

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD15-2019



中国船级社

工程临界评定技术服务指南

2019

生效日期：2019年9月1日

北京

目 录

第 1 章 通则	1
第 1 节 一般要求	1
第 2 节 接受标准	1
第 3 节 定义和符号	1
第 2 章 缺陷的表征	4
第 1 节 缺陷类型	4
第 2 节 缺陷表征尺寸定义	4
第 3 节 缺陷的检测与合并	5
第 3 章 海洋工程结构物评定应力	7
第 1 节 应力线性化	7
第 2 节 主应力	8
第 3 节 二次应力	9
第 4 章 材料性能	11
第 1 节 断裂韧性	11
第 2 节 拉伸特性	11
第 5 章 断裂失效评定	13
第 1 节 评定流程	13
第 2 节 失效评定图	13
第 3 节 断裂比	15
第 4 节 载荷比	15
第 6 章 疲劳失效评定	16
第 1 节 评定方法	16
第 2 节 评定流程	16
第 3 节 疲劳扩展速率系数	16
附录 A 评定参量确定	18
A.1 应力强度因子计算	18
A.2 参考应力计算	22

第 1 章 通则

第 1 节 一般要求

1.1.1 本指南是中国船级社（以下简称 CCS）为钢质结构中缺陷构件提供工程临界评定技术服务的推荐作法。

1.1.2 本指南的使用应以相应设施规范、标准的要求为前提，包括海上固定平台、移动平台和海底管道等。

1.1.3 本指南提供了海上固定平台、移动平台和海底管道评定载荷和工况的建议，其他设施应依据其设施类型及作业环境，确定相应的评定载荷和工况。

1.1.4 本指南可作为 CCS 对外提供工程临界评定技术服务的依据。

1.1.5 特殊类型和采用新颖结构型式或材料的工程临界评定应另行考虑，并经 CCS 同意。

第 2 节 接受标准

1.2.1 本指南接受的主要标准如下：

(1) BS7910 《Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures》

(2) API RP 2A WSD 《Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design》

(3) ISO 19902 《Petroleum and natural gas industries -- Fixed steel offshore structures》

第 3 节 定义和符号

1.3.1 定义

(1) 工程临界评定

工程临界评定 (Engineering Critical Assessment, 简称 ECA)，基于“合于使用”的原则，对有焊接缺陷的结构进行断裂和疲劳失效评定。

(2) 断裂失效评定

采用断裂力学的方法，评价含缺陷海洋工程结构物能否排除断裂失效的安全评定。

(3) 疲劳失效评定

评价含缺陷海洋工程结构物在预期疲劳载荷的作用下，在所要求的继续使用期内能否排除疲劳失效的安全评定。

(4) 帕里斯定律

帕里斯定律 (Paris law)，通过试验确定的裂纹扩展速率与应力强度因子范围的关系。

(5) 失效评定图方法

基于失效评定图 (Failure Assessment Diagram, 简称 FAD) 的断裂评定方法, 通过判别评定点与失效曲线的位置评价结构安全性。

(6) 裂纹驱动力方法

基于裂纹驱动力 (Crack Driving Force, 简称 CDF) 的断裂评定方法, 分别确定裂纹尖端载荷与材料断裂能力判别材料是否具有抵抗裂纹驱动力的能力。

1.3.2 符号

本指南所用的符号含义如下:

A	疲劳缺陷增长关系常数
a	表征裂纹尺寸, 贯穿裂纹的半长度, 表面裂纹深度, 埋藏裂纹半深度, mm
B	缺陷所在截面厚度, mm
c	表面或埋藏缺陷的半长度, mm
E	评定温度下的材料弹性模量, MPa
J_{mat}	J 积分方法测定材料断裂韧度, N/mm
K_{mat}	应力强度因子方法测定材料断裂韧度, $\text{N/mm}^{3/2}$
K_r	断裂比, 施加载荷作用下的应力强度因子与以应力强度因子表示的材料断裂韧度的比值
L_r	载荷比, 施加载荷与屈服强度的比值
m	疲劳缺陷增长关系常数
P_b	主弯曲应力, MPa
P_m	主膜应力, MPa
Q_b	二次弯曲应力, MPa
Q_m	二次膜应力, MPa
ΔK	应力强度因子变化幅度, $\text{N/mm}^{3/2}$
ΔK_0	应力强度因子变化范围门槛值, $\text{N/mm}^{3/2}$
ΔQ_b	二次弯曲应力幅值, MPa
ΔQ_m	二次膜应力幅值, MPa

δ_{mat}	CTOD 方法测定材料断裂韧度, mm
ν	泊松比
σ_U	抗拉强度, MPa
σ_Y	屈服强度或 0.2% 规定非比例延伸强度, MPa

第 2 章 缺陷的表征

第 1 节 缺陷类型

2.1.1 海洋工程结构物中常见缺陷通常包括平面缺陷（裂纹、未熔合、未焊透等）及体积缺陷（凹坑、气孔、夹渣等）。

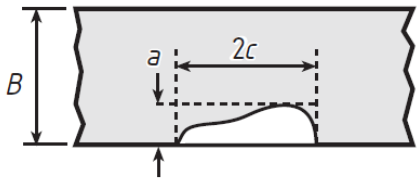
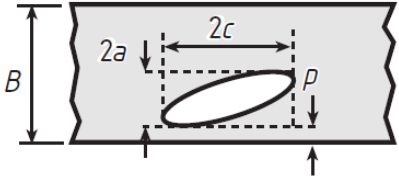
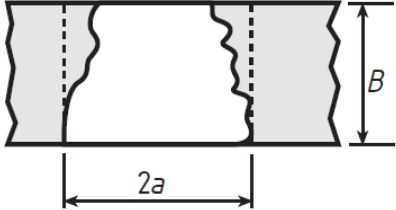
2.1.2 本指南方法的评定参数针对裂纹缺陷，对于其他型式的缺陷，可采用适当的方法等效为裂纹进行评定。裂纹缺陷根据位置可分为：表面缺陷、埋藏缺陷和贯穿缺陷。

第 2 节 缺陷表征尺寸定义

2.2.1 评定时，一般对实测的缺陷进行规则化表征处理。缺陷表征尺寸应由缺陷外接矩形的长度和高度来确定。

2.2.2 表面缺陷、埋藏缺陷、贯穿缺陷的表征尺寸定义如表 2.2.2 所示。

表 2.2.2 缺陷表征尺寸定义

缺陷位置	高度	长度	图示
表面缺陷	a	$2c$	
埋藏缺陷	$2a$	$2c$	
贯穿缺陷	$2a$	-	

第 3 节 缺陷的检测与合并

2.3.1 缺陷检测

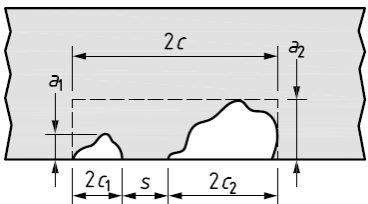
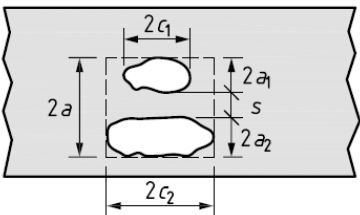
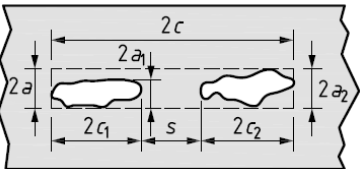
应根据评定要求，对缺陷进行全面检测，确保检测结果准确、真实、可靠。如适用，应考虑以下因素对缺陷的影响：

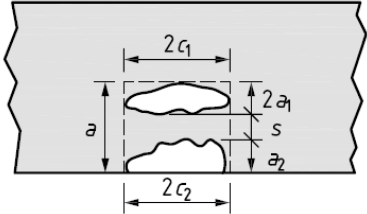
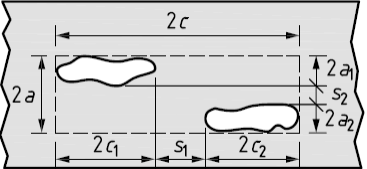
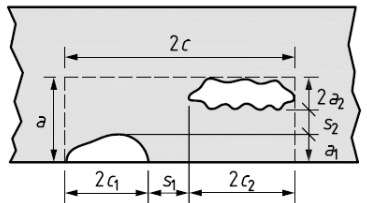
- (1) 地形、地貌的变化，如悬空、淘蚀；
- (2) 结构自身的变化，如减薄、屈曲、变形；
- (3) 超出设计条件的极端天气的出现；
- (4) 设计变更和现场改造的影响。

2.3.2 缺陷合并

当两个缺陷或多个缺陷相邻时，应考虑缺陷之间的相互影响。缺陷合并应按表 2.3.2 进行：

表 2.3.2 缺陷合并准则

缺陷类型	合并原则	合并后等效尺寸
(1) 表面缺陷 	$s \leq 2c_1$, 当 a_1 / c_1 或 $a_2 / c_2 > 1$ $s \leq \max\{0.5a_1, 0.5a_2\}$, 当 a_1 / c_1 及 或 $a_2 / c_2 < 1 (c_1 < c_2)$	$a = \max\{a_1, a_2\}$ $2c = 2c_1 + 2c_2 + s$
(2) 埋藏缺陷 (厚度方向) 	$s \leq a_1 + a_2$	$2a = 2a_1 + 2a_2 + s$ $2c = \max\{2c_1, 2c_2\}$
(3) 埋藏缺陷 (长度方向) 	$s \leq 2c_1$, 当 a_1 / c_1 或 $a_2 / c_2 > 1$ $s \leq \max\{a_1, a_2\}$, 当 a_1 / c_1 及 或 $a_2 / c_2 < 1$	$2a = \max\{2a_1, 2a_2\}$ $2c = 2c_1 + 2c_2 + s$

	$(c_1 < c_2)$	
<p>(4) 表面与埋藏缺陷 (厚度方向)</p> 	$s \leq a_1 + a_2$	$a = 2a_1 + a_2 + s$ $2c = \max\{2c_1, 2c_2\}$
<p>(5) 埋藏缺陷 (厚度与长度方向)</p> 	$s_1 \leq \max\{a_1, a_2\}$, 当 a_1 / c_1 及 $a_2 / c_2 < 1$ $s_1 < 2c_1$, 当 a_1 / c_1 或 $a_2 / c_2 > 1$ 及 $s_2 \leq a_1 + a_2$ $(c_1 < c_2)$	$2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$ $2a = 2a_1 + 2a_2 + s_2$
<p>(6) 表面与埋藏缺陷 (厚度与长度方向)</p> 	$s_1 \leq 2c_1$, 当 a_1 / c_1 或 $a_2 / c_2 > 1$ $s_1 \leq \max\{a_1, a_2\}$, 当 a_1 / c_1 及 $a_2 / c_2 < 1$ 及 $s_2 \leq a_1 + a_2$ $(c_1 < c_2)$	$a = a_1 + 2a_2 + s_2$ $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$

第 3 章 海洋工程结构物评定应力

第 1 节 应力线性化

3.1.1 海洋工程结构物评定应力包括主应力及二次应力。对于沿厚度方向分布的应力，应满足在整个缺陷长（或深）度范围内各处的线性化应力值均不低于实际应力值的原则。

3.1.2 断裂评定可将应力按下式分解薄膜应力及弯曲应力分量：

$$P_m, Q_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (1)$$

$$P_b, Q_b = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (2)$$

3.1.3 疲劳评定将应力可按下式分解薄膜应力及弯曲应力分量：

$$\Delta\sigma_m = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2}{2} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_b = \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2}{2} \quad (4)$$

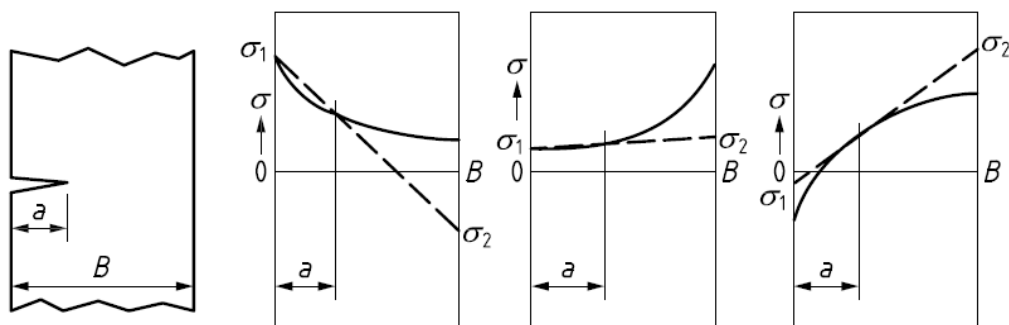


图 3.1.3 (1) 断裂评定表面缺陷所在区域应力线性化图例

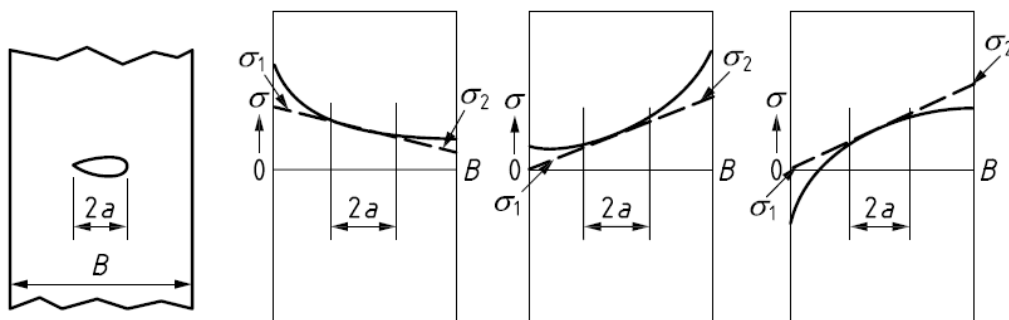


图 3.1.3 (2) 断裂评定埋藏缺陷所在区域应力线性化图例

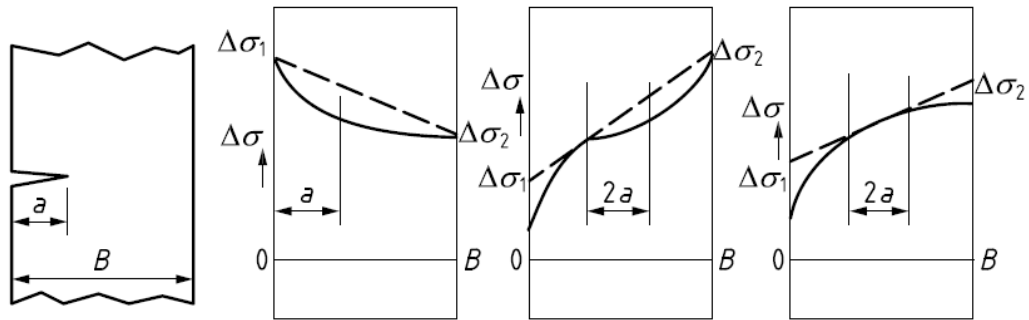


图 3.1.3 (3) 疲劳评定表面缺陷所在区域应力线性化图例

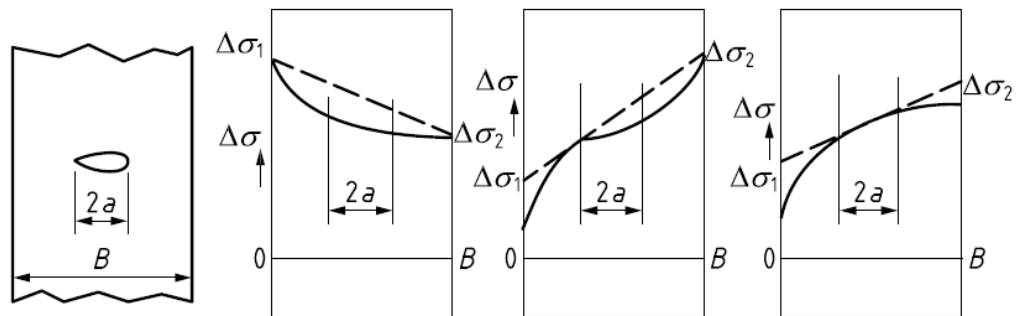


图 3.1.3 (4) 疲劳评定埋藏缺陷所在区域应力线性化图例

第 2 节 主应力

3.2.1 计算主应力时应假设结构中不包括缺陷。

3.2.2 固定平台、移动平台及海底管道主应力计算工况，应分别满足 3.2.3~3.2.5 的要求。

3.2.3 固定平台载荷

固定平台应考虑评定周期内由于平台建造、安装及服役可能承受的全部载荷，主要包括：

(1) 固定载荷，包括平台结构的重量和在某种作业形式下不变化的任何永久设备和附属结构的重量；

(2) 活载荷，在平台服役期间作用在其上面的发生变化的载荷；

(3) 环境载荷，包括风、流、波浪、地震、雪、冰和土壤移动等自然现象作用在平台上的载荷。环境载荷还包括由于波浪和潮汐引起水位变化而产生的作用在构件上的静水压力和浮力的变化。评定时应考虑平台设计寿命、评定周期选择适当的重现期。评定应按引起评定期内极端载荷的风、浪和流等因素的最不利组合选择工况组合；

(4) 安装载荷（如适用），考虑由装船、运输和安装所产生的载荷；

(5) 动力载荷（如适用），考虑周期性激励的响应，或冲击的反作用而作用在平台上的载荷。

3.2.4 移动平台载荷

移动平台应根据平台实际载荷（重力及功能载荷和有关的环境载荷）情况研究平台在迁移、作业、自存等设计工况下的运动响应和载荷。业主/设计者应规定作为设计基础的各设计工况和相应的环境条件：

(1) 环境载荷，系指直接或间接由环境作用引起的载荷，包括由环境载荷引起的所有外力，如系泊力、运动惯性力、液舱晃动力等。环境载荷一般由风载荷、波浪载荷、海流载荷组成。环境载荷还可采用其他公认的方法进行计算，必要时应通过数值模拟计算或物理模型试验来确定；

(2) 重力及功能载荷，系指在静水条件下由平台重量、使用及作业引起的载荷。

3.2.5 海底管道载荷

海底管道工程临界评定应考虑在评定周期内由于安装及服役可能承受的全部载荷，主要包括：

(1) 功能载荷，管道因自存和使用产生的载荷，包括自重、压力、静水压力及安装载荷等；

(2) 环境载荷，包括风载荷、波浪及流载荷等；

(3) 意外载荷，非正常工况下产生的载荷，典型意外工况包括极端波浪及流载荷、落物、船舶碰撞、爆炸等。

第 3 节 二次应力

3.3.1 二次应力为结构内自平衡应力，主要包括焊接残余应力及温度应力。

3.3.2 焊接残余应力

3.3.2.1 焊态结构

(1) 对于具有位于平行于焊缝方向平面内缺陷的焊接结构，残余应力可按焊材或母材室温下屈服强度之小者进行评定；

(2) 对于具有位于垂直于焊缝方向平面内缺陷的焊接结构，残余应力可按缺陷所处位置材料的室温下屈服强度进行评定，若缺陷部分位于焊缝，部分位于母材，则按焊材或母材室温下屈服强度之大者进行评定。

3.3.2.2 焊后热处理结构

(1) 焊后热处理应符合 CCS《材料与焊接规范》要求；

(2) 对于经过焊后热处理的结构，残余应力通常不能完全消除。焊后热处理后残余应力残留的程度应基于对焊缝及母材试件进行实测确定；

(3) 当实测数据不可用时，经炉内整体消除残余应力退火热处理的焊接结构残余应力可按如下规则确定：

1) 焊后热处理温度为 580℃ 至 620℃ 的焊接结构：

对于平行焊缝方向平面内的缺陷（应力垂直于焊缝），残余应力可按焊材或母材屈服强度之小者的 20% 进行评定；

对于垂直焊缝方向平面内的缺陷（应力平行于焊缝），残余应力可按缺陷所处位置材料的屈服强度的 30% 进行评定；若缺陷部分位于焊缝、部分位于母材，则按焊材或母材屈服强度之大者的 30% 进行评定。

2) 焊后热处理温度为 550℃ 至 580℃ 的焊接结构：

对于平行焊缝方向平面内的缺陷（应力垂直于焊缝），残余应力可按焊材或母材屈服强度之小者的 20% 进行评定；

对于垂直焊缝方向平面内的缺陷（应力平行于焊缝），残余应力可按缺陷所处位置材料的屈服强度的 40% 进行评定；若缺陷部分位于焊缝、部分位于母材，则按焊材或母材屈服强度之大者的 40% 进行评定。

(4) 对于经局部消除应力退火热处理或现场整体热处理的焊接结构，焊接残余应力可能高于炉内热处理残余应力的推荐值，可实测确定或保守考虑。

3.3.2.3 对焊接修补区、高拘束度焊缝区或焊接残余应力分布情况不明区域，残余应力可按焊材或母材屈服强度之小者进行评定。

第 4 章 材料性能

第 1 节 断裂韧性

4.1.1 材料断裂韧性应按照 CCS 《材料与焊接规范》要求测定。

4.1.2 断裂韧性推荐使用直接试验测定的应力强度因子 K_{mat} 、裂纹尖端张开位移(CTOD) δ_{mat} 或 J 积分 J_{mat} ，若试验数据不可用，可由夏比冲击功推导。

4.1.3 应力强度因子 K_{mat} 、裂纹尖端张开位移 δ_{mat} 和 J 积分 J_{mat} 可依下式转换：

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{EJ_{mat}}{1-\nu^2}} \quad (5)$$

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{m\sigma_Y\delta_{mat}E}{1-\nu^2}} \quad (6)$$

其中，

E 为弹性模量，

σ_Y 为材料屈服强度，

ν 为泊松比。

当 $0.3 < \sigma_Y / \sigma_U < 0.98$ ， m 由下式计算，否则 m 取 1.5：

$$m = 1.517 \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_U} \right)^{-0.3188} \quad (7)$$

其中，

σ_U 为材料抗拉强度。

第 2 节 拉伸特性

4.2.1 断裂失效评定需要材料的屈服强度、抗拉强度、弹性模量及泊松比等参数。

4.2.2 各参数应由适当温度下的力学性能试验测定，试验试件的数量、尺寸及截取位置应符合 CCS 《材料与焊接规范》要求。

4.2.3 评定中钢材各温度下弹性模量可参照表 4.2.3 选取，泊松比可取 0.3。

表 4.2.3 钢材弹性模量

温度 °C	弹性模量 MPa
-200	219 000
-150	215 000
-100	212 000
-75	210 000
-50	209 000
0	206 000
25	205 000
50	203 000
100	201 000
150	198 000
200	195 000
250	191 000
300	187 000
350	182 000
400	177 000
450	171 000
500	164 000
550	156 000
600	146 000
650	135 000

第 5 章 断裂失效评定

第 1 节 评定流程

5.1.1 数据收集

评定初期应收集评定所需数据，至少应包括：平台设计资料、缺陷检测报告、评定温度及评定周期内的载荷等。其中平台设计资料应包括：

- (1) 原始设计资料，一般应包括设计规格书、设计图纸及设计报告等；
- (2) 完工资料，一般应包括完工图纸、断裂韧性试验报告、钢材材质证书等；
- (3) 历次改造记录，一般应包括改造图纸及评估报告等。

5.1.2 应力确定

5.1.2.1 应用成熟的结构强度分析软件建立分析模型，结构模型应为不包括缺陷的完整结构。

5.1.2.2 根据评定结构类型，在模型中施加评定载荷，该载荷应覆盖在评定周期内可能出现的关键工况。

5.1.2.3 分析缺陷位置结构强度结果，确定控制工况，计算缺陷位置的膜应力及弯曲应力。

5.1.2.4 参照结构建造工艺，确定缺陷位置结构焊接残余应力。

5.1.2.5 确定应力集中系数，结构强度模型中若未模拟焊缝，应考虑焊缝引起的局部应力集中对断裂比计算结果的影响。

5.1.3 建立输入信息参数表，至少应包括：

- (1) 缺陷所在位置结构几何尺寸；
- (2) 缺陷类型、长度、高度；
- (3) 材料断裂韧性参数、屈服强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比；
- (4) 主应力及二次应力。

5.1.4 绘制失效评定曲线，计算断裂比及载荷比，进行结构断裂失效评定。

第 2 节 失效评定图

5.2.1 根据材料参数绘制失效评定曲线，评定曲线方程参见 5.2.2 节。对任一工况应分别计算断裂比 K_r 及载荷比 L_r ，参见 5.3.1、5.4.1 节。在失效评定图中绘制评定点，判别是否在可接受区，如图 5.2.1 所示。对评定点在不可接受区内的工况，可使用更详尽的评定数据重新评定。

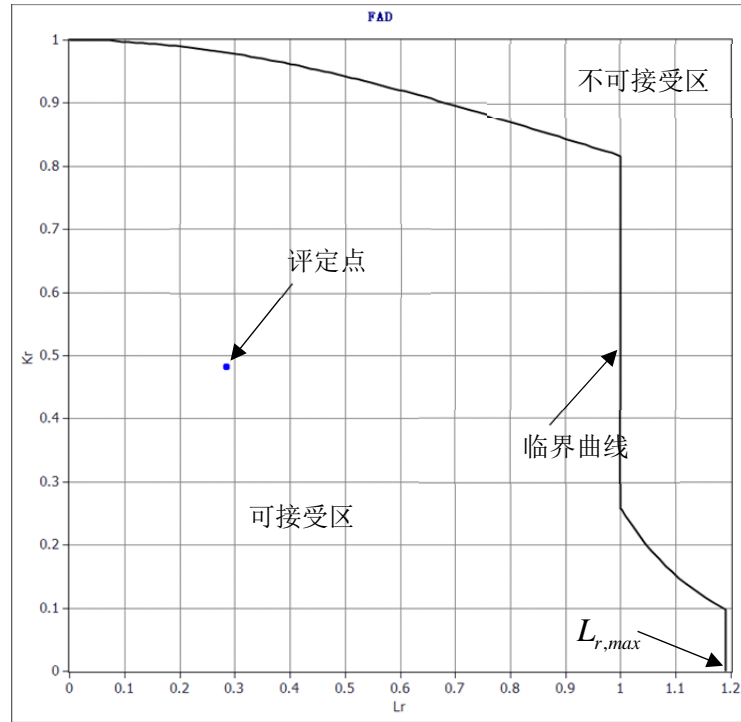


图 5.2.1 失效评定图

5.2.2 失效评定曲线

海洋工程结构物工程临界评定中评定曲线一般按照下式方程确定，该方程不需要由试验测定详细的应力-应变关系曲线：

当 $L_r \leq 1$ 时，

$$f(L_r) = \left(1 + \frac{1}{2}L_r^2\right)^{-1/2} [0.3 + 0.7\exp(-\mu L_r^6)] \quad (8)$$

当 $1 < L_r < L_{r,max}$ 时，

$$f(L_r) = f(1)L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (9)$$

当 $L_r \geq L_{r,max}$ 时，

$$f(L_r) = 0 \quad (10)$$

L_r 的截断值 $L_{r,max}$ 依下式确定：

$$L_{r,max} = \frac{\sigma_Y + \sigma_u}{2\sigma_Y} \quad (11)$$

其中，

$$\mu = \min\left(0.001 \frac{E}{\sigma_Y}, 0.6\right)$$

$$N = 0.3 \left(1 - \frac{\sigma_Y}{\sigma_u}\right)$$

第 3 节 断裂比

5.3.1 断裂比 K_r 按照下式计算：

$$K_r = \frac{K_I^P + K_I^S}{K_{mat}} + \rho \quad (12)$$

其中，

K_I^P 为仅有主应力作用时的应力强度因子，参见 A.1 节；

K_I^S 为仅有二次应力作用时的应力强度因子，参见 A.1 节；

ρ 为主应力与二次应力对应力强度因子的相互作用，参见 A.1 节。

第 4 节 载荷比

5.4.1 载荷比 L_r 按照下式计算：

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \quad (13)$$

其中，

σ_{ref} 为参考应力，参见 A.2 节；

第 6 章 疲劳失效评定

第 1 节 评定方法

6.1.1 平面缺陷的疲劳评定，首先依据疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与裂纹尖端应力强度因子变化幅度 ΔK ，确定在规定的循环周期内疲劳裂纹的扩展量和最终尺寸；然后根据所给出的判别条件和方法，来判断该平面缺陷是否会发生疲劳断裂。

6.1.2 疲劳裂纹扩展速率与裂纹尖端应力强度因子变化幅度的关系可按照帕里斯定律确定：

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (14)$$

其中，

A 与 m 为与材料和施加载荷相关的系数，取值参考 6.3.1。

第 2 节 评定流程

6.2.1 疲劳缺陷评定按下列步骤进行：

- (1) 确定缺陷表征；
- (2) 确定应力变化范围；
- (3) 确定材料参数；
- (4) 计算疲劳裂纹的 ΔK ；
- (5) 计算疲劳裂纹扩展量；
- (6) 安全性评价。

第 3 节 疲劳扩展速率系数

6.3.1 对于屈服强度或 0.2% 规定非比例延伸强度不超过 600MPa 的钢材，疲劳扩展速率系数 A 与 m 的推荐值如表 6.3.1 及图 6.3.1 所示：

表 6.3.1 疲劳扩展速率系数 A 与 m 的推荐值

环境	阶段 A		阶段 B		两阶段转换点 ΔK ， N/mm ^{3/2}
	A	m	A	m	
空气中 ¹⁾	2.10×10^{-17}	5.10	1.29×10^{-12}	2.88	144
无防腐	1.72×10^{-13}	3.42	7.48×10^{-7}	1.11	748

海洋环境 ²⁾	阴极保护 (-850mV)	2.10×10^{-17}	5.10	2.02×10^{-11}	2.67	290
	阴极保护 (-1100mV)	2.10×10^{-17}	5.10	1.02×10^{-7}	1.40	415
1) 空气温度不超过 100℃； 2) 海水温度不超过 20℃，超过此温度需修正扩展速率系数。						

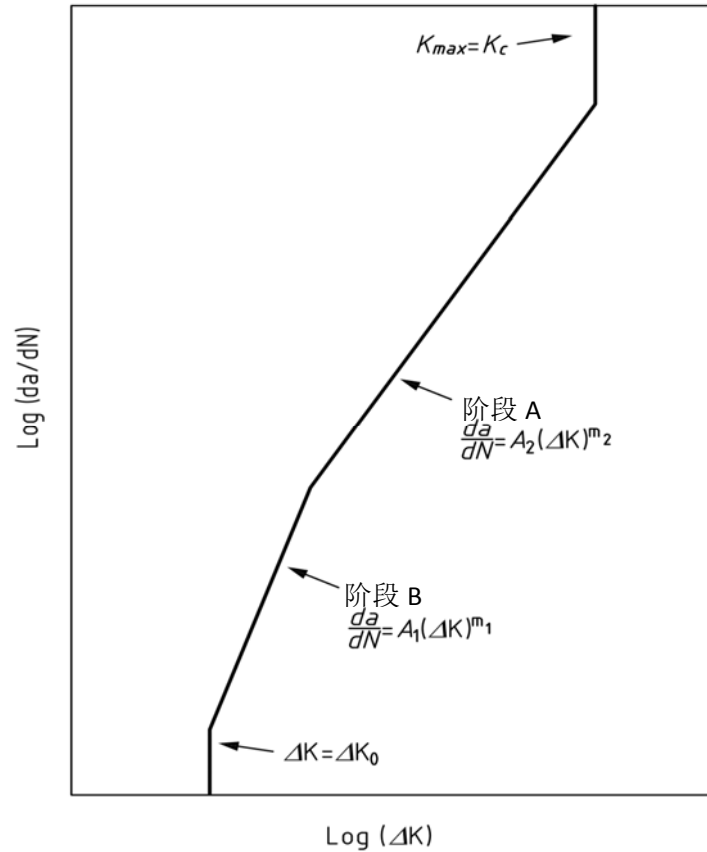


图 6.3.1 裂纹增长关系

6.3.2 疲劳裂纹扩展的应力强度因子变化范围阈值 ΔK_0 的推荐值如表 6.3.2 所示：

表 6.3.2 应力强度因子变化范围阈值 ΔK_0 的推荐值

环境	ΔK_0 , $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$
空气中，空气温度不超过 100℃	63
海洋环境，海水温度不超过 20℃，有阴极保护	63
海洋环境，海水温度不超过 20℃，无防腐	0

附录 A 评定参量确定

A.1 应力强度因子计算

A.1.1 概述

应力强度因子根据下式计算：

$$K_I = (Y\sigma)\sqrt{\pi a} \quad (15)$$

其中， $(Y\sigma)$ 由主应力对应的 $(Y\sigma)_p$ 和二次应力对应的 $(Y\sigma)_s$ 组成， $(Y\sigma)_p$ 与 $(Y\sigma)_s$ 分别由下式确定：

$$(Y\sigma)_p = Mf_w \{k_{tm} M_{km} M_m P_m + k_{tb} M_{kb} M_b [P_b + (k_m - 1)P_m]\} \quad (16)$$

$$(Y\sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b \quad (17)$$

A.1.2 对于表面裂纹， M 及 f_w 由下式确定：

$$M = 1 \quad (18)$$

$$f_w = \left\{ \sec \left[\left(\frac{\pi c}{W} \right) \left(\frac{a}{B} \right)^{0.5} \right] \right\}^{0.5} \quad (19)$$

A.1.3 对于表面裂纹， M_m 由下式确定：

$$M_m = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{B} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right] \frac{gf_\theta}{\Phi} \quad (20)$$

其中，

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right) \quad (0 < a/2c \leq 0.5);$$

$$M_1 = \left(\frac{c}{a} \right)^{0.5} \left[1 + 0.04 \left(\frac{c}{a} \right) \right] \quad (0.5 < a/2c \leq 1.0);$$

$$M_2 = \left[\frac{0.89}{0.2 + \left(\frac{a}{c}\right)} \right] - 0.54 \quad (0 < a/2c \leq 0.5);$$

$$M_2 = \left(\frac{c}{a}\right)^4 \quad (0.5 < a/2c \leq 1.0);$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \left(\frac{a}{c}\right)} + 14 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24} \quad (0 < a/2c \leq 0.5);$$

$$M_3 = -0.11 \left(\frac{c}{a}\right)^4 \quad (0.5 < a/2c \leq 1.0);$$

$$g = 1 + \left[0.1 + 0.35 \left(\frac{a}{B}\right)^2 \right] (1 - \sin \theta)^2 \quad (0 < a/2c \leq 0.5);$$

$$g = 1 + \left[0.1 + 0.35 \left(\frac{c}{a}\right) \left(\frac{a}{B}\right)^2 \right] (1 - \sin \theta)^2 \quad (0.5 < a/2c \leq 1.0);$$

$$f_\theta = \left[\left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \right]^{0.25} \quad (0 < a/2c \leq 0.5);$$

$$f_\theta = \left[\left(\frac{c}{a}\right)^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right]^{0.25} \quad (0.5 < a/2c \leq 1.0);$$

$$\Phi = \left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \right]^{0.5} \quad (0 < a/2c \leq 0.5);$$

$$\Phi = \left[1 + 1.464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65} \right]^{0.5} \quad (0.5 < a/2c \leq 1.0)。$$

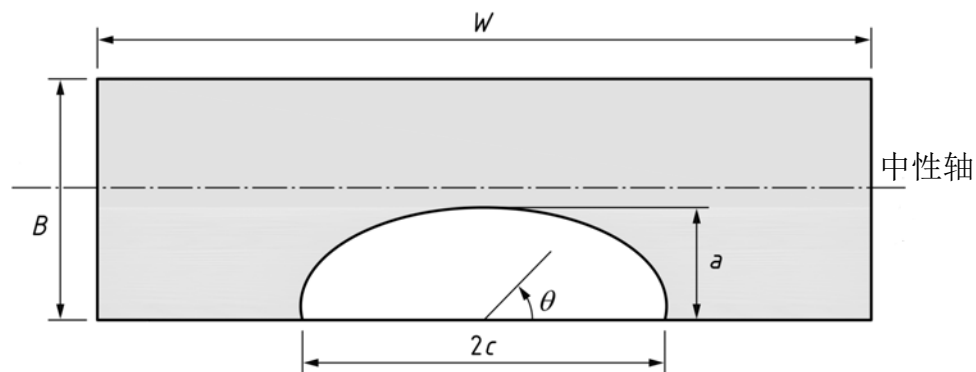


图 A.1.3 表面裂纹参数示意

A.1.4 由焊接引起的应力集中对应力强度因子的修正

对于焊接结构，其焊趾位置存在局部应力集中。当裂纹出现在此区域时，需引入修正系数 M_k 修正应力集中对应力强度因子的影响。

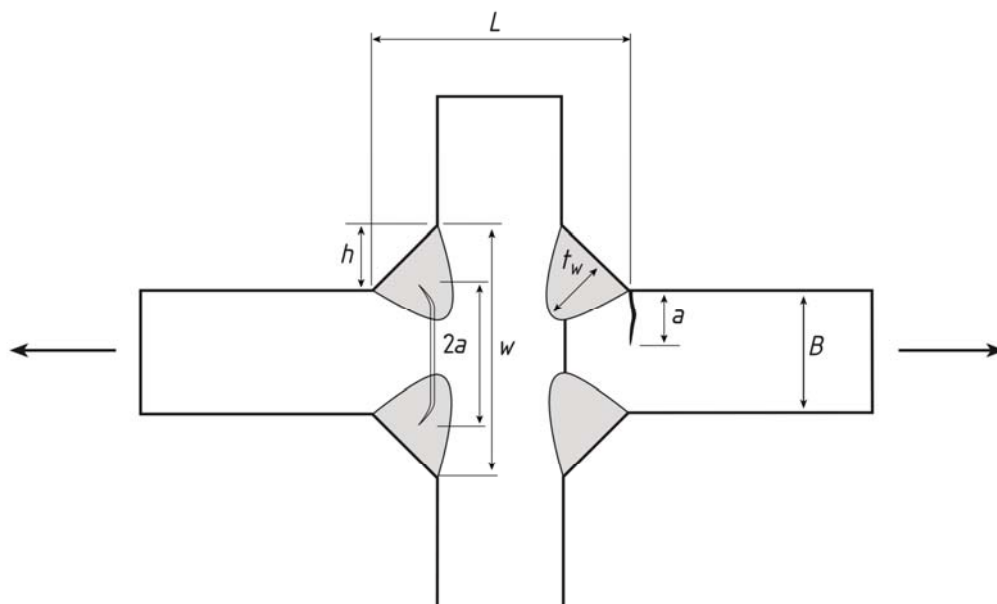


图 A.1.4 焊趾位置裂纹参数

修正因子 M_k 由下式确定：

$$M_k = \nu(z/B)^w \quad (21)$$

当计算得到 M_k 小于 1 时，取 $M_k = 1$ 。式中参数由下表确定：

表 A.1.4 疲劳扩展速率系数 A 与 m 的推荐值

	L/B	z/B	ν	w
轴向载荷	≤ 2	$\leq 0.05(L/B)^{0.55}$	$0.51(L/B)^{0.27}$	-0.31
		$> 0.05(L/B)^{0.55}$	0.83	$0.15(L/B)^{0.46}$
	> 2	≤ 0.073	0.615	-0.31
		> 0.073	0.83	-0.20
弯曲载荷	≤ 1	$\leq 0.03(L/B)^{0.55}$	$0.45(L/B)^{0.21}$	-0.31

		$> 0.03(L/B)^{0.55}$	0.68	$0.19(L/B)^{0.21}$
	> 1	≤ 0.03	0.45	-0.31
		> 0.03	0.68	-0.19

A.1.5 由结构不连续引起的应力集中对应力强度因子的修正

主应力及温度应力在结构不连续位置会造成局部应力集中，其他二次应力通常不受结构不连续影响。当裂纹位于由结构不连续引起的应力集中区域时，应考虑应力集中对应力强度因子的修正。引入参数 k_m 修正错边对应力强度因子的影响，引入 k_t 修正结构几何不连续对应力强度因子的影响。修正系数通常可通过直接计算求得，也可采用其他公认的方法进行计算。

A.1.6 主应力与二次应力计算应力强度因子的相互作用

在计算应力强度因子时，主应力与二次应力对应力强度因子的贡献相互影响，计算中引入参数 ρ 考虑相互影响的作用。

先计算参量 ρ_1 ：

当 $K_I^S \left(\frac{L_r}{K_I^P} \right) \leq 5.2$ 时，

$$\rho_1 = 0.1 \left[K_I^S \left(\frac{L_r}{K_I^P} \right) \right]^{0.714} - 0.007 \left[K_I^S \left(\frac{L_r}{K_I^P} \right) \right]^2 + 0.00003 \left[K_I^S \left(\frac{L_r}{K_I^P} \right) \right]^5 \quad (22)$$

当 $K_I^S \left(\frac{L_r}{K_I^P} \right) > 5.2$ 时，

$$\rho_1 = 0.25 \quad (23)$$

根据下式计算 ρ ：

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_1 \quad (L_r \leq 0.8) \\ \rho &= 4\rho_1(1.05 - L_r) \quad (0.8 < L_r < 1.05) \\ \rho &= 0 \quad (L_r \geq 1.05) \end{aligned} \quad (24)$$

当计算求得 $K_I^S < 0$ 时，则 K_I^S 与 ρ 均取零。

A.1.7 疲劳评定应力强度因子变化范围 ΔK 的计算规则

附录 A.1.1~A.1.6 中所列 K_I 计算方法，均适用于疲劳评定时应力强度因子变化范围 ΔK 的计算，计算时应按照以下规则进行参数替代，则所得 K_I 即为 ΔK ：

(1) 公式中 σ 应以 $\Delta\sigma$ 替代；

(2) 公式中 P_m 、 P_b 、 Q_m 及 Q_b 应分别以 ΔP_m 、 ΔP_b 、 ΔQ_m 及 ΔQ_b 替代。

A.1.8 对本指南未给出的其他类型缺陷的应力强度因子计算，应采用其他公认的方法与参数进行计算。

A.2 参考应力计算

A.2.1 薄壁管表面裂纹参考应力按下式计算：

$$\sigma_{ref} = \frac{P_m[\pi(1-a/B) + 2(a/B)\sin(c/r_i)]}{(1-a/B)[\pi - (c/r_i)(a/B)]} + \frac{2P_b}{3(1-a'')^2} \quad (25)$$

其中，

$$\text{当 } \pi r_i \geq c + B, \quad a'' = \frac{a/B}{1+B/c};$$

$$\text{当 } \pi r_i < c + B, \quad a'' = (a/B)(c/\pi r_i)。$$

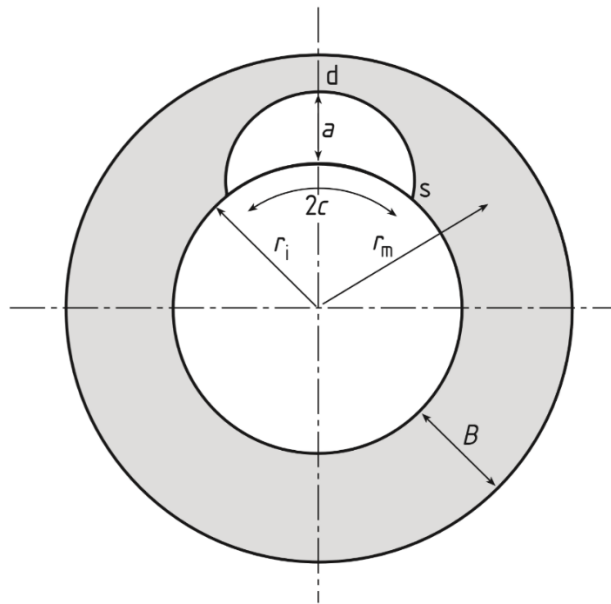


图 A.2.1 参考应力计算参数

A.2.2 对本指南未给出的其他类型缺陷的参考应力计算，应采用其他公认的方法与参数进行计算。