

规 范 文 件
R005AM01-2024

中 国 船 级 社

国内航行海船建造规范

修 改 通 报

2024

2024 年 7 月 1 日生效

北 京



中　国　船　级　社

国内航行海船建造规范

修 改 通 报

2024

第 2 篇　船　　体

目　录

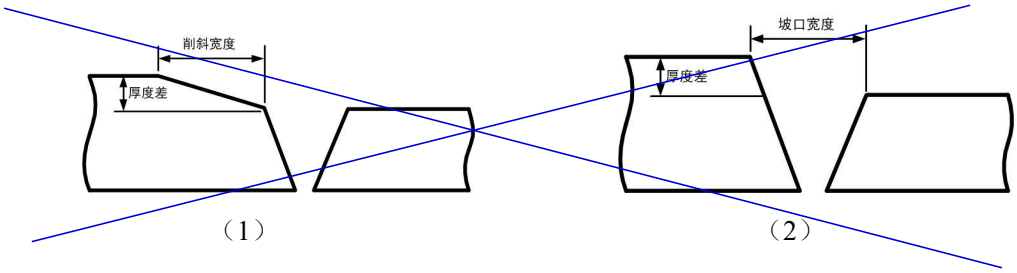
第 1 章　通则 1
第 4 节　船体结构的焊缝设计 1
第 7 节　有限航区 1
第 9 节　船首甲板装置 1
第 2 章　船体结构 2
第 1 节　一般规定 2
第 17 节　上层建筑及甲板室 2
第 20 节　舱口和舱口盖 2
附录 4　船舶结构单元屈曲强度评估 36
第 3 章　舾装 85
第 1 节　舵 85
第 2 节　锚泊及系泊设备 89
附录 1　弯矩及剪力分布计算指南 91
附录 3　锚泊设备载荷计算 95
第 8 章　散货船 98
第 1 节　一般规定 98
第 8 节　货舱舱口盖 98
第 9 节　双舷侧结构 98
第 9 章　滚装船、客船、客滚船与渡船 99
第 2 节　船体结构 99
第 8 节　露天玻璃栏杆 99
第 12 章　驳船 102
第 1 节　一般规定 102

第 1 章　通　　则

第 4 节　船体结构的焊缝设计

1.4.3　对接、搭接与塞焊焊缝

1.4.3.1　不同厚度钢板进行对接，若其单侧厚度差小于等于 4mm 时，可在焊缝宽度内使焊缝的外形均匀过渡。若其单侧厚度差大于 4mm 时，应将厚板的边缘削斜，使其与焊缝均匀过渡，~~削斜的~~宽度应不小于单侧厚度差的 3 倍，坡口两边的高度差 d 不大于 4mm，如图 1.4.3.1(1)所示~~。；若其厚度差大于 4mm 且~~但坡口宽度不小于单侧厚度差的 3 倍时，不必削斜，可在焊缝宽度内使焊缝的外形均匀地过渡，~~不必削斜，~~如图 1.4.3.1(2)所示。



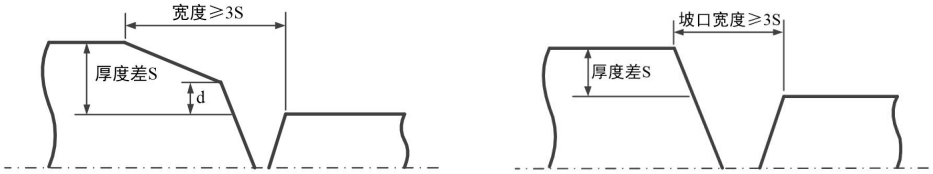


图 1.4.3.1　不同厚度钢板对接示意图

第 7 节　有限航区

1.7.3 构件规范尺寸的折减

1.7.3.6 平板龙骨的厚度应不小于船底板规范要求厚度计算值加 1.5mm，且不小于相邻船底板的厚度。

第 9 节　船首甲板装置

1.9.2　船首露天甲板小舱口的强度与锁紧

1.9.2.1　本条的规定适用于所有船长 80m 及以上的船舶，距夏季载重线以上高度小于 0.1*L* 或 22m，取其小者，在船首 0.25*L* 区域露天甲板上的小舱口的强度与锁紧。本条的规定不适用于满足 UI LL64（除 UI LL64 的第 4 和第 5 条要求外）的集装箱船上通往货舱的小舱口盖，此类舱口盖应视为非风雨密（无论其自身是否为风雨密），但对于此类小舱口盖的尺寸，本节 1.9.2.4~1.9.2.7 的要求可用于替代 UI LL64 的第 6 条要求。

第 2 章　船体结构

第 1 节　一般规定

2.1.1　适用范围

2.1.1.1　本章规定主要适用于干货船。本章无规定者，按本篇第 1 章的要求。

2.1.1.2　本章适用的基本结构形式为多层甲板或单层甲板且设有单层底或双层底，以及正常尺度的舱口布置。

2.1.1.3　船底和强力甲板开口线外一般采用纵骨架式。

2.1.1.4　对于具有自卸系统的船舶，其自卸货系统应满足 CCS《船舶与海上设施起重设备规范》的相关要求。

~~2.1.3 偶尔装载散货的干货船补充要求~~

~~2.1.3.1 偶尔装载散货的干货船，除满足本章要求之外，货舱区域船体结构还应满足以下要求：~~

~~(1) 船底骨架强度应符合本篇第 8 章第 2 节的要求；~~

~~(2) 水密舱壁强度应符合本篇第 8 章第 4 节的要求；~~

~~(3) 装载手册和装载仪应符合本篇第 8 章第 7 节的要求~~

~~(4) 当载重线船长 L_L 为 100m 及以上时，应设置双舷侧，且应符合本篇第 8 章第 9 节的要求。~~

第 17 节　上层建筑及甲板室

2.17.3　上层建筑端壁和甲板室围壁

2.17.3.1　上层建筑端壁板和甲板室围壁板的厚度 t 应不小于：

$$t = 3s\sqrt{hK} \quad \text{mm}$$

板的最小厚度 t_{min} 应按如下要求：

当 $L_1 \geq 65$m：　$t_{\min} = (0.01L_1 + 5.0)\sqrt{K}$ mm，　对最下层

$t_{\min} = (0.01L_1 + 4.0)\sqrt{K}$ mm，　对其他各层，且不小于 5mm

当 $L_1 < 65$m：　t_{min}=5.0mm，　对最下层无保护前端壁

t_{min}=4.0mm，　对其他各层

式中：s ——扶强材间距，m；

h ——计算压头，m；按本节 2.17.2 计算；

L_1 ——船长，m，L_1 取值不必大于 300m；

K ——材料系数。

第 20 节　舱口和舱口盖

2.20.1　一般要求

2.20.1.1　对于露天的舱口和舱口盖除应满足本节要求外，还应满足《1966 年国际载重

线公约》1988 年议定书附则 B 修正案附则 I 的有关要求。

2.20.1.2　对于非露天的舱口盖，可根据其结构形式按本节相关要求确定其结构尺寸，但仅需计及许用货物载荷。

2.20.1.3　对深舱内的钢质舱口盖尺寸，可根据其所在的位置，按本节的有关要求予以确定。但不论在何种情况下，其尺寸应不小于本章第 13 节对深舱甲板及其骨架的要求。

2.20.1.4　当在舱口盖上装载车辆或使用车辆装卸货物时，舱口盖的尺寸还应符合本章第 21 节对车辆甲板的要求。

2.20.1.5　对于兼作直升机甲板的舱口盖，舱口盖的尺寸还应符合本章第 18 节对直升机甲板的要求。

2.20.1.6　除另有规定外，舱口盖扶强材和桁材的带板宽度应按本篇第 1 章第 2 节 1.2.2 确定，但扶强材的面积应不包括在桁材的带板中。

2.20.1.7　对于货舱内下甲板装货舱口盖，其强度校核应按照 2.20.3 的规定。

2.20.1.8　舱口围板的高度：

(1) 在位置 1，其高度应不小于 600mm；

(2) 在位置 2，其高度应不小于 450mm；

(3) 采用钢质风雨密舱口盖的船舶，在不影响船舶安全和采取有效措施的条件下，经船旗国主管机关同意，对其舱口围板高度可适当降低；

(4) 在非露天干舷甲板或露天上层建筑甲板上的货舱口，可按其所在位置及所需的舱口保护程度，设置适当高度的围板。

2.20.1.9　舱口盖类型

(1) 单壳舱口盖

由钢材或等效材料构成的符合国际载重线公约第 16 条要求的一种舱口盖。这种舱口盖有连续的顶板和侧板，向下是敞开的，其底部扶强结构是暴露的。舱口盖应为风雨密，除特殊免除外，应设置衬垫材料及扣紧装置。

(2) 双壳舱口盖

如同本条(1)所定义的舱口盖，但具有连续的底板，使底部扶强结构和内部构件与外部环境隔离。

(3) 箱型舱口盖

一种特殊类型的活动舱口盖，通过防水帆布和压紧装置来保证风雨密，其设计应符合国际载重线公约第 15 条要求。

注：现代设计中，在很多情况下吊离式舱口盖也称为箱型舱口盖，但不属于本条(3)定义的舱口盖。现代吊离式舱口盖应属于单壳或双壳舱口盖这两种类型之一。

2.20.2　钢质风雨密舱口盖

2.20.2.1　一般要求

(1) 本条~~适用于除第 1 篇第 2 章附录 2 定义的散货船、自卸散货船、矿砂船和兼用船以外的船舶，并~~适用于所有露天甲板上的货舱舱口盖和舱口围板。根据本节的规定，部分要求适用于以下分类的某些特定船型：

- 类型 1 船舶：除散货船、自卸船、矿砂船和兼用船以外的船舶；
- 类型 2 船舶：散货船、自卸船、矿砂船和兼用船。

(2) 强度要求适用于舱口盖和具有加筋板构造的舱口围板及舱口盖的封闭装置。

(3) 本条要求适用于钢质舱口盖和舱口围板。舱口盖和舱口围板的材料应满足本篇第 1 章第 3 节的有关要求。舱口盖顶板、底板和主要支撑构件应为材料级别 I。若采用等效材料或新颖结构设计时，应提交 CCS 认可。

(4) 舱口盖的主要支撑构件和扶强材在舱口盖的长度和宽度范围内应尽可能连续，如无法实现时，应采用适当的布置方式以确保舱口盖有足够的承载能力，但不应采用端部削斜的连接方式。

平行于扶强材方向的主要支撑构件的间距应不超过其跨距的 1/3。当强度评估采用平面应变或壳单元的有限元分析时，这项要求可适当放宽。

舱口围板的扶强材在舱口围板的宽度和长度范围内应连续。

(5) 除另有规定外，本条规定中板厚 t 均为净板厚。

构件的净厚度要满足本节 2.20.2.3-2.20.2.6 以及 2.20.2.8 规定的最小净尺寸要求。

总厚度等于净厚度 t 加上腐蚀余量 t_s，腐蚀余量见本节 2.20.2.10 的要求。

采用~~板架分析或~~有限元方法进行强度计算时应基于净尺寸。

2.20.2.2　舱口盖和舱口围板的载荷模型

舱口盖和舱口围板的结构强度评估采用的载荷应符合下列规定。

定义：

L——船长，m；

- L_L——载重线船长，m；

X——结构构件中点至 L 或 L_L 后端的纵向距离，m；

D_{min}——最小型深，m，见载重线公约附则 I 第 3 条的规定；

h_N——标准上层建筑高度，m，按下式计算：

$$h_N = 1.05 + 0.01L_L \text{，且} 1.8 \leqslant h_N \leqslant 2.3 \text{。}$$

(1) 垂向露天设计载荷

舱口盖的垂向露天设计载荷 p_H 由载重线公约给出，可按表 2.20.2.2(1)进行计算。垂向露天设计载荷不应与本条(3)、(4)中的货物载荷进行组合。

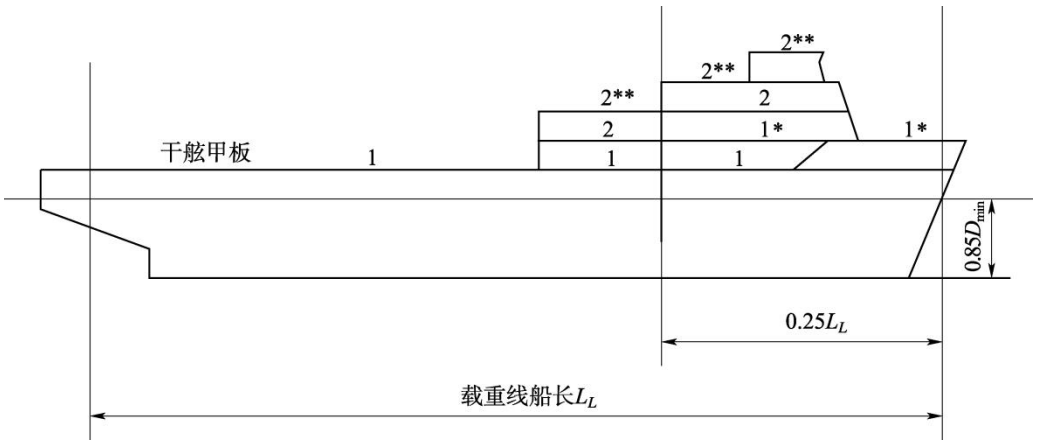
位置 1 和位置 2 见图 2.20.2.2(1)。

对勘划增加干舷船舶，实际干舷甲板上的舱口盖的设计载荷可按上层建筑甲板来进行计算，前提是夏季干舷对应的吃水应不超过基于假定干舷甲板计算的最小干舷而确定的吃水，并且假定干舷甲板应低于实际干舷甲板至少一个标准上层建筑高度 h_N，如图 2.20.2.2(2)所示。

露天甲板舱口盖的垂向露天设计载荷　　**表 2.20.2.2(1)**

<table>
<tr><td rowspan="2">舱口盖位置</td><td colspan="2">垂向露天设计载荷 p_H，kN/m^2</td></tr>
<tr><td>$\frac{x}{L_L} \leqslant 0.75$</td><td>$0.75 < \frac{x}{L_L} \leqslant 1.0$</td></tr>
<tr><td rowspan="4">1</td><td colspan="2">对于 24m≤L_L≤100m</td></tr>
<tr><td rowspan="2">$\frac{9.81}{76}(1.5L_L + 116)$</td><td>干舷甲板上：$\frac{9.81}{76}\left[(4.28L_L + 28)\frac{x}{L_L} - 1.71L_L + 95\right]$</td></tr>
<tr><td>位于干舷甲板以上至少一个标准上层建筑高度的露天上层建筑甲板上：
$\frac{9.81}{76}(1.5L_L + 116)$</td></tr>
<tr><td colspan="2">对于 L_L>100m</td></tr>
<tr><td>9.81×3.5</td><td>载重线公约规定的 B 型船舶的干舷甲板上：</td></tr>
</table>

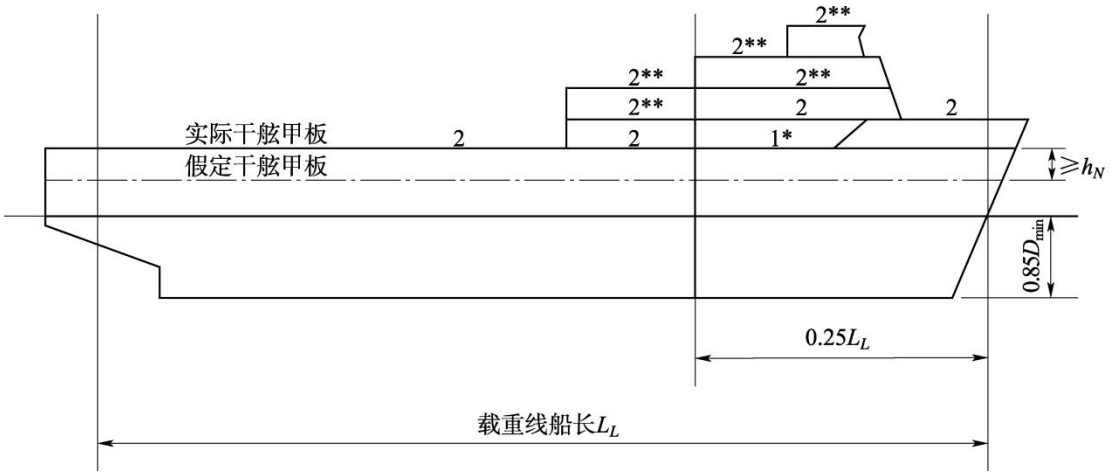
		$9.81\left[(0.0296L_1+3.04)\frac{x}{L_L}-0.0222L_1+1.22\right]$
		干舷小于载重线公约规定的 B 型船舶的干舷甲板上： $9.81\left[(0.1452L_1-8.52)\frac{x}{L_L}-0.1089L_1+9.89\right]$ $L_1=L_L$，且不大于 340m
		位于干舷甲板以上至少一个标准上层建筑高度的露天上层建筑甲板上： 9.81×3.5
2	对于 24m≤L_L≤100m	
	$\frac{9.81}{76}(1.1L_L+87.6)$	
	对于 L_L>100m	
	9.81×2.6	
	位于最低位置 2 甲板以上至少一个标准上层建筑高度的露天上层建筑甲板： 9.81×2.1	



注：*——折减载荷，位于干舷甲板以上至少一个标准上层建筑高度的露天上层建筑甲板上；

**——折减载荷，对于 L_L>100m，位于最低位置 2 甲板以上至少一个标准上层建筑高度的露天上层建筑甲板上。

图 2.20.2.2(1)　位置 1 和位置 2



注：*——折减载荷，位于干舷甲板以上至少一个标准上层建筑高度的露天上层建筑甲板上；

**——折减载荷，对于 L_L>100m，位于最低位置 2 甲板以上至少一个标准上层建筑高度的露天上层建筑甲板上。

图 2.20.2.2(2)　增加干舷的位置 1 和位置 2

(2) 水平露天设计载荷

①一般水平露天设计载荷

露天舱口盖的外侧裙板和舱口围板的水平露天设计载荷 p_A 应按下式计算：

$$p_A = f_n f_c (f_b c_L C_w - z) \quad \text{kN/m}^2$$

- 式中：$C_w = \dfrac{L}{25} + 4.1$，对于 L<90 m；

$= 10.75 - \left(\dfrac{300 - L}{100}\right)^{1.5}$，　　对于 $90\text{m} \leqslant L < 300\text{m}$；

$= 10.75$，　　对于 $300\text{m} \leqslant L < 350\text{m}$；

$= 10.75 - \left(\dfrac{L - 350}{150}\right)^{1.5}$，　　对于 $350\text{m} \leqslant L \leqslant 500\text{m}$；

$c_L = \sqrt{\dfrac{L}{90}}$，　　对于 L<90 m；

$c_L = 1$，　　对于 $L \geqslant 90\text{m}$；

$f_n = 20 + \dfrac{L_1}{12}$，对于无保护的前端舱口围板和舱口盖裙板；

$f_n = 10 + \dfrac{L_1}{12}$，对于位于实际干舷甲板到夏季载重线的距离超过载重线公约规定的最小未修正表列干舷至少一个标准上层建筑高度处且无保护的前端舱口围板和舱口盖裙板；

$f_n = 5 + \frac{L_1}{15}$，　对于两侧的舱口围板和舱口盖裙板、有保护的前端舱口围板和舱口盖裙板；

$f_n = 7 + \frac{L_1}{100} - \frac{8x'}{L}$，对于船中之后的后端舱口围板和舱口盖裙板；

$f_n = 5 + \frac{L_1}{100} - \frac{4x'}{L}$，对于船中之前的后端舱口围板和舱口盖裙板；

L_1=L，但不必大于 300m；

$f_b = 1.0 + \left(\frac{\frac{x'}{L} - 0.45}{C_b + 0.2}\right)^2$，当 $\frac{x'}{L} < 0.45$ 时；

$f_b = 1.0 + 1.5\left(\frac{\frac{x'}{L} - 0.45}{C_b + 0.2}\right)^2$，当 $\frac{x'}{L} \geqslant 0.45$ 时；

C_b——方形系数，$0.6 \leqslant C_b \leqslant 0.8$，对于船中之前后端舱口围板和舱口盖裙板，取 C_b 不必小于 0.8；

x' ——所考虑的横向围板或舱口盖前后端裙板至船长 L 后端的距离，m；对于两侧的舱口围板和舱口盖裙板，在船长方向上划分为长度近似相等且不超过 0.15 L 的若干部分，x'取每部分的中点至船长 L 后端的距离；

z ——夏季载重线到扶强材跨距中点或板中点的垂直距离，m；

$f_c = 0.3 + 0.7\frac{b'}{B'}$，其中 $\frac{b'}{B'}$ 应取不小于 0.25；

b' ——所考虑位置处的舱口围板宽度，m；

B'——船舶的露天甲板在所考虑位置处的最大实际宽度，m。

水平露天设计载荷不得小于表 2.20.2.2(2)规定的最小值。

最小水平露天设计载荷 $P_{A\min}$　　**表 2.20.2.2(2)**

L	$P_{A\min}$ kN/m²	
	无保护前端处	其他位置
≤ 50m	30	15
> 50m	$25 + \frac{L}{10}$	$12.5 + \frac{L}{20}$
< 250m		
≥ 250m	50	25

~~注：舱口盖直接计算时不必包含水平露天设计载荷，除非用于根据 2.20.2.9（2）③来设计的舱口盖水平支撑底部结构。~~

②适用于类型 2 船舶舱口围板的水平露天设计载荷

第一货舱舱口盖的前端横向舱口围板的压力 P_{coam} 应按下列各式计算：

P_{coam} = 220 kN/m²，当按照《钢质海船入级规范》第 2 篇第 8 章第 13 节设置首楼时；

P_{coam} = 290 kN/m²，其他情况；

其他舱口围板的压力P_{coam}应按下式计算：

P_{coam} = 220 kN/m²

注：舱口盖直接计算时不必包含水平露天设计载荷p_A和P_{coam}，除非用于根据 2.20.2.9（2）③来设计的舱口盖水平支撑底部结构。

(3) 货物载荷

①均布载荷。由纵摇和垂荡（例如船舶处于正浮状态）引起的作用于舱口盖上的货物均布载荷p_L应按下式计算：

$$p_L = p_C(1+a_V) \quad \text{kN/m}^2$$

式中：p_C——货物均布载荷，kN/m²；

a_V——垂向加速度附加值，按下式计算：

$a_V = Fm$；

$F = \dfrac{0.11v_0}{\sqrt{L}}$；

$m = m_0 - 5(m_0 - 1)\dfrac{x}{L}$，当$0 \leqslant \dfrac{x}{L} \leqslant 0.2$；

$m = 1.0$，当$0.2 < \dfrac{x}{L} \leqslant 0.7$；

$m = 1 + \dfrac{m_0 + 1}{0.3}\left[\dfrac{x}{L} - 0.7\right]$，当$0.7 < \dfrac{x}{L} \leqslant 1.0$；

$m_0 = 1.5 + F$；

v_0——夏季载重线吃水时的最大速度，且取值不小于$\sqrt{L}$，kn。

②集中载荷。由纵摇和垂荡（例如船舶处于正浮状态）引起的作用于舱口盖上的除集装箱载荷以外的货物集中载荷 P 应按下式计算：

$$P = P_s(1+a_V) \quad \text{kN}$$

式中：P_s——集中力，kN；

a_V——垂向加速度附加值。

(4) 集装箱载荷

①当集装箱堆装在舱口盖上时，应采用②—④中所定义的载荷。

②船舶正浮状态箱角载荷

由纵摇和垂荡（例如船舶处于正浮状态）引起的作用于舱口盖上集装箱堆垛的箱角处的载荷 P 应按下式计算：

$$P = 9.81\frac{M}{4}(1+a_V) \quad \text{kN}$$

式中：a_V——（3）①中定义的垂向加速度附加值；

M——集装箱堆垛最大设计重量，t。

③船舶横倾状态箱角载荷

当集装箱堆装在舱口盖上，如图 2.20.2.2(4)所示，由纵摇、垂荡和横摇运动产生的载荷按下列公式计算：

$$A_z = 9.81\tfrac{M}{2}(1+a_V)\left(0.45 - 0.42\frac{h_m}{b}\right) \quad \text{kN}$$

$$B_z = 9.81\frac{M}{2}(1+a_V)\left(0.45+0.42\frac{h_m}{b}\right) \quad \text{kN}$$

$$B_y = 2.4M \quad \text{kN}$$

式中：a_V——加速度，按本条(3)进行计算；

M ——集装箱堆垛最大设计~~重量~~质量，t；

h_m——在舱口盖顶板以上的集装箱堆垛重心的设计高度，m，可看作集装箱堆垛高度的加权平均值，其中每个集装箱的重心取在集装箱中心位置，

$=\Sigma(z_i \cdot W_i)/M$；

z_i——~~集装箱顶板~~舱口盖顶到第 i 个集装箱的中心距离，m

W_i——第 i 个集装箱的重量，t

b——箱脚中心线间的距离，m；

A_z、B_z——集装箱垂向堆角支反力；

B_y——集装箱横向堆角支反力。

~~注：当按 2.20.2.4 的交叉梁分析方法对舱口盖结构进行分析时，hm 和 zi 应从舱口盖支撑处算起，且不必考虑载荷B_y。~~

舱口盖强度评估时 A_z 和 B_z 的值应在舱口盖图纸上标明。

注：建议在计算货物（集装箱）系固时考虑按上述计算的载荷作为集装箱堆垛箱脚的最大值。

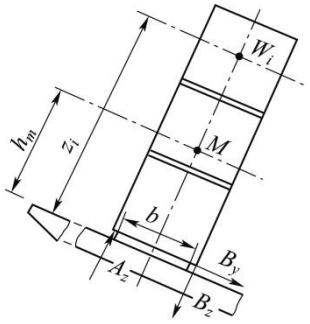


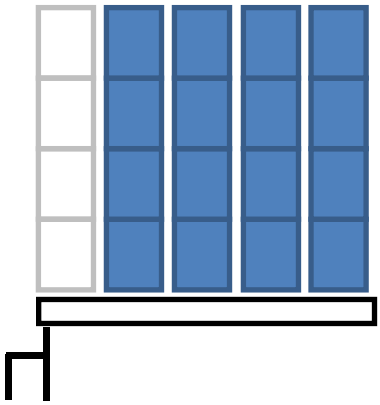
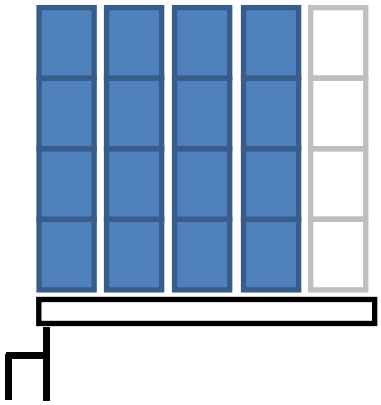
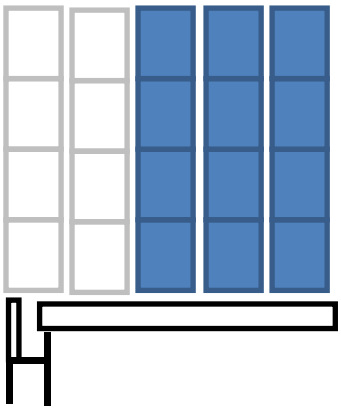
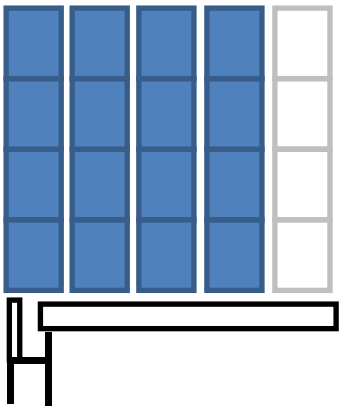
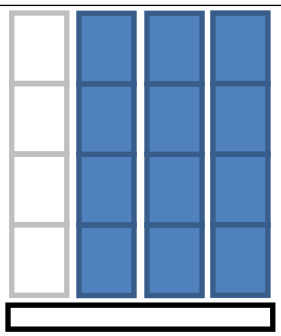
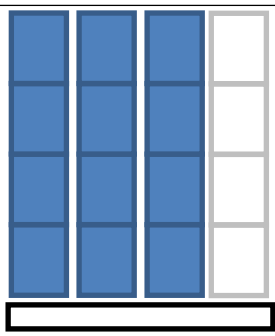
图 2.20.2.2(4)

④部分装载工况。上述②、③规定的载荷还应考虑实际运营中可能出现的非均匀装载状态，例如特定集装箱堆垛位置空载。对于部分装载工况中的每一个舱口盖，应考虑表 2.20.2.2（4）中的横倾方向。集装箱舱口盖部分装载工况可使用简单方法来代替评估，即最外层没有堆装集装箱且都全部都装载在舱口盖上的部分装载工况。如果集装箱堆垛由舱口盖和集装箱支柱共同支撑的，则这部分集装箱堆垛是可以忽略的，见表 2.20.2.2（4）集装箱舱口盖的部分装载。

另外，为了考虑舱口盖垂向支撑的最大载荷，在集装箱堆垛只由舱口盖和集装箱支柱共同支撑且~~左面~~为空置的工况是需要进行分析的。

当更多或不同的集装箱堆垛为空置时可能需要考虑校核部分装载工况。因此 CCS 可能要求校核除表 2.20.2.2(4)以外的其他部分装载工况。

集装箱舱口盖的部分装载　　表 2.20.2.2(4)

横倾方向	←	→
舱口盖由纵向舱口围板支撑且所有集装箱堆垛均放置在舱口盖上时		
舱口盖由纵向舱口围板支撑且最外层集装箱堆垛由舱口盖和集装箱支柱共同支撑时		
舱口盖不由纵向舱口围板支撑（沿船宽方向货舱中部舱口盖）		

⑤舱口盖上混装20’和40’集装箱。

对于集装箱混装工况（20’和 40’集装箱），舱口盖盖板最外侧前后端的箱脚集中力不得大于 40’集装箱的设计堆重引起的力；舱口盖中间位置处箱脚集中力不得大于 20’集装箱的设计堆重引起的力。

(5) 除上述(1)~(4)规定的载荷外，钢质风雨密舱口盖应考虑船体弹性变形引起横向载荷，且加载后的应力总和应不超过 2.20.2.5 中规定的许用应力。

2.20.2.3　钢质风雨密舱口盖结构净尺寸应符合下列规定：

(1) 局部净板厚

舱口盖顶板局部净板厚应不小于按下列各式计算所得之值，且不小于 6mm：

$$t = 0.0158 F_p s \sqrt{\frac{p}{0.95 R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

$$t = 0.01 s \quad \text{mm}$$

式中：F_p ——拉伸和弯曲组合因子，按下列公式计算：

$F_p = 1.5$，一般情况；

$F_p = 1.9\dfrac{\sigma}{\sigma_a}$，对于主要支撑构件带板，当$\dfrac{\sigma}{\sigma_a} \geqslant 0.8$时；

s ——扶强材间距，mm；

p ——p_H和p_L，按本节 2.20.2.2 进行计算，kN/m^2；

σ ——舱口盖顶板的最大正应力， N/mm^2，根据图 2.20.2.3 选取；

σ_a~~$=0.8R_{eH}$~~——许用应力，见表 2.20.2.5，N/mm^2；

R_{eH} ——材料的屈服应力，N/mm^2。

对于受压的翼板还应满足本节 2.20.2.6 对屈曲强度的要求。

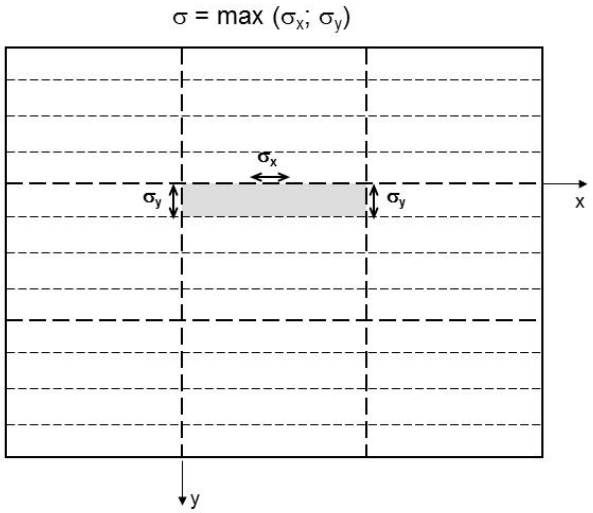


图 2.20.2.3

①当舱口盖承受轮印载荷时，舱口盖顶板的厚度还应满足本章第 21 节的有关要求。

双壳舱口盖和箱型桁材的底板板厚应通过本节 2.20.2.4 规定的直接计算来确定且应满足本节 2.20.2.5 规定的许用应力要求。当底板作为强力构件考虑时，底板的净尺寸应不低于 5mm。当舱口盖上装载大件货时，底板的净厚度不得小于按下式计算的值：

$$t = 6.5 s \times 10^{-3} \quad \text{mm}$$

式中：s——扶强材间距，mm；

当底板不作为强度构件考虑时，该舱口盖的底板总厚度应不小于 5mm。

注：大件货特指绑扎在舱口盖上大型或超大型货物。例如起重机、风力发电站和涡轮机等的货物部件。该载荷可看作均布载荷。木材、管子和钢卷不必看作为大件货物。

(2) 舱口盖扶强材应符合下列规定：

在均布载荷作用下，两端固定的扶强材的净剖面模数 Z、净剪切剖面面积 A_{shr} 应不小于

按下列各式计算所得之值：

$$Z = \frac{psl^2}{f_{bc}\sigma_a} \quad \text{cm}^3$$

$$A_{shr} = \frac{8.7psl}{\sigma_a}10^{-3} \quad \text{cm}^2$$

式中：l ——扶强材跨距，m，视适用情况，取主要支撑构件的间距或主要支撑构件与边缘支撑之间的距离。当在所有普通骨材跨距的两端设有肘板时，普通扶强材跨距可减去肘板最小臂长的 2/3，但不大于总跨距的 10%；

s ——扶强材间距，mm；

p —— p_H 和 p_L，按本节 2.20.2.2 进行计算，kN/m^2；

f_{bc} ——普通扶强材的边界系数，等于：

f_{bc}=8，对于普通扶强材两端简支或一端简支另一端固定的情况；

f_{bc}=12，对于普通扶强材两端固定的情况；

σ_a ——表 2.20.2.5 的许用应力，N/mm^2。

对于双壳舱口盖底板的扶强材，由于不存在侧向载荷因此可不考虑上述要求。对于为压载或液体货物设计的双壳舱口盖，舱口盖底板的扶强材应根据CCS要求进行加强。

扶强材（U 型材/吊架除外）腹板的净厚度，不得小于 4mm。

扶强材净剖面模数的计算基于带板宽度等于扶强材间距的假定。

~~对于扁钢扶强材和抗屈曲扶强材，h/t_w 不大于 $15k^{0.5}$，其中 h 为扶强材的高度，t_w 为扶强材的净厚度，$k=235/R_{eH}$。~~

对于平行于主要支撑构件~~且布置在按本节 2.20.2.4 规定的有效宽度之内~~的扶强材，在穿过主要支撑构件时应保持连续，同时可计入主要支撑构件剖面特性的计算。应验证扶强材上由主要支撑构件弯曲和侧向压力产生的组合应力不超过本节 2.20.2.5 规定的许用应力。当舱口盖底板不作为强度构件时，其扶强材可不必考虑此条要求。

对于受压的舱口盖扶强材，应按本节 2.20.2.6 的规定校核侧向和扭转屈曲强度。

当舱口盖承受轮印载荷时应满足本章第 21 节的有关要求；当舱口盖承受集中载荷时，舱口盖扶强材尺寸可通过直接计算来确定且应满足本节 2.20.2.5 规定的许用应力要求。

(3) 主要支撑构件的净尺寸应符合下列规定：

①主要支撑构件尺寸应按本节 2.20.2.4 规定的直接计算来确定且应满足本节 2.20.2.5 规定的许用应力要求。

主要支撑构件的所有部分应按本节 2.20.2.6 来验证其具有足够的安全性来抵抗屈曲。应验证本节 2.20.2.6(3)②规定的有效宽度以内的双向受压翼板的屈曲强度。

主要支撑构件腹板的净厚度应不小于按下列各式计算所得之值：

$$t = 6.5s \times 10^{-3} \quad \text{mm}$$

$$t_{min} = 5 \quad \text{mm}$$

式中：s ——扶强材间距，mm；

②舱口盖裙板的净尺寸应符合下列规定：

应根据本节 2.20.2.4 对裙板的尺寸进行验证且应满足本节 2.20.2.5 规定的许用应力要求。

暴露于海水冲刷的外侧裙板的净厚度应不小于按下列各式计算所得之值：

$$t = 0.0158s\sqrt{\frac{p_A}{0.95R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

$$t = 8.5s \times 10^{-3} \quad \text{mm}$$

$$t_{min} = 6 \quad \text{mm}$$

式中：s ——扶强材间距，mm；

p_A ——水平露天设计载荷，按本节 2.20.2.2 进行计算，kN/m²；

R_{eH} ——材料的屈服应力，N/mm²。

裙板的惯性矩要求参见 2.20.2.9（1）④。

裙板要有足够的刚度来支撑紧固装置之间的密封线压力，cm⁴。裙板的惯性矩应不小于：

$$I = 6qs_{SD}^4$$

式中：q ——密封线压力，N/mm，计算时最小取 5N/mm；

s_{SD} ——紧固装置的间距，m。

2.20.2.4　强度计算

舱口盖的应力应采用有限元分析确定。

本节中的应力计算模型将分别用于 2.20.2.5 和 2.20.2.6 的屈服强度和屈曲强度评估。

应使用 2.20.2.1（5）中定义的净尺寸。

可采用交叉梁分析或有限元方法来对舱口盖强度进行计算。双壳舱口盖或具有箱型梁的舱口盖应采用本节（2）规定的有限元方法进行计算。

(1) 交叉梁分析时的有效横剖面特性

横剖面特性的确定要考虑有效宽度。应计入有效宽度以内的平行于所考虑主要支撑构件的扶强材的横剖面面积，如本节图 2.20.2.6(2)所示。

考虑载荷类型，主要支撑构件的板的有效宽度 e_m 根据表 2.20.2.4(1)进行确定.翼板为单侧设置或非对称形式的，需进行特别计算来确定其有效宽度。

板的有效横剖面不得小于面板的有效横剖面。

对于具有与主要支撑构件腹板垂直的扶强材的受压翼板，其有效宽度按本节 2.20.2.6(3)②来确定。

主要支撑构件的板的有效宽度 e_m　　表 2.20.2.4(1)

l/e	0	1	2	3	4	5	6	7	≥8
e_{m1}/e	0	0.36	0.64	0.82	0.91	0.96	0.98	1.00	1.00
e_{m2}/e	0	0.20	0.37	0.52	0.65	0.75	0.84	0.89	0.90

e_{m1}——适用于承受均布载荷或承受不少于 6 个等间距的单个载荷的主要支撑构件

e_{m2}——适用于承受 3 个或更少的单个载荷的主要支撑构件

中间值可通过插值计算获得

l——弯矩曲线上零点之间的长度

——$l = l_0$ 对简支的主要支撑构件

——$l = 0.6 \cdot l_0$ 对于两端固支的主要支撑构件

——其中：l_0 是主要支撑构件无支撑的长度

e——受支撑板材的宽度，mm，从其中心量至相邻未受支撑区域的中心。

(1) 有限元计算方法的一般要求

舱口盖的有限元强度计算，应尽量按实际情况对舱口盖几何特性进行模拟。单元的大小要能合适地计及有效宽度在任何情况下，单元的宽度应不大于扶强材的间距。在载荷传递节点和开口处，网格划分要尽可能良好。单元的宽度应不大于扶强材的间距，且单元的长宽比应不大于 4。

主要支撑构件腹板的单元高度不得超过腹板高度的 1/3，需对抵抗侧向载荷的扶强材和支撑板进行理想化模拟。扶强材可采用壳单元、平面应力单元或梁单元来进行模拟。应力分

~~析时可不必对抗屈曲的扶强材进行模拟。~~需对承受侧向载荷的板的额扶强材进行理想化模拟。扶强材可采用梁单元或壳/板单元来进行模拟。屈曲加强筋在应力计算分析时可忽略。

图 2.20.2.4（1）所示装有 U 型材的舱口盖需要做等效有限元分析。在骨材横剖面，节点需位于 U 型材腹板与舱口盖之间连接处，也需位于 U 型材腹板和翼板连接处。

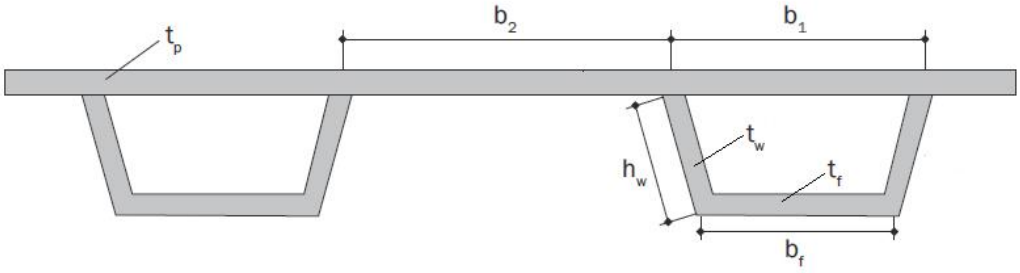


图 2.20.2.4（1） 装有 U 型材的舱口盖

①坐标系统采用右手坐标系：

x 轴沿纵向，以船首为正方向；

y 轴沿横向，以左舷为正方向；

z 轴沿型深方向，向上为正方向。

②有限元分析时，结构尺寸应基于净厚度。

③有限元模型范围按如下要求确定：

(a)如舱口盖的桁材、载荷和支承边界条件只对称于 x 轴或 y 轴一个轴，则可取舱口盖的 1/2 进行校核；

(b)如舱口盖的桁材、载荷或支承边界条件不对称于任何一个轴，则应取舱口盖整体进行强度校核，如图 2.20.2.4(2)。

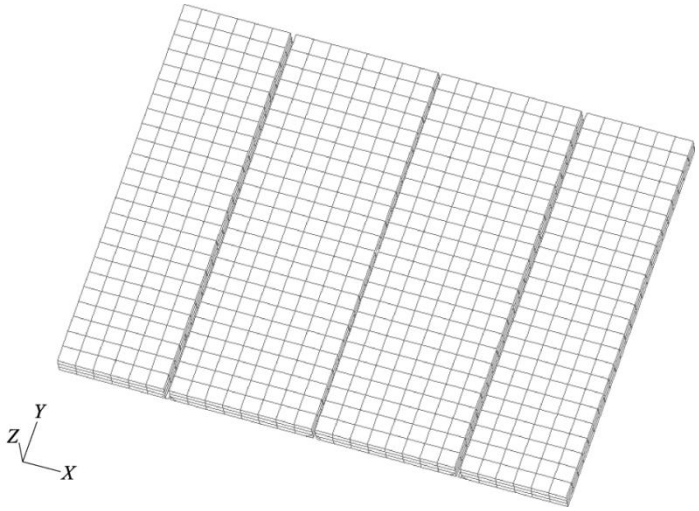


图 2.20.2.4(2) 舱口盖有限元模型

④模型单元应符合以下要求：

(a)舱口盖的所有板材、桁材和扶强材均应包含在有限元模型中。

(b)所有板材，如顶板、底板、肘板、主要支撑构件的腹板、面板等用板单元模拟，且尽量避免采用三角形单元；

(c)所有扶强材用梁单元、杆单元或板单元模拟；

⑤单元网格尺寸控制如下：

(a)网格间距不应大于骨材间距；

(b)桁材在垂直方向上应布置不少于 3 个单元；

(c)三角形或四边形单元的角度不应小于 60 度也不应大于 120 度。

⑥边界条件按如下要求确定：

(a)如舱口盖的桁材和载荷对称于 xz 平面，则对称面内节点的纵向位移为 0，绕 y、z 两个坐标轴的角位移为 0，即 $\delta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ (如图 2.20.2.4(3))；

(b)如舱口盖的桁材和载荷对称于 yz 平面，则对称面内节点的横向位移为 0，绕 x、z 两个坐标轴的角位移为 0，即 $\delta_y = \theta_x = \theta_z = 0$ (如图 2.20.2.4(3))；

(c)支承处的节点一般应约束 z 向的线位移，即 $\delta_z = 0$；

(d)应按照限位器限制的方向约束其线位移；

(e)如舱口盖是折叠式的，则铰链处应设置为 z 向位移刚性关联。

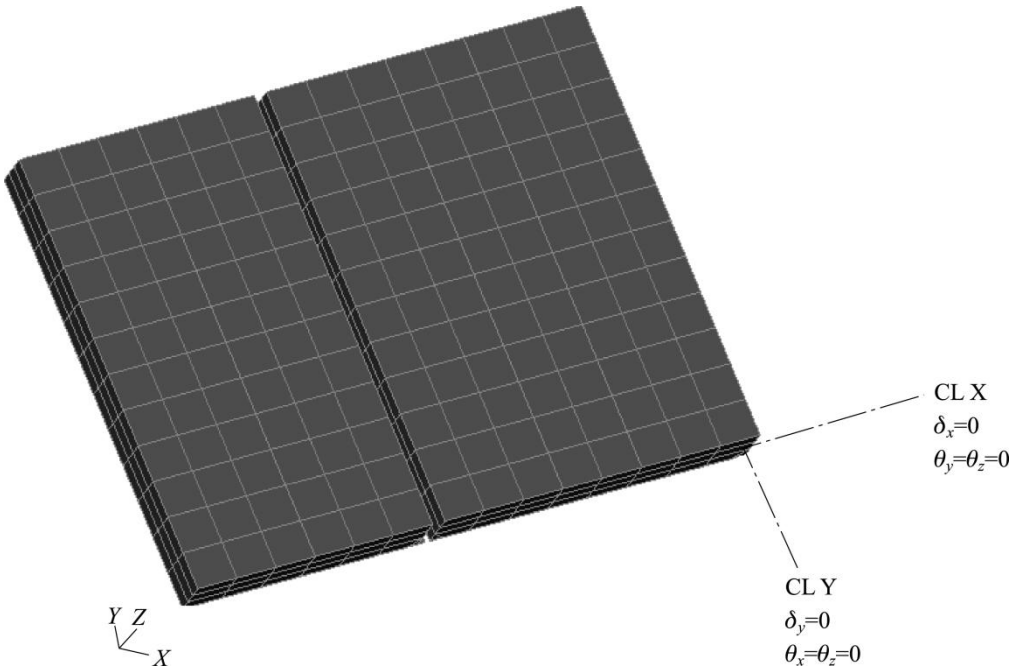


图 2.20.2.4(3)　舱口盖模型的边界条件

2.20.2.5　舱口盖结构强度屈服和变形衡准

（1） 许用应力

~~基于净尺寸的舱口盖结构等效应力应不大于$0.8R_{eH}$，其中R_{eH}为材料的屈服应力，N/mm²。对于本节2.20.2.2(2)~(5)规定的设计载荷，当采用有限元方法进行分析时，基于净尺寸的舱口盖结构等效应力应不大于$0.9R_{eH}$。~~

~~当采用交叉梁分析时，等效应力可按下式计算：~~

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \ \text{N/mm}^2$$

~~式中：σ=正应力，N/mm²~~

~~τ=剪切应力，N/mm²~~

所有舱口盖结构构件应符合以下公式：

$\sigma_{vm} \le \sigma_a$，对于板单元：

$\sigma_{axial} \le \sigma_a$，对于杆单元或者梁单元。

式中：σ_a——表格 2.20.2.5 中的许用应力；

R_{eH}——材料屈服应力；

σ_{vm}——等效应力可按下式计算：

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2} \text{ N/mm}^2$$

式中：σ_x——x 向的正应力，N/mm²

σ_y——y 向的正应力，N/mm²

τ——x-y 面内的剪切应力，N/mm²

σ_{axial}——杆单元或者梁单元的轴向应力，N/mm²

当采用有限元方法的平面应变或壳单元进行强度分析时，应力应从单元的中心处进行选取；需要特别关注的是，在非对称桁材的翼板处，应力从单元中心读取可能会导致偏于危险的结果。因此，在这种情况下网格需要足够细化，或从单元四边读取的应力不大于许用应力。当选用壳单元进行分析时，应选取单元中面应力。

对于屈服应力为390 N/mm²的钢材，计算时R_{eH}取368 N/mm²。

结构应力集中的评估，根据实际情况进行控制。

许用应力　　表 2.20.2.5

构件	承受载荷	σ_a，N/mm²
舱口盖结构	外部压力，定义见 2.20.2.2(1)	$0.80R_{eH}$
	其他载荷，定义见 2.20.2.2(2)~(5)	对于静载荷+动载荷 $0.90R_{eH}$ 对于静载荷 $0.72R_{eH}$

（2）变形

主要支撑构件由于本节 2.20.2.2 所规定载荷作用产生的垂向变形应不大于 $0.0056l_g$，其中 l_g 是主要支撑构件的最大跨距。

注：舱口盖上安排载运集装箱且允许混合堆装时，即在两个 20′集装箱的上方堆装一个 40′集装箱，应注意舱口盖的挠度。还应考虑由于舱口盖变形与舱内货物发生可能的碰触。

2.20.2.6　舱口盖结构的屈曲要求

（1）一般要求

所有的舱口盖结构都要进行屈曲强度校核。屈曲评估应采用附录 5 的要求进行。

屈曲校核应采用 2.20.2.1（5）定义的净尺寸进行。

（2）长细比要求

长细比要求应符合附录 5 第 2 节中的规定。长细比要求不需要应用于双壳舱口盖的下边界，除非该货舱设计用于运输压载或液体货物。

对无横向支撑的构件跨距大于 3m 时，主要支撑构件面板的宽度应不小于高度的 40%。与面板连接的防倾肘板可作为主要支撑构件的横向支撑。

（3）屈曲要求

①适用于舱口盖结构承受压应力、剪应力和侧向压力的屈曲评估。下列结构单元都应进行屈曲评估：

- 加筋和非加筋板格，包括曲板和采用 U 型材的面板；

- 开口处主要支撑构件的腹板。

舱口围板的屈曲强度评估应满足本条要求。

板格类型和评估方法，侧向压力的施加，应力，安全系数和屈曲校核衡准见 2.20.2.6（3）②-2.20.2.6（3）⑤。屈曲评估的程序和详细要求在附录 5 第 4 节中给出，包括不规则板格的理想化，参考应力和屈曲衡准的定义。

除非另有规定，2.20.2.6（3）中使用的符号在附录 5 中定义。

②板格类型和评估方法

舱口盖结构的板格应模拟成附录 5 第 4 节 4.2 中定义的加筋板格（SP）或者非加筋板格（UP）。应按照表 2.20.2.6（3）①、图 2.20.2.6（3）①和图 2.20.2.6（3）② 的规定，使用附录 5 第 1 节 1.3 中定义的方法 A（-A）和方法 B（-B）进行评估。对于具有开孔的腹板板格，屈曲评估时应使用开孔的评估程序。

对装有 U 型材的舱口盖，应根据附录 5 第 5 节 5.2.5 中装有 U 型材板格的具体要求进行额外屈曲评估。

结构构件和评估方法　　表 2.20.2.6（3）①

结构单元	评估方法(1)(2)	常规板格定义
舱口盖顶板/底板结构，见图 2.20.2.6（3）①		
舱口盖顶板、底板	SP-A	长度：横向桁材之间 宽度：纵向桁材之间
不规则加筋板格	UP-B	局部骨材/PSM 之间的板
舱口盖主要支撑构件腹板，见 2.20.2.6（3）②		
横向/纵向桁材腹板（单壳形式）	UP-B	局部骨材/面板、PSM 之间的板
横向/纵向桁材腹板（双壳形式）	SP-B(3)	长度：PSM 之间 宽度：完整腹板高度
带开孔的腹板板格	开孔评估	局部骨材/面板、PSM 之间的板
不规则加筋板格	UP-B	局部骨材/面板、PSM 之间的板
注(1)：SP 和 UP 分别代表加筋板格和非加筋板格。 注(2)：A 和 B 分别代表方法 A 和方法 B。 注(3)：如横向/纵向桁材腹板上不规则的布置了屈曲筋/肘板，可使用 UP-B 方法。		

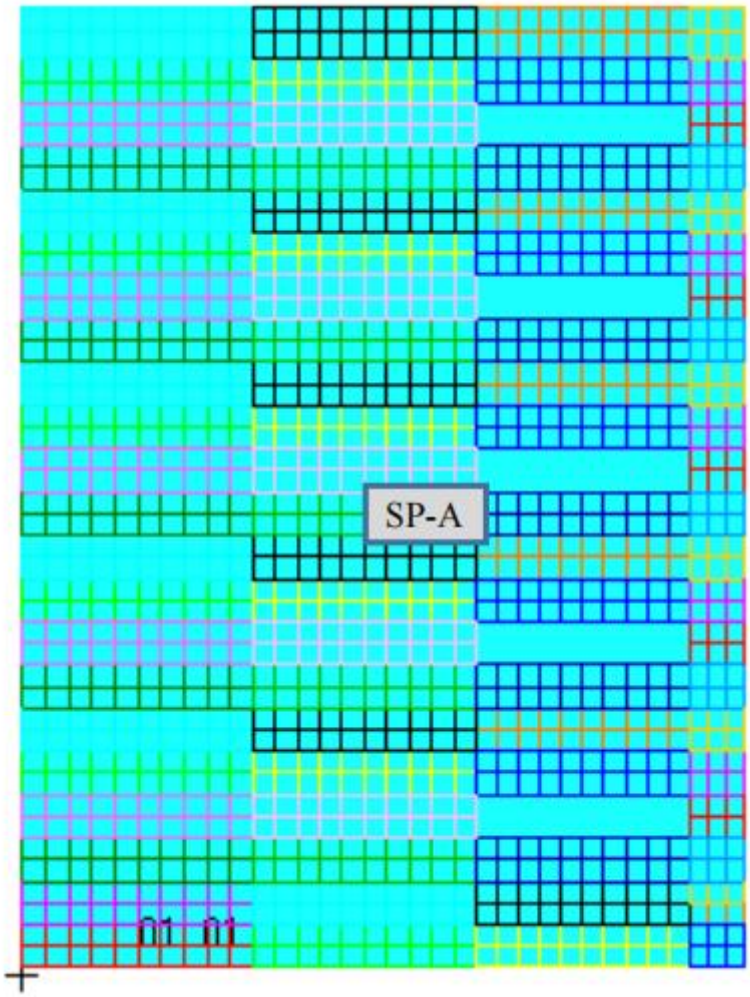


图 2.20.2.6（3）①

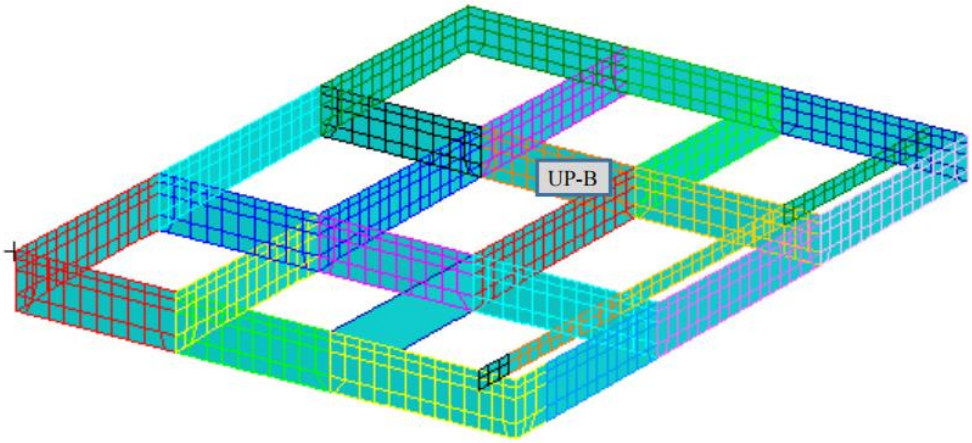


图 2.20.2.6（3）②

③施加的侧向压力和应力

舱口盖的屈曲评估基于 2.1 和 2.2 定义的侧向压力和根据 2.20.2.4 进行有限元分析获得的应力。

④安全因子

对于所有舱口盖结构构件，安全因子 S=1.0 适用于附录 5 第 5 节 5.2.2 和附录 5 第 5 节 5.2.3 分别定义的板和加强筋屈曲能力公式。

⑤屈曲衡准

如果一个结构单元满足以下的衡准，则认为其具有可接受的屈曲强度：

$$\eta_{act} \leq \eta_{all}$$

式中：η_{act}——基于所施加应力的屈曲利用因子，附录 5 第 1 节 1.3.2.2 和附录 5 第 4 节中所定义和根据附录 5 第 5 节 计算。

η_{all}：许用屈曲利用因子，见表 2.20.2.6（3）⑤

许用屈曲利用因子　　表 2.20.2.6（3）⑤

结构单元	承受载荷	η_{all},许用屈曲利用因子
板和骨材 主要支撑构件腹板	外部压力，定义见 2.20.2.2(1)	0.80
	其他载荷，定义见 2.20.2.2(2)~(5)	0.90，对于静载荷+动载荷 0.72，对于静载荷

2.20.2.7　舱口盖细节要求：

(1) 舱口盖上的集装箱基座

舱口盖上的集装箱基座应符合本篇第 7 章附录 1 的有关要求。在本节 2.20.2.2 规定的货物载荷及集装箱载荷的作用下，集装箱基座的支持结构的计算应力应符合本节 2.20.2.5 的要求。

(2) 风雨密性

除以下要求外，舱口盖还应满足 IACS Rec.14 的有关要求。

①衬垫材料(一般要求)

密封衬垫材料应适合于船舶所有预期的航行工况，且适合于所要载运的货物。所选密封衬垫材料的尺寸和弹性应能承受可能产生的变形，外力应仅由钢结构承受。

应对密封衬垫进行压紧来实现舱口盖在所有预期操作条件下的有效密封。对于舱盖与船体结构之间，或各盖板之间有较大相对运动的船舶，密封衬垫应予以特殊考虑。

②风雨密衬垫的免除

对于仅运输集装箱的货舱舱口盖，如船东要求并符合下述条件，则本条(2)对于风雨密密封衬垫的要求可以免除：

舱口围板的高度应不小于600mm。

- 露天甲板舱口盖位于深度 $H(x)$ 以上的部位， $H(x)$ 应符合下述计算标准：

$$H(x) \geqslant T_{fb} + f_b + h \qquad \text{m}$$

式中：T_{fb}——与勘定的夏季载重线相应的吃水，m；

f_b——最小要求干舷，m，按修订后的载重线公约ICLL Reg.28确定；

$$h = 4.6m \text{ 当 } \frac{x}{L_L} \leqslant 0.75 ;$$

$$h = 6.9m \text{ 当 } \frac{x}{L_L} > 0.75 ;$$

- 围板处贴近每一板格的边缘应装上曲径式密封、排水挡板或其他等效装置，这些开口的净剖面尺寸应尽可能小。
- 如舱口用多块舱口盖板覆盖，盖板之间间隙的净开口宽度应不大于50mm。
- 曲径式密封与舱口盖板之间的间隙应视为完整稳性和破损稳性计算要求的未被保护的开口。
- 对于货舱的排水和必要的消防系统应参照本规范第8篇第6章的相关要求。
- 安装非风雨密舱口盖的货舱应配备舱底水报警器。
- 此外，集装箱载运危险货物的积载和隔离应符合IMO MSC/Circ.1087的第三章的要求。

③多板格舱口盖的交叉连接处应提供有效的排水布置

2.20.2.8 舱口盖的舱口围板应符合下列要求：

（1）舱口围板的净厚度应不小于按下列各式计算所得之值：

- 类型 1 船舶：

$$t = 0.0142s\sqrt{\frac{p_A}{0.95R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

$$t_{\min} = 6 + \frac{L_1}{100} \quad \text{mm}$$

- 类型 2 船舶：

$$t = 0.016s\sqrt{\frac{p_{coam}}{0.95R_{eH}}} \quad \text{mm}$$

$$t_{\min} = 9.5 \quad \text{mm}$$

式中：s——扶强材间距，mm；

p_A——水平露天设计载荷，按本节 2.20.2.2（2）①进行计算，kN/m²；

p_{coam}——水平露天设计载荷，按本节 2.20.2.2（2）②进行计算，kN/m²；

~~R_{eH}——材料的屈服应力，N/mm²；~~

$L_1 = L$，不必大于 300 m。

在船中 0.4L 区域内连续的纵向舱口围板，还应满足本章第 2 节的有关要求。

（2）舱口围板扶强材应满足下述要求：

舱口围板扶强材应在舱口围撑板处保持连续。

两端约束扶强材的净剖面模数 Z、净剪切面积 A_{shr} 应不小于按下列各式计算所得之值：

- 类型 1 船舶：

$$Z = \frac{p_A s l^2}{f_{bc} R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

$$A_{shr} = \frac{p_A s l^2}{R_{eH}} 10^{-2} \quad \text{cm}^2$$

式中：f_{bc}——一般情况为 12，对于在围板角隅处，扶强材端部削斜时取 8；

l——扶强材跨距，m，取为舱口围撑板间距；

s——扶强材间距，mm；

p_A——水平露天设计载荷，按本节 2.20.2.2（2）①进行计算，kN/m²；

~~R_{eH}——材料的屈服应力，N/mm²；~~

对于舱口角隅处削斜的围板扶强材，其固定支撑处的剖面模数和剪切面积应增加 35%，在削斜扶强材端部的围板总厚度应不小于：

$$t_{gr}=19.6\sqrt{\frac{p_A s\left(l-0.0005s\right)}{1000R_{eH}}}\quad \text{mm}$$

- 类型 2 船舶：

$$Z=1.21\frac{p_{coam}sl^2}{f_{bc}c_pR_{eH}}\quad \text{cm}^3$$

式中：f_{bc}——一般情况为 16，

对于在围板角隅处，扶强材端部削斜时取 12；

l——扶强材跨距，m；

s——扶强材间距，mm；

p_A——水平露天设计载荷，按本节 2.20.2.2（2）① 进行计算，kN/m^2；

p_{coam}——水平露天设计载荷，按本节 2.20.2.2（2）② 进行计算，kN/m^2；

c_p——普通扶强材塑性剖面模数与弹性剖面模数之比，其带板宽度等于 40t（t 为带板的净厚度），mm；如无更精确的估算值时，c_p 取为 1.16。

在船中 0.4L 区域内连续的纵向舱口围板，其水平扶强材还应满足本章第 2 节的有关要求。

（3）舱口围撑板用来传递载荷，除满足本节 2.20.2.5 规定的许用应力要求外，还应满足下述要求：

①舱口围撑板剖面模数和腹板厚度

对位于甲板连接处的具有折边或面板的梁式舱口围撑板（如图 2.20.2.8（3）的例 1 和 2），其净剖面模数 Z 和净厚度 t_w 应不小于按下式计算所得之值：

$$Z=\frac{Ps_cH_c^2}{1.9R_{eH}}\quad \text{cm}^3$$

$$t_w=\frac{2Ps_cH_c}{hR_{eH}}\quad \text{mm}$$

式中：H_C——舱口围撑板的高度，m；

s_c——舱口围撑板间距，mm；

h——与甲板连接处的撑板深度，mm；

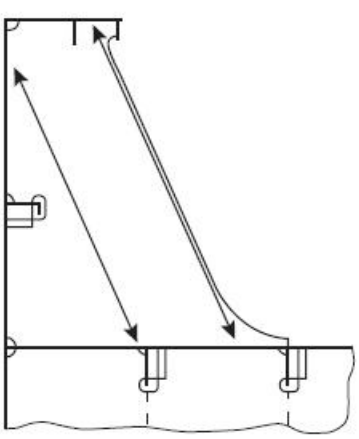
p——水平露天设计载荷，kN/m^2；当为一般载荷时，取为 p_A 按本节 2.20.2.2（2）①进行计算；当为类型 2 船舶时，取为 p_{coam}，按本节 2.20.2.2（2）②进行计算。。

对于如图 2.20.2.8（3）例 3 和 4 的其他型式舱口围撑板，应采用交叉梁分析或有限元方法来确定其尺寸，并满足本节 2.20.2.5 的强度衡准。

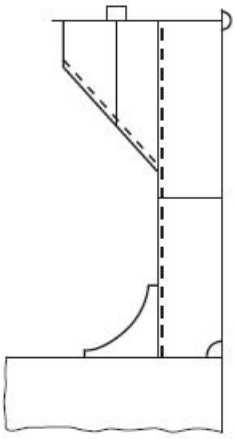
舱口围撑板应由适当的支持结构支撑。计算舱口围撑板的剖面模数时，仅当撑板有适当的支持结构且焊接提供足够连接时，其面板面积方可计入。

腹板与甲板的焊接应采用双面连续焊，焊喉应不小于 0.44t_w。

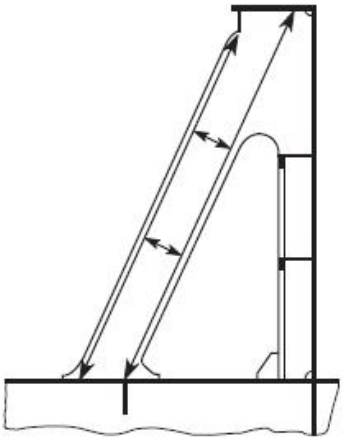
对于类型 2 船舶，舱口围撑板腹板趾端与甲板板的连接应采用全熔透焊或 K 形部分熔透焊，延伸距离不小于撑板宽度的 15%。对于其他船舶，舱口围板撑板下端的腹板趾部焊喉大小应符合本篇第 1 章的有关要求。



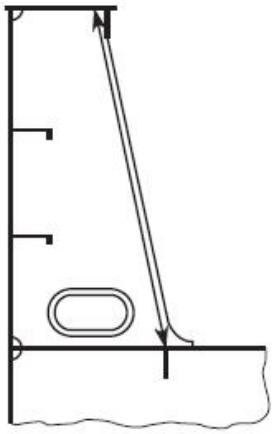
例 1



例 2



例 3



例 4

图 2.20.2.8（3） 舱口围撑板举例

②对于传递舱口盖支撑摩擦力的舱口围撑板，应对其疲劳强度进行考虑。

（4）舱口围板还应符合下述要求：

①作为船体纵向结构部分的舱口围板，在设计时应满足本章第 2 节总纵强度的有关要求。

②焊接到舱口围板上的结构构件和舱口围板上的顶部开口应具有足够的疲劳强度。

③在长度大于 0.1L 的连续纵向舱口围板的两端应设置斜肘板或等效的过渡结构和相应的支持结构。在这些肘板的端部应采用长度为 300mm 的全焊透焊缝将其连接到甲板上。

④局部细节的设计应能将舱口盖上的载荷传递到舱口围板，并通过其传递到以下的甲板结构之上。舱口围板及其支撑结构应进行足够加强来承受来自舱口盖的纵向、横向及垂向载荷。应检查甲板下结构能承受撑板所传递的载荷。除非另外说明，焊接和材料应符合 CCS 的有关要求。

⑤对于在甲板上载运货物(例如木材、煤或焦炭)的船舶，撑板的间距应不大于 1.5m。

⑥舱口围板应延伸到甲板横梁的下边缘或舱口边桁材安装在甲板横梁的下边缘，延伸的舱口围板或舱口边桁材且应有折边或设置面板或半圆钢。见图 2.20.2.8（4）。

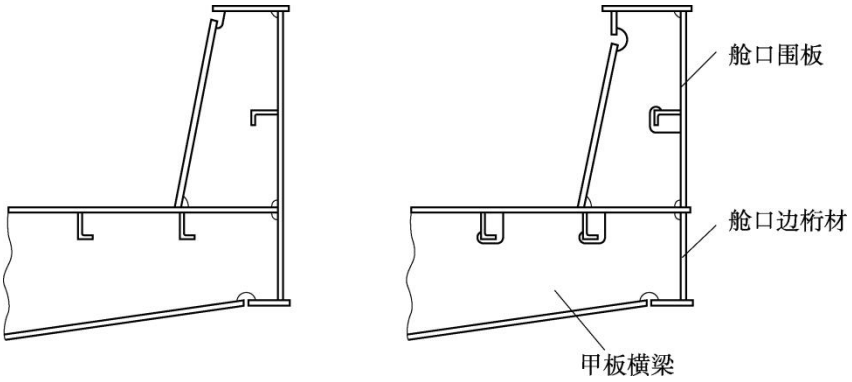


图 2.20.2.8（4） 舱口围板的延伸

⑦舱口围板的排水布置应符合以下要求：

如果通过布置排水挡板或将舱口侧围板和端围板沿垂向进行延伸，将排水沟布置在密封线以内，则应在排水沟的适当位置提供排水孔。

舱口围板的排水口的布置应与应力集中区域(如舱口角隅，起重机支柱过渡区域)保持足够的距离。

排水口应布置在排水沟的端部，并应采用止回阀来防止水从外部倒流进去。另外，消防软管不能与排水口相连接。

如在舱口盖和船舶结构的钢材之间存在连续的外部接触面，则在钢材接触面与密封件之间的空间亦应有排水设施。

2.20.2.9 钢质风雨密舱口盖的封闭装置

(1)紧固装置

①一般要求

在舱口盖与舱口围板之间以及在交叉接头处，应通过紧固装置产生足够的密封线压力，以保持风雨密。紧固装置应能承受由于船体变形所引起的舱口盖与舱口围板间的相对位移。

紧固装置应保证结构可靠，并牢固地与舱口围板、甲板或舱口盖连接。每块舱口盖上的各紧固装置应具有大致相同的刚性。根据本节 2.20.2.3(3)②的要求，舱口盖(包括由多个部分组成的舱口盖)的每一侧都应配备足够数量的紧固装置。

限位块、紧固装置的材料以及其焊接材料均应符合 CCS《材料与焊接规范》的有关要求。材料的技术规格应在舱口盖的图纸上标示出。

②杆状压紧器

如采用杆状压紧器，则应设置减振垫片或弹性垫块。

③液压式压紧器

如采用液压式压紧器，则应有可靠措施，以确保当液压系统出现故障时，在关闭位置处仍能保持机械锁紧。

④紧固装置的横剖面面积

紧固装置的实际横剖面面积应不小于：

$$A = 0.28 q S_{SD} k_l \quad \text{cm}^2$$

式中：q——密封线压力，N/mm，不小于 5N/mm；

S_{SD}——紧固装置间距，m，应取不小于 2m；

$$k_l = (\frac{235}{R_{eH}})^e$$

R_{eH}——材料的屈服应力，N/mm²，但 R_{eH} 应取不大于 $0.7R_m$；

R_m——材料的抗拉强度，N/mm²；

e=0.75　当 $R_{eH} > 235$　N/mm²；

e=1.00　当 $R_{eH} \leqslant 235$　N/mm²；

舱口面积超过 5m² 时，固定杆或螺栓的实际直径应不小于 19mm。

对于会产生显著弯曲和剪切应力的特殊设计的紧固装置，可按本条(1)⑤的止跳装置来设计。设计载荷为密封线压力 q 与紧固装置距离 S_{SD} 的乘积。

⑤止跳装置

对于其上系固货物的舱口盖的紧固装置，应根据本节2.20.2.2(4)中载荷确定的提升力来进行设计，如图2.20.2.9(1)。应考虑在实际中可能遇到的不对称载荷。在这些载荷作用下，紧固装置中的等效应力不能超过：

$$\sigma_V = \frac{150}{k_l} \quad \text{N/mm}^2$$

式中：k_l 同本条④。

注：对于防止舱口盖翻转，表 2.20.2.2(4)中的部分装载工况可能不能涵盖所有非对称装载的最危险情况。

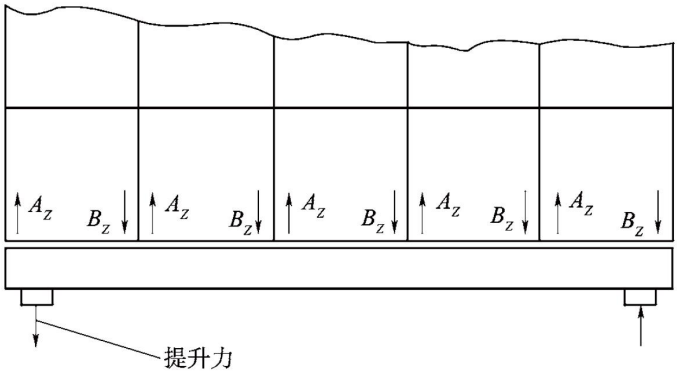


图 2.20.2.9(1)　舱口盖的提升力

止跳装置的免除应参照以下要求：

如果没有由于船舶横摇造成的舱口盖的提升，则舱口盖的紧固装置可以免除。在这种情况下，应经过交叉梁分析或有限元分析证明舱口盖达到平衡状况，垂向的舱口盖支撑应使用只受压的边界单元。如果紧固装置被免除，横向舱口盖导轨的有效高度应达到在舱口盖支撑以上 h_E，如图2.20.2.9(2)，h_E 应不小于：

$$h_E = 1.75(2se + d^2)^{0.5} - 0.75d \qquad \text{mm}$$

$$h_{E\min} = \text{舱口盖边板高度} + 150 \qquad \text{mm}$$

式中：e——横向舱口盖导轨的内侧与舱口盖边板的最大距离，mm；

s——横向舱口盖导轨间的总间隙，10≤s≤40，mm；

d——横向限位块的上边界与舱口盖支撑的距离，mm；

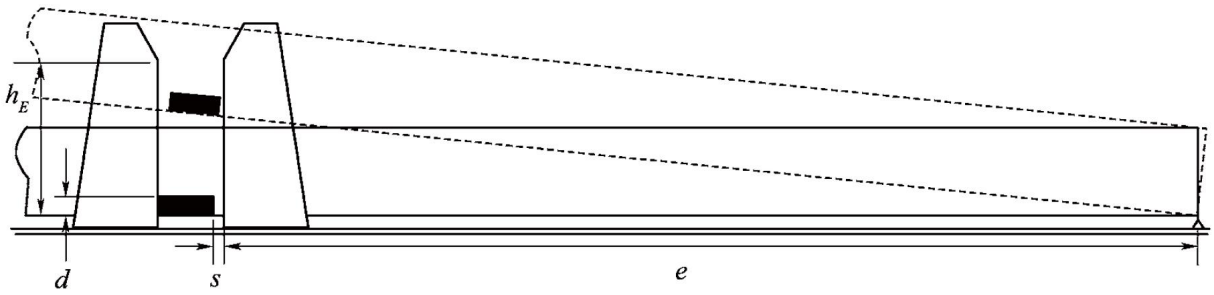


图 2.20.2.9(2)　横向舱口盖导轨的高度

横向舱口盖导轨及其支持结构的尺寸应按照横向载荷作用在高度 h_E 计算。

(2) 舱口盖支承、限位块及支持结构

①水平质量力

出于舱口盖支撑结构设计，水平质量力应按下式计算：

$$F_h = ma$$

式中：F_h——水平质量力，kN；

$a_X = 0.2g$　纵向；

$a_Y = 0.5g$　横向；

m——舱口盖上所系固货物的质量和舱口盖的质量总和；

纵向和横向加速度可不必同时考虑。

②舱口盖支承

为传递由本节2.20.2.2中工况以及本条(2)①中水平质量力所引起的支撑力，应保证支承的标称表面压力一般不超过下式计算所得之值：

$$p_{n\max} = dp_n \quad \text{N/mm}^2$$

式中：d=3.75-0.015L

$d_{\max} = 3.0$

$d_{\min} = 1.0$，一般情况

$d_{\min} = 2.0$，对部分装载工况，见本节 2.20.2.2(5)

P_n——许用标称表面压力，见表 2.20.2.9(2)。

许用标称表面压力 P_n　　**表 2.20.2.9(2)**

支承材料	如下作用力时的 P_n(N/mm²)	
	垂向力	水平力(在限位块上)
船体结构钢	25	40
淬火钢	35	50
低摩擦系数材料	50	—

对于不易发生相对位移的金属支承表面，其最大标称表面压力为：

$$p_{n\max} = 3p_n \text{ N/mm}^2$$

注：当设备商能够证明舱口盖垂向支撑结构的材料具有足够的能力承载更大的表面标称压力时，CCS可对许用标称表面应力进行放宽。其中载荷不但应包括静载荷还应考虑具有足够应力循环相对运动的动载荷。另外，需对垂向载荷和相关水平运动的长期分布谱进行假定并取得CCS批

准。

支承的图纸应提交批准。支承的图纸中必须标明材料制造厂商所给出的最大许用压力。

如预期在支承表面会产生较大的相对位移，则建议采用具有低摩擦特性的材料。

支承的支持结构的设计应使其压力均匀分布。

无论限位块如何进行布置，支承必须能在纵向和横向传递下述载荷 P_h：

$$P_h = \mu \frac{P_V}{\sqrt{d}}$$

式中：P_V——垂向支撑力；

μ——摩擦系数；

μ=0.5，钢对钢；

对于非金属，低摩擦特性的支承材料对钢之间的摩擦系数μ可以减少，但应不小于0.35，并应令CCS满意；

支承、邻近结构以及支持结构的许用应力应不超过本节2.20.2.5中的要求。

对于承受水平力P_h的支承的支持结构和邻近结构，应对其疲劳强度进行考虑。

③舱口盖限位块

应对舱口盖进行充分地压紧来防止水平移动。对于其上装载货物的舱口盖，应设有限位块。

限位块及其支持结构的尺寸由本节2.20.2.2(2)产生的载荷和本条(2)①中载荷的大者确定。

舱口盖和舱口围板上的限位块及其支持结构的许用应力应根据本节2.20.2.5确定。另外，应考虑本条(2)②的要求。

特别对于类型2船舶，应遵守以下附加要求：

舱口盖应通过限位块有效锁紧，以可承受175KN/m^{2}压力产生的横向力。

除第1舱舱口盖外，舱口盖应通过限位块有效锁紧，以可承受175 kN/m^{2}压力产生的作用于首端的纵向力。

第1舱舱口盖应通过限位块有效锁紧，以可承受230 kN/m^{2}压力产生的作用于首端的纵向力。如按《钢质海船入级规范》第2篇第8章第13节设置首楼，该压力可减小到175kN/m^2。

限位块、支撑结构和限位块焊缝的焊喉计算的相当应力应不超过许用值 $0.8R_{eH}$。

2.20.2.10 腐蚀余量和换新

（1）舱口盖和舱口围板的腐蚀余量

舱口盖构件的尺寸要求采用下列一般腐蚀余量 t_c，见表 2.20.2.10。

舱口盖和舱口围板的腐蚀余量 t_c **表 2.20.2.10**

适用	结构	t_S[mm]
集装箱船、汽车运输船、纸张运输船以及客船的露天甲板舱口	舱口盖	1.0
	舱口围板	1.5 当 $t \leqslant 10$
		$\frac{0.1t}{\sqrt{K}} + 0.5$，但不大于 3 当 $t > 10$

适用	结构	t_S[mm]
类型 2 船舶的露天甲板舱口	舱口盖，一般情况	2.0
	双壳舱口盖的顶板和底部板	2.0
	双壳舱口盖的内部结构	1.5
	舱口围板和围板撑板	1.5
其他船舶的露天甲板舱口	舱口盖，一般情况	2.0
	双壳舱口盖的顶板和底部板	1.5
	双壳舱口盖和封闭箱型横梁的内部结构	1.0
	不作为船体纵向构件的舱口围板	1.5
	作为船体纵向构件的舱口围板	1.5 当 $t \leqslant 10$
		$\frac{0.1t}{\sqrt{K}}+0.5$，但不大于 3 当 $t > 10$
	围板撑板和扶强材	1.5

注：t：规范要求的舱口围板的净厚度；

K：材料系数。

（2）换新

当测量厚度小于 t_{net} + 0.5 mm 时，以下结构构件需进行换新：

- 单壳舱口盖
- 双壳舱口盖的板
- 表 2.20.2.10 中给出腐蚀余量的舱口围结构

涂装应保持在“良好”状态，“良好”的定义见第 1 篇第 5 章 5.1.5.1(15)。

当 CCS 验船师根据舱盖板腐蚀和变形情况，对舱口盖顶板或底板换新或认为有必要时，应对双壳舱口盖的内部结构进行测厚，如测量厚度小于 t_{net}，内部结构应要求换新。

当腐蚀余量 t_S=1.0mm 时，钢材换新的厚度是 $t_{net,}$ 当测量厚度在 t_{net} 和 t_{net}+0.5mm 之间时，可通过采用涂装或年度测厚的措施替代换新。

对于表 2.20.2.10 中没有给出腐蚀余量的舱口围结构，钢板换新和涂装或年度测厚应符合 CCS 的相关规定。

2.20.3 钢质箱型舱口盖

2.20.3.1 钢质箱型舱口盖的设计载荷应符合下列规定：

(1) 露天舱口盖的垂向露天设计载荷按本节表 2.20.2.2(1)进行计算。

(2) 舱口盖上的许用货物载荷 p 应由船东或设计方规定，且应包含在装载手册中。同时应符合下述要求：

①下甲板舱口盖上的许用货物载荷 p 应不小于：

$$p = 7.06h \qquad \text{kN/m}^2$$

式中：h——舱口盖至上一层甲板的舱口盖扶强材下缘的垂直距离，m。

本条要求不适用于将下甲板舱口盖作为下甲板的多用途货船(见本节图 2.20.3.1(2))。

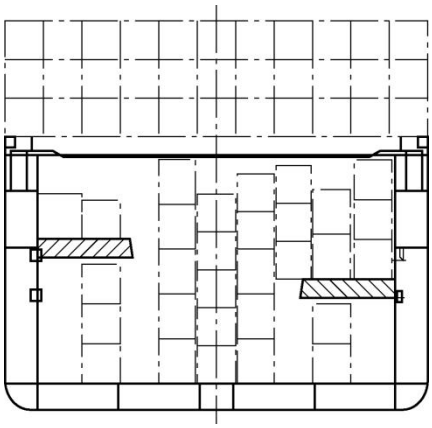


图 2.20.3.1(2)

②居住舱室内舱口盖上的许用货物载荷 p 应不小于 12.7kN/m^2。

2.20.3.2　舱口盖局部尺寸应符合下列规定：

(1) 舱口盖顶板的厚度 t 应不小于按下式计算所得之值，且应不小于 6mm：

$$t = 0.01s \qquad \text{mm}$$

式中：s——扶强材间距，mm。

(2) 钢质箱形舱口盖的扶强材和桁材的尺寸应符合以下规定：

①在均布的垂向露天设计载荷作用下，扶强材的剖面模数 W、剖面惯性矩 I 应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 7.82Kspl^2 \times 10^{-4} \qquad \text{cm}^3$$

$$I = 1.44spl^3 \times 10^{-3} \qquad \text{cm}^4$$

式中：p——垂向露天设计载荷，kN/m^2；

s——扶强材间距，mm；

l——扶强材跨距，m；

K——材料系数。

②在均布货物载荷作用下，扶强材的剖面模数 W、剖面惯性矩 I 应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 1.064Kspl^2 \times 10^{-3} \qquad \text{cm}^3$$

$$I = 1.8spl^3 \times 10^{-3} \qquad \text{cm}^4$$

式中：p——许用货物载荷，kN/m^2；

s——扶强材间距，mm；

l——扶强材跨距，m；

K——材料系数。

③当扶强材的两端设置有效的肘板或为连续时，扶强材的剖面模数可较①或②计算所得之值减小 33%，剖面惯性矩可减小 80%。

④钢质箱形型舱口盖的桁材应采用本节的直接计算法予以确定。但当钢质箱形型舱口盖承受均布载荷，且仅在一个方向设置桁材时，桁材也可按①和②确定。

(3)钢质箱形型舱口盖具有变化横剖面的扶强材和桁材的尺寸应符合以下规定：

①具有变化横剖面的扶强材和桁材(见图 2.20.3.2(3))在其跨距点处的剖面模数应不小于按下列公式计算值的大者：

$$W = W_{cs} \quad \text{——cm}^3$$

$$W = \left(1 + \frac{3.2\alpha - \gamma - 0.8}{7\gamma + 0.4}\right) W_{cs} \quad \text{——cm}^3$$

式中：W_{cs}——符合本节要求的等截面剖面模数，cm^3；

$a = \dfrac{l_1}{l_0}$，其中 l_0 为跨距，m，l_1 为变化剖面部分的长度，m；

$\gamma = \dfrac{W_1}{W_0}$，其中 W_0 为跨距中点的剖面模数，cm^3，W_1 为端点的剖面模数，cm^3。

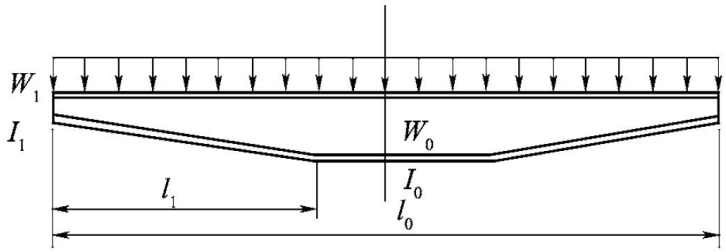


图 2.20.3.2(3)

②具有变化横剖面的扶强材和桁材在其跨距点处的剖面惯性矩 I 应不小于按下列公式求得值的大者：

$$I = I_{cs} \quad \text{——cm}^4$$

$$I = \left(1 + \frac{8\alpha^3(1-\beta)}{0.2 + 3\sqrt{\beta}}\right) I_{cs} \quad \text{——cm}^4$$

式中：I_{cs}——符合本节要求的等截面惯性矩，cm^4；

$a = \dfrac{l_1}{l_0}$，其中 l_0 为跨距，m，l_1 为变化剖面部分的长度，m；

$\beta = \dfrac{I_1}{I_0}$，其中 I_0 为跨距中点剖面惯性矩，cm^4，I_1 为端点的剖面惯性矩，cm^4；

③扶强材和桁材两端的腹板高度应不小于其跨距中点处腹板高度的 2/5 且不小于 150mm，在该处的剖面模数应不小于跨距中点处的 0.35 倍。

2.20.3.3　钢质箱型舱口盖结构强度的直接计算应符合本节 2.20.2.4 的规定。

2.20.3.4　钢质箱型舱口盖结构屈服和变形衡准

钢质箱型舱口盖的屈服强度和挠度应满足表 2.20.3.4 的要求。

钢质箱型舱口盖　　**表 2.20.3.4**

载荷	许用正应力 ［σ］(N/mm²)	许用挠度 (m)
垂向露天设计载荷	$0.70R_{eH}$	$0.0049l$
除垂向露天设计载荷以外的载荷	$0.65R_{eH}$	$0.0044l$

2.20.3.5 钢质箱型舱口盖结构屈曲强度应满足表 2.20.3.5 的要求。

表 2.20.3.5

构件		衡准
舱口盖顶板板格	单向设置桁材	对于桁材弯曲而引起的舱口盖顶板板格的压应力应不大于临界屈曲应力σ_c的 0.8 倍，σ_c可按~~本篇第 8 章第 11 节 8.11.3.6(1)~~2.20.3.5（1）的规定计算。
	双向设置桁材	用有限元板单元模型分析计算所得的舱口盖顶板板格的双轴向压应力，应符合本节 2.20.2.6(1)的规定。
桁材腹板		桁材腹板板格的剪切应力应不大于临界屈曲剪切应力τ_c的 0.8 倍，τ_c可按~~本篇第 8 章第 11 节 8.11.3.6(3)~~ 2.20.3.5（3）的规定计算。
与桁材平行的扶强材		对于平行于扶强材方向的桁材弯曲而引起的扶强材带板中的压应力应不大于临界屈曲应力σ_c的 0.8 倍，σ_c可按~~本篇第 8 章第 11 节 8.11.3.6(2)~~2.20.3.5（2）的规定计算。

（1） 舱口盖板临界应力

对于平行于扶强材方向的主要支撑构件弯曲而引起的舱口盖板板格的压应力σ，应不超过临界屈曲应力σ_{c1}的 0.8 倍，σ_{c1}应按下列两式计算：

$$\sigma_{c1} = \sigma_{E1} \qquad \text{当 } \sigma_{E1} \le \frac{R_{eH}}{2}\text{；}$$

$$\sigma_{c1} = R_{eH}\left(1 - \frac{R_{eH}}{4\sigma_{E1}}\right) \qquad \text{当 } \sigma_{E1} > \frac{R_{eH}}{2}\text{；}$$

式中：R_{eH} ——材料屈服应力，N/mm^2；

$$\sigma_{E1} = 3.6E\left(\frac{t}{1000s}\right)^2\text{，N/mm}^2\text{；}$$

E ——弹性模量，钢材取为 2.06×10^5 N/mm^2；

t ——板格的净厚度，mm；

s ——扶强材的间距，m。

对于垂直于扶强材方向的主要支撑构件弯曲而引起的舱口盖板板格的平均压应力σ，应不超过临界屈曲应力σ_{c2}的 0.8 倍，σ_{c2}应按下列两式计算：

$$\sigma_{c2} = \sigma_{E2} \qquad \text{当 } \sigma_{E2} \le \frac{R_{eH}}{2}\text{；}$$

$$\sigma_{c2} = R_{eH}\left(1 - \frac{R_{eH}}{4\sigma_{E2}}\right) \qquad \text{当 } \sigma_{E2} > \frac{R_{eH}}{2}\text{；}$$

式中：R_{eH}——材料屈服应力，N/mm^2；

$$\sigma_{E2} = 0.9mE\left(\frac{t}{1000s_s}\right)^2\text{，N/mm}^2\text{；}$$

$$m = c\left[1 + \left(\frac{s_s}{l_s}\right)^2\right]^2 \frac{2.1}{\psi + 1.1}$$

E——弹性模量，钢材取为 2.06×10^{5}N/mm^2；

t——板格的净厚度，mm；

s_s——板格的短边长度，m；

l_s——板格的长边长度，m；

ψ——最小压应力与最大压应力之比值；

c=1.3，当板格由主要支撑构件支撑；

c=1.21，当板格由角钢或 T 型钢扶强材支撑；

c=1.1，当板格由球扁钢扶强材支撑；

c=1.05，当板格由扁钢扶强材支撑。

（2） 舱口盖扶强材临界应力

对于平行于扶强材方向的主要支撑构件的弯曲而引起的舱口盖扶强材带板中的压应力σ，应不超过临界屈曲应力σ_{cs}的 0.8 倍，σ_{cs}应按下列两式计算：

$\sigma_{cs}=\sigma_{Es}$　　当 $\sigma_{Es}\le\frac{R_{eH}}{2}$；

$\sigma_{cs}=R_{eH}\left(1-\frac{R_{eH}}{4\sigma_{Es}}\right)$　　当 $\sigma_{Es}>\frac{R_{eH}}{2}$；

式中：R_{eH}——材料屈服应力，N/mm²；

σ_{Es}——扶强材的理想弹性屈曲应力，N/mm²，取σ_{E3}和σ_{E4}中之小值；

$\sigma_{E3}=\frac{0.001EI_a}{Al^2}$，N/mm²；

E——弹性模量，钢材取为 2.06×10^5N/mm²；

I_a——扶强材的惯性矩，cm⁴，计算时应包括带板，带板宽度取为扶强材间距；

A——扶强材的横剖面面积，cm²，计算时应包括带板，带板宽度取为扶强材间距；

l——扶强材跨距，m；

$\sigma_{E4}=\frac{\pi^2EI_w}{10^4I_pl^2}\left(m^2+\frac{K}{m^2}\right)+0.385E\frac{I_t}{I_p}$，N/mm²；

$K=\frac{Cl^4}{\pi^4EI_w}\times10^4$；

m——半波数，由表 2.20.3.5（2）给出；

I_w——扶强材与板连接处的剖面扇形惯性矩，cm⁶，应按下列各式计算：

$I_w=\frac{h_w^3t_w^3}{36}\times10^{-6}$，对扁钢；

$I_w=\frac{t_fb_f^3h_w^2}{12}\times10^{-6}$，对 T 型钢；

$I_w=\frac{b_f^3h_w^2}{12(b_f+h_w)^2}\left[t_f\left(b_f^2+2b_fh_w+4h_w^2\right)+3t_wb_fh_w\right]\times10^{-6}$，对角钢和球扁钢；

I_p——扶强材与板连接处的剖面极惯性矩，cm⁴，应按下列两式计算：

$I_p=\frac{h_w^3t_w}{3}\times10^{-4}$，对扁钢；

$I_p=\left(\frac{h_w^3t_w}{3}+h_w^2b_ft_f\right)\times10^{-4}$，对有折边的扶强材；

I_t——扶强材的圣维南惯性矩，cm⁴，应按下式计算，计算时不包括带板

$I_s=\frac{h_w t_w^3}{3}\times10^{-4}$，对扁钢；

$I_s=\frac{1}{3}\left[h_w t_w^3+b_f t_f^3\left(1-0.63\frac{t_f}{b_f}\right)\right]\times10^{-4}$，对有折边的扶强材；

h_w——扶强材的腹板高度，mm；

t_w——扶强材的腹板净厚度，mm；

b_f——扶强材翼板宽度，mm；

t_f——扶强材翼板净厚度，mm；

s——扶强材间距，m；

C——由舱口盖顶板产生的弹簧刚度，应按下式计算：

$$C=\frac{k_\rho E t_\rho^3}{3s\left(1+\frac{1.33k_\rho h_w t_\rho^3}{1000st_w^3}\right)}\times10^{-3}$$；

$k_\rho=1-\eta_\rho$，取值应不小于 0，对于有折边的扶强材，取值应不小于 0.1；

$\eta_\rho=\frac{\sigma}{\sigma_{E1}}$；

σ——主要支撑构件翼板带板正应力；

σ_{E1}——见 2.20.3.5 (1)；

t_p——舱口盖板板格的净厚度，mm。

半波数 ***m*** 值　　表 2.20.3.5（2）

K	$0<K\leq4$	$4<K\leq36$	$36<K\leq144$	$(m-1)^2m^2<K\leq m^2(m+1)^2$
m	1	2	3	m

（3） 舱口盖主要支撑构件腹板板格临界应力

应对主要支持构件的腹板板格进行屈曲校核，腹板板格是由主要支撑构件的腹板加强筋、与之相交的其他主要支撑构件、面板(或舱口盖底板)、舱口盖顶板围成的。

主要支撑构件腹板板格的剪切应力τ应不超过临界屈曲应力τ_c的 0.8 倍，τ_c应按下列两式计算：

$\tau_c=\tau_E$　当$\tau_E\leq\frac{\tau_F}{2}$；

$\tau_c=\tau_F\left(1-\frac{\tau_F}{4\tau_E}\right)$　当$\tau_E>\frac{\tau_F}{2}$；

式中：$\tau_F=\frac{R_{eH}}{\sqrt{3}}$，N/mm²；

R_{eH}——材料屈服应力，N/mm²；

$\tau_E=0.9k_s E\left[\frac{t_{pr,n}}{1000d}\right]^2$，N/mm²；

E——弹性模量，钢材取为 2.06×10^5 N/mm^2；

$t_{pr,\,n}$——主要支撑构件腹板的净厚度，mm；

$k_t=5.35+4.0\left(\frac{d}{a}\right)^2$；

a——腹板板格中长边长度，m；

d——腹板板格中短边长度，m。

对于平行于扶强材方向的主要支撑构件，腹板板格边长应考虑实际尺寸。

对于垂直于扶强材方向的主要支撑构件或者舱口盖结构没有扶强材的情况，在计算τ_c时应假定板格是边长为 d 的正方形，应考虑板格端部剪切应力的平均值τ。

2.20.3.6　钢质箱形型舱口盖应按下列要求配备防水帆布和封闭装置：

(1) 对位于干舷甲板和上层建筑甲板上的露天舱口，至少应覆两层结实的防水帆布。

(2) 不应用黄麻制作防水帆布。在防水帆布被制成舱盖布以前的单位面积最小重量为：

如帆布涂煤焦油 0.65kg/mm^2；

如帆布涂化学涂料 0.65kg/mm^2；

如帆布涂黑油 0.55kg/mm^2；

(3) 在舱口围板或水平加强筋上应焊有楔耳，楔耳应有适合楔子的斜度。楔耳宽度应不小于 65 mm，中心间距不大于 600mm，近舱口角隅的楔耳距舱口角隅应不大于 150mm。

(4) 应采用硬木做楔子。楔子的斜率应不大于 1:6，其薄头厚度至少为 13mm。

(5) 对位于干舷甲板及上层建筑甲板上的露天舱口，应配备扁钢或其他相当属具，以便能有效地压紧覆在舱口盖上防水帆布。对于长度大于 1.5m 的舱口盖，至少应用两套装置予以压紧。

(6) 对于其他位置的露天舱口，应配备供系缚用的松紧螺栓或其他装置。

2.20.3.7 钢质箱型舱口盖的舱口围板应符合下列规定：

(1) 露天舱口围板的结构：

①围板厚度 t 应不小于按下式计算所得之值：

$$t=0.05L+6.5 \qquad \text{mm}$$

式中：L——船长，m，计算时取值不必大于 90m。

②当围板高度等于或大于 600mm 时，应在其上缘或离上缘约 250mm 处设置水平球扁钢或其他等强度构件。水平球扁钢的腹板高度应不小于 180mm，并应在水平球扁钢与甲板之间设置间距不大于 3m 的垂直加强筋或肘板。加强筋或肘板的腹板高度应不小于水平球扁钢的腹板高度，并应具有折边或面板。当围板高度大于 900mm 时，应减小上述加强筋或肘板的间距。当围板高度等于或大于 1200mm 时，应在围板半高处增设一根水平球扁钢或其他等强度构件。当舱口围板承受集装箱时，应对舱口围板及其支撑构件作相应加强；

③如在围板上缘不设面板，则在该处应用半圆钢或其他能保证围板刚性和上缘部分圆滑的型材；

④当甲板板不伸入围板内时，应将舱口角隅处的围板弯成圆形。在船中部 0.5L 区域内，此圆角半径应符合本章 2.4.4 的要求。

当甲板板伸入围板内，而甲板开口的角隅处符合本章 2.4.4 要求，且将纵向围板在舱口角隅处削斜延伸时，则舱口角隅处的舱口围板可为方形；

⑤不应将与舱口围板大致在一直线上的外伸肘板或供收藏钢质舱盖的轨道焊于甲

板室或桅屋上，除非经过计算后表明可以将舱口围板作为船体的纵向强力构件；

⑥如将露天舱口围板同时兼作甲板纵桁时，其结构应符合本章2.8.8中的有关要求。

(2) 当将下甲板舱口围板同时兼作甲板纵桁时，其结构还应符合本章2.8.8中的有关要求。

2.20.4 带活动横梁的舱口盖

2.20.4.1 带活动横梁的舱口盖的设计载荷应符合下列规定：

(1) 露天舱口盖的垂向露天设计载荷按本节表2.20.2.2(1)进行计算；

(2) 舱口盖上的许用货物载荷应符合本节2.20.3.1(2)的要求。

2.20.4.2 带活动横梁的舱口盖应符合下列规定：

(1) 对于带活动横梁的舱口盖，如其舱口盖板为钢质，则应满足本节2.20.3.2(1)的要求；如为木质盖板，厚度 t 应不小于按下式所得之值，且不小于60mm：

$$t = 40S \qquad \text{mm}$$

式中：S——舱口活动横梁间距，m。

若设计载荷大于18.4kN/m^2，则应按比例增加板厚。

木质盖板的两端应用宽为65mm，厚为3mm的镀锌扁钢进行围箍，并予以有效固定。

(2) 在垂向露天设计载荷作用下，带活动横梁的露天舱口盖应符合下列规定：

①活动横梁的剖面模数 W、剖面惯性矩 I 应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 0.782KSpl^2 \qquad \text{cm}^3$$

$$I = 1.44Spl^3 \qquad \text{cm}^4$$

式中：p——垂向露天设计载荷，按本节2.20.4.1进行计算，kN/m^2；

S——舱口活动横梁的间距，m；

l——舱口活动横梁的跨距，m；

K——材料系数。

②活动横梁距端部至少为180mm长度内的腹板加厚1倍，或在原腹板上加设复板。

③活动横梁的上下缘应设有连续面板。上缘面板的宽度应达到使支承舱口盖板的宽度不小于65mm，并在腹板平面内加装高为50mm的扁钢。

④在活动横梁的承座上应设有效的装置，以将舱口活动横梁固定在其中。承座的支承长度至少为75mm。

⑤钢质盖板扶强材的剖面模数 W、剖面惯性矩 I 应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 0.664Kspl^2 \qquad \text{cm}^3$$

$$I = 1.13spl^3 \qquad \text{cm}^4$$

式中：p——垂向露天设计载荷，按本节2.20.4.1进行计算，kN/m^2；

l——扶强材跨距，m；

s——扶强材间距，m；

K——材料系数。

(3) 在均布货物载荷作用下，带活动横梁的舱口盖应满足下述要求：

①舱口活动横梁的剖面模数 W、剖面惯性矩 I 应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 1.064KSpl^2 \qquad \text{cm}^3$$

$$I = 1.8Spl^3 \qquad \text{cm}^4$$

式中：p——许用货物载荷，kN/m^2；

S——舱口活动横梁的间距，m；

l——舱口活动横梁的跨距，m；

K——材料系数。

②舱口活动横梁还应满足本条(2)中②～④的要求。

③钢质盖板扶强材的剖面模数 W、剖面惯性矩 I 应不小于按下列各式计算所得之值：

$$W = 1.064Kspl^2 \qquad \text{cm}^3$$

$$I = 1.8spl^3 \qquad \text{cm}^4$$

式中：p——许用货物载荷，kN/m^2；

l——扶强材跨距，m；

s——扶强材间距，m；

K——材料系数。

(1) 带活动横梁的舱口盖具有变化横剖面的扶强材和桁材的尺寸应符合本节 2.20.3.2(3) 规定。

2.20.4.3　带活动横梁的舱口盖结构强度的直接计算应符合本节 2.20.2.4 的规定。

2.20.4.4　带活动横梁的舱口盖结构屈服和变形应符合本节 2.20.3.4 的规定。

2.20.4.5　带活动横梁的舱口盖结构屈曲强度应符合本节 2.20.3.5 的规定。

2.20.4.6　带活动横梁的舱口盖的封闭装置应符合本节 2.20.3.6 的规定。

2.20.4.7　带活动横梁的舱口盖的舱口围板应符合本节 2.20.3.7 的规定。

2.20.5　其他类型的开口

2.20.5.1　对于其他类型开口，应符合本篇第 1 章 1.12.7 的要求。

2.20.5.2　露天甲板上的小舱口还应符合下列要求：

(1) 小舱口围板的高度应符合本节 2.20.1.8 的要求，其厚度应不小于本章对舱口开口线内的甲板所规定的最小厚度或 11mm，为其小者；

(2) 小舱口应配以钢质风雨密的舱口盖，并设可靠的紧固装置，以在任何情况下都能使舱口盖保持风雨密，舱口盖的板厚应不小于本章对舱口开口线内的甲板所规定的最小厚度或 8mm，为其小者。

(3) 位于船首露天甲板上的小舱口盖的强度和锁紧，还应符合本篇第 1 章第 7 节的有关要求。

新增附录 4

附录 4　船舶结构单元屈曲强度评估

第 1 节　应用与定义

缩写

EPP —— 单元板格，定义见[1.2.3.1]
PSM —— 主要支撑构件
SP —— 加筋板格，定义见[1.2.3.3]
UP —— 非加筋板格，定义见[1.2.3.3]

1.1　应用

1.1.1　一般要求

1.1.1.1　关于船舶强度的相关统一要求

本附录给出了屈曲评估的一般流程（见图 1.1.1.1），且对于舱口盖结构，与第 2 章第 20 节一起联合使用。本附录在下文中，将第 2 章第 20 节称之为相关统一要求。

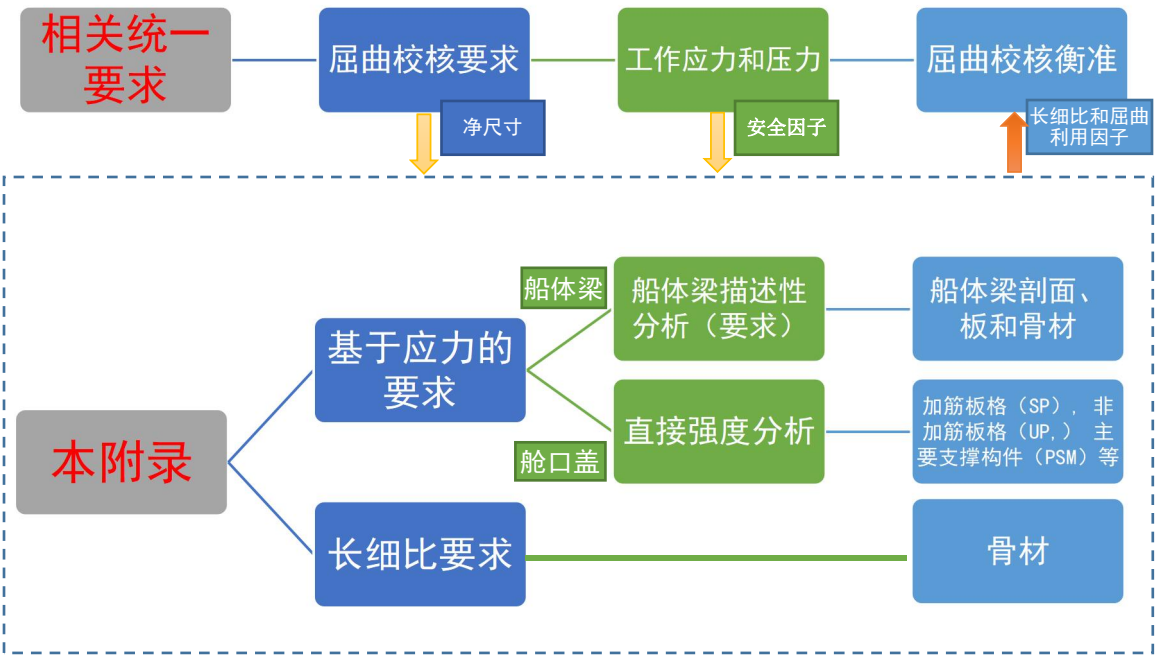


图 1.1.1.1　本附录与相关统一要求联合使用的应用一览图

1.1.2　本附录的应用

1.1.2.1　本附录的章节及应用说明

屈曲校核应按以下进行：

（1）第 1 节　与屈曲能力有关的一般性定义、许用屈曲利用因子和屈曲校核衡准；

（2） 第 2 节 纵骨和横向骨材的长细比要求；

（3） 第 3 节 承受船体梁应力的板、纵骨和横向骨材、主要支撑构件及其他构件的描述性屈曲要求；

（4） 第 4 节 舱口盖结构件（包括板、骨材和主要支撑构件）的直接强度分析（通常采用有限元）的屈曲要求；

（5） 第 5 节 板格、骨材、主要支撑构件和柱结构的屈曲能力确定。

1.1.2.2 本附录的屈曲评估

对于船体梁、舱口盖或其他结构组件，应根据适用的相关统一要求，校核第 2 节中定义的长细比要求和第 3 节或第 4 节中规定的屈曲要求。

1.1.2.3 替代方法

本附录包含了确定板、纵骨、主要支撑构件和柱屈曲能力的一般方法。对于本附录中未涵盖的特殊情况，例如在两个方向上具有加强筋的整个板结构（即同时设有主、次加强筋的加筋板），经 CCS 同意，可使用其他更先进的方法，如有限元分析方法。

1.2 术语和假定

1.2.1 屈曲

1.2.1.1 屈曲强度

屈曲强度或承载力是指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。考虑[1.2.1.2]中屈曲行为的屈曲强度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结构所能承受的最大载荷。

对于每个结构构件，其屈曲强度应对应于最不利或最关键的屈曲模式。

1.2.1.2 屈曲行为

屈曲强度评估同时考虑了弹性屈曲和后屈曲行为。后屈曲可根据载荷情况、长细比和结构类型，考虑载荷的内部重新分布。例如，对于板的屈曲评估，通常可以利用其正面的弹性后屈曲效应。

如上所述，对于细长结构，计算所得的屈曲强度通常高于理想弹性屈曲应力（最小特征值）。若接受细长板格的弹性屈曲，则意味着在更高的屈曲利用水平下，可能会出现较大的弹性挠度和平面内刚度降低。

1.2.2 净尺度方法

1.2.2.1 一般要求

除非另有规定，本附录中的所有构件尺寸要求，包括长细比要求，均基于通过从总厚度中扣除全部腐蚀增量 t_c 而得到的净构件尺寸。

1.2.2.2 腐蚀增量

本附录中提及的腐蚀增量 t_c 的定义见相关统一要求。

1.2.2.3 应力计算模型

用于计算屈曲评估的应力计算的结构模型（通常基于净构件尺寸）的相关建模等要求见相关统一要求。

1.2.3 结构理想化

1.2.3.1 单元板格（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。单元板格的长为 a，宽为 b，分别对应于板的最长边和最短边， 如图 1.2.3.1 所示。

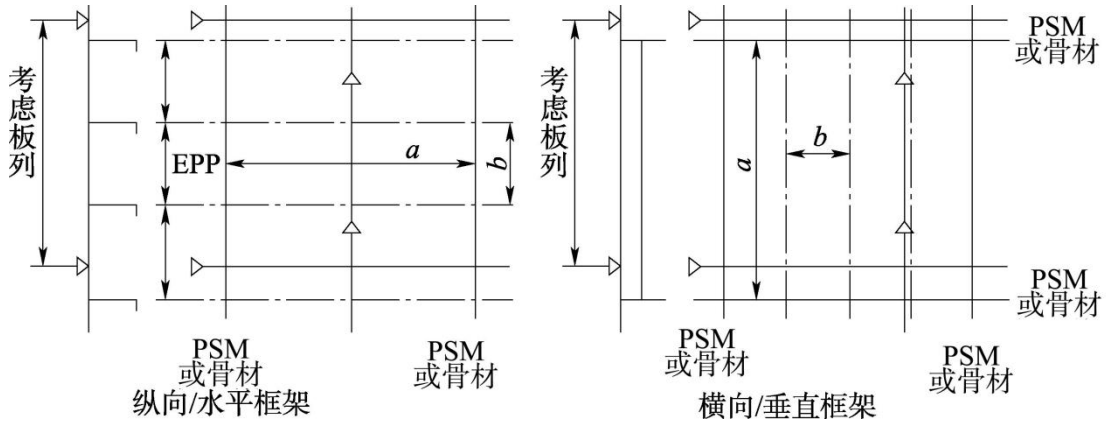


图 1.2.3.1　单元板格（EPP）的定义

1.2.3.2　骨材的标准类型

典型骨材类型的横截面尺寸定义说明如图 1.2.3.2（1）所示，包括扁钢、球扁钢、角钢、L2 和 T 型材。如适用，其他类型的骨材可理想化为用于屈曲校核的图 1.2.3.2（1）中的典型类型之一。对于通常安装在某些舱口盖中的 U 型材，其横截面尺寸定义说明如图 1.2.3.2（2）所示。

除非另有规定，屈曲校核中的骨材跨距应取其全跨度或全长度 l ，mm，即等于主要支撑构件的间距。

横截面尺寸中的符号定义如下：

b_1 —— 由 U 型材所围的带板宽度，mm，如图 1.2.3.2（2）所示；

b_2 —— 相邻 U 型材之间的带板宽度，mm，如图 1.2.3.2（2）所示；

b_f —— 骨材的翼板或面板宽度，mm，如图 1.2.3.2（1）和图 1.2.3.2（2）所示；

$b_{f\text{-}out}$ —— 骨材腹板厚度中面到翼板边缘处最大距离，mm，如图 1.2.3.2（1）所示；

d_f —— L2 型钢横截面的翼板延伸部分的宽度，mm，如图 1.2.3.2（1）所示；

e_f —— 带板至翼板中心的距离，mm，如图 1.2.3.2（1）所示。详细定义见第 5 节[符号]；

h_w —— 骨材腹板高度，mm，如图 1.2.3.2（1）和图 1.2.3.2（2）所示；

t_f —— 翼板净厚度，mm；

t_p —— 带板净厚度，mm；

t_w —— 腹板净厚度，mm。

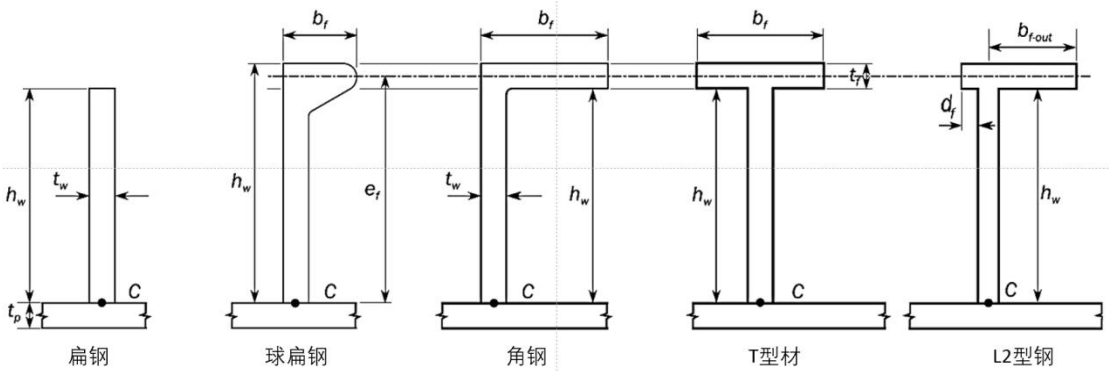


图 1.2.3.2（1）　典型骨材横截面尺寸说明

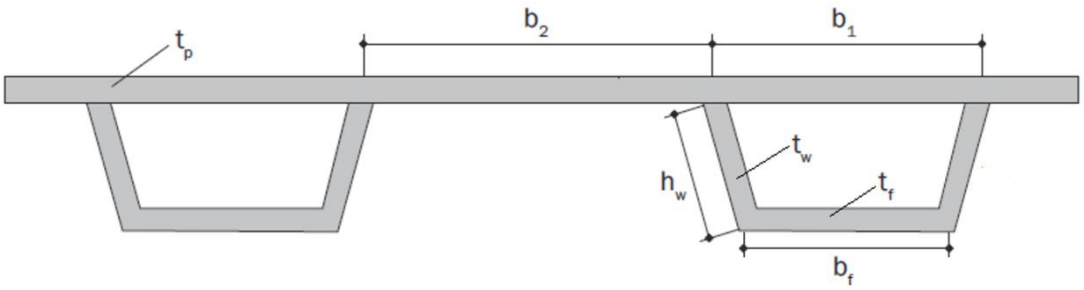


图 1.2.3.2（2） U 型材横截面尺寸说明

1.2.3.3 加筋板格（SP）与非加筋板格（UP）

对于骨材与其带板之间具有相对较强相互作用的板格，每根骨材与其带板应作为一个整体模拟为一个加筋板格，以使屈曲评估中能够考虑其局部和整体屈曲模式。

但对于单元板格，如屈曲强度校核中不考虑设置在其边缘的骨材与之相互作用的效应，则该板格应模拟为非加筋板格。

1.2.4 正负号规定

1.2.4.1 应力

本附录中，压应力和剪应力为正值，拉力为负值。

1.3 评估方法和接受衡准

1.3.1 评估方法

1.3.1.1 方法 A 与方法 B

考虑到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。

1.3.1.2 SP-A、SP-B、UP-A 和 UP-B 模型

对于[1.2.3.3]中定义的加筋板格和非加筋板格结构模型的屈曲评估，用方法 A 或方法 B 进行板的屈曲评估，对此建立了以下四个屈曲评估模型：

（1）SP-A：加筋板格，且使用方法 A；

（2）SP-B：加筋板格，且使用方法 B；

（3）UP-A：非加筋板格，且使用方法 A；

（4）UP-B：非加筋板格，且使用方法 B；

1.3.2 屈曲利用因子

1.3.2.1 利用因子η，定义为施加的载荷与对应的屈曲能力之比。

1.3.2.2 对于组合载荷，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 1.3.2.2 所示，且表示如下：

$$\eta_{act} = \frac{W_{act}}{W_U} = \frac{1}{\gamma_c}$$

式中：

W_{act} —— 施加的等效应力。对于描述性和直接强度分析的屈曲评估，实际施加的等效应力分别在第 3 节和第 4 节中给出；

W_U —— 等效屈曲能力。对于板和骨材，对应的屈曲或极限能力在第 5 节中给出；

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结构垮塌进行计算，也就是说，当实施应力增加或减少，而使其值落在屈曲强度相关曲线或表面上时，则得到板格对应的屈曲能力。

图 1.3.2.2 表示某一结构件在σ_x和σ_y应力作用下的屈曲能力和屈曲利用系数。

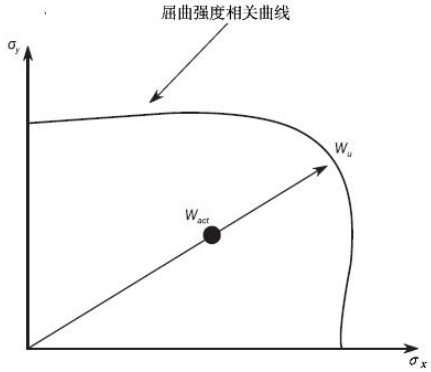


图 1.3.2.2　屈曲能力和屈曲利用因子示例

1.3.3　许用屈曲利用因子

1.3.3.1　许用屈曲利用因子η_{all}，按相关统一要求中的规定取用。

1.3.4　屈曲接受衡准

1.3.4.1　如果一个结构件满足如下衡准，则具有可接受的屈曲强度：

$$\eta_{act} \leq \eta_{all}$$

式中：

η_{act} —— 基于所施加应力的屈曲利用因子，定义见[1.3.2.2]；

η_{all} —— 许用屈曲利用因子，定义见[1.3.3.1]。

第 2 节　　尺度比要求

符号

本节中未定义的符号见第 1 节[1.2.3.2]。

R_{eH} —— 所计算结构件的规定最小屈服应力，N/mm^2。

2.1　一般要求

2.1.1　引言

2.1.1.1　骨材单元（U 型材除外）应满足本节给出的适用长细比和尺度比要求。

2.2　骨材

2.2.1　骨材尺度比

2.2.1.1　所有骨材类型的净尺寸

骨材的净厚度应满足如下衡准：

（1）骨材腹板：

$$t_w \geq \frac{h_w}{C_w}\sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

（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 2.2.1.1 中给出。

长细比系数　　表 2.2.1.1

骨材类型	C_w	C_f
角钢和 L2 型钢	75	12
T 型材	75	12
球扁钢	45	-
扁钢	22	-

如果上述（2）的要求不能满足，则用于强度评估（包括实际净剖面模数）的翼板有效自由外伸部分，mm，应取为：

$$b_{f-out-max} = C_f t_f \sqrt{\frac{235}{R_{eH}}}$$

对于组合型材，采用以下替代方法：对于组合型材的腹板，使用其相关屈服强度（不含腹板边上的加强筋），结合表 2.2.1.1 中的角钢和 L2 型钢要求进行评估。腹板边上的加强筋可作为扁钢加强筋，按[2.2.1.1]进行评估。对翼板，[2.2.1.2]中的要求仍然适用。

2.2.1.2　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：

$$b_f \geq 0.2h_w$$

2.3　主要支撑构件

2.3.1　尺度比和刚度比

2.3.1.1　腹板和翼板的尺度比

主要支撑构件腹板和翼板的净厚度一般应满足本规范第 9 篇第 8 章第 2 节[4.1]的相关要求。

第 3 节　船体梁描述性分析的屈曲要求

符号

η_{all}：许用屈曲利用因子，定义见第 1 节[1.3.3.1]；

LCP：载荷计算点，定义见[3.1.2.1]。

3.1　一般要求

3.1.1　引言

3.1.1.1　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）、骨材和纵舱壁的槽形结构。

3.1.1.2　对承受船体梁应力的构件进行屈曲校核的船舶纵向范围见相关统一要求。

3.1.1.3　设计载荷组：应对相关统一要求中定义的设计装载工况相对应的所有设计载荷组以最不利的压力组合进行屈曲校核。

对于每个设计载荷组的所有静载荷和动载荷工况，侧向压力应按[3.1.2.1]中定义的载荷计算点进行计算，且应与相关统一要求中的船体梁应力进行组合施加。

3.1.2　定义

3.1.2.1　载荷计算点

单元板格(EPP)和骨材的载荷计算点 (LCP) 定义如下：

（1）EPP 的船体梁应力载荷计算点

EPP 的船体梁应力应按表 3.1.2.1 规定的载荷计算点计算。

板屈曲评估的载荷计算点(LCP)坐标　　表 3.1.2.1

LCP 坐标	船体梁弯曲应力		船体梁剪切应力
	非水平布置板	水平布置板	
x 坐标	EPP 长边中点		
y 坐标	EPP 上端和下端点，A1 和 A2，见图 3.1.2.1(1)	EPP 舷侧和舷内端点，A1 和 A2，见图 3.1.2.1(1)	EPP 中点，B 点见图 3.1.2.1(1)
z 坐标	与 x 和 y 值对应		

（2）　纵骨的船体梁应力载荷计算点

纵骨的船体梁应力应按下列荷载计算点计算：

- 纵骨的跨中；
- 纵骨与带板的交点。

（3）　水平加强筋的压力载荷计算点

压力的载荷计算点：

- 骨材全长度 l 的中点；
- 骨材与带板的交点。

（4）　非水平加强筋的压力载荷计算点

侧向压力 P 应取全长度 l 中点的压力与下列公式计算所得之值的大者：

$P = \dfrac{p_U + p_L}{2}$，当垂直加强筋的上端在最低零压力线以下时；

$P = \dfrac{l_1}{l}\dfrac{p_L}{2}$，当垂直加强筋的上端在最低零压力线或以上时。

式中：　l_1——垂直加强筋下端与零压力线之间的距离，m；

p_U、p_L——分别为垂直加强筋跨距 l 的上下端侧向压力。

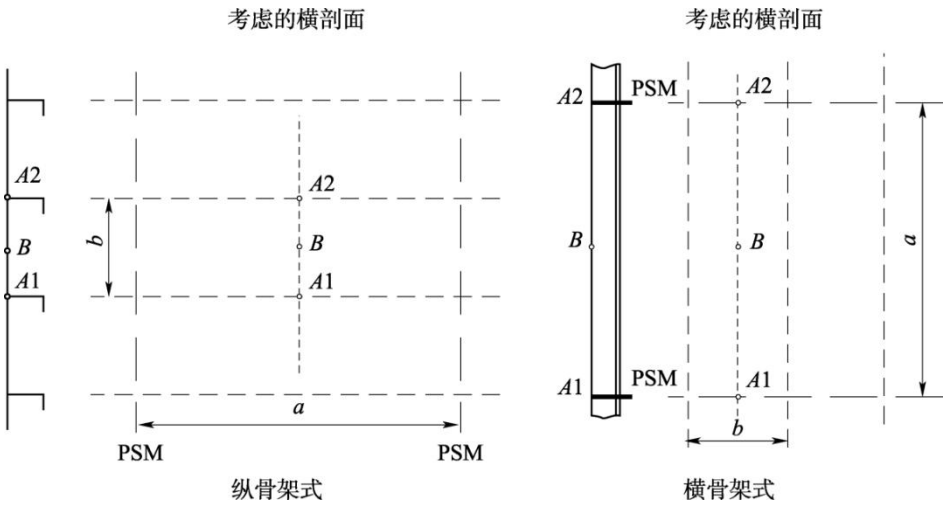


图 3.1.2.1（1）　板屈曲评估载荷计算点(PSM 系指主要支撑构件)

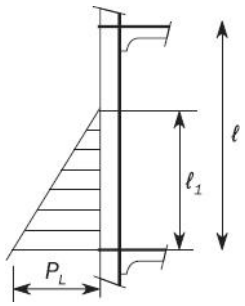


图 3.1.2.1（2）　垂直加强筋压力定义

3.1.3　等效板格

3.1.3.1　具有板厚变化的纵向加筋布置情况

对于纵向加筋布置，如果单元板格(EPP)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：

$$b_{eq} = l_1 + l_2\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1.5}$$

式中：l_1——板格中较小板厚 t_1 部分的宽度，mm，定义见图 3.1.3.1；

l_2——板格中较大板厚 t_2 部分的宽度，mm，定义见图 3.1.3.1。

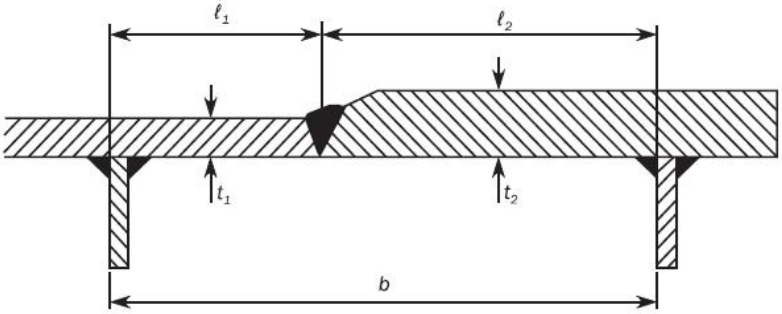


图 3.1.3.1　在宽度跨区上的板厚变化

3.1.3.2　具有板厚变化的横向加筋布置情况

对于横向加筋布置，如果单元板格(EPP)内板厚有所不同，则板和骨材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。

3.1.3.3　具有不同材料的板格

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。

3.2 屈曲衡准

3.2.1 整体加筋板结构

3.2.1.1 加筋板的整体屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{overall} \le \eta_{all}$$

式中：$\eta_{overall}$——第 5 节[5.2.1]中定义的最大屈曲利用因子。

3.2.2 板

3.2.2.1 基本板格的屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{plate} \le \eta_{all}$$

式中：η_{plate}——根据第 5 节[5.2.2]中定义的屈曲能力方程，采用 SP-A 模式计算的板的最大屈曲利用因子。

对于单舷侧散货船底边舱和顶边舱之间的垂向加强舷侧板的η_{plate}，第 5 节表 5.2.2.3 的工况 12 和工况 16 中对应的“夹紧”板格的短边平均应力为σ_y且$\varphi_y = 1$。

3.2.3 骨材

3.2.3.1 加强筋和单舷侧散货船舷侧肋骨的屈曲强度应满足如下衡准：

$$\eta_{stiffener} \le \eta_{all}$$

式中：$\eta_{stiffener}$——根据第 5 节[5.2.3]中定义的能力方程，计算的骨材最大屈曲利用因子。

注 1：该项能力校核仅当[3.2.1]中定义的加筋板的整体屈曲强度满足后才进行。

注 2：该项能力校核仅适用于沿屈曲板格长边的骨材。

3.2.4 垂直槽形纵舱壁

3.2.4.1 垂直纵舱壁上的垂向槽条的剪切屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{shear} \le \eta_{all}$$

式中：η_{shear}——槽型舱壁的最大剪切屈曲利用因子；

$$\eta_{shear} = \frac{\tau_{bhd}}{\tau_c}$$

τ_{bhd}——作用在纵舱壁上的船体梁剪应力，N/mm^2，见相关统一要求。

τ_c——临界剪切屈曲应力，N/mm^2，见第 5 节[2.2.3]。

3.2.5 水平槽形纵舱壁

3.2.5.1 对于每个“1/2 面板+1 个腹板＋1/2 面板”的水平槽条组合单元(槽条组合单元，见图 3.2.5.1 中的灰色区域)，均应满足以下衡准：

$$\eta_{column} \le \eta_{all}$$

式中：η_{column}——最大整体柱屈曲利用因子，见第 5 节 [5.3.1]。

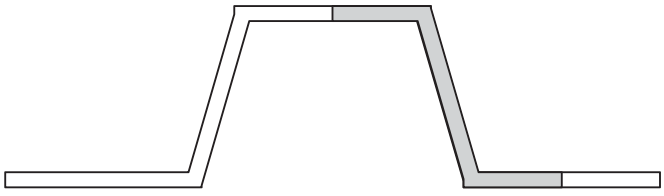


图 3.2.5.1 槽条组合单元

第 4 节　舱口盖直接强度分析屈曲要求

符号

R_{eH_P}——板格的屈服应力，定义见[4.2.1.3]

R_{eH_S}——骨材的屈服应力，定义见[4.2.1.3]

α—— 板格的长宽比，定义列于第 5 节的[符号]中。

η_{all}——许用屈曲利用因子，定义见第 1 节[1.3.3.1]

4.1　一般要求

4.1.1　引言

4.1.1.1　本节要求基于舱口盖直接强度分析（通常有限元方法）和承受正应力、剪应力和侧向压力的屈曲评估。

4.1.1.2　根据相关统一要求进行直接强度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评估：

- 加筋和非加筋板格。
- 开口处腹板。

4.2　加筋和非加筋板格

4.2.1　一般要求

4.2.1.1　舱口盖结构中的板格应模拟成加筋或非加筋板格，选用第 1 节[1.3.1.1]中定义的方法 A 或方法 B 计算板屈曲能力，其组合也等同于使用第 1 节[1.3.1.2]中定义的屈曲评估模型。

4.2.1.2　板格的平均厚度

如果有限元分析中板格内厚度不均匀，屈曲评估时应采用下面的加权平均板厚：

$$t_{avr} = \frac{\sum_1^n A_i t_i}{\sum_1^n A_i}$$

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元单元个数。

4.2.1.3 板格和骨材的屈曲应力

板格的屈服应力R_{eH_P}取为板格内所有单元屈服应力的最小值。

骨材的屈服应力R_{eH_S}取为骨材中的所有单元屈服应力的最小值。

4.2.2 加筋板格

4.2.2.1 对于加筋板（SP），每一个骨材连同带板都应理想化为相关统一要求中定义的加筋板格模型。

4.2.2.2 如果加筋板格内的骨材属性或骨材间距有变化，则应对该板格的所有构造，即对每根骨材及其之间的板分别进行计算。计算位置处的板厚、骨材属性和骨材间距假设应用于整个板格。

4.2.2.3 加筋板格骨材的屈曲评估仅适用于沿屈曲板格长边方向的骨材。

4.2.3 非加劲板格

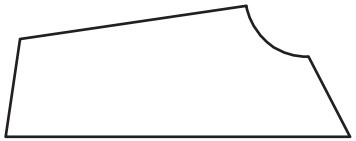
4.2.3.1 不规则板格

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 [4.2.3.2] 和 [4.2.3.3] 将不规则和三角形几何形状的板格定义为等效的矩形板格，并应满足屈曲评估。

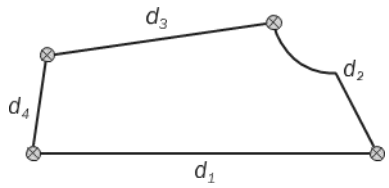
4.2.3.2 几何形状非规则板格的等效

为进行屈曲评估，不规则几何形状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；

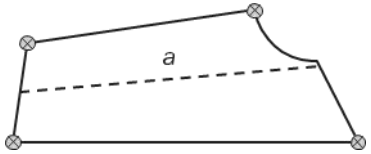


（2）计算角与角之间沿板格多边形边界的距离，即端点之间所有直线线段的总和；



（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；



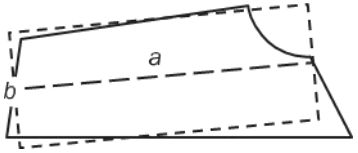
（5）短边长度 b，mm，应取为：

$$b=\frac{A}{a}$$

式中：

A ——板的面积，mm^2；

a ——（4）中定义的长度，mm。

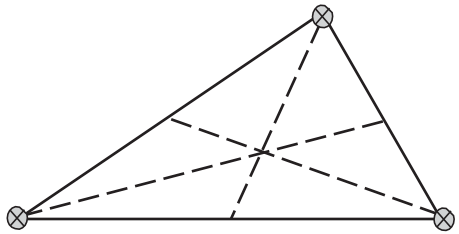


（6）直接强度分析得到的应力，应先转化到等效矩形板格的局部坐标系统中，再用于屈曲评估。

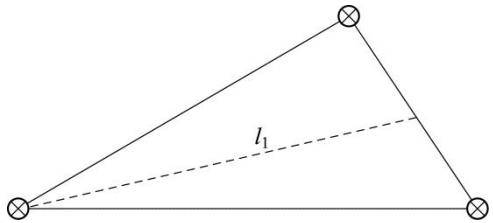
4.2.3.3　三角形非加筋板格的模拟

为进行板的屈曲评估，三角形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；



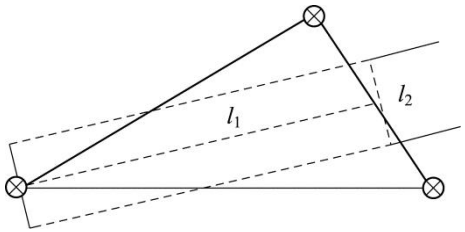
(2) 找出最长的中线。该中线的长度 l_1，mm，定义了能力模型的纵向；



(3)　模型的宽度 l_2，mm，取为；

$$l_2 = \frac{A}{l_1}$$

式中：A　——板的面积，mm^2



(4) 等效矩形板格的短边长度 b 和长边长度 a，mm，取为：

$$b = \frac{l_2}{C_{tri}}$$

$$a = l_1 C_{tri}$$

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。

4.2.4 参考应力

4.2.4.1 应力分布应取自根据相关统一要求进行的直接计算分析，并施加到屈曲模型上。

4.2.4.2 对于有限元分析，参考应力用第 6 节中的基于应力的参考应力计算方法得到。

4.2.5 侧向压力

4.2.5.1 用于直接计算分析中的侧向压力也应用于屈曲评估中。

4.2.5.2 如果由数个有限板单元构成的屈曲板格的侧向压力不为常数，则应根据如下公式计算得到平均侧向压力，N/mm^2：

$$P_{avr} = \frac{\sum_1^n A_i P_i}{\sum_1^n A_i}$$

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。

4.2.6 屈曲衡准

4.2.6.1 UP-A 板格

UP-A 板格的受压屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{UP-A} \leq \eta_{all}$$

式中：η_{UP-A} ——根据第 5 节[5.2.2]中定义的方法 A 算得的板的最大利用因子。

4.2.6.2 UP-B 板格

UP-B 板格的压缩屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{UP-B} \leq \eta_{all}$$

式中：η_{UP-B} ——根据第 5 节[5.2.2]中定义的方法 B 算得的板的最大屈曲利用因子。

4.2.6.3 SP-A 板格

SP-A 板格的受压屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{SP-A} \leq \eta_{all}$$

式中：$\eta_{SP\text{-}A}$——加筋板格的最大利用因子，取为下列各项的最大值：

- 第 5 节[5.2.1]中定义的整体加筋板屈曲能力$\eta_{overall}$；
- 根据第 5 节[5.2.2]中定义的方法 A 算得的板的能力η_{plate}；
- 第 5 节[5.2.3]中定义的骨材屈曲能力$\eta_{stiffener}$，且对于骨材两侧的每个 EPP，分别单独考虑其属性（厚度、尺寸）、[4.2.5.2]中定义的

压力和参考应力。

注 1：仅当第 5 节 [5.2.1] 定义的整体加筋板能力满足后才能进行骨材的屈曲能力校核。

4.2.6.4 SP-B 板格

SP-B 板格的压缩屈曲强度应满足以下衡准：

$$\eta_{SP-B} \leq \eta_{all}$$

式中：η_{SP-B}——加筋板格的最大利用因子，取为下列各项的最大值：

- 第 5 节[5.2.1]中定义的整体加筋板能力$\eta_{overall}$；
- 根据第 5 节[5.2.2]中定义的方法 B 算得的板的能力η_{plate}；
- 第 5 节[5.2.3]中定义的骨材屈曲能力$\eta_{stiffener}$，且对于骨材两侧的每一 EPP，分别单独考虑其属性（厚度、尺寸），[4.2.5.2] 定义的压力和参考应力。

注 1：仅当第 5 节 [5.2.1] 定义的整体加筋板能力满足后才能进行骨材的屈曲能力校核。

4.2.6.5 开口处腹板

主要支撑构件的开口处腹板应满足以下衡准：

$$\eta_{opening} \leq \eta_{all}$$

式中：$\eta_{opening}$——开口处腹板的最大利用因子，根据第 1 节[1.3.2.2]的定义和按照第 5 节[5.2.4]计算得到的失效时的应力倍增因子γ_c进行计算得到。

第 5 节 屈曲能力

符号

A_p	——	骨材带板的净横截面积，mm²； $A_p = st_p$
A_s	——	不包括带板的骨材净横截面积，mm²；
a	——	板格长边长度，mm；
b	——	板格短边长度，mm；

b_{eff} —— 骨材的有效带板宽度，mm，定义见[5.2.3.5]

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$\sigma_x > 0$，

① 对描述性评估：

$$b_{eff1} = \frac{C_{x1}b_1 + C_{x2}b_2}{2}$$

② 对有限元分析：

$$b_{eff1} = C_x b$$

（2）如果$\sigma_x \leq 0$，

$$b_{eff1} = b$$

b_f —— 骨材翼板宽度，mm；

b_1, b_2 —— 所考虑的骨材每一侧的板格宽度，mm。对于设有 U 型材的加筋板格，b_1 和 b_2 的定义见第 1 节图 1.2.3.2（2）；

C_{x1}, C_{x2} —— 对于所考虑的骨材，针对每一侧板格 EPP1 和 EPP2，根据表 5.2.2.3 工况 1 所定义的折减因子；

d —— 如表 5.2.2.6 所示，与圆柱轴线平行的对应曲板边长，单位为 mm；

e_f —— 带板至翼板中心的距离，mm，见第 1 节图 1.2.3.2（1），且按如下取用：

$e_f = h_w$ 扁钢

$e_f = h_w - 0.5t_f$ 球扁钢

$e_f = h_w + 0.5t_f$ 角钢、L2 型钢和 T 型材

F_{long} —— 系数，定义见[5.2.2.4]；

F_{tran} —— 系数，定义见[5.2.2.5]；

h_w —— 骨材腹板高度，mm，见第 1 节图 1.2.3.2（1）；

l —— 骨材跨距，mm，等于主要支撑构件间距。对舷侧肋骨，其跨距等于舷侧外板处的顶边舱与底边舱之距；

R —— 曲板的半径，mm；

R_{eH_P} —— 板的最小屈服应力，N/mm²；

R_{eH_S} —— 骨材的最小屈服应力，N/mm²；

S —— 分项安全因子，除非在相关统一要求中有特别说明，否则应取为 1.0；

t_p —— 板格的净厚度，mm；

t_w —— 骨材腹板的净厚度，mm；

t_f —— 骨材翼板的净厚度，mm；

$x\text{-}axis$ —— 平行于矩形屈曲板格长边方向的局部坐标轴；

$y\text{-}axis$ —— 垂直于矩形屈曲板格长边方向的局部坐标轴；

α —— 板格长宽比，定义见表 5.2.2.3，且取为：$\alpha = \frac{a}{b}$；

β —— 系数，取为：$\beta = \frac{1-\psi}{\alpha}$；

ω —— 系数，取为：$\omega = min\,(3, \alpha)$；

σ_x —— 施加在板格边缘上沿 x 轴方向的应力，N/mm²；

σ_y —— 施加在板格边缘上沿 y 轴方向的应力，N/mm²；

σ_1 —— 沿板格边缘的最大名义应力，N/mm²；

σ_2 —— 沿板格边缘的最小名义应力，N/mm²；

σ_E —— 弹性参考屈曲应力，N/mm²，按如下计算：

（1）应用于根据[5.2.2.1]计算板格极限状态时：

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t_p}{b}\right)^2$$

（2）应用于根据[5.2.2.6]计算曲板板格极限状态时：

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t_p}{d}\right)^2$$

τ —— 施加的剪应力，N/mm²；

τ_c —— 剪切屈曲强度，N/mm^2；

ψ —— 边缘应力比，取为：$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$；

γ —— 作用在载荷上的应力倍增因子。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；

γ_{GEB} —— 整体弹性屈曲能力的应力倍增因子。

5.1 一般要求

5.1.1 引言

5.1.1.1 本节包含用于确定板格、骨材、主要支撑构件和支柱结构屈曲能力的方法。

5.1.1.2 应用本节规定时，施加在结构构件上的应力σ_x, σ_y 和 τ定义如下：

（1）对于船体梁描述性屈曲要求，见第 3 节。

（2）对于舱口盖直接强度分析屈曲要求，见第 4 节。

5.1.1.3 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，直到本节[5.2.1.1]、[5.2.2.1]和[5.2.3.1]中定义的对应相关方程等于 1.0 为止。

5.1.1.4 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。

5.1.1.5 侧向压力

对于在[5.1.1.3]中定义的屈曲能力的计算，侧向压力应予以施加，且视为常量。

5.2 板格的屈曲能力

5.2.1 整体加筋板格

5.2.1.1 弹性加筋板格的极限状态应基于如下相关方程，该式为根据[5.2.3.4]进行骨材屈曲校核而设定的前提条件：

$$\frac{\gamma_c}{\gamma_{GEB}} = 1$$

且对应的屈曲利用因子定义如下：

$$\eta_{overall} = \frac{1}{\gamma_c}$$

式中：整体弹性屈曲能力的应力倍增因子，γ_{GEB}，应基于下列公式计算得到：

$\gamma_{GEB} = \gamma_{GEB,bi+\tau}$　　$\tau \neq 0$ 和 $(\sigma_x > 0$ 或 $\sigma_y > 0)$

$\gamma_{GEB} = \gamma_{GEB,bi}$　　$\tau = 0$ 和 $(\sigma_x > 0$ 或 $\sigma_y > 0)$

$\gamma_{GEB} = \gamma_{GEB,\tau}$　　$\tau \neq 0$ 和 $(\sigma_x \leq 0$ 或 $\sigma_y \leq 0)$

其中：$\gamma_{GEB,bi+\tau}$，$\gamma_{GEB,bi}$ 和 $\gamma_{GEB,\tau}$为在[5.2.1.2]、[5.2.1.3]和[5.2.1.4]中分别定义的不同载荷组合的整体弹性屈曲能力的应力倍增因子。对于$\gamma_{GEB,bi+\tau}$，$\gamma_{GEB,bi}$ 和 $\gamma_{GEB,\tau}$ 的计算， σ_x 与 σ_y 均不能取小于 0。

σ_x, σ_y　　——　　施加在板格上名义应力，N/mm²，按[5.2.2.7]中的定义取用；

τ　　——　　施加的剪应力，N/mm²，按[5.2.2.7]中的定义取用。

5.2.1.2　对于承受双轴向载荷的加筋板，其应力倍增因子$\gamma_{GEB,bi}$为：

$$\gamma_{GEB,bi} = \frac{\pi^2}{L_{B1}^2 L_{B2}^2} \frac{\left[D_{11}L_{B2}^4 + 2(D_{12} + D_{33})n^2 L_{B1}^2 L_{B2}^2 + n^4 D_{22} L_{B1}^4\right]}{L_{B2}^2 N_x + n^2 L_{B1}^2 N_y}$$

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，按下式计算：

$N_x = \sigma_{x,av}(A_p + A_s)/s$

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 的定义见图 5.3.1.4。

N_y—— 作用在沿板格 y 轴方向的单位长度力，N/mm，按下式计算：

$$N_y = c\sigma_y t_p$$

L_{B1}—— 骨材跨距，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 倍骨材间距，即$L_{B2} = 6s$。

n—— 与骨材垂直方向的半波数，应使得计算得到的 $\gamma_{GEB,bi}$为大于 0 的最小值。

c—— 考虑作用在板格边界上与骨材方向垂直的应力影响系数，取为：

$$c = 0.5(1 + \Psi) \quad \text{对于 } 0 \leq \Psi \leq 1$$

$$c = \frac{1}{2(1-\Psi)} \quad \text{对于} \Psi < 0$$

Ψ—— 表 5.3.1.3 中工况 2 所示的边缘应力比。

$\sigma_{x,av}$—— 泊松修正后板和骨材的平均应力，MPa，取为：

$$\sigma_{x,av} = \sigma_x - \nu c\sigma_y A_s/(A_p + A_s) \geq 0 \quad \text{对于 } \sigma_x > 0 \text{ 且 } \sigma_y > 0$$

$$\sigma_{x,av} = \sigma_x \quad \text{对于 } \sigma_x \leq 0 \text{ 或} \sigma_y \leq 0$$

$D_{11}, D_{12}, D_{22}, D_{33}$ —— 加筋板的弯曲刚度系数，N·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：

$$D_{22} = \frac{Et_p^3}{12(1-\nu^2)}\left[1.2 + 4.8 \times Min\left(1.0,\ \frac{b_1^2}{h_w(b_1+b_2)}\right) \times Min\left(1.0, \left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3\right)\right]$$

$$D_{12} = \nu D_{22}$$

h_w——U 型材的腹板宽度，定义见图 5.3.1.4。

I_{eff}——骨材连同有效带板宽度的截面惯性矩，cm^4，与 [5.2.3.4]中的 I 相同。

5.2.1.3　对于承受纯剪切载荷的加筋板，其应力倍增因子 $\gamma_{GEB,\tau}$为：

$$\gamma_{GEB,\tau} = \frac{\sqrt[4]{D_{11}^3 D_{22}}}{(L_{B1}/2)^2 N_{xy}}\left[8.125 + 5.64\sqrt{\frac{(D_{12}+D_{33})^2}{D_{11}D_{22}}} - 0.6\frac{(D_{12}+D_{33})^2}{D_{11}D_{22}}\right] \quad \text{对于 } D_{11}D_{22} \geq (D_{12}+D_{33})^2$$

$$\gamma_{GEB,\tau}=\frac{\sqrt{2D_{11}(D_{12}+D_{33})}}{(L_{B1}/2)^2N_{xy}}\left[8.3+1.525\frac{D_{11}D_{22}}{(D_{12}+D_{33})^2}-0.493\frac{D_{11}^2D_{22}^2}{(D_{12}+D_{33})^4}\right]$$ 对于 $D_{11}D_{22}$

$$<(D_{12}+D_{33})^2$$

其中：$N_{xy}=\tau t_p$

5.2.1.4 对于承受组合载荷的加筋板，其应力倍增因子$\gamma_{GEB,bi+\tau}$为：

$$\gamma_{GEB,bi+\tau}=\frac{1}{2}{\gamma_{GEB,\tau}}^2\left[-\frac{1}{\gamma_{GEB,bi}}+\sqrt{\frac{1}{{\gamma_{GEB,bi}}^2}+4\frac{1}{{\gamma_{GEB,\tau}}^2}}\right]$$

式中：$\gamma_{GEB,bi}$和$\gamma_{GEB,\tau}$的定义分别见[5.2.1.2]和[5.2.1.3]。

5.2.2 板

5.2.2.1 板的极限状态

板的极限能力应基于下列相关方程：

$$\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_xS}{\sigma_{cx}}\right)^{e_0}-B\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_xS}{\sigma_{cx}}\right)^{\frac{e_0}{2}}\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_yS}{\sigma_{cy}}\right)^{\frac{e_0}{2}}+\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_yS}{\sigma_{cy}}\right)^{e_0}+\left(\frac{\gamma_{c1}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{e_0}=1$$

$$\left(\frac{\gamma_{c2}\sigma_xS}{\sigma_{cx}}\right)^{\frac{2}{\beta_p^{0.25}}}+\left(\frac{\gamma_{c2}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{\frac{2}{\beta_p^{0.25}}}=1 \text{ 对 } \sigma_x\geq 0$$

$$\left(\frac{\gamma_{c3}\sigma_yS}{\sigma_{cy}}\right)^{\frac{2}{\beta_p^{0.25}}}+\left(\frac{\gamma_{c3}|\tau|S}{\tau_c}\right)^{\frac{2}{\beta_p^{0.25}}}=1 \text{ 对 } \sigma_y\geq 0$$

$$\frac{\gamma_{c4}|\tau|S}{\tau_c}=1$$

由此得到：

$$\gamma_c = Min\left(\gamma_{c1},\gamma_{c2},\gamma_{c3},\gamma_{c4}\right)$$

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/mm^2，定义见[5.2.2.7]；

τ ——施加在板格边界上的剪应力，N/mm^2；

σ_{cx}——沿着与屈曲板格长边平行的方向的极限屈曲应力，N/mm^2，定义见[5.2.2.3]；

σ_{cy}——沿着与屈曲板格短边平行的方向的极限屈曲应力，N/mm^2，定义见[5.2.2.3]；

τ_c——极限屈曲剪应力，N/mm^2，定义见[5.2.2.3]；

$\gamma_{c1},\gamma_{c2},\gamma_{c3},\gamma_{c4}$ 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 5.2.2.1；

e_0——系数，定义见表 5.2.2.1；

板的长细比参数，定义为：

β_p—— $\beta_p=\frac{b}{t_p}\sqrt{\frac{R_{eH\_P}}{E}}$

系数B和e_0的定义　　表 5.2.2.1

施加的应力	B	e_0
$\sigma_x \geq 0$ 和 $\sigma_y \geq 0$	$0.7 - 0.3\,\beta_p/\alpha^2$	$2/\beta_p^{0.25}$
$\sigma_x < 0$ 或 $\sigma_y < 0$	1.0	2.0

5.2.2.2 参考细长度

参考细长度按下式计算：

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_{eH\_P}}{K\sigma_E}}$$

式中：K ——屈曲因子，定义见表 5.2.2.3 和表 5.2.2.6。

5.2.2.3 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 5.2.2.3。

对于[5.2.2.1]中的第一个方程，当 $\sigma_x < 0$ 或 $\sigma_y < 0$ 时，折减因子应取为：$C_x = C_y = C_\tau = 1$

对于其他工况：

（1）对 SP-A 和 UP-A，应采用如下 c_1，根据表 5.2.2.3 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，根据表 5.2.2.3 计算 C_y

$$c_1 = 1$$

（3）对于单舷侧散货船的垂向加筋舷侧板，应采用如下 c_1，根据表 5.2.2.3 计算 C_y

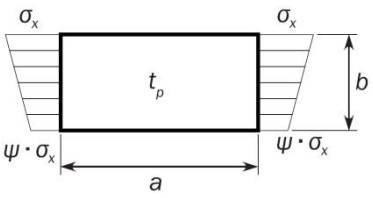
$$c_1 = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \geq 0$$

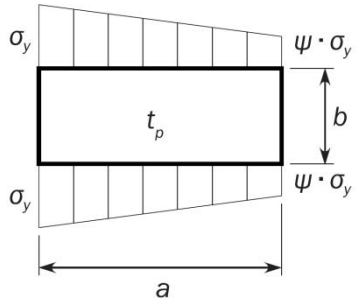
（4）对于槽形舱壁的槽条，应采用如下 c_1，根据表 5.2.2.3 计算 C_y

$$c_1 = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \geq 0$$

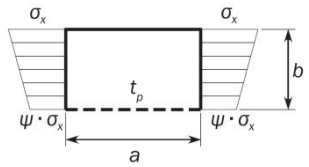
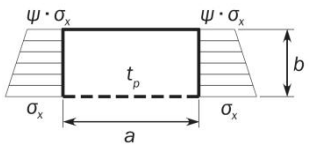
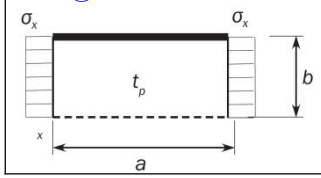
板的边界条件应视为简支（参见表 5.2.2.3 中的工况①、②和⑮）。如果板的边界条件与简支相差很大，可以在 CCS 同意的前提下，根据表 5.2.2.3 的不同工况，采用更恰当的边界条件。

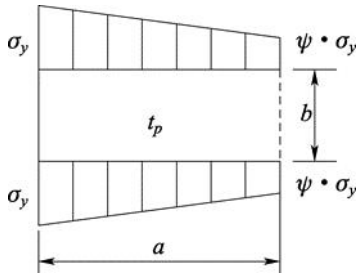
平面板格的屈曲因子和折减因子 表5.2.2.3

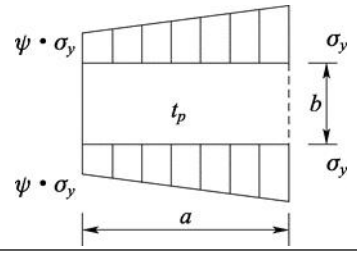
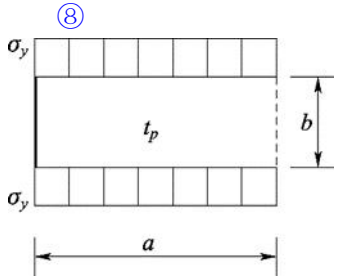
工况	应力比ψ	长宽比α	屈曲因子 K	折减因子 C
① 	$1 \geq \psi \geq 0$	$K_x = F_{long}\dfrac{8.4}{\psi + 1.1}$		当 $\sigma_x \leq 0$ 时，$C_x = 1$； 当 $\sigma_x > 0$ 时： $C_x = 1$ 对 $\lambda \leq \lambda_c$ $C_x = c\left(\dfrac{1}{\lambda} - \dfrac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对 $\lambda > \lambda_c$ 其中： $c = (1.25 - 0.12\psi) \leq 1.25$ $\lambda_c = \dfrac{c}{2}\left(1 + \sqrt{1 - \dfrac{0.88}{c}}\right)$
	$0 > \psi > -1$	$K_x = F_{long}[7.63 - \psi(6.26 - 10\psi)]$		
	$\psi \leq -1$	$K_x = F_{long}\left[5.975(1-\psi)^2\right]$		

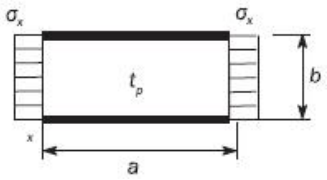
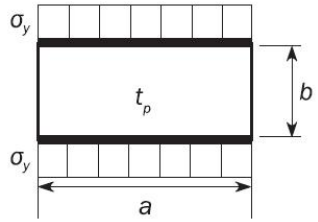
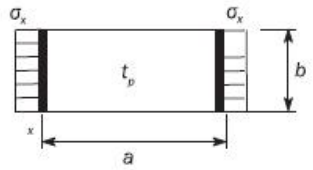
<table>
<tr>
<td rowspan="4">②
 
</td>
<td rowspan="2">$1 \geq \psi \geq 0$</td>
<td colspan="2">$K_y = F_{tran} \dfrac{2\left(1+\dfrac{1}{\alpha^2}\right)^2}{1+\psi+\dfrac{(1-\psi)}{100}\left(\dfrac{2.4}{\alpha^2}+6.9 f_1\right)}$</td>
<td rowspan="4">当 $\sigma_y \leq 0$ 时， $C_y = 1$；
当 $\sigma_y > 0$ 时：
$C_y = c\left(\dfrac{1}{\lambda} - \dfrac{R+F^2(H-R)}{\lambda^2}\right)$
其中：
$c = (1.25-0.12\psi) \leq 1.25$
$R = \lambda(1-\lambda/c)$ 对 $\lambda < \lambda_c$
$R = 0.22$ 对 $\lambda \geq \lambda_c$
$\lambda_c = 0.5c(1+\sqrt{1-0.88/c})$
$F = \left(1-\left(\dfrac{K}{0.91}-1\right)\Big/\lambda_p^2\right)c_1 \geq 0$
$\lambda_p^2 = \lambda^2 - 0.5$ 且 $1 \leq \lambda_p^2 \leq 3$
c_1 的定义见 5.3.1.3。
$H = \lambda - \dfrac{2\lambda}{c(T+\sqrt{T^2-4})} \geq R$
$T = \lambda + \dfrac{14}{15\lambda} + \dfrac{1}{3}$</td>
</tr>
<tr>
<td>$\alpha \leq 6$</td>
<td>$f_1 = (1-\psi)(\alpha-1)$</td>
</tr>
<tr>
<td rowspan="3">$1-\dfrac{4\alpha}{3} \leq \psi < 0$</td>
<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 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>
<tr>
<td>$\alpha > 6(1-\psi)$</td>
<td>$f_1 = 0.6(\dfrac{1}{\beta}+14\beta)$
但不大于 $14.5-0.35\beta^2$
$f_2 = f_3 = 0$</td>
</tr>
<tr>
<td>$3(1-\psi) \leq \alpha \leq 6(1-\psi)$</td>
<td>$f_1 = \dfrac{1}{\beta}-1$
$f_2 = f_3 = 0$</td>
</tr>
<tr>
<td>$1.5(1-\psi) \leq \alpha < 3(1-\psi)$</td>
<td>$f_1 = \dfrac{1}{\beta}-(2-\omega\beta)^4-9(\omega\beta-1)(\dfrac{2}{3}-\beta)$
$f_2 = f_3 = 0$</td>
</tr>
</table>

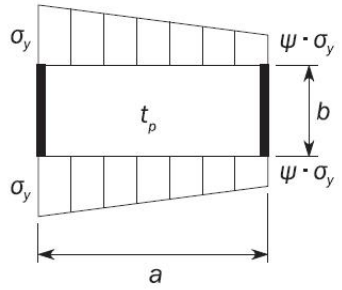
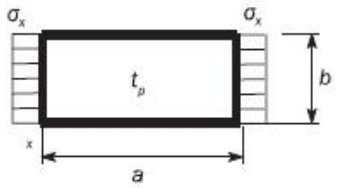
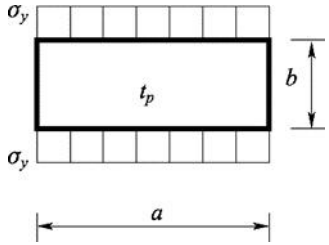
		$1-\psi \le \alpha < 1.5(1-\psi)$	如果 $\alpha > 1.5$，则 $f_1 = 2\left(\frac{1}{\beta} - 16\left(1-\frac{\omega}{3}\right)^4\right)(\frac{1}{\beta}-1)$ $f_2 = 3\beta - 2$； $f_3 = 0$ 如果 $\alpha \le 1.5$，则 $f_1 = 2\left(\frac{1.5}{1-\psi}-1\right)\left(\frac{1}{\beta}-1\right)$ $f_2 = \frac{\psi(1-16f_4^2)}{1-\alpha}$； $f_3 = 0$ $f_4 = [1.5 - Min(1.5;\alpha)]^2$	
		$0.75(1-\psi) \le \alpha < (1-\psi)$	$f_1 = 0$ $f_2 = 1 + 2.31(\beta-1) - 48\left(\frac{4}{3}-\beta\right)f_4^2$ $f_3 = 3f_4(\beta-1)\left(\frac{f_4}{1.81} - \frac{\alpha-1}{1.31}\right)$ $f_4 = [1.5 - \mathrm{Min}(1.5;\alpha)]^2$	

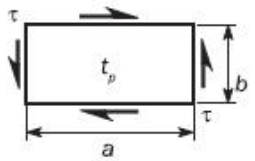
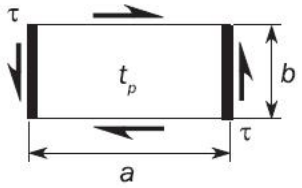
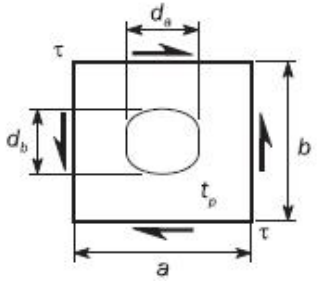
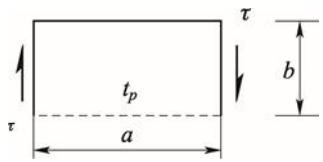
<table>
<tr><td></td><td>$\psi < 1-\frac{4\alpha}{3}$</td><td colspan="2">$K_y = 5.972F_{tran}\frac{\beta^2}{1-f_3}$
式中，
$f_3 = f_5\left(\frac{f_5}{1.81}+\frac{1+3\psi}{5.24}\right)$
$f_5 = \frac{9}{16}[1+Max(-1;\psi)]^2$</td><td></td></tr>
<tr><td>③
 
</td><td>$1 \geq \psi \geq 0$</td><td colspan="2">$K_x = \frac{4(0.425+1/\alpha^2)}{3\psi+1}$</td><td rowspan="3">对于UP-A评估模型：
$C_x = 1$ 对$\lambda \leq 0.75$
$C_x = \frac{0.75}{\lambda}$ 对$\lambda > 0.75$
对于UP-B评估模型：
$C_x = 1$ 对 $\lambda \leq 0.7$
$C_x = \frac{1}{\lambda^2+0.51}$ 对 $\lambda > 0.7$</td></tr>
<tr><td></td><td>$0 > \psi > -1$</td><td colspan="2">$K_x = 4(0.425+1/\alpha^2)(1+\psi)$
$-5\psi(1-3.42\psi)$</td></tr>
<tr><td>④
 
</td><td>$1 \geq \psi \geq -1$</td><td colspan="2">$K_x = \left(0.425+\frac{1}{\alpha^2}\right)\frac{3-\psi}{2}$</td></tr>
<tr><td>⑤
 
</td><td>-</td><td>$\alpha \geq 1.64$</td><td>$K_x = 1.28$</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>$\alpha < 1.64$</td><td>$K_x = \frac{1}{\alpha^2}+0.56+0.13\alpha^2$</td></tr>
</table>

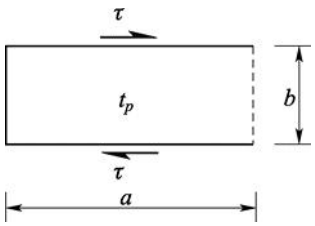
<table>
<tr><td rowspan="2">⑥
 
</td><td>$1 \geq \psi \geq 0$</td><td>$K_y = \frac{4(0.425+\alpha^2)}{(3\psi+1)\alpha^2}$</td><td rowspan="3">对于UP-A评估模型：
$C_y = 1$ 对$\lambda \leq 0.75$
$C_y = \frac{0.75}{\lambda}$ 对$\lambda > 0.75$

对于UP-B评估模型：
$C_y = 1$ 对 $\lambda \leq 0.7$
$C_y = \frac{1}{\lambda^2+0.51}$ 对 $\lambda > 0.7$</td></tr>
<tr><td>$0 > \psi \geq -1$</td><td>$K_y = 4\left(0.425+\alpha^2\right)(1+\psi)\frac{1}{\alpha^2} - 5\psi(1-3.42\psi)\frac{1}{\alpha^2}$</td></tr>
<tr><td>⑦
 
</td><td>$1 \geq \psi \geq -1$</td><td>$K_y = \left(0.425+\alpha^2\right)\frac{3-\psi}{2\alpha^2}$</td></tr>
<tr><td>⑧
 
</td><td>--</td><td>$K_y = 1+\frac{0.56}{\alpha^2}+\frac{0.13}{\alpha^4}$</td></tr>
<tr><td>⑨</td><td>—</td><td>$K_x = 6.97$</td><td>$C_x = 1$ 对$\lambda \leq 0.83$
$C_x = 1.13\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{0.22}{\lambda^2}\right)$
对$\lambda > 0.83$</td></tr>
</table>

			
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 	—	$\alpha \ge 4$ 时 $K_x = 4$ $\alpha < 4$ 时 $K_x = 4 + 2.74\left[\frac{4-\alpha}{3}\right]^4$	$C_x = 1$ 对$\lambda \le 0.83$ $C_x = 1.13\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2}\right)$ 对$\lambda > 0.83$
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。
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$\lambda \leq 0.84$

			$C_\tau=\dfrac{0.84}{\lambda}$　　对$\lambda>0.84$
⑯ 	—	$K_\tau=\sqrt{3}\left[5.34+\text{Max}\left[\dfrac{4}{\alpha^2};\dfrac{7.15}{\alpha^{2.5}}\right]\right]$	
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： $r=\left(1-\dfrac{d_a}{a}\right)\left(1-\dfrac{d_b}{b}\right)$ $\dfrac{d_a}{a}\le 0.7$　且　$\dfrac{d_b}{b}\le 0.7$	
⑱ 	—	$K_\tau=\sqrt{3}\left(0.6+\dfrac{4}{\alpha^2}\right)$	$C_\tau=1$　　对$\lambda\le 0.84$ $C_\tau=\dfrac{0.84}{\lambda}$　　对$\lambda>0.84$

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。			

5.2.2.4　修正因子F_{long}

修正因子F_{long}取决于屈曲板格长边边缘上的加强筋类型，其定义参见表 5.2.2.4。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 5.2.2.4 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，则选用的值c可大于表 5.2.2.4 中给出的数值。

修正因子F_{long}　　表 5.2.2.4

<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">加筋板格</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">$F_{long}=c+1\ \ for\ \ \frac{t_w}{t_p}>1$
$F_{long}=c\left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3+1\ \ for\ \ \frac{t_w}{t_p}\le 1$</td><td>0.10</td></tr>
<tr><td>球扁钢</td><td>0.30</td></tr>
<tr><td>角钢</td><td>0.40</td></tr>
<tr><td>T 型材</td><td>0.30</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 $b_2\ge b_1$：
$F_{long}=\left(1.55-0.55\frac{b_1}{b_2}\right)\left[1+c\left(\frac{t_w}{t_p}\right)^3\right]$
（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，且不按照本节[5.4.3.5]中的定义进行修正。
（2）：b_1、b_2和t_w的定义见第 1 节图 1.2.3.2（2）。</td></tr>
</table>

5.2.2.5　修正因子F_{tran}

修正因子F_{tran}应取为：

（1）对于单舷侧散货船的顶边舱和底边舱之间的横骨架式 EPP：

① 如果两个相邻的肋骨由邻近板格上安装的各一个防倾肘板支撑，　则 $F_{tran}=1.25$；

② 如果两个相邻的肋骨由邻近板格上分别安装的各两个防倾肘板支撑，　则 $F_{tran}=1.33$；

③ 在其他位置，　$F_{tran}=1.15$

（2）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 的 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 的 b_1

式中：b_1、b_2 和 h_w 的定义见本节图 1.2.3.2（2）。

表 3 中工况 2 所定义的参数 F 应替换为以下公式：

$$F=\left[1-\left(\frac{K_y}{0.91F_{tran}}-1\right)/\lambda_p^2\right]c_1\geq 0$$

（3）对于其他情况，修正因子F_{tran}应取为 1.0。

5.2.2.6　曲面板格

对于$R/t_p\leq 2500$ 的曲板板格，适用如下要求，否则应适用本节[5.2.2.1]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：

$$\eta_{curved\_plate}=\frac{1}{\gamma_c}$$

式中：

σ_{ax}——　施加在曲板板格所对应圆柱的轴向应力，N/mm^2。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_{tg}, C_{τ}　——曲面板格的屈曲折减因子，定义见表 5.2.2.6。

曲面板格应力倍增因子γ_c不必小于将其伸展为平面板格按照本节[5.3.1.1]所给出的γ_c值。

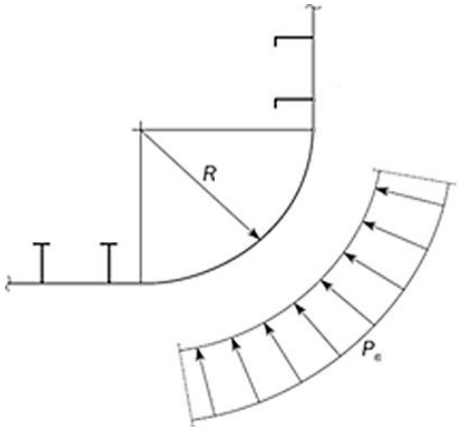
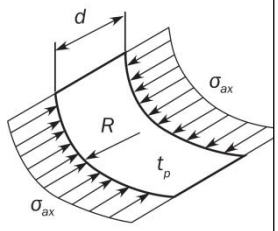
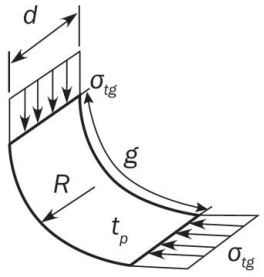
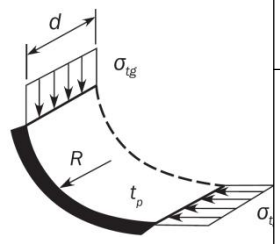
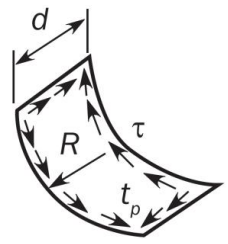


图 5.2.2.6　舭列板为横骨架式

满足$R/t_p \le 2500$ 的曲面板格的屈曲因子和折减因子　　表 5.2.2.6

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，如图 5.3.1.6 所示，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  	$\frac{d}{R} \le 1.63\sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = \frac{d}{\sqrt{Rt_p}} + 3\frac{(Rt_p)^{0.175}}{d^{0.35}}$	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，如图 5.3.1.6 所示，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  	$\frac{d}{R} \le \sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = \frac{0.6d}{\sqrt{Rt_p}} + \frac{\sqrt{Rt_p}}{d} - 0.3\frac{Rt_p}{d^2}$	同工况 2
	$\frac{d}{R} > \sqrt{\frac{R}{t_p}}$	$K = 0.3\frac{d^2}{R^2} + 0.291\left(\frac{R^2}{dt_p}\right)^2$	
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 $\lambda \le 0.4$； $C_\tau = 1.274 - 0.686\lambda$， 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。			

5.2.2.7　施加在板格上的正应力和剪应力

施加在板格上用于[5.2.1.1]中加筋板格的整体弹性屈曲能力及[5.2.2.1]中板格能力计算的双向正应力σ_x和σ_y，N/mm²，应取为：

（1）对于有限元分析，见第 4 节[4.2.4]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相关统一要求进行计算，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 节[3.1.2.1]的（1）和（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 节[3.1.2.1]（1）中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/mm^2；

用于[5.2.1.1]中加筋板格的整体弹性屈曲能力及[5.2.2.1]板格屈曲能力计算的剪应力τ，N/mm^2，应取为：

① 对于有限元分析，本章第 4 节[4.2.4]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，应根据相关统一要求计算得到的剪应力，板格载荷计算点定义见第 3 节[3.1.2.1]（1）；

③ 描述性要求中，对于加筋板格的整体弹性屈曲能力计算，应根据相关统一要求计算得到的剪应力，载荷计算点的定义如下：

（a）对于所分析的加强筋，在其整体跨距l的中间位置；

（b）在加强筋与其带板的交线处的点；

（4）对于梁系分析，PSM 腹板带板的剪应力$\tau = 0$。

5.2.3 骨材

5.2.3.1 屈曲模式

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*）。

5.2.3.2 扁钢的腹板厚度

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，在本节[5.2.1]和[5.2.3.4]中计算其截面积A_s、模量Z和惯性矩I时，应采用以下定义的有效腹板厚度，mm：

$$t_{w\_red} = t_w\left(1 - \frac{2\pi^2}{3}\left(\frac{h_w}{s}\right)^2\left(1 - \frac{b_{eff1}}{s}\right)\right)$$

5.2.3.3 球扁钢的理想化

球扁钢应按等效剖面考虑。等效剖面的净尺寸按下列各式得到：

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

$$b_f = \alpha\left(t_w^{'} + \frac{h_w^{'}}{6.7} - 2\right)$$

$$t_f = \frac{h_w^{'}}{9.2} - 2$$

$$t_w = t_w^{'}$$

式中：$h_w^{'}, t_w^{'}$——球扁钢的净高度和厚度，mm，见图 5.2.3.3；

α——系数，等于：

$$\alpha = 1.1 + \frac{\left(120 - h_w^{'}\right)^2}{3000} \quad \text{对 } h_w^{'} \le 120$$

$$\alpha = 1.0 \quad \text{对 } h_w^{'} > 120$$

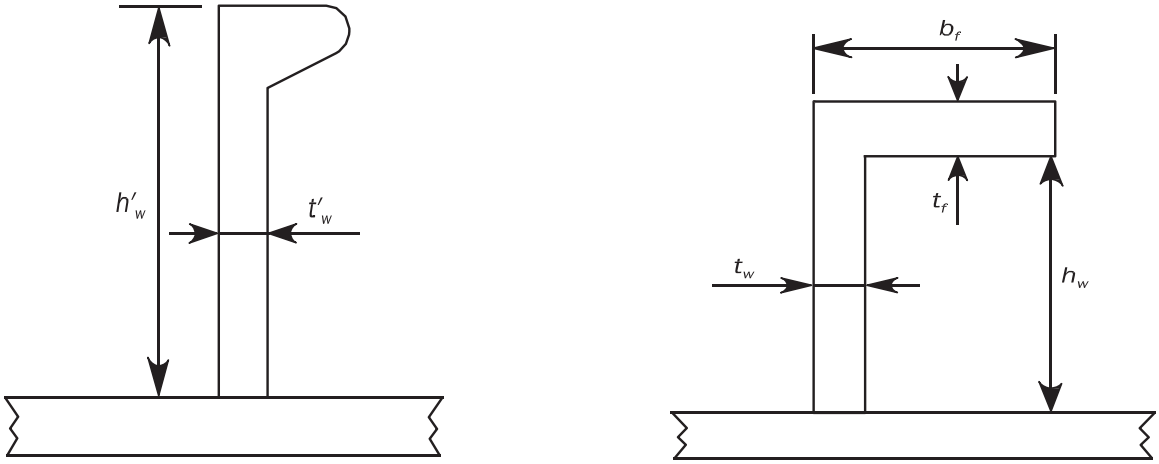


图 5.2.3.3　球扁钢骨材的理想化

5.2.3.4　极限屈曲能力

当$\sigma_a + \sigma_b + \sigma_w > 0$，且初始设置$\gamma = 1$时，骨材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定义为：

$$\eta_{stiffener} = \frac{1}{\gamma_c}$$

式中：

σ_a　——作用在骨材及其带板的跨中位置处的有效轴向应力，　N/mm²，

$$\sigma_a = \sigma_x \frac{st_p + A_s}{b_{eff1} t_p + A_s}$$

σ_x　——作用在骨材及其带板的名义轴向应力，　N/mm²，

（1）对于有限元分析，σ_x是指带板中沿着加强筋轴向方向的应力，按[5.2.3.6]修正后的应力；

（2）　对于描述性屈曲评估，σ_x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[3.2.2.1]计算，骨材的载荷计算点见第 3 节[3.1.2.1]；

（3）对于交叉梁系分析，σ_x是指作用在所连接屈曲板格 x 方向的应力。

——加强筋上的弯曲应力，N/mm²，　定义见[5.4.4.3],

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），$R_{eH} = R_{eH\_P}$

σ_b　——骨材的弯曲应力，　N/mm²

$$\sigma_b = \frac{M_0 + M_1 + M_2}{1000Z}$$

Z ——骨材的净剖面模数，包括按照[5.2.3.5]的带板有效宽度，按如下计取：

（1）对于加强筋导致的失效（*SI*），取骨材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。

M_2 ——由于削斜骨材的偏心引起的弯矩，N·mm，按如下计算：

（1）对于连续加强筋

$$M_2 = 0$$

（2）对于一端或两端削斜的骨材

$$M_2 = C_{snip} w_{na} \gamma \sigma_x (A_p + A_s)$$

C_{snip} ——考虑削斜骨材端部效应的系数，按如下计算：

（1）对于骨材导致的失效（*SI*），$C_{snip} = -1.2$；

（2）对于带板导致的失效（*PI*），$C_{snip} = 1.2$；

σ_w ——扭转引起的应力，N/mm²，定义见[5.4.4.4]

M_1 ——由于侧向压力 P 引起的弯矩，N·mm，按如下计算：

（1）对于连续骨材

$$M_1 = C_i \frac{|P| s l^2}{24 \times 10^3}$$

（2）对于两端削斜的骨材

$$M_1 = C_i \frac{|P| s l^2}{8 \times 10^3}$$

（3）对于一端连续/固支，一端削斜的骨材

$$M_1 = C_i \frac{|P| s l^2}{14.2 \times 10^3}$$

P ——侧向压力，kN/m²

（1） 对于有限元屈曲分析，*P* 是指第 4 节[4.2.5.2]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 节[3.1.2.1]中定义的骨材载荷计算点处计算得到的静压力。

C_i ——压力系数：

（1） $C_i = C_{SI}$，对于加强筋导致的失效（*SI*），；

（2） $C_i = C_{PI}$，对于带板导致的失效（*PI*），；

C_{PI} ——带板导致的失效模式的压力系数：

（1）$C_{PI} = 1$，如果侧向压力施加在加强筋背侧；

（2）$C_{PI} = -1$，如果侧向压力施加在与加强筋同侧；

C_{SI} ——加强筋导致的失效模式的压力系数

（1） $C_{SI} = -1$，如果侧向压力施加在加强筋背侧；

（2） $C_{SI} = 1$，如果侧向压力施加在与加强筋同侧；

M_0 ——由于骨材的侧向变形 *w* 引起的弯矩，N·mm

$M_0 = F_E C_{sl} \frac{\gamma}{\gamma_{GEB} - \gamma} w_0$，且前提条件为$\gamma_{GEB} - \gamma > 0$

γ_{GEB} ——在[5.2.1]中定义的整体弹性屈曲能力的应力倍增因子；

F_E ——骨材的理想弹性屈曲力，N：

$$F_E = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 EI \times 10^4$$

I ——包括有效带板宽度的骨材惯性矩，cm⁴。I 应满足下式：

$$I \geq \frac{s t_p^3}{12 \times 10^4}$$

t_p ——带板净厚度，mm，按下式取为：

（1）对于描述性要求：两个带板的平均厚度；

（2）对于有限元分析：所计算的 EPP 在骨材一边的厚度

C_{sl} ——整体柔度相关的变形折减系数，按如下计算：

（1）$C_{sl} = 1 - \frac{1}{12}\lambda_G^4$，对于$\lambda_G \le 1.56$；

（2）$C_{sl} = 3/\lambda_G^4$，对于$\lambda_G > 1.56$；

λ_G ——加筋板整体柔度的参考细长度，，按如下计算：

$$\lambda_G = \sqrt{\frac{\gamma_{ReH}}{\gamma_{GEB}}}$$

其中：$\gamma_{ReH} = \frac{\text{Min}\,(R_{eH\_P},\ R_{eH\_S})}{\sqrt{\sigma_{x,av}^2+\sigma_y^2-\sigma_{x,av}\sigma_y+3\tau^2}}$

$\sigma_{x,av}$ ——板和骨材的平均轴向应力，定义见 [5.2.1.2]；

σ_y ——板的横向应力，定义见 [5.2.1.1]；

τ ——板的剪切应力，定义见本节[5.2.1.1]；

w_0 ——假定缺陷值，mm，取为：

$w_0 = l/1000$；

σ_w ——扭转变形引起的应力，N/mm²，取为：

（1）对于骨材导致的失效（*SI*）

① 对于$\sigma_a > 0$：

$\sigma_w = Ey_w e_f \Phi_0 \left(\frac{m_{tor}\pi}{l_{tor}}\right)^2 \left(\frac{1}{1-\frac{\gamma\sigma_a}{\sigma_{ET}}} - 1\right)$，且前提条件为$\sigma_{ET} - \gamma\sigma_a > 0$

② 对于$\sigma_a \le 0$：

$\sigma_w = 0$

（2）对于带板导致的失效（*PI*）

$\sigma_w = 0$

y_w ——从骨材横截面中心到骨材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，$y_w = b_{f-out} + 0.5t_w - \frac{h_w t_w^2 + t_f\left(b_f^2 - 2b_f d_f\right)}{2A_s}$

（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，取为：

$$\sigma_{ET} = \frac{E}{I_p}\left[\left(\frac{m_{tor}\pi}{l_{tor}}\right)^2 I_\omega \times 10^2 + \frac{1}{2(1+\nu)} I_T + \left(\frac{l_{tor}}{m_{tor}\pi}\right)^2 \varepsilon \times 10^{-4}\right]$$

I_p ——骨材关于点 *C* 的净极惯性矩，cm⁴，按表 5.4.4.4 定义，点 *C* 如第 1 节图 1.2.3.2（1）所示，且按表 5.2.3.4 定义；

I_T ——骨材的净圣维南惯性矩，cm⁴，按表 5.2.3.4 定义；

I_ω ——加强筋关于点 C 的净剖面扇形惯性矩，cm⁶，点 C 如第 1 节图 1.2.3.2（1）所示，且按表 5.2.3.4 定义；

l_{tor} ——骨材跨距，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；

m_{tor} ——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；

$\varepsilon = \left(\frac{t_p^3}{3b}\right)$ 对于扁钢；

A_w ——腹板净面积，mm^2；

A_f ——翼板净面积，mm^2。

惯性矩 表 5.2.3.4

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： $\frac{b_f^3 t_f e_f^3}{12\times 10^6}$
注： (1) t_w 为腹板净厚度，mm，本表中不使用 [5.2.3.2] 中定义的 t_{w_red}； (2) 对于球扁钢和角钢，d_f 取为 0。		

5.2.3.5 带板的有效宽度

骨材的有效带板宽度，b_{eff}，mm，应取为：

（1） 当$\sigma_x > 0$ 时：

① 对于有限元分析：

$$b_{eff} = Min\,(C_x b, \chi_s s)$$

② 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$\sigma_x \le 0$ 时：

$$b_{eff} = \chi_s s$$

式中：χ_s——有效宽度系数，取为：

① 如果$\frac{\ell_{eff}}{s} \ge 1$，则：

$$\chi_s = \frac{1.12}{1+\frac{1.75}{\left(\frac{\ell_{eff}}{s}\right)^{1.6}}} \le 1.0$$

② 如果$\frac{\ell_{eff}}{s}<1$，则：

$$\chi_s = 0.407\frac{\ell_{eff}}{s}$$

ℓ_{eff}——骨材有效长度，mm，取为：

（1）对于两端固支的加强筋，$\ell_{eff}=\frac{l}{\sqrt{3}}$；

（2）对于一端简支、一端固支的加强筋，$\ell_{eff}=0.75l$；

（3）对于两端简支的加强筋，$\ell_{eff}=l$；

5.2.3.6 针对骨材屈曲能力评估的有限元应力修正

当按照第 4 节[4.2.4]，从有限元分析得到的参考应力 x 和 y 均为压应力时，x 应根据下列公式进行修正：

（1）如$\sigma_x<\nu\sigma_y$，则：

$$\sigma_{xcor}=0$$

（2）如$\sigma_x\geq\nu\sigma_y$，则：

$$\sigma_{xcor}=\sigma_x-\nu\sigma_y$$

5.2.4 主要支撑构件

5.2.4.1 开口位置处的腹板

应基于轴向压应力和剪切应力的联合作用，进行主要支撑构件开口位置处腹板屈曲评估。与开口两边邻接的腹板应作为单独的非加筋板格，如表 5.2.4.1 所示。

应采用[5.2.2.1]的相关方程，且：

$$\sigma_x=\sigma_{av}$$

$$\sigma_y=0$$

$$\tau=\tau_{av}$$

式中：σ_{av}——所计算的腹板区域内，即表 5.2.4.1 中的 P1、P2 和 P3 区域内的加权平均压应力，N/mm^2；

在应用表 5.2.4.1 时，加权平均剪切应力按如下取值：

（1）如果模型中建立了主要支撑构件上的开口模型，则：

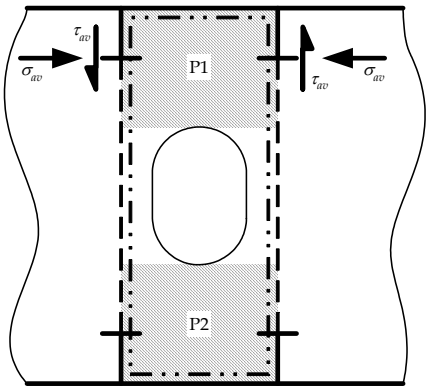
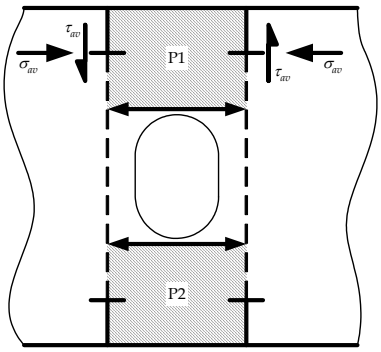
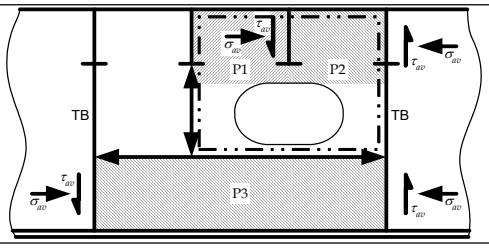
τ_{av}——计算的腹板面积上的加权平均剪切应力，N/mm^2。腹板面积如表 5.2.4.1 中的 P1、P2、P3 所示；

（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 5.2.4.1 中给出的加权平均剪切应力，N/mm^2。

开口腹板的屈曲折减因子　　表 5.2.4.1

结构布置 (1)	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

结构布置（1）		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（2）		对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 5.2.2.3 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 5.2.2.3 中的工况⑱或⑲选取。	对于表 5.2.2.3 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 5.2.2.3 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 $\tau_{av} = \tau_{av}(web)h/(h-h_0)$
(b) 边缘有加强		对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 5.2.2.3 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。	对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 5.2.2.3 中的工况⑮选取。	对于 P1 和 P2 区域，应采用各自的折减因子，按表 5.2.2.3 中的工况⑮选取，且：$\tau_{av} = \tau_{av}(web)h/(h-h_0)$
(c) 腹板上开口示例		板格 P1 和 P2 应按照(a)评估；板格 P3 应按照(b)评估。		

式中：

h ——主要支撑构件开口腹板的高度，m；

h_0——沿腹板高度方向量得的开口高度，m；

$\tau_{av}(web)$—— 覆盖主要支撑构件腹板高度 h 的加权剪应力，N/mm^2

注（1）：开口腹板位置处的屈曲评估应考虑的板格如图中阴影所示，编号为 P1、P2 等。

注（2）：对于具有开口且边缘未作加强的主要支撑构件的腹板板格，如构造(a)所示，适用的屈曲评估方法取决于其具体边界条件。如果沿翼板或沿带板的一条长边不承受“线内支持”，即该边缘可以自由被拉紧，则应使用方法 B。其他情况下，如板格短边与板的翼板相连的典型情况，则应使用方法 A。

5.2.4.2　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 5.2.4.1 所示选取。

5.2.4.3　由垂直骨材穿过的主要支撑构件腹板，应根据图 5.2.4.3 进行等效板格的理想化。

板格宽度的修正也适用于其他槽孔构造的情况，只要腹板和领板至少与穿过的骨材的一侧相连。

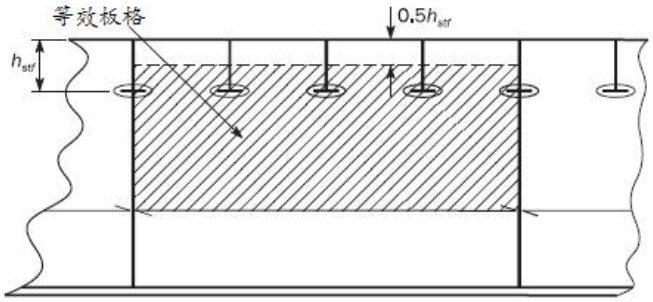


图 5.2.4.3　主要支撑构件腹板的理想化

5.2.5　装有 U 型材的加筋板格

5.2.5.1　局部板格屈曲

对于装有 U 型材的加筋板，应按如下分别校核每个 EPP b_1, b_2, b_f和h_w（见第 1 节图 1.2.3.2(2)）的局部板格屈曲：

（1）带板板格 EPP b_1, b_2应使用 SP-A 模型评估。计算表 5.2.2.3 工况①的屈曲系数 K_x 时，应使用表 5.2.2.4 定义的 U 型材的修正系数F_{long}；计算表 5.2.2.3 工况②的 K_y 时，应使用[5.2.2.5]定义的 U 型材的F_{tran}。

（2）面板和腹板板格 EPP b_f和h_w应使用 UP-B 方法评估，且$F_{long}=1$，$F_{tran}=1$。

5.2.5.2　加筋板整体屈曲及骨材的屈曲

装有 U 型材加筋板格的骨材的整体加筋板格能力和极限能力评估时，翘曲应力$\sigma_w=0$，且包括有效宽度带板的弯曲惯性矩应基于以下假设计算：

（1）U 型材的两侧腹板板格应取为垂直于带板，厚度等于t_w，高度等于带板与骨材翼板之间的距离；

（2）带板的有效宽度b_{eff}取为 EPP，b_1, b_2分别按照 SP-A 模型计算得到的b_{eff}之和；

（3）不考虑剪滞效应的骨材带板有效宽度b_{eff1}取为 EPP，b_1, b_2分别计算得到的 b_{eff1}之和。

5.3　柱结构的屈曲能力

5.3.1　槽形结构的柱屈曲

5.3.1.1　屈曲利用因子

轴向受压槽形结构的柱屈曲利用因子η，按下式计算：

$$\eta_{column}=\frac{\sigma_{av}}{\sigma_{cr}}$$

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 for $\sigma_E > 0.5R_{eH\_S}$

σ_E——最小弹性受压屈曲应力，N/mm²，按[5.3.1.2]计算；

R_{eH_S}——材料屈服应力，N/mm²。对于组合截面构件，应取各构件材料屈服应力的小者。

5.3.1.2　弹性柱屈曲应力

轴向受压构件的弹性柱屈曲应力σ_E，N/mm²，按下式计算：

$$\sigma_E = \pi^2 E f_{end} \frac{I}{A l_{pill}^2} \times 10^{-4}$$

式中：I——关于横截面最弱轴的净惯性矩，cm^4；

A——构件的净横截面积，cm^2；

l_{pill}——构件的无支撑长度，m；

f_{end}——端部约束因子，对应于适用的简单支持的端部，且应按如下取用，但对于在顶凳或底凳处的固定端部深度超过 2 倍槽形的情况除外：

- $f_{end} = 1.0$，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。

第 6 节　基于应力的参考应力

符号

a　——第 5 节中定义的板格长边长度，mm；

b　——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。

6.1　基于应力的方法

6.1.1　引言

6.1.1.1　本节给出了一种通过二次多项式曲线和使用最小二乘法线性分布和加权平均法得到线性分布来确定所计算的屈曲板格边缘应力分布的方法。参考应力是指将板单元中心处的应力变换到所计算屈曲板格局部坐标系下的应力分量。

6.1.1.2　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，详见第 4 节[4.2.3.1]。

6.1.2　应力施加

6.1.2.1　规则板格

对于某一规则板格，如满足下列条件，则其参考应力应按照[6.2.1]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[6.2.2]针对非规则板格的定义进行选取。

6.1.2.2　非规则板格和曲板板格

非规则板格的参考应力应按照[6.2.2]的定义进行选取。

6.2　参考应力

6.2.1　规则板格

6.2.1.1　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：

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} A_i\left[\sigma_{xi} - (Cx_i^2 + Dx_i + E)\right]^2$$

上式中的未知系数 C、D 和 E 应使得$\partial\Pi$分别对 C、D 和 E 的第一阶偏导数为零，即

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\Pi}{\partial C} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i x_i^2\left[\sigma_{xi} - \left(Cx_i^2 + Dx_i + E\right)\right] = 0 \\ \dfrac{\partial\Pi}{\partial D} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\left[\sigma_{xi} - \left(Cx_i^2 + Dx_i + E\right)\right] = 0 \\ \dfrac{\partial\Pi}{\partial E} = 2\sum_{i=1}^{n} A_i\left[\sigma_{xi} - \left(Cx_i^2 + Dx_i + E\right)\right] = 0 \end{cases}$$

未知系数 C、D 和 E 可以通过联立求解上述 3 个方程组得到。

$$\sigma_{x1} = \frac{1}{b}\int_0^b \sigma_x(x)dx = \frac{b^2}{3}C + \frac{b}{2}D + E$$

$$\sigma_{x2} = \frac{1}{b}\int_{a-b}^{a} \sigma_x(x)dx = \left(a^2 - ab + \frac{b^2}{3}\right)C + \left(a - \frac{b}{2}\right)D + E$$

如果$-\frac{D}{2C} < \frac{b}{2}$ 或者 $-\frac{D}{2C} > a - \frac{b}{2}$，，则$\sigma_{x3}$应予以忽略。否则，$\sigma_{x3}$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：$\sigma_x = Max\left(\sigma_{x1}, \sigma_{x2}, \sigma_{x3}\right)$；

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骨材的屈曲评估，作用在带板短边上的应力σ_x应为：

$$\sigma_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i\sigma_{xi}}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

应力σ_x的边缘应力比等于 1.0。

6.2.1.2　横向应力

施加在屈曲板格长边上的横向应力σ_y，应通过对所计算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获得。

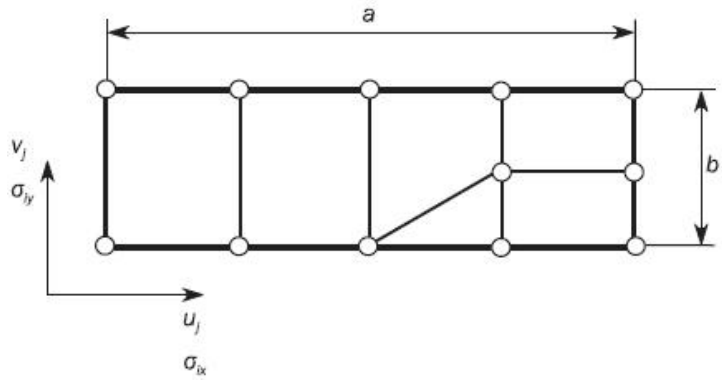


图 6.2.1.2　　屈曲板格

$\sigma_y(x)$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$\partial\Pi$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：

$$A = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\sigma_{yi}\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\sigma_{yi}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\right)^2}$$

$$B = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\sigma_{yi}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\sigma_{yi}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n} A_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} A_i x_i\right)^2}$$

横向应力计算如下：

$$\sigma_y = max\,(A, A + Ba)$$

边缘应力比计算如下：

$$\psi_y = \frac{min\,(A, A + Ba)}{max\,(A, A + Ba)}\ ，\ 如果\ \sigma_y > 0$$

$$\psi_y = 1\ ，\qquad 如果\ \sigma_y \le 0.$$

6.2.1.3　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：

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i\tau_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

6.2.2　非规则板格和曲板板格

6.2.2.1　参考应力

纵向、横向和剪应力都应采用面积加权平均方法，根据如下计算得到：

$$\sigma_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \sigma_{xi}}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

$$\sigma_y = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \sigma_{yi}}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \tau_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

边缘应力比应取为：

$$\psi_x = 1$$

$$\psi_y = 1$$

第 3 章　舵　　装

第 1 节　舵

3.1.1　一般要求

3.1.1.1　基本假设

(1) 本节规定适用于普通剖面型舵，以及部分为了提升舵力，采用特殊布置以剖面优化加强型的舵。对于剖面形状不包含在本节中的舵型，需要特殊考虑。

(2) 本节规定适用于钢质舵。非钢质舵需要特殊考虑。

3.1.1.2　设计考虑

(1) 应提供有效的方式以在不产生过度的舵承压力时支撑舵体的重量，例如采用在舵杆上部设置一个上舵承的方式。上舵承处的船体结构应适当地加强。

(2) 应有合适的装置，以防止舵被抬升。

(3) 通海的舵杆围阱，应在最深的装载水线之上安装有密封装置或填料函，以防止海水进入舵机舱，导致舵承处的润滑剂被冲走。若舵杆围阱的顶部低于~~最深的装载~~结构吃水（无纵倾）处水线，应设有两个分开的水密密封/填料函。

3.1.1.4　焊接和设计细节

(3) 承受舵弯曲产生较大应力的舵旁板焊接，以及舵板与锻钢或铸钢承座实心体或者厚板的焊接~~时~~，应采用全焊透。在高应力区域，比如半悬挂舵缺口处以及悬挂舵上部分，应采用铸钢或者焊接在隔板上。通常应采用双面全焊透。如果背面不可施焊，应焊接在陶瓷垫板或相当材料上。可采用钢质垫板，且应单面连续焊接在~~实体或厚板~~坡口上，见图 3.1.1.4（3）。单面焊的坡口角度应至少为 15°。

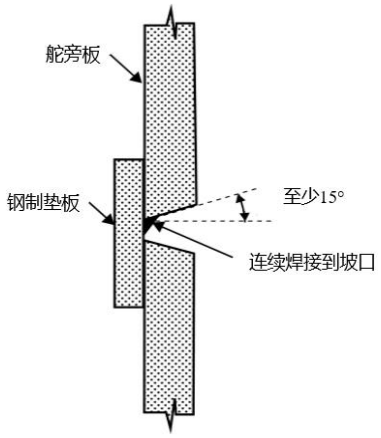


图 3.1.1.4（3）　舵旁板全焊透时使用钢制垫板

3.1.2　舵力和舵杆扭矩

3.1.2.1　无缺口舵叶

(1) 舵力是舵尺寸计算的基础，舵力 C_R 应按下式计算：

$$C_R = 132K_1K_2K_3AV^2 \quad \text{N}$$

式中：C_R——舵力，N；

A——舵叶面积，m^2；

V——最大服务航速，kn。当航速小于 10 kn 时，V 应被下式取代：

$$V_{\min} = (V + 20)/3$$

对于倒车工况，应采用最大倒车航速V_{astern}（船舶在最深航行吃水，在设计最大倒车功率下，预计能达到最大速度），且该航速应不小于下式计算所得之值：

$$V_{astern} = 0.5V$$

3.1.4 舵杆尺寸

3.1.4.2 合成应力要求的舵杆尺寸

舵杆的等效弯曲和扭转合成应力应不超过 $118/K$，N/mm²。

K——舵杆材料系数，见本节 3.1.1.3(5)。

等效应力σ_c应按下式计算得到：

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_b^{\,2} + 3\tau_t^{\,2}} \quad \text{N/mm}^2$$

式中：弯曲应力 $\sigma_b = \dfrac{10.2M}{d_c^3} \times 10^3 \quad N/mm^2$

剪切应力 $\tau_t = \dfrac{5.1Q_R}{d_c^3} \times 10^3 \quad N/mm^2$。

舵杆直径 d_c 应不小于按下式计算所得之值：

$$d_c = d_t \sqrt[6]{1 + \frac{4}{3}\left(\frac{M}{Q_R}\right)^2} \quad \text{mm}$$

式中：M——考虑剖面的舵杆弯矩, Nm。

对于舵杆围阱伸入舵内的悬挂舵，舵杆尺寸应按照本章附录 1 的 2.2 规定的两个工况进行校核。

3.1.5 舵叶

3.1.5.2 舵叶

舵旁板、顶板和底板的板厚 t 应不小于下式计算所得之值：

$$t = 5.5s\beta\sqrt{K}\sqrt{d + C_R 10^{-4}/A} + 2.5 \quad \text{mm}$$

式中：d——夏季载重线结构吃水，m；

C_R——舵力，N，见本节 3.1.2.1；

A——舵叶面积，m²；

$\beta = \sqrt{1.1 - 0.5(\frac{s}{b})^2}$，如 $\frac{b}{s} \geq 2.5$，则 β 最大取 1。

s——板格的短边长度，m；

b——板格的长边长度，m；

K——舵叶材料系数，见本节 3.1.1.3(2)。

3.1.6 舵杆连接

3.1.6.4 具有特殊拆装专用装置的锥形连接

(2) 推入压力

推入压力应不小于以下两式计算所得之值的大者：

$$p_{req1} = \frac{2Q_F \times 10^3}{d_m^{\,2} l \pi \mu_0} \quad \text{N/mm}^2$$

$$p_{req2} = \frac{6M_c \times 10^3}{l^2 d_m} \quad \text{N/mm}^2$$

式中：Q_F——按本节 3.1.6.3(2)确定的舵杆设计屈服扭矩，Nm；

d_m——锥体平均直径，mm；见图 3.1.6.3（a）；

l——连接长度，mm；

μ_0——摩擦系数，等于 0.15；

M_c——锥形连接最上端的舵杆弯矩(例如悬挂舵)，Nm。

对于舵杆围阱伸入舵内的悬挂舵，锥形连接应按照本章附录 1 的 2.2 规定的两个工况进行校核。

应证明推入压力不超过锥体的许用表面压力。许用表面压力 p_{perm}，应按下式计算确定：

$$p_{perm} = \frac{0.95R_{eH}(1-\alpha^2)}{\sqrt{3+\alpha^4}} - p_b \quad \text{N/mm}^2$$

式中：$p_b = \dfrac{3.5M_c \times 10^3}{d_m l^2}$ N/mm^2；

R_{eH}——舵枢材料规定的最小屈服应力，N/mm^2；

$\alpha = \dfrac{d_m}{d_a}$；

d_m——直径，mm，定义见图 3.1.6.3（a）；

d_a——舵枢外径见图 3.1.6.3（a），mm，应不小于 $1.25d_0$。见图 3.1.6.3（a）及 3.1.6.3（b）(最小直径处量取)。

3.1.7 **舵销**

3.1.7.2 连接

(2) 舵销销座的推入压力

如采用干式装配，舵销销座的推入压力，应按下式计算的 p_{req1} 确定。

如采用注油装配，~~所要求的~~舵销销座的推入压力，应按下式计算的 p_{req1} 和 p_{req2} 中大者确定。

$$p_{req1} = 0.4\frac{Bd_0}{d_m^2 l} \quad \text{N/mm}^2$$

$$p_{req2} = \frac{6M_{bp}}{l^2 d_m} \times 10^3 \quad \text{N/mm}^2$$

式中：B——舵销销座的支撑力，N；

d_0——舵销直径，mm，见图 3.1.6.3（a）。

M_{bp}——舵销锥形连接的弯矩，按下式确定：

$$M_{bp} = Bl_a \quad \text{Nm}$$

l_a——舵销轴承中部与接触面（锥形连接与舵销）顶端之间的长度，m，见图 3.1.7.2。

推入长度 Δl_1 应按本节 3.1.6.4⑶的类似方法计算，采用要求的舵销轴承推入压力和舵销轴承的属性。

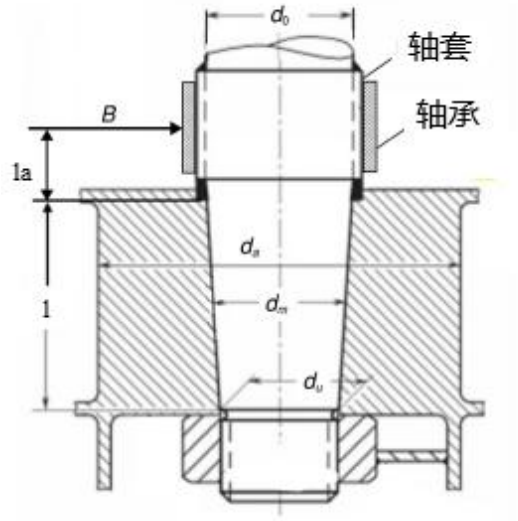


图 3.1.7.2　舵销连接 l_a 示意图

3.1.8　舵杆、舵轴和舵销的轴承

3.1.8.1　轴套和衬套

(1) 舵杆轴承

轴承应有轴套和衬套，对于直径小于 200mm 的舵杆和舵销，可根据需要安装轴套。轴套和衬套的最小厚度 t_{min} 应取为：

t_{min} = 8mm　　金属材料和合成材料

t_{min} = 22mm　　木材

(2) 舵销的轴承

任何衬套或轴套的厚度 t ，mm，应不小于下式及 3.1. 8.1(1)定义的最小厚度。

$$t = 0.01\sqrt{B}$$

式中：B——相关轴承支撑力，N。

3.1.9　挂舵臂与舵杆围阱的强度

3.1.9.2　舵杆围阱

本要求适用于伸入艉柱以下的舵杆围阱，这种布置的舵杆围阱承受舵力。

(1) 材料，焊接以及与船体的连接

舵杆围阱的钢材应保证可焊性，熔炼分析的含碳量不超过 0.23%，或者碳当量 C_{EQ} 不超过 0.41%。

舵杆围阱的板材钢级一般不应低于本篇第 1 章第 3 节中材料级别 II 所对应钢级。

舵杆围阱与船壳或导流尾鳍底部的连接焊缝应为全焊透。

对延伸到船壳或导流尾鳍以下的舵杆围阱，凸肩圆角半径 r,mm,见图 3.1.9.2 应尽可能大并满足下式：

r=0.1d_c/ K ，且应不小于：

r=60mm　　当 $\sigma \geq 40/K$　N/mm^2

r=30mm　　当 $\sigma < 40/K$　N/mm^2

式中：d_c——3.1.4.2 定义的舵杆直径

σ ——舵杆围阱的弯曲应力, N/mm^2

K——舵杆围阱的材料系数，分别见本节 3.1.1.3(2)或 3.1.1.3(5)。

弧形可用打磨方式制成。如用砂轮打磨，应在焊缝方向上避免砂轮划痕。应用模板核查弧形的精度。至少应核查四个，并应向验船师提交报告。

非钢质材料舵杆围阱应由 CCS 作特殊考虑。

第 2 节　锚泊及系泊设备

3.2.1　舾装数

3.2.1.1　海船的锚泊设备应根据船舶种类及其航行水域并根据本节 3.2.1.2 所求得的舾装数 N，按表 3.2.1.1(1)和表 3.2.1.1(2)的要求配备。本节对拖索和系船索的数量、长度及破断负荷的要求仅为指导性要求。

对工作特殊，船东要求加大锚重，且借助于其他设施进行锚泊作业的非自航船舶，其锚链的配备可仅按规范要求的锚重选取。

本节关于锚泊设备的要求系针对因等待靠泊、潮水等而暂时系泊于港口或遮蔽区的船舶。

因此，符合本节要求的设备并非用于在风暴天气下使船舶与毫无遮蔽的海岸保持距离，或使移动或漂动中的船舶停下。在上述条件下，作用在锚泊设备上的载荷将由于形成高能量载荷而增大，并导致其部件的损坏或丢失，特别是较大尺度的船舶。

符合本节规定的锚泊设备能使船舶在良好的锚地底质上系留，以防止出现走锚情况。在不良的锚地底质上，锚的抓力将明显降低。

本节所要求锚泊设备的舾装数(EN)公式基于假定的最大水流速度为 2.5m/s、最大风速为 25m/s、最小出链长度在 6~10 之间。出链长度系指抛出锚链的长度与水深之比。对于船长大于 135m 的船舶，本节所要求的锚泊设备可认为适用于最大水流速度为 1.54m/s、最大风速为 11m/s、最大有义波高为 2m。

假定在正常情况下，一艘船舶只使用一只锚。

锚及锚链的制造应满足 CCS《材料与焊接规范》的相关要求。

首锚应与其锚链连接，布置于船上，并随时可用。

除正常按计划抛锚作业，锚泊设备对船舶在应急情况下的安全也有重要作用，如丧失操作性、非计划性修理以及其他非预计情况。

3.2.1.2　舾装数 N 按下式计算：

$$N = \Delta^{\frac{2}{3}} + 2(Bh + S_{fun}) + \frac{A}{10}$$

式中：Δ——夏季载重水线下的型排水量，t；

B——船宽，m；

h——从夏季载重水线到最上层舱室顶部的有效高度，m；即：

$$h = a + \sum h_i$$

其中：a——从船中夏季载重水线至上甲板边线的垂向距离，m；

h_i——各层宽度大于 $B/4$ 的舱室，在其中心线处量计的高度，m；对最下层的层高 h_i 从上甲板中心线量起，或从具有不连续上甲板时的名义甲板线量起，见图 3.2.1.2（1）。

A ——船长 L 范围内夏季载重水线以上的船体部分和上层建筑以及各层宽度大于 $B/4$ 的甲板室和烟囱的侧投影面积的总和，m^2。当 A_{FS} 大于零时，烟囱的侧投影面积应计入 A。此时，烟囱的侧投影面积应从上甲板，或从具有不连续上甲板时的名义甲板线量起，直到有效高度 h_F。

S_{fun} ——烟囱的有效正投影面积，m^2，即：

$$S_{fun} = A_{FS} - S_{shield}$$

其中：A_{FS} ——烟囱的正投影面积，m^2，从上甲板中心线，或具有不连续上甲板时的名义甲板线量起，直到有效高度 h_F。当沿烟囱高度方向，所有高度的烟囱宽度均小于或等于 $B/4$，A_{FS} 取为零。

h_F ——烟囱的有效高度，m，从上甲板中心线，或具有不连续上甲板时的名义甲板线量起，直到烟囱的顶部。烟囱的顶部可取为烟囱宽度达到 $B/4$ 的平面。

S_{shield} ——烟囱正投影面积 A_{FS} 被宽度超过 $B/4$ 的甲板室遮蔽（掉的）部分的面积，m^2。如果不只一个遮蔽部分，单个遮蔽部分，如 $S_{shield1}$，$S_{shield2}$ 等，应相加，见图

3.2.1.2（3）。在确定 S_{shield} 时，所有宽度超过 $B/4$ 的甲板室的宽度可假设为 B，参见图 3.2.1.2（3）中确定 $S_{shield1}$， $S_{shield2}$ 的方式。

当船上安装了多个烟囱，则:

h_F ——烟囱的有效高度，m，从上甲板中心线，或从具有不连续上甲板时的名义甲板线量起，直到最高烟囱的顶部。最高烟囱的顶部可取为所有烟囱宽度之和达到 $B/4$ 的平面。

A_{FS} ——各烟囱的正投影面积之和，m^2，从上甲板中心线，或从具有不连续上甲板时的名义甲板线量起，直到有效高度 h_F 。当沿烟囱高度方向，所有高度的各烟囱宽度之和均小于或等于 $B/4$， A_{FS} 可取为零。

A——船长 L 范围内夏季载重水线以上的船体部分和上层建筑以及各层宽度大于 $B/4$ 的甲板室和烟囱的侧投影面积的总和，m^2；当 A_{FS} 大于零时，各烟囱的总侧投影面积应计入 A。烟囱在横向的遮蔽效果应在计算总侧投影面积时予以考虑，例如当两个或三个烟囱的侧投影面积全部或部分重叠，重叠部分的面积只需计入一次。

拖船的艉装数，按下式计算：

$$N = \Delta^{\frac{2}{3}} + 2(aB + \sum b_i h_i) + \frac{A}{10}$$

式中：a、B 和 h_i 同上所述；

b_i ——上层建筑宽度或各层宽度超过 $B/4$ 甲板室的宽度，m。

对船长小于 45m 的仅用于拖带的拖船，可仅使用一只锚，并保证第二只锚及对应锚链存放可随时进行安装。在丢失锚时，拖船应保持在港内直到替换锚安装完毕。

计算 h 和 A 时，不必计及舷弧和纵倾，即 h 是船中干舷与各层宽度大于 $B/4$ 的舱室高度之和。

凡是超过 1.5m 高度的挡风板和舷墙，均应视为上层建筑或甲板室的一部分。

宽度大于 $B/4$ 的甲板室如在宽度为 $B/4$ 或以下的甲板室之上，应计入上面的甲板室而忽略下面的甲板室。

在确定 h 和 A 时，可不考虑舱口围板高度和集装箱之类任何甲板货的高度。在确定 A 时，高于 1.5m 的舷墙，图 3.2.1.2（2）所示的面积 A_2 应计入 A。表 3.2.1.1(2)中的有档首锚链的总长度应在两只首锚之间分为大致相等的部分。

对船长小于 90m 的船舶，也可以使用本章附录 3 的载荷计算来选取锚泊设备。

设备配置 **表** 3.2.1.1(1)

船 型	要求配置的设备
货船、散货船、油船、耙吸式挖泥船、渡船等	按 N 选取。
拖船	按 N 选取。
近海供应船	按 N 选取，但锚链按 N 增大 2 档选取。
有人驳船	按 N 选取。
无人驳船	按 N 选取，但首锚可仅配 1 只，锚链可仅配一半长度。
起重船、打桩船或其他类似作业的船舶	按 N 选取，但起重机、打桩机等的侧投影面积应计入 N。若作业用锚满足本表的要求，可代替首锚。~~若用钢索代替锚链时（不限船长），锚重应至少增加 25%，钢索长度应不小于 1.5 倍相应锚链的值，其破断负荷应与相应锚链破断负荷相同。作为替代锚机装置的起锚用绞车，应满足 CCS《钢质海船入级规范》第 3 篇第 13 章第 2 节的要求（锚链轮和止链器的要求除外），绞车的布置应配有排绳装置，并需要按 CCS《钢质海船入级规范》第 3 篇第 13 章 13.2.6 的要求进行试验。锚与钢索之间应装有短锚链，其长度为 12.5m 或锚存放位置至锚机的距离，取小者。在钢索与锚链的衔接处应加转环。~~

3.2.3 **锚链**

3.2.3.1 对 N 小于 90 的船舶，可用试验载荷相等的无档锚链代替。

3.2.3.2 ~~对船长小于 40m 的船舶，~~在以下情况可使用钢丝绳替代锚链：

（1）船长小于 90m，且仅需要一只应急锚（在正常临时锚泊作业时不需用锚）；

（2）船舶有定位（至少 4 点）锚设备（如铺缆船船或铺管船）；

（3）表 3.2.1.1（1）中起重船、打桩船或其他类似作业的船舶的作业用锚。

3.2.3.3 使用钢丝绳替代锚链时，应满足下述要求：

（1）钢丝绳的总长应为表 3.2.1.1(2)中的有档锚链相应要求长度的 1.5 倍，最小破断强度应为与相应 CCS 1 级有档锚链破断强度相同。

（2）锚的重量应比表 3.2.1.1（2）中相应锚重增加 25%。

（3）在钢丝绳和锚之间应设一段短的锚链，其长度为 12.5 m 或锚存放位置至锚机的距离，取小者。

（4）所有与钢丝绳（包括钢丝绳的中间部分）接触的表面都需要进行倒圆，倒圆半径不小于 10 倍的钢丝绳直径。

（5）应根据制造商建议选取合适的钢丝绳，并应提供维护和检查手册。

3.2.3.~~3~~4 锚链在连接于锚的一端应装设 1 个转环。

3.2.3.~~4~~5 锚链的内端应系固在船体结构上，并能在锚链舱外易于到达的地方迅速解脱。

3.2.3.~~5~~6 拉伸应力小于 400N/mm^2 的 CCS 1 级链不能用于大抓力锚。CCS 3 级链仅适用于链径为 20.5mm 或以上的锚链。

3.2.3.~~6~~7 表 3.2.1.1（2）中所列锚链总长度应尽可能平均分配给两只首锚的锚链。

3.2.4 **拖索和系船索**

3.2.4.1 系船索的数量、长度及破断负荷应标注在船舶的系泊布置图上。表 3.2.1.1（2）所列的拖索为船舶上配有的用于拖船或其他船舶拖带本船所使用的，为选取拖索而计算艏装数时，应计入甲板货（~~装载手册中给出~~名义能力工况）的侧投影面积。作为 3.2.4 条的替代方法，可根据本章附录 2 直接系泊分析的方式确定系泊索的数量及最小破断负荷。

附录 1　弯矩及剪力分布计算指南

2　舵–舵杆系统的受力

2.1　悬挂舵

分析数据

l_{10} - l_{30} =该系统各构件长度，m；

I_{10} - I_{30} =这些构件的惯性矩，cm^4。

舵叶的载荷 P_R：

$$P_R = C_R / (l_{10} 10^3) \quad \text{kN/m}$$

弯矩和剪力

弯矩和剪力可按下式计算所得：

$$M_b = C_R (l_{20} + (l_{10}(2c_1 + c_2)/3(c_1 + c_2))) \quad \text{Nm}$$

$$B_3 = \frac{M_b}{l_{30}} \quad \text{N}$$

$$B_2 = C_R + B_3 \quad \text{N}$$

式中：C_R——舵力，N；

图 2.1 中所示锥形连接顶端的最大弯矩 M_c 适用于舵叶与舵杆连接。

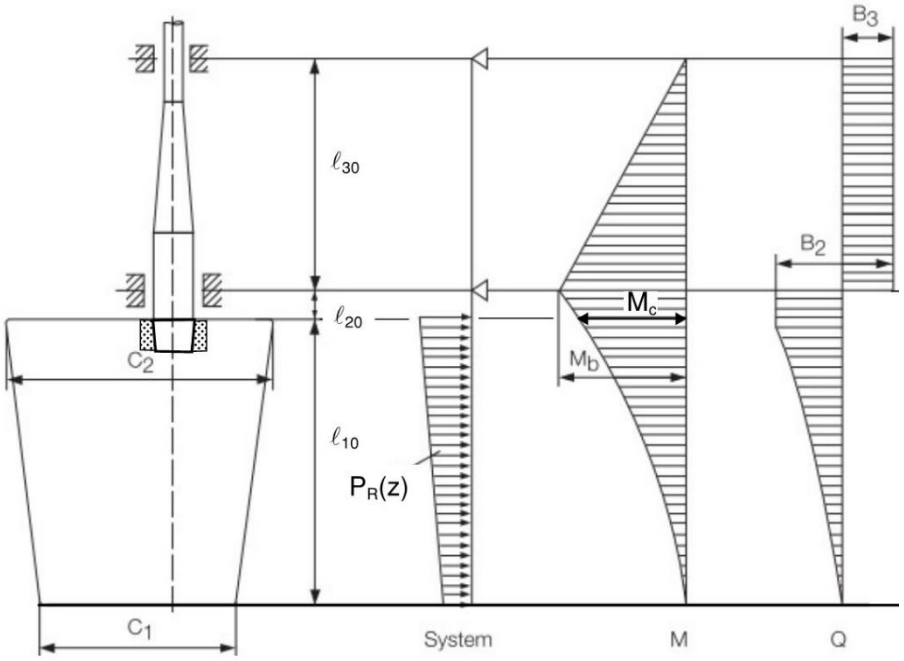


图 2.1 悬挂舵

2.2 有舵杆围阱的悬挂舵

分析数据

l_{10}-l_{30}——该系统各构件长度，m；

I_{10}-I_{30}——这些构件的惯性矩，cm^4。

舵叶的载荷 P_R：

$$P_R = C_R / ((l_{10} + l_{20})10^3) \quad \text{kN/m}$$

弯矩和剪力

对于有延伸到舵内的舵杆围阱的悬挂舵，应根据下述两个工况校核其强度，两个工况下的弯矩和剪力可分别按图 2.2（1）和图 2.2（2）确定。~~下式计算所得：~~

（1）压力施加于整个舵区域；

舵力 $C_R = C_{R1} + C_{R2}$

舵扭矩 $Q_R = Q_{R1} + Q_{R2}$

舵杆弯矩 $M_b = M_{CR2} - M_{CR1}$

（2）压力施加于轴承中部以下舵区域。

舵力 C_{R2} 对应舵扭矩 Q_{R2} 施加于舵叶面积 A_2

舵杆弯矩 $M_b = M_{CR2}$

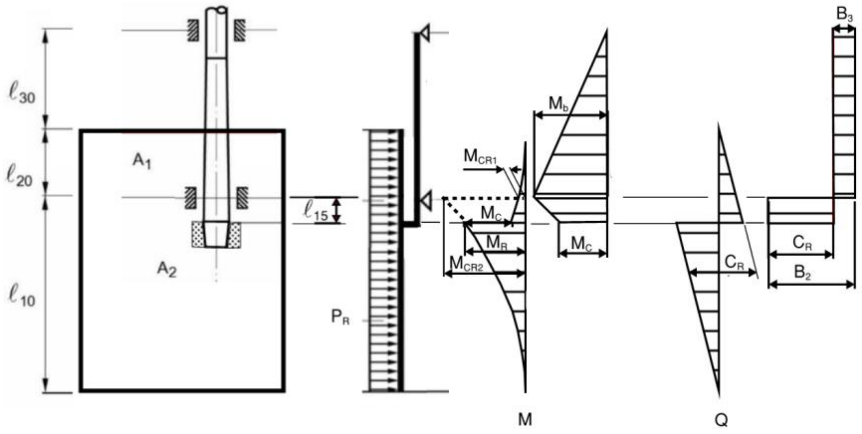


图 2.2（1）

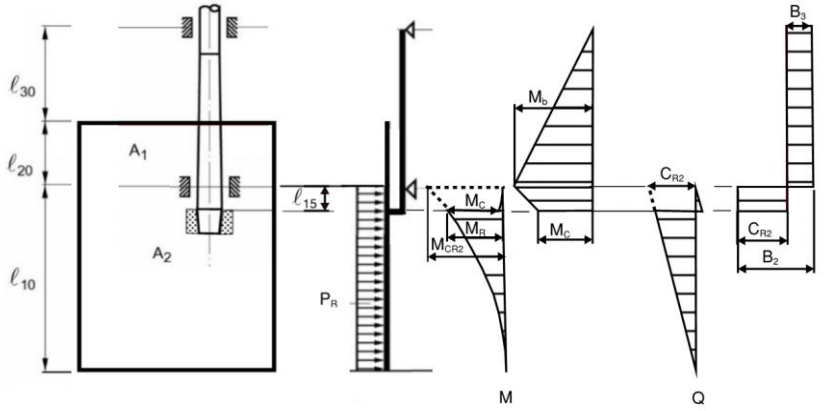


图 2.2（2）

~~取以下公式计算所得值的大者：~~

$$M_{CR1} = C_{R1}(CG_{1Z} - l_{10}) \quad \text{Nm}$$

$$M_{CR2} = C_{R2}(l_{10} - CG_{2Z}) \quad \text{Nm}$$

式中：

C_{R1}——舵叶面积 A_1 内的舵力，N；

C_{R2}——舵叶面积 A_2 内的舵力，N；

CG_{1Z}——舵叶面积 A_1 重心距基线的垂直位置，m；

CG_{2Z}——舵叶面积 A_2 重心距基线的垂直位置，m。

$$C_R = C_{R1} + C_{R2} \quad \text{N}$$

$$B_3 = (M_{CR2} - M_{CR1})/(l_{20} + l_{30}) \quad \text{N}$$

$$B_2 = C_R + B_3 \quad \text{N}$$

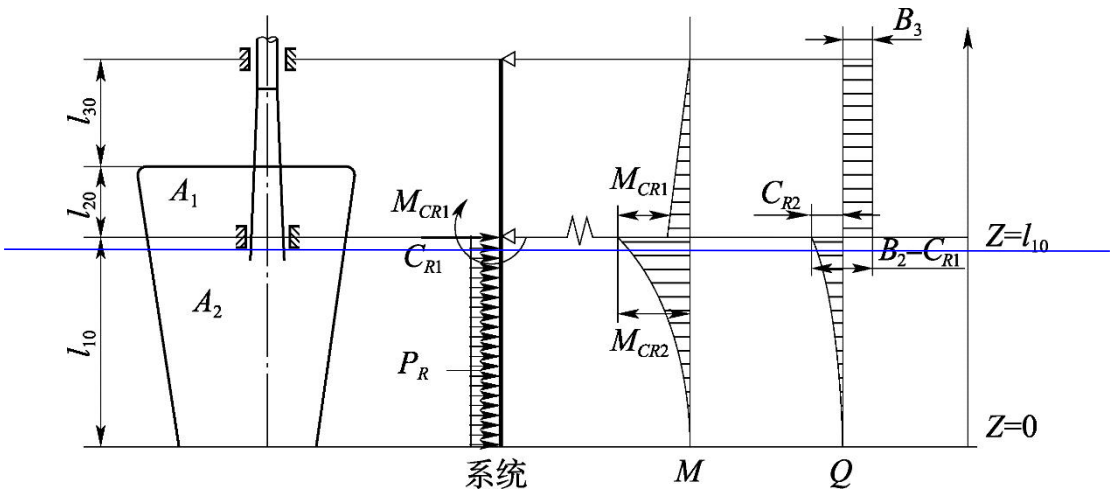


图 2.2　有舵杆围阱的悬挂舵

新增附录 3

附录 3　锚泊设备载荷计算

1　一般要求

1.1　本附录作为本章 3.2.1.2 条对船长在 90m 以下单体船舶锚泊要求的替代方法，可通过直接载荷计算的方法来确定船舶需要的锚泊设备。

2　总载荷 F_{EN}

2.1　由风和流作用在锚泊状态下单体船舶上的总载荷（静态+动态）F_{EN} 载荷，kN，可由下式计算所得：

$$F_{EN}=2(F_{SLPH}+F_{SH}+F_{SS})$$

其中：F_{SLPH}——作用在船体水下部分的静态流载荷；

F_{SH}——作用在船体部分的静态风载荷；

F_{SS}——作用在上层建筑的静态风载荷；

2.1.1　计算 F_{SLPH}

作用在船体水下部分的静态流载荷 F_{SLPH}，kN，可按下式计算：

$$F_{SLPH}=\frac{1}{2}\rho C_f S_m V_c^2 10^{-3}$$

其中：ρ——水的密度，取为 1025kg/m^3；

C_f——系数，可按下式计算：

$$C_f=(1+k)\frac{0.075}{(\log R_e-2)^2}$$

其中：R_e——雷诺数，可按下式计算：

$$R_e=\frac{(V_c L_{WL})}{1.054\cdot 10^{-6}}$$

L_{WL}——水线处船长；

k——系数，可按下式计算：

$$k=0.017+20\frac{C_{bWL}}{L_{WL}^2 T^{-0.5} B_{WL}^{-1.5}}$$

C_{bWL}——水线处方形系数，可按下式计算：

$$C_{bWL}=\frac{\Delta}{1.025 L_{WL} B_{WL} T}$$

其中：Δ——水线处型排水体积，m^3；

S_m——吃水下船体部分的总湿表面的面积，m^2；S_m 可由设计者提供，如无相关数据，可取为 $6\cdot\Delta^{2/3}$；

V_c——流速，m/s；

2.1.2　计算 F_{SH}

作用在船体部分的静态风载荷 F_{SH}，kN，可由下式计算所得：

$$F_{SH}=\frac{1}{2}\rho(C_{hfr}S_{hfr}+0.02S_{hlat})V_W^2 10^{-3}$$

其中：ρ——空气的密度，取为 1.22kg/m³；

V_W——风速，m/s；

S_{hfr}——船体和舷墙（如有）前表面，m²，投影在船舶的垂直平面上，该垂直平面位于船舶后端后方，并垂直于船舶纵轴；

S_{hlat}——船体和舷墙（如有）一侧的部分侧表面，m²，整个船舶的长度，投影在船舶的垂直平面上，该垂直平面平行于船舶纵轴，并根据图 2.1.2 划定界限，图 2.1.2 中 B 为船宽，m。

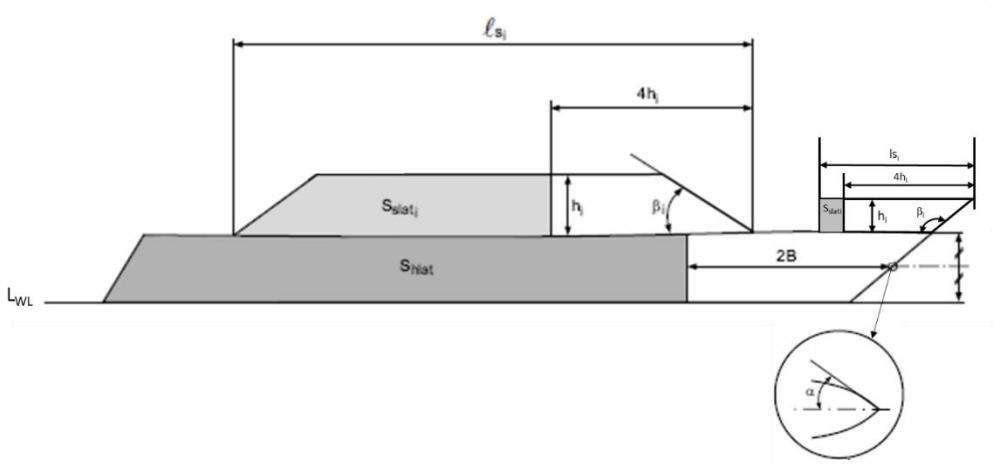


图 2.1.2

C_{hfr}——系数，取为 $0.8\sin\alpha$，α 见图 2.1.2;

船体的上部，是在船舶的整个长度上，从一侧延伸到另一侧，延伸到最上层连续甲板的部分。

2.1.3　计算 F_{SS}

(1) 一般情况

作用在上层建筑和甲板室的静态风载荷 F_{SS}，kN，可由下式计算所得：

$$F_{SS}=\frac{1}{2}\rho\sum(C_{sfr_i}S_{sfr_i}+0.08S_{slat_i})V_W^2 10^{-3}$$

其中：ρ——空气的密度，取为 1.22kg/m³；

V_W——风速，m/s；

S_{sfr_i}——各层上层建筑或甲板室，包含舷墙（如有）的前表面，m²，投影在船舶的垂直平面上，该垂直平面位于船舶后端后方，并垂直于船舶纵轴；

S_{slat_i}——各层上层建筑或甲板室，包含舷墙（如有）一侧的部分侧表面，m²，整个船舶的长度，投影在船舶的垂直平面上，该垂直平面平行于船舶纵轴，并根据图 2.1.2 划定界限，当 $4h_i \geq l_{si}$，则 S_{slat_i} 取为 0；

C_{sfr_i}——系数，取为 $0.8\sin\beta_i$，β_i 见图 2.1.2，当 β_i 大于 90°时取为 90°;

(2) 上层建筑位于船舶前部

当上层建筑位于船体前部，上层建筑的前壁和侧壁与侧壳连续时，作用在上层建筑的静

态风载荷 F_{SS}，kN，可由下式计算所得：

$$F_{SS}=\frac{1}{2}\rho\sum(C_{hfr_i}S_{hfr_i}+0.08S_{slat_i})V_W^2 10^{-3}$$

其中：S_{hfr_i}——各层上层建筑或甲板室，包含舷墙（如有）的前表面，m^2，投影在船舶的垂直平面上，该垂直平面位于船舶后端后方，并垂直于船舶纵轴；

C_{hfr_i}——系数，取为$0.8\sin\alpha_s$，α_s见图 2.1.2 的α，自船体前部的上层建筑的高度方向中部位置测量;

这部分静态载荷需要加到根据 2.1.3（1）计算所得的静态载荷上。

3 锚重量

3.1 单个锚重量，kg，至少应为：

普通无杆锚：$P=(F_{EN}/7)\cdot 10^2$

大抓力锚：$P=(F_{EN}/10)\cdot 10^2$

超大抓力锚：$P=(F_{EN}/15)\cdot 10^2$

4 锚链

4.1 有档锚链尺寸

锚链直径根据不同等级的最小破断负荷 *BL* 和验证负荷 *PL* 来确定。

	CCS 1 级	CCS 2 级	CCS 3 级
BL	$6F_{EN}$	$6.8F_{EN}$	$7.5F_{EN}$
PL	0.7*BL*		

锚链尺寸应与锚的重量相匹配。如果船上锚的重量超过本附录 3.1 计算重量的 7%，则应按照 3.1 的公式计算出对应的 F_{EN}，并再次计算相应的 *BL* 和 *PL*。

4.2 单根锚链的长度

连接到每个锚的锚链长度 L_{cc}，m，应至少等于：

当 P<180 时，$L_{cc}=30\ln(\mathrm{P})-42$

当 P≥180 时，L_{cc} 应根据本章表 3.2.1.1（2）选取。

其中 P 为根据本附录 3.1 确定的普通无杆锚的重量。

第 8 章　散 货 船

第 1 节　一般规定

8.1.1　适用范围

8.1.1.1　本章适用于通常在装货处所具有单甲板、双层底、顶边舱和底边舱，且主要用于运输散装干货的船舶，不包括矿砂船。

8.1.3　船体结构强度直接计算和疲劳评估

8.1.3.1　船长为 150m 及以上的散货船，其货舱区域主要构件(纵向、横向)应按本章附录 1 进行直接计算。

8.1.3.2　船长为 150m 及以上的散货船，应按 CCS《船体结构疲劳强度指南》，对其货舱区域的下述部位进行疲劳强度校核。

(1)　纵骨(船底、舷侧、甲板及内壳)与横向强框架的连接部位；
(2)　纵骨(船底、舷侧、甲板及内壳)与横舱壁的连接部位；
(3)　底边舱或内壳与内底板连接处；
(4)　内底板与底凳斜侧板的连接处；
(5)　槽形横舱壁与底凳顶板的连接处；
(6)　槽形横舱壁与顶凳底板的连接处；
(7)　单壳散货船货舱肋骨与顶边舱和底边舱的连接处。

第 8 节整节修改如下：

第 8 节　货舱舱口盖

8.8.1.1　一般要求

8.8.1.1　本节适用于散货船、矿砂船和兼用船。货舱舱口盖应满足本篇第 2 章第 20 节的有关要求。

第 9 节　双舷侧结构

8.9.1　一般要求

8.9.1.1　本节适用于散货船货舱区域的双舷侧结构。

8.9.1.2　双舷侧内的横隔板和平台上可开人孔，人孔可开成圆形或长圆形，长圆的长轴方向应是垂直方向或船长方向，除通道开口外，上下相邻平台上的孔不应在同一垂直线上。开孔周边应予以加强。

8.9.2　双舷侧的结构布置

8.9.2.1　如整个货舱区域应设双舷侧，内壳结构应尽量向在货舱首尾端尽量延伸并与该处结构有效连接和过渡。内壳的支持构件应设在双舷侧内，不能设置在货舱一侧。

第 9 章　滚装船、客船、客滚船与渡船

第 2 节　船体结构

9.1.1　**适用范围**

9.1.1.1　本章要求适用于下列定义的滚装船、客船、客滚船与渡船：

(1)　滚装船系指一种设计和制造成能装载车辆或使用车辆装卸集装箱或托盘货物的专用船舶；

(2)　客船系指载运乘客超过 12 人的船舶；

(3)　客滚船系指具有滚装处所或特种处所的客船；

(4)　渡船系指为载运乘客（不设卧铺）和/或车辆往返于海峡两岸或岛屿间作定班期营运而专门设计的船舶。载运乘客超过 12 人的渡船为客渡船。

9.2.1　**一般要求**

9.2.1.1　船体结构布置应符合本篇第 1 章第 ~~1~~28 节的有关规定。

新增第 8 节

第 8 节　露天玻璃栏杆

9.8.1　**一般要求**

9.8.1.1　本节的要求仅适用于露天玻璃栏杆。露天玻璃栏杆系指位于露天甲板，以玻璃为面材，配以金属等其他材质结构的护栏。

9.8.1.2　在本篇第 1 章第 1 节 1.1.2.22 所规定的位置 2 以上的露天甲板，可以使用玻璃栏杆代替本篇第 2 章第 19 节所规定的舷墙或栏杆，但不适用于系泊操作、救生艇及救生筏集合站和登乘站等区域。

9.8.1.3　玻璃的制造应符合公认的行业或国家标准。

9.8.1.4　露天玻璃栏杆布置图应提交 CCS 批准、适用载荷和结构强度计算资料应提交 CCS 备查。

9.8.2　**布置要求**

9.8.2.1　露天玻璃栏杆高度应至少离甲板 1m。

9.8.2.2　除排水舷口布置有特别要求外，露天玻璃栏杆上的开口（如两块玻璃板的间隙，或玻璃板与甲板间的间隙等）应不大于 76mm。

9.8.2.3　如形成阱，应设有必要的排水舷口，排水舷口的开孔高度应不大于 230mm。

9.8.3　**设计压力**

9.8.3.1　对于最下层露天甲板，其玻璃栏杆的最小设计压力 P_w 应按如下要求计算：

$$P_w=9.81h，\ kN/m^2$$

式中，h——本篇第 2 章第 17 节 2.17.2 计算压头。

9.8.3.2　对于更高层的露天甲板，其玻璃栏杆的最小设计压力 P_w 应按如下要求计算：

（1） 在结构吃水上方 1.7C 米以下范围内，P_w=5kN/m^2。其中，C 为本篇第 2 章第 2 节 2.2.3.1 所规定系数；

（2） 其他位置，P_w=2.5kN/m^2。

9.8.4 最小尺寸要求

9.8.4.1 对于采用单层钢化安全玻璃的露天玻璃栏杆，应满足以下要求：

（1） 玻璃最小厚度应不小于 6mm；

（2） 应在顶部设置护栏，其最小剖面模数不小于 17cm^3；

（3） 栏杆支柱间距应不超过 1.5m，支柱最小剖面模数不小于 20cm^3。

9.8.4.2 对于采用层压钢化安全玻璃的露天玻璃栏杆，应满足以下要求：

（1） 单层玻璃最小厚度应不小于 4mm；

（2） 应在顶部设置护栏，其最小剖面模数不小于 17cm^3；

（3） 栏杆支柱间距通常应不超过 1.5m，支柱最小剖面模数不小于 20cm^3；

9.8.4.3 上述 9.8.4.1 和 9.8.4.2 所规定的剖面模数要求基于钢质材料计算，若采用其他材质，其刚度与强度应等效于规范要求的钢质构件。

9.8.4.4 玻璃板应至少在两侧采用金属安装框架进行支撑，玻璃板可采用机械方式或粘合剂固定在金属框架上。若金属安装框架采用螺栓与栏杆支柱连接，单侧受力螺栓不应少于 2 个。

9.8.4.5 玻璃板和金属框架之间的重叠部分应不小于 10mm 或 b/75mm，取大者，但不用大于 20mm，b 为玻璃板宽度，mm。

9.8.4.6 在公共区域，应采用层压钢化安全玻璃制作露天玻璃栏杆。

9.8.5 玻璃厚度

9.8.5.1 采用单层钢化安全玻璃时，其厚度应不小于下式计算所得：

$$t = b\sqrt{\beta P} \,/\, 200 \qquad \text{mm}$$

式中：b——玻璃短边长，mm；

P——计算载荷，$P = 0.5Pw$，kN/m^2；

P_w——设计压力，kN/m^2，见本节 9.8.3；

β——系数，按下列各式计算：

1）对于四周均设置牢固支持的玻璃：

$$\beta = 0.54A_R - 0.078A_R^2 - 0.17\text{，对 } A_R \le 3.6$$

$$\beta = 0.7645\text{，对 } A_R > 3.6$$

2）对于仅两侧设置牢固支撑的玻璃：

$$\beta = 0.7645$$

其中：A_R——玻璃长宽比因子，按下式计算：

$$A_R = a / b$$

a——玻璃长边长，mm；

b——玻璃短边长，mm。

9.8.5.2 采用层压钢化安全玻璃时，其等效厚度应不小于 9.8.5.1 计算值所得。等效厚度

按下式计算：

$$t_e = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} t_i^2} \quad \text{mm}$$

式中：n—玻璃层数；

t_i—第 i 层玻璃的厚度。

9.8.6 栏杆支柱

9.8.6.1 对于结构吃水上方 1.7C 米以下范围内的栏杆支柱，其根部剖面模数 W 应不小于按下式计算所得：

$$W = 655\frac{PSl^2}{R_{eH}} \quad \text{cm}^3$$

式中：S——支柱间距，m；

l——支柱高度，m；

P——计算载荷，$P = Pw$，kN/m^2；

P_w——设计压力，kN/m^2，见本节 9.8.3；

R_{eH}——屈服强度，N/mm^2。

9.8.6.2 对于结构吃水上方 1.7C 米以下范围内的栏杆支柱，其根部剪切面积 A 应不小于按下式计算所得：

$$A = 22.7\frac{PSl}{R_{eH}} \quad \text{cm}^2$$

式中：S——支柱间距，m；

l——支柱高度，m；

P——计算载荷，$P = Pw$，kN/m^2；

R_{eH}——屈服强度，N/mm^2。

第 12 章　驳　　船

第 1 节　一般规定

12.1.1　适用范围

12.1.1.1　本章定义的驳船是指无自航能力、依靠他船顶推和拖曳航行的船舶。包括下述类型：

(1)　货舱内装载一般干货的驳船；

(2)　货舱内装载货油的驳船；

(3)　载驳船上的船载驳，且货舱内装载一般干货；

(4)　为在甲板上装载货物而专门设计的箱形驳；

(5)　专用于海洋工程导管架结构的运输，在导管架下水作业时采用尾倾方式将导管架滑入水中的驳船。；

(6)　货舱内装载化学品的驳船；

(7)　货舱内装载液化气体的驳船。

12.1.1.2　对于本章无规定者，货舱内装载散装货油的驳船应根据其结构形式符合本篇第 5 章或第 6 章的有关要求，；货舱内装载化学品的驳船应根据其结构形式符合 CCS《散装运输危险液体化学品船舶构造与设备规范》第 2 篇第 A4 章的有关要求；货舱内装载液化气体的驳船应根据其结构形式符合 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》第 2 篇附录 1 和附录 2 的有关要求；其他驳船应符合本篇第 2 章的有关要求。

12.1.1.3　对于作为海上浮动设施的趸船，其结构可按本章对于箱形驳的要求。

中　国　船　级　社

国内航行海船建造规范

修 改 通 报

2024

第 3 篇　轮　　机

目　录

第 2 章　泵与管系 1
第 6 节　泵、阀与附件 1
第 8 节　布置 1
第 5 章　油船管系 2
第 1 节　一般规定 2
第 12 章　轴系振动与校中 3
第 2 节　扭转振动 3
第 3 节　纵向振动 3

第 2 章　泵与管系

第 6 节　泵、阀与附件

2.6.2　阀和附件

2.6.2.5　阀上应设有显示阀开闭状态的指示装置，但能通过其他方法观察到者除外；对于遥控阀，其遥控位置亦应显示阀的开闭状态。

第 8 节　布　　置

2.8.1　管路布置

2.8.1.3　穿过干舷甲板（客船为舱壁甲板）以下防撞舱壁的管子应装有能在干舷甲板(客船为舱壁甲板)以上操作的螺旋关闭阀(除非主管机关同意使用其他阀)，阀体应安装在首尖舱内的舱壁上，并带有显示阀开闭状态的指示装置遥控阀，且该阀通常应处于关闭状态。当遥控系统失效时，该阀应能自动关闭或在干舷甲板(客船为舱壁甲板)以上手动关闭。

对于货船，上述管子可以装设能在干舷甲板以上操作的由阀座或法兰适当支撑的蝶阀。

上述阀也可安装在应紧靠防撞舱壁的前侧或后侧安装，但在一切营运情况下均应易于接近，且其所在处所不应是装货物处所。该阀可不必设置在干舷甲板以上进行控制的机构。

上述阀应为钢质、青铜或其他认可的塑性材料，普通铸铁或类似材质的阀不能采用。

第 5 章　油船管系

第 1 节　一般规定

5.1.7　货油管电气接地

5.1.7.1　货油舱和管系的防静电接地和跨接，应符合本规范第 4 篇 1.3.4.112~~2~~的要求。

第 12 章　轴系振动与校中

第 2 节　扭转振动

12.2.4　发电机的附加要求

12.2.4.1　在额定工况下，交流发电机转子处的合成振幅应不大于 3.5°(电角)，当通过带整流的变频器可以确保输出稳定的电源给电网正常使用时，电角可不受 3.5° 的限制。

第 3 节　纵向振动

12.3.1　一般要求

12.3.1.2　大型低速二冲程直接推进柴油机推进轴系及涡轮机推进轴系的纵向振动特性，应提交批准。



中　国　船　级　社

国内航行海船建造规范

修 改 通 报

2024

第 4 篇　电气装置

目　录

第 2 章　船上电气装置 1
第 17 节　载运油箱中有自用燃料车辆船舶附加要求 1
第 18 节　载运危险货物船舶附加要求 1

第 2 章　船上电气装置

第 17 节　载运油箱中有自用燃料车辆船舶附加要求

2.17.2　在客船的舱壁甲板以上的特种处所以及客船和货船每小时换气次数不少于 10 次的闭式滚装处所和闭式车辆处所装载车辆

2.17.3　在客船舱壁甲板以下的特种处所以及客船和货船每小时换气次数少于 10 次的闭式滚装处所和闭式车辆处所装载车辆

2.17.4　在客船和货船装货处所内除车辆处所、特种处所和滚装处所以外的货物处所装载车辆

2.17.4.1　~~在客船装货处所内装载车辆时，该处所及其排气通风导管内，应安装合格防爆电气设备。~~在所有船舶上，除车辆处所、特种处所和滚装处所以外的货物处所载运油箱中有自用燃料车辆时，应满足 SOLAS 公约第 II 章第 20.2.1.2 的要求。

~~2.17.4.2　在货船装货处所内装载车辆时，该处所及其排气通风导管内，应安装合格防爆电气设备。若该处所每小时换气次数不少于 10 次，则在距离车辆甲板或装车平台 450mm 的高度之外，如不使用合格防爆电气设备，则应安装外壳防护等级至少为 IP55 的电气设备。~~

2.17.5.1　在该区域中安装的电气设备，除其外壳防护等级应符合本篇表 1.3.2.2 的有关规定。

第 18 节　　载运危险货物船舶附加要求

2.18.3.4　载运 5.1 类硝酸铵（UN1942）、硝酸铵基肥料（UN2067）、9 类硝酸铵基肥料（UN2071）、硝酸铵基肥料和硝酸铵基化肥料 MHB~~（无危害）~~时，除~~本质安全型~~合格防爆电气设备外，危险区域内的所有电气设备应按照 2.18.8.1 的要求关断。

2.18.5.1　载运散装固体危险货物(含能产生爆炸性气体环境的固体危险货物)和 MHB，危险区内安装的合格防爆电气设备应符合表 2.18.5.1 的最低要求。

在危险区内使用的电气设备特性(举例)　　表 2.18.5.1

危险货物	IMO 分类	主要危险①	粉尘防爆	气体防爆	
			外壳防护等级	防爆类别	温度组别
硅铁铝粉末 UN1395	4.3	H_2	—	IIC	T2
无涂层硅铝粉 UN1398	4.3	H_2	—	IIC	T2
铝熔炼副产品或铝再熔炼副产品 UN3170	4.3	H_2	—	IIC	T2
铝熔炼/再熔副产品，经处理的	MHB(WF and/or WT and/or CR)	H_2	—	IIC	T1
硝酸铵 UN1942	5.1	~~易燃~~	—	~~本安型设~~	T4

危 险 货 物	IMO 分类	主要危险[①]	粉 尘 防 爆	气 体 防 爆	
			外壳防护等级	防爆类别	温度组别
				备二	
硝酸铵基肥料 UN2067	5.1	易燃二	—	本安型设备二	T4
硝酸铵基肥料 UN2071	9	二	—	本安型设备二	T4
硝酸铵基肥料（无危害）	—	二	—	本安型设备二	T4
硝酸铵基肥料 MHB	MHB(OH)	二	二	本安型设备二	T4
褐煤砖	MHB(CB and/or SH)	粉尘、甲烷	IP55	IIA	T4
煤	MHB(CB and/or SH and/or WF and/or CR)	粉尘、甲烷	IP55	IIA	T4
直接还原铁（A）	MHB(SH and/or WF)	H_2	—	IIC	T2
直接还原铁（B）	MHB(SH and/or WF)	H_2	—	IIC	T2
直接还原铁（C）	MHB(SH and/or WF)	H_2	—	IIC	T2
磷铁合金（包括砖型块）	MHB(WF and/or WT)	H_2	—	IIC	T1
硅铁，硅含量 25%至 30%，或硅含量 90%或以上（包括砖形块）	MHB(WF and/or WT)	H_2	—	IIC	T1
硅铁 UN1408，硅含量 30%或以上，但小于 90%（包括砖形块）	4.3	H_2	—	IIC	T1
废氧化铁或废海绵铁 UN1376	4.2	粉尘	IP55	IIA	T2
含植物油种子饼 UN1386	4.2	已烷	—	IIA	T3
种子饼 UN2217	4.2	已烷	—	IIA	T3
种子饼和其他经加工含油植物残渣	MHB (SH)	粉尘	IP55	IIA	T3
硅锰合金（低碳）	MHB(WF and/or WT and/or TX)	H_2	—	IIC	T1
从纸和塑料回收的固态燃料	MHB (SH)	易燃	IP55	—	T3
甘蔗生物质颗粒	MHB(CB and/or WF and/or WT and/or OH)	易燃、粉尘	IP55	IIA	T3
硫磺 UN1350（压块及粗粒）	4.1	易燃、粉尘	IP55	—	T4
锌灰 UN1435	4.3	H_2	—	IIC	T2
烤木	MHB(CB and/or SH	易燃、粉尘	IP55	—	T3

危 险 货 物	IMO 分类	主要危险①	粉 尘 防 爆	气 体 防 爆	
			外壳防护等级	防爆类别	温度组别
	and/or CR)				
木球团，含有添加剂和/或粘合剂	MHB(WF)	粉尘	IP55	—	T3
木球团，不含有添加剂和/或粘合剂	MHB(OH)	粉尘	IP55	—	T3

注：① 这里的“危险”一词专指因危险货物和电气设备而产生的爆炸危险。