

ICS 25.160.01
CCS J 33



CWA

团 体 标 准

T/CWAN 0131—2025

焊缝疲劳分析 等效结构应力法

Weld fatigue analysis-equivalent structural stress method

2025-03-19 发布

2025-04-01 实施

中国焊接协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本流程	2
5 一般要求	2
6 仿真模型建立规则	3
7 焊缝疲劳寿命评估	10
8 仿真分析报告	13
附录 A（规范性）基于等效结构应力法的焊缝疲劳分析基本流程图	14
参考文献	15

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：江苏徐工工程机械研究有限公司、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、洛阳船舶材料研究所（中国船舶集团有限公司第七二五研究所）、南昌航空大学、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司、中船双瑞（洛阳）特种装备股份有限公司、重庆科技大学、北部湾大学、合肥工业大学、中石化洛阳工程有限公司、重庆三峡学院。

本文件主要起草人：张贵芝、张立平、邹吉鹏、张洪国、黄瑞生、廖志谦、陈玉华、武鹏博、刘希林、秦建、尹立孟、曹浩、余巍、李德雨、路全彬、王金富、杨玉强、刘大双、张龙、方乃文、高乐。

焊缝疲劳分析 等效结构应力法

1 范围

本文件规定了基于等效结构应力法的焊缝疲劳分析的一般要求、仿真建模规则、求解器设置、仿真分析报告等内容。

本文件适用于基于主S-N曲线方法对焊接接头进行疲劳评估分析。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 31054 机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语

GB/T 33582 机械产品结构有限元力学分析通用规则

T/CWAN 0009 焊接术语 熔化焊

3 术语和定义

GB/T 31054、GB/T 33582和T/CWAN 0009界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

疲劳 fatigue

在反复应力作用下，产生一条或多条裂纹并逐渐扩展造成结构件的破坏。

3.2

焊缝疲劳失效模式 weld fatigue failure mode

焊缝疲劳失效有焊趾开裂、焊喉开裂、焊根开裂、熔合区开裂四种失效模式。

注：焊缝疲劳失效模式示意图见图1。

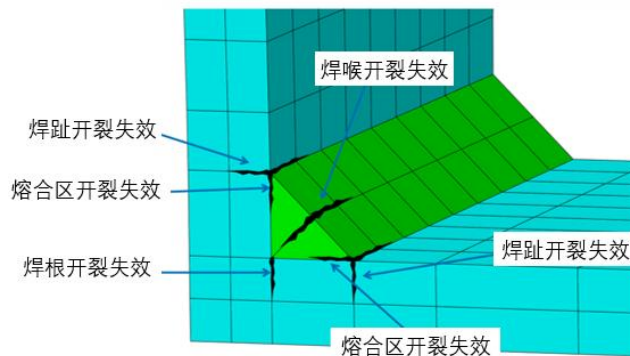


图1 焊缝疲劳失效模式

3.3

结构应力 structural stress

考虑结构不连续性效应而计算得到的构件应力，它包括膜应力和弯曲应力。

3.4**S-N 曲线 S-N curve**

疲劳强度和循环次数（N）之间的数量关系。

3.5**主 S-N 曲线 main S-N curve**

基于大量焊接接头疲劳试验和实际运营数据，拟合出的单一通用的主 S-N 曲线(等效结构应力-寿命曲线)。

4 基本流程

附录 A 给出了基于等效结构应力法的焊缝疲劳分析流程，具体如下：

- (1) 指定具体待评点的位置；确定加载历史，加载历史应包括施加于构件的所有重要的载荷与事件；
- (2) 如果有对焊接接头中不同的疲劳评估点的动应力实测数据，则转到步骤（4）；
- (3) 如果没有动应力实测数据，进行有限元静强度分析，从计算结果中提取该部位的应力，结合载荷谱，换算获得各个疲劳评估点的应力范围谱；
- (4) 对疲劳评估点，利用循环计数法确定各个位置的应力应变循环次数，定义周期应力总循环次数为 M。
- (5) 确定步骤(4)中已经得到的第 k 个循环开始和结束点上假设裂纹面法向的弹性膜应力和弯曲应力（开始点为 m_t ，结束点为 n_t ）。利用这些数据，计算起始点膜应力和弯曲应力的变化范围，计算最大应力、最小应力、应力变化范围、平均应力变化范围。
- (6) 计算第 k 个循环的弹性结构应力变化范围。
- (7) 计算第 k 个循环的等效结构应力变化范围。
- (8) 根据焊接接头疲劳曲线和得到的等效结构应力变化范围参数，计算循环次数 N_k 。
- (9) 计算第 k 个循环的疲劳损伤。
- (10) 对所有应力变化范围重复第 8 步到第 9 步，确定等效结构应力变化范围。
- (11) 计算各级载荷下的损伤比，根据 Palmgren-Miner 法则计算累积损伤；
- (12) 对焊接接头每个需要评估的位置重复第 7 步到第 11 步，计算各评估位置的疲劳寿命里程及年限；
- (13) 编制报告，流程结束。

5 一般要求

5.1 有限元模型分析前应符合下述要求：

——应按照 GB/T 33582 附录 B 规定选择单位制，质量单位选择吨，长度单位选择毫米，时间单位选择秒，温度单位选择摄氏度或开[尔文]，模型材料属性单位应与几何模型单位一致；

——应选笛卡尔直角坐标系，当边界条件中有力或者约束与全局坐标系不一致时，可增加局部坐标系；

——焊接结构件 CAD 模型应结构完整，装配关系清晰明了；

——有限元分析宜选用具备前处理、疲劳寿命评估及可视化结果处理功能的一个或多个软件进行。

5.2 应按照表 1 推荐的形式进行建立不同焊缝疲劳失效模式下的焊缝有限元模型。

表 1 不同焊缝疲劳失效模式下有限元建模方式

失效模式	模型单元类型
焊趾失效	壳单元、实体单元
焊喉失效	实体单元
焊根失效	实体单元
熔合区失效	实体单元

6 仿真模型建立规则

6.1 几何模型处理

针对对接接头、搭接接头和角接头等不同接头形式的焊接结构件需进行几何处理，在三维 CAD 软件中处理时应符合下述要求：

- 几何模型简化不应改变结构的基本特征、传力路径、刚度、质量分布等；
- 应对几何模型分类、实体特征清理；
- 应删除包络面等无体积结构件、临时参考点、参考线、参考面；
- 应去除构件中小于 5mm 的孔、深度小于 3mm 的浅槽和凸台、过渡圆弧等细节特征；
- 应依据真实刚度，简化轴、螺栓、滑块、钢丝绳等机构；
- 焊接坡口应清晰明了，连接件不能有穿透；

6.2 焊缝有限元网格划分要求

6.2.1 壳单元模型

采用壳单元建立焊接接头网格模型时应符合如下几个要求：

- 壳单元建模时，焊缝所在平面内的单元法线方向必须一致，焊缝长度方向节点单元要连续；
- 壳单元建模时，焊缝及焊趾区域网格应为四边形单元，交叉焊缝可为三角形单元，三角形单元在焊趾及焊缝位置的比例应小于 5%；

示例 1：两条相交焊缝的网格划分时，相交处采用两个三角形单元过渡，如图 2 所示，由节点 1、2、3 组成的三角形网格和节点 1、3、4 组成的三角形网格。

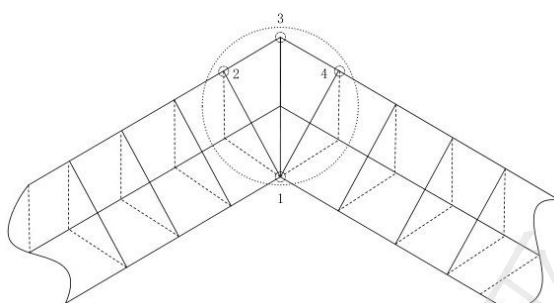


图 2 壳单元模型两条交叉焊缝网格划分示意图

示例 2: 三条相交焊缝的网格划分时, 相交处采用一个三角形单元过渡, 如图 3 所示, 由节点 1、2、3 组成的三角形网格。

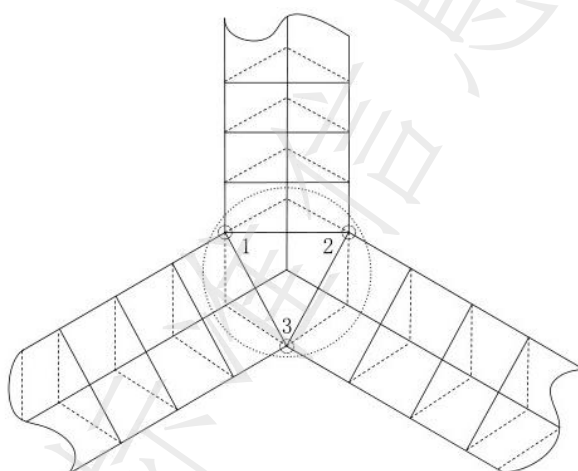


图 3 壳单元模型三条交叉焊缝网格划分示意图

c) 对于对接焊缝, 壳单元厚度应为有效焊缝厚度; 对于角焊缝, 壳单元厚度应为焊喉厚度, 即 0.707 倍的焊脚高度。

6.2.2 实体单元模型

采用实体单元建立焊接接头网格模型时应符合如下几个要求:

- a) 焊缝应按照实际焊接尺寸建模;
- b) 焊缝及焊趾相关位置应采用六面体网格, 其次为三菱柱网格单元类型;
- c) 板的厚度方向至少要有两层以上的单元离散, 并且在中性面上有节点生成, 且沿着板厚方向的节点要共线;
- d) 焊趾单元在焊线处沿厚度方向应在同一平面, 且与板的厚度方向垂直;
- e) 实体单元模型焊缝相交的位置优先采用焊缝断开的方法, 也可以采用四面体单元填充交叉位置;

示例 3: 两条相交焊缝的网格划分时, 相交处采用四个四面体网格过渡, 如图 4 所示, 节点 1、2、3、7 组成的四面体网格、节点 1、3、4、7 组成的四面体网格、节点 1、4、5、7 组成的四面体网格、节点 1、5、6、7 组成的四面体网格。

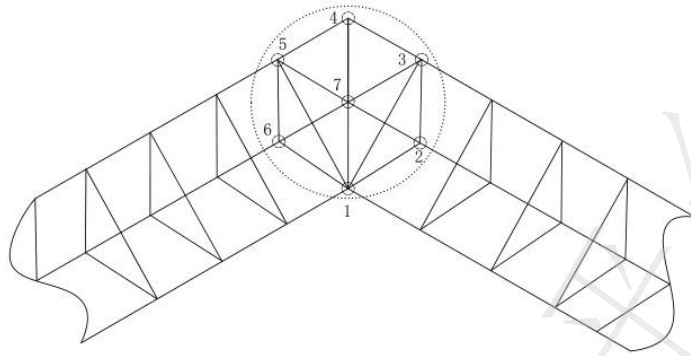


图4 实体单元模型两条交叉焊缝网格划分示意图

示例4：三条相交焊缝的网格划分时，相交处采用四个四面体网格过渡，如图5所示。节点1、2、3、7组成的四面体网格、节点1、3、4、5组成的四面体网格、节点1、5、6、7组成的四面体网格、节点1、3、5、7组成的四面体网格。

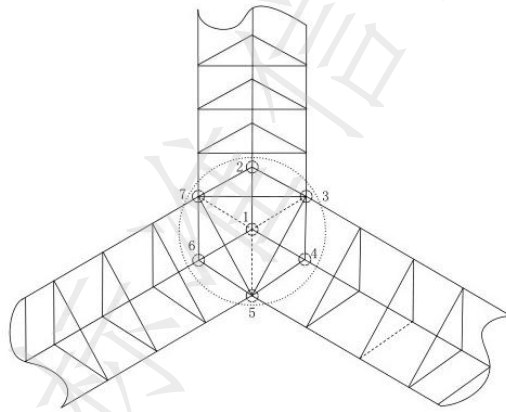


图5 实体单元模型三条交叉焊缝网格划分示意图

6.2.3 其他通用要求

仿真模型还应满足以下通用要求：

- a) 焊接接头应分为：焊缝、焊趾、母材三个区域；
- b) 焊线上的节点个数要多于5个；
- c) 应区分全熔透焊缝和部分熔透焊缝，全熔透焊缝位置，两母材需要节点耦合，部分熔透焊缝位置，两母材节点不耦合，如图6、图7所示；

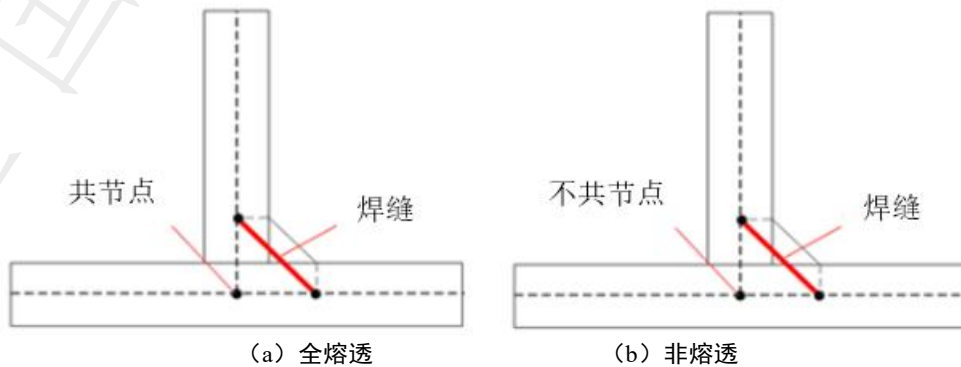


图6 壳单元网格模型示意图

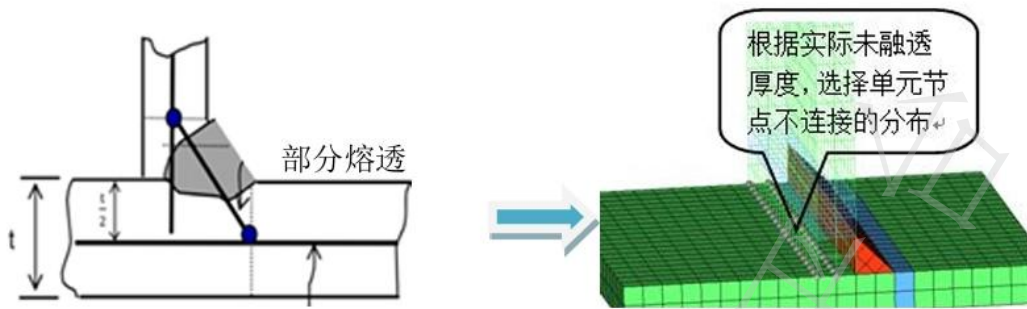


图 7 部分熔透焊缝实体单元模型示意图

e) 对于有焊缝拐弯的位置, 拐弯处的网格要求大于等于四个, 如图 8 所示。



图 8 拐角处焊缝网格划分示意图

6.2.4 不同类型焊缝建模方法

6.2.4.1 对于对接焊缝, 壳单元有限元建模时, 两对接板抽取中面相连接, 坡口线在中面投影间的几何面作为焊缝面; 若厚度相同, 焊缝面平行板厚方向; 不等厚板连接时, 焊缝面为倾斜面。实体单元有限元建模则以实际情况为准。建模示例如图 9、图 10 所示。



图 9 对接接头壳单元建模示例

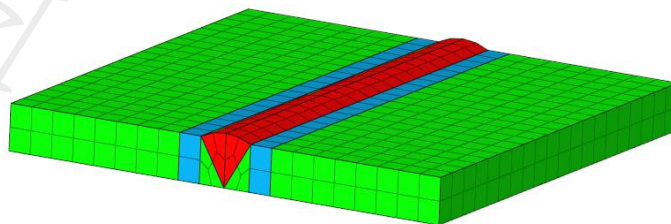


图 10 对接接头实体单元建模示例

6.2.4.2 对接焊缝壳单元建模时, 焊缝单元厚度定义为有效焊缝厚度, 部分熔透时为焊缝熔深, 等厚板全熔透焊接时为板厚, 不等厚板全熔透焊接时为薄板板厚。

6.2.4.3 对于 T-型接头, 除了 T 字部位节点相连之外, 壳单元以一排倾斜单元模拟, 建模示例如图 11 所示。两板的厚度明显大于焊脚的长度, 应按照图 11 (b) 简化处理, 焊脚长度 1/2 的位置建立一排倾斜单元模拟焊接面, 焊接面与板中面采用刚性单元连接 (RBE2)。实体单元以一排截面为三角形的单元模拟, 建模示例如图 12 所示。

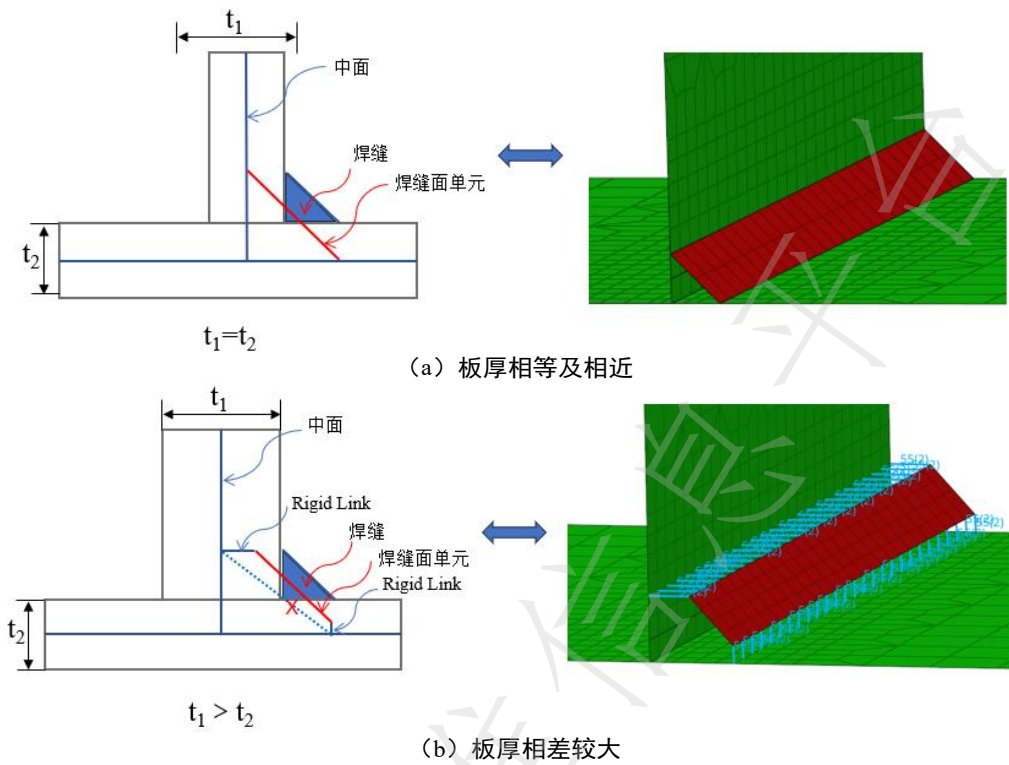


图 11 T-型接头壳单元建模示例

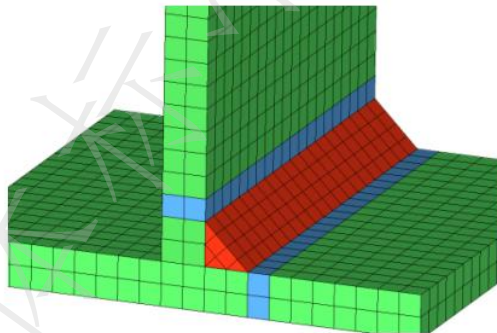


图 12 T-型接头实体单元建模示例

6.2.4.4 T 型接头角焊缝焊脚尺寸为 L_w ，对于壳单元有限元模型中，焊缝的焊脚尺寸分别为实际尺寸加上对应板厚的一半，即 $L=L_w+T/2$ ，焊缝单元厚度定义为 $0.707L_w$ ；对于实体单元，焊缝根据实际焊接尺寸建模，焊趾位置的确定如图 13。

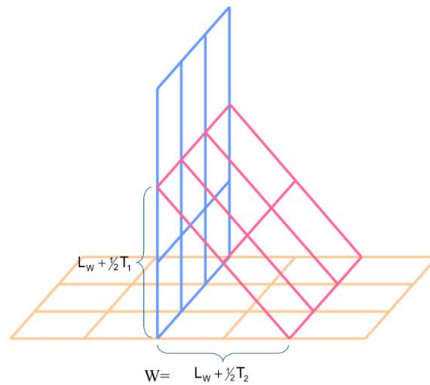


图 13 焊趾位置确定示意图

6.2.4.5 对于搭接接头，采用壳单元建模时，需将两层板分别抽壳，板与板之间以一排倾斜单元和一排垂直单元模拟，焊脚尺寸按照实际焊脚尺寸选取，厚度为 0.707 倍焊脚高度；采用实体单元建模时，按照实际情况建立即可。若搭接长度过长，且搭接面受法向载荷，未焊部分则需建立面面之间的耦合或接触关系。建模示例如图 14 所示。

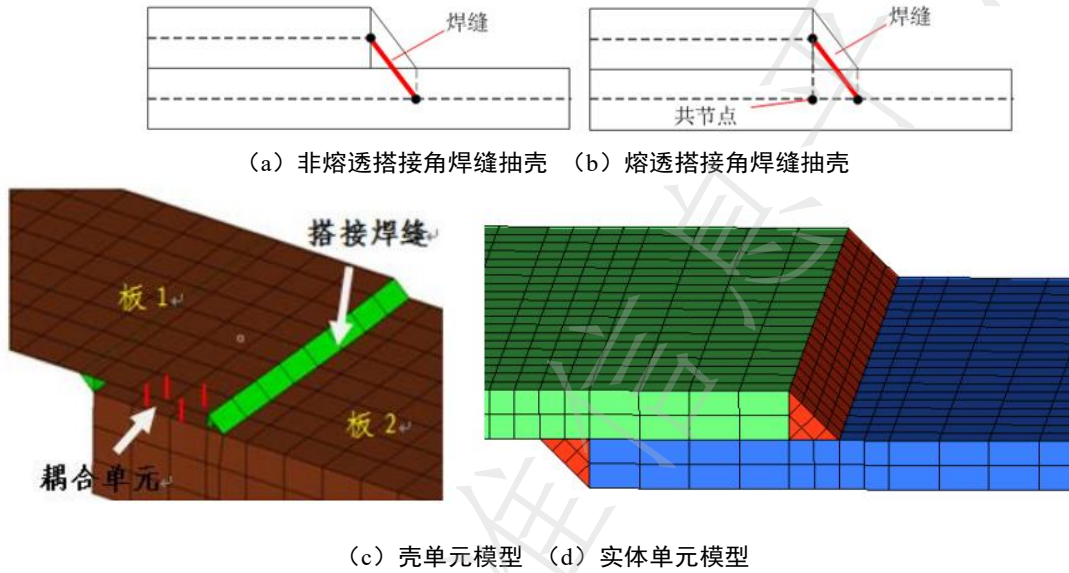


图 14 搭接接头建模示例

6.2.4.6 环焊缝、拐角焊缝建模时，应确保相邻两焊趾单元法线向量夹角应小于 45 度，否则会导致线性单元网格不敏感特性有所降低。建模示例如图 15 和图 16 所示。

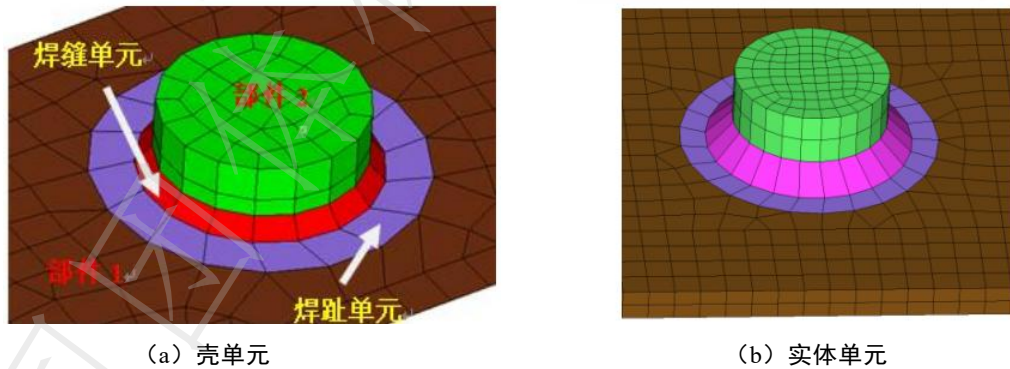


图 15 环焊缝建模示例

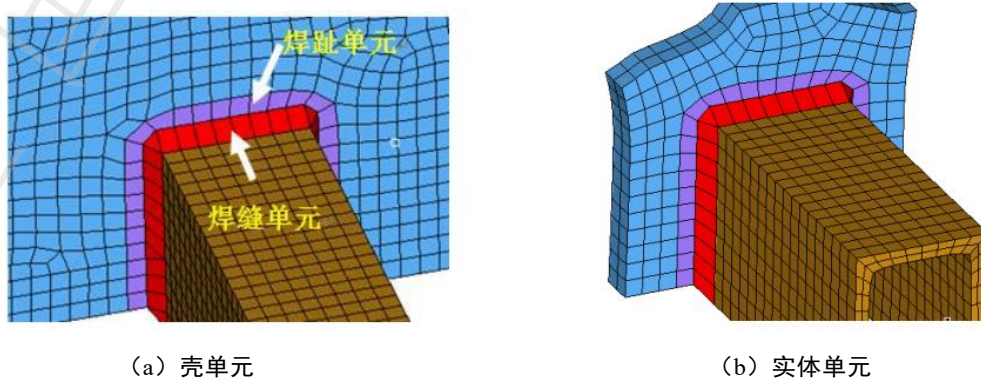


图 16 拐角焊缝建模示例

6.2.4.7 筋板周圈角焊缝建模时，当遇厚的筋板与大薄板焊接时，需将筋板周圈焊，此时筋板的厚度方向应建立焊缝单元，至少 2 个单元以上，建模示例如图 17 所示。

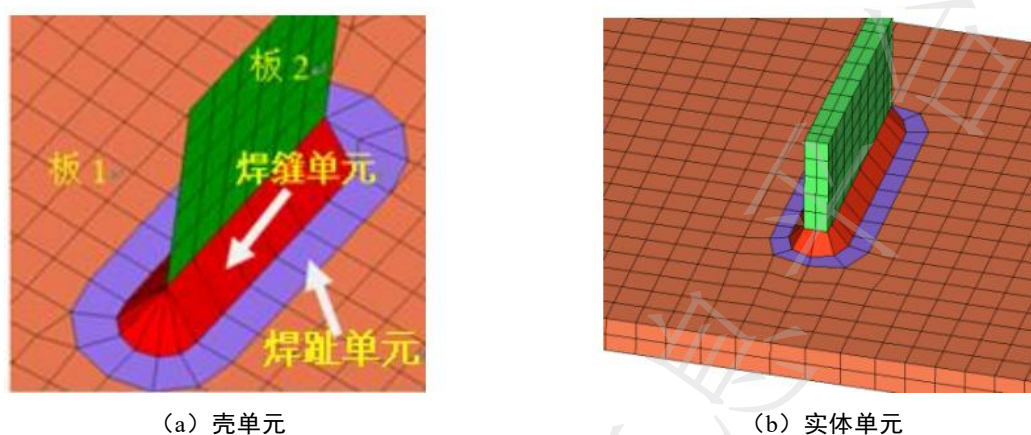


图 17 筋板周圈角焊缝建模示例

6.3 焊线定义

6.3.1 焊线定义时应每条焊线单独定义，区分壳单元和实体单元，指定每条焊缝起始节点、焊线节点、起始单元、参考单元，并定义成单独节点集和单元集。

6.3.2 不同焊缝开裂模式下单元节点集定义应遵循如下原则：

- a) 焊趾、焊根失效模式下是焊接板的板厚，如图 18；
- b) 焊喉失效模式下的板厚则是焊喉厚度；如图 18；
- c) 熔合区失效模式下的板厚：T 型接头角焊缝的是焊脚高度，如图 18，对接接头的是坡口面斜边长度；
- d) 起始单元必须包含起始节点和至少一个焊线节点；
- e) 起始节点位于起弧或者熄弧处均可，如果封闭焊缝，可以任意选取一个节点；
- f) 参考方向是起始节点位置处与裂纹扩展方向相反的矢量；
- g) 模型单元类型为实体单元时，焊接参考单元必须包括全厚度上所有的单元，还有代表环绕角度的起弧或熄弧处的全厚度单元，如图 19；
- h) 焊喉失效模式下，焊接参考单元应多选择开裂平面侧的母材上的两排单元，如图 20；
- i) 熔合区失效模式下，焊接参考单元应多选择垂直开裂方向母材上的一排单元，如图 20。

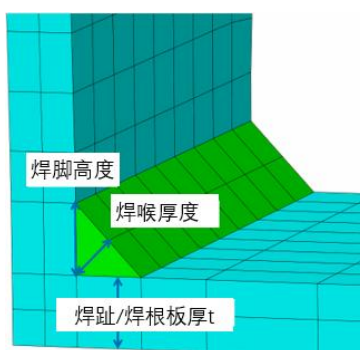


图 18 T 型接头角焊缝焊趾、焊根、焊喉、熔合区失效模式下的板厚图示

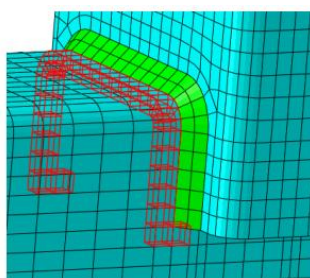


图 19 环绕焊接参考单元选择图示

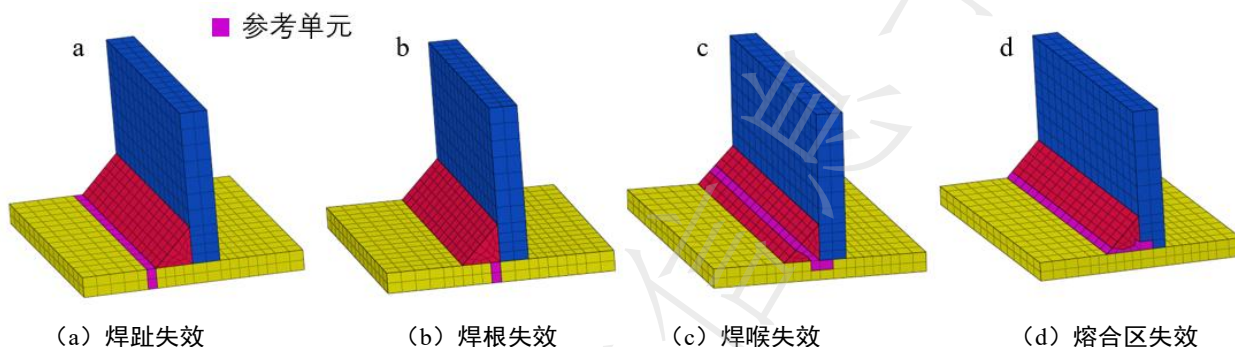


图 20 不同失效模式下参考单元选择图示

6.4 材料定义

材料数据选择应符合下述要求：

- a) 应在赋予材料前依据材料试验测试或者《机械设计手册》把所有相关材料的弹性模量、泊松比和密度输进材料库；
- b) 应创建包含材料属性的截面特性，截面特性与单元类型对应，并将截面特性分配给模型各区域；
- c) 如果某结构件简化后质量和真实质量不一致，应在材料库对其材料单独起名建立，并通过调整密度，使质量差满足要求。
- d) 焊接接头 S-N 曲线选择主 S-N 曲线，即等效结构应力和循环次数的对数关系曲线，宜选择中值的主 S-N 曲线。

7 焊缝疲劳寿命评估

7.1 静强度分析

7.1.1 模型应根据实际工况条件施加载荷和约束条件，应明确载荷大小、方向，约束位置、自由度和方向。

7.1.2 模型应根据结构件实际作业姿态，分工况求解计算。

7.1.3 选用“Static General”线性通用静态分析步进行分析，分析过程中输出应力结果和位移结果两种场变量，有限元结果文件中应当包含全局坐标系下的节点力结果以及几何模型。

7.1.4 静力计算结果应满足静强度要求，才可以进行疲劳分析。

7.2 等效结构应力计算

7.2.1 结构应力计算

7.2.1.1 进行焊接结构疲劳寿命评估时，焊接结构的结构应力分为膜应力和弯曲应力两个部分，计算公式如公式（1）所示。

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (1)$$

式中：

σ_m ——膜应力；

σ_b ——弯曲应力；

f_y ——线力；

m_x ——线矩；

t ——板厚。

7.2.1.2 一条焊线上节点力和节点矩与节点线力和线矩的关系如图 21 所示。

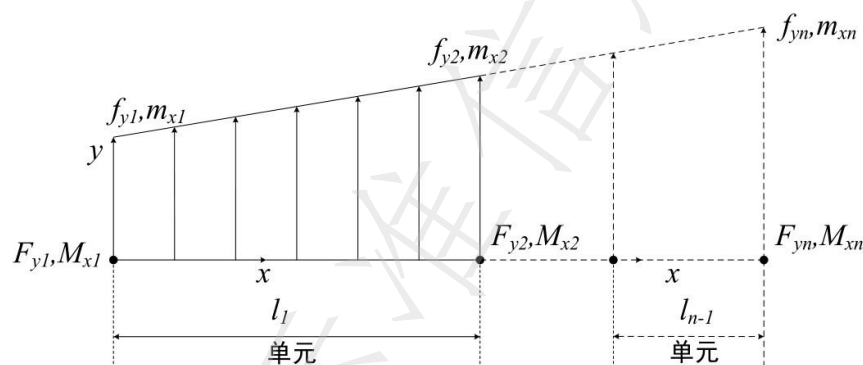


图 21 节点力和节点矩与节点线力和线矩关系示意图

7.2.1.3 一条焊线上的多个节点力和节点间线力的计算公式如（2）所示：

$$\{F_{y1}, F_{y2}, \dots, F_{yn}\}^T = L\{f_{y1}, f_{y2}, \dots, f_{yn}\}^T \quad (2)$$

式中：

F_{y1} ——节点 1 在 y 轴方向的节点力；

F_{y2} ——节点 2 在 y 轴方向的节点力；

F_{yn} ——节点 n 绕 y 轴的力矩；

f_{y1} ——节点 1 绕 y 轴方向单元边的线力；

f_{y2} ——节点 2 绕 y 轴方向单元边的线力；

f_{yn} ——节点 n 绕 y 轴方向单元边的线力；

L ——单元长度等效矩阵，计算公式如（3）所示。

$$L = \begin{bmatrix} \frac{I_1}{3} & \frac{I_1}{6} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{I_1}{6} & \frac{I_1 + I_2}{3} & \frac{I_2}{6} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{I_2}{6} & \frac{I_1 + I_2}{3} & \frac{I_3}{6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \frac{(I_{n-2} + I_{n-1})}{3} & \frac{I_{n-1}}{6} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \frac{I_{n-1}}{6} & \frac{I_{n-1}}{3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中：

I_1 ——节点 1 和节点 2 之间的距离； l

I_2 ——节点 2 和节点 3 之间的距离；

I_3 ——节点 3 和节点 4 之间的距离；

I_{n-2} ——节点 n-3 和节点 n-2 之间的距离；

I_{n-1} ——节点 n-1 和节点 n 之间的距离。

7.2.1.4 一条焊线上的多个节点矩和节点间线矩的计算公式如（4）所示：

$$\{M_{x1}, M_{x2}, \dots, M_{xn}\}^T = \{m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}\}^T \quad (4)$$

式中：

M_{x1} ——节点 1 绕 x 轴的力矩；

M_{x2} ——节点 2 绕 x 轴的力矩；

M_{xn} ——节点 n 绕 x 轴的力矩；

m_{x1} ——节点 1 绕 x 轴的力矩；

m_{x2} ——节点 2 绕 x 轴的力矩；

m_{xn} ——节点 n 绕 x 轴的力矩。

7.2.1.5 焊线上任意节点的结构应力计算如公式（5）所示：

$$\sigma_n = \frac{1}{t} L^{-1} \left(F_{yn} + \frac{6}{t} M_{xn} \right) \quad (5)$$

式中：

L^{-1} ——单元长度等效逆矩阵

F_{yn} ——节点力矩阵

M_{xn} ——节点力矩矩阵

7.2.2 等效结构应力计算

等效结构应力计算如公式（6）所示：

$$\Delta S_S = \frac{\Delta \sigma_S}{t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m}} \quad (6)$$

式中：

$\Delta \sigma_S$ ——结构应力；

ΔS_s ——等效结构应力；

m ——常数，值为 3.54；

$I(r)$ ——载荷弯曲比 r 的函数，其计算如公式（7）所示。

$$I(r)^{\frac{1}{m}} = 2.1549r^6 - 5.0422r^5 + 4.8002r^4 - 2.0694r^3 + 0.561r^2 + 0.0097r + 1.5426 \quad (7)$$

式中：

r ——载荷弯曲比，计算如公式（8）所示。

$$r = \frac{|\sigma_b|}{|\sigma_b| + |\sigma_m|} \quad (8)$$

7.3 疲劳寿命计算

7.3.1 寿命评估时应根据主S-N曲线获得等效结构应力对应的循环次数，其计算如公式（9）所示。

$$N = \left(\frac{\Delta S_s}{C_d} \right)^{-1/h} \quad (9)$$

N ——循环次数；

C_d, h ——不同概率分布S-N曲线试验统计常数，根据表2确定。

表2 主S-N曲线方程参数

统计依据	Cd	h
中值	19930.2	0.3195
+2 σ	28626.5	
-2 σ	13875.7	
+3 σ	34308.1	
-3 σ	11577.9	
注：焊态下焊接接头的主 S-N 曲线		

7.3.2 实际作业载荷谱下， n 个循环造成的损伤计算公式如公式（10）所示，当疲劳发生破坏时， $D=1$ 。

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i} \quad (10)$$

8 仿真分析报告

根据具体的分析对象、分析目的等编写分析报告，报告至少包括但不限于以下内容：

- 仿真对象，详细描述组件或者结构、焊接工艺和参数；
- 仿真目标，介绍分析问题背景，说明采取的分析手段、阐述预期结果细节；
- 参考标准，说明本次分析参照的国家或其他标准信息，仿真结果是否合格的依据和标准；
- 物理模型，描述需要模拟的物理过程，给定的边界条件及简化假设；
- 分析过程，描述模型处理方式、材料属性、工况及约束（边界）条件、求解参数及求解方式；
- 结果分析，应给出母材整体应力云图，关键位置的局部应力、疲劳损伤云图及典型的图标结果，图中数值应给出解释，图表应简明易懂且不应有无关的信息。

附录 A
(规范性)

基于等效结构应力法的焊缝疲劳分析基本流程图

基于等效结构应力法的焊缝疲劳分析基本流程如图 A.1 所示。

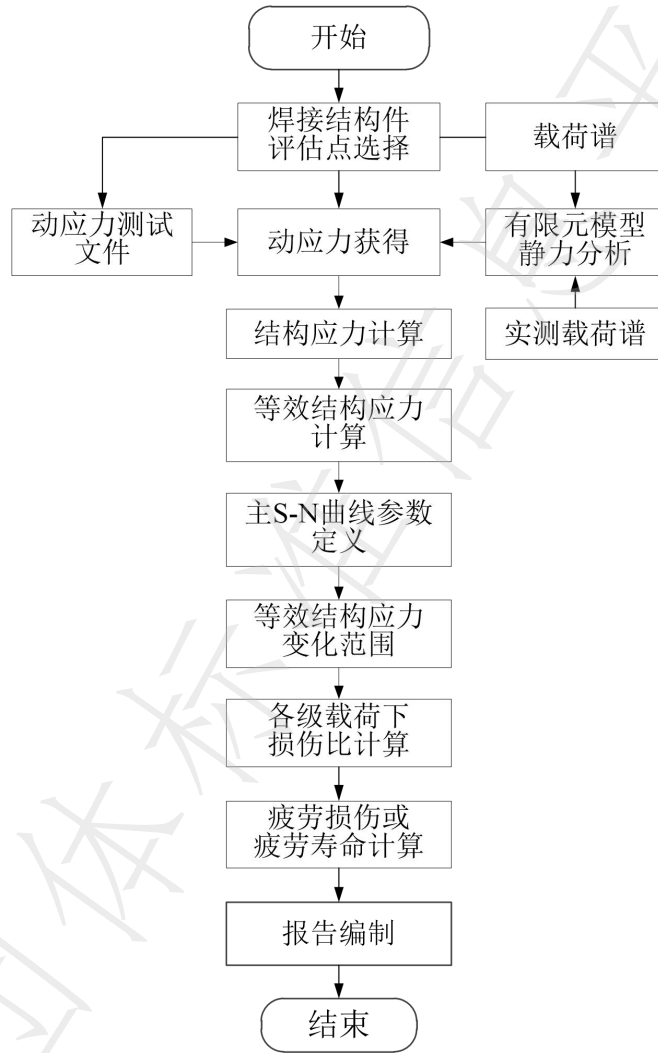


图 A.1 基于等效结构应力法的焊缝疲劳分析流程图

参 考 文 献

- [1] ASME BPVC VIII-2-2015 ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME 锅炉与压力容器标准).

全国团体标准信息平台