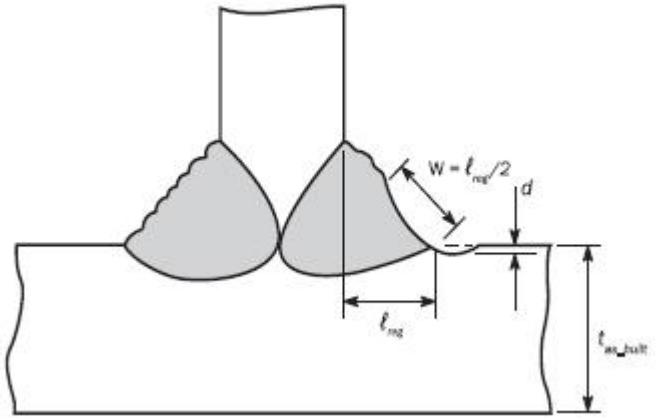
（3）除特殊规定外，疲劳改善因子适用于连接 6 至 50mm 厚度钢板的焊缝。

（4）疲劳改善因子可应用于横向对接焊，T 型和十字型焊接接头以及纵向附件焊接，但不包括纵骨端部连接。

（5）对于易遭受机械损坏的区域，只有在得到适当保护时才可考虑使用疲劳改善方法。

（6）大的多道焊缝应进行珠状表面处理，见图 6.4.1。

（7）建造者需提供船舶上应用焊接后处理的细节清单和位置。



l_{leg}：焊脚长度　　w：凹槽的宽度　　d：打磨深度

图 6.4.1 焊接珠状表面的打磨范围

7 工艺

7.1 应用

7.1.1 结构细节的疲劳性能通常可采用增强的工艺标准（包括建造对中和焊接控制）得到改善。

7.2 建造细节工艺控制

7.2.1 建造对中和误差控制

超出建造公差的建造对中可能使结构细节产生更多的应力集中，降低疲劳性能。建造者应负责满足第 13 章第 1 节的建造要求。

7.2.2 焊缝形状控制

几何形状差的焊缝可能产生更高的应力集中，因此，焊趾处应有良好的几何形状和光滑过渡。CCS 对关键焊趾位置可要求焊缝形状控制，即强化工艺。

焊接切口应力集中是焊接坡口角度和焊趾半径的直接函数。

前面所述 S-N 曲线有效性是基于焊接坡口角度最大平均值为 50 度，且焊趾半径最小平均值为 0.5mm。考虑计算疲劳寿命的结果，可能要求提交审批某些重要区域的焊接接头。

7.2.3 焊接后处理方法

焊接后处理方法可以用于改进结构细节的抗疲劳性能，如第 6 节所示。

设计阶段，计算疲劳寿命时通常不计入这些处理带来的任何益处。只有不能通过采用替代设计措施（如改进切口形状、设置肘板软趾、增加局部厚度或者其他改变结构细节几何形状等）合理达到设计疲劳寿命时，才考虑这些益处。CCS 根据具体情况考虑。

7.2.4 结构细节设计标准

本章第 6 节提供了结构细节改进设计的要求。结构细节设计标准同时包括工艺和焊接要求。

第 4 节　简化应力分析

符号

本节未定义的符号，见第 1 章第 4 节。

（i）—— 下标，表示第 4 章第 2 节规定的载荷工况 HVM、FVM、BSR-P、BSR-S、BSP-P、BSP-S、OST-P、OST-S。

'*i1*'代表载荷工况：HVM-1、FVM-1、BSR-1P、BSR-1S、BSP-1P、BSP-1S、OST-1P 或 OST-1S。

'*i2*'代表载荷工况：HVM-2、FVM-2、BSR-2P、BSR-2S、BSP-2P、BSP-2S、OST-2P 或 OST-2S。

（j）—— 下标，代表装载工况：

为满载或正常压载，见本章第 1 节[6.2]定义。

l_{bdg}—— 骨材有效弯曲跨距，m，见第 3 章第 6 节定义。

$I_{y\text{-}n50}$—— 所考虑纵向位置处船体梁垂向净剖面惯性矩，m^4。

$I_{z\text{-}n50}$—— 所考虑纵向位置处船体梁水平净剖面惯性矩，m^4。

y—— 所考虑载荷计算点的横向坐标，m。

z—— 所考虑载荷计算的垂向坐标，m。

z_n—— 从基线到水平中和轴的距离，m。

f_c—— 修正因子，见本章第 1 节[5.1.2]定义。

f_{NA}—— 修正因子，取为：

f_{NA} =1.0，对于 $0<z\leq D/2$

f_{NA} =0.95，对于 $z=D$

f_{NA}: 通过线性插值得到 z 的其他值。

K_a—— 轴向载荷应力的几何应力集中系数，见[5.2]。

K_b—— 侧向压力应力的几何应力集中系数，见[5.2]。

K_n—— 非对称骨材剖面形状的应力集中系数，见[5.1]。

1　一般要求

1.1　适用范围

1.1.1 本节定义了用于纵骨端部连接的疲劳强度评估的简化应力分析要求。

1.1.2 图 5.1.1（1）所示的纵骨每个端部连接的热点应力范围和热点平均应力应评估其翼板或腹板处，考虑以下位置：

(1)除横舱壁、凳处以外的横向强框架或肋板处，应不考虑因相对位移产生的附加热点应力。

(2)位于横舱壁、凳处的横向强框架或肋板处，应考虑因相对位移产生的附加热点应力。

几何不对称骨材的应力集中系数按照[5.1]确定，骨材端部连接点'A'和点'B'的几何形状的应力集中系数按照[5.2]确定。

1.2　假定

1.2.1 纵骨端部连接的疲劳评估使用下列假定：

热点应力基于：

（1）名义应力。

（2）[5]给定的应力集中系数。

（3）本章第 1 节[6]规定的装载工况。

纵骨端部连接类型见[5.2]。

1.2.2 [5.2]给出的端部连接是基于轴向和侧向载荷作用下的典型接头几何形状。当结构细节与本节表 5.2.1 不同时，应使用[5.3]的有限元分析证明结构细节的疲劳强度是适当的。

2 热点应力

2.1 热点应力范围

2.1.1 由装载工况(*j*)中载荷工况(*i*)的动载荷产生的热点应力范围，N/mm²，按下式计算：

$$\Delta\sigma_{HS,i(j)} = \left|\left(\sigma_{GD,i1(j)} + \sigma_{LD,i1(j)} + \sigma_{dD,i1(j)}\right) - \left(\sigma_{GD,i2(j)} + \sigma_{LD,i2(j)} + \sigma_{dD,i2(j)}\right)\right|$$

式中：

$\sigma_{GD,\ i1(j)}$,$\sigma_{GD,\ i2(j)}$—— 由船体梁波浪弯矩产生的应力，N/mm²，见[3.1.1]定义。

$\sigma_{LD,\ i1(j)}$,$\sigma_{LD,\ i2(j)}$—— 由局部动压力产生的应力，N/mm²，见[4.1.1]定义。

$\sigma_{dD,\ i1(j)}$,$\sigma_{dD,\ i2(j)}$—— 由波浪中相对位移产生的应力，N/mm²，见[4.2.4]和[4.2.5]定义。

2.2 热点平均应力

2.2.1 由装载工况(*j*)中载荷工况(*i*)的静载荷与动载荷产生的热点平均应力，N/mm²，按下式计算：

$$\sigma_{mean,i(j)} = \sigma_{GS,(j)} + \sigma_{LS,(j)} + \sigma_{dS,(j)} + \sigma_{mLD,i(j)} + \sigma_{mGD,i(j)} + \sigma_{mdD,i(j)}$$

式中：

$\sigma_{GS,\ (j)}$—— 由船体梁静水弯矩产生的应力，N/mm²，见[3.2.1]定义。

$\sigma_{LS,\ (j)}$—— 由局部静压力产生的应力，N/mm²，见[4.1.2]定义。

$\sigma_{dS,\ (j)}$—— 由静水中相对位移产生的应力，N/mm²，见[4.2.5]定义。

$\sigma_{mLD,\ i(j)}$—— 由局部动压力产生的平均应力，N/mm²，定义为：

$$\sigma_{mLD,i(j)} = \frac{\sigma_{LD,i1(j)} + \sigma_{LD,i2(j)}}{2}$$

$\sigma_{LD,i1(j)}$,$\sigma_{LD,i2(j)}$—— 由局部动压力产生的应力，N/mm²，见[4.1.1]定义。

$\sigma_{mGD,\ i(j)}$—— 由整体波浪弯矩产生的平均应力，N/mm²，定义为：

$$\sigma_{mGD,i(j)} = \frac{\sigma_{GD,i1(j)} + \sigma_{GD,i2(j)}}{2}$$

$\sigma_{GD,\ i1(j)}$,$\sigma_{GD,\ i2(j)}$—— 整体波浪弯矩产生的应力，N/mm²，见[3.1.1]定义。

$\sigma_{mdD,\ i(j)}$—— 局部动压力下的相对位移引起的平均应力，N/mm²，见[4.2.]定义。

3 船体梁应力

3.1 船体梁波浪弯矩产生的应力

3.1.1 装载工况(*j*)中载荷工况 *i1* 和 *i2* 的船体梁热点应力，N/mm²，按下式计算：

$$\sigma_{GD,ik(j)} = f_c \cdot K_a \left(\frac{M_{wv-LC,ik}}{I_{y-n50}} (z - z_n) \cdot f_{NA} - \frac{M_{wh-LC,ik}}{I_{z-n50}} y \right) 10^{-3}$$

式中：

$M_{wv\text{-}LC,\ ik}$—— 在所考虑纵向位置的船体梁载荷计算点处，*ik* 等于 *i*1 和 *i*2 的装载工况(*j*)中动载荷工况的垂向波浪弯矩，KNm，见第 4 章第 4 节定义。

$M_{wh\text{-}LC,\ ik}$—— 在所考虑纵向位置的船体梁载荷计算点处，*ik* 等于 *i*1 和 *i*2 的装载工况(*j*)中动载荷工况的水平波浪弯矩，KNm，见第 4 章第 4 节定义。

3.2 船体梁静水弯矩产生的应力

3.2.1 装载工况(*j*)的静水弯矩产生的船体梁热点应力，N/mm²，按下式计算：

$$\sigma_{GS,(j)} = \frac{f_c \cdot f_{NA} \cdot K_a \cdot \beta_{(j)} \cdot M_{sw} \cdot (z - z_n)}{I_{y-n50}} 10^{-3}$$

式中：

M_{sw}—— 许用垂向静水弯矩，kNm，在所考虑纵向位置的船体梁载荷计算点处，见第 4 章第 4 节定义。

$\beta_{(j)}$—— 许用垂向静水弯矩的比例系数，见表 3.2.1 定义。

许用垂向静水弯矩的比例系数 **表 3. 2. 1**

装载工况	$\beta_{(j)}$
均匀满载	0.8，中垂
正常压载	0.75，中拱

4 骨材局部应力

4.1 骨材弯曲应力

4.1.1 动压力产生的应力

由装载工况(*j*)中载荷工况 *i*1 和 *i*2 的局部动压力产生的热点应力，N/mm²，按下式计算：

$$\sigma_{LD,ik(j)} = \frac{K_b K_n s l_{bdg}^2 (\eta_W f_{NL} P_{W,ik(j)} + \eta_{ld} P_{ld,ik(j)} + \eta_{bd} P_{bd,ik(j)}) \left(1 - \frac{6x_e}{l_{bdg}} + \frac{6x_e^2}{l_{bdg}^2}\right)}{12 Z_{eff-n50}}$$

式中：

$P_{w,ik(j)}$—— 跨距中点处装载工况(*j*)中载荷工况 *i1* 和 *i2* 的波浪动压力，kN/m²，见第 4 章第 5 节。

$P_{ld,ik(j)}$—— 跨距中点处装载工况(*j*)中载荷工况 *i1* 和 *i2* 的液舱动压力，kN/m²，见第 4 章第 6 节。

若装载工况相关，作用在骨材两侧的压力，即作用在骨材一侧或骨材反面一侧的带板，可能同时考虑。

不考虑甲板纵骨处的内部液体动压力。

$P_{bd,ik(j)}$—— 跨距中点处装载工况 (*j*) 中载荷工况 *i1* 和 *i2* 的矿砂动压力，kN/m²，见第 4 章第 6 节 [2.2.3] 。

$\eta_w, \eta_{ld}, \eta_{bd}$—— 压力法线系数，取为：

η=1，当所考虑压力作用于骨材一侧

η=-1，其他

f_{NL}—— 波浪压力的非线性修正因子，取为：

$$f_{NL}=1 \qquad z>T_{LC}+2h_w$$

$$f_{NL}=2.5\frac{z-T_{LC}}{h_w}\text{-}4 \qquad T_{LC}+1.8h_w<z\le T_{LC}+2h_w$$

$$f_{NL}=0.5\frac{z-T_{LC}}{h_w}\text{-}0.4 \qquad T_{LC}+1.6h_w<z\le T_{LC}+1.8h_w$$

$$f_{NL}=0.4 \qquad T_{LC}+1.2h_w<z\le T_{LC}+1.6h_w$$

$$f_{NL}=0.7-0.25\frac{z-T_{LC}}{h_w} \qquad T_{LC}+0.6h_w<z\le T_{LC}+1.2h_w$$

$$f_{NL}=1-0.75\frac{z-T_{LC}}{h_w} \qquad T_{LC}\text{-}0.2h_w<z\le T_{LC}+0.6h_w$$

$$f_{NL}=0.1875\frac{z-T_{LC}}{h_w}+1.1875 \qquad T_{LC}\text{-}h_w<z\le T_{LC}\text{-}0.2h_w$$

$$f_{NL}=1 \qquad z\le T_{LC}\text{-}h_w$$

h_w—— 水线处压力的等效水压头，m，见第 4 章第 5 节定义。

X_e—— 热点至跨距 l_{bdg} 最近端的距离，m，见图 4.1.2。

$Z_{eff\text{-}n50}$—— 所考虑骨材的净剖面模数，cm^3，计算时带板取有效宽度 b_{eff}。

b_{eff}—— 跨距端部和端部肘板及支撑的带板的有效宽，mm。

$$b_{eff}=s\cdot\min\left[\frac{\frac{1.04}{3}}{1+\left(\frac{l_{bdg}}{s}\left(1-\frac{1}{\sqrt{3}}\right)\cdot10^3\right)^{1.35}};1.0\right] \qquad \text{当}\frac{l_{bdg}}{s}\left(1-\frac{1}{\sqrt{3}}\right)\times10^3\ge1\text{时}$$

$$b_{eff}=0.26l_{bdg}\left(1-\frac{1}{\sqrt{3}}\right)\times10^3 \qquad \text{当}\frac{l_{bdg}}{s}\left(1-\frac{1}{\sqrt{3}}\right)\times10^3<1\text{时}$$

4.1.2 静压力产生的应力

由装载工况(j)的局部静压力产生的热点应力，N/mm^2，按下式计算：

$$\sigma_{LS,(j)}=\frac{K_bK_nsl_{bdg}^2(\eta_sP_{s,(j)}+\eta_{ls}P_{ls,(j)}+\eta_{bs}P_{bs,(j)})\left(1-\frac{6x_e}{l_{bdg}}+\frac{6x_e^2}{l_{bdg}^2}\right)}{12Z_{eff-n50}}$$

式中：

$P_{S,(j)}$—— 装载工况(j)的外部静水压力，kN/m^2，见第 4 章第 5 节。

$P_{lS,(j)}$—— 装载工况(j)的液舱静水压力，kN/m^2，见第 4 章第 6 节。

若装载工况相关，作用在两侧的压力可能同时考虑。

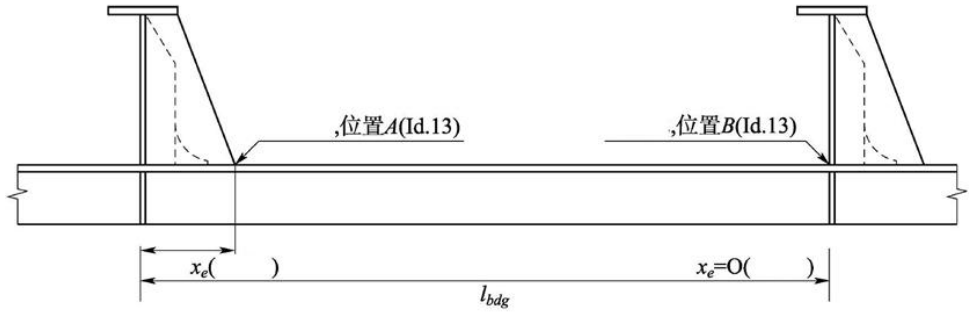
对甲板纵骨，不考虑液舱静压力。

$P_{bS,(j)}$—— 装载工况（j）的矿砂静压力，kN/m^2，见第 4 章第 6 节；

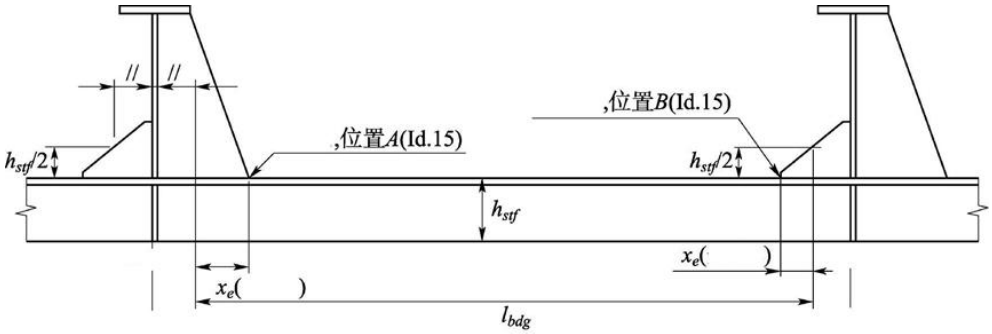
$\eta_S,\eta_{ls},\eta_{bs}$—— 压力法向系数，取为：

η=1，当所考虑压力作用于骨材一侧

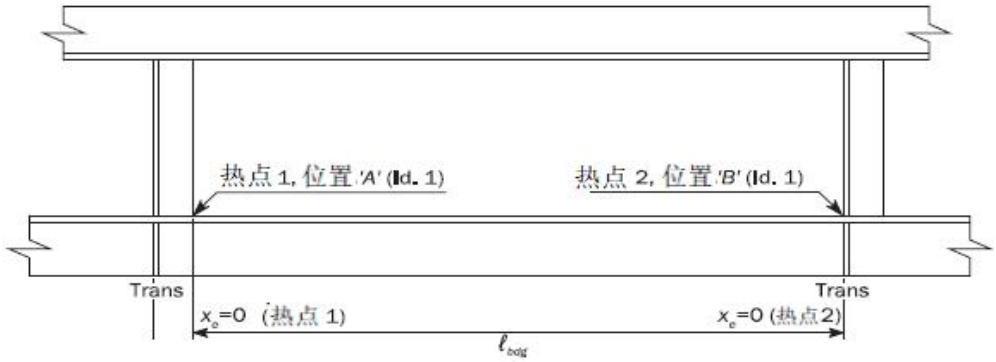
η=-1，其他



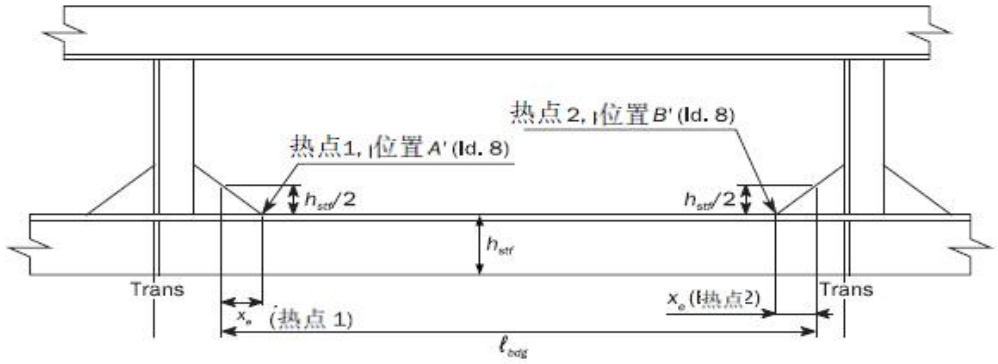
由自由翼板横向结构支承



由自由翼板横向结构支承



由双层结构 / 横舱壁支承



由双层结构 / 横舱壁支承

图 4.1.2 热点有效跨距和 X_e 定义

4.2 相对位移产生的应力

4.2.1 位于横舱壁、凳处的横向强框架和实肋板上的纵骨端部连接应计入相对位移产生的附加热点应力。

4.2.2 相对位移的定义

相对位移定义如下：

- 对穿过凳处实肋板的纵骨，在凳处实肋板之前（*Fwd*）或之后（*Aft*）第一个实肋板处纵骨相对于其在凳处的位移。
- 对其他纵骨，在包括货舱横舱壁之前（Fwd）或之后（Aft）第一个横向强框架（或实肋板）处纵骨相对于其在横舱壁处的位移。

4.2.3 符号约定

热点处，即纵骨翼板，当相对位移产生的应力为受拉时，相对位移的符号为正。

4.2.4 装载工况（j）中载荷工况 $i1$ 和 $i2$ 下相对位移产生的附加热点应力，应按第 7 章第 2 节 [2] 舱段有限元模型算得。

下列流程是按照第 7 章第 2 节 [2] 舱段有限元模型计算相对位移引起的应力。位置“a”和“f”处在装载工况（j）中载荷工况 $i1$ 和 $i2$ 相对位移引起的应力，N/mm^2，按下式计算：

$$\sigma_{dD,ik(j)}=\begin{cases}K_b\sigma_{dFwd-a,ik(j)}+K_b\sigma_{dAft-a,ik(j)} & \text{位置 "}a\text{"}\\ K_b\sigma_{dFwd-f,ik(j)}+K_b\sigma_{dAft-f,ik(j)} & \text{位置"}f\text{"}\end{cases}\quad(k=1,2)$$

式中：a，f——下标，表示图 4.2.4 所示位置；

Aft，*Fwd*——下标，表示图 4.2.4 所示横舱壁之后（*Aft*）和之前（*Fwd*）方向；

K_b——位置‘a’或‘f’处由于弯曲引起的应力集中因子，可能与表 5.2.1 中定义的‘A’或‘B’有关。

$\sigma_{dFwd-a,\ ik(j)}$，$\sigma_{dAft-a,\ ik(j)}$，$\sigma_{dFwd-f,\ ik(j)}$，$\sigma_{dAft-f,\ ik(j)}$——装载工况（j）中载荷工况 $i1$ 和 $i2$ 下的“a”和“f”处分别由包括制荡舱壁在内的横舱壁或位于凳处肋板与前（*Fwd*）和后（*Aft*）横向强框架或肋板之间的相对位移引起的附加热点应力，N/mm^2，取为

$$\sigma_{dFwd-a,ik(j)}=\frac{3.9\delta_{Fwd,ik(j)}EI_{Aft-n50}I_{Fwd-n50}}{Z_{Aft-n50}l_{Fwd}\left(l_{Aft}I_{Fwd-n50}+l_{Fwd}I_{Aft-n50}\right)}\left(1-1.15\frac{\left|x_{eAft}\right|}{l_{Aft}}\right)10^{-5}$$

$$\sigma_{dAft-a,ik(j)}=\left[\frac{3.9\delta_{Aft,ik(j)}EI_{Aft-n50}I_{Fwd-n50}}{Z_{Aft-n50}l_{Aft}\left(l_{Aft}I_{Fwd-n50}+l_{Fwd}I_{Aft-n50}\right)}\left(1-1.15\frac{\left|x_{eAft}\right|}{l_{Aft}}\right)-\frac{0.9\delta_{Aft,ik(j)}EI_{Aft-n50}\left|x_{eAft}\right|}{Z_{Aft-n50}l_{Aft}^3}\right]10^{-5}$$

$$\sigma_{dFwd-f,ik(j)}=\left[\frac{3.9\delta_{Fwd,ik(j)}EI_{Aft-n50}I_{Fwd-n50}}{Z_{Fwd-n50}l_{Fwd}\left(l_{Aft}I_{Fwd-n50}+l_{Fwd}I_{Aft-n50}\right)}\left(1-1.15\frac{\left|x_{eFwd}\right|}{l_{Fwd}}\right)-\frac{0.9\delta_{Fwdt,ik(j)}EI_{Fwd-n50}\left|x_{eFwd}\right|}{Z_{Fwd-n50}l_{Fwd}^3}\right]10^{-5}$$

$$\sigma_{dAft-f,ik(j)}=\frac{3.9\delta_{Aft,ik(j)}EI_{Aft-n50}I_{Fwd-n50}}{Z_{Fwdt-n50}l_{Aft}\left(l_{Aft}I_{Fwd-n50}+l_{Fwd}I_{Aft-n50}\right)}\left(1-1.15\frac{\left|x_{eFwd}\right|}{l_{Fwd}}\right)10^{-5}$$

$I_{Fwd-n50}$，$I_{Aft-n50}$——前（*Fwd*）和后（*Aft*）纵骨的净惯性矩，cm^4；

$Z_{Fwd-n50}$，$Z_{Aft-n50}$——前（*Fwd*）和后（*Aft*）骨材的净剖面模数，cm^3；

l_{Fwd}，l_{Aft}——前（*Fwd*）和后（*Aft*）纵骨跨距，m，按图 4 所示量取；

x_{eFwd}，x_{eAft}——分别从 l_{Fwd} 和 l_{Aft} 的最近端至热点位置‘*a*’或‘*f*’的距离，m，见图 4.1.2；

$\delta_{Fwd,\ ik(j)}$，$\delta_{Aft,\ ik(j)}$——横舱壁（包括制荡舱壁或凳处实肋板）与之前（*Fwd*）或之后（*Aft*）横向强框架（或肋板）之间垂直于带板的相对位移，mm，见图 4.2.4。

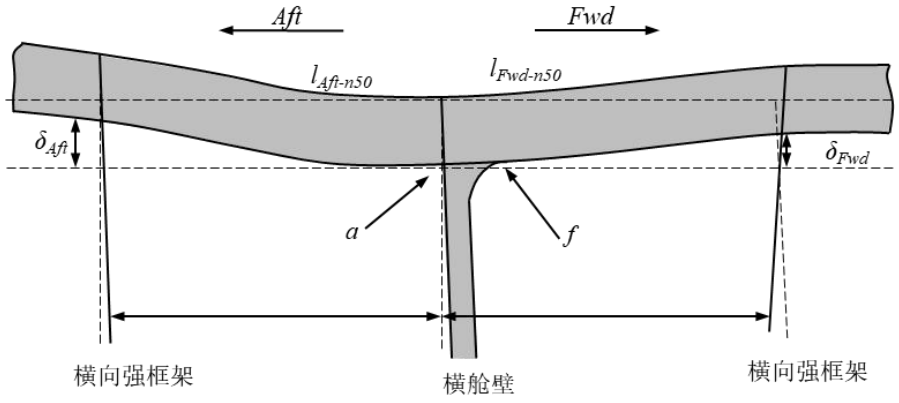


图 4.2.4　相对位移的定义（以舷侧纵骨为例）

4.2.5　静水相对位移应力

在静水中由于横舱壁以及相邻横向强框架或肋板之间的垂直于带板的相对位移引起的附加热点应力，N/mm²，按照[4.2.4]的方法，使用静水局部应力σ_{LS}和静压力代替动局部应力σ_{LD}和动压力计算求得。

5　应力集中系数

5.1　不对称骨材

5.1.1 侧向受载组合型和轧制型角钢的不对称翼板的应力集中系数 K_n，在腹板板厚中间位置处算得，如图 5.1.1(2)所示，应取为：

$$K_n = \frac{1+\lambda\beta^2}{1+\lambda\beta^2\psi_z}$$

式中：

$$\lambda = \frac{3\left(1+\dfrac{\eta}{280}\right)}{1+\dfrac{\eta}{40}}$$

$$\eta = \frac{l_{bdg}^4 \cdot 10^{12}}{b_{f-n50}^3 \cdot t_{f-n50} \cdot h_{stf-n50}^2 \cdot \left(\dfrac{4 \cdot h_{stf-n50}}{t_{w-n50}^3} + \dfrac{s}{t_{p-n50}^3}\right)}$$

$$\beta = 1 - \frac{2b_{g-n50}}{b_{f-n50}} \quad \text{组合型材}$$

$$\beta = 1 - \frac{t_{w-n50}}{b_{f-n50}} \quad \text{轧制型材}$$

$b_{g\text{-}n50}$——　骨材偏心，取翼板边缘至腹板中心线的距离，mm，见图 5.1.1(2)。

$b_{f\text{-}n50}$——　翼板净宽度，mm，见图 5.1.1(2)。

$t_{f\text{-}n50}$—— 翼板净厚度，mm，见图 5.1.1(2)。

$h_{stf\text{-}n50}$—— 包括面板在内的骨材净高度，mm，见图 5.1.1(2)。

$t_{w\text{-}n50}$—— 腹板净厚度，mm，见图 5.1.1(2)。

$h_{w\text{-}n50}$—— 骨材腹板净高度，mm，见图 5.1.1(2)。

$t_{p\text{-}n50}$—— 带板净厚度，mm，见图 5.1.1(2)。

Ψ_z—— 如下所示系数：

$$\Psi_z = \frac{h_{w-n50}^2 t_{w-n50}}{4Z_{n50}} 10^{-3}$$

Z_{n50}—— 骨材净剖面模数，其带板宽度等于骨材间距，cm^3。

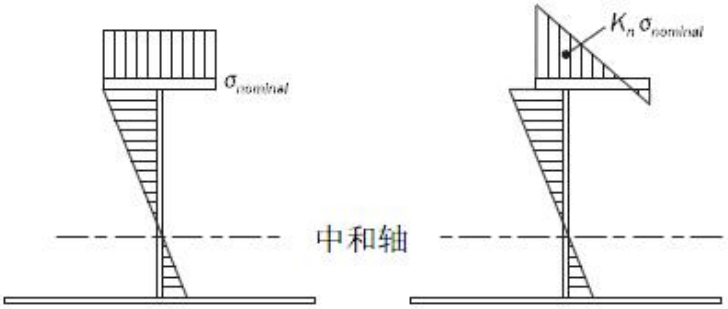


图 5.1.1（1）翼板对称和非对称骨材的弯曲应力

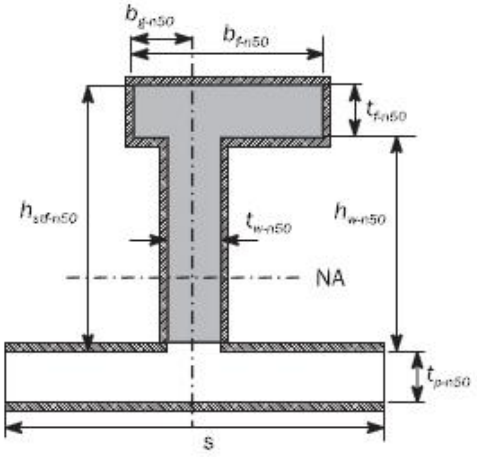


图 5.1.1（2）骨材-净尺度

5.1.2 球扁钢

球扁钢的因子 K_n 应使用图 5.1.2 所示的等效组合剖面形状算得。等效组合后翼板形状与原球扁钢翼板具有相同的剖面特性，即横剖面面积、垂向惯性矩和中和轴位置相同。对于 HP 球扁钢，等效的组合剖面尺寸列于表 5.1.2。

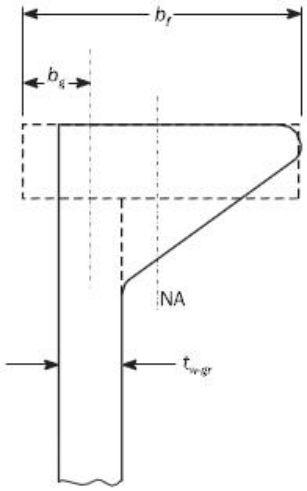


图 5.1.2 球扁钢和等效组合剖面

HP 等效组合剖面尺寸　　表 5.1.2

HP 球扁钢		**等效组合翼板总厚度**		
高度 (mm)	腹板总厚度，$t_{w\text{-}gr}$ (mm)	b_f (mm)	$t_{f\text{-}gr}$ (mm)	b_g (mm)
160	7-9	$t_{w\text{-}gr}$+18.7	18.1	($t_{w\text{-}gr}$ +0.7)/2
180	8-10	$t_{w\text{-}gr}$+21.4	20.5	($t_{w\text{-}gr}$ +0.8)/2
200	9-13	$t_{w\text{-}gr}$ +24.5	22.9	($t_{w\text{-}gr}$ +0.9)/2
220	9-13	$t_{w\text{-}gr}$ +27.6	25.4	($t_{w\text{-}gr}$ +1.0)/2
240	10-14	$t_{w\text{-}gr}$ +30.3	28.0	($t_{w\text{-}gr}$ +1.1)/2
260	10-14	$t_{w\text{-}gr}$ +33.0	30.6	($t_{w\text{-}gr}$ +1.3)/2
280	10-14	$t_{w\text{-}gr}$ +35.4	33.3	($t_{w\text{-}gr}$ +1.4)/2
300	11-16	$t_{w\text{-}gr}$ +38.4	35.9	($t_{w\text{-}gr}$ +1.5)/2
320	11-16	$t_{w\text{-}gr}$ +41.0	38.5	($t_{w\text{-}gr}$ +1.6)/2
340	12-17	$t_{w\text{-}gr}$ +43.3	41.3	($t_{w\text{-}gr}$ +1.7)/2
370	13-19	$t_{w\text{-}gr}$ +47.5	45.2	($t_{w\text{-}gr}$ +1.9)/2
400	14-19	$t_{w\text{-}gr}$ +51.7	49.1	($t_{w\text{-}gr}$ +2.1)/2
430	15-21	$t_{w\text{-}gr}$ +55.8	53.1	($t_{w\text{-}gr}$ +2.3)/2

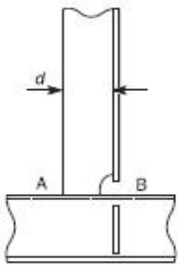
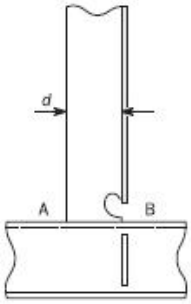
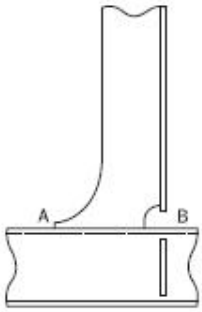
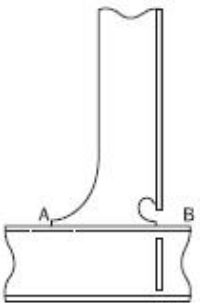
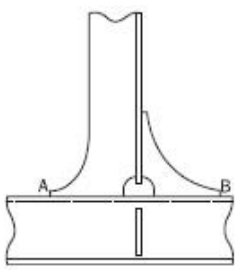
5.2　纵骨端部连接

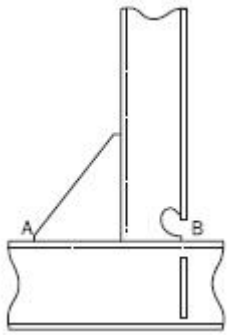
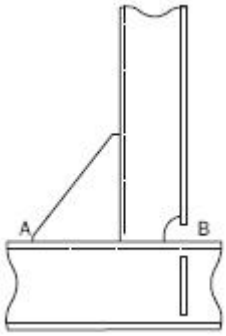
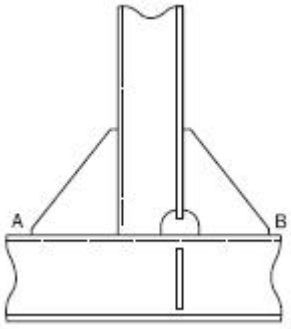
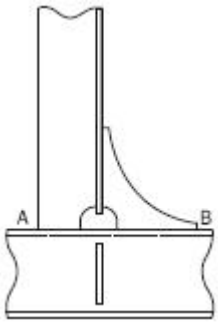
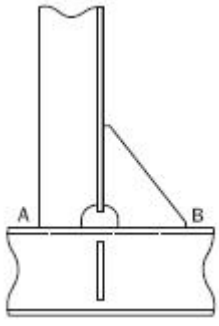
5.2.1 表 5.2.1 列出了轴向和侧向受载骨材端部连接的应力集中系数 K_a 和 K_b。如果软趾几何形状符合[5.2.5]的要求，表 5.2.1 中列出的软趾应力集中系数有效。侧向受载的应力集中系数 K_b 同样用于由相对位移引起的应力。

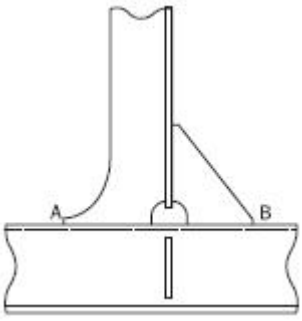
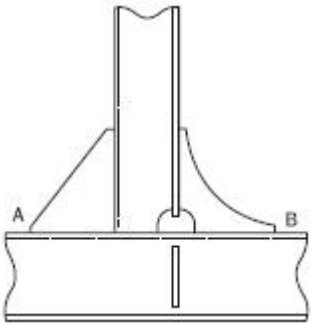
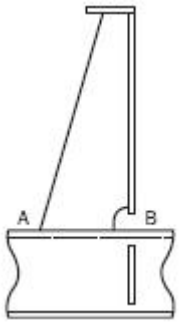
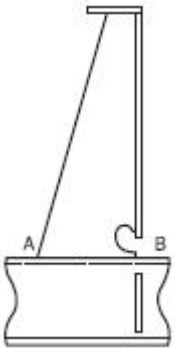
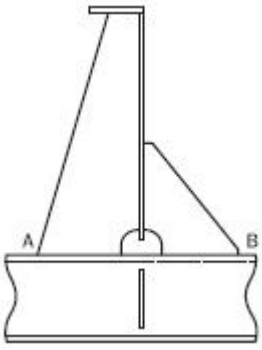
5.2.2　其他连接形式

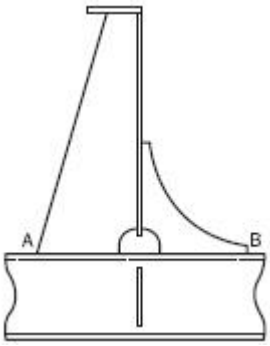
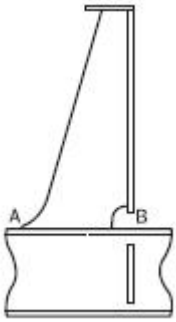
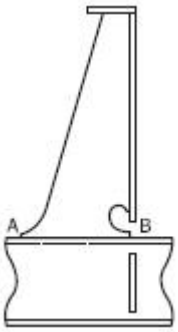
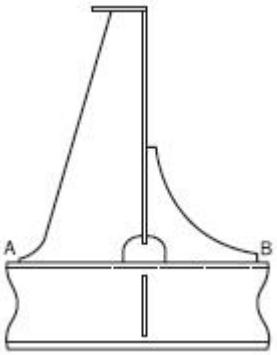
若提供的连接形式不包含在表 5.2.1 中，应使用本章第 5 节所述的精细网格有限元分析直接得到热点应力，或按[5.3]所述的有限元分析得到应力集中系数对该连接形式的疲劳强度进行评估。

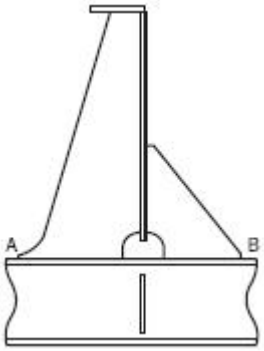
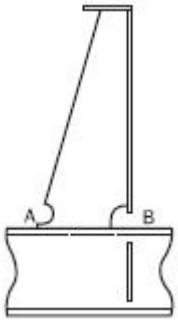
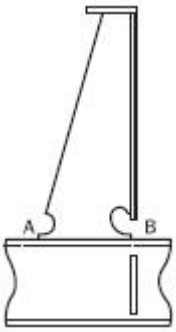
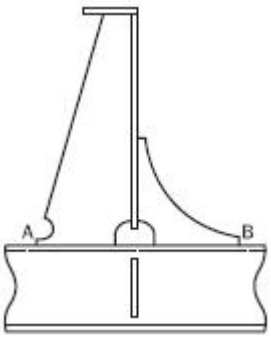
应力集中系数　　表 5. 2. 1

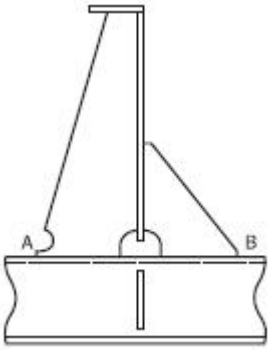
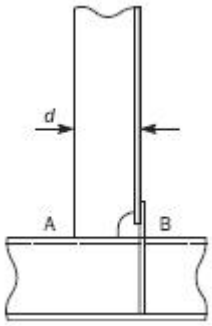
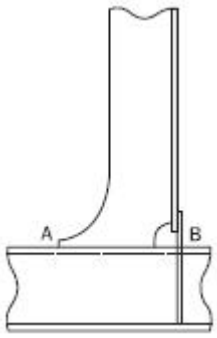
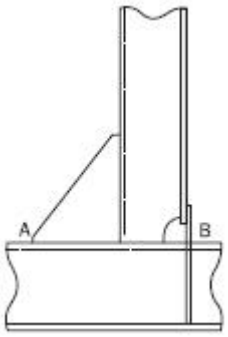
标识号	连接类型(2)(3)	A 点		B 点	
		K_a	K_b	K_a	K_b
1(1)		1.28 当 d≤150 1.36 当 150＜ d≤250 1.45 当 d>250	1.40 当 d≤150 1.50 当 150＜ d≤250 1.60 当 d>250	1.28 当 d≤150 1.36 当 150＜ d≤250 1.45 当 d>250	1.60
2(1)		1.28 当 d≤150 1.36 当 150＜ d≤250 1.45 当 d>250	1.40 当 d≤150 1.50 当 150＜ d≤250 1.60 当 d>250	1.14 当 d≤150 1.24 当 150＜ d≤250 1.34 当 d>250	1.27
3		1.28	1.34	1.52	1.67
4		1.28	1.34	1.34	1.34
5		1.28	1.34	1.28	1.34

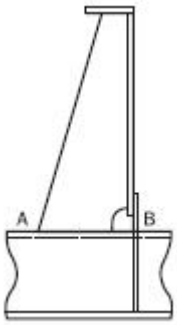
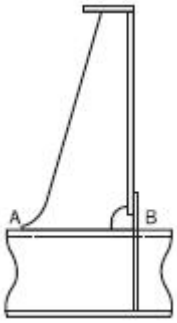
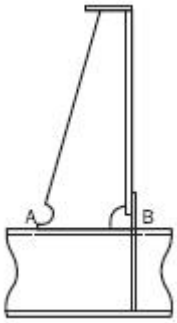
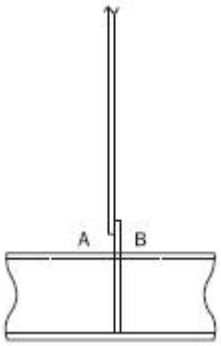
标识号	连接类型(2)(3)	A 点		B 点	
		K_a	K_b	K_a	K_b
6		1.52	1.67	1.34	1.34
7		1.52	1.67	1.52	1.67
8		1.52	1.67	1.52	1.67
9		1.52	1.67	1.28	1.34
10		1.52	1.67	1.52	1.67

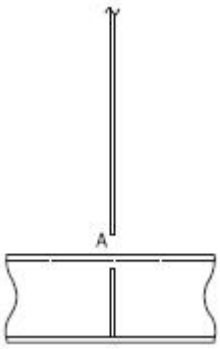
标识号	连接类型[2][3]	A 点		B 点	
		K_a	K_b	K_a	K_b
11		1.28	1.34	1.52	1.67
12		1.52	1.67	1.28	1.34
13		1.52	1.67	1.52	1.67
14		1.52	1.67	1.34	1.34
15		1.52	1.67	1.52	1.67

标识号	连接类型(2)(3)	A 点		B 点	
		K_a	K_b	K_a	K_b
16		1.52	1.67	1.28	1.34
17		1.28	1.34	1.52	1.67
18		1.28	1.34	1.34	1.34
19		1.28	1.34	1.28	1.34

标识号	连接类型[2][3]	A 点		B 点	
		K_a	K_b	K_a	K_b
20		1.28	1.34	1.52	1.67
21		1.28	1.34	1.52	1.67
22		1.28	1.34	1.34	1.34
23		1.28	1.34	1.28	1.34

标识号	连接类型[2][3]	A 点		B 点	
		K_a	K_b	K_a	K_b
24		1.28	1.34	1.52	1.67
25[1]		1.28 当 d≤150 1.36 当 150＜ d≤250 1.45 当 d>250	1.40 当 d≤150 1.50 当 150＜ d≤250 1.60 当 d>250	1.14 当 d≤150 1.24 当 150＜ d≤250 1.34 当 d>250	1.25 当 d≤150 1.36 当 150＜ d≤250 1.47 当 d>250
26		1.28	1.34	1.34	1.47
27		1.52	1.67	1.34	1.47

标识号	连接类型[2][3]	A 点		B 点	
		K_a	K_b	K_a	K_b
28		1.52	1.67	1.34	1.47
29		1.28	1.34	1.34	1.47
30		1.28	1.34	1.34	1.47
31[4]		1.13	1.20	1.13	1.20

标识号	连接类型[2][3]	A 点		B 点	
		K_a	K_b	K_a	K_b
32[4][5][6]		1.13	1.14	N/A	N/A

注：
（1）附件长度 d，mm，定义为焊接于纵骨翼板上的不扣除扇形孔的焊接附件长度。
（2）如果纵骨为扁钢且有一腹板加强筋/肘板焊接到该骨材上，当腹板加强筋/肘板的厚度大于骨材厚度的 0.7 时，表中应力集中系数应乘以 1.12。这同样适用于翼板边缘与连接附件面间隙小于 8mm 的不对称剖面的骨材，如达不到上述标准的球扁钢和角钢。
（3）搭接连接/附件的设计见[5.2.3]。
（4）连接类型 31 和 32 为不设置腹板加强筋或腹板加强筋不与纵骨翼板连接的结构细节。见[5.2.4]。
（5）对于无补板和/或腹板焊接到翼板的连接类型 32，本表格中的应力集中系数应用时不考虑开孔形状。
（6）疲劳评估点“A”位于骨材腹板和横向强框架或补板的连接处。

5.2.3　搭接连接

货舱区域不应使用纵骨搭接的连接形式，即附件焊接到纵骨的腹板。

5.2.4　未连接到腹板加强筋的端部骨材

若如下位置未设置腹板加强筋或腹板加强筋不与纵骨翼板连接：

（1）1.1T_{SC} 以下的舷侧外板。

（2）船底。

（3）1.1T_{SC} 以下的内壳纵舱壁。

（4）内底板

则有如下要求：

（1）按图 5.2.4 所示设置全补板(即表 5.2.1 中连接类型 ID31)，或，

（2）按本章第 6 节[2.1]所述进行开孔细节设计。

可接受与本章第 6 节[2.1]中开孔等效的设计，需用适当的有限元分析评估其疲劳强度，有限元分析基于包含补板的主要支撑构件腹板开孔处附近的热点应力，见本章第 6 节[2.2]。

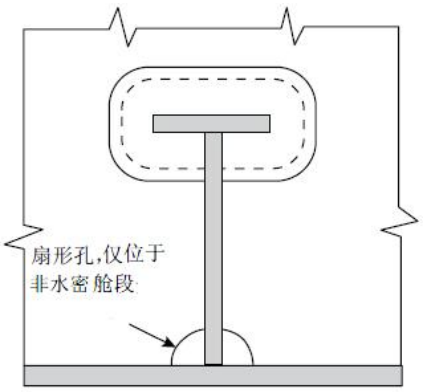


图 5.2.4　全补板

5.2.5　腹板加强筋和背肘板的软趾

腹板加强筋和背肘板的端部连接趾部几何形状符合下列要求：

$$\theta \le 20$$

$$h_{toe} \le \max(t_{bkt-gr}, 15)$$

式中：　θ——　软趾角度，度，见图 5.2.6。

h_{toe}——　软趾高度，mm，见图 5.2.6。

$t_{bkt\text{-}gr}$—　肘板总厚度，mm。

5.2.6　推荐细节设计

纵骨端部连接的软趾和背肘板推荐细节设计见图 5.2.6。

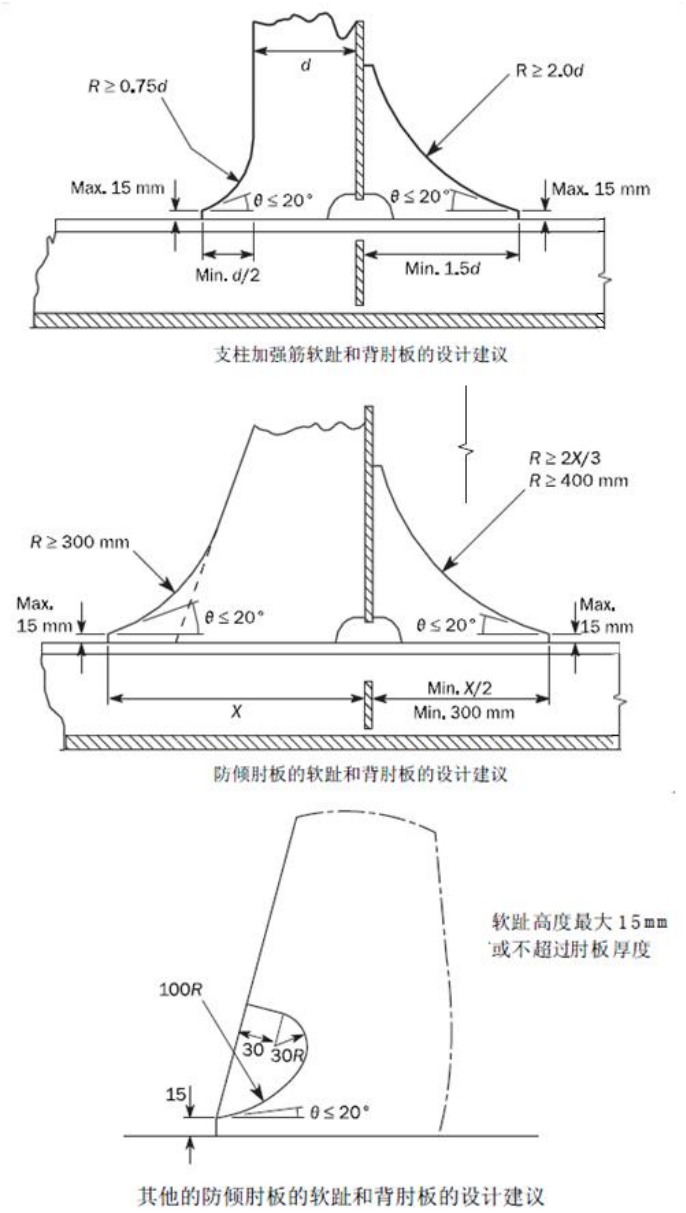


图 5.2.6 软趾和背肘板的细节设计

5.3 替代设计

5.3.1 替代设计几何应力集中系数按照本章第 5 节的要求使用精细网格有限元分析方法计算。另外，使用精细网格有限元方法计算骨材端部连接的几何应力集中系数应符合以下原则：

有限元模型范围：有限元模型如图 5.3.1 所示，在纵骨方向上至少保证 4 档强框架间距，所考虑结构细节位于中间框架。所有强框架处建立同样类型的端部连接模型。在横向，模型可保持一个骨材间距。

（1）通常，考虑以下两个载荷工况进行载荷施加：

1）轴向载荷通过在模型端部施加强迫位移；

2）侧向载荷通过在壳板上施加单位压力载荷。

（2）边界条件：

1）沿带板边缘纵向切口、沿强框架横向和垂向切口和腹板加强筋顶部施加对称边界条件。

2）对于侧向载荷工况：模型前后端的所有自由度均刚性固定。

3）对于轴向载荷工况：当模型后端纵向位移约束时，模型前端应施加强制轴向位移，反之亦然。

（3）有限元网格密度：

所考虑热点位置，单元尺寸应采用骨材翼板厚度的量级，或者按照骨材类型取为 10mm。模型其他部分，单元尺寸应取为 s/10，s 为骨材间距。

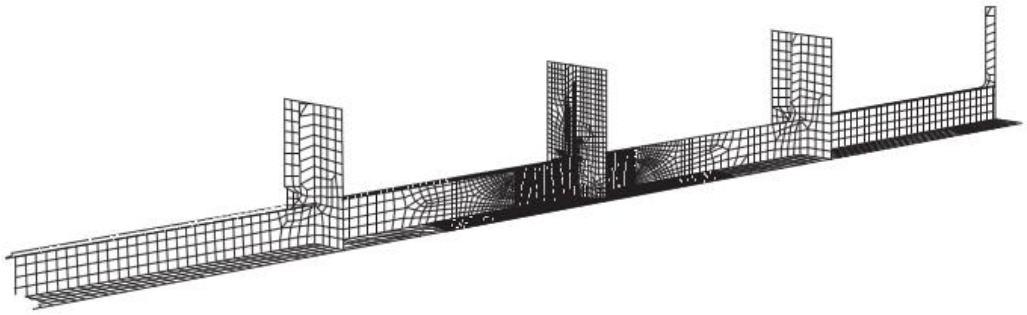


图 5.3.1 计算几何应力集中系数的细化有限元模型（以带翼板的骨材为例）

对于上述指定的两种载荷工况，应力集中系数按如下方法确定：

(1) 轴向载荷工况：

$$K_a = \frac{\sigma_{HSAx}}{\sigma_{NomAx}}$$

(2) 弯曲载荷工况

$$K_b = \frac{\sigma_{HSBd}}{\sigma_{NomBd}}$$

式中：

σ_{HSAx}—— 轴向载荷在骨材翼板产生的热点应力，N/mm^2。

σ_{NomAx}—— 按照[3.1]规定，有限元计算的轴向载荷在骨材翼板产生的名义轴向应力，N/mm^2。

σ_{HSBd}—— 单位压力载荷在骨材翼板产生的热点应力，N/mm^2。

σ_{NomBd}—— 按照[4.1]规定，有限元计算的单位压力载荷在骨材翼板产生的名义弯曲应力，N/mm^2。

替代设计的几何应力集中系数应形成文档提交 CCS。

第 5 节　舱段有限元应力分析

1　一般要求

1.1　适用范围

1.1.1 本节内容适用于舱段有限元应力分析方法的疲劳评估。采用基于热点应力的方法，给出焊接型和非焊接型热点的要求。热点应力考虑了焊接接头结构细节的不连续性，但不考虑焊趾处的切口效应。

1.1.2 热点应力通常很大程度取决于表达结构的有限元模型和热点应力计算程序。不采纳本节之外的其他有限元热点应力计算方法。

1.1.3 热点分为 a,b 两种类型，见表 1.1.3。热点类型的定义依据其在板上的位置和与焊趾的方向，见图 1.1.3。

热点的类型　　**表 1.1.3**

类型	描述
a	位于板表面焊趾处的热点
b	位于板边缘焊趾处的热点

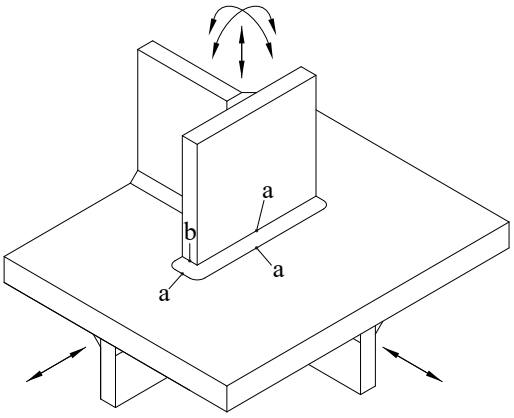


图 1.1.3 热点的类型

1.1.4 应关注简单连接热点应力计算方法的限制，见[5]。

1.1.5 应用舱段有限元应力分析的节点类型，见本章第 2 节[2]。

2　结构模型化

2.1　一般要求

2.1.1 疲劳评估的热点应力计算，要求在高应力集中处使用精细有限元网格。精细网格区域可以嵌入舱段有限元模型中，应根据第 7 章第 2 节建立舱段粗网格模型。或者，也可以采用精细网格区域的独立局部有限元模型，边界条件从舱段有限元模型中得到。

2.1.2　腐蚀模型根据本章第 1 节 [5.1]的规定，疲劳评估应用的精细网格有限元模型为基于 t_{n50} 的净尺度模型。

2.1.3　独立局部有限元模型

如使用独立局部有限元模型，局部模型的范围应使计算应力不受到边界条件和施加载荷的显著影响。精细网格有限元模型的边界应尽可能取在舱段模型中的主要支撑构件（如纵桁、水平桁材、肋板）位置处。局部模型边界处的横向强框、水平桁材、纵桁不必建模。

2.1.4 “a”类型热点的应力评估基于网格尺寸 t_{n50}×t_{n50}的壳单元，t_{n50}为热点处板材的净厚度。“b”类型热点的应力评估基于网格尺寸 10×10mm 的壳单元。精细网格区内的网格均应保持上述的尺寸，并在疲劳热点位置向外所有方向至少延伸 10 个单元。精细网格与较粗网格间的单元尺寸应逐渐过渡，并保持可接受的网格质量。过渡网格应为规则形状的均匀网格，并逐渐由较小的单元过渡到较大的单元。

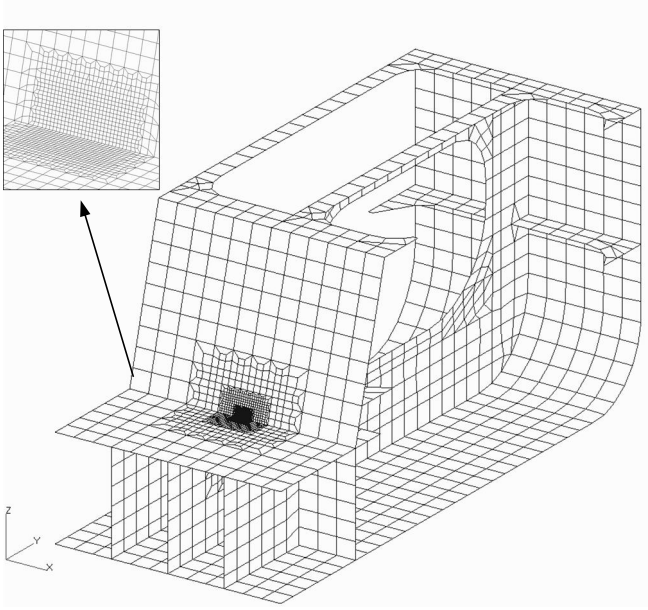


图 2.1.1(1)　内底与边舱斜板折角连接处的局部精细网格模型（t_{n50}×t_{n50}）

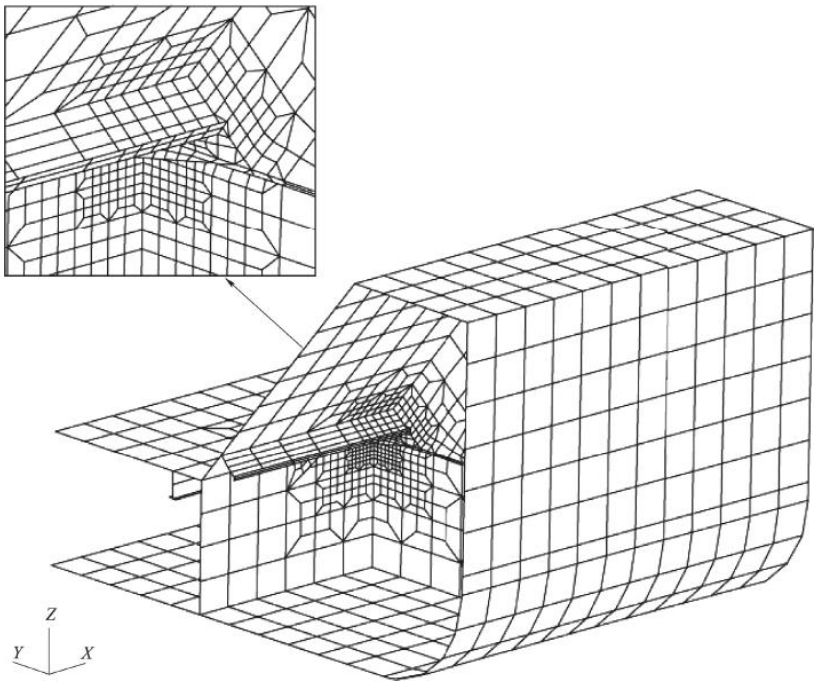


图 2.1.1(2)　边舱折角处内底、边舱斜板、横框架、纵桁和肘板的局部精细网格模型（t_{n50}×t_{n50}）

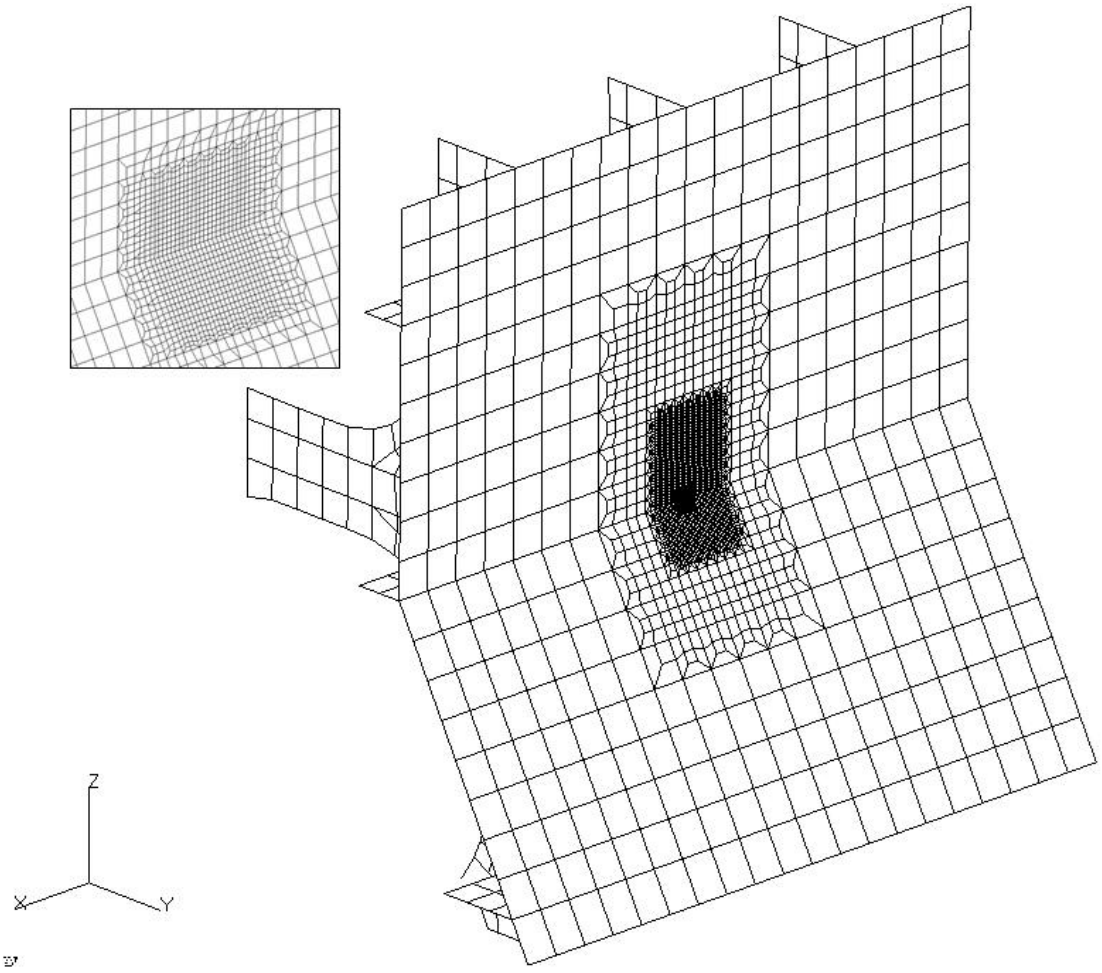


图 2.1.1(3)　边舱上折角处边舱斜板和内壳的局部精细网格模型（$t_{n50}\times t_{n50}$）

2.1.5 精细网格区域内应使用具有弯曲和膜元特性的 4 节点壳单元。4 节点壳单元具备面内应力的完全线性分布域，因此可准确表达单元的面内纯弯曲。在应力梯度较大的区域，可选择使用 8 节点壳单元。壳单元应表示板材的中面特性。出于实际目的，相邻不同厚度的板材可假定为板材中线对中，不考虑厚度变化引起的错开距离。焊缝形状和建造不对中在建模中不考虑。

2.1.6 邻近精细网格区的所有结构应使用壳单元建模。应尽可能避免使用三角形单元。避免使用特大长宽比（如长宽比大于 3）和畸形单元（如单元角的角度小于 60 度或者大于 120 度）。

2.1.7 如果在自由边（如连接骨材的强框架开孔、板材边缘和舱口角隅）进行应力评估时，应使用高度与邻接板材厚度相同、宽度可忽略的梁单元来得到局部边缘应力值。

2.2　边舱折角焊接式连接

2.2.1 除 [2.1] 的一般要求以外，本子条款的建模要求也适用于焊接式舭部边舱的上折角和下折角。

2.2.2 如使用独立的局部有限元模型，局部模型的最小范围如下：

（1）沿纵向，模型应覆盖两个强框架间距（即所校核的横向强框架向前后各延伸一个强框架间距）。位于局部模型端部位置的横向强框架不必建模。

（2）沿垂向，模型应从基线至双壳压载舱的最下一根水平桁。当边舱的上折角需进行疲劳评估时，模型应延伸至双壳压载舱的最下一根水平桁之上 4 个纵骨间距。

（3）沿横向，对于边舱下折角点，模型应从舷侧至双层底纵桁向内延伸 4 个纵骨的间距；对于边舱上折角点，模型应从舷侧延伸至双层底纵桁。

2.2.3 毗连内底板的强框架上的任何嵌接肘板、紧邻折角热点的第一根纵骨以及临近横框架的任何短梁和肘板，都应使用壳单元建模。远离折角的纵骨可使用梁单元建模。纵桁外侧“突出”的内底板应使用壳单元建模至嵌接肘板。沿纵向远离嵌接肘板的内底板突出部分可使用等效面积的线单元建模。距离折角一个骨材间距内的任何开孔，比如电缆、管路和通道开孔，都应建模。

2.2.4 边舱折角连接的典型局部有限元模型和 $t_{n50}\times t_{n50}$ 网格区的近观图见图 2.1.1（1）、图 2.1.1（2）和图 2.1.1（3）。

2.3 底凳—内底的连接

2.3.1 除 [2.1] 的一般要求以外，本子条款的建模要求也适用于底凳与内底连接的评估。

2.3.2 局部模型的最小范围如下：

a） 沿垂向，从船底外板至内底以上 2m 高度水平和槽条与底凳顶板相交处的较大高度值。

b） 沿横向，局部模型应延伸至细网格区域两侧最近的底凳隔板（即，至相邻双层底桁材）处。模型端部的底凳隔板不必建模。

c） 沿纵向，模型应覆盖后部底凳—内底连接之后一个实肋板间距和前部底凳—内底连接之前一个实肋板间距。

2.3.3 在局部模型范围内，底凳内部的隔板、肘板和底凳板上的骨材应根据其在局部模型范围内的实际的位置进行建模。隔板和肘板用壳单元模拟。底凳板上第一根垂向或水平骨材和内底板上第一根纵骨用壳单元模拟，其它骨材可用梁单元模拟。底凳与内底连接处的 $t_{n50}\times t_{n50}$ 精细网格区域的典型有限元模型见图 2.3.3。

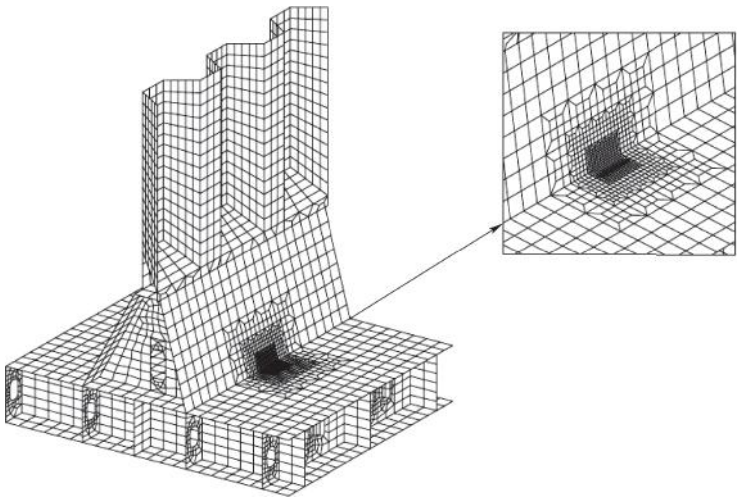


图 2.3.3 内底与底凳斜板连接处的局部有限元模型，$t_{n50}\times t_{n50}$ 网格

2.4 槽形舱壁与底凳连接

2.4.1 除 [2.1] 的一般要求以外，本子条款的建模要求也适用于槽形舱壁与底凳连接的评估。

2.4.2 局部模型的最小范围如下：

a) 沿垂向，从底凳底部至底凳顶板以上 2m 的范围。

b) 沿横向，局部模型应延伸至细网格区域两侧最近的底凳隔板（即，至相邻双层底桁材）处，模型端部的底凳隔板不必建模。

c) 沿纵向，模型应覆盖后部底凳—内底连接之后一个实肋板间距和前部底凳—内底连接之前一个实肋板间距。

2.4.3 底凳内部的隔板、肘板和底凳板上的骨材应根据其在局部模型范围内的实际位置进行建模。隔板、肘板应使用壳单元建模。底凳板上第一根垂直或水平骨材应使用壳单元建模，其他骨材可使用梁单元建模。底凳与槽形舱壁连接处的 $t_{n50}\times t_{n50}$ 精细网格区域的典型有限元模型见图 2.4.3。

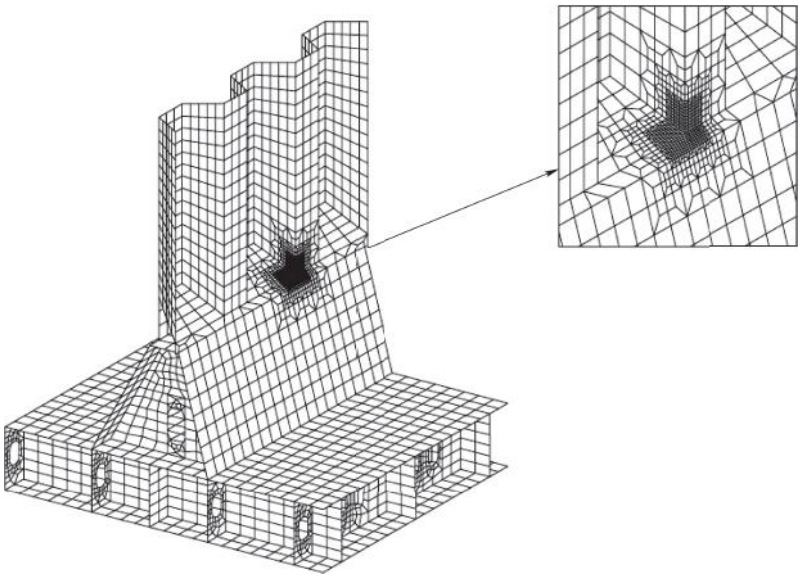


图 2.4.3 底凳与槽形横舱壁连接处的局部有限元模型，$t_{n50}\times t_{n50}$ 网格

2.5 舱口角隅及舱口围板端肘板

2.5.1 除[2.1]的一般要求以外，本条的建模要求也适用于舱口角隅/舱口围板肘板。应基于舱段有限元分析的应力水平确定需进行疲劳分析的舱口角隅/舱口围板端肘板。

2.5.2 如使用独立的局部有限元模型，其最小范围如下：

（1）沿横向，覆盖半个船宽以上。

（2）沿纵向，从所考虑舱口角隅/舱口围端肘板所在货舱中心延伸至相邻的货舱，包含所考虑舱口角隅/舱口围端肘板附近的全宽的舱口间甲板。

（3）沿垂向，从围板顶板至二甲板与外壳或内壳的相交处。

2.5.3 主要支撑构件及舱口围板撑板应使用具有膜元和弯曲特性的壳单元建模。

2.5.4 有限元网格细化水平应能够在热点应力中获取舱口角隅几何形状的应力集中。上甲板水平和横向甲板结构处的舱口角隅板边缘、舱口围板端部肘板的自由边和舱口围板端部肘板与甲板焊接处的趾部均应进行疲劳评估。如[2.1.7]所述，舱口角隅开口自由边处或舱口围端肘板自由边处应采用高度与板厚相同、宽度近似可忽略的梁单元获取局部边缘应力值。

2.5.5 局部结构的形状特别是关注的区域应在有限元模型中体现。舱口角隅的区域需采用足够小的单元划分网格以获得边缘的局部应力。通常，圆形角隅的 90 圆弧采用至少 15 个单元描述其曲率。对于椭圆或抛物线型角隅，从内侧半径端点至半长轴纵向距离一半位置处至少应用 15 个单元建模。舱口角隅椭圆边总共应至少用 20 个单元建模。圆弧自由边处的细化单元尺寸不必小于板厚，但也不应大于板厚的 5 倍。除了实际网格必要的考虑外，肘板

板应保持同样的理想化水平，并扩展至边板、甲板板和舱口围板。在肘板趾部处不应进行网格过渡。

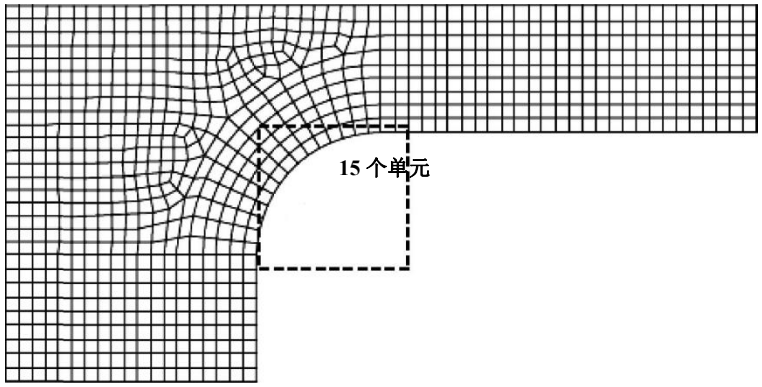


图 2.5.1（1） 圆弧形舱口角隅的网格密度

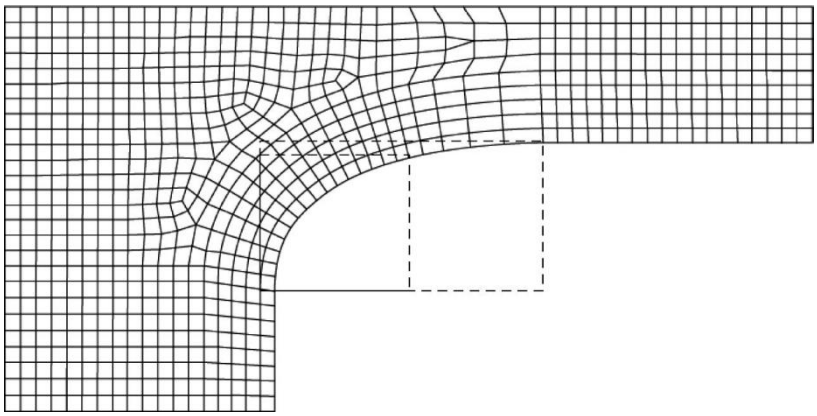


图 2.5.1（2） 椭圆形舱口角隅的网格密度

2.6 边界条件

2.6.1 舱段模型

舱段模型端部的边界条件应与第 7 章第 2 节 [1.5]一致。

2.6.2 独立局部模型

如使用局部独立模型计算热点应力范围，边界条件应按第 7 章第 3 节 [5.2]规定进行。

2.7 载荷施加

舱段有限元应力方法载荷施加方法见第 7 章第 3 节。

3 非腹板加强十字接头的细节热点应力

3.1 焊接结构细节

3.1.1 对于“a”类型的热点，热点应力σ_{HS}基于 $t_{n50}\times t_{n50}$ 网格密度的有限元分析得到，公式如下：

$$\sigma_{HS} = 1.12\sigma$$

式中，σ——表面主应力，N/mm^2，读取于距交线 $t_{n50}/2$ 处。

t_{n50}——焊趾处板材的净厚度，mm。

对“a”类型热点腹板加强十字接头的结构细节，应按照[4.2]的方式读取应力。

对于“*b*”类型的热点，其应力分布不取决于板厚，热点应力σ_{HS}基于 10×10mm 网格密度的有限元分析得到，公式如下：

$$\sigma_{HS} = 1.12\sigma$$

σ——表面主应力，N/mm^2，在距交线 5mm 处读取。

3.1.2　应力读取方法

根据单元类型，采用如下其中一种应力读取方法：

（1）4 节点单元：

对于类型“a”热点，单元中心点的表面应力分量线性外插至 A-A 线以得到位于距交线 $t_{n50}/2$ 位置处的应力读取点“*i*1”和“*i*2”载荷工况的应力分量，如图 3.1.3（1）。由 A-A 线两侧（L 侧，R 侧）算得的应力分量的张量差（工况“*i*1”和“*i*2”之间）得到应力读取点处的两个热点主应力范围。需确定单元坐标系 x 方向与热点主应力范围坐标系的主方向 pX 之间的角度θ。

（2）8 节点单元：

在 $t_{n50}\times t_{n50}$ 单元网格下采用 8 节点单元，单元边长中点的节点位于距类型“a”热点 $t_{n50}/2$ 的 A-A 线上，该节点与应力读取点重合。*i*1 和 *i*2 载荷工况的单元表面应力分量可直接应用，无需在 A-A 线两侧（L 侧，R 侧）相邻单元外插，如图 3.1.3（2）。由 A-A 线两侧（L 侧，R 侧）算得的应力分量的张量差（工况“*i*1”和“*i*2”之间）得到应力读取点处的两个热点主应力范围。需确定单元坐标系 x 方向与热点主应力范围坐标系的主方向 pX 之间的角度θ。

对于“*b*”类型热点的疲劳评估，应使用梁单元来获取疲劳应力范围，应力范围基于梁单元的轴向应力和弯曲应力，梁单元的高度与所考虑板材的厚度相同，面内宽度方向可以忽略。

3.1.3 上述的应力提取过程基于单元的表面应力。通常，有限元软件中的单元应力是在单元内部的高斯积分点计算得到。根据有限元软件中设定的单元类型，为获得应力读取点（单元中心点表面或单元边缘）的实际应力，可能有必要进行若干次内插。

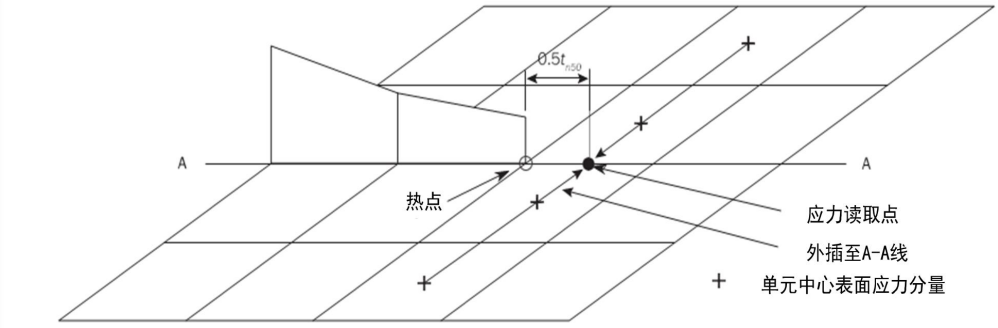


图 3.1.3(1)应力读取点和 4 节点单元的热点应力

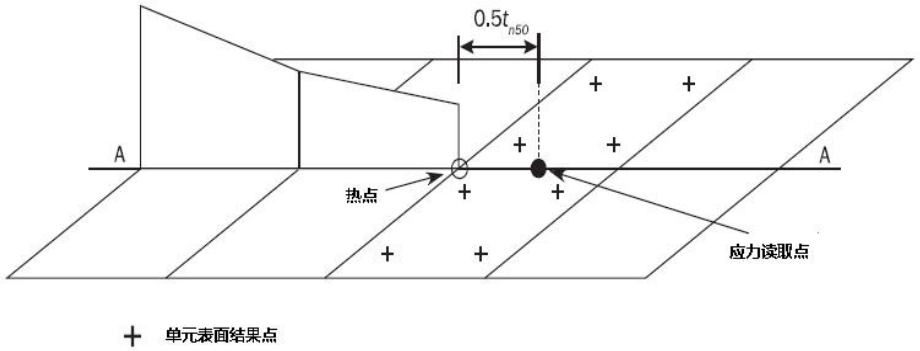


图 3.1.3(2) 应力读取点和 8 节点单元的热点应力

3.2 母材

3.2.1 对于板材自由边的疲劳评估，需使用梁单元获取疲劳应力范围。梁单元的高度与所考虑板材的厚度相同，面内宽度方向可忽略，截面面积为单位面积。

4 腹板加强十字接头的热点应力

4.1 应用范围

4.1.1 在本章第 2 节表 2.1.3（1）规定的结构细节中，以下结构细节视为腹板加强十字接头：

（1）焊接型折角连接，见图 4.1.3；

（2）内底与底凳连接处，见图 4.1.3；

与腹板加强十字接头相关的两类热点需进行评估：

（1）位于腹板加强十字接头翼板处的热点；

（2）位于腹板加强十字接头腹板处的热点；

4.1.2 腹板加强十字接头翼板处的热点应力计算方法见[4.2]。

4.1.3 腹板加强十字接头腹板处的热点应力计算方法见[4.3]。

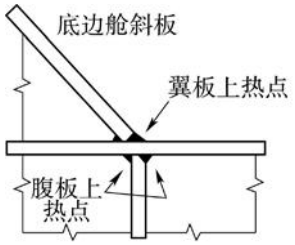


图 4.1.3 腹板加强十字接头

4.2 翼板处的热点应力计算

4.2.1 对于腹板加强十字接头翼板处热点，应从所考虑构件与相连构件的交线移至实际焊趾位置的点读取表面主应力，并将读取的应力乘以 1.12。交线取在假定中面对中十字接头的中间板厚处。

热点应力，N/mm^2，由如下公式计算得到：

$$\sigma_{HS}=1.12\sigma_{shift}$$

式中，σ_{shift}—— 应力读取位置处的表面主应力，N/mm^2。

从交线偏移的应力读取位置如下：

$$x_{shift}=\frac{t_{1-n50}}{2}+x_{wt}$$

式中，$t_{1\text{-}n50}$——板材 1 的净厚度，mm,见图 4.2.2（1）；

X_{wt}——延伸角焊缝焊脚长度，mm，见图 4.2.2（1），取不大于 $t_{1\text{-}n50}$。

4.2.2 热点应力读取点处的应力应按下式计算，见图 4.2.2（2）：

$$\sigma_{shift}=\left[\sigma_{membrane}(x_{shift})+0.6\cdot\sigma_{bending}(x_{shift})\right]\cdot\beta$$

式中，$\sigma_{bending\,(x_{shift})}$——偏移位置处的弯曲应力，N/mm²，取为：

$\sigma_{bending\,(x_{shift})}=\sigma_{surface\,(x_{shift})}-\sigma_{membrane\,(x_{shift})}$

$\sigma_{surface\,(x_{shift})}$——在 x_{shift} 位置处总表面应力（包括膜应力和弯曲应力，N/mm²）

$\sigma_{membrane\,(x_{shift})}$——在 x_{shift} 位置处的膜应力，N/mm²

β：板角度热点应力修正因子，取为：

对于α=135°

$$\beta=0.96-0.13\frac{x_{wt}}{t_{1\text{-}n50}}+0.20\left(\frac{x_{wt}}{t_{1-n50}}\right)^2$$

对于α=120°

$$\beta=0.97-0.14\frac{x_{wt}}{t_{1-n50}}+0.32\left(\frac{x_{wt}}{t_{1-n50}}\right)^2$$

对于α=90°

$$\beta=0.96+0.031\frac{x_{wt}}{t_{1-n50}}+0.24\left(\frac{x_{wt}}{t_{1-n50}}\right)^2$$

α——角度，度，组成腹板加强十字接头的板之间的角度，如图 4.2.2（2）所示。

连接板的角度在这些给定角度之间的修正因子，基于以上数值的线性插值获得。计算热点应力应与本章第 3 节[4.2]焊趾连接处的热点 SN 曲线配合使用。

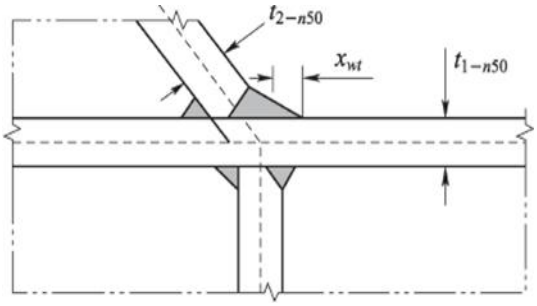


图 4.2.2(1) 腹板加强十字接头的几何参数

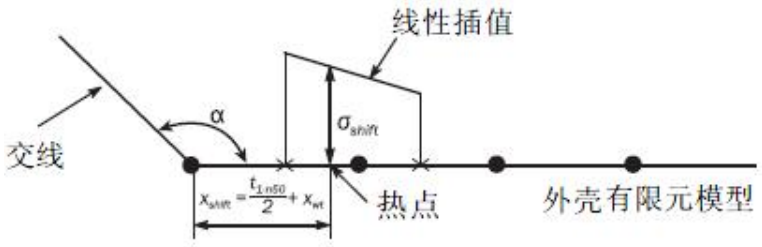


图 4.2.2(2) 腹板加强十字接头的热点应力计算

4.2.3 位于 A-A 线左右两侧的前两个单元的单元中心点表面主应力依次取平均值做为腹

板位置（A-A 线）处的表面主应力。载荷工况‘*i*1’和‘*i*2’的表面主应力沿着线 A-A 线性插值得到位于 x_{shift} 位置处应力读取点的热点主应力，如图 4.2.3。两个热点主应力范围在载荷工况‘*i*1’和‘*i*2’的应力读取点得到。

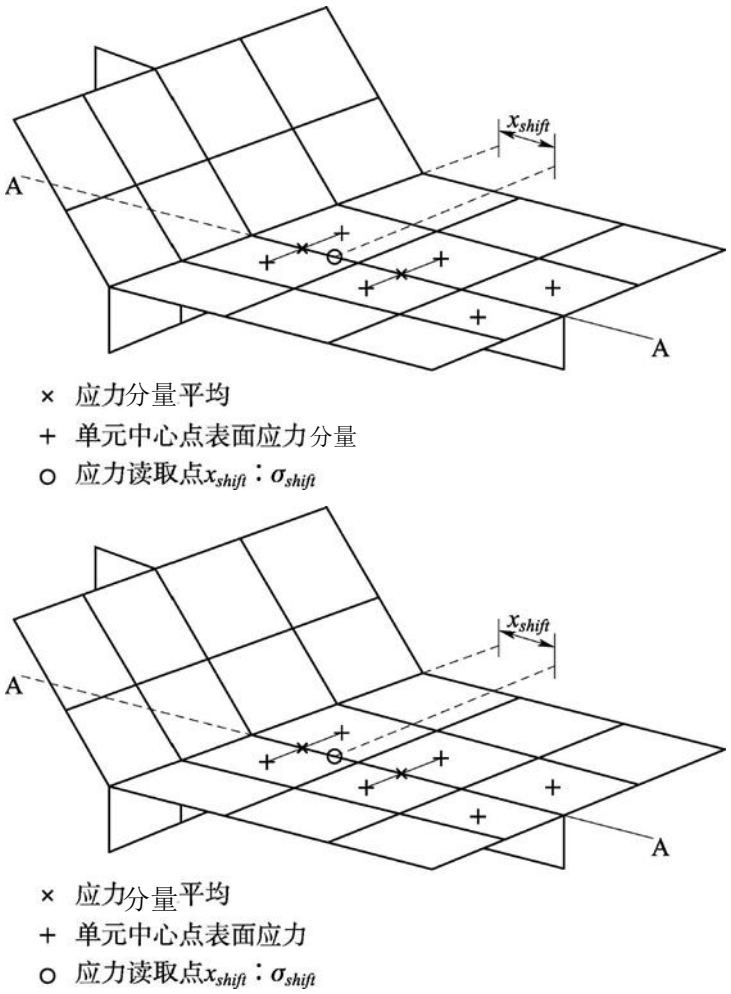


图 4.2.3 腹板加强十字接头的热点应力读取

4.3 腹板热点应力计算

4.3.1 位于腹板的热点（如图 4.3.1）应采用由水平和垂直的单元交线偏移 x_{shift} 距离的交点处的最大表面主应力定义的热点应力进行校核，如图 4.3.1。十字接头板厚中心线为交叉线，假定中线对准。热点应力，N/mm^2，由如下公式计算得到：

$$\sigma_{HS} = \sigma_{shift}$$

式中，σ_{shift}—— 最大表面主应力，N/mm^2，位于偏移 x_{shift} 的交点处；

交点偏移的应力读取点如下：

$$x_{shift} = \frac{t_{3-n50}}{2} + x_{wt}$$

$t_{3\text{-}n50}$—— 腹板的净厚度，mm，见图 4.3.1；

x_{wt} ——延伸角焊缝焊脚长度，mm，取为：

$$x_{wt} = \min(l_{leg1}, l_{leg2})$$

l_{leg1}，l_{leg2}——图 4.3.1 所示水平和垂直焊缝线的焊脚长度，mm。

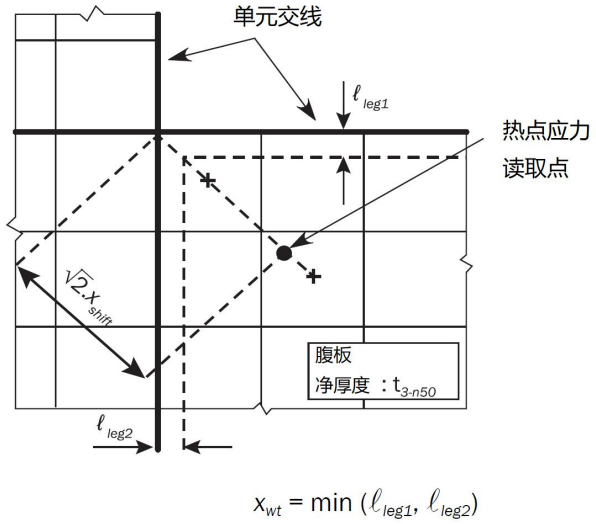


图 4.3.1 腹板处热点

5 热点应力方法的限制条件

5.1 热点应力方法的适用范围

5.1.1 当考虑如图 5.1.2 所示的 I 方向的应力流时，本章第 1 节[2.3.1]的热点应力方法不适用于简单的十字型接头和简单的 T 型接头。对于热点位置 c 处的垂直于焊缝的应力（I 方向），由于横向的板材在模型中仅以单一平面的壳单元建模，所以没有应力流入其中。但是，它会吸引热点位置 a 处面内的（II 方向）应力。

若横向板材后侧设有肘板（如图 5.1.2），垂直于横向板材方向的刚度起作用，应力会流入横向板材，规范提供的热点应力方法是适用的。

5.1.2 简单的十字型、T 型接头位置 c 处的热点应力，应根据[3.1]的应力读取程序得到的应力乘以几何应力集中系数 1.3 得到，如下所示：

$$\sigma_{HS} = 1.3 \cdot 1.12 \cdot \sigma$$

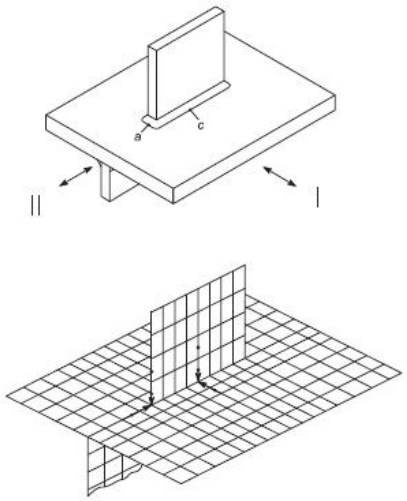


图 5.1.2 面内正交载荷作用下焊接接头的校核点示意图

第 6 节　结构细节设计标准

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

1　一般要求

1.1　目的

1.1.1 设计标准提供了结构设计初始阶段的抗疲劳细节设计，从以下几个方面考虑：

（1）疲劳设计原则的应用

（2）建造公差和其他实际施工的考虑

（3）营运经验和疲劳的表现情况

1.1.2 船体结构细节设计中设计标准的应用分为如下几步：

（1）标记船体结构中易发生疲劳破坏的关键部位

（2）对于每一关键结构细节识别出该位置的热点位置

（3）提供一系列替代改进设计的适当解决方案供选择

（4）对于几何形状、尺寸、焊接、建造公差程序提出要求

（5）改善疲劳寿命的建造后处理方法，如焊趾打磨

1.2　适用范围

1.2.1 本节所述结构细节应按照相应的设计标准设计，也可采用满足疲劳性能的替代细节设计。

如果本章第 2 节表 2.1.2（1）的结构细节符合本节的设计标准，可不进行精细网格有限元的疲劳评估。

2　骨材与横框架的连接

2.1　设计标准

2.1.1 对于如下构件上纵骨与横框架的切口处，若未设置腹板加强筋或腹板加强筋未与纵骨连接，应使用全补板、设计标准（如表 2.2.2 所示）或与之等效的设计：

（1）$1.1T_{sc}$ 以下的外壳（船底板、舭列板、舷侧外板）

（2）$1.1T_{sc}$ 以下的内壳（内底板、纵舱壁、纵壁/平台）

2.1.2 如使用有限元分析对比证明满足疲劳性能要求，也可采用与表格 2.2.2 中不同的设计。有限元分析比较应按照图 2.1.2 中建模原则进行。

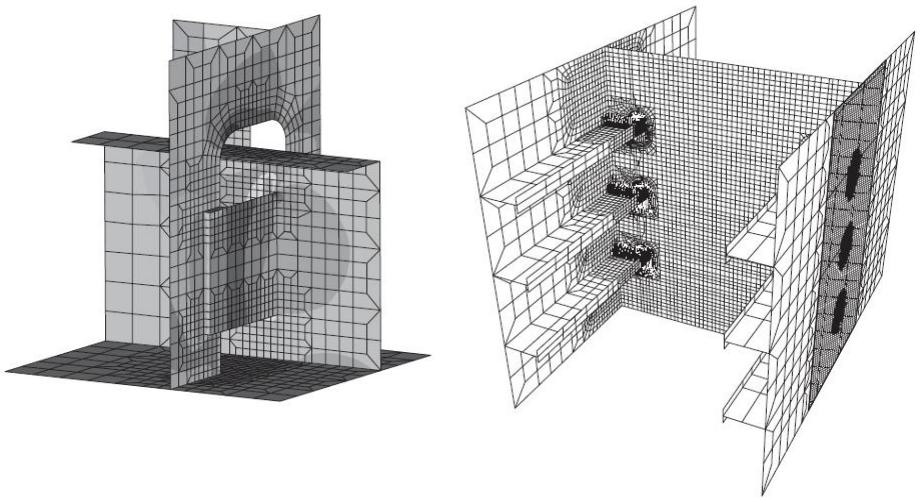


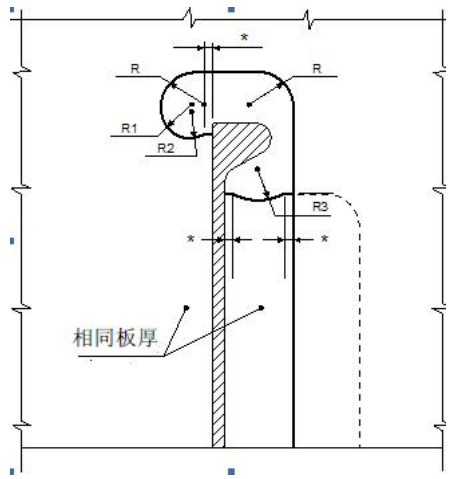
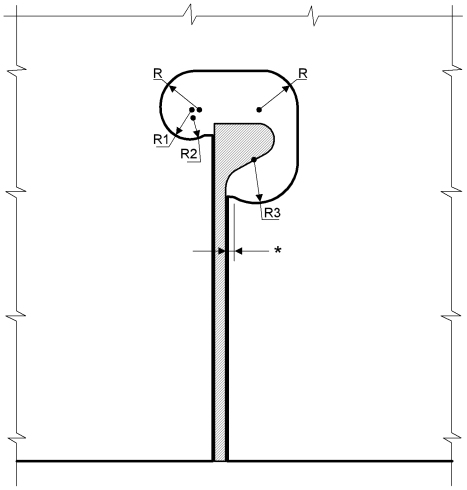
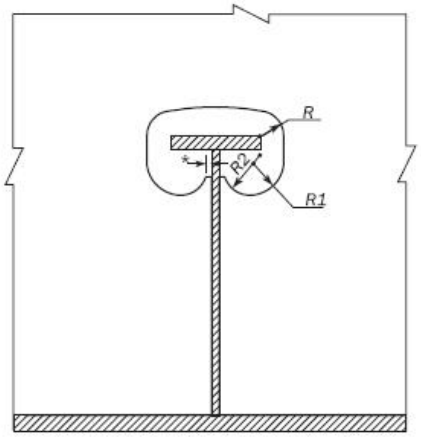
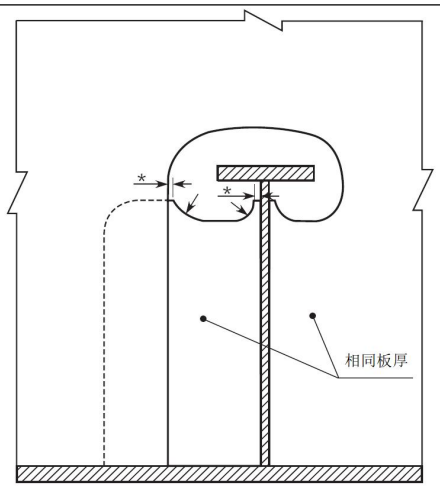
图 2.1.2 等效替代设计的有限元验证模型

2.2 骨材与横框架连接处的等效设计

2.2.1 如果骨材与横框架的连接未按照[2.1]设计，需证明替代设计与设计标准有等效的疲劳强度或具备满足要求的疲劳强度。替代设计应按照[2.2.2]至[2.2.5]的方法进行验证，结果文件应提交 CCS。

2.2.2 [2.2.3]和[2.2.4]提供的方法用来验证替代设计中开孔处具有等效的疲劳强度，如双层底或双舷侧位置处。对切口处的关键热点，替代设计的热点应力应和要求设计的热点应力进行比较。关键热点的选取取决于结构细节设计，并应得到 CCS 的认可。热点应力应根据本章第 5 节 [3.1]和 [3.2]获得。应注意自由边处的焊接热点属于“b”型热点。相关典型的热点疲劳校核见本章第 2 节[2]。

设计标准-骨材与横框架的连接　　表 2.2.2

<table>
<tr><td colspan="2">未设置腹板加强筋或腹板加强筋未焊接至纵骨翼板的纵骨与横向强框架开孔处</td></tr>
<tr><td colspan="2">设计标准</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>3</td><td>4</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">注:
标“*”的软趾表示焊脚长度应合适，以保证能够从焊缝到圆弧部分可以光顺过渡。可取横向强框架/领板/补板厚度的较大者，最大值 15mm；图 1 和 4 的形状表明可以接受重叠补板连接。</td></tr>
</table>

关键位置	高应力区域的开孔处以及焊接的终止处
结构细节设计标准	通过改进开孔的形状，以避免由剪切载荷和经过焊接接头传导的局部载荷造成的横向强框架位的高应力集中
建造公差	根据 IACS 第 47 号建议案，所有连接构件应保证对准，并准确控制开孔尺寸
焊接要求	横向强框架和纵骨腹板的相交处采用包围焊，且无咬边和刻痕。

2.2.3 精细网格有限元模型用于分析双舷侧或双层底处的情况。模型的横向范围应涵盖 3 个骨材，即 4 个骨材间距，纵向范围应向前后各延伸半个肋距。典型模型见图 2.1.2。对于通道开孔，模型中不应含切口。补板或强框架与纵骨腹板的连接、补板与横框架的连接、强框架补板和切口的自由边均用相应板材的净厚度尺寸的单元（$t_{net}\times t_{net}$）建模。净板厚尺寸的网格沿各个方向保持至少 5 个单元。该区域以外网格尺寸可按照本章第 5 节 [2]的要求平

稳增加。重叠补板的偏心需要在建模中考虑。横向强框架与补板应使用偏心单元连接（横向板单元）。偏心单元的偏移距离等于两板材中面的距离，厚度为横向强框架腹板净厚度的 2 倍。表示填角焊的偏心单元如图 2.2.3 所示。

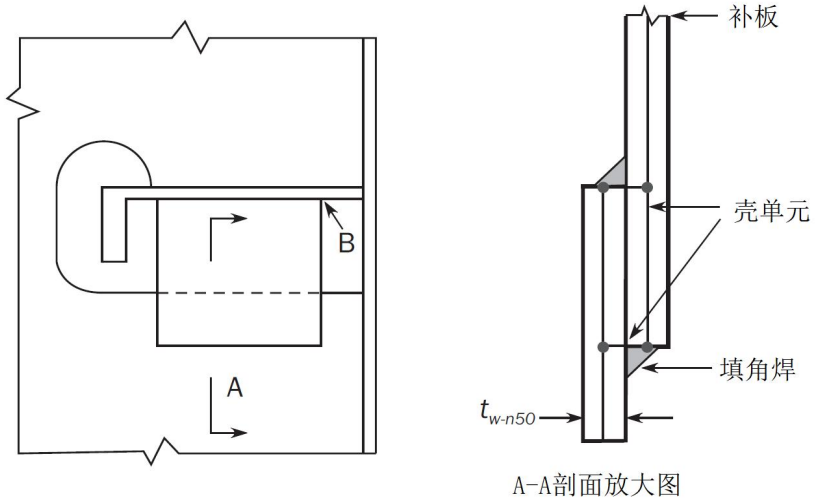


图 2.2.3 补板的偏心壳单元建模

2.2.4 标准设计和替代设计的有限元模型应施加 3 个载荷工况：

（1）单位外部压力，模型顶部和底部固定；

（2）在模型顶部施加指定的单位位移产生剪应力，模型下底部固定；

（3）在模型顶部施加指定的单位位移产生轴向载荷，模型底部固定。

双壳结构中，模型的前后两部分应对称，载荷和边界条件见图 2.2.4。

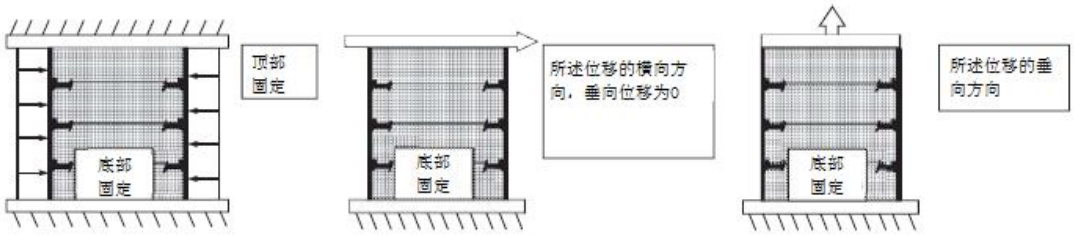


图 2.2.4 载荷施加与边界条件-替代设计的有限元验证

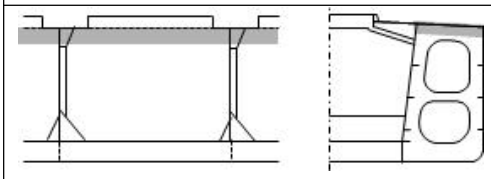
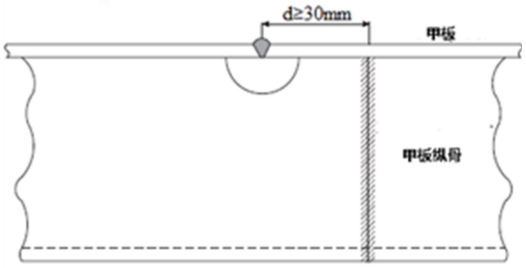
2.2.5 可以在骨材-框架连接的实际位置利用子模型法进行替代设计的精细网格分析，以证明其具有足够的疲劳强度。如满足本章第 1 节的疲劳验收衡准，可接受替代设计。采用本章第 1 节，第 3 节和第 5 节所述方法论校核疲劳验收衡准。替代设计的接受范围仅针对做过分析的特定部位。

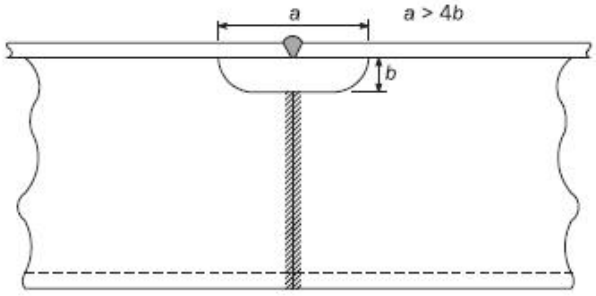
3 分段的扇形孔

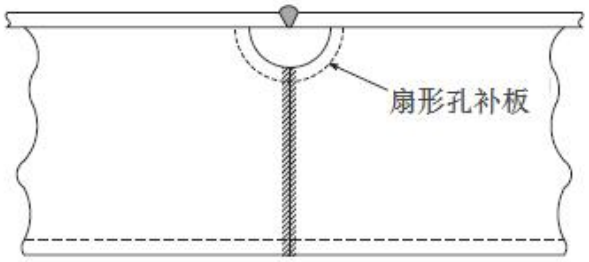
3.1 设计标准

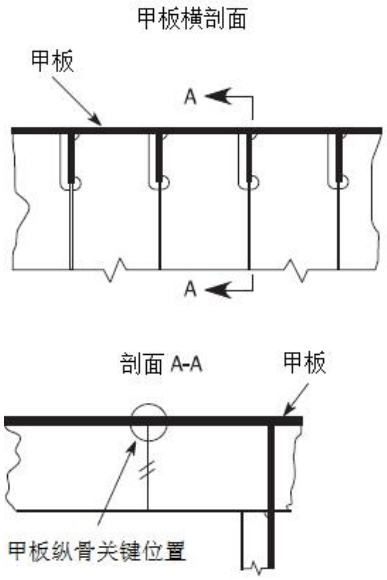
3.1.1 货舱区域分段接头处，位于强力甲板和距基线 0.9*D* 以上舷侧骨材上的扇形孔应根据表 3.1.1 中的设计标准进行设计。

设计标准-分段接头扇形孔　　表 3.1.1

<table>
<tr><th>关键区域</th><th>设计标准</th></tr>
<tr><td></td><td rowspan="2">(I) 骨材上的偏移对接:


(II) 骨材上的加长扇形孔:


(III)有领板的封闭扇形孔　:


注 1:
对于选项 II，如能证明基于船体梁载荷并计入焊缝处附加应力集中因子的条件下满足疲劳寿命要求，也可接受扇形孔的其他几何形状。</td></tr>
<tr><td>关键位置

</td></tr>
<tr><td>关键位置</td><td>货舱区域内的强力甲板和距基线 0.9D 以上舷侧分段接头处的甲板骨材焊接</td></tr>
<tr><td>设计标准</td><td>所有扇形孔需满足设计标准</td></tr>
<tr><td>建造公差</td><td>保证所有结构构件依据 IACS 第 47 号建议案进行对中</td></tr>
<tr><td>焊接要求</td><td>分段接头处纵骨的腹板和翼板均使用全焊透对接焊缝、无咬边和刻痕，特别对于选项 II 扇形孔的焊接终止处。</td></tr>
</table>

4　边舱折角

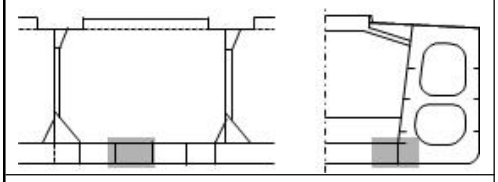
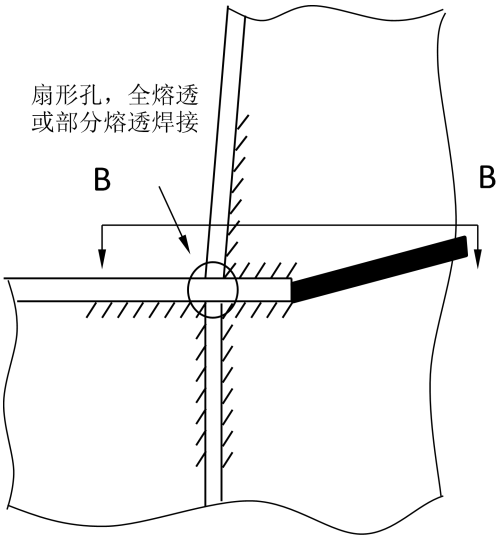
4.1　设计标准

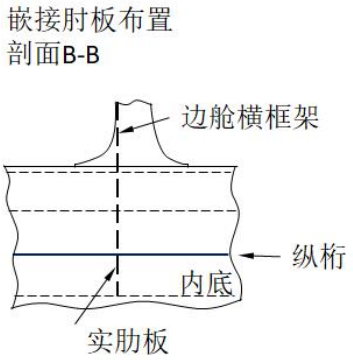
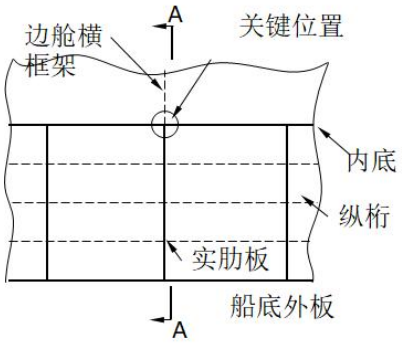
边舱斜板与内底的焊接型折角应满足表 4.1 中的设计标准。

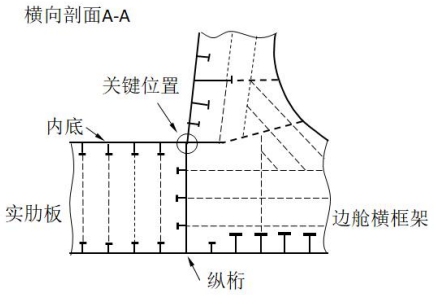
通常，应满足表 4.1 所述的关于焊接、焊缝处理和建造公差的最低要求。如证明具有合适的疲劳寿命，可接受一些支撑结构的位置变化和 / 或改变（如横向和纵向肘板）。根据热

点疲劳分析的结果，可增加额外的嵌入构件和/或进行焊缝修整。

设计标准—边舱折角连接细节，焊接型 表 4.1

<table>
<tr><td colspan="2">双层底肋板与边舱的连接
内底和边舱斜板折角采用的焊接连接</td></tr>
<tr><td>关键区域</td><td>设计标准</td></tr>
<tr><td></td><td rowspan="2">


</td></tr>
<tr><td>关键位置



</td></tr>
</table>

最低要求	作为最低要求，应满足设计标准。 货舱：无扇形孔或采用补板将其封闭，应用嵌接肘板。
关键位置	边舱斜板、内底板和实肋板的连接处。 实肋板与内底板和边舱的折角处旁纵桁的连接处。
细节设计标准	通过消除边舱折角处的扇形孔，延伸内底板来减少周期性的外部水动压力、货物惯性压力和船体梁载荷引起的合成应力水平。嵌接肘板净厚度至少取折角处 80%内底板的厚度，材料的屈服极限与其相同。
建造公差	边舱斜板的中线应与桁材的中线对齐，许用公差应取为 $t_{as\text{-}built}/3$ 和 5mm 的小者，$t_{as\text{-}built}$ 为旁桁材的建造厚度。

双层底肋板与边舱的连接 内底和边舱斜板折角采用的焊接连接	
关键区域	设计标准
焊接要求	货舱长度内，全熔透或部分熔透焊接应用于纵舱壁板与内底板的连接；部分熔透焊接应用于旁纵桁和内底的连接；全熔透应用于实肋板与内底板和旁纵桁的连接，边舱横向强框架与舱壁、内底、旁纵桁的连接。纵舱壁板和内底板的焊接应扩大并打磨光顺，应去除可见的咬边，范围为沿实肋板两侧至少 300mm 的区域。全熔透或部分熔透焊接的定义和要求见第 13 章第 3 节。

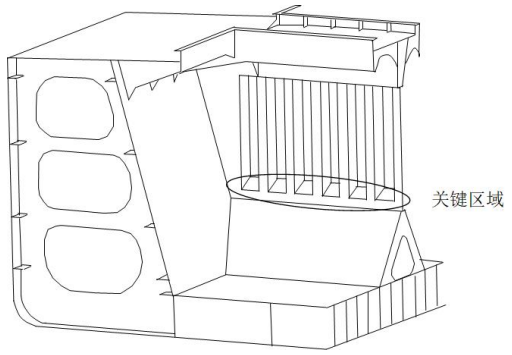
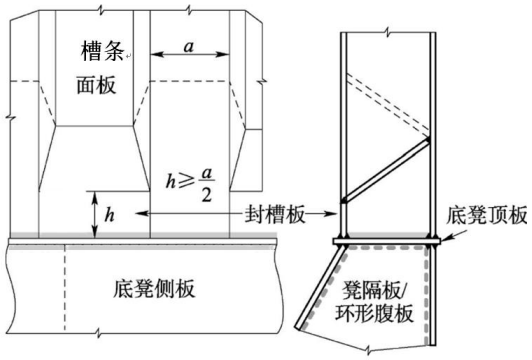
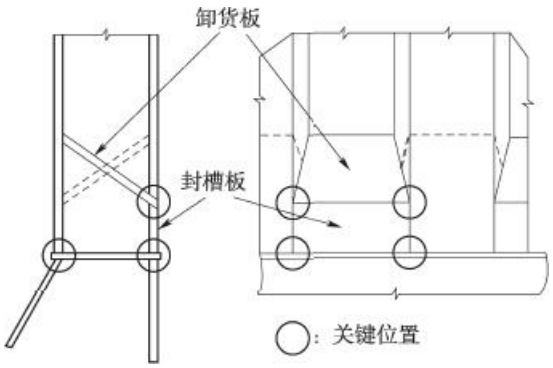
5 舱壁与底凳和顶凳的连接

5.1 设计标准

5.1.1 舱壁与底凳的焊接连接应符合表 5.1.1 所示设计标准。

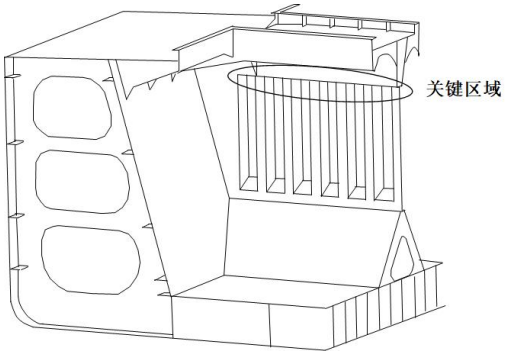
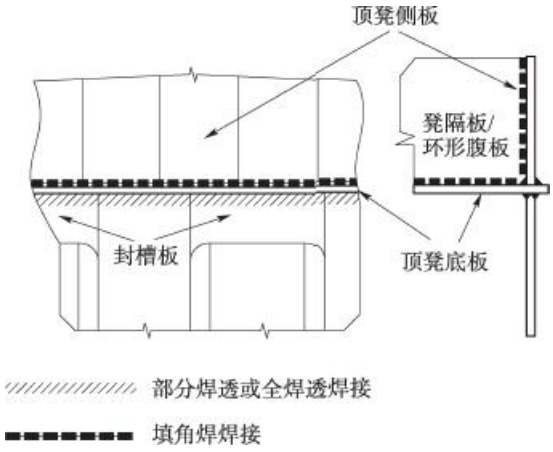
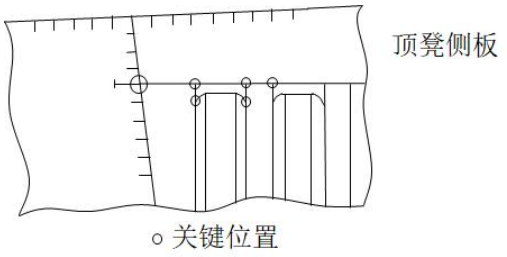
5.1.2 舱壁与顶凳的焊接连接应符合表 5.1.2 所示设计标准。

横舱壁与底凳连接设计标准　　表 5.1.1

<table>
<tr><td colspan="2">横舱壁与底凳的连接</td></tr>
<tr><td>关键区域</td><td>设计标准</td></tr>
<tr><td>
</td><td rowspan="3">
</td></tr>
<tr><td>关键位置</td></tr>
<tr><td>
</td></tr>
<tr><td>关键位置</td><td>底凳顶板与底凳、槽形横舱壁的连接。
卸货板与槽形横舱壁的连接。</td></tr>
</table>

横舱壁与底凳的连接	
关键区域	设计标准
细节设计标准	底凳顶板处的底凳隔板避免使用扇形孔。 槽形舱壁应设置封槽板。 封槽板应采用与槽形横舱壁相同的材料和建造厚度；封槽板的高度应大于槽条宽度的一半。 为降低两侧卸货板相交处的应力集中，可将一侧的卸货板的高度设置高于另外一侧（如图），也可在相交点处的卸货板下面设置肘板扶强材。
建造公差	依据 IACS 第 47 号建议案，保证底凳斜板与槽条面板的对中。
焊接要求	全熔透焊接应用于底凳顶板与底凳侧板、槽形横舱壁的连接。 部分熔透或全熔透焊接应用于封槽板的周围。但是底凳顶板与封槽板的焊接应采用全熔透焊接。 焊接的起始和终止位置应尽可能远离关键角落。

横舱壁与顶凳连接设计标准 **表 5.1.2**

横舱壁与顶凳斜凳的连接	
关键区域	设计标准
	
关键位置	
	
关键位置	槽形横舱壁与顶边舱斜板和顶凳的连接
细节设计标准	顶凳底板处的顶凳隔板应避免使用扇形孔。 重压载舱内的槽形横舱壁面板之间应设置封槽板。 重压载舱处，顶边舱内部设置与槽形舱壁面板对齐内的横向强框架或背部加强扶强材以确保载荷的有效分散。 封槽板的材料和板厚应不低于槽条面板的要求。
建造公差	依据 IACS 第 47 号建议案，应保证槽形横舱壁面板与顶凳侧板以及水密横舱壁和顶边舱内部横向强框架（或背部加强扶强材）的对中。

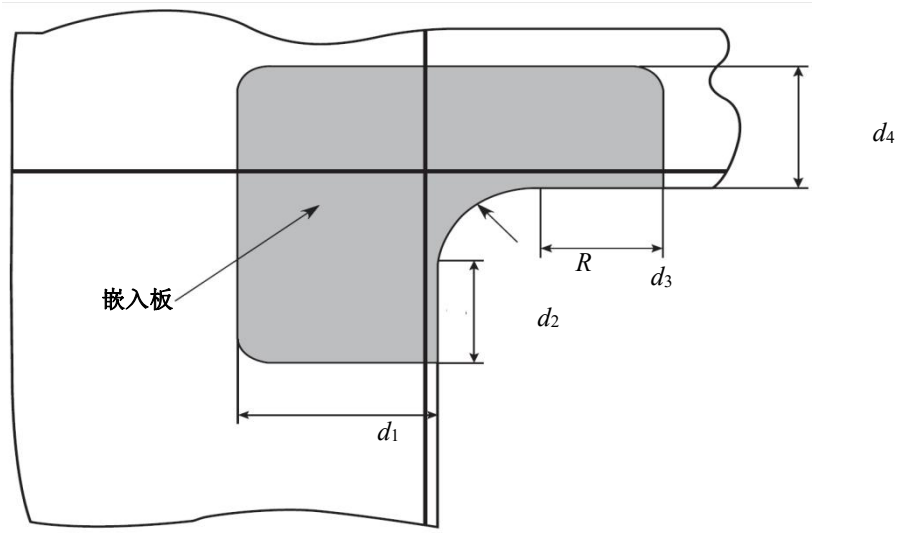
横舱壁与顶凳斜凳的连接	
关键区域	设计标准
焊接要求	● 部分熔透或全熔透焊接应用于顶凳底板和槽条。 ● 顶凳底板与顶凳侧板的连接应使用焊接系数最小为 0.44 的填角焊。 ● 顶凳底板与顶凳隔板/环形腹板的连接应使用焊接系数最小为 0.44 的填角焊。 焊接的起始和终止位置应尽可能远离所有货舱的关键角落

6 舱口角隅

6.1 设计标准

6.1.1 货舱区域强力甲板上的舱口角隅应按照表格 6.1.1 中的设计标准设计。

舱口角隅设计标准 **表 6.1.1**

舱口角隅		
设计标准		
		
	无嵌入板	有嵌入板
关键位置	舱口角隅曲线部分。	舱口角隅曲线部分。 嵌入板与甲板板的过渡。
细节设计标准	舱口角隅形状应满足第 3 章第 5 节的要求。	圆弧和嵌入板的尺寸和厚度应满足第 3 章 第 5 节的要求。 嵌入板与甲板板的过渡应进行厚度削斜，削斜过渡的长度不小于其厚度差值的 3 倍。
后处理	曲率范围内的切割边缘应打磨。	曲率范围内的切割边缘应打磨。

附录 1　基于谱分析的船体结构疲劳强度评估

1 一般规定

1.1 适用范围

1.1.1 本附录适用于矿砂船基于谱分析的疲劳强度评估。

1.2 分析流程

1.2.1 本附录基于 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论计算结构的疲劳损伤，并评估结构的疲劳强度。

1.2.2 疲劳谱分析的流程分为三部分：

（1）水动力分析：通过三维水动力分析计算船舶在规则波上的波浪载荷；

（2）结构分析：根据波浪载荷，通过结构分析得到应力传递函数；

（3）谱分析及疲劳损伤计算：针对各海况计算结构应力谱，并计算结构的疲劳损伤，对各海况下的疲劳损伤求和后得到给定装载工况的结构的疲劳损伤，对各装载工况的疲劳损伤求和后得到结构在设计寿命中的总疲劳损伤。

1.2.3 疲劳谱分析的流程见图 1.2.3。

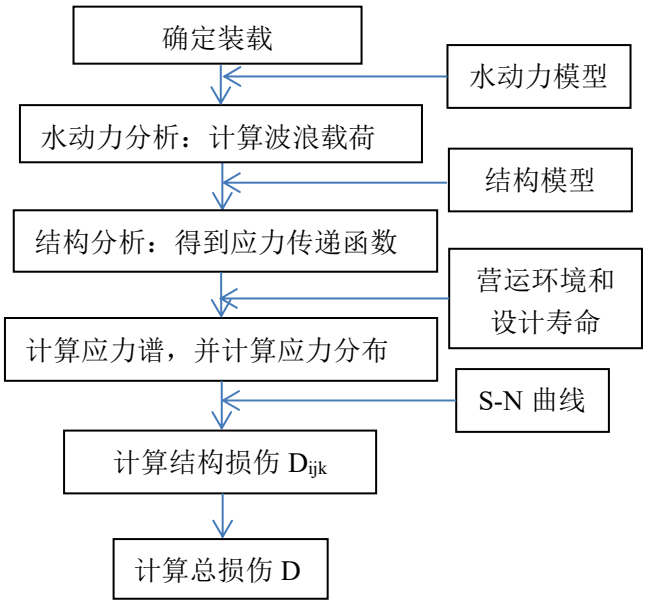


图 1.2.3 疲劳谱分析流程图

1.3 疲劳强度校核节点

1.3.1 疲劳评估应考虑的适用范围见[1.3.2]。如有必要，还应根据细化分析和疲劳热点评估的结果增加疲劳评估节点。

1.3.2 对于矿砂船，应考虑以下区域（示意图见图 1.3.2（1）和图 1.3.2（2））：

1）船中货舱纵舱壁与内底板连接处；

2）货舱内底板与底凳连接处；

3）最尾货舱舱口角隅；

4）最尾货舱后端舱口围板支撑肘板纵向趾端。

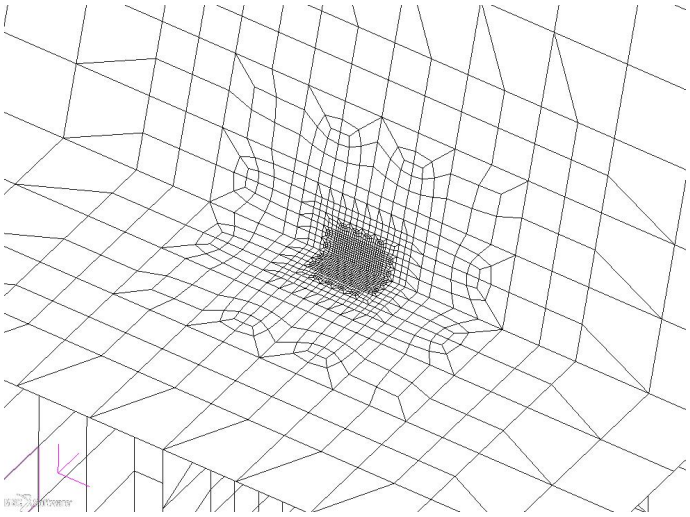


图 1.3.2（1）纵舱壁与内底板连接处（货舱长度中部）

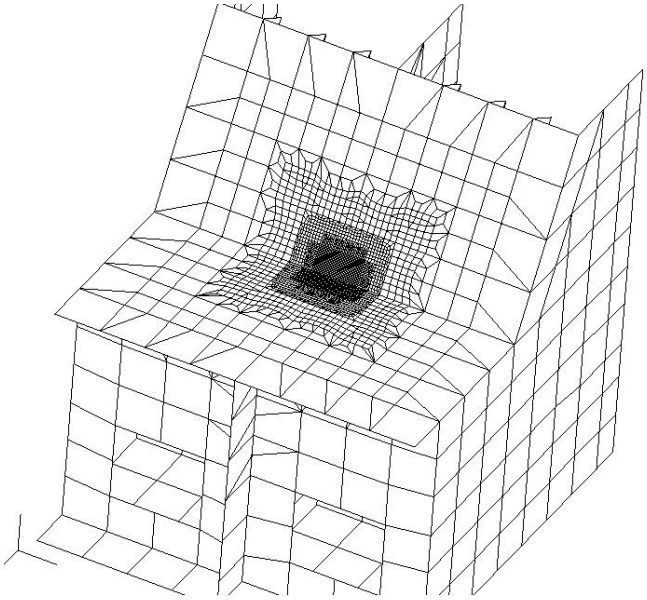


图 1.3.2（2）内底板与底凳连接处（货舱宽度中部）

1.4 定义

1.4.1 本附录的符号定义见第 1 章第 4 节，第 4 章定义。

1.4.2 坐标系统

（1）坐标系规定见第 1 章第 4 节

（2）本附录中浪向角指在（1）所描述的坐标系下波浪传播的方向与 X 轴正向的夹角。在此规定下，0 度为随浪，90 度为横浪（从右舷向左舷传播），180 度为迎浪。

2 工况及载荷

2.1 装载工况

2.1.1 结构疲劳损伤为长期累积过程，应考虑最常用装载工况。对矿砂船，需考虑的装载工况及时间分配系数见本章第 1 节[6]并考虑本章第 3 节[5.2.1]所定义的航行时间因子

f_0。

2.2 载荷工况

2.2.1 用于疲劳谱分析的载荷工况包括静态工况和动态工况两类。

2.2.2 静态工况用来计算选定装载工况下静载荷产生的结构应力，该应力用于疲劳评估时的平均应力修正。作用在有限元模型上的静载荷包括舷外水及舱内液体静压力，船体结构及货物的重力。

2.2.3 动态工况仅包含波浪引起的动载荷，载荷通过对给定装载的水动力分析得到，每个动载荷工况对应一个由浪向角和波浪频率确定的规则波。

2.3 水动力分析

2.3.1 应采用三维势流程序进行水动力分析，计算船舶在波浪上的响应。

2.3.2 水动力分析的质量模型应能反映相应装载工况的实船的质量分布；水动力网格则应反映实际的船体外壳形状及船舶的浮态（吃水、纵倾、横倾）。

2.3.3 为了准确地将重力及惯性力施加在有限元模型上，应检查有限元模型的质量特性，使其能反映实船的质量分布，水动力分析中的质量模型可基于上述全船有限元模型。当采用简化质量模型时，模型也应能准确模拟实船质量特性（质量、质心及质量分布情况）。

2.3.4 水动力计算中，应考虑足够的浪向角和频率范围。浪向角应包括 0-360 度范围，最大浪向间隔为 30 度；频率应考虑 0.2-1.8 弧度/秒的范围，最大频率间隔为 0.1 弧度/秒。

2.3.5 计算时取航速为 75%的最大服务航速。

2.3.6 当采用时域水动力分析时，应通过适当的方法将载荷的时间历程转换成传递函数。应选取达到稳定状态后的时间历程进行转换。

2.3.7 水动力分析得到的结果包括波浪动压力和运动（加速度）两部分。波浪动压力以压力的形式施加到外壳上，惯性力（包括由于横摇、纵摇运动引起的重力加速度在水平方向上的分量）通过加速度场和质量分布来施加到有限元模型上（对船体结构、设备），或者以压力的形式施加在舱室周界上（对油水、矿砂）。

2.4 舱内液体载荷

2.4.1 根据水动力分析结果计算液舱型心的合成加速度矢量$\left(a_x^2+a_y^2+a_z^2\right)^{1/2}$，并根据该矢量确定压力计算参考点。计算出在该矢量的方向上，计算点至参考点的距离h后，得到施加到液舱周界上的压力p，kN/m^2，（见图 2.4.1）：

$$p=\rho_L h\left(a_x^2+a_y^2+a_z^2\right)^{1/2}$$

式中：ρ_L——液体密度，t/m^3；

h——加速度合成矢量方向上压力计算点距离液舱压力计算参考点的距离，m；

$\left(a_x^2+a_y^2+a_z^2\right)^{1/2}$——合成加速度矢量，$m/s^2$；

a_x——所计算舱室形心的纵向加速度，m/s^2；

a_y——所计算舱室形心的横向加速度，m/s^2；

a_z——所计算舱室形心的垂向加速度，m/s^2。

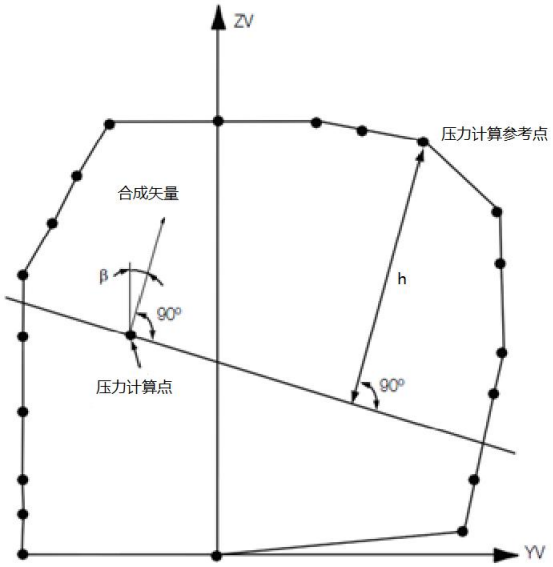


图 2.4.1 舱内压力计算

2.5 矿砂载荷

2.5.1 矿砂静压力

由矿砂产生的静压力 P_{bs}，kN/m^2，应取为：

$$P_{bs}=\rho_C g K_C\left(z_C-z\right)，\text{但不小于 0}$$

式中：ρ_C——矿砂密度，t/m^3

K_C——系数，取为：

$K_C=\cos^2\alpha+(1-\sin\psi)\sin^2\alpha$，对内底、横舱壁和纵舱壁、底凳、垂直顶凳；

$K_C=0$，对上甲板、倾斜顶凳和顶凳水平板；

α——所考虑的板与水平面之间的夹角，（°）；

ψ——矿砂休止角，（°），取 35°；

z——计算点高度，m；

z_C——基线到载荷计算点对应的矿砂上表面的高度，m，取为：

$z_C=h_{DB}+h_C$

h_{DB}——双层底高度，m；

h_C——矿砂上表面有效高度，m。

2.5.2 矿砂动压力

动载荷工况中，由矿砂产生的动压力 P_{bd}，kN/m^2，应取为：

对于 $z\le z_C$，

$$P_{bd}=\rho_C\left[0.25a_X\left(x_G-x\right)+0.25a_Y\left(y_G-y\right)+K_C a_Z\left(z_C-z\right)\right]$$

对于 $z>z_C$，

$$P_{bd}=0$$

且 $P_{bs}+P_{bd}\ge 0$

式中：x，y，z——计算点的坐标；

x_G，y_G——货舱的形心的 x 向和 Y 向坐标；

a_X，a_Y，a_Z——货物重心处的加速度；对于装满（即 V_{Full}）的货舱，货物重心取舱室形心，对于未装满的货舱，垂向高度 z_G 按下式计算：

$z_G = h_{DB} + h_{C-cl}/2$；

h_{C-cl}——在船宽方向的中间位置的矿砂上表面有效高度，m；

P_{bs} ___矿砂静压力，见 2.5.1。

2.5.3 矿砂剪切载荷

（1）对于装载矿砂的货舱，当载荷计算点的 $z \le z_C$ 时，除 2.5.1 和 2.5.2 定义的矿砂压力外，以下的剪切载荷应被考虑：

对于静载荷场景：2.5.3（2）的定义由于重力作用于纵舱壁斜板和底凳斜板的静剪切载荷。

对于动载荷场景：以下的动剪切载荷压力：

P_{bs-d} 用于纵舱壁斜板和底凳斜板，定义见 2.5.3（3）；

P_{bs-dx} 用于内底板纵向，定义见 2.5.3（4）；

P_{bs-dy} 用于内底板横向，定义见 2.5.3（4）；

P_{bs-x}，P_{bs-y} 用于纵舱壁斜板和底斜凳板上 X、Y 方向加速度产生的剪切载荷，定义见 2.5.3（5）。

（2）倾斜纵舱壁和底凳斜板上的静剪切载荷

由矿砂重力作用于纵舱壁倾斜板和底凳斜板产生的静剪切载荷 P_{bs-s}，沿板向下为正，应取为：

$$P_{bs-s} = \rho_C g \frac{(1-K_C)(z_C - z)}{\tan\alpha}，\ kN/m^2$$

（3）纵舱壁斜板和底凳斜板上的动剪切载荷

由垂向加速度作用于纵舱壁斜板和底凳斜板产生的动剪切载荷 P_{bs-d}，沿板向下为正，应取为：

$$P_{bs-d} = \rho_C a_Z \frac{(1-K_C)(z_C - z)}{\tan\alpha}，\ kN/m^2$$

（4）沿内底板的动剪切载荷

由纵向加速度作用于内底板产生的纵向方向（向艏为正）的动剪切载荷 P_{bs-dx}，应取为：

$$P_{bs-dx} = -0.75\rho_C a_x (z_C - z)\ ，\ kN/m^2$$

由横向加速度作用于内底板产生的横向方向（向左舷为正）的动剪切载荷 P_{bs-dy}，应取为：

$$P_{bs-dy} = -0.75\rho_C a_y (z_C - z)\ ，\ kN/m^2$$

（5）对于整船有限元强度评估，考虑载荷平衡的要求，对纵舱壁斜板、底凳斜板上应考虑 X、Y 方向加速产生的摩擦力。任意斜板上的剪切载荷按以下要求计算：

1）板的水平方向：

$$P_{bs-x} = -0.75\rho_C a_x (z_C - z)\cos\alpha \cdot \cos\alpha_x - 0.75\rho_C a_y (z_C - z)\cos\alpha \cdot \cos\alpha_y，\ kN/m^2$$

式中：α_x——斜板水平方向与 X 方向的夹角，

α_y——斜板水平方向与 Y 方向的夹角。

2）板的垂直内底方向：

$$P_{bs-y} = -0.75\rho_C a_x (z_C - z)\sin\alpha_x - 0.75\rho_C a_y (z_C - z)\sin\alpha_y，\ kN/m^2$$

式中：α_x——斜板水平方向与 X 方向的夹角，

α_y——斜板水平方向与 Y 方向的夹角。

2.6 边界条件

2.6.1 在所有载荷的作用下，整船有限元模型应基本处于动态平衡状态。应检查模型在 3 个方向上的不平衡力。对于迎浪工况，不平衡力不应大于排水量的 1%，对于斜浪和横浪工况，不平衡力不应大于排水量的 2%。

2.6.2 边界条件约束模型的刚体位移即可，详见第 8 章第 1 节[2.5.1]的规定。

3 结构分析及应力传递函数

3.1 计算目的

3.1.1 结构分析的目的为根据第 2 节的载荷计算热点应力，并插值得到应力传递函数。

3.1.2 结构分析采用整船粗网格模型结合局部细化模型的三维有限元方法计算细化区的热点应力。

3.2 整船有限元模型

3.2.1 模型应包括所有主船体结构、上层建筑及甲板室结构。

3.2.2 模型一般采用纵骨间距大小的网格，用板单元模拟船体板及主要构件腹板等结构，用梁单元模拟骨材及主要构件的面板。

3.2.3 有限元模型采用船体结构的净尺寸（扣除 $0.5t_c$）。为了考虑腐蚀的影响，算得的应力应按本章第 1 节[5.2.1]进行处理。

3.2.4 为了正确施加惯性力，应对有限元模型的质量特性进行检查，使其应能反映实船的船体结构及设备的实际质量分布。可以用质量单元模拟设备的质量，但应与船体结构有效连接，以合理传递相应载荷，且不应改变船体结构的刚度。

3.3 细化模型

3.3.1 对于需要进行疲劳评估的区域，应在应力集中处采用细化模型。细化模型的具体要求见本章第 5 节。

3.3.2 细化分析可采用将细化模型嵌入整船有限元模型中进行；也可采用独立的局部细化模型，其位移边界条件从整船有限元模型得到。

3.3.3 自由边结构（如舱口角隅）板边缘的应力，按本章第 5 节[3.2.1]的方法读取。

3.4 应力传递函数

3.4.1 结构分析得到各单元的应力分量（σ_x，σ_y，τ_{xy}）的传递函数，利用上述应力进行插值，得到热点处应力分量的传递函数。对于焊接接头和十字焊接接头，热点应力插值方法本章第 5 节。

3.4.2 根据热点处的应力分量计算热点处的主应力。对于静载荷工况，主应力计算公式见本章第 3 节[3.2.4]。对于动态工况，主应力半幅值通过在整个波浪周期内搜索确定，该值即应力传递函数：

$$H_\sigma = \max\left(\frac{\sigma_x\left(\omega t+\theta_x\right)+\sigma_y\left(\omega t+\theta_y\right)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x\left(\omega t+\theta_x\right)-\sigma_y\left(\omega t+\theta_y\right)}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2\left(\omega t+\theta_{xy}\right)} \right)$$

式中：

ω——波浪的频率，rad/s；

t——时刻，计算时在整个波浪周期内搜索，即 $\omega t = 0 \sim 2\pi$；

$\theta_x,\theta_y,\theta_z--\sigma_x,\sigma_y,\pi_{xy}$ 各应力的相位，rad 。

由于应力分量结果与装载、浪向角和频率有关，因此应力传递函数也是这三个变量的函数。

3.4.3 对于自由边区域，读取梁单元（见 3.3）的轴向应力作为应力传递函数。

4 疲劳强度评估

4.1 应力谱及应力范围分布

4.1.1 根据选定的环境条件、设计寿命和第 1 章第 1 节[3.2]的规定，确定疲劳分析的波浪散布图，及各海况持续的时间。

4.1.2 针对需要进行疲劳谱分析的热点，采用其应力传递函数（见[3.4.2]）对波浪散布图中的每个海况进行计算，即可得到应力谱 S_σ 如下：

$$S_\sigma\left(\omega_e\middle|H_S,T_Z,\theta,L_o\right)=\left|H_\sigma\left(\omega\middle|\theta,L_o\right)\right|^2\bullet S_\eta\left(\omega\middle|H_S,T_Z\right)\left|1-\frac{2\omega V\cos\theta}{g}\right|^{-1}$$

式中：

H_σ ——应力传递函数，见[3.4.2]；

S_η ——波浪谱；

ω_e ——遭遇频率，按下式计算：

$\omega_e=\left|\omega-\left(\frac{\omega^2V}{g}\right)cos\theta\right|$；

ω ——波浪频率；

V ——计算航速，见[2.3.5]；

H_S ——海况的有义波高；

T_Z ——海况的平均周期；

θ ——浪向角；

L_o ——装载工况，考虑表 2.1.1 所定义的各装载工况。

4.1.3 对应力谱进行分析时，考虑短峰波效应，能量扩散函数取余弦的平方，其各阶矩，m_n，按下式计算：

$$m_n=\int_0^\infty\sum_{-\pi/2}^{\pi/2}f_s\left(\alpha\right)\bullet\omega_e^nS_\sigma\left(\omega_e|H_S,T_Z,\theta+\alpha,L_o\right)d\omega_e$$

式中：

θ ——计算的主浪向；

α ——与主浪向的夹角；

$f_s\left(\alpha\right)$ ——能量扩散函数，应有 $\sum_{-\pi/2}^{\pi/2}f_s\left(\alpha\right)=1$；当浪向为等间距时，有 $f_s\left(\alpha\right)=kcos^2\left(\alpha\right)$；

S_σ ——应力谱；

ω_e ——遭遇频率；

H_S ——海况的有义波高；

T_Z ——海况的平均周期；

L_o ——装载工况。

4.1.4 应力谱的根方差σ，和平均周期T_a，根据如下公式得到:

$$\sigma = 2\sqrt{m_0}$$

$$T_a = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

式中：

m_0 ——应力谱的零阶矩；

m_2 ——应力谱的二阶矩。

应力范围S的分布服从 Rayleigh 分布，其概率密度函数g为：

$$g(S) = \frac{S}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right)$$

式中：

S——应力范围；

σ——应力谱的根方差。

4.1.5 根据各应力分布的时间占比（考虑装载工况、海况、浪向角），结合船的设计寿命，计算该应力分布的持续时间，T。并根据其平均周期计算应力范围的循环次数。对于第i个装载，第j个海况，第k个浪向角，其应力循环次数按下式计算：

$$N_{Tijk} = \frac{T_{ijk}}{T_{aijk}}$$

式中：

T_{ijk} ——应力分布的持续时间，s；

$T_{ijk} = 31.557x10^6 Lp_i p_j p_k$；

L ——设计寿命（年）；

p_i ——第 i 个装载在整个设计寿命中的占比，见表 2.1.1；

p_j ——第 j 个海况在整个散布图中的占比；

p_k ——第 k 个浪向角在所有浪向中的占比，见[2.3.4]；

T_{aijk} ——所计算的装载、海况和浪向组合下的应力的平均周期，s。

4.2 应力修正系数

4.2.1 按如下方法计算平均应力修正系数：

（1）对于焊接节点：

$$f_{mean} = \begin{cases} \min(1.0, 0.85 + 0.3\sigma_{mean}/S), & \sigma_{mean} \geq 0 \\ \max(0.7, 0.85 + 0.3\sigma_{mean}/S), & \sigma_{mean} < 0 \end{cases}$$

（2）对于母材自由边：

$$f_{mean}=\begin{cases}\min\left(1.0,0.8+0.4\sigma_{mean}/S\right), & \sigma_{mean}\geq 0\\ \max(0.6,0.8+0.4\sigma_{mean}/S), & \sigma_{mean}<0\end{cases}$$

式中：

σ_{mean} ——所计算装载的平均应力；

S ——所修正的应力范围，见本节[1.4]。

4.2.2 按本章第 3 节[3.3]方法对应力范围进行板厚修正。

4.3 S-N 曲线

4.3.1 根据本章第 3 节的规定确定疲劳损伤时采用的 S-N 曲线。

4.4 疲劳损伤计算

4.4.1 计算疲劳损伤时，按下列要求和步骤进行（见图 4.4.1）：

（1）对于各应力范围分布 g(S)，每一应力范围增量造成的结构损伤 dD 由下式计算：

$$dD=\frac{dn(S)}{N(S)}=\frac{N_T g(S)}{N(S)}dS=\frac{T/T_a}{N(S)}g(S)dS$$

式中：

N_T ——该应力分布中包含的应力循环的次数；

T ——该应力分布的持续时间；

T_a ——平均周期；

$N(S)$ ——该应力范围下结构的疲劳失效循环次数，根据选取的 S-N 曲线确定；

$g(S)$ ——应力范围的概率密度函数。

（2）对于给定的装载、海况及浪向角（对应一个应力分布）下的损伤D_{ijk}，按下式计算：

$$D_{ijk}=\frac{T}{T_a}\int_0^{\infty}\frac{g(S)}{N(S)}dS$$

采用数值积分方法计算损伤时，应力范围分量步长一般不应大于 7Mpa，取其中间值代入损伤计算公式。

（3）对所有浪向角算得的损伤进行求和得到某一海况的损伤。

（4）对所有海况算得的损伤进行求和得到某一装载工况下的损伤。

（5）对所有装载工况算得的损伤进行求和得到总的损伤：

$$D=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}D_{ijk}$$

式中：

D_{ijk} —给定装载工况、海况及浪向角下的结构损伤；

I ——装载工况的数量；

J ——海况的数量；

K ——浪向角的数量。

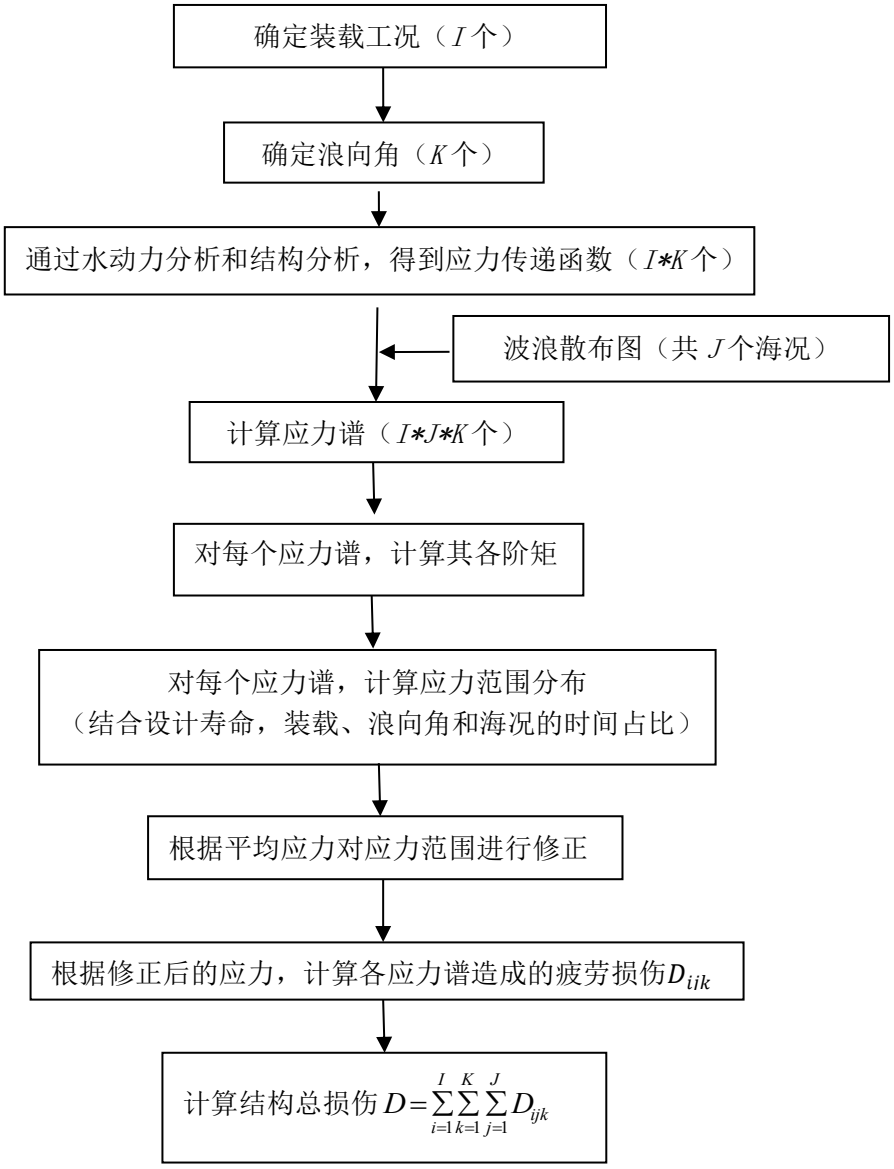


图 4.4.1 疲劳损伤计算流程

4.5 衡准

4.5.1 对于给定的设计要求（海况，疲劳寿命），结构节点的总损伤应不大于 1.0

第 11 章　上层建筑、甲板室和舾装

第 1 节　上层建筑、甲板室

符号

本节未定义的符号，参考第 1 章第 4 节。

P——作用于所考虑上层建筑侧壁或甲板的压力，kN/m^2

$P=P_D$，对于外甲板；

$P=P_{dl}$，对于非露天甲板；

$P=P_{sl}$，对于上层建筑。

P_D——露天甲板的侧向压力，kN/m^2，定义见第 4 章第 5 节。

P_{dl}——非露天甲板的侧向压力，kN/m^2，定义见第 4 章第 6 节。

P_{sl}——上层建筑两侧的侧向压力，kN/m^2，定义见第 4 章第 5 节。

P_{FB}——舷侧外板的侧向压力，kN/m^2，受到第 4 章第 5 节要求的船首冲击影响。

P_A——上层建筑的端部舱壁和甲板室围壁的外部压力，kN/m^2，根据第 4 章第 5 节。

l_{bdg}——有效弯曲跨距，m，定义见第 3 章第 6 节。

l_{shr}——有效剪切跨距，m，定义见侧向压力第 3 章第 6 节。

c——系数，取为

c＝0.75，对于一端或两端简支的梁、桁材和横向构件；

c＝0.55，对于其他情况。

m_a——系数，

$$m_a = 0.204\frac{s}{1000l_{bdg}}\left[4-(\frac{s}{1000l_{bdg}})^2\right] \quad 且\frac{s}{1000\ l_{bdg}} \le 1$$

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本节要求适用于钢质上层建筑和甲板室。除本节对上层建筑的露天甲板以及当侧板是舷侧外板的一部分时的上层建筑侧板或甲板室的两侧的要求外，本规范第 6 章的要求适用。

1.1.2 对本节适用范围，所考虑的上层建筑指位于船中 0.4L 区域之后或之前或其长度小于 0.15L。

1.1.3 对本节适用范围，位于船中 0.4L 范围内的甲板室长度不应超过 0.2L。

1.2 总尺寸

1.2.1 参照第 3 章第 2 节，涉及[3]的所有尺寸和尺度为总值。

2 结构布置

2.1 结构连续性

2.1.1 甲板室的舱壁和侧壁

甲板室的前后端壁和侧壁应得到甲板下结构的有效支撑，如舱壁、桁材和支柱。

侧壁、主要纵向和横向舱壁，应在各层甲板室对齐，当不能对齐时，应该设有其它有效支撑。

布置应使建造的不连续性的影响降至最小。侧壁上的所有开孔应用框架加固，并设有圆角。在门和类似的开口的上下应设置连续的围板或桁材。

2.1.2 甲板室角隅

在甲板室与强力甲板连接位置的角隅，布置上要注意将载荷传递至甲板下的支撑结构。

2.2 端部连接

2.2.1 甲板扶强材

根据第 3 章第 5 节[3.2]要求，横梁应通过肘板连接至两侧强框架上。

穿过在纵向围壁和桁材的横梁可不设肘板，直接与纵向围壁的扶强材和桁材的腹板焊接。

2.2.2 纵向和横向甲板桁材

根据第 3 章第 5 节[4.3]要求，面板应用防倾肘板加强。

2.2.3 上层建筑肋骨的端部连接

垂向肋骨应焊接到其下边的主要强框架处，或有足够支撑结构的甲板处。

2.3 舱壁的局部加强

2.3.1 大开口处、救生设备的支撑区域或其他设备、装置等的高载荷的区域应进行局部加强。

3 尺寸

3.1 上层建筑侧壁和甲板

3.1.1 露天侧壁板和露天甲板板

露天侧壁板和露天甲板板，包括其支撑结构应符合[3.2.1]至[3.2.5]要求和第 6 章第 8 节[3.3]首部冲击要求，如适用。

3.1.2 非露天甲板的甲板板

上层建筑非露天甲板的甲板板和支撑结构应符合[3.2.2]至[3.2.5]要求。

3.2 甲板室

3.2.1 板

总板厚 $t_{gr\text{-}exp}$，mm，应不小于下式求得的值：

$$t_{gr-\exp} = 7.5\sqrt{\frac{ks}{s_{std}}}\text{，对于第一层}$$

$$t_{gr-\exp} = 7.0\sqrt{\frac{ks}{s_{std}}}\text{，对于第二层}$$

$$t_{gr\text{-}\exp} = 6.5\sqrt{\frac{ks}{s_{std}}}\text{，对第三层及以上}$$

式中，s_{std}：扶强材或横梁的标准参考间距，mm，取为：

$$s_{std} = 470 + 1.67L_1$$

如甲板由敷层覆盖，则甲板板的总厚度可减小 1.5mm，但应不小于 5mm。

如使用木材以外的敷层，应注意敷层不影响钢板，敷层应有效地安装在甲板上。

3.2.2 非露天甲板的甲板板

非露天甲板的总板厚 $t_{gr\text{-}unexp}$，mm，应不小于下式求得的较大值：

$t_{gr-un\exp} = 0.9t_{gr-\exp}$,在所考虑层，且

$$t_{gr-\exp} = (5.8\frac{s}{1000}+1)\sqrt{k}$$ 但不小于 5.5mm

3.2.3 横梁和扶强材

横梁和扶强材的总剖面模数 Z_{gr}，cm^3，和总剪切面积 $A_{gr\text{-}sh}$，cm^2，应不小于下式求得的值：

$$Z_{gr} = ckP\frac{s}{1000}{l_{bdg}}^2$$

$$A_{gr-sh} = 0.05(1-0.817m_a)kP\frac{s}{1000}l_{shr}$$

3.2.4 纵桁和强横梁

纵桁和强横梁的总剖面模数 Z_{gr}，cm^3，和总剪切面积 $A_{gr\text{-}sh}$，cm^2，应不小于下式求得的值：

$$Z_{gr} = ckPS{l_{bdg}}^2$$

$$A_{gr-sh} = 0.05kPSl_{shr}$$

纵桁高度应不小于 $l/25$。为保证连续甲板横梁而开设扇形口的纵桁，其腹板高度至少为甲板横梁高度的 1.5 倍。

3.2.5 纵桁和强横梁的替代板架分析

若甲板纵桁和强横梁的布置形成板架结构，可对基于总尺寸的结构模型进行额外的板架分析。应力结果应不超过以下的许用弯曲、剪切和等效应力，N/mm^2：

$$\sigma_b = 150/k$$

$$\tau = 100/k$$

$$\sigma_{eqv} = 180/k$$

3.3 甲板室围壁和上层建筑端部舱壁

3.3.1 适用范围

[3.3]要求适用于对开口和起居舱室只起保护作用的上层建筑端部舱壁和甲板室围壁。对于不保护干舷甲板开口、上层建筑甲板或最低层甲板室甲板开口的甲板室端壁的尺寸应满足[3.3.2]和[3.3.3]的要求。对于不包括起居或不保护船舶营运的基本设备以及不保护机舱棚的甲板室端壁尺寸也应满足[3.3.2]和[3.3.3]的要求。

3.3.2 板厚

板总厚度 t_{gr}，mm，应不小于下式求得的大值：

$$t_{gr} = 0.9\frac{s}{1000}\sqrt{kP_A}+1.5$$

$$t_{gr} = (5.0+\frac{L_2}{100})\sqrt{k}$$ ，对最底层

$$t_{gr} = (4.0+\frac{L_2}{100})\sqrt{k}$$，对顶层，但不应小于 5.0mm

3.3.3 扶强材

扶强材的总剖面模数 Z_{gr}，cm^3，应不小于下式求得的值：

$$Z_{gr}=0.35kP_A\frac{s}{1000}l^2$$

本要求假设最低层扶强材的腹板有效地焊接在甲板上。其他形式的端部连接的尺寸需要特殊考虑。考虑到间距 s 和跨距 l，甲板室侧壁扶强材的剖面模数不必大于正对其下甲板上的肋骨的剖面模数。

3.4 挡浪板

3.4.1 计算载荷参照第 4 章第 5 节 4.4 按上层建筑前端壁的要求确定。

3.4.2 挡浪板的板厚和扶强材尺寸按本节 3.3 确定。

3.4.3 支持挡浪板的主要构件（水平桁材和垂直桁材）尺寸应用直接计算法确定，许用应力如下：

$$[\sigma_e]=\sqrt{\sigma^2+3\tau^2}=235/K \qquad \text{N/mm}^2$$

式中：K——材料系数。

第 2 节　舷墙和护栏

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 在露天的干舷甲板和上层建筑甲板的边界，在甲板室第一层的边界以及上层建筑的端部要提供舷墙或护栏。

1.2 最小高度

1.2.1 舷墙或护栏的最小高度为敷层以上 1.0m，按照[2.2]或[3.2]要求建造。如其高度影响船舶的正常营运，可接受较小的高度，但所提供的适当防护措施应经主管机关的认可。

2 舷墙

2.1 一般要求

2.1.1 平板舷墙的上缘应布置合适的栏杆作为加强，采用间距不大于 2.0m 的支撑肘板或平板肘板进行支撑。

支撑肘板或平板肘板的自由边界应加强。

2.1.2 在船中 0.6L 范围内，舷墙的布置应使其不受船体梁应力的影响。

2.1.3 舷墙应在锚链筒处应适当加强并增加厚度。过道处的舷墙切口或其他开口应远离上层建筑的间断处。

2.1.4 在用于货物装卸装置作业的支索或其他索具的眼板处，以及锚泊或拖带所用的锚链孔或导缆孔处，舷墙板和支撑肘板应予以充分加强。

2.1.5 舷墙上开口的布置应使对船员的保护至少等效于[3.2.2]水平横档提供的保护。为此，可由间隔约 230mm 的竖档或竖栏取代横档或横栏。

2.1.6 如锚泊装置使舷墙受到较大力作用，应充分加强支撑肘板。

2.2 舷墙构造

2.2.1 板材

在露天干舷甲板和上层建筑甲板边界处的舷墙板的总厚度，应不小于表 2.2.1 给出的值。

舷墙板的厚度 **表** 2.2.1

舷墙高	总厚度
1.8m 及以上	按照第 1 节[3.2.1]得到的相同位置的上层建筑侧壁要求的厚度，但不小于 6.5mm
1.0m	6.5mm
中间高度	线性插值

2.2.2 支撑肘板

支撑肘板的总剖面模数 $Z_{stay-gr}$，cm^3，应不小于下式求得的值：

$$Z_{stay-gr} = 77 h_{blwk}{}^2 s_{stay}$$

式中：h_{blwk}——自甲板板上表面到栏杆顶端的舷墙高度，m；

S_{stay}——支撑肘板的间距，m。

在计算剖面模数时，仅计入与甲板相连的材料。在与甲板相连的位置，可计入支撑肘板的球头或折边翼板应计入。舷墙板与舷顶列板相连的位置，也可计入不超过 600mm 宽的带板。

2.2.3 舷墙被完全切断的位置，应在开口端部安装加强的支撑肘板或平板肘板。舷墙支撑肘板应由甲板下骨材提供支撑，或与甲板下骨材对齐。与舷墙支撑肘板相连的骨材应采用双面连续角焊缝。

2.2.4 在上层建筑端部以及侧板削斜进入到舷墙的过渡长度内，舷墙厚度应与侧板相同。如这些位置的舷墙上有开口，则应通过增加板厚或其他适当的形式予以充分补偿。

3 栏杆

3.1 一般要求

3.1.1 在上层建筑与凸形甲板连接的位置，应在干舷甲板露天部分的全长范围内安装栏杆。

3.2 栏杆的构造

3.2.1 栏杆的支柱应符合下列要求：

(1) 固定、移动或铰链式支柱应间隔约 1.5m。

(2) 至少每第 3 根支柱应用肘板或支撑肘板支撑。

(3) 移动或铰链式支柱应能锁定在直立位置。

(4) 船舶如设有圆弧型舷顶列板，支柱应设在甲板的平坦部分。

(5) 船舶如设有焊接的舷顶列板，支柱不应与舷顶列板、舷侧直立段或连续的挡水扁铁相连。

3.2.2 栏杆的最低横档、甲板或立柱以下的开口应不大于 230mm。其他横档的间隔应不大于 380mm。

3.2.3 钢丝绳仅在特殊情况下可准予取代栏杆，且须限制其长度。在这种情况下，钢丝绳应用松紧螺丝绷紧。

3.2.4 仅在两个固定支柱和/或舷墙之间可采用链索取代护栏。如果开口很宽，链锁上应安装垂直横档以防止水平横档散开。

第 3 节　锚系泊设备

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 锚泊及系泊设备应满足《钢质海船入级规范》第 2 篇第 3 章第 2 节要求。

第 4 节　甲板设备和装置的支撑结构

1 一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 甲板设备和装置的支撑结构应满足《钢质海船入级规范》第 2 篇第 3 章第 6 节和第 7 节要求。

第 5 节　舱口和舱口盖

1　一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 设置在首部露天甲板上的小舱口应满足《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 7 节的要求。

1.1.2 货舱区舱口盖应符合《钢质海船入级规范》第 2 篇第 8 章第 11 节的要求。

第 12 章　货物装卸载

第 1 节　一般规定

1 一般要求

1.1 本章给出了矿砂船货舱快速装载、重货加强、抓斗装货/卸货加强的要求。

1.2 矿砂船货物含水率超过其适运水分极限(TML)时可能导致货物发生液化，相关强度评估要求应特殊考虑。

2 附加标志

2.1 对于符合本章第 2 节要求具有快速装载的矿砂船，可授予附加标志：EL100。

2.2 对于符合本章第 3 节[2]要求具有重货加强的矿砂船，应授予附加标志：Strengthened for Heavy Cargoes。经申请，按本章第 3 节[3]要求进行重货加强的矿砂船，可在 Strengthened for Heavy Cargoes 附加标志后加注（IB）后缀标志。

2.3 对于符合本章第 4 节要求具有抓斗加强的矿砂船，应授予附加标志：Grab*（X）。

第 2 节　快速装载

1 一般要求

1.1 本节规定适用于具有所有货舱单舱一次性 100%装载（快速装载）工况的矿砂船。

1.2 快速装载时的平均装载速率应不超出表 1.2 的规定；对于更高的平均装载速率应另行考虑。

平均装载速率　　表 1.2

载重吨（t）	平均装载速率（t/h）
220000~250000	14000
>250000	16000

2 船体结构强度

2.1 在快速装载的整个过程中，船体梁的实际静水弯矩和静水剪力不应超出港内工况许用静水弯矩和许用静水剪力。

2.2 在快速装载的整个过程中，应保证双层底和横舱壁有足够的局部强度。应按第 4 章第 8 节[3.1.4]直接计算工况表和第 7 章舱段直接强度分析进行快速装卸载工况的强度分析。

3 设备配备及要求

3.1 如需通过压载调整来控制船体梁的实际静水弯矩和静水剪力不超出港口工况的许用静水弯矩和许用静水剪力，则应符合[3.2]和[3.3]的要求。

3.2 压载系统应能匹配[1.2]中平均装载速率的要求，包括压载舱布置、压载泵的能力以及压载管系的布置等。

3.3 船上应配备液舱（如压载舱、燃油舱等）遥控测深仪、船舶吃水读取系统，并与船上装载仪同步。装载过程中液位无变化的燃油舱等不需考虑在内。

4 快速装载手册要求

4.1 船上应配备经 CCS 批准的快速装载手册或可包含在其他经批准的装载手册中。

4.2 快速装载的装载顺序，应包括从装货开始至装货结束每一步骤的装货及与之同步的压载调整（如需要）操作顺序，确保在整个装载过程中（包括每个货舱从空舱装载至满舱）符合[2.1]的要求。

4.3 快速装载手册中至少应包括下述内容：

(1)每一步骤每一货舱的装货量；

(2)每一步骤每一压载舱的压载水调整量；

(3)每一步骤结束时的最大静水弯矩与剪力；

(4)每一步骤结束时的船舶吃水与纵倾。

第 3 节　重货加强

符号

P_{in}——干散货压力，见第 4 章第 6 节[2.2.1]；

1 一般要求

1.1 本节给出了矿砂船货舱区域双层底的重货加强要求。

1.2 本节[2]给出了矿砂船重货加强附加标志的强制要求，本节[3]给出了后缀标志（IB）的可选附加要求。

2 结构要求

2.1 布置要求

2.1.1 横骨架式的双层底应在每档肋位处设置实肋板

2.1.2 纵骨骨架式的双层底实肋板间距一般应不大于 2.5m，船底桁材间距一般应不大于 3.6m。经直接计算验证，间距可增大。

2.1.3 当中桁材用箱形中桁材(管隧)代替时，侧板之间的距离一般应不大于 2m；经直接计算验证，应不大于 3m。

2.1.4 箱形中桁材的骨架应符合下列要求：

(1) 在箱形中桁材内的每个肋位上，应设置船底骨材和内底骨材

(2) 船底骨材和内底骨材的两端应逐渐放大，与箱形中桁材侧板连接，其放大后的高度和长度应不小于骨材高度的 1.5 倍。同时，侧板的外侧无肋板的肋位上，应设置与实肋板等厚的肘板，并与船底和内底纵骨连接。

(3) 箱形中桁材内在船体中心线处，应设置船底纵向骨材，该骨材在横向骨架处可间断。

2.2 结构尺寸

2.2.1 双层底（肋板、中桁材、旁桁材、内底板、内底纵骨）的结构尺寸应满足本规范的适用要求。

3 附加要求

3.1 结构尺寸

3.1.1 根据第 6 章第 3 节[1]计算干散货压力作用下的内底板尺寸要求时，干散货压力 P_{in} 应增大 10%。

3.1.2 根据第 6 章第 4 节[1]计算干散货压力作用下的内底纵骨尺寸要求时，干散货压力 P_{in} 应增大 10%。

第 4 节　抓斗加强

符号

M_{GR}——空抓斗的质量，t。

1　通则

1.1　适用范围

1.1.1 矿砂船应具有抓斗加强附加标志 Grab*（X），其货舱设计为用抓斗装货/卸货，抓斗的最大质量为 X 吨，结构尺寸应符合本节的要求。

1.1.2 此附加入级标志并不否定使用更重的抓斗，但应使船东和船舶经营者认识到，如果经常或偶尔使用更重的抓斗卸货，内底板局部破损的风险会增大并可能要提早更换。

2　结构尺寸

2.1　板

2.1.1 内底和垂直倾斜货舱板的净厚度（不包括污水井）取下列数值的大者：

- t，按第 6 章和第 7 章要求得出；
- t_{GR}，定义见 [2.1.2] 和 [2.1.3] 。

2.1.2　内底板

内底板的净厚度 t_{GR}，mm，按下式求得：

$$t_{GR} = 0.62\sqrt{bk}\left(\frac{M_{GR}}{20}\right)^{0.25}$$

2.1.3　垂直和倾斜的货舱边界

本条中定义的净厚度 t_{GR}，mm，应用于下列结构：

- 横向底凳侧板
- 平面横舱壁板
- 未设底凳的槽形横舱壁面板
- 纵舱壁板

距内底最低点向上 3.0m 高度范围内的净厚度，按下式求得：

$$t_{GR} = 0.55\sqrt{bk}\left(\frac{M_{GR}}{20}\right)^{0.25}$$

第13章 建　　造

第1节　建造和制造

1 一般要求

1.1 工艺

1.1.1 所有工艺均应为验船师接受。焊接应符合本章第2节的要求。任何缺陷均应在材料被覆上油漆或任何其他合成物之前予以纠正并使验船师满意。

1.2 加工标准

1.2.1 结构加工应符合IACS第47号建议案（IACS Rec.47）或制造/建造开始之前经CCS认可的制造标准。如船厂采用其他标准，船厂应提供该标准与IACS Rec.47等效的文件证明材料。

1.2.2 在制造/建造开始前，制造/建造过程中所用的制造标准应提供给CCS。

1.2.3 制造标准应包括确立以下规定项目范围和公差限制的内容：

(1) 切边：切边斜度和切边粗糙度；

(2) 折边骨材和肘板以及组合型材：翼板宽度和腹板高度、翼板和腹板之间的角度，以及翼板平面或面板顶部的平直度；

(3) 支柱：各层甲板之间平直度和圆柱结构直径；

(4) 肘板和扁钢骨材：防倾肘板和扁钢骨材自由边缘线的扭曲变形；

(5) 骨材组件：面板和腹板的端部削斜细节；

(6) 板材组件：平面和曲面分段的尺寸（长和宽）、扭曲度和方正度，以及内部构件与板材间的偏差；

(7) 立体分段装配：对平面和曲面立体分段，除板材组件衡准以外的上下板材之间的扭曲偏差；

(8) 特殊装配：上下舵钮间距，螺旋桨毂后缘和尾尖舱舱壁间距，尾框架组件扭曲度，主机座面板宽度和长度。螺旋桨毂和挂舵臂的镗孔应在船尾主要部分的焊接完成及镗孔部位周边结构无损检测合格之后进行。如采用分段镗孔，应进行轴对中，其方法和顺序应提交CCS认可。舵、舵销的装配和对中，应在船舶尾部的主要部分焊接完成之后进行。最终装配之前，应检查舵销、舵杆圆锥面的接触状况；

(9) 板材对接：板材对接对齐；

(10) 十字形接头：在十字形接头的中线和底线测量对齐情况；

(11) 内部构件对齐：T形纵骨翼板的对齐，板格骨材的对齐，T形接头和搭接接头的间隙，以及分段组装和合拢接头处连续骨材上切口与扇形孔的间距；

(12) 龙骨和船底观察：船舶全长以及相邻两舱壁间距的偏差，船舶前体和后体翘起以及船中肋板升高；

(13) 尺寸：垂线间长、船中型宽和型深以及螺旋桨毂后缘和主机之间的距离；

(14) 框架之间的板的光顺性：外板框架、液舱顶、舱壁、上甲板、上层建筑甲板、甲板室甲板和围蔽板在框架之间的平整度；

(15) 框架处板的光顺性：在框架处量取的外板、液舱顶、舱壁、强力甲板板和其他结构的平整度；

(16) 横撑材：边舱内的横撑材与纵舱壁、舷侧外板垂直度偏差，以及横撑材合拢对接缝（如有）部位的直线度偏差；

(17) 舱口围：考虑了船舶满载中垂影响的密封压紧条、横向限位、舱盖关闭及打开止挡装置、拉紧螺栓、液压顶升装置的安装尺寸及间隙（如有）。

1.2.4 母材表面的划伤及裂纹等缺陷的处理需使用经批准的程序。

1.3 检验

1.3.1 适用的建造检验要求见 CCS《钢质海船入级规范》第 1 篇。

2 切口、板的边缘

2.1 一般要求

2.1.1 切口、舱口角隅等的自由边（切割面）应作适当预处理，不应有凹口。通常，切割波纹等应打磨平顺。所有边缘均应进行倒角，在高应力部位应予倒圆。火焰或机器切割的板材或翼板的自由边不得有锐角，并应按上述规定光顺。这也适用于切割波纹等，尤其是舷顶列板的上缘及类似焊接接头，剖面面积的变化或类似不连续的部位。

2.1.2 舱口角隅应以机器切割加工。

3 冷成型

3.1 特殊构件

3.1.1 船体梁的高应力构件的缺口韧性尤其引起关注（例如第 3 章第 1 节表 2.3.1（1）要求 III 级材料的项目），如舭部列板。对于碳锰钢，冷弯板的内缘弯曲半径应不小于 10 倍的总板厚。若符合[3.3]中的规定，许用内缘弯曲半径可减小。

3.2 槽形舱壁

3.2.1 对槽形舱壁，其冷弯板的内缘弯曲半径，对碳锰钢，应不小于建造板厚的 4.5 倍。若符合[3.3]中的规定，许用内缘弯曲半径可减小。

3.3 较小弯曲半径

3.3.1 内缘弯曲半径减小到[3.1]要求的 10 倍总板厚之下时，应提供支持数据。弯曲半径应不小于总板厚的 2 倍。且应满足下列最低的附加要求：

（1）对所有曲板

- 应对弯曲区域进行 100%目视检查。
- 应通过磁粉试验进行随机抽查。

（2）对液舱边界上的曲板

- 应采用 D/DH 级或以上的钢材；
- 材料在应变时效条件下进行冲击试验并满足本款所述的要求。变形量应等于生产过程中的最大变形量(由公式计算为 $t_{as\text{-}built}/(2r_{bdg} + t_{as\text{-}built})$，式中 $t_{as\text{-}built}$ 为板材的建造厚度，r_{bdg} 为弯曲半径。)。一个试件应被塑性变形至计算的变形量或 5%，取大者；接着在 250℃人工时效 1 小时后进行夏比 V 形缺口冲击试验。应变时效后平均冲击功应符合所用钢材等级的规定冲击要求。

4 热成型

4.1 温度要求

4.1.1 热轧、控轧、温度-形变控制轧制或正火的钢材的成型温度不应超过 650℃，调质钢成型温度比回火温度至少低 28℃，否则应进行力学性能试验，以保证这些温度未对钢材的拉伸性能和冲击性能产生不利影响。若按照[4.2.1]的要求用线加热或点加热方式进行曲线

成形或光顺处理，则不要求进行这些力学性能试验。

4.1.2 当考虑在成形和消除应力中不按[4.1.1]的方式对温度-形变控制轧制（TMCP）钢材作进一步加热时，为在进一步加热后证明力学性能，要求用代表性材料通过程序试验进行确认。

4.2 线加热或点加热

4.2.1 用线加热或点加热方式进行曲线成形或光顺处理，应使用经批准的程序，以确保材料性能不会受到不利的影响。表面加热温度应予控制，不能超过适用于板材等级的最大允许极限。

5 装配和对中

5.1 一般要求

5.1.1 在单个构件装配或分段组装时，应避免过大的力。单个构件的过大变形应尽量在下一步组装前校正。焊接完工后，应采用对材料性能不产生明显影响的方法进行校直和对中。如有疑问，CCS 可要求进行工艺试验。

5.1.2 构件应按 IACS Rec.47 表 7 的规定或 CCS 接受的公认的制造标准的要求进行对中。。

第 2 节　焊接制造

1　一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本节要求适用于船体结构焊接的焊前准备、施焊和检查。

1.2 焊接工艺方面的应用限制

1.2.1 焊接类型、尺寸和材料

本节对焊接类型、尺寸和材料的要求是基于以下考虑：

(1) 接头类型；

(2) 接头的重要性；

(3) 接头应力的大小、类型和方向；

(4) 母材和焊材的材料特性；

(5) 焊缝间隙尺寸。

1.2.2 焊前准备、施焊和检查

焊前准备、施焊和检查还应满足 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 5 章的适用要求。

2　焊接工艺、焊接材料和焊工

2.1 一般要求

2.1.1 所有焊接应由经认可的焊工，使用满足 CCS 规范要求的焊接材料，按照经 CCS 认可的焊接工艺进行，相关要求见 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 2、3、4 章。

3　焊接接头

3.1 一般要求

3.1.1 接头的焊接应按照经认可的图纸进行。

3.1.2 船厂所采用的质量标准应提交 CCS，并且除根据具体情况另有规定外，该质量标准应适用于所有的焊接接头。

3.1.3 应考虑装配顺序以及所用焊接方式对板格、组件等整体收缩的影响。焊接应系统地进行，按正确顺序完成每一焊接接头，无不当中断。在实际可行情况下，焊接应在接头中心开始向外进行，或在组件中心开始向四周展开，使每一部分均可朝一个或多个方向自由移动。

3.1.4 完成的焊接接头应令现场验船师满意。坡口制备与焊根间隙应符合经认可的焊接工艺。连接构件间的间隙应不超过 IACS Rec.47 中规定的最大值，或 CCS 批准认可的建造标准。若连接构件间的间隙超过了规定值，则应按 IACS Rec.47 的规定或 CCS 接受的公认制造标准采取矫正措施。

3.1.5 如在厚板或分段上采用小填角焊缝时，焊接应基于经认可的焊接工艺规程。可接受如预热、低氢焊条或低氢焊接方式等专门的预防措施。

3.1.6 当厚构件与相对较薄板材连接时，如有必要，焊缝尺寸和焊接顺序应根据需要进行修改。

3.1.7 如果质量控制体系可确保使用的焊接材料等级高于所焊接钢材强度等级的最低要求，所用的焊接材料熔敷金属屈服强度可高于本章第 3 节[2.5.2]中规定的最小值并且焊缝的尺寸可根据较高等级焊接材料的屈服强度确定。

3.1.8 一般而言，对接接头采用双面焊时，在背面焊接之前，应以适当方法将有缺陷金属从根部除去。

3.1.9 相交焊缝的布置

当跨过对接焊缝的加强构件以连续角焊连接时，其跨越处的焊缝应修平。同样，在角接焊前加强构件腹板上的对接焊缝也应焊完并修平。整修部位应平顺，无缺口或形状突变。当上述条件无法满足时，可在加强构件腹板上开一通焊孔。通焊孔的尺寸和位置应满足通焊要求。

3.1.10 止漏处理

当结构穿过液舱壁，渗漏到邻近处所可能产生危险或不良影响，则在舱壁两侧构件至少 150mm 长度内采用全焊透焊缝。作为替代措施，邻近处所内的构件靠近舱壁处开一适当形状的小扇形孔，并完全焊实。此外也可采用其他等效措施。

4 无损检测

4.1 一般要求

4.1.1 送审的无损检测计划应包括有关检测的位置与数量、所采用的焊接工艺、所使用的无损检测方法等必需资料。船厂应对完工的焊接进行目视检查，以确保所有完成的焊接都令人满意。除了目视检查，焊接接头应使用超声波、射线照相、磁粉、涡流、着色渗透或其他适合焊接构造的可接受的方法中的一种或组合进行检查。以上检验应按照 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 5 章第 3 节中的适用要求进行。

4.1.2 焊缝无损检测应在检测计划中所指明的位置处进行，以确保焊缝没有裂纹和 CCS 相关要求不能接受的内部缺陷。钢质焊缝无损检测操作工艺文件、检测人员和验收标准等应满足 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇附录 1 的适用要求。

4.1.3 对采用的先进无损检测方法与质量等级要求应满足 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇附录 2 的适用要求。

第 3 节　焊接接头设计

符号

A_{weld}—有效填角焊缝面积，cm^2

f—钝边宽度，mm

f_{weld}—焊接系数

f_{yd}—考虑焊缝熔敷金属屈服强度的修正因数，定义见[2.5.2]

l_{dep}—焊缝熔敷金属总长度，mm

l_{leg}—连续、搭接或间断角焊缝的焊脚高度，mm

l_{weld}—焊接头长度，mm

R_{eH_weld}—焊缝熔敷金属的最小屈服强度，N/mm^2

$t_{as\text{-}built}$—连接构件的建造厚度，mm

t_{gap}—角焊缝间隙允差，应取 2.0mm

t_{throat}—角焊缝焊喉厚度，mm，定义见[2.5.3]

1　一般要求

1.1 适用范围

1.1.1 本节的要求适用于船体结构中焊接连接的设计，基于考虑本章第 2 节[1.2.1]提及的内容。

1.1.2 应送审表明焊缝尺寸和焊接细节的图纸和/或技术规格。

1.1.3 焊缝的焊脚高度应符合本节表 2.5.2（1）中定义的最小焊脚高度要求。

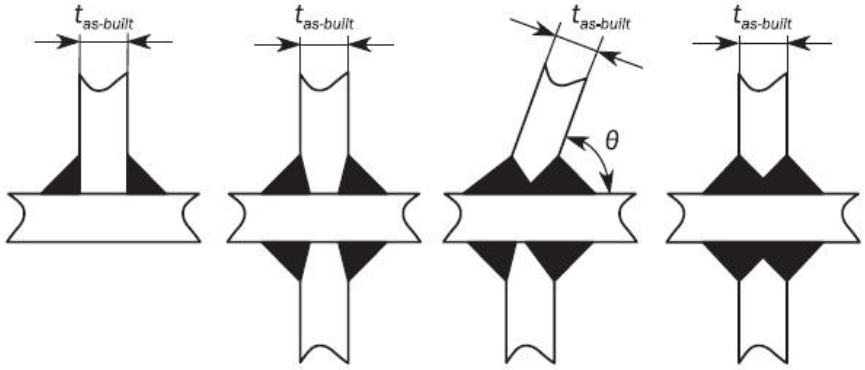
1.2 替代

1.2.1 本节要求视为船体建造中电弧焊接的最低要求，其他方法、布置和细节应按 CCS《钢质海船入级规范》第 1 篇第 2 章第 2 节[2.2.5]的规定进行审批。

2　T 型或十字接头

2.1 适用范围

2.1.1 主要支撑构件、骨材腹板与板材的连接以及在另一板材上立装竖板的连接应采用填角焊缝或熔透焊，见图 2.1.1。



$t_{as\text{-}built}$—连接构件的建造厚度，mm

θ—连接角度，度

图 2.1.1　T 型或十字接头

2.1.2 如果连接处有高应力或被认为很关键，应在立板上开坡口得到部分熔透或全熔透焊缝。

2.2 连续角焊

2.2.1 下列部位应采用连续焊：

(1) 对所有构件，腹板与面板的连接；
(2) 使用高强度钢处的所有角焊缝；
(3) 风雨密甲板与其上结构的边界（包括舱口围板和其他开口）；
(4) 液舱和水密舱室边界；
(5) 液舱和货舱内所有结构；
(6) 液舱边界骨材和主要支撑构件；
(7) 尾尖舱内所有结构和尾尖舱舱壁骨材和主要支撑构件；
(8) 首尖舱内的所有结构；
(9) 骨材和主要支撑构件所有端部连接处（包括端肘板、补板、扇形孔）和与其他构件正交相连处的焊缝；
(10) 主船体上的所有搭接焊缝；
(11) 船首 0.3 *L* 区域内主要支撑构件和扶强构件与船底外板连接处；
(12) 扁钢纵骨与板材相连；
(13) 小附加装置(件)连接到高强度钢板上，以及其他连接或附件；
(14) 支柱与柱冠和柱座连接；
(15) 舱口围板撑板与甲板板连接，见[2.4.5]；
(16) 厨房、配膳室、洗衣室、浴室、厕所和蓄电池室等处的周界角焊缝。

2.3 间断角焊

2.3.1 如不要求连续焊，可采用间断焊。

2.3.2 如果梁、骨材、肋骨等为间断焊并穿过开口纵桁、承梁材或水平桁，应在每一交点的每侧有两道匹配的断续焊缝。此外，梁、骨材和肋骨应有效接到纵桁、承梁材和水平桁上。在允许间断焊或单面连续焊的地方，对剪切跨距两端的十分之一应根据[2.5.2]和[2.5.3]采用双面连续焊。

2.3.3 在甲板室干舱里可接受单面连续焊。

2.3.4 单面连续焊尺寸应有[2.5.2]对间断焊要求的角焊缝尺寸，系数 f_2 应取 2.0。

2.4 部分熔透和全熔透焊接

2.4.1 高应力区域定义

应用本节规范时，高应力区域系指应进行细网格有限元分析的区域且与焊缝相邻单元的细网格屈服利用因子超过第 7 章第 3 节定义的细网格许用利用因子的 90%。

2.4.2 部分熔透或全熔透焊接

在高拉应力区域或认为危险的区域，应采用全熔透或部分熔透焊接。

全焊透时，应消除钝边，如在背边焊接前打磨。对部分熔透焊，钝边宽度 f 应在 3mm 和 $t_{as\text{-}built}$ /3 间取值。确保焊道渗透至坡口根部的坡口角度α，通常在 40 度至 60 度之间。全熔透/部分熔透的焊道应覆盖坡口根部。部分熔透的例子见图 2.4.2。

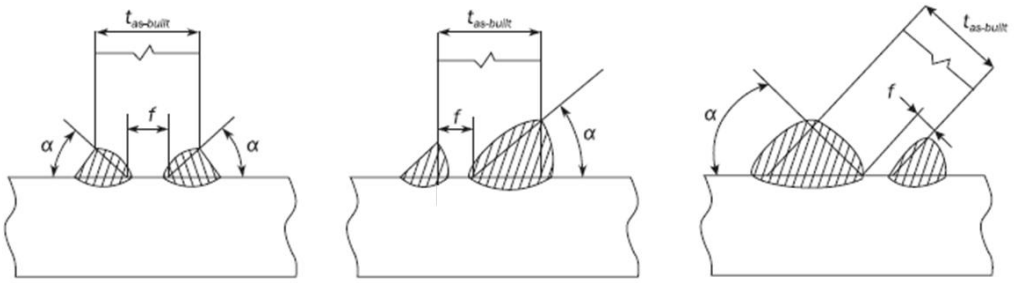


图 2.4.2　部分熔透焊

2.4.3 单侧部分熔透焊接

对于单侧开坡口的部分熔透焊，坡口相对一侧的填角焊应满足[2.5.2]的要求。

2.4.4 全熔透或部分熔透焊接范围

[2.4.5]和[2.4.6]中列出的每个特定位置处及基于其他衡准，如第 10 章给出的疲劳评估，可能需要采用全熔透或部分熔透焊接。全熔透或部分熔透焊接范围应由 CCS 批准。全熔透或部分熔透焊接距参考点（即构件交点、肘板趾端等）的最小范围不应小于 300mm。

2.4.5 要求全熔透焊接的位置

下列位置和规范要求的其他位置处应采用全熔透焊接：

(1) 角隅处圆弧型舱口围板与甲板连接部位；

(2) 垂直槽形舱壁与底凳顶板连接，以及纵舱壁内与槽形舱壁翼板对齐的结构构件与底边舱斜板的连接；

(3) 槽形舱壁底凳侧板与内底板；

(4) 当开口尺寸超过 300 mm 时，船中 0.6L 以内的强力甲板、舷顶列板和船底板上的开口边缘补强部位或管道贯穿处；

(5) 在结构吃水以下形成外板边界（包括但不限于海水阀箱、舵杆围阱和尾封板），建造厚度小于或等于 12mm 的立板板格。建造厚度大于 12 mm，可根据[2.4.1]采用部分熔透焊；

(6) 对纵向舱口围板端部肘板与甲板板的趾端连接，距边围板端部肘板趾端 0.15Hc 距离内要求采用全熔透焊，Hc 是舱口围板的高度；

(7) 长的横向强框架厚翼板与舷侧强框架连接部位。长的纵桁厚翼板与舱壁强框架连接部位；

(8) 起重机座和支撑肘板以及支撑结构；

(9) 挂舵臂和尾轴架与船壳结构连接部位。

2.4.6 要求部分熔透焊接的位置

下列位置应采用[2.4.2]定义的部分熔透焊接。基于其他衡准，如第 10 章给出的疲劳评估，其他位置可能需要采用部分熔透焊接：

(1) 纵舱壁如有折角时，折角处斜板与内壳纵桁及垂直板连接部位；

(2) 槽形舱壁底凳支撑肋板与内底板连接部位；

(3) 槽形舱壁卸货板，当卸货板设在槽形舱壁的下端时，则卸货板应采用单面熔透焊与槽形板和底凳顶板焊接；

(4) 舱壁主要支撑构件和凳板下的双层底内结构构件，见图 2.4.4；

(5) 槽形舱壁底凳下列板与内底板连接部位；

(6) 舱壁水平桁肘板趾端和根部；

(7) 纵舱壁与舱口强横梁端肘板的趾端。

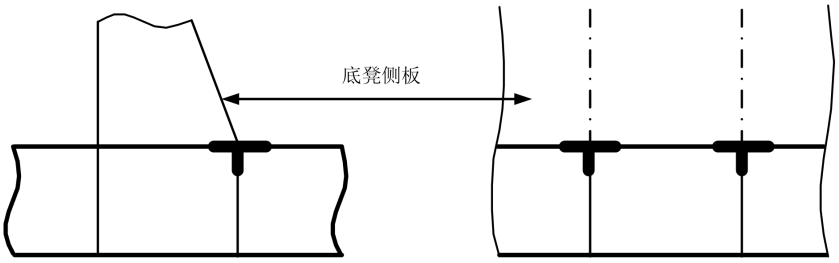


图 2.4.4 高应力区焊接示例

2.4.7 细化网格有限元分析

在高应力区域，至少应采用[2.4.2]定义的部分熔透焊。全熔透或部分熔透焊接的最小范围应取以下大者：

(1) 距离最高屈服利用因子的单元任一方向 150mm；

(2) 范围覆盖超过以上提及屈服利用因子衡准的所有单元。

2.5 焊缝尺寸衡准

2.5.1 焊缝要求尺度应按 0.5mm 就近圆整。

2.5.2 连续、搭接或间断角焊缝的焊脚高度 l_{leg}，mm，应取不小于如下大者：

$$l_{leg} = f_1 f_2 t_{as-built}$$

$$l_{leg} = f_{yd} f_{weld} f_2 f_3 t_{as-built} + t_{gap}$$

l_{leg}，见表 2.5.2（1）

式中：

f_1——焊接类型系数

f_1＝0.30　对于双面连续焊

f_1＝0.38　对于间断焊

f_2——坡口加工系数

f_2＝1.0　对于未开坡口的双面连续焊

f_2＝0.70 对于单面开坡口，且 $f = t_{as-built}/3$ 的部分熔透焊

f_{yd}——系数，取不小于下者：

$$f_{yd} = \left(\frac{1}{k}\right)^{0.5}\left(\frac{235}{R_{eH_weld}}\right)^{0.75}$$

$$f_{yd} = 0.71$$

R_{eH_weld}——焊缝熔敷金属最小屈服强度，N/mm^2，且应不小于：

R_{eH_weld}= 305　　对于普通强度钢焊缝，R_{eH}= 235N/mm^2 的普通强度钢

R_{eH_weld}= 375　　对于屈服应力 R_{eH} 为 265~355N/mm^2 的高强度钢焊缝

R_{eH_weld}= 400　　对于屈服应力 R_{eH} 为 390N/mm^2 的高强度钢焊缝

f_{weld}——焊接系数，取决于构件类型，见表 2.5.2（2），表 2.5.2（3）和 表 2.5.2（4）

k——立板的材料系数

f_3——焊缝类型修正因数：

f_3=1.0　　对于双面连续焊

$f_3 = s_{ctr}/l_{weld}$　对于间断焊或并列焊

s_{ctr}——两连续角焊焊段从中心到中心的间距，mm

2.5.3 焊喉尺寸 t_{throat}，mm，见图 2.5.3，应不小于：

$$t_{throat} = \frac{l_{leg}}{\sqrt{2}}$$

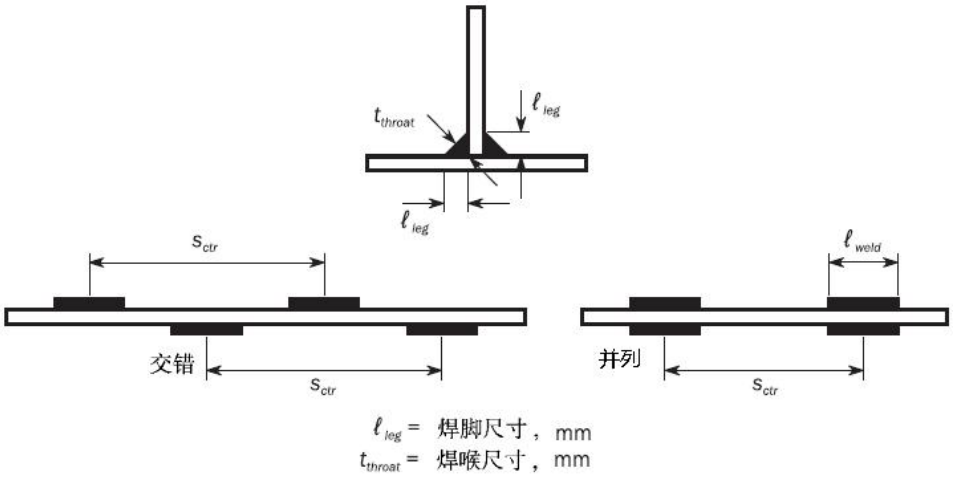


图 2.5.3 焊缝尺寸定义

最小焊脚尺寸 **表 2.5.2（1）**

区域	处所类型		最小焊脚高度
货舱区域	货舱	舱顶下 3m 范围内的焊缝	6.5(1)
		其他位置	6.0(1)
	压载水舱	舱顶下 3m 范围内的焊缝(2)	6.5(1)
		其他位置	6.0(1)
	干舱和空舱		5.0(1)
	其他液舱		6.0(1)
其他区域	压载水舱	舱顶下 3m 范围内的焊缝(2)	6.0(1)
		其他位置	5.5(1)
	燃油、淡水和其他液舱		4.5
	干舱和空舱		4.0
	上层建筑及甲板室		3.5
（1）如果单元的建造厚度小于 12mm，最小焊脚高度可以减小 0.5mm （2）仅适用于露天甲板为舱顶的压载舱 3m 距离为自液舱顶并平行于液舱顶垂直量取。			

不同构件的焊接系数 **表 2.5.2（2）**

船体区域	连接		f_{weld}
	由	对	
一般区域，除非本表中另做规定	水密板	边界板	0.48
	油密板	边界板	0.51
	构件端部肘板		0.48
	骨材	深舱舱壁	0.24

船体区域	连接				f_{weld}
	由		对		
			主要支撑构件腹板和领板		0.38
	骨材腹板		板（除深舱舱壁）		0.20
			组合型骨材面板	端部（15%跨距）	0.38
				其他位置	0.20
船底和双层底	普通骨材		船底板和内底板		0.24
	中纵桁		外板		0.38
			内底板		0.38
	旁纵桁，包括间断板		船底板和内底板		0.24
	肋板		外板和内底板	对端部两个肋距长度	0.38
			中桁材和位于边舱的旁桁材		0.38
			其他位置		0.24
	中桁材上的肘板		中桁材、内底板、肋板和外板		0.38
	腹板骨材		肋板和桁材		0.20
双舷侧结构中的舷侧和纵舱壁	主要支撑构件腹板		舷侧外板		0.30
			纵舱壁和主要支撑构件腹板	甲板强横梁和端部连接处	0.43
				横撑材处	0.36
				其他位置	0.30
甲板	强力甲板	$t_{as-built} \geq 13$	船中 0.6*L* 以内舷侧外板		PPW[3]
			其他位置		0.48
		$t_{as-built} < 13$	舷侧外板		0.48
	其他甲板		舷侧外板		0.38
			骨材		0.20
	舱口围板		甲板板	15%舱口围板高度的舱口角隅处的纵向舱口围板	FPW [3]
				距舱口角隅处 15%舱口围板高度位置至 15%舱口围板长度位置之间的纵向舱口围板	0.48
				其他位置	0.38
	腹板骨材		围板腹板		0.20 [2]
舱壁	非水密舱壁结构		边界		0.24
	骨材		舱壁板	端部处（25%跨距），如不设端肘板	0.48
尾尖舱	内部构件		边界及边界之间：水线以下		0.38
			水线以上		0.20

船体区域	连接		f_{weld}
	由	对	
首尖舱	内部构件	边界及边界之间	0.20
机器处所	中纵桁	平板龙骨和内底板	0.48
	肋板	中纵桁	0.48
	基座纵桁	顶板和主要船体结构	PPW(3)
	肋板和纵桁	内底板和外壳板	0.38
上层建筑和甲板室	外围壁（第 1 和第 2 层上层建筑）	甲板、外围壁	0.48
	外围壁和内舱壁	其他位置	0.20

(1) 货舱外舱口围板 *fweld*=0.43
(2) 连续焊接。
(3) PPW：根据[2.4.2]的部分熔透焊。
(4) FPW：根据[2.4.2]的全熔透焊。

其他装置和设备的焊接系数 **表 2.5.2（3）**

项目	连接	f_{weld}
舱口盖	水密接头	0.48
	骨材端部	0.38
	其他位置	0.24
桅，起重柱，起重机基座，等	甲板/甲板下结构	0.43
甲板机械基座	甲板	0.24
系泊设备基座	甲板	0.43
出入孔盖板围板	任意位置	0.43
舷侧门和风雨密门的加强	任意位置	0.24
外板肋骨和风雨密门	任意位置	0.43
通风筒和空气管围板	甲板	0.43
通风筒等装置	任意位置	0.24
通风筒，空气管 等．围板连至甲板	甲板	0.43
泄水管和排水管	甲板	0.55
舷墙撑板	甲板	0.24
舷墙板	甲板	0.43
护栏，栏杆柱	甲板	0.43
压紧器和配件	舱口围板和舱口盖	0.24 (3)
(1) 最小焊接系数．当 $t_{as\text{-}built}$>11.5mm l_{leg} 不必超过 $0.62t_{as\text{-}built}$．根据设计可要求熔透焊．		

2.5.4 表 2.5.2（2）和表 2.5.2（3）中未列出的主要支撑构件连接，应使用表 2.5.2（4）中的焊接系数

主要支撑构件焊接系数　　表 2.5.2（4）

船体结构	连接			f_{weld}
	由	对		
主要支撑构件	腹板	外板、甲板板、内底板、舱壁	端部处（15%剪切跨距）	0.48
			其他位置	0.38
		面板	在液舱/货舱内，位于从首尖舱起 0.125L 范围内	0.38
			面板横截面积大于 65 cm^2	0.38
			其他位置	0.24
	端部连接	压载水舱边界处		0.48
		其他位置		0.38

2.5.5 竖立的纵向骨材腹板建造厚度如果大于 15 mm 且超过带板厚度，焊缝应为双面连续焊，焊脚高度应不小于以下三者中的最大值：

(1) 0.30 $t_{as\text{-}built}$，式中 $t_{as\text{-}built}$ 是带板建造厚度且不必大于 30 mm；

(2) 0.27 $t_{as\text{-}built}$ + 1，式中是立板的建造厚度。此公式得到的焊脚尺寸不必大于 8.0 mm；

(3) 表 2.5.2（1）给出的焊脚高度。

2.5.6 如果根据[2.5.2]中第 2 个公式确定最小焊缝尺寸，在与船体外板、甲板或舱壁相连的接头处应计入因骨材穿过构件而切口的材料损失。在切口宽度超过骨材间距的 15%时，焊脚高度应乘以：

$$\frac{0.85s}{l_w}$$

式中：

s——骨材间距，mm，见图 2.5.6

l_w——切口之间腹板的长度，mm，见图 2.5.6

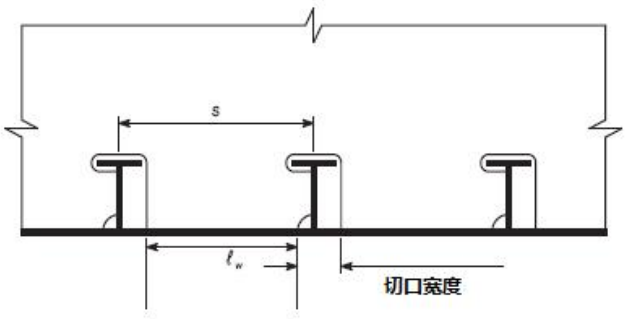


图 2.5.6 骨材腹板切口处的有效材料

2.5.7 主要支撑构件端部连接的剪切面积

主要支撑构件端部连接的焊接，包括 10%的剪切跨距，其焊缝面积应等于该构件的总横剖面积。焊脚高度 l_{leg}，mm，应由下式得出：

$$l_{leg} = 1.41 f_{yd} \frac{h_w t_{gr\text{-}req}}{l_{dep}}$$

式中：

h_w ——主要支撑构件腹板高度，mm

$t_{gr\text{-}req}$—— 基于从舱段有限元分析得到的最高平均屈服利用因子或货舱区域外主要支撑

构件剪切面积要求得到的端部连接处（包括 10%的剪切跨距）腹板要求总厚度，mm

l_{weld} ——焊缝连接长度，mm，见图 2.5.7

l_{dep} ——焊缝熔敷金属总长度，mm，见图 2.5.7，取为：

对于双面连续角焊缝：$l_{dep}= 2l_{weld}$

焊缝尺寸应不小于按[2.5.2]计算所得值。

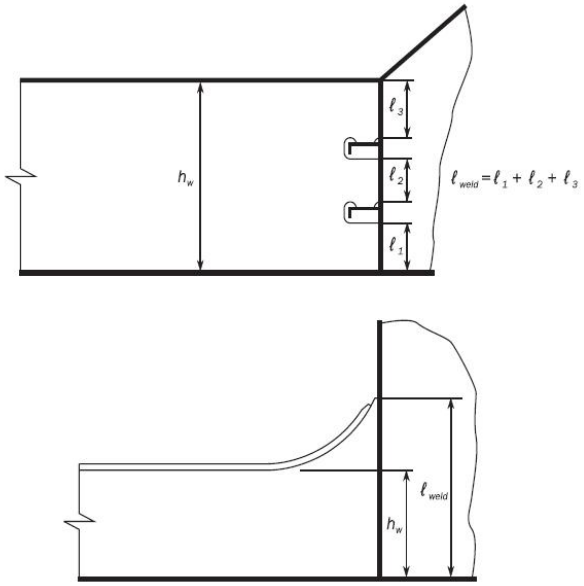


图 2.5.7 主要支撑构件的剪切面积

2.5.8 纵骨

纵骨与板材的焊接，在纵骨端部 15%剪切跨距（定义见第 3 章第 6 节）的范围内应为双面连续焊缝。

在主要支撑构件处，双面连续焊缝的长度应等于纵骨的高度或端肘板的高度的较大者。

2.5.9 甲板纵骨

对甲板纵骨，在纵骨与主要支撑构件相交处要求有一对相匹配的焊缝。

2.5.10 由肘板提供纵向连续性

如果纵向强力构件在主要支撑构件处切断，且强度的连续性由肘板实现，则焊缝面积应不小于该构件的总横剖面积。焊缝面积 A_{weld}，cm^2 由下式确定：

$$A_{weld} = \frac{f_{yd} t_{throat} l_{dep}}{100}$$

2.5.11 无肘板骨材

如果允许间断焊，船壳、水密和油密舱壁以及甲板室正面的无肘板骨材，应在其各个端部十分之一长度内采用双面连续焊。非密性结构舱壁、甲板室侧面和尾端的无肘板骨材应在每端有一对相匹配的间断焊。

2.5.12 减小焊缝尺寸

（1）当使用经批准的自动深熔焊工艺且质量控制使构件装配间隙保持在 1mm 或以下，表 2.5.2（2）所规定的焊接系数可减小 15%，但不大于 1.5 mm 角焊缝焊脚尺寸。若船厂能始终满足以下要求，焊接系数最多可减小 20%，但不大于 1.5 mm 角焊缝焊脚尺寸：

① 选择经包含对最小和最大焊缝根部装配间隙因素的焊接工艺试验确认的合适的方法进行焊接；

② 所连接构件根部熔深至少为焊脚尺寸的折减量；

③ 证明已建立合适的质量控制体系。

（2）经 CCS 同意，可采用在腹板两侧开坡口或其他方法减小填角焊焊脚尺寸。但应提供验证证明以及相关质量控制措施。

2.5.13 减小焊缝尺寸验证

采用任何方法减小焊缝尺寸，均应在图纸上标明作为减小理由的具体要求。图纸应针对减小的焊脚高度和[2.5.2]所要求的不含焊脚高度折减值的焊脚高度，说明焊缝设计和尺寸要求。还应在图纸上加注，以描述两焊脚高度的差别及其应用要求。

3 对接接头

3.1 一般要求

3.1.1 加筋板结构中的板件接头一般应以对接焊缝连接，见图 3.1.1。

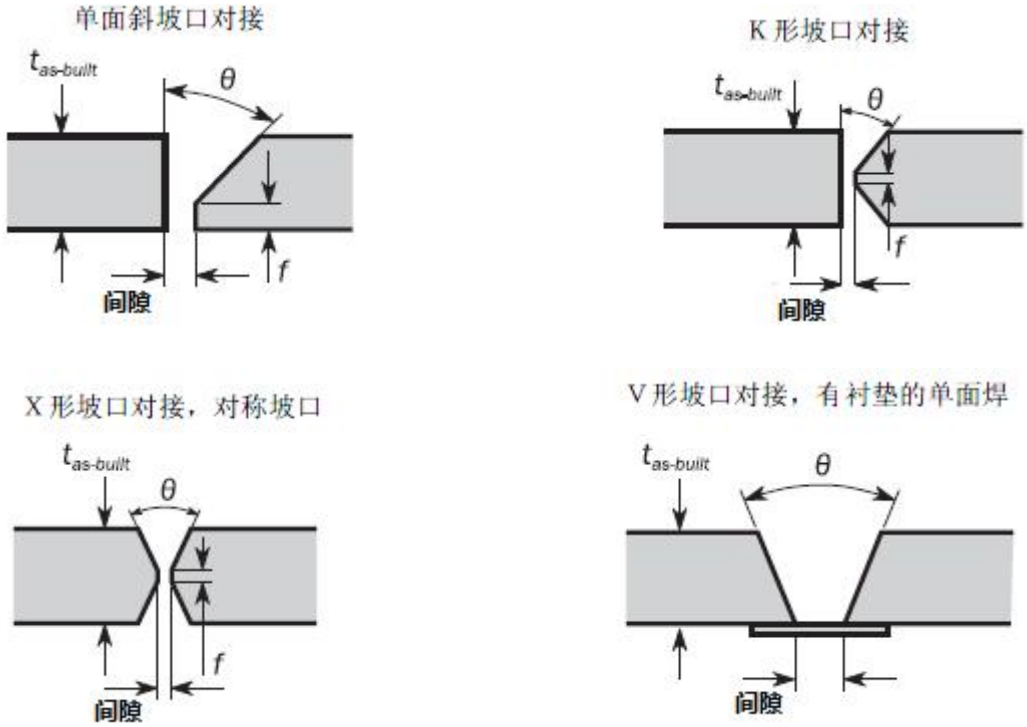


图 3.1.1 典型对接焊缝

3.2 厚度差

3.2.1 过渡

如果所焊接的板材建造厚度相差大于 4mm，较厚板通常应削斜过渡。削斜过渡的长度应不小于建造厚度差的 3 倍。如果坡口宽度不小于厚度差的 3 倍，可不进行削斜过渡，在焊缝宽度内使焊缝的外形均匀地过渡。

4 其他类型接头

4.1 搭接接头

4.1.1 区域

搭接焊缝仅在 CCS 认可的非特定情况下方可采用。下列情况可采用搭接焊缝：

- 复板边缘连接

- 承受极低应力的内部构件

4.1.2 搭接宽度

如果采用搭接，搭接宽度应不小于连接板建造厚度的三倍，但不大于四倍，见图 4.1.2。如果较薄焊接板建造厚度大于等于 25mm，搭接接头将予以特殊考虑。

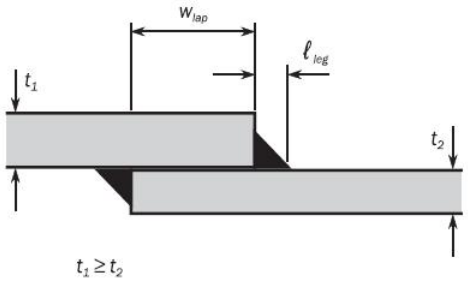


图 4.1.2　搭接接头的填角焊缝

4.1.3 补板搭接

对于骨材穿过腹板和舱壁板开口处的补板和领板的搭接，不得小于补板厚度的三倍，但不必大于 50mm。

4.1.4 端部搭接

端部搭接，均应在每一个边缘有连续焊缝，焊脚高度为 l_{leg}，mm，如图 4.1.2 所示，两个焊脚高度之和应不小于较薄板建造厚度的 1.5 倍。

4.1.5 搭接拼缝

搭接拼缝的两个边缘均应有连续焊缝，尺寸按[2.5.2]对液舱/货舱或水密舱壁边界的要求。液舱/货舱范围以外建造厚度 12.5mm 或以下板材拼缝，可按[2.5.2]对水密舱壁边界的要求，在一个边缘可为间断焊。

4.2 长孔塞焊焊缝

4.2.1 一般不采用长孔塞焊。当在背面无法进入实施焊接的情况下，如：板材与其内侧的型材腹板无法直接采用角焊缝连接，可以采用长孔塞焊。但是，在船中 0.6*L* 区域范围内不准许对船体外板和强力甲板上的复板采用长孔塞焊焊缝。

4.2.2 塞焊孔应形状良好，最小塞焊孔长度 l_{slot} 为 75 mm，宽度 w_{slot} 为两倍建造板厚。如用于复板或类似位置时，塞焊缝的间距 s_{slot} 一般应为 $2l_{slot}$ 至 $3l_{slot}$，但不大于 250 mm，见图 4.2.2。角焊缝尺寸应根据[2.5.2]中第 2 个公式确定，$t_{as\text{-}built}$ 为较薄板的建造厚度，焊接系数取 0.48。塞焊孔不应以焊肉填满。

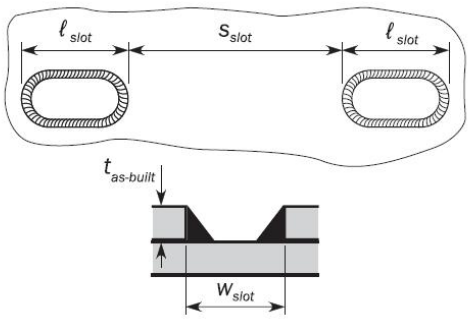


图 4.2.2　塞焊缝

4.2.3 封板

将板材与内部腹板相连时如无法留出焊接通道，可用开孔塞焊将封板连接到腹板的面板上。塞焊孔应有良好的圆度，最小长度 l_{slot} 为 90 mm，最小宽度 w_{slot} 为两倍建造板厚。板上

的塞孔应有平整、清洁和方正的边缘，间距 $s_{s/ot}$ 一般应不大于 140 mm。塞焊孔不应以焊肉填满。

4.3 螺柱和吊环焊缝

4.3.1 如要在高应力区域的主要构件上焊接永久性或临时性螺柱或吊环，拟定的位置应提交批准。

5 连接细部

5.1 舭龙骨

5.1.1 应根据表 5.1.1 中的要求，通过连续角焊缝将垫板与外壳、舭龙骨与垫板连接。

舭龙骨焊接要求 **表 5.1.1**

连接构件	焊脚高度，mm	
	端部	其他位置
垫板至外壳	0.62 t_{1as_built}	0.48 t_{1as_built}
舭龙骨腹板至垫板	0.48 t_{2as_built}	0.30 t_{2as_built}
$t_{1as\text{-}built}$——垫板建造厚度，mm $t_{2as\text{-}built}$——舭龙骨腹板建造厚度，mm		

5.1.2 垫板和舭龙骨的对接焊缝应相互错开，并与外板的对接缝错开，见图 5.1.2。通常，垫板位置的外板对接缝应磨平，舭龙骨位置的垫板对接缝也应磨平。不允许垫板对接焊缝与外板直接连接。这可以通过使用可卸式背垫获得。

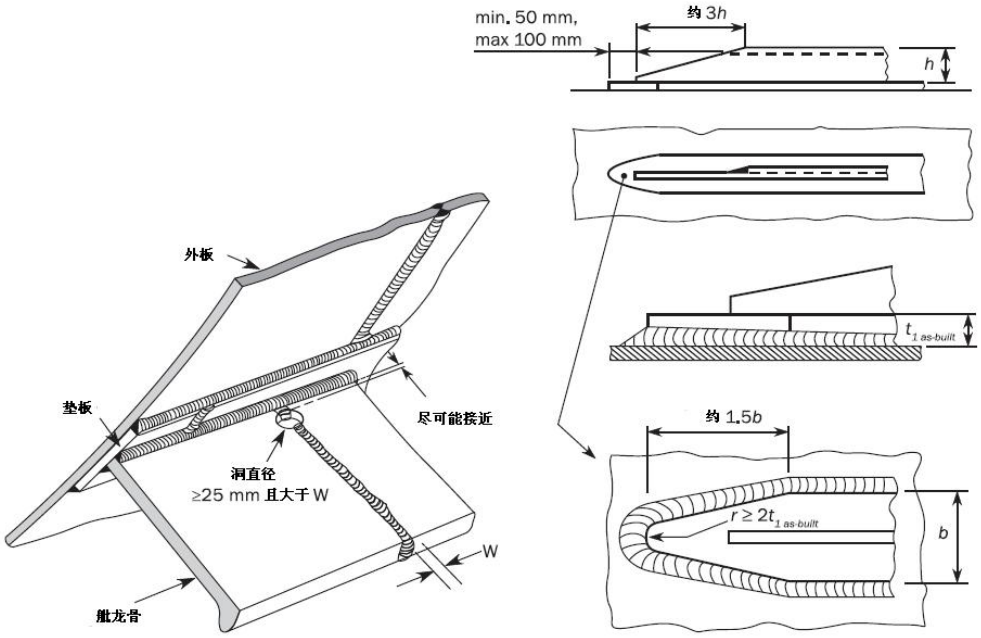


图 5.1.2 舭龙骨

5.1.3 垫板应采用连续角接焊缝，焊脚高度见表 5.1.1。垫板两端端面处，焊脚高度应根

据表 5.1.1 增加，但应不超过垫板的建造厚度，见图 5.1.2。垫板端面至船体板材的焊缝过渡应与板材形成 45 度或更小的角度。

5.1.4 通常不应采用扇形孔和切口。在舭龙骨对接焊缝上的止裂孔应尽可能靠近垫板，洞孔直径应大于对接焊缝的宽度，最小为 25mm。如对接焊缝已采用无损检测，则可不必开止裂孔。

5.2 支柱和撑材的端部连接

5.2.1 支柱和撑材端部连接的有效填角焊缝面积（焊喉乘以焊缝长度），cm^2，不小于：

$$A_{weld} = f_3 \left(\frac{235}{R_{eH_Weld}} \right)^{0.75} F$$

式中：

F——所考虑结构的设计载荷，kN

f_3——系数，取：

f_3=0.05，当支柱或撑材仅受压时

f_3=0.14，当支柱或撑材受拉时

5.3 小角度立板

5.3.1 如立板与所连接的板材之间的角度如图 5.3.1 中所示小于 75 度时，则较大角度一侧的角接焊缝的尺寸应按照下列公式增加：

$$l_\theta = \frac{l_{leg}}{\sqrt{2}\sin\frac{\theta}{2}}$$

式中：

l_{leg}——[2.5.2]定义的焊脚高度，mm

θ——如图 5.3.1 中所示连接角度，度

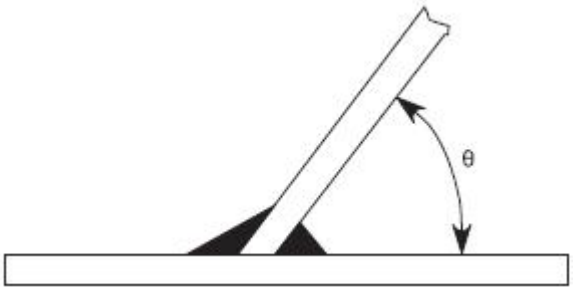


图 5.3.1 连接角度

5.3.2 θ小于 45 度的主要强力构件连接，见图 5.3.1，仅可以适用于干舱和空舱。

第 14 章　营运船舶换新衡准

第 1 节　原则和检验要求

1 原则

1.1 适用范围

1.1.1 本章的目的是提供船舶船体结构的许用厚度折减衡准。

1.1.2 本衡准仅适用于按照本规范入级的营运船舶。

1.1.3 应使用测量厚度根据规定的换新衡准评估船体结构。

1.2 腐蚀裕量概念

1.2.1 腐蚀裕量

腐蚀裕量包括两方面：局部腐蚀和总体腐蚀，定义见第 3 章第 2 节[1.1.2]。

1.2.2 评估

在船舶营运阶段，需要根据局部腐蚀和总体腐蚀换新衡准对船舶进行评估。

若任一船体结构的测量厚度大于本章第 2 节[2]规定的换新厚度，则在船舶营运阶段不需对已包括第 3 章第 3 节相关腐蚀增量并考虑了所有相关载荷及极限状态（如屈服、屈曲、疲劳）的新建船舶的要求进行评估。

1.2.3 钢材换新

若测厚结果超出了局部或总体腐蚀裕量，则要求采取钢材换新。

1.3 文件要求

1.3.1 图纸

第 1 章第 3 节所要求的船上应备的图纸，应包括本章第 2 节所定义的每一构件的建造厚度和换新厚度。所有自愿增加的厚度也要明确标示在图纸上。

船上所备图纸和信息的列表参见 CCS《钢质海船入级规范》第 1 篇。

2 船体检验要求

2.1 一般要求

2.1.1 最低船体检验要求

保持船级的最低船体检验要求，包括厚度测量的最低要求见 CCS《钢质海船入级规范》第 1 篇。

第 2 节　验收衡准

符号

$t_{as\text{-}built}$——建造厚度，mm。

t_c——第 3 章第 3 节确定的腐蚀增量，mm。

t_{res}——储备厚度，取 0.5mm。

t_{vol_add}——自愿增加厚度，mm。

1 一般要求

1.1　适用范围

1.1.1 本节给出验收衡准要求。

1.2　定义

1.2.1 甲板区域——

甲板区域包括参与船体梁强度的所有下列项目：

位于基线以上 0.9*D* 的水平面之上或穿过的构件，如：

- 强力甲板板
- 甲板边板
- 舷顶列板
- 舷侧外板
- 内壳和其他纵向舱壁板（如有）
- 与上述板材连接的纵骨、纵桁

1.2.2 船底区域

船底区域包括参与船体梁强度的下列项目：

内底板以下的构件：

- 龙骨板
- 船底板
- 舭列板
- 船底桁材
- 内底板
- 舷侧外板
- 与上述板材连接的纵骨

1.2.3 中和轴区域

中和轴区域包括甲板区域和船底区域之间的如下项，如：

- 舷侧外板
- 纵舱壁板

对于形成船体梁腹板的非垂直纵向强力构件，包括在该区域面积内的构件面积应是投影到垂直平面上的投影面积。

2 换新衡准

2.1 局部腐蚀

2.1.1 局部构件的换新厚度

局部构件包括局部支撑构件和主要支撑构件。

如果测量厚度 t_m，mm 小于换新厚度 t_{ren}，则构件需要换新，即：

$$t_{ren} = t_{as-built} - t_c - t_{vol_add}$$

2.1.2 换新区域

基于 [2.1.1] 换新衡准而需要换新的区域，通常应采用插入材料进行维修，该材料应等于或大于原构件建造时的等级和屈服应力，并且厚度 t_{repair}，mm，应不小于：

$$t_{repair} = t_{as-built} - t_{vol_add}$$

2.1.3 替代解决办法

当测量厚度 t_m 符合下式要求时，构件可不必换新，但在随后的年度检验中应对此构件予以测厚。如该构件已按涂层生产商的要求敷设保护涂层并且涂层状况为“良好”时，可不进行年度测厚：

$$t_{ren} \leqslant t_m < t_{ren} + t_{res}$$

2.1.4 对需满足本规范进水强度要求的槽形舱壁的换新，按本规范第 6 章第 7 节的相关要求。

2.2 总体腐蚀

2.2.1 适用范围

在船龄达到 15 年的特别检验时（或在船龄达到 15 年前的第 3 次特别检验时），应采用构件的测量厚度、换新厚度和加强厚度来评估船舶的总纵强度。

2.2.2 换新衡准

（1）船底区域和甲板区域：

用测量厚度确定的在甲板和船底处的现有船体梁剖面模数应不小于按第 5 章第 1 节用总提供厚度扣除 $0.5t_c$ 后计算的剖面模数。

（2）中和轴区域：

中和轴区域的现有剖面面积（此区域的测量板材面积的总和）应不小于总提供厚度扣除 $0.5t_c$ 后的中和轴区域剖面面积。

总提供厚度定义见第 3 章第 2 节。

附录 A　船体结构波激振动和砰击颤振直接计算评估方法

符号

H_S —— 有义波高，m；

T_Z —— 波浪平均跨零周期，s；

ω —— 波浪圆频率，rad/s；

θ —— 浪向角，随浪为 0°，迎浪为 180°；

g —— 重力加速度，取为 9.81 m/s^2；

m —— S-N 曲线反斜率；

Δm —— S-N 曲线两段反斜率差；

$\Gamma(x,v)$ —— 不完全 GAMMA 函数值；

$\Gamma(x)$ —— 完全 GAMMA 函数值；

T —— 计算疲劳寿命，s，$T = 3.1557 \times 10^7 f_t T_D$；

T_D —— 设计疲劳寿命，年；

f_t —— 船舶海上航行时间比例系数，应与第 10 章第 1 节 6.1.2 的规定一致；

n_l、n_s、n_h —— 分别为装载工况总数、海况总数和浪向总数；

p_n、p_j、p_i —— 分别为第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向的发生概率；

$\Delta\sigma_{HG,WV}$ —— 船体梁垂向波浪弯矩产生的应力范围，N/mm^2，按下式计算：

$$\Delta\sigma_{HG,WV} = \frac{M_{wv-h} - M_{wv-s}}{W_v} \times 10^{-3}$$

式中，M_{wv-h}—— 未考虑波激振动与砰击颤振影响的中拱波浪弯矩，kNm，按第 4 章第 4 节 3.2.1 计算；

M_{wv-s} —— 未考虑波激振动与砰击颤振影响的中垂波浪弯矩，kNm，按第 4 章第 4 节 3.2.1 计算；

W_v —— 计算点的垂向剖面模数，m^3；

ξ —— 应力范围长期 Weibull 分布的形状参数，按第 10 章第 3 节 5.2.1 选取；

N_R —— 对应于相应超越概率水平的循环数，按第 10 章第 3 节 5.2.1 选取。

f_{es}——线性波激振动影响系数，按本附录 3.3 计算；

f_{ews}——砰击颤振和波激振动影响系数，按本附录 4.4 计算。

1　一般要求

1.1 适用范围

1.1.1　本附录规定了波激振动和砰击颤振诱导载荷作用下船体结构疲劳强度和船体梁极限强度的评估方法。

1.1.2　考虑船体结构波激振动和砰击颤振的适用条件：

a）$L > 250$m；

b）$f_{ec} > f_{2n}$；

式中，f_{ec} —— 考虑波激振动和砰击颤振效应的临界波浪遭遇频率，Hz，按下式计算：

$$f_{ec} = 0.318 + 0.017V$$

其中，V —— 最大服务航速，m/s，定义见第 1 章第 4 节 2.1.1；

f_{2n} —— 船体梁垂向两节点振动频率，Hz，如无确切数据，按下式计算：

$$f_{2n} = 5.117 \times 10^4 \sqrt{\frac{I_{ov}}{\Delta_v L_{pp}^3}}$$

其中，I_{ov} —— 舯剖面垂向惯性矩，m^4；

L_{pp} —— 垂线间长，m；

Δ_v —— 包含附连水质量的船舶总质量，t，按下式计算：

$$\Delta_v = \left(1.2 + \frac{B}{3d}\right)\Delta$$

其中，B —— 型宽，m；

d —— 平均吃水，m；

Δ —— 船舶排水量，t。

c） $\alpha > 45°$。

其中，α —— 外飘角，定义为见第 4 章第 5 节 3.3.1，(°)，取艏柱后 0.1L 处夏季吃水线距最上层甲板垂直距离一半高度的水线位置。

1.1.3 对符合条件 a）和 b）的船舶，应根据本附录 3.3 进行计及线性波激振动的船舶结构疲劳强度评估；对符合条件 a）、b）和 c）的船舶，应根据本附录 4.4 进行计及砰击颤振和波激振动的船舶结构疲劳强度评估；对符合条件 a）的船舶，应根据本附录 5.3 进行计及砰击颤振的船体梁极限强度评估。

1.1.4 附加标志

按照本附录 3.3 进行疲劳强度评估的船舶，授予附加标志 SAF。

按照本附录 4.4 进行疲劳强度评估的船舶，授予附加标志 SWAF。

按照本附录 5.3 进行极限强度评估的船舶，授予附加标志 WAU。

1.1.5 本附录应与第 10 章和第 5 章相关规定一并使用进行船体结构的疲劳强度和极限强度评估。

1.2 波激振动和砰击颤振现象

1.2.1 当船体结构刚度较低、船舶航速较高时，在波浪激励下船体结构会发生持续的无明显衰减的高频振动，产生所谓的“波激振动”现象，它是一种船体结构与波浪作用之间的共振现象。波激振动一般在船体一阶总振动频率等于或接近船舶航行的波浪遭遇频率时发生，也就是线性波激振动；当船体一阶总振动频率等于或接近波浪遭遇频率的整数倍或双色（或多色）规则波的和频时，船体也会产生波激振动，即为非线性波激振动。波激振动由于具有高频特征，且一般在中低海况下发生，主要影响结构的疲劳强度。对波激振动可根据需要采用线性频域水弹性谱分析方法或非线性时域水弹性统计分析方法进行计算预报。

1.2.2 当船舶以较高航速在中高浪级中航行时，大幅的船波相对运动会使船体受到波浪的强烈冲击，船体结构由于砰击载荷的作用而发生瞬时的快速衰减的高频振动，产生所谓的“颤振”现象，它是一种波浪砰击对船体的强迫振动现象。颤振不仅使船体结构中的总应力水平达到较高的量级，影响船体梁极限强度，而且其高频特征也会影响结构的疲劳强度。由于砰击颤振的强非线性特征，应采用非线性时域水弹性统计分析方法进行计算预报。

1.2.3 对计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估，应采用线性频域水弹性谱分析方法进行计算预报；对计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估，应采用非线性时域水弹性统计分析方法进行计算预报，此时砰击颤振响应和波激振动响应是耦合在一起的。

1.3 基本假定

1.3.1 仅考虑波激振动和砰击颤振对船体梁垂向波浪弯矩的影响。

1.3.2　载荷直接计算应考虑水弹性响应效应。

1.3.3　计及波激振动和砰击颤振的船体结构疲劳强度评估方法应与第 10 章的相关规定一致。

1.3.4　计及砰击颤振的船体梁极限强度评估时所采用的许用静水弯矩、波浪弯矩以及船体梁极限承载能力等计算方法应与第 5 章对相关船型的规定一致。

1.3.5　船体梁垂向振动应至少取前三阶垂向振型。

1.4 波激振动和砰击颤振评估流程

1.4.1　计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估流程

基于线性水弹性理论和谱分析方法，计算船体梁垂向波浪弯矩。得到的波浪弯矩包含低频和高频分量，其中，低频分量为不含波激振动的垂向波浪弯矩（即，波频分量），高频分量为波激振动诱导的垂向波浪弯矩，总弯矩为包含低频分量和高频分量的垂向波浪弯矩。分别将垂向波浪弯矩的波频分量应力响应和总弯矩应力响应应用于疲劳损伤计算，按图 1 所示流程进行计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估。

1.4.2　计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估流程

基于非线性波浪载荷时域分析方法，计算船体梁垂向波浪弯矩的时间历程，包含砰击颤振和波激振动诱导弯矩。得到的波浪弯矩包含低频和高频分量，其中，低频分量为不含砰击颤振和波激振动的垂向波浪弯矩（即，波频分量），高频分量为砰击颤振和波激振动诱导的垂向波浪弯矩，总弯矩为包含低频分量和高频分量的垂向波浪弯矩。分别将垂向波浪弯矩的波频分量应力响应和总弯矩应力响应应用于疲劳损伤计算，按图 2 所示流程进行计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估。

1.4.3　计及砰击颤振的船体梁极限强度评估流程

基于非线性波浪载荷时域分析方法，计算船体梁垂向波浪弯矩的时间历程，包括弹性体砰击颤振诱导弯矩和刚体非线性波浪诱导弯矩。对不同海况下弯矩响应峰值进行 Weibull 拟合分析，并考虑航速、浪向、海况等累积概率按长期极值预报理论确定弹性体颤振弯矩和刚体非线性弯矩的极值。根据两种弯矩极值考虑砰击颤振导致船体梁波浪弯矩的增加，按图 3 所示流程进行计及砰击颤振的船体梁极限强度评估。

2　计算条件

2.1 装载工况

2.1.1　用于评估计及波激振动和砰击颤振的船体结构疲劳强度的装载工况一般应与第 10 章第 1 节 6.1.2 的规定一致，特殊情况可另行考虑。

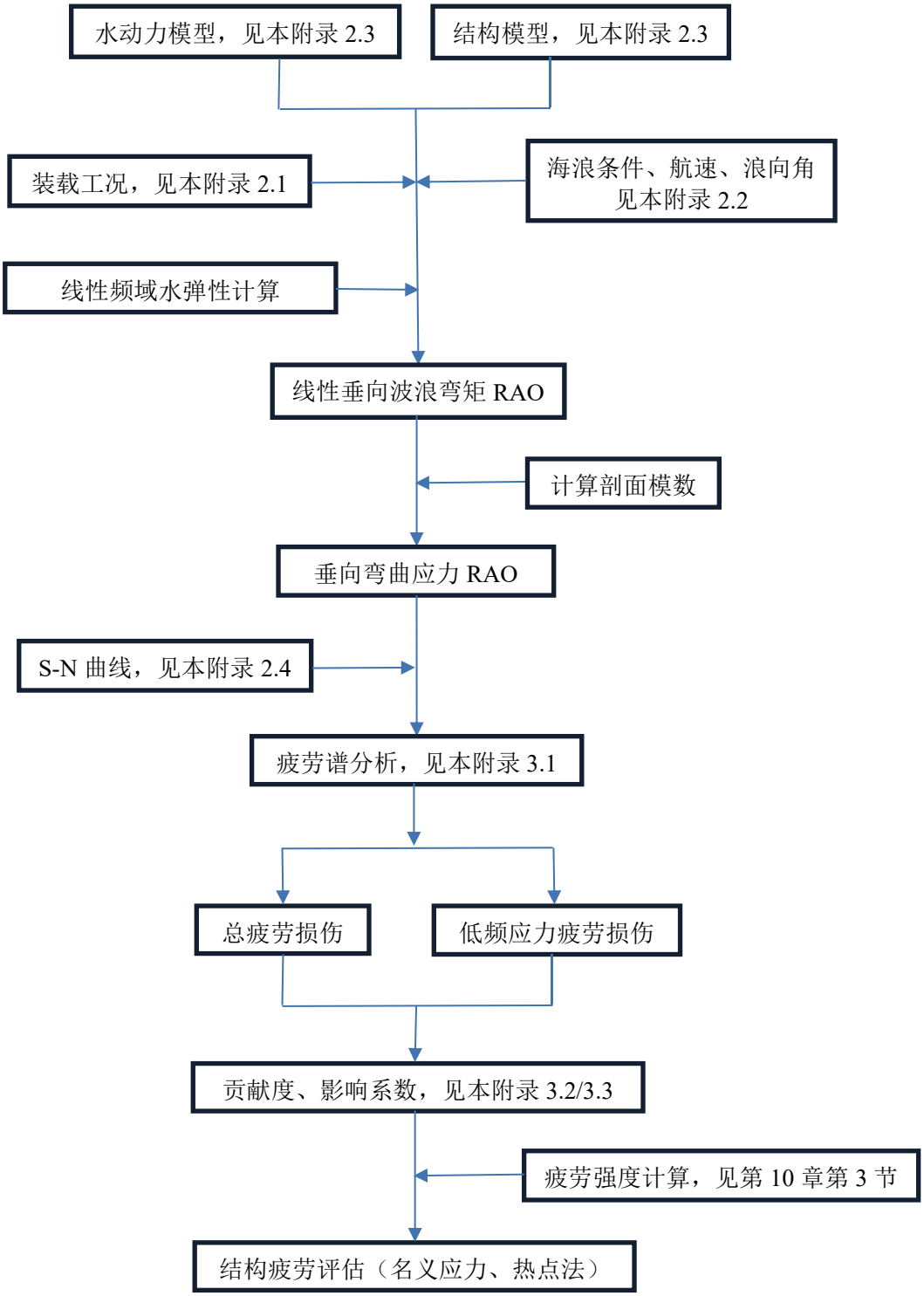


图 1 计及线性波激振动的船舶结构疲劳强度评估流程

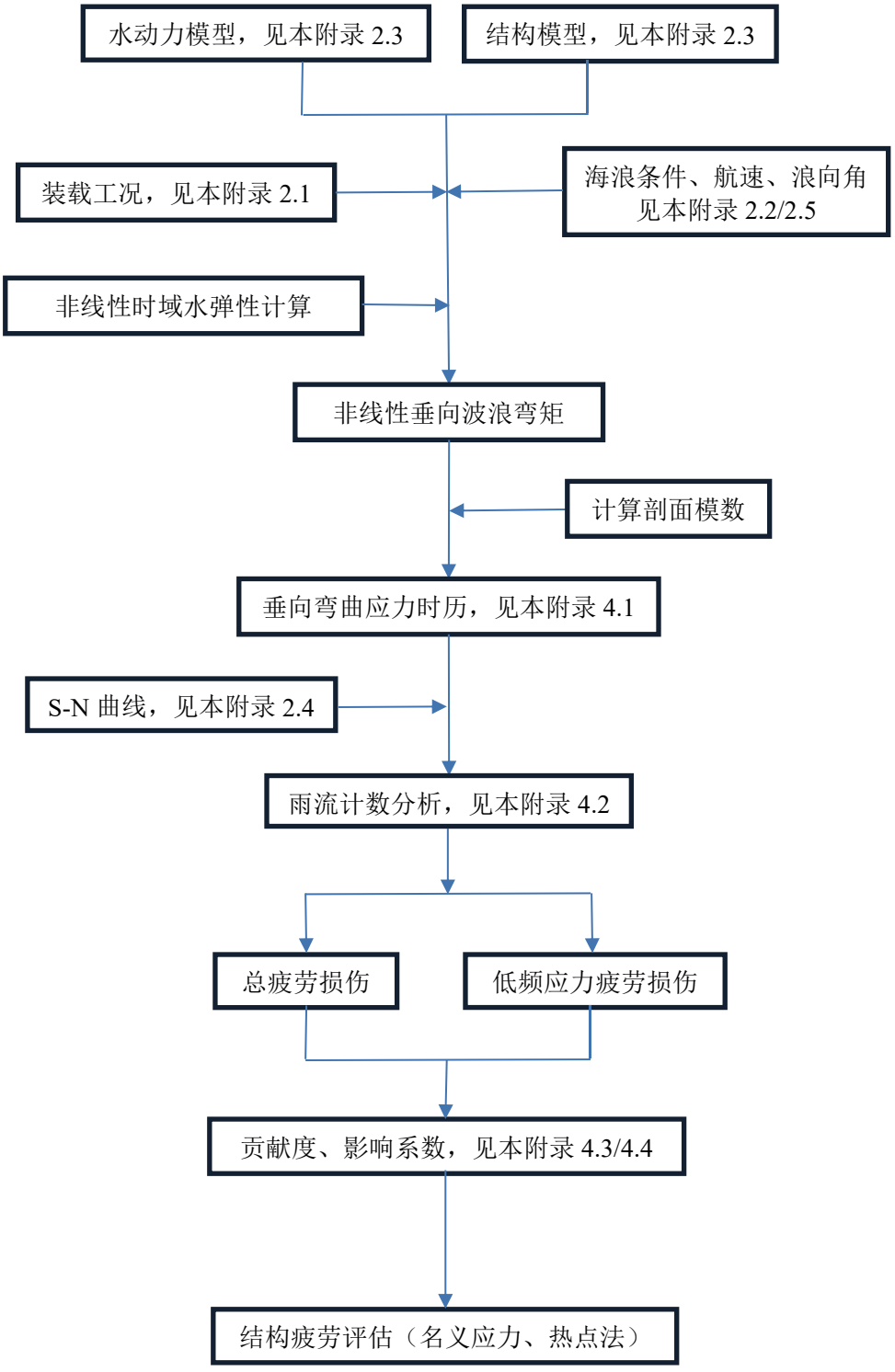


图 2 计及砰击颤振和波激振动的船舶结构疲劳强度评估流程

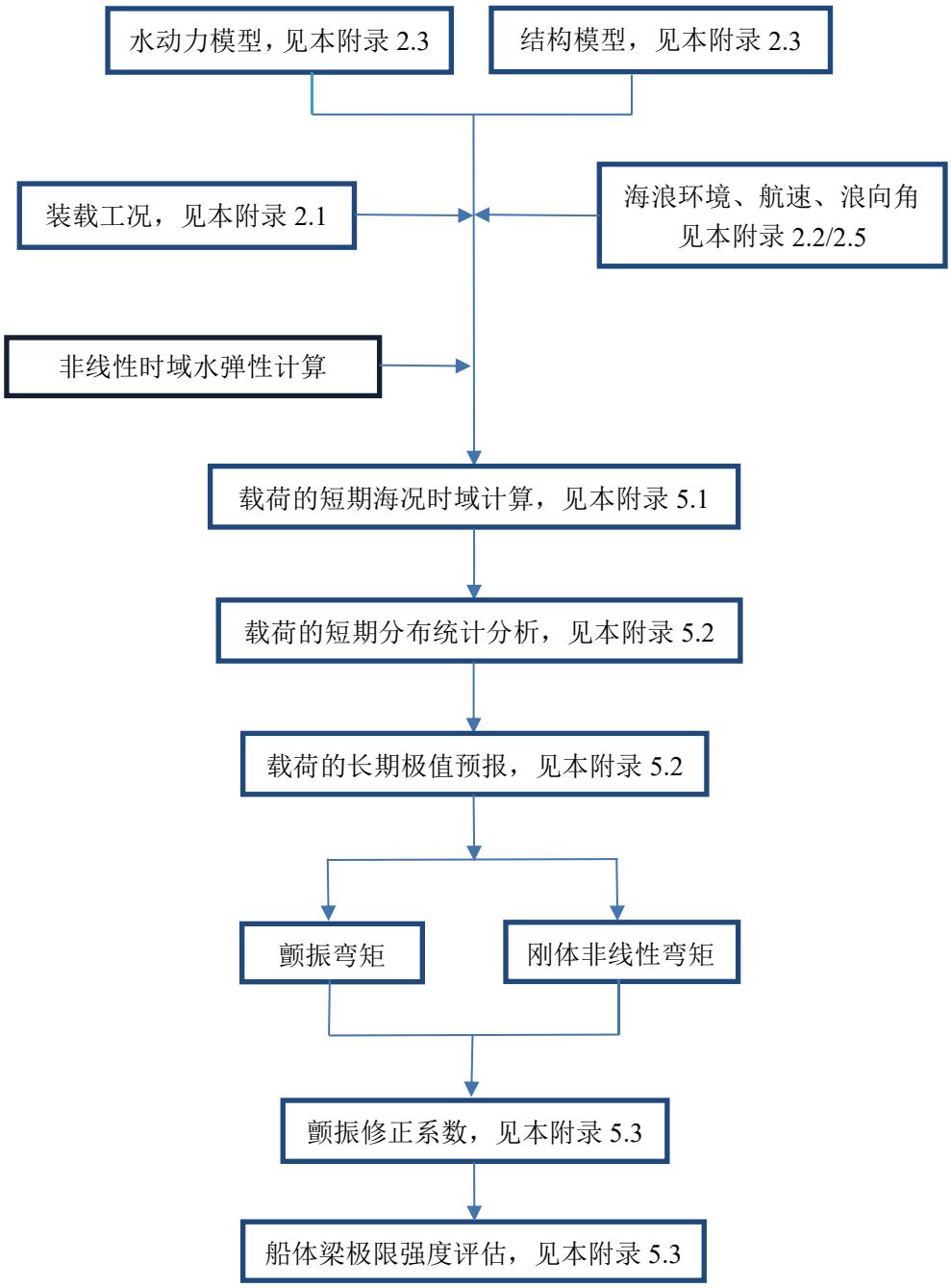


图 3 计及砰击颤振的船体梁极限强度评估流程

2.1.2　用于评估矿砂船计及砰击颤振的船体梁极限强度的装载工况，应根据装载手册分别选取使静水中拱弯矩和静水中垂弯矩达到最大的航行工况。

2.2 波浪环境

2.2.1　海浪散布图

对无限航区船舶，一般采用 IACS Rec.34 推荐的北大西洋海浪散布图。特殊情况可另行考虑。

2.2.2　海浪谱

海浪的功率谱密度函数$S(\omega)$一般采用双参数 P-M 谱：

$$S(\omega)=\frac{124H_S^2}{T_Z^4}\omega^{-5}exp\left(-\frac{496}{T_Z^4}\omega^{-4}\right)$$

实际响应频率为遭遇频率ω_e应按下式计算：

$$\omega_e=\omega\left(1-\frac{\omega V_c}{\mathrm{g}}cos\theta\right)$$

式中，V_c —— 计算航速，m/s，见本附录 2.2.3。

2.2.3　航速

除指定航速外，波激振动和砰击颤振计算一般采用四种计算航速V_c，分别按下式计算，且不应小于 5kn：

$$V_c=\begin{cases}100\%V & \text{当 } 0<H_S\leq 6.0\mathrm{m} \text{ 时}\\ 75\%V & \text{当 } 6.0\mathrm{m}<H_S\leq 9.0\mathrm{m} \text{ 时}\\ 50\%V & \text{当 } 9.0\mathrm{m}<H_S\leq 12.0\mathrm{m} \text{ 时}\\ 25\%V & \text{当 } 12.0\mathrm{m}<H_S \text{时}\end{cases}$$

2.2.4　浪向角

除实际船舶设计中指定各浪向角和相应的发生概率以外，一般在 0°至 360°之间，取浪向角间隔不大于 30°，各浪向角的发生概率相等。

2.3 计算要求

2.3.1　水动力计算

（1）对任一计算装载工况，其水动力模型应根据纵倾和稳性计算手册校核排水量、纵倾角、浮心纵向位置、静水弯矩等，其主要参数误差应控制在以下范围：

排水量：$\pm 1\%$；

纵倾角：± 0.1 (°)；

浮心纵向位置：$\pm 0.2\%L$；

静水弯矩：$\pm 10\%$。

同时，也应注意检查艏艉吃水和纵横稳性高数据。

（2）初稳性高应考虑对未装满液舱的自由液面修正，如液舱中液体的装载高度大于液舱高度的 98%或低于 2%，则可不对稳性高进行自由液面修正。

（3）粘性横摇阻尼可采用附录 A.1-1.1 的数值模型进行确定。

（4）在对线性波激振动响应传递函数 RAO 计算中，船舶遭遇频率范围应能至少覆盖船体梁两节点振动频率，推荐波频输入范围为[0,3.0]rad/s，频率步长不大于 $0.3\sqrt{\mathrm{g}/L}$。

（5）采用三维水动力模型计算，其网格单元尺寸应考虑与最小遭遇波长、航速及不规则波频的匹配，以达到稳定收敛的数值解。水动力模型湿表面网格数目应不小于 5000。

2.3.2　振动模态计算

将船体结构简化为两端自由的变截面梁模型（至少 21 个剖面），可采用迁移矩阵法或有限元方法计算船体梁振动的干模态，并应考虑船体长度方向上的重量分布和各剖面垂向振动转动惯量、剪切面积及抗弯惯性矩。

2.3.3　船体结构的应力响应可采用梁模型或有限元等方法进行计算。

2.3.4　结构阻尼可采用附录 A.1-2.1 的数值模型进行确定。

2.4 疲劳计算 S-N 曲线

2.4.1　一般采用本附录 2.4.2 所给定的 S-N 曲线形式。如采用其他 S-N 曲线形式，本附录 3.1.2 的疲劳损伤计算公式应另行考虑。

2.4.2　S-N 曲线的一般表达如下式：

$$\begin{cases} NS^m = C & \text{当} S > S_Q \\ NS^{m+\Delta m} = K & \text{当} S \le S_Q \end{cases}$$

式中，S —— 应力范围，$\mathrm{N/mm^2}$；

N —— 对应于 S 的疲劳失效循环次数；

C、K —— S-N 曲线常数；

S_Q —— S-N 曲线二线段交点处的应力范围值，$\mathrm{N/mm^2}$。

2.5 砰击颤振计算工况简化

2.5.1　对无限航区船舶，可采用本章 2.5.2 和 2.5.3 规定的简化工况进行非线性时域砰击颤振计算评估。

2.5.2　砰击颤振疲劳载荷计算工况

对砰击颤振疲劳载荷的计算，可按如下方案选取计算工况：

（1）　浪向角：顶浪至顶斜浪 60°范围，间隔不大于 30°，发生概率按全浪向等概率确定；

（2）　海况：IACS Rec.34 海浪散布图中有义波高在 12m 以下、且发生概率在 0.0001 以上的 98 个海况。

2.5.3　砰击颤振极限载荷计算工况

对砰击颤振极限载荷的计算，可按如下步骤进行计算工况的筛选：

（1）　对船中剖面垂向波浪弯矩做全浪向线性幅频响应算子（RAO）计算；

（2）　按 IACS Rec.34 海浪散布图对垂向波浪弯矩做全浪向全海况短期预报；

（3）　根据线性短期预报结果作长期极值分析，按如下方案选取计算工况：

1)　浪向角：顶浪至顶斜浪 30°范围，间隔不大于 30°，发生概率按全浪向等概率确定；

2)　海况：有义波高在 12m 以上，对垂向波浪弯矩长期极值贡献率最大的 50 个海况。

采用简化工况计算的垂向波浪弯矩线性长期极值应不低于全浪向全海况线性长期极值的 98.5%，如不满足要求则应按贡献率增加计算海况。

3　线性波激振动作用下的船体结构疲劳强度评估

3.1 疲劳损伤计算

3.1.1　应力范围的短期分布

（1）垂向波浪弯矩波频分量的应力响应

应力的响应谱$S_\sigma(\omega)$应按下式计算：

$$S_\sigma(\omega) = |H_\sigma(\omega)|^2 S(\omega)$$

式中：$S(\omega)$ —— 海浪的功率谱密度函数，见本附录 2.2.2；

$H_\sigma(\omega)$ —— 应力响应的传递函数，$(\mathrm{N}/mm^2)/\mathrm{m}$，应按下式计算：

$$H_\sigma(\omega) = \frac{H(\omega)}{W_v} \times 10^{-3}$$

其中，$H(\omega)$ —— 船舶剖面垂向弯矩的传递函数，$(\mathrm{kN \cdot m})/\mathrm{m}$；

W_v —— 计算点的垂向剖面模数，m^3。

功率谱密度的 0 阶矩m_0、2 阶矩m_2和 4 阶矩m_4，应分别按下式计算：

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S_\sigma(\omega) d\omega \quad (n = 0,2,4)$$

交变应力过程的标准差σ_x为应力响应谱 0 阶矩的函数：

$$\sigma_x = \sqrt{m_0}$$

波浪载荷引起的应力平均跨零频率f_0应按下式计算：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$

带宽修正系数$\lambda(m,\varepsilon)$应按下式计算：

$$\lambda(m,\varepsilon) = a(m) + [1 - a(m)](1-\varepsilon)^{b(m)}$$

式中：$a(m) = 0.926 - 0.033m$；

$b(m) = 1.587m - 2.323$；

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}$$。

（2） 船体水弹性总弯矩的应力响应

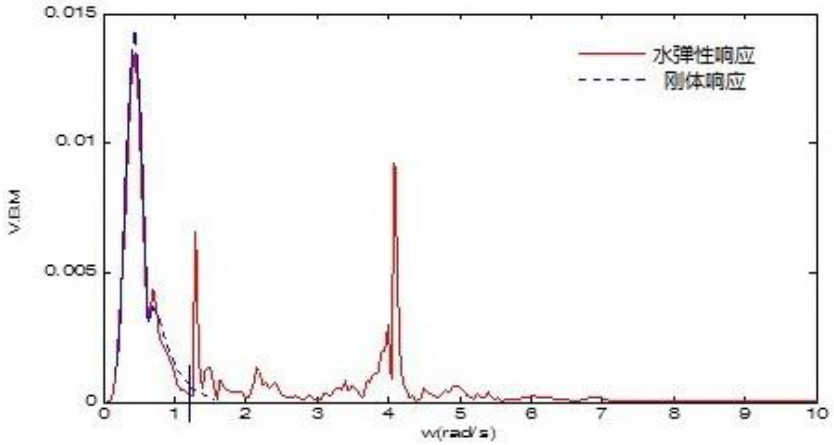
波频分量（刚体响应）和波激振动分量（水弹性高频响应）的窄带应力响应统计特性值（如响应的标准差），应分别按如下各式计算：

波频分量：$m_{wave-n} = \int_0^{\omega_1} \omega^n S_\sigma(\omega) d\omega$

波激振动分量：$m_{springing-n} = \int_{\omega_1}^\infty \omega^n S_\sigma(\omega) d\omega$

式中：$S_\sigma(\omega)$ —— 应力的响应谱密度函数，见本附录 3.1.1（1）；

ω_1 —— 波频分量和波激振动分量之间的临界频率值，见图 4。



ω图 4 典型船舶弹性体垂向波浪弯矩频域响应

波频分量的跨零频率f_{wave}和波激振动分量的跨零频率$f_{springing}$，应分别按如下各式计算：

$$f_{wave}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_{wave-2}}{m_{wave-0}}}$$

$$f_{springing}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_{springing-2}}{m_{springing-0}}}$$

式中：m_{wave-0}、m_{wave-2} —— 分别为波频分量的 0 阶矩和 2 阶矩；

$m_{springing-0}$、$m_{springing-2}$ —— 分别为波激振动分量的 0 阶矩和 2 阶矩。

应力标准差σ_i、跨零频率f_0及应力范围带宽修正系数$\lambda(m,\varepsilon)$，应分别按如下各式计算：

$$\sigma_i=\sqrt{m_{springing-0}+m_{wave-0}}$$

$$f_0=\frac{\sqrt{f_{springing}^2 m_{springing-0}+f_{wave}^2 m_{wave-0}}}{\sigma_i}$$

$$\lambda(m,\varepsilon)=\frac{\nu_p}{\nu_c}\left[\lambda_H^{m/2+2}\left(1-\sqrt{\frac{\lambda_w}{\lambda_H}}\right)+\frac{m\Gamma\left(\frac{m}{2}+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m}{2}+1\right)}\sqrt{\pi\lambda_w\lambda_H}\right]+\frac{\nu_w}{\nu_c}\lambda_w^{m/2}$$

式中：$\nu_p=\lambda_H\nu_H\sqrt{1+\frac{\lambda_w}{\lambda_H}\left(\frac{\nu_w}{\nu_H}\varepsilon\right)^2}$；

$$\nu_c=\sqrt{\lambda_H\nu_H^2+\lambda_w\nu_w^2}\ ;$$

$$\lambda_H=\frac{m_{springing-0}}{\sigma_i^2};$$

$$\lambda_w=\frac{m_{wave-0}}{\sigma_i^2};$$

$\nu_H=f_{springing}$ ；

$\nu_w=f_{wave}$ ；

$$\varepsilon=\sqrt{1-\frac{m_2^2}{m_0 m_4}}。$$

3.1.2　疲劳累积损伤度计算

设计疲劳寿命期内，波频分量和波激振动引起宽带应力响应所产生的总疲劳损伤度D_S，应按下式计算：

$$D_S=\frac{T}{C}\left(2\sqrt{2}\right)^m\Gamma\left(1+\frac{m}{2}\right)\sum_{n=1}^{n_l}\sum_{j=1}^{n_s}\sum_{i=1}^{n_h}\left[\lambda_{nji}p_n p_j p_i f_{0,nji}\left(\sigma_{nji}\right)^m\mu_{nji}\right]$$

式中：λ_{nji} —— 第 n 装载工况、第 j 海况、第 i 浪向垂向波浪弯矩波频分量或总弯矩应力响应的带宽修正系数，分别按本附录 3.1.1（1）或 3.1.1（2）中的$\lambda(m,\varepsilon)$计算；

$f_{0,nji}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况、第 i 浪向垂向波浪弯矩波频分量或总弯矩应力响应的跨零上穿频率，1/s，分别按本附录 3.1.1（1）或 3.1.1（2）中的f_0计算；

σ_{nji} —— 第 n 装载工况、第 j 海况、第 i 浪向垂向波浪弯矩波频分量或总弯矩应力响应的标准差，$\mathrm{N/mm^2}$，分别按本附录 3.1.1（1）中的σ_x或 3.1.1（2）中的σ_i计算；

$$\mu_{nji} = 1 - \frac{\Gamma\left[1+\frac{m}{2}, \nu_{nji}^2\right] - \nu_{nji}^{-\Delta m}\Gamma\left[1+\frac{m+\Delta m}{2}, \nu_{nji}^2\right]}{\Gamma\left[1+\frac{m}{2}\right]}；$$

$$\nu_{nji} = \frac{S_Q}{2\sqrt{2}\sigma_{nji}}。$$

3.2 线性波激振动对疲劳损伤的贡献度

3.2.1 线性波激振动对疲劳损伤的贡献度α_S，应按下式计算，且不应小于零：

$$\alpha_S = \frac{D_{total,S}}{D_{wave,S}} - 1$$

式中：$D_{wave,S}$ ——垂向波浪弯矩波频分量应力响应（见附录 3.1.1（1））产生的疲劳累积损伤，按本附录 3.1.2 计算；

$D_{total,S}$ ——垂向波浪总弯矩应力响应（见附录 3.1.1（2））产生的疲劳累积损伤，按本附录 3.1.2 计算。

3.3 计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估

3.3.1 线性波激振动影响系数f_{es}应满足下式：

$$\alpha_S = f_{es}^m \cdot \frac{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right) - \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_{ts}\right) + \nu_{ts}^{-\frac{\Delta m}{\xi}} \cdot \Gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_{ts}\right)}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right) - \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_{ws}\right) + \nu_{ws}^{-\frac{\Delta m}{\xi}} \cdot \Gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_{ws}\right)} - 1$$

式中：α_S —— 线性波激振动对疲劳损伤的贡献度，按本附录 3.2.1 计算；

$$\nu_{ts} = \left(\frac{S_Q}{f_{es} \cdot \Delta\sigma_{HG,WV}}\right)^{\xi} lnN_R；$$

$$\nu_{ws} = \left(\frac{S_Q}{\Delta\sigma_{HG,WV}}\right)^{\xi} lnN_R。$$

3.3.2 计及线性波激振动的船体结构疲劳强度评估应按第 10 章的相关规定进行计算，所采用的船体梁垂向波浪弯矩应乘以线性波激振动影响系数f_{es}。

4 砰击颤振和波激振动作用下的船体结构疲劳强度评估

4.1 应力响应时间历程

4.1.1 根据本附录 1.4.2 的要求，应将非线性时域计算得到的船体梁垂向波浪弯矩的时间历程转化为疲劳计算点的应力时间历程。

4.1.2 用于疲劳分析的载荷历程应具有足够多的统计样本，一般取 1 小时时间历程。

4.2 疲劳损伤计算

4.2.1　垂向波浪弯矩波频分量引起的疲劳累积损伤度

采用雨流计数法对应力波频分量进行计数统计，获得各装载工况、海况和浪向角下的应力范围$S_{w,k}$和相应的应力循环次数$n_{nji}(S_{w,k})$。

结合 S-N 曲线和 Miner 线性累积损伤准则，单位时间内第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角的疲劳损伤度d_{nji}，应按下式计算：

$$d_{nji,w} = \sum_{k=1}^{n_{S,w}} \frac{n_{nji}(S_{w,k})}{N(S_{w,k}) \cdot t_{nji,w}}$$

式中：$n_{nji}(S_{w,k})$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下第 k 个应力范围$S_{w,k}$的循环次数；

$N(S_{w,k})$ —— 根据 S-N 曲线获得的对应于应力范围$S_{w,k}$的疲劳失效循环次数；

$n_{S,w}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下应力范围的个数；

$t_{nji,w}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下载荷的拟合时间，s。

计算点处波频分量的疲劳累积损伤度$D_{wave,t}$应按下式计算：

$$D_{wave,t} = T \sum_{n=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_h} p_n p_j p_i d_{nji,w}$$

4.2.2　总弯矩引起的疲劳累积损伤度

采用雨流计数法对总弯矩产生的应力进行计数统计，获得各装载工况、海况和浪向角下的应力范围$S_{t,k}$和相应的应力循环次数$n_{nji}(S_{t,k})$。

结合 S-N 曲线和 Miner 线性累积损伤准则，单位时间内第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角的疲劳损伤度d_{nji}，应按下式计算：

$$d_{nji,t} = \sum_{k=1}^{n_{S,t}} \frac{n_{nji}(S_{t,k})}{N(S_{t,k}) \cdot t_{nji,t}}$$

式中：$n_{nji}(S_{t,k})$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下第 k 个应力范围$S_{t,k}$的循环次数；

$N(S_{t,k})$ —— 根据 S-N 曲线获得的对应于应力范围$S_{t,k}$的疲劳失效循环次数；

$n_{S,t}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下应力范围的个数；

$t_{nji,t}$ —— 第 n 装载工况、第 j 海况和第 i 浪向角条件下载荷的拟合时间，s。

计算点处总弯矩的疲劳累积损伤度$D_{total,t}$应按下式计算：

$$D_{total,t} = T \sum_{n=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_h} p_n p_j p_i d_{nji,t}$$

4.3 砰击颤振和波激振动对疲劳损伤的贡献度

4.3.1　砰击颤振和波激振动对疲劳损伤的贡献度α_{WS}，应按下式计算，且不应小于零：

$$\alpha_{WS} = \frac{D_{total,t}}{D_{wave,t}} - 1$$

式中：$D_{wave,t}$ —— 垂向波浪弯矩波频分量应力响应产生的疲劳累积损伤，按本附录 4.2.1 计算；

$D_{total,t}$ —— 垂向波浪总弯矩应力响应产生的疲劳累积损伤，按本附录 4.2.2 计算。

4.4 计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估

4.4.1　砰击颤振和波激振动影响系数f_{ews}应满足下式：

$$\alpha_{WS}=f_{ews}^{m}\cdot\frac{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)-\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\nu_{tws}\right)+\nu_{tws}^{-\frac{\Delta m}{\xi}}\cdot\Gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\nu_{tws}\right)}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)-\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\nu_{ws}\right)+\nu_{ws}^{-\frac{\Delta m}{\xi}}\cdot\Gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\nu_{ws}\right)}-1$$

式中：α_{WS} ——砰击颤振和波激振动对疲劳损伤的贡献度，按本附录 4.3.1 计算；

$$\nu_{tws}=\left(\frac{S_Q}{f_{ews}\cdot\Delta\sigma_{HG,WV}}\right)^{\xi}lnN_R\ ;$$

$$\nu_{ws}=\left(\frac{S_Q}{\Delta\sigma_{HG,WV}}\right)^{\xi}lnN_R\ 。$$

4.4.2　计及砰击颤振和波激振动的船体结构疲劳强度评估应按第 10 章的相关规定进行计算，所采用的船体梁垂向波浪弯矩应乘以砰击颤振和波激振动影响系数f_{ews}。

5　砰击颤振作用下的船体梁极限强度评估

5.1 垂向波浪弯矩时间历程

5.1.1　根据本附录 1.4.3 的流程，对垂向波浪弯矩采用短期海况下非线性时域计算，应同时计算砰击颤振弯矩时间历程和不考虑颤振效应的刚体非线性弯矩时间历程。

5.1.2　用于极值分析的载荷历程应具有足够多的统计样本，一般取 3 小时时间历程。

5.2 垂向波浪弯矩极值分析

5.2.1　对非线性时域计算得到的各短期海况下垂向波浪弯矩峰值进行 Weibull 分布参数拟合，其累积分布函数$F_0(x)$ 应按下式计算：

$$F_0(x)=1-e^{-\left(\frac{x-\delta}{\eta}\right)^{\beta}}$$

式中：η —— 尺度参数；

β —— 形状参数；

δ —— 位置参数，可取$\delta=0$。

5.2.2　对垂向波浪弯矩，长期极值的超越概率$Q(x)$取 10^{-8}，对应的极值应按下式计算：

$$Q(x)=P\{X\geq x\}=\sum_i\sum_j p_j p_i(1-F_{0ji}(x))$$

式中：X —— 对应超越概率下的垂向弯矩极值；

$F_{0ji}(x)$ —— 第 j 海况和第 i 浪向角条件下的垂向波浪弯矩峰值累积分布函数，按本附录 5.2.1 计算。

5.3 计及砰击颤振的船体梁极限强度评估

5.3.1　船体梁任一横剖面处的极限弯曲能力应满足以下要求：

$$\gamma_s M_{sw}+\gamma_{whip}f_{whip}M_{wv}\leq\frac{M_U}{\gamma_M\gamma_{DB}}$$

式中，M_{sw} —— 许用静水弯矩，kNm，按第 5 章第 3 节 2.1.1 的相关规定计算；

M_{wv} —— 垂向波浪弯矩，kNm，按第 5 章第 3 节 2.1.1 的相关规定计算；

M_U —— 船体梁垂向极限弯曲能力，kNm，按第 5 章第 3 节 3.2.1 的相关规定计算；

γ_s —— 对应于静水弯矩的分项安全系数，按第 5 章第 3 节 2.1.1 的相关规定选取；

γ_M、γ_{DB} —— 对应于船体梁极限弯曲能力的分项安全系数，按第 5 章第 3 节 4.4.1 的相关规定选取；

γ_{whip} —— 对应于颤振弯矩影响的分项安全系数，取为：

$\gamma_{whip} = 1.05$；

f_{whip} —— 颤振修正系数，对中拱和中垂分别给出，应按下式计算：

$$f_{whip} = C_{un}\frac{M_{whip}}{M_{nonl}}$$

其中，M_{whip} —— 按本附录 5.2.2 计算得到的颤振中拱或中垂弯矩极值；

M_{nonl} —— 按本附录 5.2.2 计算得到的不考虑颤振效应的刚体非线性中拱或中垂弯矩极值；

C_{un} —— 计及工况简化和随机波影响及其他计算不确定性的修正系数，取

$C_{un} = 1.154$；

附录 A.1　阻尼数值模型

1 横摇阻尼模型

1.1 在船舶耐波性计算过程中，需在船体运动方程中计入附加阻尼力，以模拟船体的粘性横摇阻尼和各类附体产生的横摇阻尼作用。对非线性横摇阻尼，可建立由线性阻尼项和二次阻尼项组成的模型如下：

$$B_{44} = B_1 + B_2\left|\dot{\xi}_4\right| = \left(b_1 + b_2\frac{\left|\dot{\xi}_4\right|}{\omega_4}\right)B_4^{crit}$$

式中：B_{44}——横摇阻尼；

B_1、B_2——分别为线性阻尼系数和二次阻尼系数；

$\dot{\xi}_4$、ω_4——分别为横摇角速度和横摇圆频率，rad/s；

B_4^{crit} ——横摇临界阻尼，应按下式计算：

$$B_4^{crit} = 1025 \cdot \Delta \cdot \mathrm{g} \cdot \frac{GM \cdot T_R}{\pi}$$

其中：Δ—— 船舶排水量，t；

GM—— 初稳性高度，m；

T_R—— 横摇周期，s。

以临界阻尼值B_4^{crit}做无量纲化，则该模型由两个系数决定，即与临界阻尼值线性相关的系数b_1和与横摇角速度相关的二次项系数b_2。当在线性频域内求解时，可只确定线性阻尼项，需给定系数b_1。横摇阻尼B_{44}可采用试验或经验公式确定，如无适用，可取为横摇临界阻尼的 5%。

2 结构阻尼模型

2.1 水弹性计算时，可采用在波浪阻尼项中加入附加阻尼的方法，以考虑结构阻尼和货物阻尼的影响。结构阻尼一般在临界阻尼值的 1%至 3%之间，对高阶振动模态，其值会增大。结构阻尼模型如下：

$$B_{ii} = \eta_{ii}\frac{K_{ii}T_{ii}}{\pi}$$

式中：B_{ii} ——第i阶振动模态下的附加阻尼；

K_{ii} ——第i阶振动模态下含静水力和结构的总刚度；

T_{ii} ——第i阶振动模态下的自振周期；

η_{ii} ——第i阶振动模态下，表达为临界阻尼百分数的系数。

加入结构阻尼力时，应保证计算剖面处水动力与惯性力的良好平衡。结构阻尼可采用试验或经验公式确定，如无适用，η_{ii}可取 1%和 3%分别用于船舶压载和满载工况。