

指导性文件  
GUIDANCE NOTES  
GD35-2023



中国船级社

# 基于断裂力学理论的疲劳强度评估指南

2023

生效日期：2024年1月1日

北京

## 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 通 则.....           | 3  |
| 1.1 一般要求.....            | 3  |
| 1.2 术语定义.....            | 3  |
| 1.3 符号.....              | 3  |
| 1.4 疲劳破坏模式.....          | 4  |
| 1.5 疲劳评估方法.....          | 4  |
| 1.6 疲劳评估装载工况.....        | 5  |
| 1.7 疲劳评估载荷工况.....        | 5  |
| 第 2 章 疲劳评估.....          | 6  |
| 2.1 一般要求.....            | 6  |
| 2.2 评估节点.....            | 6  |
| 2.3 单一曲线模型裂纹扩展率公式.....   | 6  |
| 2.4 疲劳应力谱.....           | 6  |
| 2.5 失效评估方法.....          | 7  |
| 2.6 疲劳寿命计算.....          | 7  |
| 2.7 疲劳裂纹扩展预报流程.....      | 7  |
| 第 3 章 初始缺陷及应力强度因子计算..... | 10 |
| 3.1 一般要求.....            | 10 |
| 3.2 共面缺陷简化.....          | 10 |
| 3.3 典型裂纹应力强度因子计算.....    | 11 |
| 第 4 章 等效设计波法.....        | 14 |
| 4.1 一般要求.....            | 14 |
| 4.2 疲劳应力谱.....           | 14 |
| 4.3 应力范围.....            | 14 |
| 第 5 章 谱分析法.....          | 16 |
| 5.1 一般要求.....            | 16 |
| 5.2 水动力计算.....           | 16 |
| 5.3 有限元计算.....           | 16 |
| 5.4 疲劳应力谱.....           | 16 |
| 5.5 疲劳应力谱计算步骤.....       | 18 |
| 第 6 章 失效评估方法.....        | 19 |
| 6.1 一般要求.....            | 19 |
| 6.2 失效评估曲线.....          | 19 |
| 6.3 疲劳裂纹扩展断裂系数.....      | 20 |
| 6.4 疲劳裂纹塑性失稳系数.....      | 20 |
| 附录 1 典型裂纹应力强度因子.....     | 22 |
| 1.1 埋藏椭圆裂纹应力强度因子.....    | 22 |
| 1.2 焊趾表面裂纹应力强度因子.....    | 22 |

# 第 1 章 通 则

## 1.1 一般要求

1.1.1 本指南规定了基于断裂力学理论的船体结构疲劳强度评估方法, 载荷计算一般采用等效设计波法或谱分析法, 适用于中国船级社(China Classification Society, 以下简称 CCS) 规范或指南要求进行基于断裂力学理论的疲劳强度评估的船舶, 也适用于自愿申请本章 1.1.2 附加标志的船舶, 或 CCS 认为需要考虑裂纹扩展影响的船舶。

1.1.2 根据本指南进行疲劳强度评估并满足要求后, 可取得附加标志 FFM(XX, YY), 其中 XX 为环境条件(如 NA 表示北大西洋, 散布图见 IACS Rec.34), YY 为设计寿命(年)。

1.1.3 按本指南进行疲劳强度评估的船舶, 其结构设计、建造工艺和建造质量应满足 CCS 《钢质海船入级规范》、《材料与焊接规范》或 CCS 接受的其他有关标准的要求。

## 1.2 术语定义

### 1.2.1 初始缺陷

指实际结构在冶炼、制造过程中产生的夹渣、气孔, 加工时产生的刀痕、刻槽, 焊接时产生的裂纹、未焊透、气孔、咬边、过烧、夹渣, 铸件中的缩孔、疏松, 以及结构在不同环境中使用时产生的应力腐蚀裂纹和疲劳裂纹等。缺陷类型包括中心穿透裂纹、自由边裂纹、埋藏裂纹和表面裂纹, 各类型具体示意图见第 3 章 3.3 节。

### 1.2.2 疲劳应力谱

由符合分布函数要求的疲劳应力范围所组成的应力谱, 其中每个数值作为节点疲劳裂纹扩展预报计算的应力范围。

### 1.2.3 等效设计波法

疲劳应力谱计算基于等效设计波法, 如 CCS 《钢质海船入级规范》第 9 篇第 1 部分第 9 章或《船体结构疲劳强度指南》中所规定的应力范围计算方法。

### 1.2.4 谱分析法

疲劳应力谱计算基于谱分析法, 如 CCS 《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》中所规定的应力范围计算方法。

### 1.2.5 失效评估图法 (Failure Assessment Diagram Method, 简称 FAD)

含平面型缺陷结构完整性评价方法, 可以考虑从脆性断裂到塑性失稳所有可能的破坏模式, 计算方法见第 6 章。

### 1.2.6 名义应力

仅考虑结构几何形状影响的在结构构件中的应力, 但不考虑由于结构不连续和焊缝存在引起的应力集中。拉应力为正, 压应力为负。

## 1.3 符号

1.3.1  $\Delta\sigma_n$ : 名义应力范围,  $\text{N/mm}^2$ , 引起结构疲劳的交变应力的变化范围, 按下式计算:

$$\Delta\sigma_n = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

式中:  $\sigma_{\max}$ ——名义应力循环中的代数最大值,  $\text{N/mm}^2$ ;

$\sigma_{\min}$ ——名义应力循环中的代数最小值,  $\text{N/mm}^2$ 。

1.3.2  $\sigma_{ref}$ : 参考应力,  $\text{N/mm}^2$ , 失效评估图中用于评估导致发生结构塑性破坏的应力, 按第 6 章表 6.4.1 计算。

1.3.3  $\sigma_{mean}$ : 平均名义应力,  $\text{N/mm}^2$ , 按下式计算:

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \text{ N/mm}^2。$$

1.3.4  $K$ : 应力强度因子,  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 反映裂纹尖端弹性应力场强弱的物理量, 与裂纹类型、裂纹尺寸、结构几何尺寸以及应力大小有关, 见第 3 章 3.3 节。

1.3.5  $\Delta K$ : 应力强度因子范围,  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 一个交变应力循环中应力强度因子的最大值与最小值之差, 见第 2 章 2.3 节。

1.3.6  $\Delta K_{eq0}$ : 等效应力强度因子范围,  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 考虑载荷(应力)比影响的应力强度因子范围。

1.3.7  $R$ : 载荷(应力)比, 指疲劳载荷(应力)循环中应力最小值与最大值的比值。

1.3.8  $\Delta K_{th0}$ : 应力强度因子范围的门槛值,  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 表征裂纹扩展发生的临界点, 即大于该值时发生裂纹扩展, 反之则不扩展。船体结构用钢可取为  $2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

1.3.9  $C$ : 裂纹扩展率公式中的系数, 取 Paris 公式乘数。船体结构用钢可取为  $C=1.65 \times 10^{-11}$ 。

1.3.10  $m$ : 裂纹扩展率公式中的指数, 取 Paris 公式指数。船体结构用钢可取为  $m=3$ 。

1.3.11  $K_{IC}$ : 平面应变断裂韧度,  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。平面应变条件下, 钢材中 I 型(即张开型)裂纹发生失稳扩展时的应力强度因子临界值, 应符合 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章的有关规定。

1.3.12  $da/dN$ : 裂纹扩展率,  $\text{m/cycle}$ , 描述裂纹扩展快慢的物理量, 每次循环裂纹的增长量。

1.3.13  $K_f$ : 断裂系数, 为应力强度因子与断裂韧度的比值, 见第 6 章 6.3 节。

1.3.14  $L_r$ : 塑性失稳系数, 表征应力水平的量, 是塑性失稳的控制参量, 见第 6 章 6.4 节。

1.3.15  $N_{total}$ : 总循环数, 设计疲劳寿命期内疲劳载荷循环的总次数。

1.3.16  $N_F$ : 失效循环数, 结构疲劳失效时疲劳载荷循环的次数。

1.3.17  $R_{eH}$ : 材料的屈服强度,  $\text{N/mm}^2$ , 应遵照 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 1 章第 3 节的要求。

1.3.18  $R_m$ : 材料的抗拉强度,  $\text{N/mm}^2$ , 应符合 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章的有关规定。

*注: 对于 1.3.8-1.3.10 中的常数, 如使用其他数值, 需经 CCS 认可。*

#### 1.4 疲劳破坏模式

本指南主要针对以下两种类型的疲劳裂纹破坏模式:

- (1) 疲劳裂纹起始于焊趾处小的缺陷或咬边, 从焊趾扩展进母材;
- (2) 疲劳裂纹起始于非焊接节点的自由边(结构中的切口、沟槽或小的表面缺陷/不平整)

#### 1.5 疲劳评估方法

1.5.1 疲劳评估的理论基础为基于断裂力学理论的单一曲线模型裂纹扩展率公式, 具体计算方法见第 2 章第 2.3.1 节。

1.5.2 疲劳评估针对不同节点位置分别采用等效设计波法或谱分析法, 见第 2 章第 2.2 节。

## 1.6 疲劳评估装载工况

1.6.1 使用等效设计波法评估时，疲劳评估装载工况和时间分配系数，应符合 CCS《钢质海船入级规范》或《船体结构疲劳强度指南》的相关要求。

1.6.2 使用谱分析法评估时，疲劳评估装载工况和时间分配系数，应符合 CCS《钢质海船入级规范》或《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》的相关要求。

## 1.7 疲劳评估载荷工况

1.7.1 等效设计波法疲劳评估载荷工况应符合 CCS《钢质海船入级规范》或《船体结构疲劳强度指南》的相关要求。

1.7.2 谱分析法疲劳评估载荷工况应符合 CCS《钢质海船入级规范》或《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》的相关要求。

## 第 2 章 疲劳评估

### 2.1 一般要求

2.1.1 本指南疲劳强度评估基于疲劳裂纹扩展计算和失效评定原理进行, 计算中所使用的疲劳应力(范围)为名义应力(范围)。

2.1.2 结构疲劳失效寿命  $T_F$  应满足下式要求:

$$T_F \geq T_{DF}$$

式中:  $T_{DF}$ ——设计疲劳寿命, 年。

2.1.3 船体结构的设计疲劳寿命  $T_{DF}$  应符合 CCS《钢质海船入级规范》、《船体结构疲劳强度指南》或《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》的相关要求。

### 2.2 评估节点

2.2.1 本指南适用于焊趾和母材自由边的疲劳评估, 可参见《钢质海船入级规范》第 9 篇第 1 部分第 9 章、《船体结构疲劳强度指南》或《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》中所规定的评估节点。

### 2.3 单一曲线模型裂纹扩展率公式

2.3.1 裂纹扩展预报模型为单一曲线模型, 表达式如下:

$$\frac{da}{dN} = C \left[ (\Delta K_{eq0})^m - (\Delta K_{th0})^m \right]$$

式中:  $C$ ——裂纹扩展系数;

$m$ ——裂纹扩展指数;

$\Delta K_{th0}$ ——应力强度因子范围的门槛值。

$\Delta K_{eq0}$ ——等效应力强度因子范围, 按下式计算:

$$\Delta K_{eq0} = M_R \Delta K$$

$\Delta K$ ——应力强度因子范围, 按下式计算:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}, \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$M_R$ ——载荷(应力)比的修正因子, 按下式计算:

$$M_R = \begin{cases} (1-R)^{-\beta_1} & (R < 0) \\ (1-R)^{-\beta} & (0 \leq R < 0.5) \\ (1.05 - 1.4R + 0.6R^2)^{-\beta} & (0.5 \leq R < 1) \end{cases}$$

$R$ ——载荷(应力)比, 按下式计算:

$$R = \frac{K_{\min} + K_{res}}{K_{\max} + K_{res}}$$

$K_{\min}$ ——最小应力强度因子,  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 计算方法见第 3 章 3.3 节;

$K_{\max}$ ——最大应力强度因子,  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 计算方法见第 3 章 3.3 节;

$K_{res}$ ——残余应力的应力强度因子,  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 计算方法见第 3 章 3.3 节;

$\beta, \beta_1$ ——取决于材料和使用环境的参数, 取为:

$$\beta=0.3, \beta_1=0.7;$$

注: 使用其他数值时, 须经 CCS 认可。

### 2.4 疲劳应力谱

2.4.1 疲劳裂纹扩展计算载荷采用阶梯应力谱, 标准阶梯应力谱按下式计算:

$$\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_{\max}} = \left(1 - \frac{\lg N_i}{\lg N_{\text{total}}}\right)^{1/\xi}$$

式中： $\Delta\sigma_{\max}$ ——与总循环次数  $N_{\text{total}}$  对应的最大设计疲劳应力范围；

$N_i$ ——应力谱块  $i$  的应力范围循环次数；

$\Delta\sigma_i$ ——与循环次数  $N_i$  对应的疲劳应力范围；

$\xi$ ——Weibull 分布形状参数，取值参考 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇或《船体结构疲劳强度指南》；

$N_{\text{total}}$ ——疲劳载荷总循环数。

## 2.5 失效评估方法

2.5.1 结构节点在所考虑初始缺陷下的失效评估计算采用失效评估图法。

2.5.2 典型的失效评估图如图 2.5.2 所示，横坐标为塑性失稳系数  $L_r$ ，纵坐标为断裂系数  $K_r$ 。失效评估曲线将评估图划分为安全和不安全两个区域，如果疲劳裂纹扩展曲线上的评估点位于失效评估曲线下方，可判定含裂纹结构安全，反之则为不安全。

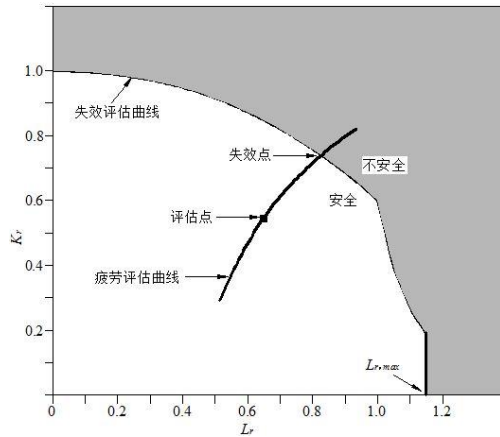


图 2.5.2 典型失效评估图示意

2.5.3 失效评估曲线的计算方法见第 6 章 6.2 节。

2.5.4 疲劳裂纹扩展的断裂系数和塑性失稳系数计算方法分别见第 6 章 6.3 节和 6.4 节。

2.5.5 失效评估曲线和疲劳裂纹扩展曲线的交点为结构节点失效点，相应的疲劳应力范围载荷循环次数为失效循环次数  $N_F$ 。

## 2.6 疲劳寿命计算

2.6.1 结构疲劳失效寿命应按下式计算：

$$T_F = \frac{N_F}{N_{\text{total}}} \cdot T_{DF}$$

式中： $T_{DF}$ ——设计疲劳寿命，年；

$N_F$ ——失效循环次数；

$N_{\text{total}}$ ——设计疲劳寿命  $T_{DF}$  期内疲劳载荷循环的总次数。

## 2.7 疲劳裂纹扩展预报流程

2.7.1 疲劳裂纹扩展计算及失效评估计算主要由以下步骤组成。

步骤一：初始参数确定

节点几何尺寸：板厚、板宽，参数定义见第 3 章 3.3 节；

节点等效初始缺陷尺寸：参数定义见第 3 章 3.1.2 节；

材料性能：断裂韧性、屈服强度、抗拉强度，参数定义见第 1 章 1.3.11 节、1.3.17 和节 1.3.18 节；

材料裂纹扩展常数：参数定义见第 1 章 1.3.8-1.3.10 节。

步骤二：疲劳应力谱生成

(1) 对于等效设计波法，计算应力范围长期概率分布取为 Weibull 分布函数，其参数见第 4 章；

(2) 对于谱分析法，计算应力范围短期概率分布取为 Rayleigh 分布函数，其参数见第 5 章；

根据应力范围概率分布函数产生疲劳应力范围阶梯谱块及对应的循环次数。

步骤三：初始缺陷尺寸规则化及应力强度因子计算

将初始缺陷等效规则化，计算结构疲劳热点处应力强度因子（范围），见第 3 章。

步骤四：疲劳裂纹扩展计算

计算每一循环载荷下的增量  $da$ ，见第 2 章。

步骤五：失效评估

计算失效评估图中的失效评估曲线和疲劳裂纹扩展曲线；通过失效条件判断裂纹是否超出失效准则设定值，见第 6 章；如果达到失效准则设定值，则计算结束；否则，按照步骤三至步骤五重复计算，直至计算结束。

2.7.2 疲劳裂纹扩展的计算流程见图 2.7.2。流程图中等效应力强度因子范围计算方法见本章 2.3 等效应力强度因子范围  $\Delta K_{eq0}$ 。

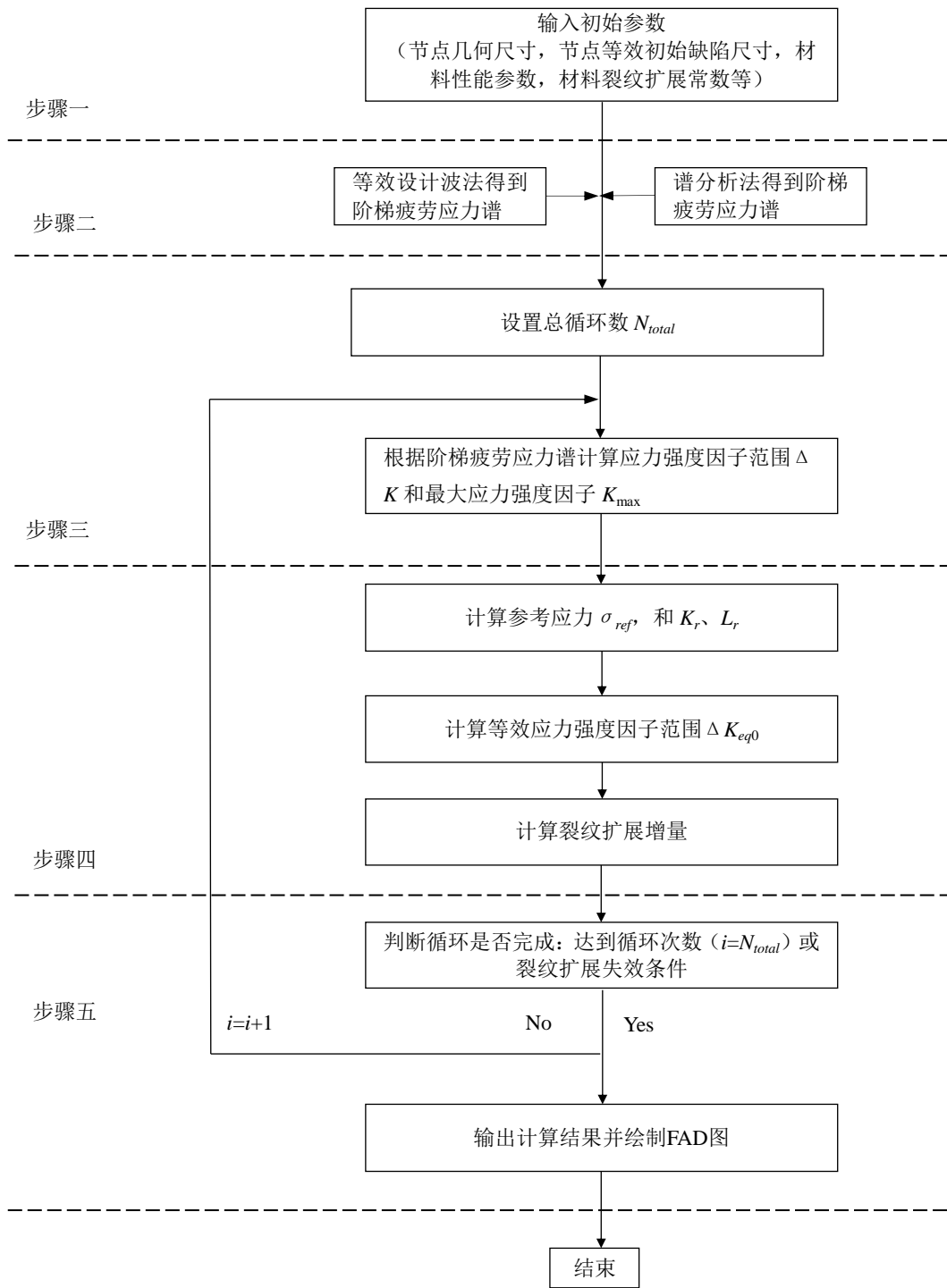


图 2.7.2 疲劳裂纹扩展的计算流程图

### 第3章 初始缺陷及应力强度因子计算

#### 3.1 一般要求

3.1.1 本指南中假定结构节点在冶炼制造、加工和焊接过程中实际存在初始缺陷。

3.1.2 对于新建船舶，初始缺陷的裂纹类型定义为自由边缺陷和表面缺陷两种。缺陷尺寸可采用常规无损检测方法结果。在设计阶段或无可靠检测数据时，可采用表3.1.2的初始缺陷尺寸。

无检测数据时假定初始缺陷尺寸 表 3.1.2

| 缺陷类型  | 缺陷尺寸, m                  |                          |
|-------|--------------------------|--------------------------|
| 自由边缺陷 | $a = 0.1 \times 10^{-3}$ | -                        |
| 表面缺陷  | $a = 0.5 \times 10^{-3}$ | $2c = 10 \times 10^{-3}$ |

注：自由边缺陷中， $a$ 指裂纹长度；

表面缺陷中， $a$ 指裂纹深度， $c$ 指裂纹半长。

3.1.3 对于营运船舶，初始缺陷的裂纹类型和裂纹尺寸应根据无损检测结果确定，并按本章3.2节规定进行等效尺寸简化。埋藏裂纹简化为椭圆裂纹，表面裂纹简化为半椭圆裂纹。

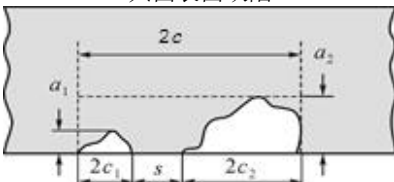
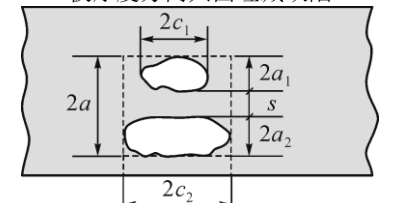
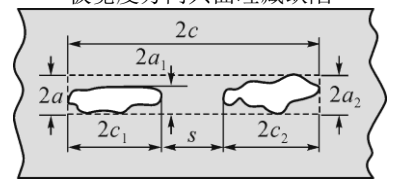
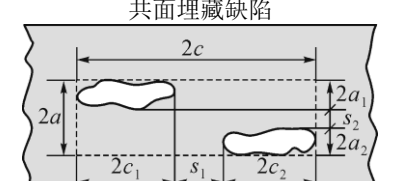
3.1.4 本章母材系指受均匀拉伸应力的平板钢材，所考虑裂纹类型为I型裂纹。I型裂纹为张开型裂纹的简称，对于该类型裂纹，外加应力垂直于裂纹面，在应力作用下，裂纹尖端张开，扩展方向和应力垂直。

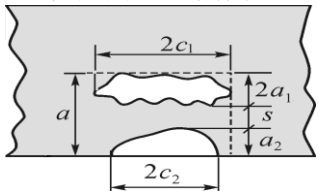
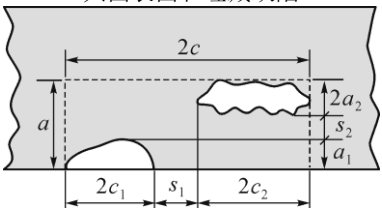
#### 3.2 共面缺陷简化

3.2.1 共面缺陷指位于同一平面上的多个缺陷。对于两个及以上的共面平面缺陷，应按表3.2.1所示规则进行简化。

共面缺陷的简化

表 3.2.1

| 序号 | 缺陷类型   | 简化准则   | 等效裂纹尺寸   |
|----|--|--|--|
| 1  | 共面表面缺陷<br>      | $s \leq \max(0.5a_1, 0.5a_2)$ $a_1/B$ 及或 $a_2/B \leq 0.5$<br>$s \leq \max(a_1, a_2)$ $a_1/B$ 及 $a_2/B > 0.5$ | $a = \max(a_1, a_2)$<br>$2c = 2c_1 + 2c_2 + s$       |
| 2  | 板厚度方向共面埋藏缺陷<br> | $s \leq a_1 + a_2$   | $2a = 2a_1 + 2a_2 + s$<br>$2c = \max(2c_1, 2c_2)$    |
| 3  | 板宽度方向共面埋藏缺陷<br> | $s \leq \max(a_1, a_2)$  | $2a = \max(2a_1, 2a_2)$<br>$2c = 2c_1 + 2c_2 + s$    |
| 4  | 共面埋藏缺陷<br>      | $s_1 \leq \max(a_1, a_2)$<br>$s_2 \leq a_1 + a_2$  | $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$<br>$2a = 2a_1 + 2a_2 + s_2$ |

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| 5 | <p>共面表面和埋藏缺陷</p>  | $s \leq a_1 + a_2$                                   | $a = 2a_1 + a_2 + s$<br>$2c = \max(2c_1, 2c_2)$    |
| 6 | <p>共面表面和埋藏缺陷</p>  | $s_1 \leq \max(0.5a_1, a_2)$<br>$s_2 \leq a_1 + a_2$ | $a = a_1 + 2a_2 + s_2$<br>$2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$ |

### 3.3 典型裂纹应力强度因子计算

3.3.1 本节所列的典型裂纹类型包括：母材中心穿透裂纹、母材自由边裂纹、母材埋藏裂纹和焊趾表面裂纹。同时给出了焊趾处焊接残余应力的应力强度因子计算方法。

3.3.2 受均匀拉伸的母材中心穿透裂纹的应力强度因子  $K$ ，按下式计算：

$$K = \sigma_n \sqrt{\pi a} Y(a) \quad \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$$

式中： $\sigma_n$ ——名义应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$a$ ——裂纹半长， $\text{m}$ ，见图 3.3.2；

$Y(a)$ ——按下式计算：

$$Y(a) = \left[ 1 - 0.25 \left( \frac{2a}{w} \right)^2 + 0.06 \left( \frac{2a}{w} \right)^4 \right] \sqrt{\sec(\pi a/w)}$$

$w$ ——母材宽度， $\text{m}$ ，见图 3.3.2。

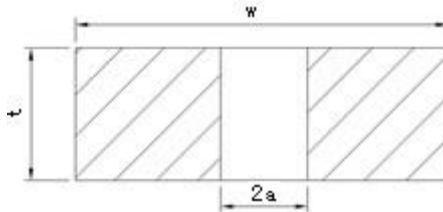


图 3.3.2 母材中心穿透裂纹示意图 ( $t$ ：母材厚度， $\text{m}$ )

3.3.3 受均匀拉伸的母材自由边裂纹的应力强度因子  $K$ ，按下式计算：

$$K = Y(a) \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$$

式中： $\sigma_n$ ——名义应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$a$ ——裂纹长度， $\text{m}$ ，见图 3.3.3；

$Y(a)$ ——按下式计算：

$$Y(a) = \left[ 1.12 - 0.231 \left( \frac{a}{w} \right) + 10.55 \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 21.72 \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 30.39 \left( \frac{a}{w} \right)^4 \right]$$

$w$ ——母材宽度， $\text{m}$ ，见图 3.3.3。

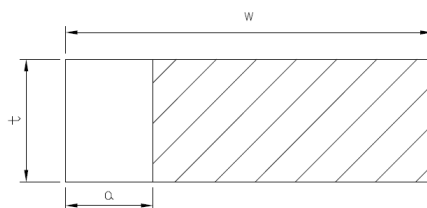


图 3.3.3 母材自由边裂纹示意图 ( $t$ : 母材厚度, m)

3.3.4 受均匀拉伸的母材埋藏裂纹的应力强度因子  $K$ , 按下式计算:

$$K = F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t'}, \frac{c}{w}, \theta\right) \frac{\sqrt{\pi a} \sigma_n}{\Phi} \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

式中:  $\sigma_n$ ——名义应力,  $\text{N/mm}^2$ ;  
 $a$ ——裂纹短轴半长, m, 见图 3.3.4;  
 $\Phi$ ——按附录 1 第 1.1.1 节计算;

$F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t'}, \frac{c}{w}, \theta\right)$ ——按附录 1 第 1.1.1 节计算;

$c$ ——裂纹长轴半长, m, 见图 3.3.4;

$t'$ ——等效厚度, m, 按下式计算:

$$t' = 2a + 2p$$

$p$ ——裂纹短轴表面到母材表面的距离, m, 见图 3.3.4;

$w$ ——母材宽度, m, 见图 3.3.4;

$\theta$ ——椭圆离心角, 弧度。

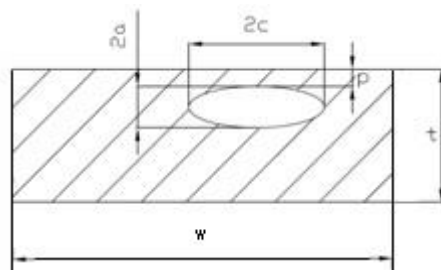


图 3.3.4 埋藏裂纹示意图 ( $t$ : 母材厚度, m)

注: 本节计算方法基于埋藏裂纹为椭圆形假定, 裂纹参数应符合如下条件:

$$0 \leq a/2c \leq 1, 2c/w < 0.5, -\pi \leq \theta \leq \pi, \text{ 且当 } 0 \leq a/2c \leq 0.1 \text{ 时, } (a/t') < 0.625 \cdot (0.6 + a/c)$$

3.3.5 焊趾处表面裂纹的应力强度因子  $K$ , 按下式计算:

$$K = (M_K^T \sigma_m + M_K^B H \sigma_b) \frac{\sqrt{\pi a}}{\Phi} F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t'}, \frac{c}{w}, \theta\right) \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

式中:  $\sigma_m$ ——名义膜应力,  $\text{N/mm}^2$ ;  
 $\sigma_b$ ——名义弯曲应力,  $\text{N/mm}^2$ ;  
 $H$ ——按附录 1 第 1.1.2 节计算;  
 $a$ ——裂纹深度, m, 见图 3.3.5(1);  
 $\Phi$ ——按附录 1 第 1.1.2 节计算;

$F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t'}, \frac{c}{w}, \theta\right)$ ——按附录 1 第 1.1.2 节计算;

其中:  $c$ ——裂纹长轴半长, m, 见图 3.3.5(1);

$t$ ——母材厚度, m, 见图 3.3.5(1);

$w$ ——母材宽度, m, 见图 3.3.5(1);

$\theta$ ——椭圆离心角, 弧度;

$M_K^T$ ——拉伸应力下焊接结构应力强度因子增大系数;

$M_K^B$ ——弯曲应力下焊接结构应力强度因子增大系数;

当缺陷或裂纹位于局部应力集中区时, 见图 3.3.5(2);

应按下列式计算  $M_K^T$ ,  $M_K^B$ :

$$M_K^{T(B)} = \begin{cases} v \left( \frac{a}{t} \right)^u & (M_K^T > 1.0) \\ 1 & (M_K^T \leq 1.0) \end{cases}$$

$v, u$ ——见表 3.3.5。

$L$ ——焊趾长度, m, 见图 3.3.5(2)。

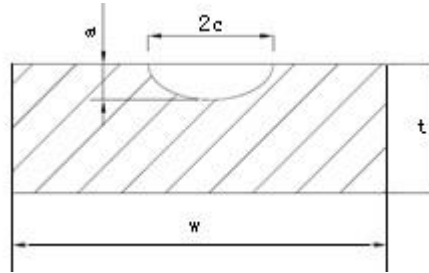


图 3.3.5 (1) 表面裂纹示意图

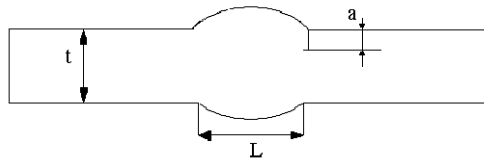


图 3.3.5 (2) 焊接局部示意图

$v, u$  的取值

表 3.3.5

| 载荷类型 | $L/t$    | $a/t$                   | $v$                | $u$                 |
|------|----------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| 拉伸   | $\leq 2$ | $\leq 0.05(L/t)^{0.55}$ | $0.51(L/t)^{0.27}$ | -0.31               |
|      |          | $> 0.05(L/t)^{0.55}$    | 0.83               | $-0.15(L/t)^{0.46}$ |
|      | $> 2$    | $\leq 0.073$            | 0.615              | -0.31               |
|      |          | $> 0.073$               | 0.83               | -0.20               |
| 弯曲   | $\leq 1$ | $\leq 0.03(L/t)^{0.55}$ | $0.45(L/t)^{0.21}$ | -0.31               |
|      |          | $> 0.03(L/t)^{0.55}$    | 0.68               | $-0.19(L/t)^{0.21}$ |
|      | $> 1$    | $\leq 0.03$             | 0.45               | -0.31               |
|      |          | $> 0.03$                | 0.68               | -0.91               |

注: 本节计算方法基于表面裂纹为半椭圆形假定, 裂纹参数应符合如下条件:

$$0 < a/c \leq 1.0, \quad 0 < a/t \leq 1.0, \quad 2c/w \leq 0.5, \quad 0 \leq \phi \leq \pi$$

3.3.6 焊趾处焊接残余应力的应力强度因子  $K_{res}$ , 按下式计算:

$$K_{res} = F \left( \frac{a}{c}, \frac{a}{t'}, \frac{c}{w}, \theta \right) \frac{\sqrt{\pi a} \sigma_{res}}{\Phi} \quad \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$$

式中:  $\sigma_{res}$ ——焊接残余应力,  $\text{N/mm}^2$ , 按下式计算:

$$\sigma_{res} = 0.3R_{eH}$$

$R_{eH}$ ——材料屈服强度,  $\text{N/mm}^2$ 。

其余符号见本章 3.3.5 节定义。

## 第 4 章 等效设计波法

### 4.1 一般要求

4.1.1 等效设计波法适用于船体结构典型节点疲劳评估,初始缺陷一般位于焊接节点的焊趾处或母材自由边处。

4.1.2 等效设计波法的疲劳应力范围根据《钢质海船入级规范》或《船体结构疲劳强度指南》疲劳相关要求获得。

4.1.3 根据典型节点连接形式和位置选择适当的应力强度因子进行裂纹扩展计算。

### 4.2 疲劳应力谱

4.2.1 本指南推荐采用由疲劳应力范围的长期分布函数确定疲劳应力谱的方法。如采用其他确定疲劳应力谱的方法,应经 CCS 同意。

4.2.2 通过 Weibull 分布的形状参数  $\xi$  和尺度参数  $q$  产生服从分布的阶梯应力谱,每个谱块应力范围数值作为结构裂纹扩展疲劳寿命计算的应力范围  $\Delta\sigma_n$ ,最大和最小应力分别为  $\sigma_{\max}=\Delta\sigma_n/2+\sigma_{mean}$  和  $\sigma_{\min}=-\Delta\sigma_n/2+\sigma_{mean}$ 。

4.2.3 应力范围长期分布的概率密度函数由双参数 Weibull 分布表示,其概率密度按下式计算:

$$f_{Weibull}(\Delta\sigma) = \frac{\xi}{q} \left( \frac{\Delta\sigma}{q} \right)^{\xi-1} \exp \left[ - \left( \frac{\Delta\sigma}{q} \right)^{\xi} \right] \quad 0 \leq \Delta\sigma < +\infty$$

式中:  $\Delta\sigma$ ——应力范围, N/mm<sup>2</sup>;

$\xi$ ——Weibull 分布形状参数,取值参考 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇或《船体结构疲劳强度指南》;

$q$ ——Weibull 分布等效尺度参数,按下式计算:

$$q = \frac{\sum \alpha_k q_k}{\sum \alpha_k}$$

式中:  $\alpha_k$ ——装载工况  $k$  的时间分配系数,见第 1 章第 1.6.1 节;

$q_k$ ——装载工况  $k$  的 Weibull 分布尺度参数,按下式计算:

$$q_k = \frac{\Delta\sigma_{n,k}}{(\ln n_k)^{1/\xi}}$$

$\Delta\sigma_{n,k}$ ——与  $10^{-8}$  超越概率水平对应的装载工况  $k$  的名义应力范围, N/mm<sup>2</sup>;

$n_k$ ——与  $10^{-8}$  超越概率水平对应的装载工况  $k$  的载荷循环次数;

按下式计算:

$$n_k = \alpha_k \times N_{total}$$

$N_{total}$ ——设计疲劳寿命期内疲劳载荷循环的总次数,取值参考 CCS《钢质海船入级规范》或《船体结构疲劳强度指南》。

### 4.3 应力范围

4.3.1 装载工况  $k$  的疲劳设计应力范围  $\Delta\sigma_{n,k}$  应按下列式计算:

$$\Delta\sigma_{n,k} = \max(\Delta\sigma_{n,ik}) \quad \text{N/mm}^2$$

式中:  $\Delta\sigma_{n,ik}$ ——装载工况  $k$  中载荷工况  $i$  下的名义应力范围, N/mm<sup>2</sup>。

4.3.2 装载工况  $k$  中载荷工况  $i$  下,疲劳名义应力范围  $\Delta\sigma_{n,ik}$  应按下列式计算:

$$\Delta\sigma_{n,ik} = \left| \sigma_{n,i1k} - \sigma_{n,i2k} \right| \quad \text{N/mm}^2$$

式中：  $\sigma_{n,i1k}, \sigma_{n,i2k}$ ——装载工况  $k$  中载荷工况  $i$  下的名义应力， $\text{N/mm}^2$ 。‘1’和‘2’分别表示载荷工况  $i1$  和  $i2$ 。

4.3.3 装载工况  $k$  中载荷工况  $i$  下，疲劳平均应力按下式计算：

$$\sigma_{mean,ik} = \frac{\sigma_{n,i1k} + \sigma_{n,i2k}}{2} \quad \text{N/mm}^2$$

式中：  $\sigma_{n,i1k}, \sigma_{n,i2k}$ ——装载工况  $k$  中载荷工况  $i$  下的名义应力， $\text{N/mm}^2$ 。‘1’和‘2’分别表示载荷工况  $i1$  和  $i2$ 。

## 第 5 章 谱分析法

### 5.1 一般要求

5.1.1 本章规定适用于采用谱分析方法计算载荷的疲劳强度计算。

5.1.2 本章未规定的水动力计算和有限元计算要求,如工况载荷、热点应力插值方法等,参考《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》或《船体结构疲劳强度指南》。

5.1.3 谱分析法计算流程见图 5.1.3。

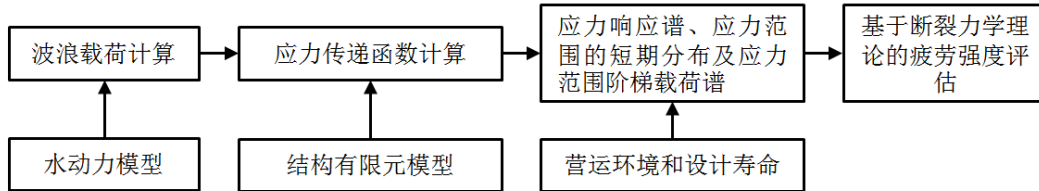


图 5.1.3 谱分析法计算流程

### 5.2 水动力计算

5.2.1 水动力计算的质量模型应能够真实反映实船的质量分布特征,总质量、重心位置、重量分布与目标装载工况保持一致。水动力模型应尽可能模拟实船的形状,水动力模型的排水体积、浮心位置应与目标装载工况保持一致,网格应尽量保持湿表面足够光滑且尽量均匀分布,网格数目应足够多以保证计算结果的准确。相关要求参考《钢质海船入级规范》第 9 篇 第 1 部分 CCS 附录 A [3.1.4]。

5.2.2 水动力计算采用的软件应得到 CCS 的认可。

### 5.3 有限元计算

5.3.1 对需要进行疲劳分析的局部结构,可以建立局部三维细化有限元模型,在其模型的边界节点施加由整船三维粗网格有限元分析得到的位移结果,作为强迫位移边界条件进行单独分析,也可以将细化模型直接嵌入整船模型中,一同进行分析。具体要求参见《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》第 3 节。

5.3.2 加载船体的运动和动力响应,用实部和虚部方法描述计算幅值。各装载工况、波浪频率及航向角在单位规则波下目标节点第一主应力的应力幅值,作为该装载工况、波浪频率及航向角的传递函数。

### 5.4 疲劳应力谱

5.4.1 波浪载荷应采用谱分析方法确定,可参见《基于谱分析的船体结构疲劳强度评估指南》。

5.4.2 建议采用 IACS 推荐的波浪散布图。对于特定航线的船舶,采用其它波浪海况散布图时,需经 CCS 认可。

5.4.3 波浪频率和浪向角的选取,按下列规定:

- (1) 波浪频率为 0.1~1.8 rad/s, 步长取 0.1 rad/s;
- (2) 浪向角包括 0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°、210°、240°、270°、300°、330°;
- (3) 航速为 75% 的最大服务航速。

5.4.4 通过疲劳应力范围短期分布 Rayleigh 分布函数得到疲劳应力谱块及对应循环次数,每个谱块应力范围数值作为结构裂纹扩展疲劳寿命计算的应力范围  $\Delta\sigma_n$ , 最大和最小应力分别为  $\sigma_{\max}=\Delta\sigma_n/2+\sigma_s$  和  $\sigma_{\min}=-\Delta\sigma_n/2+\sigma_s$  ( $\sigma_s$  为静载荷产生的结构应力)。

5.4.5 波浪功率谱使用双参数 Pierson-Moskowitz 谱(以下简称 P-M 谱), 概率密度函数表达式为:

$$G_{\eta}(\omega, H_s, T_z) = \frac{H_s^2}{4\pi} \left( \frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-5} \exp \left( -\frac{1}{\pi} \left( \frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-4} \right)$$

式中： $\omega$ ——波浪频率，rad/s；

$H_s$ ——有义波高，m；

$T_z$ ——平均跨零周期，s。

5.4.6 应力范围短期分布响应谱表达式为：

$$G_{\sigma}(\omega, H_s, T_z, \theta) = |H_{\sigma}(\omega, \theta)|^2 G_{\eta}(\omega, H_s, T_z)$$

式中： $\theta$ ——浪向角，°；

$H_{\sigma}(\omega, \theta)$ ——应力响应传递函数。

5.4.7 应力范围短期分布的概率密度函数由 Rayleigh 分布函数表示，其概率密度按下式计算：

$$f_{\sigma}(\sigma) = \frac{\Delta\sigma}{4m_0} \exp \left( -\frac{\Delta\sigma^2}{8m_0} \right) \quad 0 \leq \Delta\sigma < +\infty$$

式中： $\Delta\sigma$ ——应力范围，N/mm<sup>2</sup>；

$m_0$ ——应力功率谱密度的零阶矩，按 5.4.8 计算。

5.4.8 疲劳应力范围的平均跨零率 $\nu$ ，即单位时间内以正斜率跨越零均值的平均次数，按下式计算：

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$

式中： $m_0$ 、 $m_2$ ——分别为功率谱密度的零阶矩和二阶矩，按下式计算：

$$m_n = \int_0^{+\infty} \omega^n \cdot G_{\sigma}(\omega, H_s, T_z, \theta) d\omega$$

5.4.9 应力范围长期分布是分段连续的，表示为各短期分布的加权组合，其分布函数按下式计算：

$$F_{\Delta\sigma}(\Delta\sigma) = \frac{\sum_{n=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_h} \nu_{nij} \cdot p_n \cdot p_i \cdot p_j \cdot F_{\Delta\sigma_{nij}}(\Delta\sigma)}{\sum_{n=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_h} \nu_{nij} \cdot p_n \cdot p_i \cdot p_j}$$

式中： $F_{\Delta\sigma_{nij}}(\Delta\sigma)$ ——第 $n$ 个装载及海况 $i$ 和航向 $j$ 下，应力范围的短期分布，见 5.4.7；

$N_n$ ——装载工况个数；

$N_s$ ——海况个数；

$N_h$ ——航向个数；

$p_n$ ——第 $n$ 个装载状态所占设计寿命的比例；

$$0.85 \leq \sum_{n=1}^{n=N_n} p_n \leq 1$$

$p_i$ ——第 $i$ 个海况出现的概率；

$p_j$ ——第 $j$ 个航向出现的概率；

$\nu_{nij}$ ——第 $n$ 个装载及海况 $i$ 和航向 $j$ 下，应力交变响应平均过零率。

## 5.5 疲劳应力谱计算步骤

### 步骤一：水动力计算

建立目标船选定装载工况下的水动力模型，包括湿表面积模型和质量模型，水动力模型要求见 5.2；计算各装载工况、波浪频率及航向角下船体的运动和动力响应，船舶运动和波浪载荷响应计算所需输入参数、航速要求见 5.4。

### 步骤二：有限元计算

建立目标船的全船有限元模型，包括结构模型和质量模型，有限元模型要求见 5.3.1；计算各装载工况、波浪频率及航向角下目标节点的应力传递函数，有限元应力计算要求见 5.3.2。

### 步骤三：疲劳谱分析

结合传递函数，按照 5.4.8 得到海浪散布图中特定装载工况、波浪频率及航向角下的应力范围短期概率分布函数。

### 步骤四：疲劳应力谱

按照 2.4 得到疲劳应力谱。

### 步骤五：疲劳寿命计算

按照 2.7 进行寿命计算。

## 第 6 章 失效评估方法

### 6.1 一般要求

6.1.1 失效评估图能够考察含平面型缺陷结构从脆性断裂直至塑性失稳阶段所有可能破坏行为，可同时考虑断裂韧度和塑性失效抗力对含缺陷结构安全评定的影响。

6.1.2 采用通用失效评定曲线进行评估，该曲线适用于应力-应变曲线上无明显屈服平台特征的材料。

6.1.3 失效评估流程如图 6.1.3 所示：

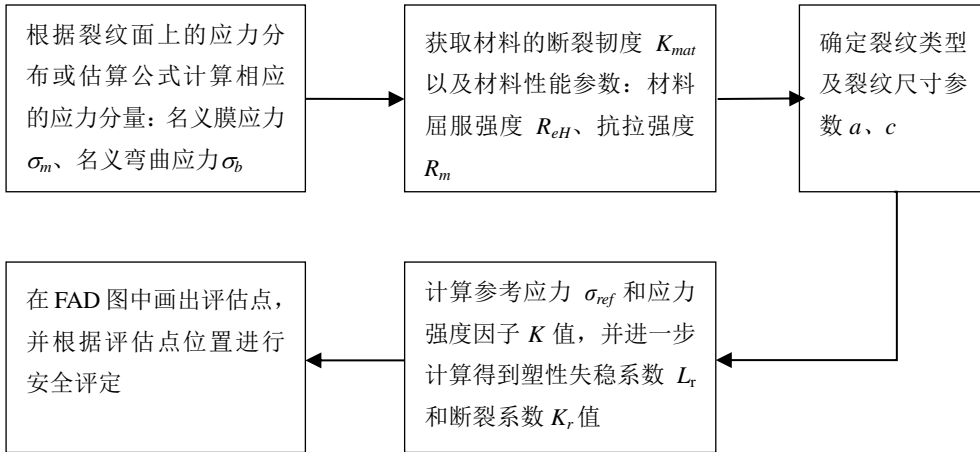


图 6.1.3 失效评估流程图

图中： $\sigma_m$ ——名义膜应力，本指南中取为疲劳名义应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$\sigma_b$ ——名义弯曲应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$K_r$ ——断裂系数；

$L_r$ ——塑性失稳系数；

$\sigma_{ref}$ ——参考应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$K_{mat}$ ——钢材断裂韧度， $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ；可取钢材平面应变断裂韧度值  $K_{IC}$ 。

### 6.2 失效评估曲线

6.2.1 失效评估曲线按下式计算：

$$\begin{cases} f(L_r) = (1 + 0.5L_r^2)^{-0.5} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)] & L_r \leq 1 \\ f(L_r) = f(L_r = 1) L_r^{\frac{(\eta-1)}{(2\eta)}} & 1 < L_r \leq L_{r,\max} \\ f(L_r) = 0 & L_r > L_{r,\max} \end{cases}$$

式中： $L_r$ ——塑性失稳系数，见 6.4；

$L_{r,\max}$ ——最大塑性失稳系数，按下式计算：

$$L_{r,\max} = \frac{R_{eH} + R_m}{2R_{eH}}$$

$R_{eH}$ ——材料屈服强度， $\text{N/mm}^2$ ；

$R_m$ ——材料抗拉强度， $\text{N/mm}^2$ 。

$$\mu = \min(0.001 \frac{E}{R_{eH}}, 0.6)$$

$$\eta = 0.3(1 - \frac{R_{eH}}{R_m})$$

### 6.3 疲劳裂纹扩展断裂系数

6.3.1 疲劳裂纹扩展的断裂系数  $K_r$  按下式计算：

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} = \frac{K_I^p + K_I^s}{K_{mat}} + \rho$$

式中： $K_I^p$ ——根据一次应力（名义应力）计算得到的应力强度因子， $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ；

$K_I^s$ ——根据二次应力（焊接残余应力）计算得到的应力强度因子， $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ；

$\rho$ ——塑性修正因子，按下式计算：。

$$\begin{cases} \rho_1 = 0.1 \left[ K_I^s \left( \frac{L_r}{K_I^p} \right) \right]^{0.714} - 0.007 \left[ K_I^s \left( \frac{L_r}{K_I^p} \right) \right]^2 + 0.00003 \left[ K_I^s \left( \frac{L_r}{K_I^p} \right) \right]^5 & K_I^s \left( \frac{L_r}{K_I^p} \right) < 5.2 \\ \rho_1 = 0.25 & K_I^s \left( \frac{L_r}{K_I^p} \right) \geq 5.2 \end{cases}$$

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

### 6.4 疲劳裂纹塑性失稳系数

6.4.1 裂纹扩展的塑性失稳系数  $L_r$  按下式计算：

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{fs}}$$

式中： $\sigma_{ref}$ ——参考应力， $\text{N}/\text{mm}^2$ ，见表 6.4.1；

$\sigma_{fs}$ ——缺陷处材料的流动强度， $\text{N}/\text{mm}^2$ ，取材料的屈服强度  $R_{eH}$ 。

裂纹参考应力  $\sigma_{ref}$  计算公式， $\text{N}/\text{mm}^2$

表 6.4.1

| 序号 | 裂纹类型   | 参考应力 $\sigma_{ref}$   |
|----|--------|---|
| 1  | 中心穿透裂纹 | $\sigma_{ref} = \frac{\sigma_b + (\sigma_b^2 + 9\sigma_m^2)^{0.5}}{3 \left( 1 - \frac{2a}{w} \right)}$  |
| 2  | 边裂纹    | $\sigma_{ref} = \frac{\sigma_b + (\sigma_b^2 + 9\sigma_m^2)^{0.5}}{3 \left( 1 - \frac{a}{w} \right)}$   |
| 3  | 表面裂纹   | $\sigma_{ref} = \frac{\sigma_b + \left[ \sigma_b^2 + 9\sigma_m^2 (1 - \alpha'')^2 \right]^{0.5}}{3(1 - \alpha'')^2}$<br>$\begin{cases} \alpha'' = (a/t) / \{1 + (t/c)\} & (w \geq 2(c+t)) \\ \alpha'' = (2a/t)(c/w) & (w < 2(c+t)) \end{cases}$                                   |
| 4  | 埋藏裂纹   | $\sigma_{ref} = \frac{\sigma_b + 3\sigma_m \alpha'' + \left[ (\sigma_b + 3\sigma_m \alpha'')^2 + 9\sigma_m^2 \left\{ (1 - \alpha'')^2 + 4 \left( \frac{p\alpha''}{t} \right) \right\} \right]^{0.5}}{3 \left\{ (1 - \alpha'')^2 + 4 \left( \frac{p\alpha''}{t} \right) \right\}}$ |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  | $\begin{cases} \alpha'' = (2a/t) / \{1 + (t/c)\} & (w \geq 2(c+t)) \\ \alpha'' = (4a/t)(c/w) & (w < 2(c+t)) \end{cases}$ |
| <p>表中：<math>a</math>——分别为：中心穿透裂纹的裂纹半长、边裂纹的边裂纹长、表面裂纹的裂纹深度、埋藏裂纹的裂纹深度半长，m；</p> <p><math>w</math>——板宽，m；</p> <p><math>c</math>——裂纹半长，m；</p> <p><math>t</math>——板厚，m；</p> <p><math>p</math>——埋藏裂纹到板表面的距离，m，见第3章图3.3.4；</p> <p><math>\sigma_m</math>——名义膜应力，N/mm<sup>2</sup>；</p> <p><math>\sigma_b</math>——名义弯曲应力，N/mm<sup>2</sup>。</p> |  |  |

## 附录 1 典型裂纹应力强度因子

### 1.1 埋藏椭圆裂纹应力强度因子

埋藏椭圆裂纹应力强度因子  $K$  按下式计算：

$$K = F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t'}, \frac{c}{w}, \theta\right) \frac{\sqrt{\pi a} \sigma_n}{\Phi} \quad \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$$

式中： $\sigma_n$ ：名义应力， $\text{N/mm}^2$ ；

$$\Phi = \begin{cases} \left[1 + 1.464(a/c)^{1.65}\right]^{1/2} & (0 \leq a/2c \leq 0.5) \\ \left[1 + 1.464(c/a)^{1.65}\right]^{1/2} & (0.5 < a/2c \leq 1) \end{cases}$$

$$F_e\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t'}, \frac{c}{w}, \theta\right) = \left[ M_1 + M_2 \left(\frac{2a}{t'}\right)^2 + M_3 \left(\frac{2a}{t'}\right)^4 \right] g f_\theta f_w$$

其中：

$$M_1 = \begin{cases} 1 & (0 \leq a/2c \leq 0.5) \\ \sqrt{c/a} & (0.5 \leq a/2c \leq 1) \end{cases}$$

$$M_2 = \frac{0.05}{0.11 + (a/c)^{3/2}}$$

$$M_3 = \frac{0.29}{0.23 + (a/c)^{3/2}}$$

$$g = 1 - \left[ \frac{(2a/t')^4 \{2.6 - (4a/t')\}^{0.5}}{1 + 4(a/c)} \right] |\cos \theta|$$

$$f_\theta = \begin{cases} \left[ (a/c)^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \right]^{1/4} & (0 \leq a/2c \leq 0.5) \\ \left[ (c/a)^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right]^{1/4} & (0.5 < a/2c \leq 1) \end{cases} \quad \theta = \begin{cases} 0 & \text{在裂纹长度尖端} \\ \pi/2 & \text{在裂纹深度尖端} \end{cases}$$

$$f_w = \left[ \sec \left( \frac{\pi c}{w} \sqrt{\frac{2a}{t'}} \right) \right]^{1/2}$$

$t'$ ：等效厚度，m。

### 1.2 焊趾表面裂纹应力强度因子

焊趾表面裂纹应力强度因子  $K$  应按下式计算：

$$K = (M_K^T \sigma_m + M_K^B H \sigma_b) \frac{\sqrt{\pi a}}{\Phi} F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{c}{w}, \theta\right) \quad \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$$

$$\text{式中：} \quad \Phi = \left[ 1.0 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} \right]^{1/2}$$

$$F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{c}{w}, \theta\right) = \left[ M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] g f_\theta f_w$$

其中：

$$M_1 = 1.13 - 0.09(a/c)$$

$$M_2 = -0.54 + 0.89 / (0.2 + a/c)$$

$$M_3 = 0.5 - 1 / (0.65 + a/c) + 14(1 - a/c)^{24}$$

$$f_\theta = \left[ \sin^2 \theta + (a/c)^2 \cos^2 \theta \right]^{1/4}$$

$$g = 1 + \left[ 0.1 + 0.35(a/t)^2 \right] (1 - \sin \theta)^2$$

$$f_w = \left[ \sec \left( \frac{\pi}{2} \frac{2c}{W} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2}$$

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \theta$$

$$H_1 = 1 - 0.34(a/t) - 0.11(a/c)(a/t)$$

$$H_2 = 1 + G_1(a/t) + G_2(a/t)^2$$

$$G_1 = -1.22 - 0.12(a/c)$$

$$G_2 = 0.55 - 1.05(a/c)^{0.75} + 0.47(a/c)^{1.5}$$

$$p = 0.2 + a/c + 0.6(a/t)$$

$\sigma_m$ ：名义膜应力，N/mm<sup>2</sup>；

$M_K^T$ ：拉伸应力下焊接结构应力强度因子增大系数；

$M_K^B$ ：弯曲应力下焊接结构应力强度因子增大系数。