

中华人民共和国国家标准

GB/T 19624—2019
代替 GB/T 19624—2004

在用含缺陷压力容器安全评定

Safety assessment of in-service pressure vessels containing defects

2019-06-04 发布

2020-01-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和符号	1
4 总论	8
5 断裂与塑性失效评定	10
6 疲劳失效评定	34
附录 A (资料性附录) 应力腐蚀、高温蠕变和腐蚀疲劳环境对安全评定的影响	43
附录 B (规范性附录) 材料性能数据的测定和选取方法	45
附录 C (规范性附录) 载荷比 L_r 参量的计算	47
附录 D (规范性附录) 应力强度因子 K_I 的计算	54
附录 E (规范性附录) 缺陷间的干涉效应系数	80
附录 F (资料性附录) 平面缺陷的分析评定方法	83
附录 G (规范性附录) 压力管道直管段平面缺陷安全评定方法	98
附录 H (规范性附录) 压力管道直管段体积缺陷安全评定方法	105
附录 I (资料性附录) 压力管道弯头和三通体积缺陷安全评定方法	111
附录 J (资料性附录) 材料断裂韧度替代取值经验公式	119
参考文献	121

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》。与 GB/T 19624—2004 相比,主要变化如下:

- 修改了规范性引用文件(见第 2 章,2004 年版的第 2 章);
- 修改了一次应力安全系数(见表 1,2004 年版的表 5-1);
- 修改了焊接修补区、高拘束度焊缝区或焊接残余应力分布情况不明区域焊接残余应力引起的二次应力取值(见 5.4.2.3.4,2004 年版的 5.4.2.4.4);
- 修改了凹坑缺陷的安全评定限定条件和免于评定的判别条件(见 5.8,2004 年版的 5.8);
- 修改了流变应力取值(见 5.8.4 和 H.7,2004 年版的 5.8.4 和 H.7);
- 增加了内压圆筒整圈内表面环向裂纹、半椭圆表面轴向和环向裂纹、椭圆埋藏轴向或环向裂纹 L_r 的计算公式,修改了内压球壳上长 $2a$ 穿透裂纹 L_r 的计算公式和适用范围,增加了示意图(见附录 C,2004 年版的附录 C);
- 增加了内压圆筒整圈内表面环向裂纹、半椭圆表面轴向和环向裂纹、椭圆埋藏轴向或环向裂纹、内压球壳上长 $2a$ 穿透裂纹 K_I 的计算公式,删除了十字接头中的焊根裂纹 K_I 的计算公式(见附录 D,2004 年版的附录 D);
- 增加了腐蚀疲劳对安全评定的影响(见附录 A);
- 修改了起裂时载荷比 L_F^* 的确定方法(见 G.4.2.2,2004 年版的 G.4.2.2);
- 修改了无量纲的含缺陷管道在纯内压下的塑性极限内压的计算公式(见 H.11.1,2004 年版的 H.11.1);
- 增加了压力管道弯头和三通体积缺陷安全评定方法(见附录 I);
- 增加了材料断裂韧性替代取值经验公式(见附录 J)。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本标准起草单位:中国特种设备检测研究院、合肥通用机械研究院有限公司、国家市场监督管理总局特种设备安全监察局、北京航空航天大学、华东理工大学、南京工业大学、浙江工业大学、清华大学。

本标准主要起草人:谢铁军、陈学东、孙亮、贾国栋、张峥、轩福贞、赵建平、高增梁、范志超、邵珊珊、刘长军、刘应华、王辉、董杰、谢国山、韩志远、曹逻炜、王冰、王笑梅。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 19624—2004。



引 言

为了适应国家有关法规、规章中关于在用含缺陷压力容器、压力管道安全评定要求和工程需要,我国陆续开展了“七五”重点科技项目“带缺陷压力容器安全性评定研究”、“八五”国家重点攻关课题“在役锅炉压力容器安全评估与爆炸预防技术研究”、“九五”国家重点科技攻关课题“在役工业压力管道安全评估与重要压力容器寿命预测技术研究”,在这些研究工作的基础上,于2004年形成GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》。该标准依据“合于使用”和“最弱环”原则,用于判别在用含缺陷压力容器在规定的使用条件下能否继续安全使用。GB/T 19624—2004的主要起草单位及人员为:中国特种设备检测研究中心陈钢、李学仁、左尚志、孙亮、陶雪荣、贾国栋;北京航空航天大学钟群鹏、田永江;华东理工大学李培宁、王志文;清华大学余寿文、董亚民;合肥通用机械研究所陈学东、张立权、何处仁、王冰;中国石化经济技术研究院寿比南;浙江工业大学张康达;大连理工大学秦红;中国通用石化机械工程公司肖有谷;浙江大学王宽福;南京工业大学沈士明。

为了解决标准实施中的问题,后续又开展了“十五”国家重点科技攻关课题“城市埋地燃气管道及工业特殊承压设备安全保障关键技术研究”、“十一五”国家科技支撑课题“大型高参数高危险性成套装置长周期运行安全保障关键技术研究”、质检公益项目“基于损伤模式的承压设备合于使用评价技术研究及应用”等研究工作,结合国际上有关技术的发展,完成了对GB/T 19624—2004的修订。

在用含缺陷压力容器安全评定

1 范围

本标准规定了在用含缺陷压力容器安全评定的术语、定义和符号、总论、断裂与塑性失效评定、疲劳失效评定。

本标准适用于在用钢制含超标缺陷压力容器的安全评定。锅炉、管道以及其他金属材料制容器中的受压元件在进行安全评定时也可参照使用。

本标准适用于含下列类型缺陷的受压元件的安全评定：

- a) 平面缺陷：包括裂纹、未熔合、未焊透、深度大于或等于 1 mm 的咬边等；
- b) 体积缺陷：包括凹坑、气孔、夹渣、深度小于 1 mm 的咬边等。

本标准不适用于下列压力容器和结构：

- a) 核能装置中承受核辐射的压力容器和结构；
- b) 机器上非独立的承压部件(如压缩机、发电机、泵、柴油机的承压壳或气缸等)；
- c) 承受直接火的受压元件；
- d) 电力行业专用的封闭式电气设备的电容压力容器(封闭电器)；
- e) 潜在失效模式包含蠕变的压力容器和结构。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 150.2 压力容器 第 2 部分：材料

GB/T 228(所有部分) 金属材料 拉伸试验

GB/T 4161 金属材料 平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法

GB/T 6398 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法

GB/T 21143—2014 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法

JB/T 4732 钢制压力容器 分析设计标准

NB/T 47013.2 承压设备无损检测 第 2 部分：射线检测

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

超标缺陷 defect exceeding standard

超过有关压力容器制造或验收法规、标准所规定的容许尺寸的缺陷。

3.1.2

断裂评定 fracture assessment

采用断裂力学的方法评价含缺陷压力容器和结构能否排除断裂失效的安全评定。

3.1.3

塑性失效评定 plastic collapse assessment

采用塑性极限分析的方法评价含缺陷压力容器和结构能否排除塑性失效的安全评定。

3.1.4

疲劳评定 fatigue assessment

评价含缺陷压力容器和结构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。

3.1.5

缺陷表征 defect characterization

缺陷的规则化

将实际缺陷按规则简化为一个简单几何形状的缺陷。



3.1.6

等效裂纹尺寸 equivalent crack size

在平面缺陷的简化评定中,按等应力强度因子的原则,将表征后的椭圆埋藏裂纹或半椭圆表面裂纹用具有相等应力强度因子的穿透裂纹代替,该穿透裂纹的半长称为上述椭圆埋藏裂纹或半椭圆表面裂纹的等效裂纹尺寸。

3.1.7

塑性极限载荷 plastic collapse load

采用极限分析方法,按理想塑性材料假设,以实际材料屈服强度和抗拉强度的平均值作为材料的流变应力进行计算,所得到的该结构所能承受的最大载荷。

3.1.8

塑性屈服载荷 plastic yield load

采用极限分析的方法,按理想塑性材料假设,以实际材料屈服强度进行计算所得到的结构所能承受的最大载荷。

3.1.9

鼓胀效应 bulging effect

内压对壳面的作用力迫使缺陷部位壳体局部凸出,导致实际的裂纹尖端应力强度因子值高于未考虑局部凸出时计算所得的应力强度因子值的现象。

3.1.10

鼓胀效应系数 coefficient of bulging effect

鼓胀效应所导致的应力强度因子增大的放大倍数。

3.1.11

ROR 材料 ROR material

应力应变关系满足 $\epsilon/\epsilon_s = \sigma/\sigma_s + \alpha(\sigma/\sigma_s)^n$ 的材料。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

- A ——材料疲劳裂纹扩展速率与 ΔK 关系式中的系数, $N^{-m} \cdot mm^{(1+3m/2)} \cdot cycle^{-1}$;
- A_p ——内压的作用面积, mm^2 ;
- A_s ——接管承载面积, mm^2 ;

- a ——平面缺陷规则化后的表征裂纹尺寸(穿透裂纹长度的一半;二维缺陷椭圆化后短轴长度的一半,即表面裂纹的深度、埋藏裂纹自身高度的一半,或角裂纹沿接管壁的深度), mm;
- a_1 ——相邻两共面裂纹中较大者的 a 值(共面夹渣较深者的 a 值), mm;
- a_2 ——相邻两共面裂纹中较小者的 a 值(共面夹渣较浅者的 a 值), mm;
- a_{45} ——接管拐角平分线方向的拐角裂纹深度, mm;
- a_f ——裂纹疲劳扩展后 a 的最终尺寸, mm;
- a_i ——第 i 个疲劳(应力)循环后的 a 值, $i = 1, 2, \dots, n$, mm;
- a_j ——疲劳扩展分段算法中第 j 计算段中裂纹尺寸 a 的近似平均值, $j = 1, 2, \dots, u$, mm;
- a_0 ——疲劳分析初始裂纹的 a 值, mm;
- \bar{a} ——简化评定中缺陷的等效裂纹尺寸, mm;
- \bar{a}_m ——简化评定中缺陷的最大容许等效裂纹尺寸, mm;
- B ——评定用壳体计算厚度,即扣除一个评定周期的内、外壁腐蚀量后的缺陷附近容器壳体壁厚($B = B_0 - C_2$), mm;
- B_1 ——计算对接焊接接头中因错边引起的弯曲二次应力时,错边两侧的容器壁厚的较大值, mm;
- B_2 ——计算对接焊接接头中因错边引起的弯曲二次应力时,错边两侧的容器壁厚的较小值, mm;
- B_{45} ——接管拐角平分线方向的容器壁厚, mm;
- B_{\min} ——接管内拐角至外拐角的距离, mm;
- B_n ——评定用接管计算厚度,即扣除一个评定周期内外壁腐蚀量后的缺陷附近接管壁厚, mm;
- B_0 ——缺陷附近实测容器壳体壁厚, mm;
- b ——在计算对接焊接接头中因错边引起的弯曲二次应力的公式中,容器壁厚参数的指数项;
- C_2 ——一个评定周期内因内外壁介质腐蚀而导致的壁厚减薄量, mm;
- c ——表征椭圆埋藏裂纹或半椭圆表面裂纹在沿壳体表面方向的半长, mm;
- c_1 ——相邻两共面裂纹中较大者的 c 值(共面夹渣中较深者的 c 值), mm;
- c_2 ——相邻两共面裂纹中较小者的 c 值(共面夹渣中较深者的 c 值), mm;
- c_f ——裂纹疲劳扩展后 c 的最终尺寸, mm;
- c_i ——第 i 个疲劳(应力)循环后的 c 值, mm;
- c_j ——疲劳扩展分段算法中第 j 计算段中裂纹尺寸 c 的近似平均值, $j = 1, 2, \dots, u$, mm;
- c_0 ——疲劳分析初始裂纹的 c 值, mm;
- D ——容器平均直径, mm;
- D_n ——接管平均直径, mm;
- d ——疲劳评定时,大小不同的应力变化范围的种数;
- d' ——计算对接焊接接头中因棱角引起的弯曲二次应力时,在与焊缝垂直的截面上,棱角的直边段在壁厚方向上的投影长度的一半, mm;

da/dt	——应力腐蚀裂纹扩展速率, mm/s;
E	——在评定温度下的材料弹性模量, MPa;
e	——表征埋藏椭圆裂纹中心偏离壁厚中心的偏心距, mm;
e_1	——错边量, mm;
F_{ch}	——接管拐角裂纹的边界修正因子;
f	—— f_b 及 f_m 的总称;
f_b	—— f_b^A 及 f_b^B 的总称;
f_b^A	——计算由弯曲应力 σ_B 引起的裂纹尺寸 a 方向裂纹尖端处应力强度因子时所用的裂纹构形因子;
f_b^B	——计算由弯曲应力 σ_B 引起的裂纹尺寸 c 方向裂纹尖端处应力强度因子时所用的裂纹构形因子;
f_{cc}	——计算拐角裂纹的 K_I 时所用的因子;
f_m	—— f_m^A 及 f_m^B 的总称;
f_m^A	——计算由薄膜应力 σ_m 引起的裂纹尺寸 a 方向裂纹尖端处应力强度因子时所用的裂纹构形因子;
f_m^B	——计算由薄膜应力 σ_m 引起的裂纹尺寸 c 方向裂纹尖端处应力强度因子时所用的裂纹构形因子;
G	——相邻两裂纹间弹塑性干涉效应系数;
G_0	——凹坑缺陷无量纲参数;
h	——缺陷沿板厚方向的实测最大自身深度, mm;
h_w	——填角焊缝焊脚尺寸, mm;
i	—— d 种应力变化范围的各自代号, $i = 1, 2, \dots, d$;
J	—— J 积分值, N/mm;
$J_{0.05}$	——裂纹稳定扩展量为0.05 mm时所对应的 J 积分值, N/mm;
$J_{0.2BL}$	——稳定裂纹扩展为0.2 mm钝化偏置线时对应的非尺寸敏感断裂抗力 J , N/mm;
$J_{c(B)}$	——当 Δa 小于0.2 mm钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或pop-in时的 J 积分断裂抗力, N/mm;
J_{IC}	——材料 J 积分断裂韧度, N/mm;
J_i	——按金相剖面法测得的材料 J 积分断裂韧度, N/mm;
$J_R(\Delta a)$	——裂纹稳定扩展 Δa 时的延性撕裂断裂韧度, N/mm;
j	——裂纹扩展分成 u 段计算的段次, $j = 1, 2, \dots, u$;
K_C	——以应力强度因子表示材料的断裂韧度,或由 J 积分断裂韧度/CTOD断裂韧度换算的以应力强度因子表示的材料断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
K_I	——I型应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
K_{IC}	——材料的平面应变断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
K_{ISCC}	——材料在相应介质环境下产生应力腐蚀开裂的界限应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
K_p	——平面缺陷常规评定中考虑了安全系数后,以应力强度因子表示的材料断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;

K_r	——平面缺陷常规评定用断裂比,指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;
K_t	——应力集中系数;
K_I^P	——一次应力引起的应力强度因子,MPa· \sqrt{m} 或 N/mm ^{3/2} ;
K_I^S	——二次应力引起的应力强度因子,MPa· \sqrt{m} 或 N/mm ^{3/2} ;
KV_2	——评价温度下夏比 V 型缺口标准试样冲击吸收能量,J;
k	——两凹坑间的最小间距, mm;
L	——板长度的一半, mm;
L_r	——载荷比,指引起一次应力的施加载荷与塑性屈服极限载荷的比值,表示载荷接近于材料塑性屈服极限载荷的程度;
L_w	——有焊趾裂纹或填角焊焊根裂纹的焊接接头上两相邻对称焊趾间的距离, mm;
L_r^{\max}	—— L_r 的容许极限;
l	——平面缺陷沿壳体表面方向的实测最大长度, mm;
l'	——计算对接焊接接头中因棱角引起的弯曲二次应力时,在与焊缝垂直的截面上,棱角两直边段总跨度的一半, mm;
M	——相邻两裂纹间的线弹性干涉效应系数;
M_g	——鼓胀效应系数;
M_σ	——应力集中修正因子;
m	——疲劳裂纹扩展速率与 ΔK 关系式中的指数;
N	——恒幅疲劳应力循环总次数, cycle;
n	——ROR 材料的应变硬化指数;
n_i	——表示 $(\Delta\sigma_m)_i$ 及 $(\Delta\sigma_B)_i$ 的应力变化范围的循环次数, cycle;
P	——一次应力, MPa;
P_b	——一次弯曲应力, MPa;
P_L	——以材料流变应力值进行极限分析所得到的结构塑性极限载荷, MPa;
P_m	——一次薄膜应力, MPa;
p	——安全评定要求的容器工作压力, MPa;
p_1, p_2	——埋藏缺陷距壳体两表面的距离, 且 $p_1 \leq p_2$, mm;
p_L	——含凹坑缺陷的容器的塑性极限载荷, MPa;
p_{L0}	——与含凹坑缺陷的容器材料及尺寸相同的无缺陷受压元件的塑性极限载荷, MPa;
p_{\max}	——已经计入安全裕度的含凹坑缺陷的容器最高容许工作压力, MPa;
Q	——二次应力, MPa;
Q_b	——二次弯曲应力, MPa;
Q_m	——二次薄膜应力, MPa;
R	——容器平均半径, mm;
R_i	——容器内半径, mm;
R_{in}	——接管内半径, mm;
R_o	——容器外半径, mm;
R_σ	——应力比,指应力循环中最小应力与最大应力之比;
S_r	——施加载荷与流变强度载荷的比值;

- $(S^3 N)_x$ —— 工况要求承受的疲劳强度参量, $N^3/\text{mm}^6 \cdot \text{cycle}$;
 $(S^3 N)_y$ —— 缺陷容许承受的疲劳强度参量, $N^3/\text{mm}^6 \cdot \text{cycle}$;
 s —— 两共面裂纹间的间距, mm;
 s_0 —— 判别两共面裂纹是否应合并的临界间距, mm;
 s_1 —— 两共面裂纹或夹渣之间沿壁厚方向的最小距离, mm;
 s_2 —— 两共面裂纹或夹渣之间沿壳壁表面方向的最小距离, mm;
 s_3 —— 两非共面裂纹或夹渣中两面之间的最小距离, mm;
 T —— 温度, $^{\circ}\text{C}$;
 T_0 —— 可忽略材料蠕变效应的温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t —— 时间, h;
 u —— 裂纹疲劳扩展分段计算法中 n_i 的分段段数;
 W —— 试样宽度的一半, mm;
 w —— 棱角尺寸, mm;
 X —— 规则化后椭球形凹坑在壳壁表面的椭圆长轴尺寸的一半, mm;
 X_1 —— 相邻两凹坑中较大者的 X 值, mm;
 X_2 —— 相邻两凹坑中较小者的 X 值, mm;
 X_b —— 平面缺陷简化评定用弯曲应力折合为当量拉伸应力的折合系数;
 X_r —— 平面缺陷简化评定用焊接残余应力折合为当量拉伸应力的折合系数;
 Y —— 规则化后椭球形凹坑在壳壁表面的椭圆短轴尺寸的一半, mm;
 Y_1 —— 相邻两凹坑中较大者的 Y 值, mm;
 Y_2 —— 相邻两凹坑中较小者的 Y 值, mm;
 y —— 计算对接焊接接头中因棱角引起的弯曲二次应力时,在与焊缝垂直的截面上,棱角直边段在壁厚方向上的投影长度, mm;
 Z —— 规则化后椭球形凹坑的深度, mm;
 ΔK —— 裂纹尖端应力强度因子变化范围, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 ΔK_a —— a 方向裂纹尖端处的 ΔK , $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 ΔK_c —— c 方向裂纹尖端处的 ΔK , $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 $(\Delta K_a)_{i-1}$ —— 按 a_{i-1}, c_{i-1} 及 $(\Delta\sigma_m)_i, (\Delta\sigma_B)_i$ 计算的 a 方向裂纹尖端处的 ΔK , $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 $(\Delta K_c)_{i-1}$ —— 按 a_{i-1}, c_{i-1} 及 $(\Delta\sigma_m)_i, (\Delta\sigma_B)_i$ 计算的 c 方向裂纹尖端处的 ΔK , $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 $[(\Delta K_a)_i]_{j-1}$ —— 按 $a = a_{j-1}, c = c_{j-1}$ 及 $(\Delta\sigma_m)_i, (\Delta\sigma_B)_i$ 计算的 a 方向裂纹尖端处的 ΔK , $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 $[(\Delta K_c)_i]_{j-1}$ —— 按 $a = a_{j-1}, c = c_{j-1}$ 及 $(\Delta\sigma_m)_i, (\Delta\sigma_B)_i$ 计算的 c 方向裂纹尖端处的 ΔK , $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 ΔK_{th} —— 疲劳裂纹扩展的应力强度因子变化范围阈值, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 ΔK^{p} —— 一次应力变化引起的应力强度因子变化范围, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 ΔK^{s} —— 二次应力强度因子变化范围, $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 或 $\text{N}/\text{mm}^{3/2}$;
 $(\Delta P_b)_i$ —— 一次应力的 $(\Delta\sigma_B)_i$, MPa;

$(\Delta P_m)_i$	——一次应力的 $(\Delta\sigma_m)_i$,MPa;
$(\Delta Q_b)_i$	——二次应力的 $(\Delta\sigma_B)_i$,MPa;
$(\Delta Q_m)_i$	——二次应力的 $(\Delta\sigma_m)_i$,MPa;
ΔT	——内外壁温差,℃;
$\Delta\sigma$	——应力变化范围,等于 $\Delta\sigma_m$ 与 $\Delta\sigma_B$ 之和,及 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_2$ 中的较大值,MPa;
$(\Delta\sigma)_i$	——第 <i>i</i> 种应力变化范围, $i = 1, 2, \dots, d$,MPa;
$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$	——截面上应力变化范围分布经线性化处理后的内、外壁上的应力变化范围值,MPa;
$\Delta\sigma_B$	——弯曲应力分量变化范围值,MPa;
$\Delta\sigma_m$	——薄膜应力分量变化范围值,MPa;
$(\Delta\sigma)_{\min}$	——可忽略的最小应力变化范围,MPa;
$(\Delta\sigma_m)_i$	——第 <i>i</i> 种薄膜应力分量变化范围,MPa;
$(\Delta\sigma_B)_i$	——第 <i>i</i> 种弯曲应力分量变化范围,MPa;
α'	——计算对接焊接接头中因棱角引起的弯曲二次应力时,在与焊缝垂直的截面上,棱角直边段与壳体表面方向所形成的锐角,rad;
β	——计算对接焊接接头中因棱角引起的弯曲二次应力时所使用的中间参量,rad;
δ	——裂纹尖端张开位移(CTOD)值,mm;
$\delta_{0.05}$	——裂纹稳定扩展量为0.05 mm时所对应的COD值,mm;
$\delta_{0.2BL}$	——稳定裂纹扩展为0.2 mm钝化偏置线时对应的非尺寸敏感断裂抗力 δ ,mm;
δ_c	——CTOD断裂韧度,mm;
$\delta_{c(B)}$	——当 Δa 小于0.2 mm钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或pop-in时的CTOD断裂抗力,mm;
δ_i	——按金相剖面法测定的材料CTOD断裂韧度,mm;
δ_r	——平面缺陷简化评定用断裂比,指在施加应力作用下的裂纹尖端张开位移与材料的张开位移断裂韧度的比值;
ν	——泊松比;
ρ	——平面缺陷常规评定中计算二次应力的塑性修正因子;
σ	——应力,MPa;
σ_1, σ_2	——截面上的应力分布经线性化处理后的内、外壁上的应力值,MPa;
$\sigma_{0.2}$	——条件屈服强度,即材料拉伸残余应变量为0.2%时所对应的应力值,MPa;
σ_B	——由应力分布线性化规则得到的弯曲应力(由 <i>P</i> 引起的称 P_b ,由 <i>Q</i> 引起的称 Q_b),MPa;
σ_b	——评定温度下材料的抗拉强度,MPa;
σ_m	——薄膜应力(由 <i>P</i> 引起的称 P_m ,由 <i>Q</i> 引起的称 Q_m),MPa;
σ_R	——焊接残余应力,MPa;
σ_R^{\max}	——焊接残余应力 σ_R 在截面上的最大值,MPa;
σ_s	——评定温度下的材料屈服强度,也可用其条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 代替,MPa;
σ_s^w	——评定温度下的焊缝金属的屈服强度,也可用其条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 代替,MPa;
σ_{Σ}	——平面缺陷简化评定中使用的总当量拉伸应力,MPa;
$\sigma_{\Sigma 1}$	——平面缺陷简化评定中,由一次薄膜应力 P_m 及局部应力集中引起的当量拉伸应

	力,MPa;
$\sigma_{\Sigma 2}$	——平面缺陷简化评定中,由一次弯曲应力 P_b 引起的当量拉伸应力,MPa;
$\sigma_{\Sigma 3}$	——平面缺陷简化评定中,由焊接残余应力引起的当量拉伸应力,MPa;
$\bar{\sigma}$	——评定温度下材料的流变应力,MPa;
$\bar{\sigma}'$	——评定温度下材料的流变应力,MPa;
Ψ_1	——平面缺陷常规评定中,为计算 K_r 所涉及的塑性修正因子 ρ 时的中间参量;
θ, φ	——角度, (°);
Φ	——第二类椭圆积分;
ϕ	——焊接接头系数;
η	——表面裂纹或埋藏裂纹的裂纹尖端离壳壁表面的最近距离, mm;
Γ	——平面缺陷简化评定中,计算棱角及错变量的应力集中的中间参量;
ϵ_s	——屈服应变;
ϵ_{Σ}	——裂纹尖端总应变。

4 总论

4.1 总则

采用本标准进行压力容器安全评定除应遵循本标准的规定外,还应遵守国家有关部门颁布的相关法律、法规和规章。

4.2 资格与职责



4.2.1 资格

4.2.1.1 进行压力容器安全评定的单位和人员的资格,应符合国家有关法律、法规和规章规定的资格。

4.2.1.2 在压力容器安全评定中,进行无损检测的人员应持有与实际使用的无损检测方法相一致的Ⅲ级资格证书,且有较丰富的缺陷判别及缺陷尺寸(包括自身高度)测定的经验。

4.2.2 职责

4.2.2.1 进行安全评定的单位应根据所评定对象的缺陷性质、缺陷成因、使用工况以及对缺陷扩展的预测等,对所评定的对象给出明确的评定结论和继续使用的条件。

4.2.2.2 进行安全评定的单位,应对所评定对象的缺陷检验结果和评定结论的正确性负责。

4.3 安全评定的准则与要求

4.3.1 安全评定的一般原则

安全评定应包括对评定对象的状况调查(历史、工况、环境等)、缺陷检测、缺陷成因分析、失效模式判断、材料检验(性能、损伤与退化等)、应力分析、必要的实验与计算,并根据本标准的规定对评定对象的安全性进行综合分析和评价。

4.3.2 失效模式判别

4.3.2.1 失效模式的类型

本标准考虑下列类型的失效模式:

- a) 断裂失效；
- b) 塑性失效；
- c) 疲劳失效。

4.3.2.2 失效模式的判断

判断失效模式应依据同类压力容器或结构的失效分析和安全评定案例与经验、被评定的压力容器或结构的具体的制造和检验资料、使用工况以及缺陷的理化检验和物理诊断结果,且对可能存在的腐蚀、应力腐蚀、高温蠕变环境等对失效模式和安全评定的影响也应予以充分的考虑。应力腐蚀、高温蠕变和腐蚀疲劳环境对安全评定的影响参见附录 A。

4.3.3 安全评定方法的选择

安全评定方法的选择应以避免在规定工况(包括水压试验)下安全评定期内发生各种模式的失效而导致事故的可能为原则。一种评定方法只能评价相应的失效模式,只有对各种可能的失效模式进行判断或评价后,才能作出所评价的含有超标缺陷的容器或结构是否安全的结论。

4.3.4 安全评定所需的参考资料和基础数据

4.3.4.1 安全评定所需的参考资料包括:

- a) 压力容器制造竣工图及强度计算书;
- b) 压力容器制造验收的有关资料,包括材料数据、焊接记录、返修记录、无损检测资料、热处理报告、检验记录和压力试验报告等;
- c) 压力容器运行状况的有关资料,包括介质情况、工作温度、载荷状况、运行和故障记录及历次检验与维修报告等。

4.3.4.2 安全评定所需的基础数据包括:

- a) 缺陷的类型、尺寸和位置;
- b) 结构和焊缝的几何形状和尺寸;
- c) 材料的化学成分、力学和断裂韧性性能数据;
- d) 由载荷引起的应力;
- e) 残余应力。



4.4 安全评定中的基础工作

4.4.1 缺陷检测

应根据安全评定的要求,对被评定对象可能存在的各种缺陷、材料和结构等合理选择有效的检测方法和设备进行全面的检测并确保缺陷检测结果准确、真实、可靠。

对于无法进行无损检测的部位存在缺陷的可能性应有足够的考虑,安全评定人员和无损检测人员应根据经验和具体情况作出保守的估计。

4.4.2 应力分析

应力分析应考虑各种可能的载荷,并根据具体失效模式的安全评定需要和评定方法,采用成熟、可靠的方法计算评定中所需的应力。

4.4.3 材料性能的测试和性能数据的获得

材料性能的测试和性能数据的获得应按有关标准和附录 B 的规定。应充分考虑材料性能数据的分散性并按偏于保守的原则确定所需的材料性能数值。评定计算时,应保证缺陷尺寸、应力和材料性能等数据单位的一致性。

4.5 评定结论与报告

4.5.1 缺陷评定完成后,评定单位应依据国家相关法规、规章和本标准的规定,及时出具完整的评定报告并给出明确的评定结论和继续使用的条件。

4.5.2 评定报告一般应包括以下内容:

- a) 被评定对象的设计、制造、安装、使用等基本情况和数据;
- b) 缺陷检验数据;
- c) 材料性能数据测试或选用;
- d) 应力状况、应力测试和应力分析;
- e) 综合安全评价与评定结论。

4.5.3 评定报告应准确无误,由评定人员编制、评定单位技术负责人审查、评定单位法人代表批准,报告应由编制、审查、批准人员签字并加盖评定单位的有效印章。

5 断裂与塑性失效评定

5.1 评定方法的分类

本章所规定的评定方法,依据评定对象的缺陷类型和评定准则的不同,分为下列四种类型:

- a) 平面缺陷的简化评定(简称简化评定);
- b) 平面缺陷的常规评定(简称常规评定);
- c) 凹坑缺陷的评定(简称凹坑评定);
- d) 气孔和夹渣缺陷的评定(简称气孔夹渣评定)。

对于平面缺陷,可采用简化评定或常规评定方法进行。在特殊和可能的情况下,也可采用分析评定方法进行更为详尽的分析评定。

5.2 安全系数

常规评定所采用的安全系数见表 1。其他评定方法所采用的安全系数,按各相应章节的规定选取。

表 1 常规评定安全系数取值

失效后果	缺陷表征尺寸 分安全系数	材料断裂韧度 分安全系数	应力分安全系数	
			一次应力	二次应力
一般	1.0	1.1	1.1	1.0
严重	1.1	1.2	1.25	1.0

5.3 缺陷的表征

5.3.1 平面缺陷的表征

5.3.1.1 缺陷表征类型和形状

安全评定时,一般应对实测的平面缺陷进行规则化表征处理,将缺陷表征为规则的裂纹状表面缺陷、埋藏缺陷或穿透缺陷。表征后裂纹的形状为椭圆形、圆形、半椭圆形或矩形。

5.3.1.2 缺陷表征尺寸

表征裂纹尺寸应根据具体缺陷情况由缺陷外接矩形的高和长来确定。对穿透裂纹,长为 $2a$;对表面裂纹,高为 a 、长为 $2c$;对埋藏裂纹,高为 $2a$ 、长为 $2c$;对孔边角裂纹,高为 a 、长为 c (见图1)。缺陷外接矩形的长边应与邻近的壳体表面平行。

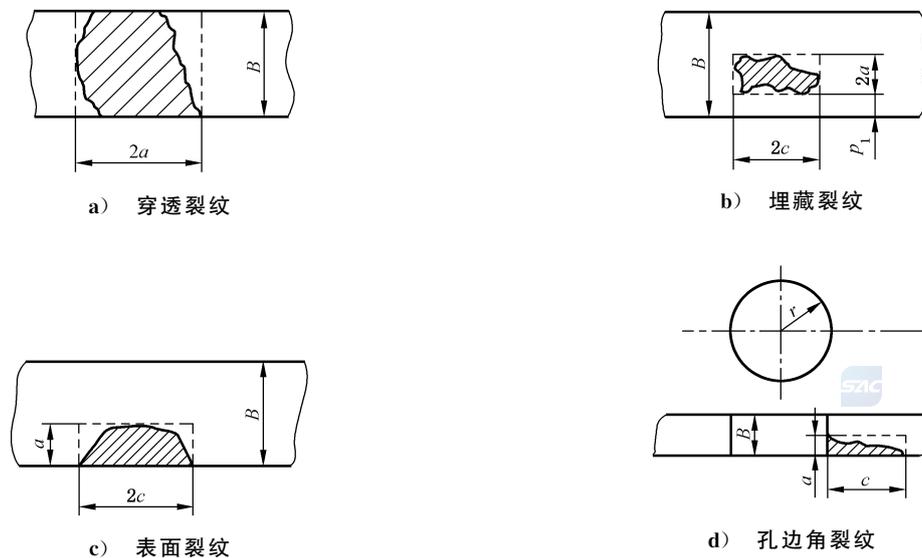


图1 平面缺陷的表征图例

5.3.1.3 表面缺陷的规则化和表征裂纹尺寸

若缺陷沿壳体表面方向的实测最大长度为 l ,沿板厚方向的实测最大深度为 h (见图2),则:

- a) 当 $h > 0.7B$ 时,规则化为长 $2a = l + 2h$ 的穿透裂纹[见图2a)];
- b) 当 $h \leq 0.7B$ 时:
 - 1) $h < l/2$ 时,规则化为 $c = l/2, a = h$ 的半椭圆表面裂纹[见图2b)];
 - 2) $h \geq l/2$ 时,对于断裂评定,规则化为 $c = a = h$ 的半圆形表面裂纹[见图2c)];对疲劳评定,规则化为 $c = l/2, a = h$ 的半椭圆表面裂纹[见图2d)]。

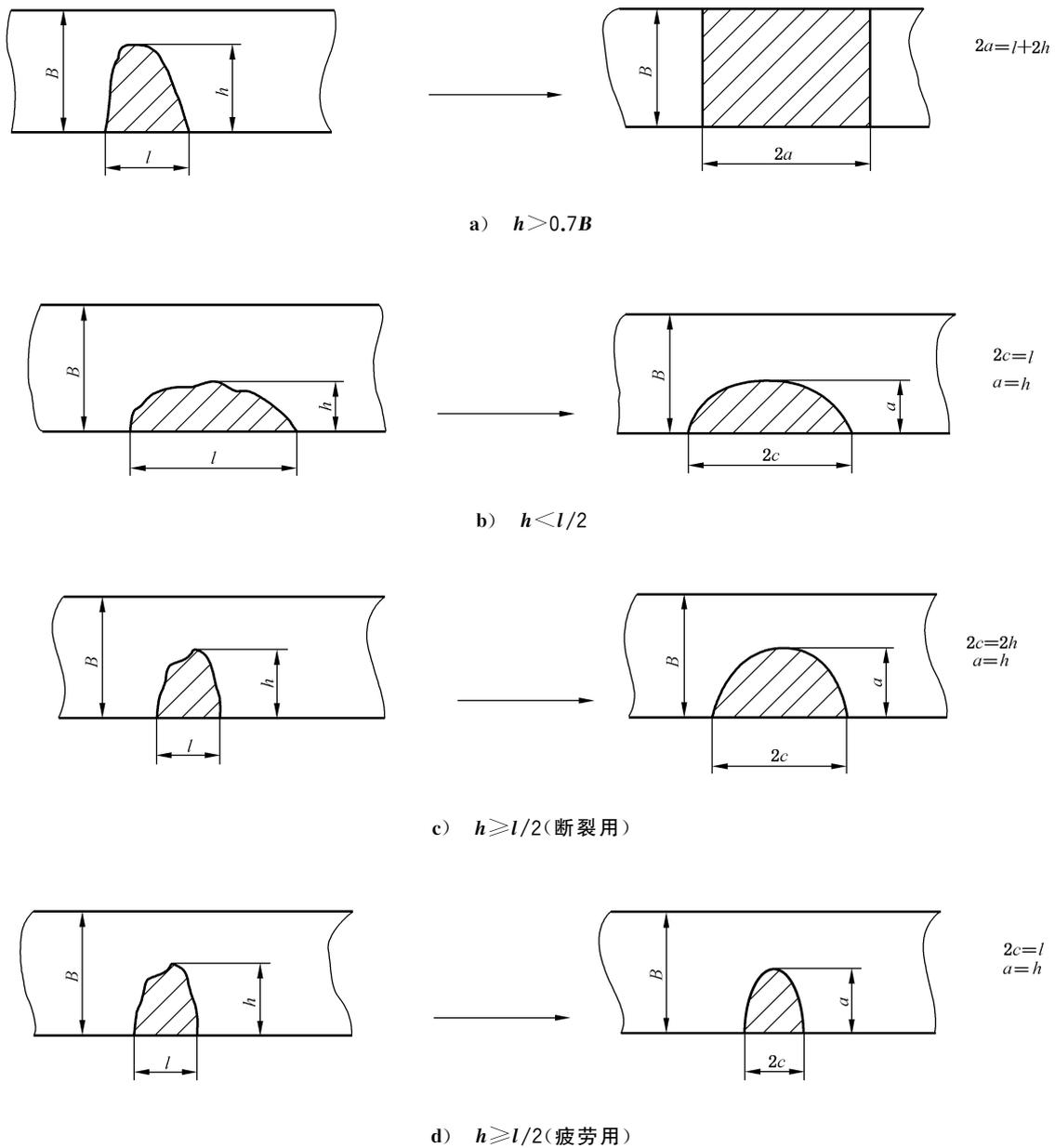


图 2 表面缺陷的规则化图例

5.3.1.4 埋藏缺陷的规则化和表征裂纹尺寸

若缺陷沿壳体表面方向的实测最大长度为 l ，沿板厚方向的实测最大自身高度为 h ，缺陷到壳体内外表面的最短距离分别为 p_1 和 p_2 ，且 $p_1 \leq p_2$ (见图 3)，则：

- a) 当 $p_1 \leq p_2 < 0.4h$ 时，规则化为 $2a = l + 2h$ 的穿透裂纹 [见图 3a)]；
- b) 当 $p_1 < 0.4h \leq p_2$ 时，规则化为 $a = h + p_1$ 、 $2c = l$ 的半椭圆表面裂纹 [见图 3b)]；
- c) 当 $0.4h \leq p_1 \leq p_2$ 时：
 - 1) $h < l$ 时，规则化为 $2c = l$ 、 $2a = h$ 的椭圆形埋藏裂纹 [见图 3c)]；
 - 2) $h \geq l$ 时，对于断裂评定，规则化为 $2c = 2a = h$ 的圆形埋藏裂纹 [见图 3d)]；对于疲劳评定，规则化为 $2c = l$ 、 $2a = h$ 的椭圆埋藏裂纹 [见图 3e)]；

d) 已表征为表面裂纹的埋藏缺陷,即使 $2a + p_1 > 0.7B$,也不再表征为穿透裂纹。

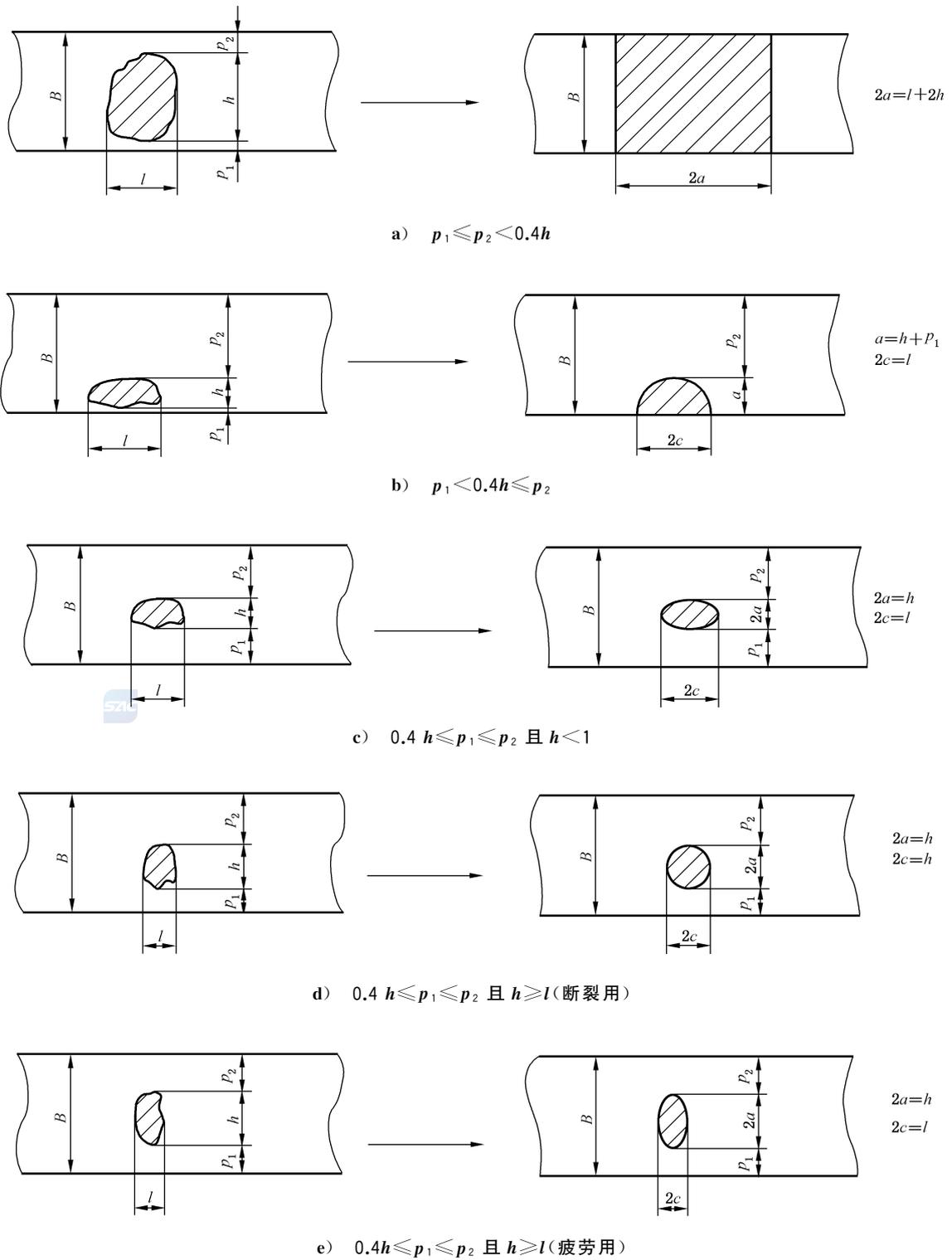


图 3 埋藏缺陷的规则化图例

5.3.1.5 穿透缺陷的规则化和表征裂纹尺寸

若穿透缺陷沿壳体表面方向的实测最大长度为 l , 则规则化为 $2a=l$ 的穿透裂纹(见图 4)。

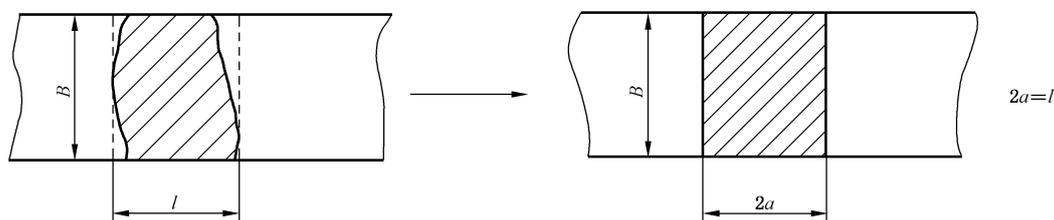


图 4 穿透缺陷的规则化图例

5.3.1.6 斜裂纹的表征

当裂纹平面方向与主应力方向不垂直时, 可将裂纹投影到与主应力方向垂直的平面内, 在该平面内按投影尺寸确定表征裂纹尺寸。

5.3.1.7 裂纹群的处理

5.3.1.7.1 一般原则

当两裂纹或多裂纹相邻时, 应考虑裂纹之间的相互影响。可先按 5.3.1.7.2 的规定确定裂纹间距 s 和合并间距 s_0 , 然后根据情况分别作出合并(复合)、考虑相互影响或忽略相互影响的处理。

5.3.1.7.2 裂纹间距 s 及合并间距 s_0 的确定

图 5 给出的共面裂纹的合并规则中, 裂纹间距 s 及合并间距 s_0 的确定原则和典型情况:

- 在图 5a) 中, $s=s_2, s_0=2c_2$ 。
- 在图 5b)、图 5c)、图 5d) 中, 若 $\frac{s_1}{2a_2} > \frac{s_2}{2c_2}$, 则 $s=s_1, s_0=2a_2$; 否则 $s=s_2, s_0=2c_2$ 。
- 在图 5e) 中, $s=s_2, s_0=2a_2$ 。

5.3.1.7.3 共面裂纹的复合及相互影响处理

共面裂纹的复合及相互影响处理原则如下:

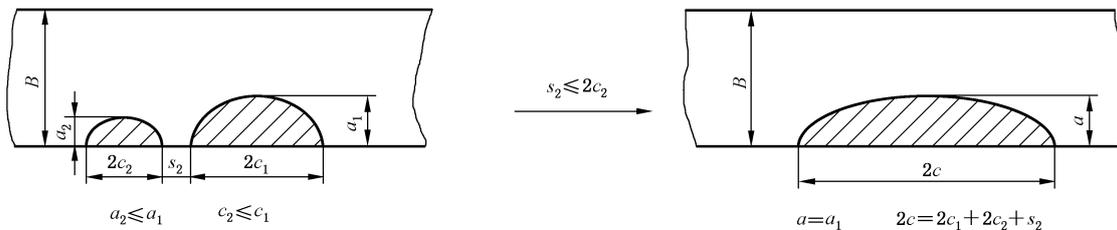
- 若 $s \leq s_0$, 则用包络该两裂纹(或两个以上 $s \leq s_0$ 的裂纹)的外切矩形将其复合, 规则化为一个裂纹。复合后的裂纹不再表征, 也不再与其他裂纹或复合裂纹复合。复合后的裂纹与其他裂纹或复合裂纹之间的相互影响按 b) 或 c) 的规定确定。
- 若 $s_0 < s < 5s_0$, 则两裂纹不必合并, 分别按单个裂纹评定, 但要考虑其相互间的影响。即在简化评定中, 计算的 $\sqrt{\delta_r}$ 值要乘以 1.2 的系数; 常规评定中, 在计算 K_r 时要将应力强度因子乘以弹塑性干涉效应系数 G ; 疲劳评定中, 在计算 ΔK 时要乘以线弹性干涉效应系数 M 。
- 若 $s \geq 5s_0$, 则可忽略其相互影响, 分别作为单个裂纹进行评定。

5.3.1.7.4 非共面裂纹的处理

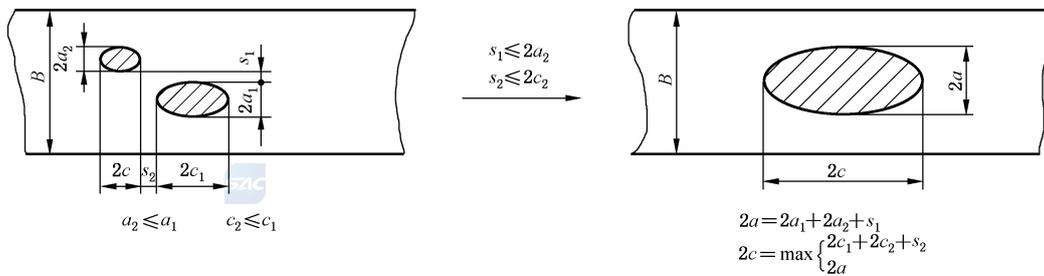
非共面裂纹的处理原则如下:

- 两未穿透裂纹相邻而不共面。当两裂纹面之间的最小距离 s_3 小于较小的表征裂纹尺寸 a_2 的 2 倍时, 即 $s_3 < 2a_2$, 则这两条裂纹可视为共面。

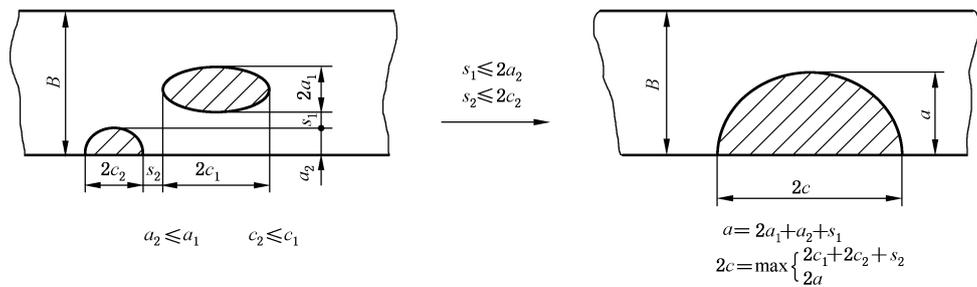
- b) 两穿透裂纹相邻而不共面。当两裂纹面之间的最小距离 s_3 小于较小的表征裂纹尺寸 a_2 的 2 倍时, 即 $s_3 < 2a_2$, 则这两条裂纹可视为共面。
- c) 一条穿透裂纹和一条未穿透裂纹相邻而不共面。当两裂纹面之间的最小距离 s_3 小于较小的表征裂纹长度时, 即 $s_3 < 2c_2$ (或 $s_3 < 2a_2$), 则这两条裂纹可视为共面。
- d) 非共面裂纹规则化为共面裂纹后, 还应考虑裂纹之间的相互影响。
- e) 凡不能视为共面裂纹处理的非共面裂纹, 均应逐个各自进行评定。



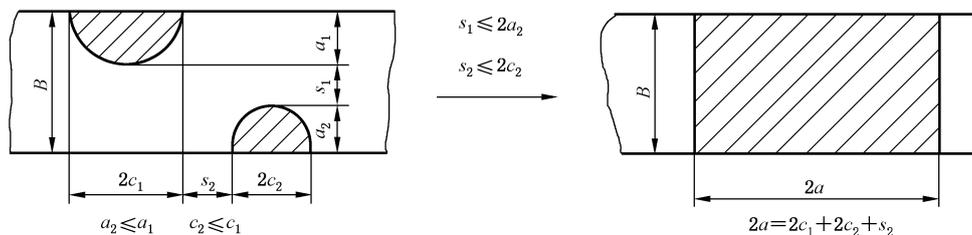
a) 位于同一侧的共同表面缺陷



b) 共面埋藏缺陷

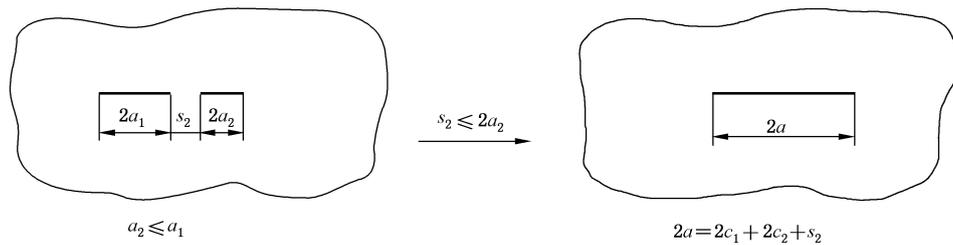


c) 共面表面和埋藏缺陷



d) 位于不同侧的共面表面缺陷

图 5 共面缺陷的合并规则图例



e) 共面穿透缺陷

图 5 (续)

5.3.2 体积缺陷的表征

5.3.2.1 单个凹坑缺陷的表征

表面的不规则凹坑缺陷按其外接矩形将其规则化为长轴长度、短轴长度及深度分别为 $2X$ 、 $2Y$ 及 Z 的半椭圆形凹坑。其中,长轴 $2X$ 为凹坑边缘任意两点之间的最大垂直距离,短轴 $2Y$ 为平行于长轴且与凹坑外边缘相切的两条直线间的距离,深度 Z 取凹坑的最大深度(见图 6)。

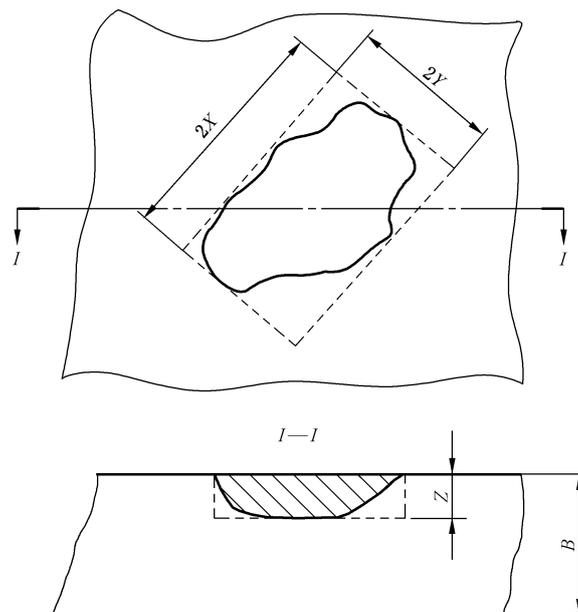


图 6 单个凹坑缺陷表征示意图

5.3.2.2 多个凹坑缺陷的表征

当存在两个以上的凹坑时,应分别按单个凹坑进行规则化并确定各自的凹坑长轴。若规则化后相邻两凹坑边缘间最小距离 k 大于较小凹坑的长轴 $2X_2$,则可将两个凹坑视为互相独立的单个凹坑分别进行评定。否则,应将两个凹坑合并为一个半椭圆形凹坑来进行评定,该凹坑的长轴长度为两凹坑外侧边缘之间的最大距离,短轴长度为平行于长轴且与两凹坑外缘相切的任意两条直线之间的最大距离,该凹坑的深度为两个凹坑的深度的较大值(见图 7)。

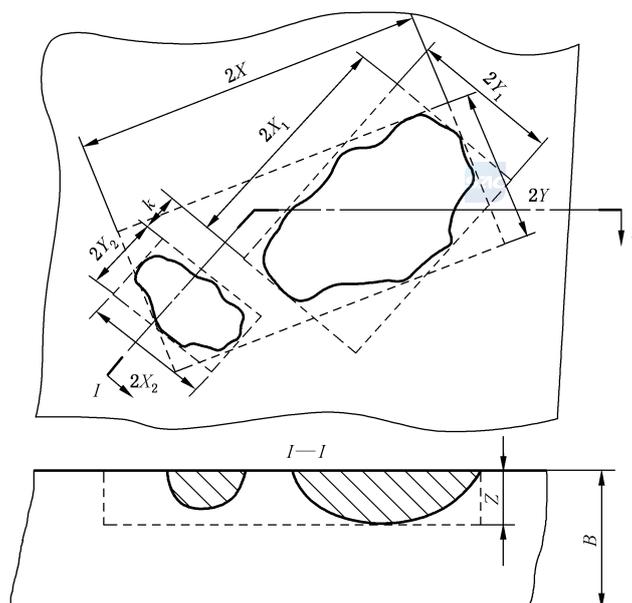


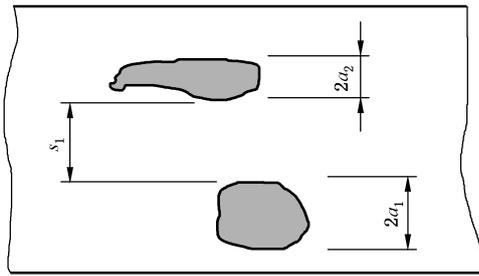
图7 多个凹坑缺陷表征示意图

5.3.2.3 气孔和夹渣缺陷的表征

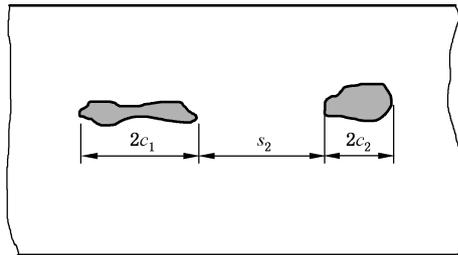
5.3.2.3.1 气孔用气孔率表征。气孔率是指在射线底片有效长度范围内，气孔投影面积占焊缝投影面积的百分比。射线底片有效长度按 NB/T 47013.2 的规定确定，焊缝投影面积为射线底片有效长度与焊缝平均宽度的乘积。

5.3.2.3.2 条形夹渣以其在射线底片上的长度表征。多个夹渣相邻时，应按下述原则考虑夹渣间的相互影响：

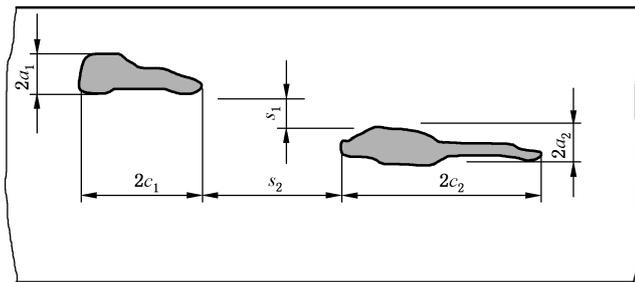
- a) 共面夹渣间的复合
若两个夹渣间的距离小于图 8 中的规定值，则将其复合为一个连续的大夹渣。
- b) 非共面夹渣的处理
当两个非共面埋藏夹渣之间的最小距离 s_3 小于较小夹渣的自身高度的一半时，则这两个夹渣可以视为共面并按 a) 的规定进行复合。否则，均应逐个分别进行评定。
- c) 已复合夹渣的处理
复合后的夹渣不再与其他夹渣或复合夹渣进行复合。



图中 $a_1 > a_2$, 如 $s_1 < 1.25(2a_2)$, 则缺陷相互干涉, 应作为自身高度 $2a = (2a_1 + 2a_2 + s_1)$ 的缺陷, 其有效长度取 $2a$ 和 $2c$ 中的较大者



如 $s_2 < c_1 + c_2$, 有效夹渣长度为 $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_2$



如 $s_1 \leq a_1 + a_2$ 且 $s_2 \leq c_1 + c_2$, 则有效夹渣长度为 $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_2$

图 8 多个夹渣的复合准则图例

5.3.2.3.3 将气孔和夹渣视为平面缺陷进行评定时,应按 5.3.1 的规定进行缺陷的表征。

5.4 平面缺陷评定中所需应力的确定

5.4.1 评定中应考虑载荷、应力及其分类

5.4.1.1 评定中应考虑载荷、应力

评定中应考虑下列载荷及其产生的应力：

- a) 介质的压力及其产生的应力；
- b) 介质和结构的重力载荷及其产生的应力；
- c) 外加机械载荷及其产生的应力；
- d) 振动、风载等载荷及其产生的应力；
- e) 焊接引起的焊接残余应力；
- f) 错边、棱角、壁厚局部减薄、不等厚度等结构几何不连续在载荷作用时所产生的应力；
- g) 温度差、热胀冷缩不协调等所产生的热温差应力或热应力；
- h) 其他应考虑的载荷或应力。

5.4.1.2 安全评定的应力分类规则

应根据应力的作用区域和性质,将其划分为一次应力 P 、二次应力 Q 。除下列特殊规定外,按 JB/T 4732 确定应力分类的规则:

- 由于管系的热膨胀在接管处引起的应力,按一次应力考虑;
- 焊接产生的残余应力,按二次应力考虑;
- 由错边、棱角、局部厚度差所引起的局部应力,按二次应力考虑;
- 由壁温温度差或材料热膨胀系数不同引起的热应力,按二次应力考虑。

5.4.2 应力确定

5.4.2.1 应力确定原则

5.4.2.1.1 在评定中所取用的应力是缺陷部位的主应力。计算该主应力时采用线弹性计算方法,并假设结构中不存在缺陷。

5.4.2.1.2 应按 5.4.1 考虑各种载荷,分别计算被评定缺陷部位结构沿厚度截面上一次应力及二次应力分布,如图 9 中的实线所示,然后将非线性分布的应力按 5.4.2.2 的规定进行缺陷区域的应力线性化处理。

5.4.2.2 缺陷区域的应力线性化规则

对于沿厚度非线性分布的应力,应根据保证在整个缺陷长(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确定沿缺陷部位截面的线性分布应力,如图 9 中虚线所示。

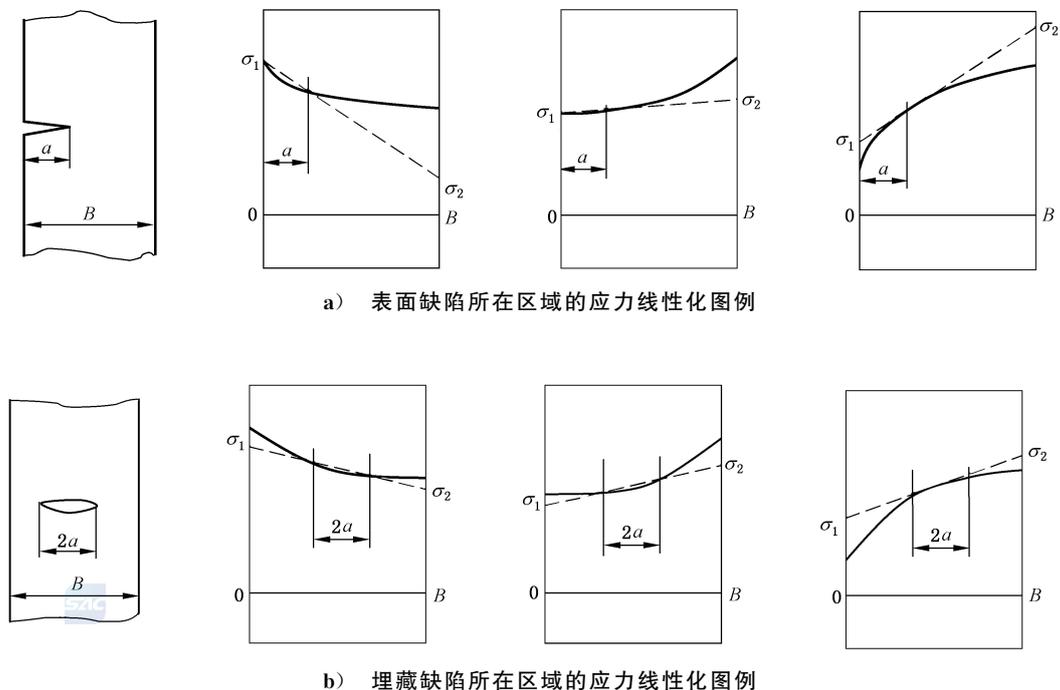


图 9 断裂评定中缺陷所在区域的应力线性化图例

5.4.2.3 应力的分解和 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b 的确定

5.4.2.3.1 对于沿厚度直线分布或经线性化处理后的应力,可按式(1)分解为薄膜应力分量 σ_m 和弯曲应

力分量 σ_B :

$$\begin{cases} \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2 \\ \sigma_B = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

由一次应力分解而得的 σ_m, σ_B , 分别为 P_m, P_b ; 由二次应力分解而得的 σ_m, σ_B , 分别为 Q_m, Q_b 。

5.4.2.3.2 如已知焊接残余应力 σ_R 的实际分布, 则按其实际分布确定 σ_m, σ_B 并用于评定计算。如不能得到焊接残余应力的实际应力分布, 可参照表 2 的规定确定应力分布或 Q_m, Q_b 。

表 2 若干典型焊接接头残余应力分布和估算例

焊接接头		残余应力 σ_R 分布示意图	σ_R 分布或 Q_m, Q_b 的确定
$B < 25 \text{ mm}$ 的对接焊接接头	作用在垂直于焊缝的平面上的 σ_R 分布, 用于垂直焊缝的缺陷		$\frac{\sigma_R}{\sigma_R^{\max}} = \left[1 - 4 \left(\frac{x}{6B} \right)^2 \right] \exp \left[-2 \left(\frac{x}{6B} \right)^2 \right]$ 并假设沿厚度均匀分布 这里取拉伸应力区宽度为 $6B$
	作用在平行于焊缝的平面上的 σ_R 分布, 用于平行焊缝的缺陷		$\sigma_R = 0.3\sigma_R^{\max}$, 均布于截面上 即 $Q_m = 0.3\sigma_R^{\max}, Q_b = 0$
$B \geq 25 \text{ mm}$ 的对接焊接接头	筒体环焊缝等低约束对接焊缝, σ_R 沿板厚的分布		表面裂纹 $a/B \leq 0.5$ 时, $Q_m = -\sigma_R^{\max}, Q_b = 2\sigma_R^{\max}$; 其他情况按线性化规则确定
	球罐、厚壁高压容器, σ_R 沿板厚的分布		表面裂纹 $a/B \leq 0.5$ 时, $Q_m = 0, Q_b = \sigma_R^{\max}$; 其他情况按线性化规则确定
角焊缝、T型对接焊缝及接管连接焊缝在焊趾处及容器焊趾处裂纹	接管焊趾裂纹		接管焊趾裂纹时取 $Q_m = 0.5\sigma_R^{\max}, Q_b = 0.5\sigma_R^{\max}$; 其他情况按线性化规则确定
	容器焊趾裂纹		$Q_m = \sigma_R^{\max}, Q_b = 0$

5.4.2.3.3 表 2 中的 σ_R^{\max} 按如下规则确定:

- a) 对于焊态结构, $\sigma_R^{\max} = \max(\sigma_s^W, \sigma_s)$;
- b) 对于经炉内整体消除应力退火热处理的焊接结构, $\sigma_R^{\max} = (0.3 \sim 0.5) \max(\sigma_s^W, \sigma_s)$;

c) 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,可实测确定或依据经验确定。

5.4.2.3.4 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,可取焊接残余应力引起的二次应力 $Q_m = \max(\sigma_s^w, \sigma_s)$, $Q_b = 0$ 。

5.4.2.3.5 由错边、棱角所产生的应力为二次应力 Q_b ,可按表 3 中所列公式进行计算。

表 3 对接焊接接头中因错边及棱角引起的二次弯曲应力的计算公式

类型	细节图	二次应力 Q_b	注释
容器焊缝的棱角	<p>2l'为两直边段总跨度</p>	设边界条件为: 固支: $\frac{Q_b}{P_m} = \frac{3d'}{B(1-\nu^2)} \frac{\tanh(\beta/2)}{\beta/2}$ 铰支: $\frac{Q_b}{P_m} = \frac{6d'}{B(1-\nu^2)} \frac{\tanh\beta}{\beta}$ 式中 $\beta = \frac{2l'}{B} \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)P_m}{E}}$	设定为理想几何形状 $d' = y/2$ 或 $d' = \alpha' l' / 2$
容器焊缝的错边	<p>$B_1 \geq B_2$ 错边量 e_1为两板厚度中心线偏移量</p>	$\frac{Q_b}{P_m} = \frac{6e_1}{B_1(1-\nu^2)} \frac{B_1^b}{(B_1^b + B_2^b)}$	$b = 1.5$ 用于环焊缝和球壳焊缝 $b = 0.6$ 用于纵焊缝

5.4.2.3.6 已知内外壁温差时,温差应力可按式(2)估算:

$$\begin{cases} Q_b = 1.6\Delta T & (\text{对铁素体钢}) \\ Q_b = 1.8\Delta T & (\text{对奥氏体钢}) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

5.5 材料性能数据的确定

5.5.1 所需的材料性能数据

5.5.1.1 力学和物理性能:屈服强度 σ_s (或条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$)、抗拉强度 σ_b 、弹性模量 E 等表征材料力学性能和物理性能的参数。

5.5.1.2 断裂韧度:简化评定需要 CTOD 断裂韧度 ($\delta_{c(B)}$ 或 $\delta_{0.2BL}$),常规评定需要 J 积分断裂韧度 ($J_{c(B)}$ 、 $J_{0.2BL}$),分析评定还要求获得包括 J_{IC} 的整条 $J_R(\Delta a)$ 阻力曲线。

5.5.2 确定材料性能数据的原则

5.5.2.1 评定中应优先采用实测数据。在无法获得实测数据时,经有关各方协商,在充分考虑材料化学成分、冶金和工艺状态、试样和试验条件等影响因素且保证评定的总体结果偏于安全的前提下,可选取代用数据。

5.5.2.2 实测数据所用的试样尽可能取自被评定缺陷部位的材料,也可取自在化学成分、力学性能、冶金和工艺状态以及使用条件等方面能真实反映缺陷所在部位材料性能的试板。

5.5.2.3 断裂韧度实测试样中的裂纹面和裂纹扩展方向应同被评定结构中的情况一致,也可选取能获得该材料最低断裂韧度数据的其他取样方法。对取自热影响区的试样,应考虑裂纹尖端所在部位组织结构类型和晶粒尺寸等的影响。

5.5.3 材料性能数据的测定和选取

材料性能数据的测定和选取方法见附录 B 的规定。

5.6 平面缺陷的简化评定

5.6.1 评定方法

平面缺陷的简化评定方法以起裂准则为基础,采用简化失效评定图进行评定。简化失效评定图如图 10 所示,由纵坐标 $\sqrt{\delta_r}$ 、横坐标 S_r 以及 $\sqrt{\delta_r}$ 等于 0.7 的水平线和 S_r 等于 0.8 的垂直线所围成的矩形为安全区,该区域之外为非安全区。按本节确定的评定点若位于失效评定图的安全区内,则为安全或可接受;否则,应为不能保证安全或不可接受。

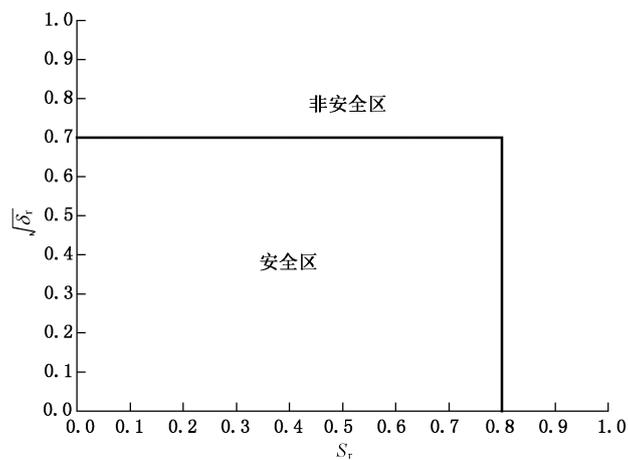


图 10 平面缺陷简化评定的失效评定图

5.6.2 评定程序

平面缺陷的简化评定按下列步骤进行:

- a) 缺陷表征和等效裂纹尺寸的确定;
- b) 应力的确定;
- c) 材料性能数据的确定;
- d) δ 及 $\sqrt{\delta_r}$ 的计算;
- e) S_r 的计算;
- f) 安全性评价。

评定程序如图 11 所示。

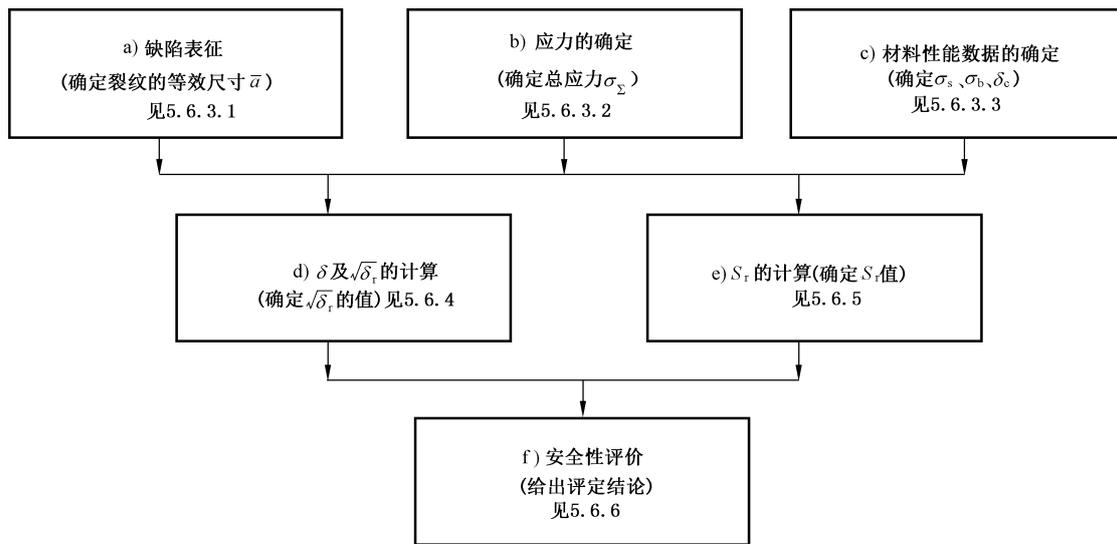


图 11 平面缺陷简化评定程序示意图

5.6.3 简化评定所需的基本数据和参数的确定

5.6.3.1 缺陷表征和等效裂纹尺寸 \bar{a} 的确定

根据缺陷的实际位置、形状和尺寸,按 5.3.1 的规定进行缺陷规则化,获得表征裂纹计算尺寸 a, c , 然后按下列规定计算等效裂纹尺寸 \bar{a} :

- a) 对长为 $2a$ 的穿透裂纹, $\bar{a} = a$ 。
- b) 对长为 $2c$ 、高为 $2a$ 的埋藏裂纹, $\bar{a} = \Omega a$ 。

式中:

$$\Omega = \frac{\left(1.01 - 0.37 \frac{a}{c}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{2a/B}{1 - 2e/B}\right)^{1.8} \left[1 - 0.4 \frac{a}{c} - \left(\frac{e}{B}\right)^2\right]\right\}^{1.08}} \dots\dots\dots (3)$$

$$e = \frac{B}{2} - (a + p_1) \dots\dots\dots (4)$$

适用范围: $a/B \leq 0.45, a/c \leq 1.0$ 。

\bar{a} 值也可从表 4 中求取。

- c) 对长为 $2c$ 、深为 a 的表面裂纹, $\bar{a} = \left(\frac{F_1}{\varphi}\right) a$ 。

式中:

$$F_1 = \begin{cases} 1.13 - 0.09 \frac{a}{c} + \left(-0.54 + \frac{0.89}{0.2 + a/c}\right) \left(\frac{a}{B}\right)^2 + \left[0.5 - \frac{1}{0.65 + a/c} + 14\left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24}\right] \left(\frac{a}{B}\right)^4 & \left(\text{当 } \frac{a}{c} > 0\right) \\ 1.12 - 0.23 \frac{a}{B} + 10.55 \left(\frac{a}{B}\right)^2 - 21.71 \left(\frac{a}{B}\right)^3 + 30.38 \left(\frac{a}{B}\right)^4 & \left(\text{当 } \frac{a}{c} = 0\right) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$\varphi = \left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}\right]^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

适用范围: $a/B \leq 0.8, a/c \leq 1.0$ 。 \bar{a} 值也可从表 5 中求取。

表 4 埋藏椭圆裂纹的等效裂纹尺寸 \bar{a}_{eq}

椭圆裂纹	椭圆裂纹	埋藏																						
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00		
0.00	0.05, ≤ 0.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.05	0.05	0.069	0.066	0.063	0.060	0.057	0.054	0.052	0.049	0.047	0.045	0.042	0.040	0.038	0.036	0.034	0.032	0.030	0.029	0.028	0.027	0.026	0.025	0.024
	0.10	0.059	0.056	0.054	0.052	0.050	0.048	0.046	0.044	0.042	0.040	0.038	0.036	0.034	0.033	0.031	0.030	0.028	0.027	0.026	0.025	0.024	0.023	0.022
	0.15	0.055	0.053	0.051	0.049	0.047	0.045	0.043	0.041	0.039	0.037	0.036	0.035	0.033	0.032	0.031	0.030	0.028	0.027	0.026	0.025	0.024	0.023	0.022
	0.20	0.054	0.052	0.050	0.048	0.046	0.044	0.042	0.041	0.039	0.037	0.036	0.034	0.033	0.032	0.031	0.029	0.028	0.027	0.026	0.025	0.024	0.023	0.022
	0.30	0.053	0.051	0.049	0.047	0.046	0.044	0.042	0.040	0.038	0.037	0.035	0.034	0.032	0.031	0.029	0.028	0.027	0.026	0.025	0.024	0.023	0.022	0.021
0.10	0.35	0.052	0.050	0.049	0.047	0.045	0.043	0.041	0.040	0.038	0.036	0.035	0.033	0.032	0.030	0.029	0.027	0.026	0.025	0.024	0.023	0.022	0.021	0.021
	0.40	0.052	0.050	0.048	0.046	0.045	0.043	0.041	0.039	0.038	0.036	0.035	0.033	0.032	0.030	0.029	0.027	0.026	0.025	0.024	0.023	0.022	0.021	0.021
	0.45	0.052	0.050	0.048	0.046	0.045	0.043	0.041	0.039	0.038	0.036	0.035	0.033	0.032	0.030	0.029	0.027	0.026	0.025	0.024	0.023	0.022	0.021	0.021
	* 0.05	0.185	0.175	0.165	0.156	0.148	0.140	0.132	0.125	0.118	0.111	0.104	0.098	0.092	0.087	0.081	0.076	0.071	0.067	0.062	0.058	0.055	0.052	0.049
	0.10	0.141	0.135	0.129	0.123	0.118	0.112	0.107	0.102	0.097	0.092	0.087	0.083	0.078	0.074	0.070	0.066	0.062	0.059	0.055	0.052	0.049	0.046	0.045
0.15	0.15	0.126	0.121	0.116	0.111	0.106	0.102	0.097	0.093	0.088	0.084	0.080	0.076	0.073	0.069	0.065	0.062	0.058	0.055	0.052	0.049	0.046	0.045	0.045
	0.20	0.119	0.114	0.110	0.105	0.101	0.097	0.092	0.088	0.084	0.080	0.077	0.073	0.070	0.066	0.063	0.060	0.056	0.053	0.050	0.047	0.045	0.044	0.045
	0.25	0.115	0.110	0.106	0.102	0.097	0.093	0.089	0.086	0.082	0.078	0.075	0.071	0.068	0.064	0.061	0.058	0.055	0.052	0.049	0.047	0.045	0.044	0.045
	0.30	0.112	0.108	0.103	0.099	0.095	0.091	0.088	0.084	0.080	0.077	0.073	0.070	0.067	0.063	0.060	0.057	0.054	0.051	0.049	0.046	0.043	0.043	0.043
	0.35	0.110	0.106	0.102	0.098	0.094	0.090	0.086	0.083	0.079	0.076	0.072	0.069	0.066	0.063	0.059	0.056	0.054	0.051	0.048	0.045	0.043	0.043	0.043
0.20	0.40	0.108	0.104	0.100	0.097	0.093	0.089	0.085	0.082	0.078	0.075	0.071	0.068	0.065	0.062	0.059	0.056	0.053	0.050	0.048	0.045	0.043	0.042	0.042
	* 0.10	0.254	0.241	0.229	0.218	0.206	0.196	0.186	0.176	0.166	0.157	0.149	0.140	0.132	0.125	0.117	0.110	0.104	0.097	0.091	0.085	0.079	0.074	0.074
	0.15	0.217	0.207	0.198	0.189	0.180	0.172	0.163	0.155	0.148	0.140	0.133	0.126	0.120	0.113	0.107	0.101	0.095	0.090	0.084	0.079	0.074	0.073	0.074
	0.20	0.198	0.190	0.182	0.174	0.166	0.159	0.152	0.145	0.138	0.131	0.125	0.119	0.113	0.107	0.101	0.096	0.090	0.085	0.080	0.076	0.071	0.071	0.071
	0.25	0.187	0.179	0.172	0.165	0.158	0.151	0.144	0.138	0.132	0.125	0.119	0.114	0.108	0.103	0.097	0.092	0.087	0.082	0.078	0.073	0.069	0.069	0.069
0.25	0.30	0.180	0.173	0.166	0.159	0.152	0.146	0.139	0.133	0.127	0.122	0.116	0.110	0.105	0.100	0.095	0.090	0.085	0.080	0.076	0.072	0.067	0.067	0.067
	0.35	0.174	0.168	0.161	0.155	0.148	0.142	0.136	0.130	0.124	0.119	0.113	0.108	0.103	0.098	0.093	0.088	0.083	0.079	0.075	0.070	0.066	0.066	0.066
	* 0.15	0.329	0.313	0.298	0.283	0.269	0.256	0.243	0.230	0.218	0.206	0.195	0.185	0.174	0.164	0.155	0.146	0.137	0.129	0.121	0.113	0.106	0.106	0.106
	0.20	0.293	0.280	0.267	0.255	0.243	0.232	0.220	0.210	0.199	0.189	0.180	0.170	0.161	0.153	0.144	0.136	0.128	0.121	0.114	0.107	0.100	0.100	0.100
	0.25	0.271	0.260	0.248	0.238	0.227	0.217	0.207	0.197	0.188	0.179	0.170	0.161	0.153	0.145	0.137	0.130	0.123	0.116	0.109	0.103	0.096	0.096	0.096
0.25	0.30	0.257	0.246	0.236	0.226	0.216	0.207	0.197	0.188	0.180	0.171	0.163	0.155	0.147	0.140	0.132	0.125	0.119	0.112	0.106	0.099	0.094	0.094	0.094
	* 0.15	0.463	0.440	0.417	0.395	0.374	0.354	0.335	0.316	0.299	0.282	0.266	0.251	0.236	0.222	0.209	0.196	0.184	0.172	0.161	0.150	0.140	0.140	0.140
	0.20	0.404	0.385	0.366	0.348	0.331	0.315	0.299	0.284	0.269	0.255	0.241	0.228	0.216	0.204	0.192	0.181	0.170	0.160	0.150	0.140	0.132	0.132	0.132
0.25	0.368	0.351	0.335	0.320	0.305	0.291	0.277	0.263	0.250	0.238	0.226	0.214	0.203	0.192	0.181	0.171	0.161	0.152	0.143	0.134	0.126	0.126	0.126	0.126

注 1 带 * 号所在行的埋藏椭圆裂纹需规定需规则化为表面裂纹或穿透裂纹计算(此表所列数据仅供插值时参考)

表 5 表面半椭圆裂纹的等效尺寸 \bar{a}

\bar{a}	\bar{a}																					
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.064	0.064	0.061	0.059	0.056	0.054	0.051	0.048	0.045	0.043	0.040	0.038	0.036	0.033	0.031	0.030	0.028	0.026	0.025	0.023	0.022	0.022
0.10	0.140	0.132	0.127	0.121	0.116	0.110	0.104	0.098	0.092	0.087	0.081	0.076	0.072	0.067	0.063	0.060	0.056	0.053	0.050	0.047	0.044	0.044
0.15	0.240	0.212	0.201	0.190	0.180	0.170	0.160	0.150	0.141	0.132	0.124	0.116	0.109	0.102	0.096	0.090	0.085	0.080	0.075	0.070	0.066	0.066
0.20	0.376	0.310	0.288	0.269	0.252	0.236	0.221	0.207	0.193	0.181	0.169	0.158	0.148	0.139	0.130	0.122	0.114	0.107	0.101	0.095	0.089	0.089
0.25	0.563	0.435	0.393	0.361	0.335	0.311	0.289	0.269	0.250	0.233	0.217	0.203	0.189	0.177	0.165	0.154	0.145	0.136	0.127	0.119	0.112	0.112
0.30	0.827	0.601	0.523	0.471	0.431	0.396	0.366	0.338	0.313	0.290	0.270	0.250	0.233	0.217	0.202	0.189	0.176	0.165	0.155	0.145	0.136	0.136
0.35	1.207	0.825	0.686	0.604	0.544	0.495	0.453	0.416	0.383	0.353	0.326	0.302	0.280	0.260	0.241	0.225	0.210	0.196	0.183	0.171	0.161	0.161
0.40	1.771	1.130	0.891	0.763	0.677	0.609	0.552	0.503	0.460	0.422	0.388	0.357	0.330	0.305	0.283	0.263	0.244	0.228	0.212	0.198	0.186	0.186
0.45	2.636	1.552	1.149	0.955	0.832	0.740	0.664	0.601	0.546	0.498	0.455	0.418	0.384	0.354	0.327	0.303	0.281	0.261	0.243	0.227	0.212	0.212
0.50	3.997	2.137	1.475	1.185	1.013	0.890	0.791	0.710	0.640	0.580	0.528	0.482	0.442	0.406	0.374	0.345	0.319	0.296	0.275	0.256	0.238	0.238
0.55	6.183	2.950	1.884	1.458	1.223	1.060	0.934	0.831	0.744	0.671	0.607	0.552	0.504	0.461	0.423	0.389	0.359	0.332	0.308	0.286	0.266	0.266
0.60	9.734	4.083	2.397	1.781	1.462	1.251	1.092	0.964	0.858	0.768	0.692	0.626	0.569	0.519	0.475	0.435	0.401	0.370	0.342	0.317	0.294	0.294
0.65	15.535	5.657	3.037	2.158	1.733	1.464	1.265	1.108	0.979	0.872	0.782	0.704	0.637	0.579	0.528	0.483	0.444	0.408	0.377	0.348	0.323	0.323
0.70	25.001	7.839	3.833	2.594	2.036	1.697	1.453	1.263	1.109	0.982	0.876	0.786	0.708	0.642	0.583	0.532	0.487	0.448	0.412	0.381	0.352	0.352
0.75	40.356	10.853	4.818	3.095	2.370	1.948	1.652	1.426	1.244	1.096	0.973	0.870	0.781	0.705	0.640	0.582	0.532	0.488	0.448	0.413	0.382	0.382
0.80	65.032	14.988	6.030	3.663	2.731	2.214	1.861	1.594	1.383	1.213	1.072	0.954	0.854	0.769	0.696	0.632	0.576	0.527	0.484	0.446	0.411	0.411

5.6.3.2 总当量应力 σ_Σ 的确定

简化评定计算所需总当量应力 σ_Σ 可按式(7)估算,并保守地假设总当量应力均匀分布在主应力平面上。

$$\sigma_\Sigma = \sigma_{\Sigma 1} + \sigma_{\Sigma 2} + \sigma_{\Sigma 3} \dots\dots\dots(7)$$

式中: $\sigma_{\Sigma 1} = K_t P_m, \sigma_{\Sigma 2} = X_b P_b, \sigma_{\Sigma 3} = X_r Q$ 。

此处, K_t 为焊缝形状引起的应力集中系数, X_b 为弯曲应力折合系数, X_r 为焊接残余应力折合系数, Q 为被评定缺陷部位热应力最大值与焊接残余应力最大值 σ_R^{\max} 的代数和。

表6给出了几种常见焊接接头结构 K_t 的取值,表7给出了 X_b 和 X_r 的取值。

表6 常见焊接接头结构局部应力集中系数 K_t

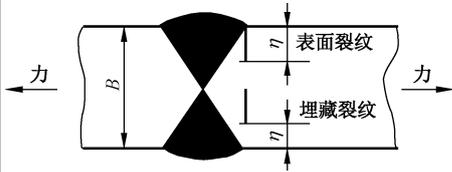
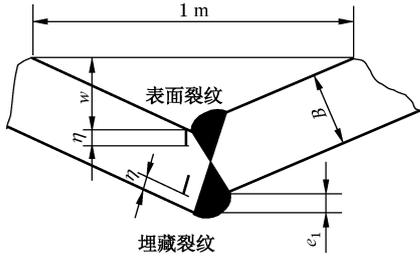
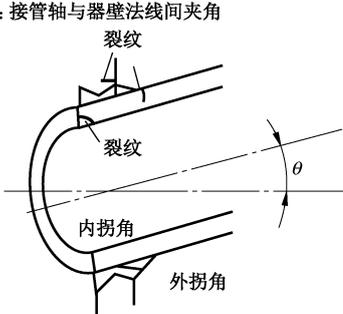
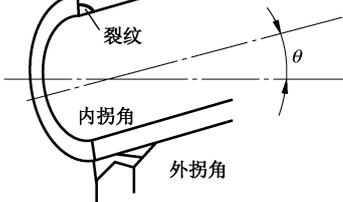
焊缝种类	含缺陷结构示意图	K_t
对接焊接接头结构		$\eta/B \leq 0.15$ 时, $K_t = 1.5$ $\eta/B > 0.2$ 时, $K_t = 1.0$ η/B 介于 0.15~0.2 之间时, K_t 可按线性内插求得 无焊缝增高时,取 $K_t = 1.0$
		$K_t = \Gamma \left[1 + \frac{3(w + e_1)}{\beta B} \right]$ 对 $\eta/B \leq 0.5$ 的表面裂纹取 $\beta = 1$ 对 $\eta/B > 0.5$ 的表面裂纹和埋藏裂纹取 $\beta = 2$ $\Gamma: \eta/B \leq 0.15$ 时, $\Gamma = 1.5$ $\eta/B > 0.2$ 时, $\Gamma = 1.0$ η/B 介于 0.15~0.2 之间时, Γ 可按线性内插求得
接管处内拐角	球壳及球形封头接管 	$K_t = 2.0(1 + 2\sin^2\theta)$
	圆筒接管  <p>注:用于结构尺寸满足分析设计规范的规定时</p>	$K_t = 3.1(1 + 2\sin^2\theta)$ 用于 θ 角平面与容器横截面平行时 $K_t = 3.1[1 + (\tan\theta)^{4/3}]$ 用于 θ 角平面与容器纵截面平行时

表7 X_b 值和 X_r 值的选取

裂纹种类	X_b	X_r		
		裂纹平行熔合线	裂纹垂直熔合线	填角焊缝裂纹
埋藏裂纹	0.25	0.2	0.6	0.6
穿透裂纹	0.5	0.2	0.6	0.6
表面裂纹	弯曲的拉伸侧	0.4~0.6	0.6	0.6
	弯曲的压缩侧			

5.6.3.3 材料性能数据的确定

按 5.5 及附录 B 确定材料的屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 及断裂韧性 δ_c 值。 δ_c 按实际情况可取 $\delta_{c(B)}$ 的值或 δ_i 的值(也可保守地取 $\delta_{0.05}$ 的值), 并将所得的材料断裂韧性 δ_c 除以 1.2 后的值用于 5.6.4 和 5.6.7 计算中所需的 δ_c 值。

5.6.4 δ 及 $\sqrt{\delta_r}$ 的计算

δ 及 $\sqrt{\delta_r}$ 按式(8)和式(10)计算:

$$\delta = \begin{cases} \pi \bar{a} \sigma_s (\sigma_\Sigma / \sigma_s)^2 M_g^2 / E & (\text{当 } \sigma_\Sigma < \sigma_s \text{ 时}) \\ 0.5 \pi \bar{a} \sigma_s (\sigma_\Sigma / \sigma_s + 1) M_g^2 / E & [\text{当 } \sigma_\Sigma \geq \sigma_s \geq (\sigma_{\Sigma 1} + \sigma_{\Sigma 2}) \text{ 时}] \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

M_g ——鼓胀效应系数,按式(9)计算:

$$M_g^2 = \begin{cases} 1 + 1.61 \bar{a}^2 / (RB) & (\text{筒壳轴向裂纹}) \\ 1 + 0.32 \bar{a}^2 / (RB) & (\text{筒壳环向裂纹}) \\ 1 + 1.93 \bar{a}^2 / (RB) & (\text{球壳裂纹}) \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

$$\sqrt{\delta_r} = \begin{cases} \sqrt{\delta / \delta_c} & (\text{单裂纹或复合后的单裂纹或不需要考虑干涉效应的裂纹群}) \\ 1.2 \sqrt{\delta / \delta_c} & (\text{需要考虑干涉效应的裂纹群}) \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

当 $\sigma_s < (\sigma_{\Sigma 1} + \sigma_{\Sigma 2}) \leq 2\sigma_s$ 时, 如果可以获得裂纹尖端的总应变 ϵ_Σ , 则可用 $\epsilon_\Sigma / \epsilon_s$ 代替 σ_Σ / σ_s 代入式(8)的第 2 式中计算 δ 。在计算或估算 ϵ_Σ 时, 仍假设结构中不存在裂纹。

5.6.5 S_r 的计算

S_r 按式(11)计算:

$$S_r = \frac{L_r}{L_r^{\max}} \dots\dots\dots (11)$$

式中: L_r 由 P_m 及 P_b 的值按附录 C 的规定计算 L_r , 其中, 载荷应力不需要考虑安全系数; L_r^{\max} 的值取 1.20 及 $\frac{\sigma_s + \sigma_b}{2\sigma_s}$ 两者中的较小值。

5.6.6 安全性的评价

将计算得到的评定点 $(S_r, \sqrt{\delta_r})$ 绘在图 10 中, 如果评定点落在安全区内, 则评定结论为安全或可接受; 否则, 应为不能保证安全或不可接受。

5.6.7 最大容许等效裂纹尺寸的确定

简化评定的结论也可以采用给出最大容许等效裂纹尺寸 \bar{a}_m 的评定方法。最大容许等效裂纹尺寸 \bar{a}_m 按式(12)计算:

$$\bar{a}_m = \begin{cases} \frac{E \delta_c}{2 \pi \sigma_s (\sigma_\Sigma / \sigma_s)^2 M_g^2} & (\text{当 } \sigma_\Sigma < \sigma_s \text{ 时}) \\ \frac{E \delta_c}{\pi \sigma_s (\sigma_\Sigma / \sigma_s + 1) M_g^2} & [\text{当 } \sigma_\Sigma \geq \sigma_s \geq (\sigma_{\Sigma 1} + \sigma_{\Sigma 2}) \text{ 时}] \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

当 $\bar{a} \leq \bar{a}_m$ 且 $S_r \leq 0.8$ 时, 该缺陷是容许的。

当 $\sigma_s < (\sigma_{\Sigma 1} + \sigma_{\Sigma 2}) \leq 2\sigma_s$ 时, 如果可以获得裂纹尖端的总应变 ϵ_Σ , 则可用 $\epsilon_\Sigma / \epsilon_s$ 代替 σ_Σ / σ_s 代入式



(12)的第2式中计算 \bar{a}_m 。在计算或估算 ϵ_s 时,仍假设结构中不存在裂纹。

5.7 平面缺陷的常规评定

5.7.1 评定方法

平面缺陷的常规评定采用通用失效评定图的方法进行。该失效评定图如图12所示。

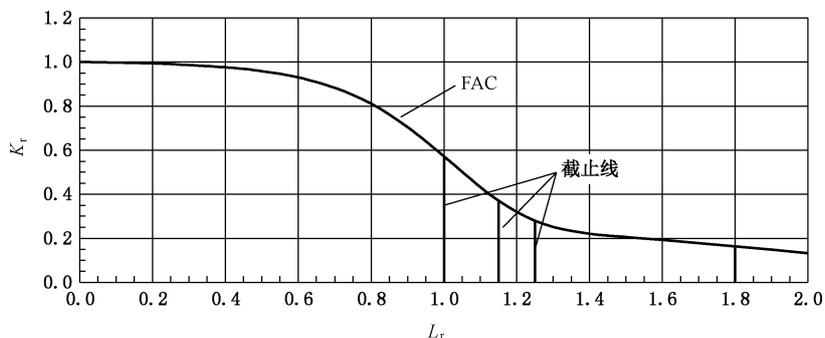


图 12 通用失效评定图

图12中失效评定曲线(FAC)的方程见式(13):

$$K_r = (1 - 0.14L_r^2)(0.3 + 0.7e^{-0.65L_r^6}) \dots\dots\dots(13)$$

截止线的方程见式(14):

$$L_r = L_r^{\max} \dots\dots\dots(14)$$

L_r^{\max} 的值取决于材料特性:

- a) 对奥氏体不锈钢, $L_r^{\max} = 1.8$;
- b) 对无屈服平台的低碳钢及奥氏体不锈钢焊缝, $L_r^{\max} = 1.25$;
- c) 对无屈服平台的低合金钢及其焊缝, $L_r^{\max} = 1.15$;
- d) 对于具有长屈服平台的材料,一般情况下, $L_r^{\max} = 1.0$;当材料温度不高于 200 °C 时, L_r^{\max} 可根据 K_r 值及材料屈服强度级别,由表 8 确定;
- e) 对于不能按钢材类别确定 L_r^{\max} 的材料,可按式(15)计算 L_r^{\max} 的值。

$$L_r^{\max} = \bar{\sigma} / \sigma_s = 0.5(\sigma_b + \sigma_s) / \sigma_s \dots\dots\dots(15)$$

表 8 温度不高于 200 °C 的长屈服平台材料的 L_r^{\max} 值

L_r^{\max}	K_r	
	$235 \text{ MPa} \leq \sigma_s < 350 \text{ MPa}$	$\sigma_s > 350 \text{ MPa}$
1.25	$K_r \leq 0.10$	$K_r \leq 0.13$
1.20	$0.10 \leq K_r < 0.12$	$0.13 \leq K_r < 0.15$
1.15	$0.12 \leq K_r < 0.20$	$0.15 \leq K_r < 0.26$
1.00	$K_r \geq 0.20$	$K_r \geq 0.26$

图12中,由 FAC 曲线、 L_r 截止线和两直角坐标轴所围成的区域之内为安全区,该区域之外为非安全区。

在评定点的计算时,相关的输入参量应根据表 1 的规定取相应的分安全系数。

5.7.2 评定程序

平面缺陷的常规评定按下列步骤进行:

- a) 缺陷的表征；
- b) 应力的确定；
- c) 材料性能数据的确定；
- d) 应力强度因子 K_I^P 和 K_I^S 的计算；
- e) K_r 的计算；
- f) L_r 的计算；
- g) 安全性评价。

评定程序如图 13 所示。

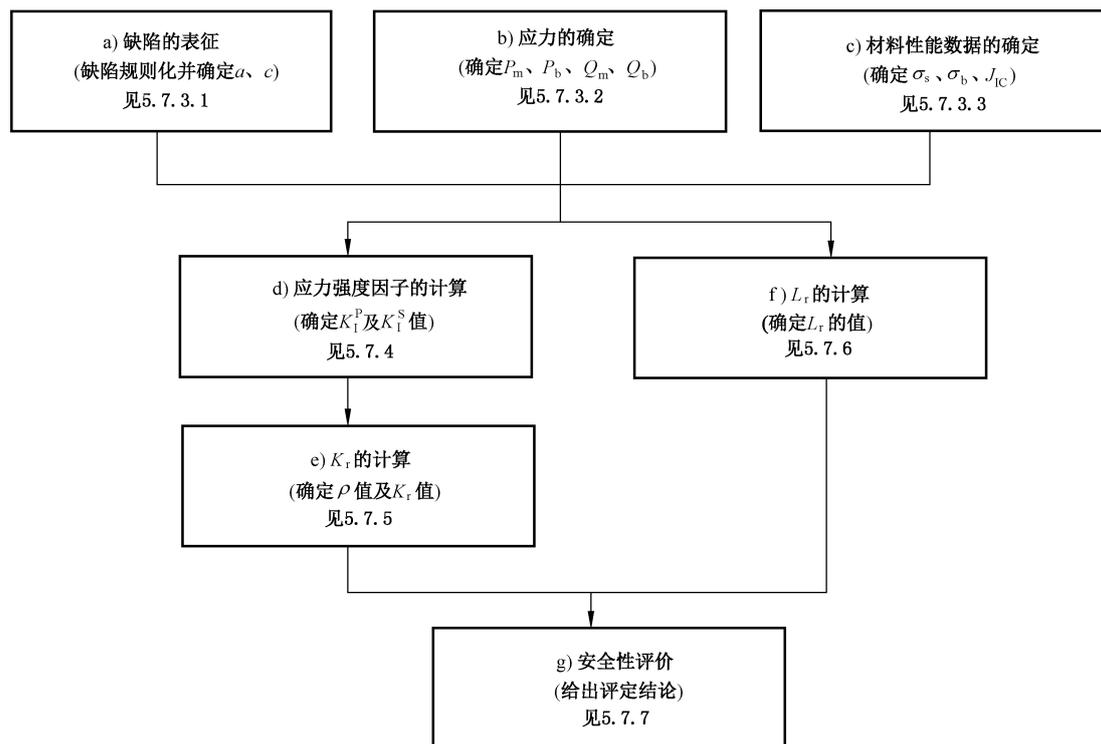


图 13 平面缺陷常规评定程序示意图

5.7.3 平面缺陷常规评定所需基本数据的确定

5.7.3.1 缺陷的表征

对经检测查明的缺陷,根据实际位置、形状和尺寸按 5.3.1 的规定进行缺陷的规则化,并得到相应的表征裂纹尺寸 a 、 c 。将相应的表征裂纹尺寸乘以表 1 规定的表征裂纹安全系数后作为计算用的表征裂纹尺寸 a 、 c 值。

5.7.3.2 应力的确定

常规评定中所需的一次应力和二次应力的应力分量 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b 按以下规定确定:

- a) 按 5.4 的规定,分别确定各种载荷下一次应力、二次应力及各应力分量;
- b) 分别计算各类应力分量的代数和,并乘以表 1 所规定的应力安全系数,由此所得到的各应力值即为用于评定计算的应力 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b 。

5.7.3.3 材料性能数据的确定

5.7.3.3.1 按 5.5 和附录 B 的规定,确定评定工况下材料的屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 及 J 积分断裂韧度 J_{IC} 。 J_{IC} 值按实际情况可取 $J_{0.2BL}$ 值或 J_i 值,也可保守地取 $J_{0.05}$ 的值。

5.7.3.3.2 计算 K_r 所需的材料断裂韧度 K_C 可以由测得的 J 积分断裂韧度 J_{IC} 按式(16)求得:

$$K_C = \sqrt{EJ_{IC}/(1-\nu^2)} \quad \dots\dots\dots(16)$$

5.7.3.3.3 在不能直接得到 J_{IC} 值时,可直接测量材料的平面应变断裂韧度 K_{IC} ,此时计算 K_r 所需的 K_C 值可用 K_{IC} 值代替;也可采用 CTOD 断裂韧度 δ_c 值,按式(17)估算 K_C 的下限值:

$$K_C = \sqrt{1.5\sigma_s\delta_c E/(1-\nu^2)} \quad \dots\dots\dots(17)$$

5.7.4 K_I^P 和 K_I^S 的计算

一次应力 P_m 、 P_b 和二次应力 Q_m 、 Q_b 作用下的应力强度因子 K_I^P 、 K_I^S 按附录 D 的规定计算。计算中所需的表征裂纹尺寸和应力,分别按 5.7.3.1 和 5.7.3.2 的规则确定。

5.7.5 K_r 的计算

断裂比 K_r 值按式(18)计算:

$$K_r = G(K_I^P + K_I^S)/K_P + \rho \quad \dots\dots\dots(18)$$

式中:

G ——相邻两裂纹间弹塑性干涉效应系数,按附录 E 的规定确定;

K_P ——评定用材料断裂韧度,即按 5.7.3.3 求得的 K_C 值除以表 1 规定的分安全系数;

ρ ——塑性修正因子,按式(19)求得:

$$\rho = \begin{cases} \Psi_1 & (\text{当 } L_r < 0.8 \text{ 时}) \\ \Psi_1(11 - 10L_r)/3 & (\text{当 } 0.8 < L_r < 1.1 \text{ 时}) \\ 0 & (\text{当 } L_r > 1.1 \text{ 时}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(19)$$

式中: Ψ_1 的值可以由图 14 根据 $K_I^S/(\sigma_s\sqrt{\pi a})$ 的值查得。 L_r 按 5.7.6 和附录 C 的规定计算求得。

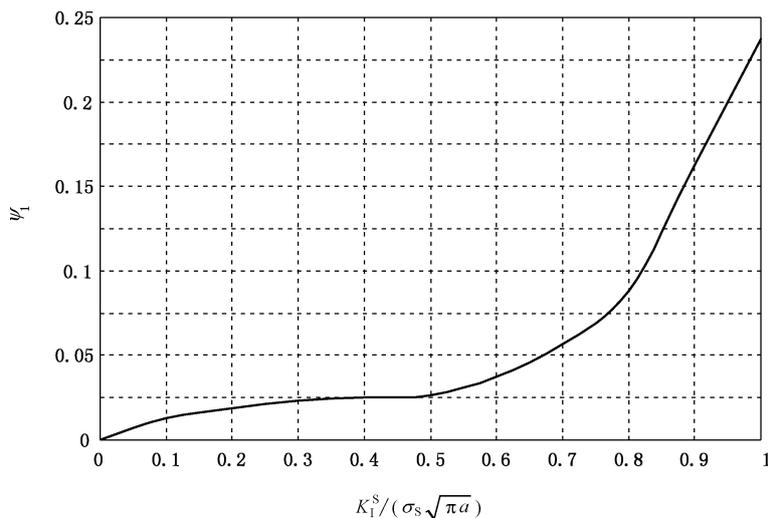


图 14 Ψ_1 取值



5.7.6 L_r 的计算

载荷比 L_r 按附录 C 的规定计算。计算中所需的一次应力和表征裂纹尺寸,分别按 5.7.3.2 和 5.7.3.1 的规则确定。

5.7.7 安全性评价

将按 5.7.5 及 5.7.6 计算得的 K_r 值和 L_r 值所构成的评定点 (L_r, K_r) 绘在常规评定通用失效评定图 12 中。如果该评定点位于安全区之内,则认为该缺陷经评定是安全的或可接受的;否则,认为不能保证安全或不可接受。如果 $L_r < L_r^{\max}$ 而评定点位于失效评定曲线上方,则容许采用分析评定方法重新评定,分析评定方法参见附录 F。

5.8 凹坑缺陷的安全评定



5.8.1 评定方法与限定条件

5.8.1.1 本节规定了内压力容器壳体表面凹坑缺陷安全评定的基本方法和步骤。在应用本方法评定之前,应将被评定缺陷打磨成表面光滑、过渡平缓的凹坑,并确认凹坑及其周围无其他表面缺陷或埋藏缺陷。

5.8.1.2 本节的规定适用于符合下述条件的压力容器:

- a) 压力容器不承受外压或疲劳载荷;
- b) 凹坑不靠近几何不连续或存在尖锐棱角的区域;
- c) $B_0/R < 0.18$ 的薄壁圆筒壳或 $B_0/R < 0.10$ 的薄壁球壳;
- d) 材料韧性满足压力容器设计规定,未发现劣化;
- e) 凹坑深度 Z 小于计算厚度 B 的 $1/3$ 并且小于 12 mm,且坑底最小厚度 $(B-Z)$ 不小于 3 mm;
- f) 凹坑长度 $2X \leq 2.8\sqrt{RB}$;
- g) 凹坑宽度 $2Y$ 不小于凹坑深度 Z 的 6 倍(容许打磨至满足本要求)。

5.8.1.3 对于超出 5.8.1.2 规定的限定条件或在服役期间表面有可能生成裂纹的凹坑缺陷,应按平面缺陷进行评定。

5.8.2 评定程序

凹坑缺陷的安全评定按下列步骤进行:

- a) 缺陷的表征;
- b) 缺陷部位容器尺寸的确定;
- c) 材料性能数据的确定;
- d) 无量纲参数 G_0 的计算和免于评定的判别;
- e) 塑性极限载荷和最高容许工作压力的确定;
- f) 安全性评价。

评定程序如图 15 所示。

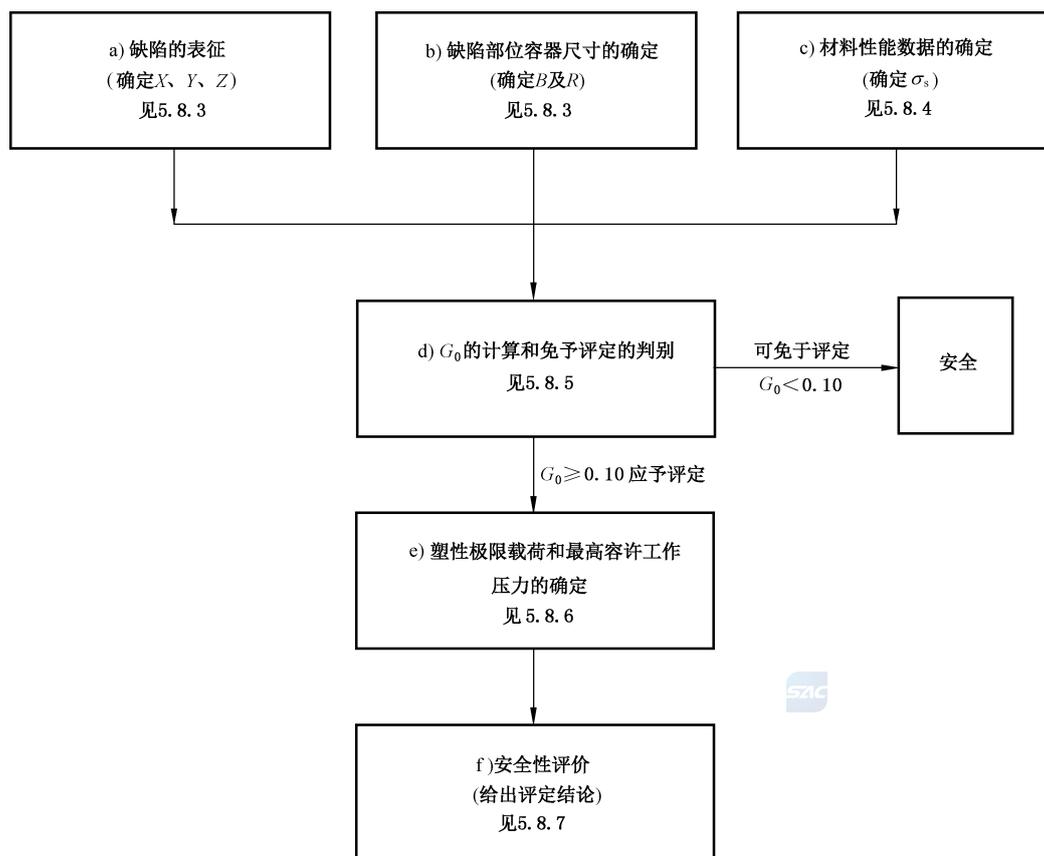


图 15 凹坑缺陷的评定程序示意图

5.8.3 缺陷的表征与缺陷部位容器尺寸的确定

对经检测查明的凹坑缺陷,根据其实际位置、形状和尺寸,按 5.3.2 的规定将其规则化,并确定凹坑所在部位容器的计算厚度 B 和平均半径 R 。

5.8.4 材料性能数据的确定

按 5.5 和附录 B 的规定,确定在评定工况下材料的屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 。评定中所需的材料流变应力 σ' 取值为 $\sigma' = 0.5(\sigma_s + \sigma_b)$ 。

5.8.5 G_0 的计算和免于评定的判别

容器表面凹坑缺陷无量纲参数 G_0 按式(20)计算:

$$G_0 = \frac{Z}{B} \frac{X}{\sqrt{RB}} \dots\dots\dots (20)$$

若 $G_0 < 0.10$, 则该凹坑缺陷可免于评定,认为是安全的或可接受的;否则应继续按 5.8.6 和 5.8.7 的规定进行评定。

5.8.6 塑性极限载荷和最高容许工作压力的确定

5.8.6.1 无凹坑缺陷壳体塑性极限载荷 p_{L0} 的计算:

球形容器按式(21)计算:

$$p_{L0} = 2\bar{\sigma}' \ln\left(\frac{R+B/2}{R-B/2}\right) \dots\dots\dots (21)$$

圆筒形容器按式(22)计算:

$$p_{L0} = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}' \ln\left(\frac{R+B/2}{R-B/2}\right) \dots\dots\dots (22)$$

5.8.6.2 带凹坑缺陷容器极限载荷 p_L 的计算:

球形容器按式(23)计算:

$$p_L = (1 - 0.6G_0) p_{L0} \dots\dots\dots (23)$$

圆筒形容器按式(24)计算:

$$p_L = (1 - 0.3\sqrt{G_0}) p_{L0} \dots\dots\dots (24)$$

5.8.6.3 带凹坑缺陷容器最高容许工作压力 p_{\max} 按式(25)确定:

$$p_{\max} = \frac{p_L}{1.8} \dots\dots\dots (25)$$

5.8.7 安全性的评价

若 $p \leq p_{\max}$ 且实测凹坑尺寸满足 5.8.1 的要求,则认为该凹坑缺陷是安全的或可接受的;否则,是不能保证安全或不可接受的。

5.9 气孔和夹渣缺陷的安全评定

5.9.1 评定方法与限定条件

5.9.1.1 本节规定了内压力容器壳体中气孔、夹渣缺陷安全评定的基本方法和步骤。

5.9.1.2 本节规定适用于符合下述条件的压力容器:

- a) $B_0/R < 0.18$ 的压力容器。
- b) 材料性能满足压力容器设计制造规定,对于铁素体钢, $\sigma_s < 450\text{MPa}$,并且在最低使用温度下 V 型夏比冲击试验中 3 个试样的平均冲击功不小于 40 J、最小冲击功不小于 28 J;对其他材料,该气孔、夹渣所在处的 K_{IC} 大于 $1\ 250\ \text{N/mm}^{3/2}$ 。
- c) 未发现材料劣化。
- d) 气孔、夹渣未暴露于器壁表面。
- e) 气孔、夹渣无明显扩展情况或可能。
- f) 缺陷附近无其他平面缺陷。

5.9.1.3 对于暴露于器壁表面的气孔、夹渣,可打磨消除。打磨成凹坑时,应按 5.8 的规定进行安全评定。对于超出 5.9.1.2 中其他限定条件或在服役期间有可能生成裂纹的气孔、夹渣,应按平面缺陷进行评定。

5.9.2 安全性评价

5.9.2.1 如果同时满足 5.9.1.2 和下列条件,则该气孔是容许的;否则,是不可接受的:

- a) 气孔率不超过 6%;
- b) 单个气孔的长径小于 $0.5B$,并且小于 9 mm。

5.9.2.2 如果夹渣的尺寸满足 5.9.1.2 和表 9 的规定,则该夹渣是容许的;否则,是不可接受的。

表 9 夹渣的容许尺寸

夹渣位置	夹渣尺寸的容许值	
球壳对接焊缝、圆筒体纵焊缝、 与封头连接的环焊缝	总长度 $\leq 6B$	自身高度或宽度 $\leq 0.25B$, 并且 ≤ 5 mm
	总长度不限	自身高度或宽度 ≤ 3 mm
圆筒体环焊缝	总长度 $\leq 6B$	自身高度或宽度 $\leq 0.30B$, 并且 ≤ 6 mm
	总长度不限	自身高度或宽度 ≤ 3 mm

5.9.2.3 按 5.9.2.1 或 5.9.2.2 的规定评定为不可接受的气孔或夹渣,可表征为平面缺陷并按 5.6 或 5.7 的规定重新进行安全评定,作出相应的安全性评价。

5.10 含缺陷压力管道的安全评定

含平面缺陷压力管道直管段的安全评定方法见附录 G,含体积缺陷压力管道直管段的安全评定方法见附录 H,含体积缺陷压力管道弯头和三通的安全评定方法参见附录 I。

6 疲劳失效评定

6.1 平面缺陷的疲劳评定

6.1.1 评定方法

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范围 ΔK 的关系式 $da/dN = A(\Delta K)^m$,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泄漏和疲劳断裂。除第 1 章所规定的平面缺陷外,难以明确划分为非平面缺陷的埋藏缺陷也应按平面缺陷进行评定。

6.1.2 评定程序

平面缺陷疲劳评定按下列步骤进行:

- a) 缺陷的表征;
- b) 应力变化范围的确定;
- c) 材料性能数据的确定;
- d) 疲劳裂纹的 ΔK 计算;
- e) 免于疲劳评定的判别;
- f) 疲劳裂纹扩展量的计算;
- g) 安全性评价。

评定程序如图 16 所示。

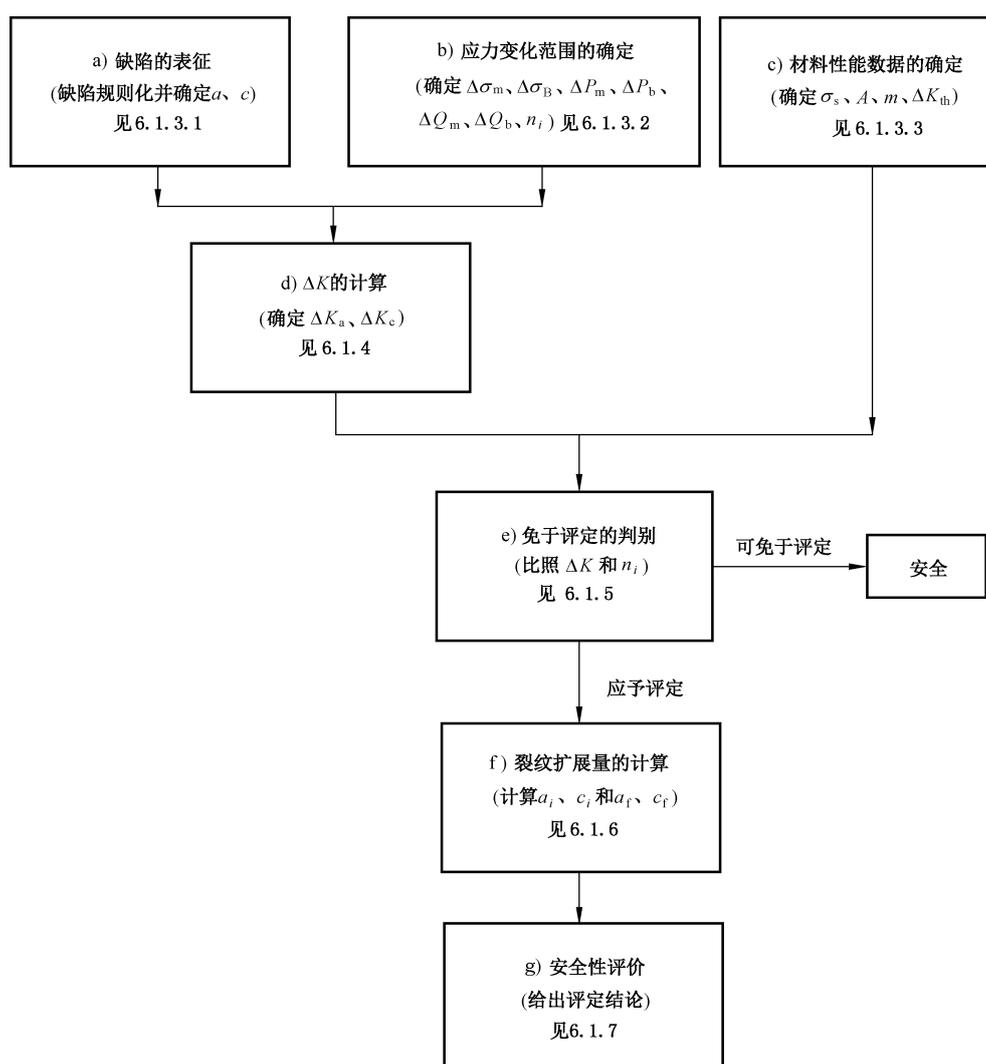


图 16 平面缺陷的疲劳评定程序示意图

6.1.3 疲劳评定所需基本数据的确定

6.1.3.1 缺陷的表征

按 5.3.1 的规定对缺陷规则化,确定疲劳评定初始裂纹的尺寸。

6.1.3.2 应力变化范围及循环次数的确定

6.1.3.2.1 根据外加载荷或温度的变化历程,分别确定被评定缺陷所在截面上垂直于裂纹平面的一次应力和二次应力的应力变化范围的分布曲线及其循环次数。平行于裂纹平面的应力变化不予考虑。

6.1.3.2.2 根据应力变化范围线性化规则,分别计算出评定所需的薄膜应力变化范围 $\Delta\sigma_m$ 和弯曲应力变化范围 $\Delta\sigma_B$ 。

应力变化范围的线性化规则:定义一条线性的、在缺陷处壁厚范围内各点应力变化范围值均不低于实际分布曲线上的应力变化范围值的应力变化范围分布直线(图 17),并按该线性化的应力变化范围分布直线确定疲劳评定中所需的薄膜应力变化范围值 $\Delta\sigma_m$ 及弯曲应力变化范围值 $\Delta\sigma_B$ [见式(26)]:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_m = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2}{2} \\ \Delta\sigma_B = \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2}{2} \end{cases} \dots\dots\dots (26)$$

式中, $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_2$ 分别为线性化后, 内、外壁处的应力变化范围值。

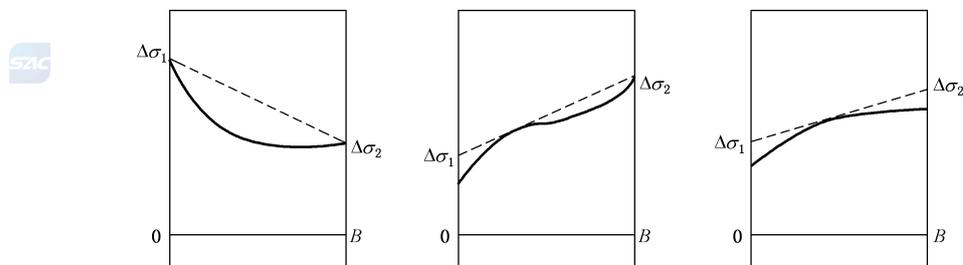


图 17 疲劳评定中应力变化范围分布的线性化规则图例

6.1.3.2.3 以一次应力的应力变化范围分布曲线所获得的 $\Delta\sigma_m$ 及 $\Delta\sigma_B$ 为 ΔP_m 及 ΔP_b , 以二次应力的应力变化范围分布曲线所获得的 $\Delta\sigma_m$ 及 $\Delta\sigma_B$ 为 ΔQ_m 及 ΔQ_b 。

6.1.3.2.4 若在预期寿命内存在 d 种不同的应力变化范围, 则应按评定周期内的载荷作用历程, 计算出 $i=1, 2, \dots, d$ 种不同应力变化范围作用时的 $(\Delta\sigma_m)_i$ 和 $(\Delta\sigma_B)_i$, 同时确定其在评定期间内相应的预期循环次数 n_i 。

6.1.3.2.5 在载荷变化范围计算中应包括由于操作压力、操作温度和其他外载荷的波动所产生的应力变化范围, 并考虑它们的组合效果。焊接残余应力不予考虑。

6.1.3.2.6 容器受双向应力疲劳作用时, 其疲劳评定按单向应力疲劳评定方法进行。

6.1.3.3 材料性能数据的确定

6.1.3.3.1 疲劳裂纹扩展速率与 ΔK 的关系式中的系数 A 与指数 m 的取值

尽可能从服役容器上取样, 按 GB/T 6398 的规定进行实验。应根据实验数据, 用最小二乘法回归得到 A 和 m , 但用最小二乘法回归得到的 A 值应乘以一个不小于 4.0 的系数后才能作为评定所取用的 A 值。

对 16MnR 钢在 100 °C 以下的空气环境中, 并且 ΔK 在 $300 \text{ N/mm}^{3/2} \sim 1\,500 \text{ N/mm}^{3/2}$ 范围内时, 也可取 $m=3.35, A=6.44 \times 10^{-14}$ 。

对 $\sigma_{0.2} < 600 \text{ MPa}$ 的铁素体钢, 在不超过 100 °C 的空气环境中, 也可取 $m=3.0, A=3 \times 10^{-13}$ 。

对伴有解理或微孔聚合等具有更高扩展速率的疲劳裂纹扩展机制时, 应取 $m=3.0, A=6 \times 10^{-13}$ 。

6.1.3.3.2 疲劳裂纹扩展的应力强度因子变化范围门槛值 ΔK_{th} 的取值

当可靠度为 97.5% 时, 碳钢和碳锰钢在空气中的疲劳裂纹扩展应力强度因子变化范围门槛值 ΔK_{th} 可以用以下方法估算:

对于母材按式(27)计算:

$$\begin{cases} \Delta K_{th} = 170 - 214R_\sigma & (\text{当 } 0 \leq R_\sigma \leq 0.5 \text{ 时}) \\ \Delta K_{th} = 63 & (\text{当 } R_\sigma > 0.5 \text{ 时}) \end{cases} \dots\dots\dots (27)$$

对于焊接接头按式(28)计算:

$$\begin{cases} \Delta K_{th} = 214\Delta\sigma/\sigma_s - 44 & (\text{当 } \Delta\sigma > \sigma_s/2 \text{ 时}) \\ \Delta K_{th} = 63 & (\text{当 } \Delta\sigma \leq \sigma_s/2 \text{ 时}) \end{cases} \dots\dots\dots (28)$$

6.1.4 应力强度因子变化范围 ΔK 的计算

根据 6.1.3.1 得到的表征裂纹尺寸 a_0 和 c_0 以及 6.1.3.2 计算的应力变化范围 $\Delta\sigma_m$ 和 $\Delta\sigma_B$, 按 D.1.3 的规定计算出各自的应力强度因子变化范围 ΔK_a 和 ΔK_c 。如果需要考虑共面裂纹的相互影响, 在计算应力强度因子变化范围时要乘以线弹性干涉效应系数 M , M 的计算方法见附录 E。

6.1.5 免于疲劳评定的判别

按 6.1.4 计算出不同载荷循环的 ΔK_a 、 ΔK_c 和所对应的预期循环次数, 如果 ΔK_a 和 ΔK_c 小于 ΔK_{th} , 则该缺陷可免于疲劳评定; 否则, 按表 10 进行判别。如果对应的预期循环次数均小于表 10 中相应各列 ΔK 值所对应的容许承受循环次数, 则该缺陷可免于疲劳评定, 认为是安全的或可接受的。

表 10 免于疲劳评定界限

ΔK 值		容许承受循环次数
表面裂纹	埋藏裂纹	
690~551	460~368	1×10^3
550~407	367~271	2×10^3
406~321	270~214	5×10^3
320~255	213~170	1×10^4
254~188	169~125	2×10^4
187~149	124~101	5×10^4
≤ 148	≤ 100	1×10^5

6.1.6 疲劳裂纹扩展量和裂纹最终尺寸 a_f 和 c_f 的计算

6.1.6.1 按应力变化范围历程逐个循环计算方法与步骤

6.1.6.1.1 按 a_0 、 c_0 和第 1 个循环的 $(\Delta\sigma_m)_1$ 、 $(\Delta\sigma_B)_1$ 分别计算 $(\Delta K_a)_0$ 和 $(\Delta K_c)_0$, 并按式(29)计算第 1 个循环后的裂纹尺寸:

$$\begin{cases} a_1 = a_0 + A(\Delta K_a)_0^m \\ c_1 = c_0 + A(0.9\Delta K_c)_0^m \end{cases} \dots\dots\dots (29)$$

6.1.6.1.2 按 a_1 、 c_1 和第 2 个循环的 $(\Delta\sigma_m)_2$ 、 $(\Delta\sigma_B)_2$ 分别计算 $(\Delta K_a)_1$ 和 $(\Delta K_c)_1$, 并按式(30)计算第 2 个循环后的裂纹尺寸:

$$\begin{cases} a_2 = a_1 + A(\Delta K_a)_1^m \\ c_2 = c_1 + A(0.9\Delta K_c)_1^m \end{cases} \dots\dots\dots (30)$$

6.1.6.1.3 重复以上步骤, 按应力变化范围的历程, 用式(31)逐次计算经历第 i 个应力变化循环后的裂纹尺寸:

$$\begin{cases} a_i = a_{i-1} + A(\Delta K_a)_{i-1}^m \\ c_i = c_{i-1} + A(0.9\Delta K_c)_{i-1}^m \end{cases} \dots\dots\dots (31)$$

6.1.6.1.4 重复以上步骤, 直到评定期间预期的最后一个应力变化循环为止, 即得到疲劳扩展的最终裂纹尺寸 a_f 和 c_f 。

6.1.6.2 分段简化计算的方法与步骤

6.1.6.2.1 如果有 d 种应力变化范围,各种应力变化的循环次数分别为 $n_i (i=1,2,\dots,d)$,并且各种应力变化范围大体上均匀分布在疲劳评定周期内,则可将每一种应力变化范围的循环数 $n_i (i=1,2,\dots,d)$ 均分为 u 段($j=1,2,\dots,u$)。第 i 种应力变化范围的循环数 n_i 均分为 u 段后,每段的循环次数为 n_i/u 。对于恒幅循环,每段的循环次数为 N/u ,一般取 $u=5$ 。

6.1.6.2.2 从 $j=1$ 起至 $j=u$ 止,应用式(32)及式(33)可偏安全地逐段计算出在各种应力变化范围作用下该计算段裂纹尺寸的近似平均值 a_j 及 c_j ,直至计算出疲劳扩展的最终尺寸 a_f 和 c_f 。

$$\begin{cases} a_j = a_{j-1} + A \sum_{i=1}^d n_i [(\Delta K_a)_i]_{j-1}^m / u & j = 1, 2, \dots, u \\ a_f = a_u + 0.5A \sum_{i=1}^d n_i [(\Delta K_a)_i]_u^m / u \end{cases} \dots\dots\dots (32)$$

$$\begin{cases} c_j = c_{j-1} + A \sum_{i=1}^d n_i [0.9(\Delta K_c)_i]_{j-1}^m / u & j = 1, 2, \dots, u \\ c_f = c_u + 0.5A \sum_{i=1}^d n_i [0.9(\Delta K_c)_i]_u^m / u \end{cases} \dots\dots\dots (33)$$

式中: $[(\Delta K_a)_i]_{j-1}$ 和 $[(\Delta K_c)_i]_{j-1}$ 分别为裂纹尺寸 $a = a_{j-1}$, $c = c_{j-1}$ 时第 i 种 $(\Delta\sigma_m)_i$ 和 $(\Delta\sigma_B)_i$ 作用下在 a 和 c 方向裂纹尖端的 ΔK 值。

如为恒幅循环,即 $d=1$,则式(32)和式(33)中的 $\sum_{i=1}^d n_i$ 简化为 N , $(\Delta K_a)_i$ 简化为 (ΔK_a) , $(\Delta K_c)_i$ 简化为 (ΔK_c) 。

6.1.6.3 可忽略 c 方向扩展时的简化计算方法

6.1.6.3.1 忽略 c 方向扩展的条件

若满足式(34)的条件,可以忽略 c 方向的扩展。

$$\Delta K_c / \Delta K_a < 0.5 \dots\dots\dots (34)$$

6.1.6.3.2 忽略 c 方向扩展时 a_f 的计算

采用 6.1.6.1 或 6.1.6.2 的计算方法,但不计算有关 c 方向的所有参数。

6.1.7 安全性评价

6.1.7.1 疲劳泄漏评定

对表面裂纹:若 $a_f < 0.7B$,则不会发生泄漏。

对埋藏裂纹:若 $\left(\frac{p_1 + a_0 - a_f}{a_f}\right) \geq 0.8$ 且 $\left(\frac{p_1 + a_0 + a_f}{B}\right) \leq 0.7$,则不会发生泄漏。

6.1.7.2 疲劳断裂评定

按第 5 章断裂及塑性破坏评定中平面缺陷简化评定或常规评定的方法,根据最终裂纹尺寸 a_f 及 c_f 和缺陷所在部位承受的最大载荷应力值进行断裂和塑性破坏评定,如果评定的结果是安全或可接受的,则不会发生因疲劳断裂和塑性破坏导致的失效。

6.1.7.3 疲劳安全性评价

若疲劳评定结果能同时满足 6.1.7.1 和 6.1.7.2 的条件,则认为该缺陷是安全的或可接受的;否则,是不能保证安全或不可接受的。

6.2 体积型焊接缺陷的疲劳评定

6.2.1 适用范围

本节规定的基于 $S-N$ 曲线的评定方法适用于同时满足下述条件的含体积型缺陷的在用压力容器焊接接头的疲劳评定:

- a) 容器壁厚等于或大于 10 mm。
- b) 操作温度低于 375 °C 的碳钢、碳-锰钢和低合金钢制容器或操作温度低于 430 °C 的奥氏体不锈钢制容器。

6.2.2 评定程序

体积型焊接缺陷的疲劳评定按下列步骤进行:

- a) 缺陷表征;
- b) 应力变化范围的确定;
- c) 免于疲劳评定的判别;
- d) 使用工况所要求承受的疲劳强度参量 $(S^3 N)_x$ 值的确定;
- e) 容许承受的疲劳强度参量 $(S^3 N)_y$ 值的确定;
- f) 疲劳安全性评价。

评定程序如图 18 所示。

6.2.3 疲劳评定所需基本数据的确定

6.2.3.1 缺陷的表征

按 5.3.2.3 的规定对缺陷进行表征。

6.2.3.2 应力变化范围及循环次数的确定

按 6.1.3.2 的规定确定应力的变化范围。体积缺陷承受的循环次数 N 及 n_i 应为从该容器投入运行时起计算。

6.2.4 免于疲劳评定的判别

符合以下条件之一者,可免于进行疲劳评定,并认为该缺陷是可接受的:

- a) 缺陷所在截面的工作应力变化范围低于 23 MPa;
- b) 仅承受与焊缝方向一致的疲劳载荷的咬边缺陷。

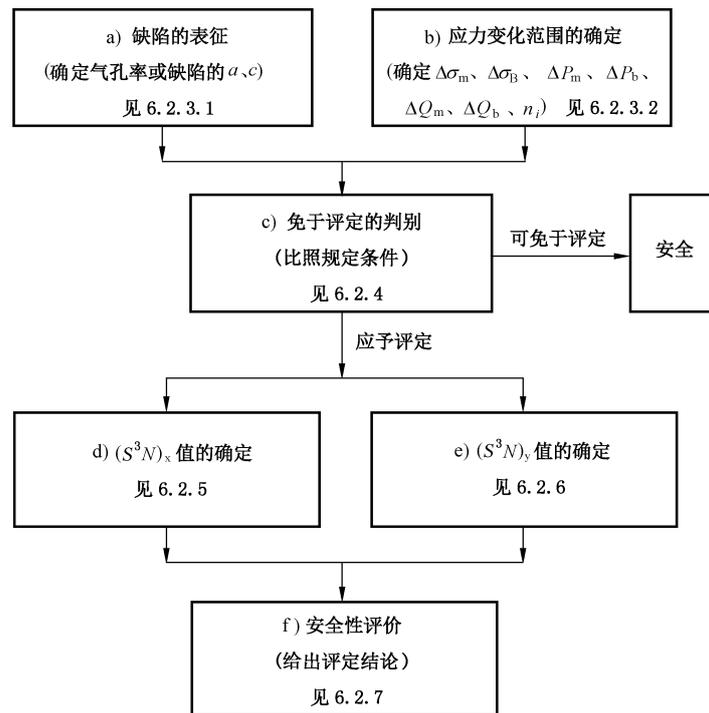


图 18 体积缺陷的疲劳评定程序示意图

6.2.5 (S³N)_x值的计算

6.2.5.1 对于恒幅疲劳,可根据缺陷所在截面的应力变化范围 Δσ 和在整个寿命期内的总循环次数 N,按式(35)计算(S³N)_x:

$$(S^3N)_x = (\Delta\sigma)^3 N \quad \dots\dots\dots (35)$$

6.2.5.2 对于非恒幅疲劳,如有 d 种应力变化范围(Δσ)_i (i=1,2,⋯,d),它们所承受的循环次数分别为 n_i (i=1,2,⋯,d),则按式(36)计算(S³N)_x:

$$(S^3N)_x = \sum_{i=1}^d \{ [(\Delta\sigma)_i]^3 n_i \} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:Δσ_i=(Δσ_m)_i+(Δσ_B)_i。

6.2.5.3 在计算非恒幅疲劳的(S³N)_x时,所有小于表 11 规定的最小应力变化范围(Δσ)_{min},可以忽略不计。

表 11 计算非恒幅疲劳的(S³N)_x时可忽略的最小应力变化范围(Δσ)_{min}

(S ³ N) _x 值	(Δσ) _{min} /MPa
1.52×10 ¹²	42
1.04×10 ¹²	37
6.33×10 ¹¹	32
4.31×10 ¹¹	28
2.50×10 ¹¹	23

6.2.5.4 容器受双向应力疲劳作用时,其疲劳评定按单向应力疲劳评定方法进行。

6.2.6 $(S^3N)_y$ 的确定

6.2.6.1 对于气孔缺陷,根据气孔率由表 12 确定所容许承受的疲劳强度参量 $(S^3N)_y$ 值。

6.2.6.2 对于夹渣缺陷,根据夹渣长度以及焊缝是否进行焊后消氢热处理的情况,按表 13 或表 14 确定所容许承受的疲劳强度参量 $(S^3N)_y$ 值。

6.2.6.3 对于容器壁厚 $B=10\text{ mm}\sim 25\text{ mm}$ 、深度 $<1\text{ mm}$ 的咬边缺陷,根据咬边深度和壁厚 B 的比值,按表 15 或表 16 确定所容许承受的疲劳强度参量 $(S^3N)_y$ 的值。

注:表 12~表 16 中的 E 为器壁评定温度下该金属材料的弹性模量。

表 12 含气孔焊接接头容许承受的疲劳强度参量 $(S^3N)_y$

气孔在射线底片上所占的面积	$(S^3N)_y$ 值
3%	$4.980\times 10^6 E$
5%	$1.196\times 10^6 E$

表 13 含夹渣的焊态焊接接头容许承受的疲劳强度参量 $(S^3N)_y$

最大夹渣长度/mm	$(S^3N)_y$ 值
2.5	$7.270\times 10^6 E$
4.0	$4.980\times 10^6 E$
10	$3.029\times 10^6 E$
35	$2.062\times 10^6 E$
>35	$1.196\times 10^6 E$

表 14 含夹渣的经消氢热处理的焊接接头容许承受的疲劳强度参量 $(S^3N)_y$

最大夹渣长度/mm	$(S^3N)_y$ 值
19	$7.270\times 10^6 E$
58	$4.980\times 10^6 E$
>58	$1.196\times 10^6 E$

表 15 含咬边的对接焊接接头容许承受的疲劳强度参量 $(S^3N)_y$ 值

最大咬边深度/壁厚	$(S^3N)_y$ 值
0.025	$7.270\times 10^6 E$
0.050	$4.980\times 10^6 E$
0.075	$3.029\times 10^6 E$
0.100	$1.196\times 10^6 E$

表 16 含咬边的角接焊接接头容许承受的疲劳强度参量 $(S^3N)_y$ 值

最大咬边深度/壁厚	$(S^3N)_y$ 值
0.050	$3.029 \times 10^6 E$
0.075	$2.062 \times 10^6 E$
0.100	$1.196 \times 10^6 E$

6.2.7 安全性评价

如果体积缺陷经评定满足式(37)的规定,则该体积型缺陷是容许的或可接受的;否则,是不能容许或不可接受的。

$$(S^3N)_y \geq (S^3N)_x \quad \dots\dots\dots (37)$$



附 录 A
(资料性附录)

应力腐蚀、高温蠕变和腐蚀疲劳环境对安全评定的影响

A.1 总则

本附录给出了考虑应力腐蚀、高温蠕变和腐蚀疲劳环境对安全评定的影响时应遵循的一般性原则。

A.2 应力腐蚀对安全评定的影响

当存在应力腐蚀条件时,按照附录 D 计算缺陷部位的 K_1 值,并与按照 GB/T 15970.6 测定的材料在使用环境下的 K_{ISCC} 进行比较,如果:

$$K_1 < K_{ISCC} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

则不考虑应力腐蚀对安全评定的影响。否则,应按照 GB/T 15970.6 测定的在使用环境下裂纹的应力腐蚀扩展速率 da/dt ,估算出至设计寿命期或下一检验期的裂纹最终尺寸,再按照第 5 章进行安全评定。

A.3 高温蠕变环境对安全评定的影响

A.3.1 一般要求

如果满足 A.3.2.1 或 A.3.3.1 的规定,则不需考虑高温蠕变环境对安全评定的影响;否则,应考虑蠕变失效的可能性,而不能仅采用本标准进行断裂与塑性失效评定。

A.3.2 第一种不考虑高温蠕变环境对安全评定的影响的条件

A.3.2.1 当整个运行期间的最高工作温度低于可忽略蠕变效应的温度 T_0 时,可不考虑高温蠕变环境对安全评定的影响。

A.3.2.2 T_0 的确定方法如下:

- a) 对于拉伸蠕变断裂应变大于 10% 的材料, T_0 为流变应力 $\bar{\sigma}$ 的作用下试件达到要求的工作寿命时其蠕变应变达到 0.2% 时的温度。
- b) 对于拉伸蠕变断裂应变小于 10% 的材料, T_0 是在达到要求的工作寿命时实际蠕变断裂伸长应变为 2% 时相对应的温度。
- c) 压力容器常用钢材在使用时间不大于 100 000h 时,其 T_0 可按表 A.1 确定。

A.3.2.3 对于焊接接头,需要了解缺陷所在焊接接头部位材料的蠕变断裂性能。但如果能够确保焊接热影响区的蠕变断裂性能不低于母材的性能,则可以根据母材的有关蠕变性能来确定 T_0 。

A.3.3 第二种不考虑高温蠕变环境对安全评定的影响的条件

A.3.3.1 当结构在整个运行历程的累积寿命损伤率小于 1.0 时,可不考虑高温蠕变环境对安全评定的影响。

A.3.3.2 对于拉伸蠕变断裂应变大于 10% 的材料, $t(T)$ 为在温度 T 和该温度下的流变应力 $\bar{\sigma}$ 的作用



下产生 0.2%蠕变应变所需要的时间。对于拉伸蠕变断裂应变小于 10%的材料, $t(T)$ 为对应蠕变应变为 2%的时间。

A.3.3.3 对于焊接接头,需要了解缺陷所在焊接接头部位材料的蠕变断裂性能。但如果能够确保焊接热影响区的蠕变断裂性能不低于母材的性能,则可以根据母材的有关蠕变性能来确定 $t(T)$ 。

表 A.1 压力容器常用钢材在使用时间不大于 100 000 h 时的 T_0

旧钢号	新钢号	使用状态	$T_0/^\circ\text{C}$
20R	Q245R	热轧,正火	375
16MnR	Q345R	热轧,正火	375
15MnVR	—	热轧,正火	375
15MnVNR	—	正火	375
18MnMoNbR	18MnMoNbR	正火加回火	375
13MnNiMoNbR	13MnNiMoR	正火加回火	375
07MnCrMoVR	07MnMoVR	调质	250
16MnDR	16MnDR	正火	350
07MnNiCrMoVDR	07MnNiVDR	调质	250
09Mn2VDR	—	正火	100
09MnNiDR	09MnNiDR	正火,正火加回火	350
15CrMoR	15CrMoR	正火加回火	475
14Cr1MoR	14Cr1MoR	正火加回火	475
12Cr2Mo1R	12Cr2Mo1R	正火加回火	450
0Cr13	S11306	退火	400
0Cr18Ni9	S30408	固溶	425
0Cr18Ni10Ti	S32168	固溶或稳定化	425
0Cr17Ni12Mo2	S31608	固溶	425
0Cr18Ni12Mo2Ti	S31668	固溶	425
0Cr19Ni13Mo3	S31708	固溶	425
00Cr19Ni10	S30403	固溶	425
00Cr17Ni14Mo2	S31603	固溶	425
00Cr19Ni13Mo3	S31703	固溶	425
00Cr18Ni5Mo3Si2	S21953	固溶	300

A.4 腐蚀疲劳对安全评定的影响

腐蚀疲劳裂纹的评定应使用相应腐蚀疲劳环境下的裂纹扩展速率和门槛值,按 6.1 进行评定。



附 录 B

(规范性附录)

材料性能数据的测定和选取方法

B.1 材料拉伸性能数据的测试和选取

B.1.1 拉伸性能按 GB/T 228 测定。屈服强度取下屈服强度或 0.2% 条件屈服强度(或规定塑性延伸率为 0.2% 时的塑性延伸强度)。焊接热影响区的拉伸性能取母材和焊缝金属中的较低值。

B.1.2 在未能实测被评定材料拉伸性能的情况下,可以按照 GB/T 150.2 和相应钢号的材料标准选取材料的有关拉伸性能指标。

B.1.3 未能实测而又不能从有关标准中查到相应数据时,可通过可靠的方法利用硬度测定值估算材料强度的参考值。

B.2 材料断裂韧度的测定方法

B.2.1 缺陷评定中所使用的材料断裂韧度应采用标准实验方法来确定。

B.2.2 CTOD 断裂韧度应按 GB/T 21143 规定的方法测定。可采用下列两种 CTOD 临界值:

$\delta_{c(B)}$ ——当 Δa 小于 0.2 mm 钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的 CTOD 断裂抗力;

$\delta_{0.2BL}$ ——稳定裂纹扩展为 0.2 mm 钝化偏置线时对应的非尺寸敏感断裂抗力 δ 。

B.2.3 J 积分试验应按 GB/T 21143 进行。可采用下列两种 J 的临界值:

$J_{c(B)}$ ——当 Δa 小于 0.2 mm 钝化偏置线时出现非稳定裂纹扩展或 pop-in 时的 J 积分断裂抗力;

$J_{0.2BL}$ ——稳定裂纹扩展为 0.2 mm 钝化偏置线时对应的非尺寸敏感断裂抗力 J 。

B.2.4 CTOD 和 J 积分试验中,载荷-位移曲线上的突进(pop-in)行为,应按 GB/T 21143 进行检验。特别是对焊接接头等非均质材料,试验后有必要对试样进行解剖检查,以确认裂纹尖端已处于有最大数量微观脆性组织的区域。

B.2.5 如果被测材料较脆,测定 J_{IC} 值有困难,可按 GB/T 4161 测定平面应变断裂韧度 K_{IC} 用于评定。

B.2.6 在不能用标准方法进行断裂韧度测试时,容许按 GB/T 21143—2014 附录 K“剖面法测定 CTOD 值”的规定进行试验,用金相剖面法测定获得 CTOD 起裂值 δ_i 和估算 J 起裂值 J_i 。

B.2.7 如果被评定容器的服役条件中存在介质和温度等环境因素的影响,则应在实测数据时的试验条件中加以考虑。

B.3 实测断裂韧度数据的选用

B.3.1 当采用单试样法测定时,断裂韧度取三个同类试验结果的最低值。对 CTOD 和 J 积分试验,当最低值小于三个试验结果平均值的 50% 或最大值大于平均值的 2 倍时,应追加三个同样的试样并采用全部六个试样数据中的第二个最低值作为评定用数据;如果进行了更多的追加试验,则按表 B.1 的当量值选取评定用数据。

B.3.2 采用多试样法测定时,应按最小二乘回归方法获得的数值减去 1 倍标准偏差所得的值作为评定用数据。

表 B.1 最低值的当量值

试验次数	当量值
3~5	最低值
6~10	第二个最低值
11~15	第三个最低值

B.4 断裂韧度的代用或参考数据的选用原则和方法

B.4.1 在未能获得实测断裂韧度数据的情况下,对有使用经验的压力容器常用钢材,容许从有关标准或资料中选取代用数据,但应对数据的选取作出有足够依据的说明。

B.4.2 在选取代用的断裂韧度数据时,应了解被评定容器的运行环境条件(容器所在的外部环境介质条件、内部介质和操作温度等)。如果被评定的是表面缺陷,则应考虑环境介质的影响;对埋藏缺陷,一般可不考虑这种影响。不论是表面缺陷还是埋藏缺陷,都应考虑温度的影响。对有环境介质和或温度影响的容器,还应考虑服役期间材料性能的退化效应。

B.4.3 被评定部位材料的化学成分、冶金和工艺状态等,在选取代用或参考数据时,均应予以充分注意。对非均质的焊接接头部位,还应考虑局部显微组织对断裂韧度的影响。

B.4.4 试验测定时的试样、取向和试验条件及试验方法等,在选取代用或参考数据时,这些因素各自产生的影响也应予以充分注意。

B.4.5 可以从每种材料推荐数据的不同断裂韧度水平中选取合适的代用或参考数据,但应保证所选用的评定数据使评定结果偏于保守和安全。

B.4.6 对延性撕裂的情况,本附录规定的是条件起裂值。在评定各方协商一致的情况下,也可以选取更为保守的其他起裂值(如 $\delta_{0.05}$ 或 $J_{0.05}$)。

B.5 材料断裂韧度替代取值经验公式

材料断裂韧度替代取值经验公式参见附录 J。

附 录 C
(规范性附录)
载荷比 L_r 参量的计算

C.1 总则

C.1.1 本附录提出了基于极限分析方法和净截面屈服准则局部解的含缺陷结构和压力容器的塑性极限载荷解、塑性屈服载荷解和 L_r 的计算式,适用于平面缺陷的简化评定和常规评定。

C.1.2 L_r^{\max} 的确定方法见 5.7.1 的规定。

C.1.3 在 L_r 的计算中只考虑一次应力,不考虑二次应力。在计算时需要的应力(P_m 及 P_b)和缺陷尺寸(a 及 c)分别按 5.4.2 和 5.3 的规定确定。

C.2 典型结构的 L_r 计算式

C.2.1 平板

C.2.1.1 含长 $2a$ 穿透裂纹的平板(板厚 B ,板宽 $2W$,见图 C.1)

$$L_r = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9P_m^2}}{3(1 - 2a/W)\sigma_s} \dots\dots\dots (C.1)$$

适用范围: $a \ll W$ 。

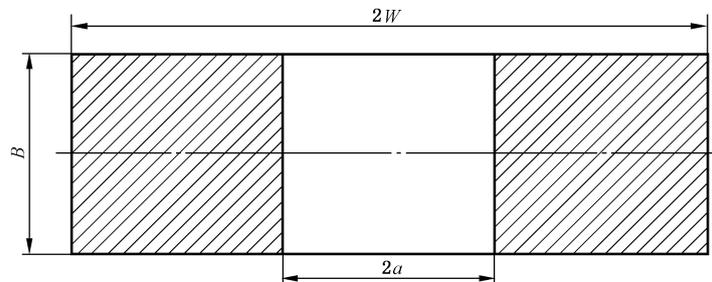


图 C.1 含穿透裂纹的平板结构尺寸示意图

C.2.1.2 含半椭圆表面裂纹的平板(裂纹 $a \times 2c$,板厚 B ,板宽 $2W$,见图 C.2)

$$L_r = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9(1 - \zeta)^2 P_m^2}}{3(1 - \zeta)\sigma_s} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

$$\zeta = \frac{ac}{B(c+B)}。$$

适用范围: $a/B \leq 0.8$ 且 $(c+B)/W \leq 1.0$,也可用于压力容器。

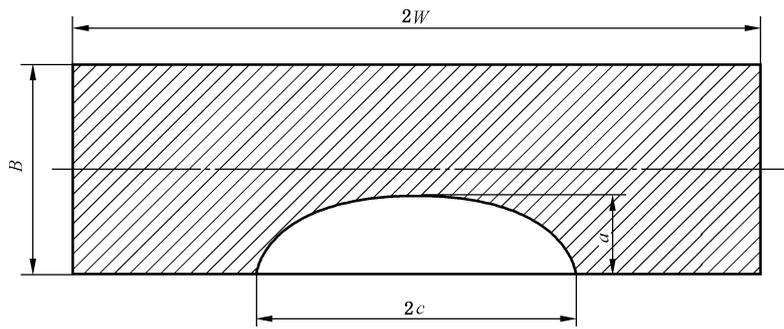


图 C.2 含半椭圆表面裂纹的平板结构尺寸示意图

C.2.1.3 含椭圆形埋藏裂纹的平板(裂纹 $2a \times 2c$, 板厚 B , 板宽 $2W$, 见图 C.3)

$$L_r = \frac{(3\zeta P_m + P_b) + \sqrt{(3\zeta P_m + P_b)^2 + 9[(1 - \zeta)^2 + 4\zeta\gamma]P_m^2}}{3[(1 - \zeta)^2 + 4\zeta\gamma]\sigma_s} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

$$\zeta = \frac{2ac}{B(c+B)}$$

$$\gamma = \frac{p_1}{B}$$

p_1 ——缺陷距板表面最近处距离(指被评定裂尖位置)。

适用范围: $2a/B \leq 0.8$ 且 $(c+B)/W \leq 1.0$, 也可用于压力容器。

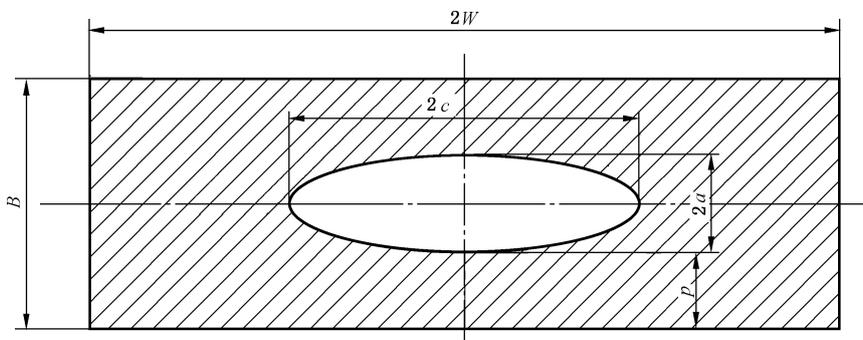


图 C.3 含椭圆埋藏裂纹的平板结构尺寸示意图

C.2.2 内压圆筒

C.2.2.1 含长 $2a$ 轴向穿透裂纹的内压圆筒(板厚 B , 内径 R_i , 见图 C.4)

$$L_r = \frac{1.2P_m}{\sigma_s} \sqrt{1 + 1.6a^2/(R_i B)} \dots\dots\dots (C.4)$$

适用范围: $B/R_i \leq 0.1$ 。

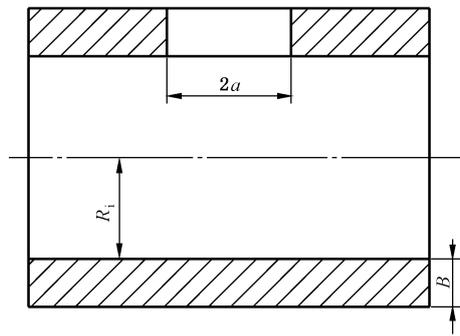


图 C.4 含轴向穿透裂纹的圆筒结构尺寸示意图

C.2.2.2 含整圈内表面环向裂纹的内压圆筒(深度 a , 板厚 B , 内半径 R_i , 见图 C.5)

$$L_r = \frac{P_m [\pi(1 - a/B) + 2(a/B) \sin(c/R_i)]}{\sigma_s(1 - a/B) [\pi - (c/R_i)(a/B)]} + \frac{2P_b}{3\sigma_s(1 - \zeta)^2} \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

$$\zeta = \frac{a}{B}; c = \pi R_i。$$

适用范围: $a/B \leq 0.8, B/R_i \leq 1.0$ 。

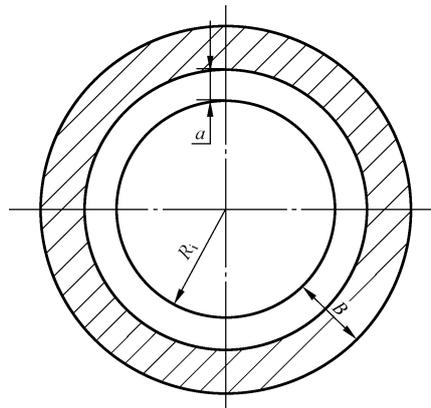


图 C.5 含整圈内表面环向裂纹的圆筒结构尺寸示意图

C.2.2.3 含半椭圆表面轴向裂纹($a \times 2c$)的内压圆筒(板厚 B , 内半径 R_i)

内压圆筒上轴向内表面半椭圆裂纹(见图 C.6):

$$L_r = \frac{1.2M_s P_m + \frac{2P_b}{3(1 - \zeta)^2}}{\sigma_s} \dots\dots\dots (C.6)$$

式中:

$$M_s = \frac{1 - [a/(BM_T)]}{1 - (a/B)}, M_T = \left[1 + 1.6 \left(\frac{c^2}{R_i B} \right) \right]^{0.5}; \zeta = \frac{a/B}{1 + B/c}。$$

适用范围: $a/B \leq 0.8, B/R_i \leq 1.0$ 。

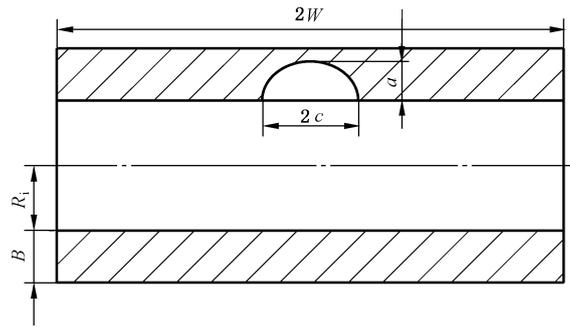


图 C.6 含半椭圆内表面轴向裂纹的圆筒结构尺寸示意图

计算内压圆筒上轴向外表面半椭圆裂纹(见图 C.7)的 L_r 时,将式(C.6)中的内半径换为外半径。

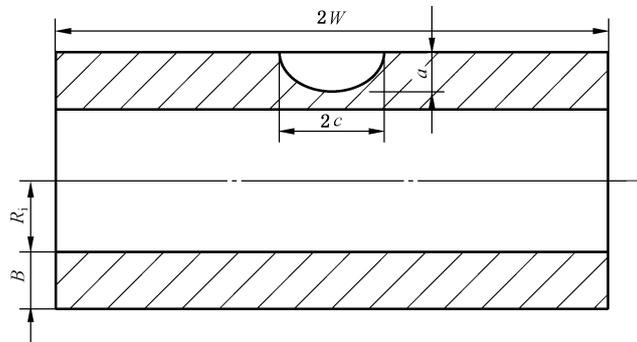


图 C.7 含半椭圆外表面轴向裂纹的圆筒结构尺寸示意图

C.2.2.4 含半椭圆内表面环向裂纹($a \times 2c$)的内压圆筒(板厚 B , 内半径 R_i , 见图 C.8)

内压圆筒上半椭圆内表面环向裂纹可按式(C.5)计算。

适用范围: $a/B \leq 0.8, B/R_i \leq 1.0$ 。

当 $\pi R_i \geq c + B$, $\zeta = \frac{a/B}{1+B/c}$; 当 $\pi R_i < c + B$, $\zeta = \left(\frac{a}{B}\right) \left(\frac{c}{\pi R_i}\right)$ 。

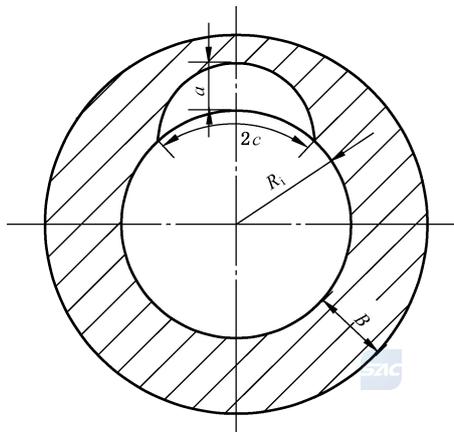


图 C.8 含半椭圆内表面环向裂纹的圆筒结构尺寸示意图

C.2.2.5 含椭圆埋藏轴向或环向裂纹(2a × 2c)的内压圆筒(板厚 B, 内半径 R_i)

含椭圆埋藏轴向裂纹的圆筒结构尺寸见图 C.9, 含椭圆埋藏环向裂纹的圆筒结构尺寸见图 C.10。计算方法与限制条件按 C.2.1.3。

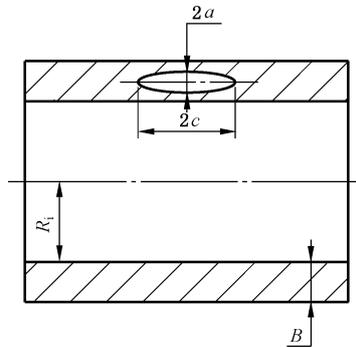


图 C.9 含椭圆埋藏轴向裂纹的圆筒结构尺寸示意图

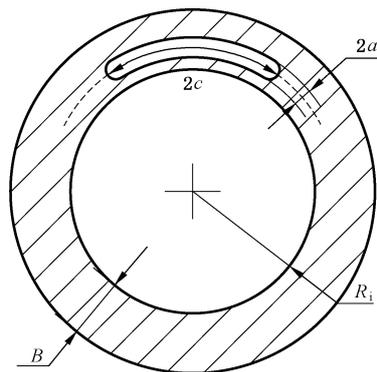


图 C.10 含椭圆埋藏环向裂纹的圆筒结构尺寸示意图

C.2.3 内压球壳

含长 2a 穿透裂纹的内压球壳(板厚 B, 内半径 R_i, 见图 C.11):

$$L_r = \left(\frac{P_m}{\sigma_s}\right) \frac{1 + \sqrt{1 + 8a^2/[R_i B \cos^2(a/R_i)]}}{2} + \frac{2}{3(1 - a/\pi R_i)} \left(\frac{P_b}{\sigma_s}\right) \dots\dots\dots (C.7)$$

适用范围: 0 < B/R_i ≤ 0.1, 0 < 2a/πR_i < 0.1。

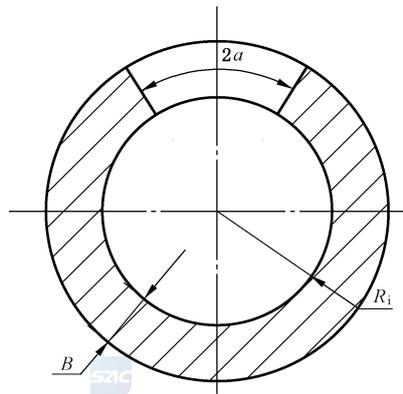


图 C.11 含穿透裂纹的球壳结构尺寸示意图

C.2.4 接管

C.2.4.1 容器接管拐角裂纹(四分之一圆形裂纹)

$$L_r = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9(1 - \zeta)^2 P_m^2}}{3(1 - \zeta)^2 \sigma_s} \dots\dots\dots (C.8)$$

式中:

$\zeta = a/B_{\min}$;

B_{\min} ——接管内拐角至外拐角间的距离;

P_m, P_b ——垂直裂纹平面方向在 B_{\min} 厚度上分布的应力。

适用范围: $a/B_{\min} \leq 0.8$ 。

C.2.4.2 仅受内压的容器接管拐角裂纹(四分之一圆形裂纹)

$$L_r = \left(\frac{p}{\sigma_s}\right) \frac{A_p}{A_s - \pi a^2/4} \dots\dots\dots (C.9)$$

仅受内压作用计算 L_r 时需要采用的受压面积 A_p 和承载面积 A_s 见图 C.12 和图 C.13, 图中:

$$l_s = 0.4 \sqrt{R_{in} B_n}$$

$$l_m = \begin{cases} \min\{0.4 \sqrt{R_i B}, 2R_{in}/3\} & \text{(圆筒形容器)} \\ \min\{0.4 \sqrt{R_i B}, R_{in}\} & \text{(球形容器)} \end{cases}$$

适用范围: $a/\sqrt{4A_s/\pi} \leq 0.8$ 。

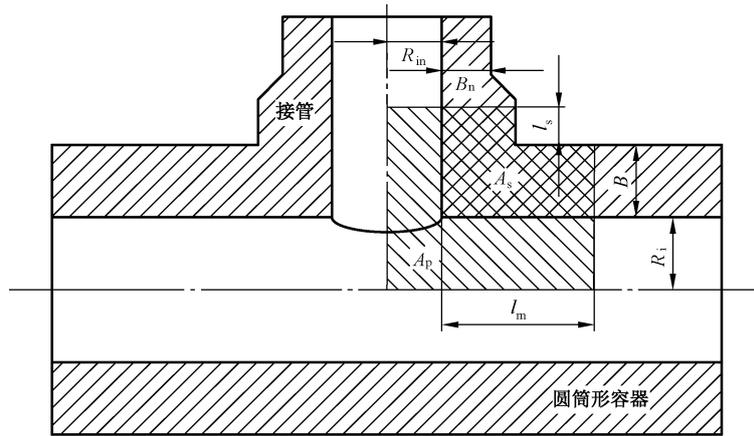


图 C.12 圆筒形容器接管拐角裂纹

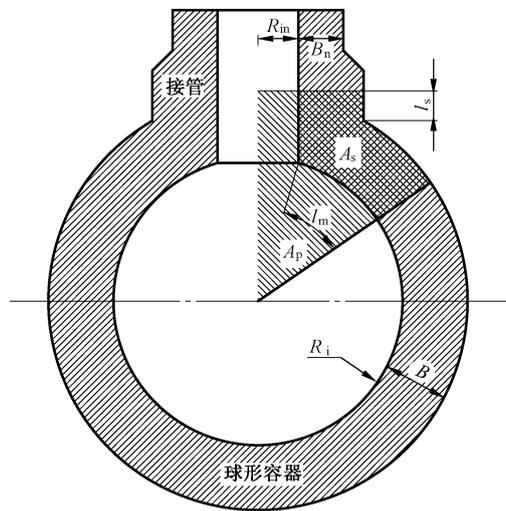


图 C.13 球形容器接管拐角裂纹

附 录 D
(规范性附录)
应力强度因子 K_I 的计算

D.1 总则**D.1.1 适用范围**

本附录提供了含缺陷结构和压力容器在承载情况下,缺陷尖端部位的应力强度因子 K_I 的计算式,适用于平面缺陷的断裂常规评定,也适用于疲劳评定。

D.1.2 计算 K_I 时所需裂纹尺寸和应力值的确定

在平面缺陷断裂常规评定计算 K_I 时,所输入的裂纹尺寸 a 、 c 和应力值 σ_m 、 σ_B 或 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b ,应按 5.3 和 5.4 的规定确定。

D.1.3 疲劳评定所需应力强度因子变化范围 ΔK 的计算规则

D.1.3.1 D.2 中所列各种 K_I 计算式形式和所附图表,均适用于按第 6 章进行缺陷的疲劳评定时有关 ΔK 、 ΔK_a 、 ΔK_c 的计算。

D.1.3.2 采用本附录所列 K_I 的计算式进行相应的 ΔK 、 ΔK_a 、 ΔK_c 的计算时,应进行参数替代,具体规则如下:

- a) 算式中的 σ_m 、 σ_B 分别以 $\Delta\sigma_m$ 、 $\Delta\sigma_B$ 替代,则所得 K_I 即为 ΔK 。
- b) 若 $\Delta\sigma_m$ 、 $\Delta\sigma_B$ 分别为一次应力变化范围 ΔP_m 、 ΔP_b 时,则所得结果是一次应力变化引起的应力强度因子变化范围 ΔK^P ;若 $\Delta\sigma_m$ 、 $\Delta\sigma_B$ 分别为二次应力变化范围 ΔQ_m 、 ΔQ_b 时,则所得结果是二次应力强度因子变化范围 ΔK^S ;
- c) 计算裂纹尺寸 a 方向裂尖处的应力强度因子变化范围 ΔK_a 时,应采用 a 方向的裂纹构形因子 f_m^A 、 f_b^A ;计算裂纹尺寸 c 方向裂尖处的应力强度因子变化范围 ΔK_c 时,应采用 c 方向的裂纹构形因子 f_m^B 、 f_b^B 。

D.1.3.3 ΔK 计算中所需输入的裂纹尺寸 a 、 c 和应力变化范围值 $\Delta\sigma_m$ 、 $\Delta\sigma_B$ 或 ΔP_m 、 ΔP_b 、 ΔQ_m 、 ΔQ_b ,应按 5.3 和 6.1 的规定确定。

D.2 典型结构的 K_I 计算式**D.2.1 平板****D.2.1.1 含长 $2a$ 穿透裂纹的平板(板宽 $2W$,板长 $2L$)**

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m + \sigma_B) \dots\dots\dots (D.1)$$

适用范围: $a/W \leq 0.15$ 且 $a/L \leq 0.15$ 。结构示意图如图 C.1 所示。

D.2.1.2 含半椭圆表面裂纹($a \times 2c$)的平板(板宽 $2W$,板长 $2L$,板厚 B)

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_B f_b) \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

$$f_m^A = \frac{1}{\left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}\right]^{0.5}} \left\{ 1.13 - 0.09 \frac{a}{c} + \left(-0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}} \right) \left(\frac{a}{B}\right)^2 + \left[0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24} \right] \left(\frac{a}{B}\right)^4 \right\} \dots\dots\dots (D.3)$$

$$f_b^A = \left\{ 1 + \left(-1.22 - 0.12 \frac{a}{c} \right) \frac{a}{B} + \left[0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{c}\right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.5} \right] \left(\frac{a}{B}\right)^2 \right\} f_m^A \dots\dots\dots (D.4)$$

$$f_m^B = \left\{ \left[1.1 + 0.35 \left(\frac{a}{B}\right)^2 \right] \left(\frac{a}{c}\right)^{0.5} \right\} f_m^A \dots\dots\dots (D.5)$$

$$f_b^B = \left[1 - 0.34 \frac{a}{B} - 0.11 a^2 / (cB) \right] f_m^B \dots\dots\dots (D.6)$$

式中：上标 A 表示求裂纹深度处 K_1 时用的系数；上标 B 表示求裂纹长度方向两端点处 K_1 时用的系数。

f_m^A 、 f_b^A 、 f_m^B 、 f_b^B 可分别由表 D.1~表 D.4 直接查得。

适用范围： $a/B \leq 0.8$ ， $a/c \leq 1.0$ ， $c/L \leq 0.15$ ， $c/W \leq 0.15$ 。结构示意图如图 C.2 所示。

D.2.1.3 含椭圆埋藏裂纹 ($2a \times 2c$) 的平板 (板宽 $2W$ ，板厚 B)

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_B f_b) \dots\dots\dots (D.7)$$

式中：

$$f_m^A = \frac{1.01 - 0.37 \frac{a}{c}}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{2a/B}{1 - 2e/B}\right)^{1.8} \left[1 - 0.4 \frac{a}{c} - \left(\frac{e}{B}\right)^2 \right] \right\}^{0.54}} \dots\dots\dots (D.8)$$

$$f_b^A = \frac{\left(1.01 - 0.37 \frac{a}{c} \right) [2e/B + a/B + 0.34 a^2 / (cB)]}{\left\{ 1 - \left(\frac{2a/B}{1 - 2e/B}\right)^{1.8} \left[1 - 0.4 \frac{a}{c} - \left(\frac{e}{B}\right)^2 \right] \right\}^{0.54}} \dots\dots\dots (D.9)$$

$$f_m^B = \frac{1.01 - 0.37 \frac{a}{c}}{\left\{ 1 - \left(\frac{2a/B}{1 - 2e/B}\right)^{1.8} \left[1 - 0.4 \frac{a}{c} - 0.8 \left(\frac{e}{B}\right)^{0.4} \right] \right\}^{0.54}} \dots\dots\dots (D.10)$$

$$f_b^B = \frac{\left(1.01 - 0.37 \frac{a}{c} \right) [2e/B - a/B - 0.34 a^2 / (cB)]}{\left\{ 1 - \left(\frac{2a/B}{1 - 2e/B}\right)^{1.8} \left[1 - 0.4 \frac{a}{c} - 0.8 \left(\frac{e}{B}\right)^{0.4} \right] \right\}^{0.54}} \dots\dots\dots (D.11)$$

e ——埋藏椭圆裂纹中心偏离壁厚中心的偏心距。

f_m^A 、 f_b^A 、 f_m^B 、 f_b^B 也可由表 D.5~表 D.8 查得。但表中以缺陷离表面的最近距离 p_1 表示，而不用参量 e ，两者之间的关系是 $p_1 + a + e = B/2$ 。

适用范围： $a/B \leq 0.45(1 - 2e/B)$ ， $a/c \leq 1.0$ ， $c/W \leq 0.15$ ， $e/B < 0.5$ 。结构示意图如图 C.3 所示。

D.2.2 内压圆筒

D.2.2.1 含轴向穿透裂纹(长度 $2a$)的内压圆筒(板厚 B , 内半径 R_i)

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_B f_b) \dots\dots\dots (D.12)$$

式中: $f_m = G_0, f_b = G_0 - 2G_1, G_i = \frac{A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3}{1 + A_4\lambda + A_5\lambda^2 + A_6\lambda^3} (i=0, 1), \lambda = \frac{1.818a}{\sqrt{R_i B}}$ 。

对于在圆筒内表面的穿透裂纹尖端位置, $A_0 \sim A_6$ 由表 D.1 查得。

表 D.1 内压圆筒轴向穿透裂纹内表面裂纹构形因子计算系数取值

B/R_i	G_i	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.01	G_0	1.007 62	-0.178 500	0.161 440	0.000 000	-0.152 520	0.058 880	-0.003 090
	G_1	0.000 3	2.728 940	0.424 320	1.698 480	13.876 92	3.712 580	0.073 810
0.016 67	G_0	1.007 64	0.013 520	0.179 410	0.000 000	0.064 370	0.024 070	-0.001 050
	G_1	0.001 55	1.965 340	0.176 480	1.467 290	9.452 660	3.829 850	0.018 860
0.05	G_0	1.008 48	0.011 360	0.194 630	0.000 000	0.073 580	0.027 420	-0.001 140
	G_1	0.003 82	0.784 820	-0.285 200	0.747 730	1.890 590	2.274 800	-0.004 600
0.1	G_0	1.008 56	0.149 340	0.243 300	0.000 000	0.268 710	0.009 360	-0.000 250
	G_1	0.003 53	0.542 290	-0.148 882	0.419 400	1.263 990	1.193 950	0.005 930
0.2	G_0	1.004 75	0.107 380	0.229 090	0.000 000	0.223 980	0.012 480	-0.000 260
	G_1	0.000 12	0.506 470	0.246 340	0.343 420	3.059 800	0.794 490	0.018 660
0.333 33	G_0	1.005 66	0.279 910	0.286 730	0.000 000	0.483 700	-0.012 079	0.001 377
	G_1	0.014 47	0.179 880	0.014 630	0.000 000	-0.029 591	0.005 410	0.000 000
1.0	G_0	0.994 4	-0.095 100	0.225 710	0.000 000	0.125 240	0.029 970	0.002 957
	G_1	0.003 59	0.137 790	0.017 440	0.000 000	-0.065 443	0.016 350	0.000 310

对于在圆筒外表面的穿透裂纹尖端位置, $A_0 \sim A_6$ 由表 D.2 查得。

表 D.2 内压圆筒轴向穿透裂纹外表面裂纹构形因子计算系数取值

B/R_i	G_i	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.01	G_0	1.004 540	0.392 250	0.086 470	0.000 000	-0.020 700	0.030 610	-0.000 990
	G_1	0.999 510	7.930 100	4.196 810	1.911 150	9.117 120	3.412 640	0.503 310
0.016 67	G_0	1.004 660	0.481 660	0.168 680	0.000 000	0.124 010	0.029 580	-0.000 250
	G_1	0.995 030	2.659 410	1.233 980	0.250 070	3.250 500	0.526 340	0.070 820
0.05	G_0	0.996 830	0.338 140	0.091 330	0.000 000	-0.017 405	0.027 980	-0.000 490
	G_1	0.992 850	0.786 010	0.490 220	0.000 000	1.020 270	0.108 660	0.001 550

表 D.2 (续)

B/R_i	G_i	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.1	G_0	0.994 730	0.510 250	0.185 410	0.000 000	0.168 770	0.030 030	0.000 233
	G_1	0.999 220	1.713 680	0.612 070	0.075 550	1.973 850	0.142 370	0.031 160
0.2	G_0	0.995 330	0.585 820	0.211 280	0.000 000	0.230 790	0.037 440	-0.000 130
	G_1	0.998 190	0.665 590	0.343 860	0.000 000	0.737 420	0.097 600	0.000 330
0.333 33	G_0	0.996 150	1.422 090	0.689 830	0.000 000	1.113 750	0.085 480	0.000 444
	G_1	1.000 870	0.928 950	0.333 800	0.000 000	0.956 970	0.087 980	0.000 130
1.0	G_0	0.987 790	0.427 250	0.048 420	0.000 000	0.053 630	0.012 170	0.000 553
	G_1	0.998 500	0.058 340	0.016 870	0.000 000	-0.051 282	0.010 850	0.000 220

适用范围： $0.01 \leq B/R_i \leq 1$ 。结构示意图如图 C.4 所示。

D.2.2.2 含整圈内表面环向裂纹(深度 a)的内压圆筒(板厚 B , 内半径 R_i)

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_B f_b) \dots\dots\dots (D.13)$$

式中： f_m 和 f_b 由表 D.3 查得。

表 D.3 内压圆筒整圈内表面环向裂纹的裂纹构形因子取值

$B/R_i=0.1$			$B/R_i=0.2$		
a/B	f_m	f_b	a/B	f_m	f_b
0.0	1.122	1.122	0.0	1.122	1.122
0.2	1.261	0.954	0.2	1.215	0.933
0.4	1.582	0.909	0.4	1.446	0.810
0.6	2.091	0.810	0.6	1.804	0.650
0.8	2.599	0.600	0.8	2.280	0.411

适用范围： $0.1 \leq B/R_i \leq 0.2, 0 \leq a/B \leq 0.8$ 。结构示意图如图 C.5 所示。

D.2.2.3 含半椭圆内表面轴向裂纹($a \times 2c$)的内压圆筒(板宽 $2W$, 板厚 B , 内半径 R_i)

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_B f_b) \dots\dots\dots (D.14)$$

式中： f_m 和 f_b 由表 D.4 查得。

表 D.4 内压圆筒半椭圆内表面轴向裂纹的裂纹构形因子取值

a/B	f_m^A	f_b^A	f_m^B	f_b^B	a/B	f_m^A	f_b^A	f_m^B	f_b^B
$a/c=1.0, B/R_i=0.1$					$a/c=1.0, B/R_i=0.25$				
0.0	0.663	0.663	0.729	0.729	0.0	0.663	0.663	0.729	0.729
0.2	0.647	0.464	0.726	0.676	0.2	0.643	0.461	0.719	0.669
0.4	0.661	0.291	0.760	0.649	0.4	0.656	0.288	0.745	0.638
0.6	0.677	0.110	0.804	0.623	0.6	0.677	0.107	0.785	0.610
0.8	0.694	-0.080	0.859	0.599	0.8	0.704	-0.079	0.838	0.585

表 D.4 (续)

a/B	f_m^A	f_b^A	f_m^B	f_b^B	a/B	f_m^A	f_b^A	f_m^B	f_b^B
$a/c=0.4, B/R_i=0.1$					$a/c=0.4, B/R_i=0.25$				
0.0	0.951	0.951	0.662	0.662	0.0	0.951	0.951	0.662	0.662
0.2	0.932	0.698	0.676	0.632	0.2	0.919	0.688	0.669	0.627
0.4	1.016	0.519	0.768	0.651	0.4	0.998	0.506	0.759	0.644
0.6	1.109	0.316	0.896	0.674	0.6	1.110	0.311	0.889	0.666
0.8	1.211	0.090	1.060	0.700	0.8	1.255	0.103	1.060	0.694
$a/c=0.2, B/R_i=0.1$					$a/c=0.2, B/R_i=0.25$				
0.0	1.059	1.059	0.521	0.521	0.0	1.059	1.059	0.521	0.521
0.2	1.062	0.806	0.578	0.548	0.2	1.045	0.791	0.577	0.547
0.4	1.260	0.677	0.695	0.597	0.4	1.240	0.663	0.698	0.599
0.6	1.500	0.515	0.876	0.660	0.6	1.514	0.515	0.887	0.665
0.8	1.783	0.320	1.123	0.737	0.8	1.865	0.348	1.144	0.745
$a/c=0.1, B/R_i=0.1$					$a/c=0.1, B/R_i=0.25$				
0.0	1.103	1.103	0.384	0.384	0.0	1.103	1.103	0.384	0.384
0.2	1.172	0.897	0.451	0.429	0.2	1.153	0.881	0.451	0.428
0.4	1.494	0.834	0.582	0.503	0.4	1.470	0.816	0.585	0.504
0.6	1.985	0.765	0.820	0.623	0.6	2.003	0.765	0.830	0.627
0.8	2.737	0.689	1.219	0.810	0.8	2.864	0.749	1.242	0.819
$a/c=0.05, B/R_i=0.1$					$a/c=0.05, B/R_i=0.25$				
0.0	1.120	1.120	0.275	0.275	0.0	1.120	1.120	0.275	0.275
0.2	1.231	0.946	0.335	0.318	0.2	1.211	0.929	0.334	0.318
0.4	1.701	0.971	0.469	0.406	0.4	1.674	0.950	0.471	0.407
0.6	2.619	1.080	0.765	0.584	0.6	2.285	1.079	0.774	0.587
0.8	4.364	1.301	1.374	0.919	0.8	3.163	1.081	1.400	0.928

适用范围： $0.1 \leq B/R_i \leq 0.25, 0.05 \leq a/c \leq 1, 0 \leq a/B \leq 0.8, c/W \leq 0.15$ 。结构示意图如图 C.6 所示。

D.2.2.4 含半椭圆内表面环向裂纹($a \times 2c$)的内压圆筒(板厚 B , 内半径 R_i)

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_B f_b) \dots\dots\dots (D.15)$$

式中: f_m 和 f_b 由表 D.5 查得。

表 D.5 内压圆筒半椭圆内表面环向裂纹的裂纹构形因子取值

a/B	f_m^A	f_b^A	f_m^B	f_b^B	a/B	f_m^A	f_b^A	f_m^B	f_b^B
$a/c=1.0, B/R_i=0.1$					$a/c=1.0, B/R_i=0.2$				
0.0	0.663	0.663	0.729	0.729	0.0	0.663	0.663	0.729	0.729
0.2	0.667	0.574	0.681	0.623	0.2	0.667	0.582	0.681	0.623
0.4	0.670	0.327	0.706	0.528	0.4	0.670	0.334	0.706	0.528
0.6	0.686	0.140	0.733	0.431	0.6	0.686	0.117	0.733	0.431
0.8	0.702	-0.105	0.764	0.332	0.8	0.702	-0.099	0.764	0.332
$a/c=0.5, B/R_i=0.1$					$a/c=0.5, B/R_i=0.2$				
0.0	0.896	0.896	0.697	0.697	0.0	0.896	0.896	0.697	0.697
0.2	0.999	0.731	0.731	0.628	0.2	1.004	0.735	0.731	0.628
0.4	1.031	0.504	0.801	0.563	0.4	1.030	0.503	0.801	0.563
0.6	1.121	0.306	0.889	0.502	0.6	1.124	0.305	0.889	0.502
0.8	1.148	0.014	0.993	0.445	0.8	1.192	0.027	0.993	0.445
$a/c=0.2, B/R_i=0.1$					$a/c=0.2, B/R_i=0.2$				
0.0	1.059	1.059	0.521	0.521	0.0	1.059	1.059	0.521	0.521
0.2	1.168	0.870	0.617	0.623	0.2	1.144	0.851	0.617	0.623
0.4	1.375	0.736	0.835	0.591	0.4	1.318	0.698	0.835	0.591
0.6	1.599	0.561	1.048	0.556	0.6	1.517	0.515	1.048	0.556
0.8	1.803	0.269	1.255	0.519	0.8	1.782	0.253	1.255	0.519
$a/c=0.1, B/R_i=0.1$					$a/c=0.1, B/R_i=0.2$				
0.0	1.103	1.103	0.384	0.384	0.0	1.103	1.103	0.384	0.384
0.2	1.219	0.921	0.482	0.487	0.2	1.214	0.903	0.482	0.487
0.4	1.529	0.829	0.700	0.498	0.4	1.382	0.776	0.700	0.498
0.6	1.939	0.677	0.981	0.525	0.6	1.661	0.624	0.981	0.525
0.8	2.411	0.479	1.363	0.570	0.8	2.031	0.386	1.363	0.570

适用范围: $0.1 \leq B/R_i \leq 0.2, 0 \leq a/B \leq 0.8, 0.1 \leq a/c \leq 1$ 。结构示意图如图 C.8 所示。

D.2.2.5 含椭圆埋藏轴向或环向裂纹($2a \times 2c$)的内压圆筒(板厚 B , 内半径 R_i)

计算方法与限制条件按照 D.2.1.3(含椭圆埋藏裂纹的平板)。结构示意图如图 C.9 和 C.10 所示。

D.2.3 内压球壳

含长 $2a$ 穿透裂纹的球壳(板厚 B , 内半径 R_i)

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_B f_b) \dots\dots\dots (D.16)$$

式中: $f_m = G_0, f_b = G_0 - 2G_1, \lambda = \frac{1.818a}{\sqrt{R_i B}}$ 。 G_0 和 G_1 由表 D.6 查得。

表 D.6 内压球壳穿透裂纹的裂纹构形因子计算系数取值

B/R_i	λ	G_0		G_1	
		内表面的穿透裂纹尖端位置	外表面的穿透裂纹尖端位置	内表面的穿透裂纹尖端位置	外表面的穿透裂纹尖端位置
0.333 3	0	0.866	1	0	1
	0.131 9	0.831 1	0.966 8	0.028 9	0.991 7
	0.263 8	0.828 6	1.025 2	0.055 2	1.007 3
	0.659 5	0.865 8	1.210 3	0.142 6	1.041
	1.319	1.065 1	1.494 7	0.320 8	1.131 6
	2.638	1.964 3	2.014 7	0.885	1.335 1
	3.957	3.471 9	2.361 2	1.724 9	1.459 7
	5.276	5.609 2	2.381 7	2.892 2	1.443 1
	6.595	7.350 5	2.114	3.820 1	1.268 9
	7.914	12.484	1.025 8	6.539 1	0.668 7
	9.233	18.011	-0.726	—	—
0.2	0	0.912 9	1	0	1
	0.153 3	0.879	0.986	0.049 4	1.001
	0.459 8	8.890 2	1.142 3	0.123 6	1.014 1
	0.919 5	0.982 7	1.358 9	0.234	1.070 2
	1.532 5	1.266 8	1.667 6	0.426	1.172 5
	3.065 1	2.564 5	2.286 6	1.197 9	1.431 2
	4.597 6	4.735 7	2.649 6	2.362 4	1.563 6
	6.130 1	7.523 7	2.550 7	3.836 2	1.486 3
	7.662 7	10.797	2.045 2	5.538	1.195 1
	8.943 4	16.504	0.706	8.500 3	0.487 1
	10.728	25.473	-2.021	13.144	-0.97
0.1	0	0.953 5	1	0	1
	0.198 7	0.9207	1.0278	—	—
	0.397 3	0.931 1	1.135 5	—	—
	0.993 4	1.059 7	1.430 9	0.277 4	1.079 1
	1.986 7	1.642 6	1.954 2	0.643 8	1.274
	3.973 4	3.928 4	2.742 1	1.898 3	1.606 7
	5.960 2	7.683 3	2.974 3	3.842 6	1.675 9
	7.946 9	13.05	2.406 8	6.594 5	1.362 6
	9.933 6	20.604	0.794 9	10.439	0.514 8
	11.92	30.445	-1.844	15.45	-0.861
	13.907	43.35	-4.735	22.019	-2.383

表 D.6 (续)

B/R_i	λ	G_0		G_1	
		内表面的穿透裂纹尖端位置	外表面的穿透裂纹尖端位置	内表面的穿透裂纹尖端位置	外表面的穿透裂纹尖端位置
0.05	0	0.9759	1	0	1
	0.134 1	0.948	1.006 6	—	—
	0.268 2	0.953 7	1.088 2	0.128 2	0.977
	0.402 3	0.959 9	1.154	0.155 9	0.981 8
	0.804 6	1.030 4	1.358 6	0.240 2	1.040 6
	1.341	1.250 5	1.652 6	0.399	1.149 7
	2.681 9	2.323	2.361 4	1.016 8	1.434 5
	5.363 9	6.482	3.194	3.190 8	1.785 5
	8.045 8	13.238	2.870 1	6.613 1	1.578 8
	10.728	23.215	1.122 5	11.648	0.675 6
0.016 67	0	0.991 8	1	0	1
	0.158 3	0.977 5	1.054 2	0.128	0.958 6
	0.224 9	0.977	1.087 2	0.144 2	0.951 6
	0.469 4	0.99	1.206 6	0.183 7	0.971 1
	1.349 3	1.279 2	1.702 1	0.403 9	1.152 2
	2.248 9	1.930 7	2.216 2	0.786 9	1.363 5
	4.497 8	4.820 3	3.179 6	2.301 9	1.772 2
	8.995 6	15.929	3.027 2	7.878	1.631 9
	13.493	34.004	-0.32	16.863	-0.069
0.01	0	0.995	1	0	1
	0.173 1	0.982 3	1.070 3	0.142 3	0.943 4
	0.576 9	1.009 2	1.267 4	0.204 6	0.981 4
	1.730 6	1.522 9	1.945 7	0.543 2	1.239 7
	2.884 3	2.585 5	2.582 2	1.127 5	1.505 3
	5.768 5	7.202 5	3.493 1	3.479 4	1.892 2
	11.537	24.958	1.793 6	12.283	0.989 3
	17.306	53.643	-4.219	26.45	-2.03

适用范围： $0.01 \leq B/R_i \leq 0.3333$ 。结构示意图如图 C.11 所示。

D.2.4 焊趾和接管

D.2.4.1 焊趾处的表面裂纹(深为 a , 长为 $2c$ 的半椭圆形)(见图 D.1)

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m^A M_{km} + \sigma_B f_b^A M_{kb}) / \Phi \dots\dots\dots (D.17)$$

式中:

- K_I —— 裂纹最深处的值;
- f_m^A, f_b^A —— 可由表 D.9 及表 D.10 查得;
- M_{km}, M_{kb} —— 可由表 D.17 及表 D.18 查得;
- Φ —— 第二类椭圆积分, 其近似值为 $\Phi = [1 + 1.464 \times (a/c)^{1.65}]^{0.5}$, 或由表 D.7 查得。

表 D.7 第二类椭圆积分取值

a/c	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Φ	1.00	1.02	1.05	1.10	1.15	1.21	1.28	1.35	1.42	1.50	1.57

D.2.4.2 仅受内压圆筒的四分之一圆形接管拐角裂纹(见图 D.2)

$$K_I = P_m \sqrt{\pi a} \left(1 + \sqrt{\frac{R_{in} B_n}{R_i B}} \right) f_{cc} \dots\dots\dots (D.18)$$

式中: f_{cc} 由表 D.8 查得。

表 D.8 仅受内压圆筒的四分之一圆形接管拐角裂纹构形因子取值

a/B	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
f_{cc}	1.88	1.74	1.60	1.49	1.38	1.30	1.22	1.18	1.13

适用范围: $a/B \leq 0.8, R_{in}/R_i \leq 0.4$ 。

D.2.4.3 仅受内压圆筒接管拐角椭圆裂纹

$$K_I = M_\sigma F_{ch} P_m \frac{\sqrt{\pi a}}{\Phi} \left[\left(\frac{4}{\pi} + \frac{ac}{2B_n R_{in}} \right) / \left(\frac{4}{\pi} + \frac{ac}{B_n R_{in}} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (D.19)$$

式中:

- a, c —— 拐角裂纹在接管侧和容器侧的裂纹长度;
- R_{in} —— 接管内半径;
- P_m —— 容器薄膜应力;
- Φ —— 椭圆裂纹形状因子, 可用经验式(D.20)表示:

$$\begin{cases} \Phi = \sqrt{1 + 1.46(a/c)^{1.65}} & (\text{当 } a/c \leq 1.0 \text{ 时}) \\ \Phi = \sqrt{1 + 1.46(c/a)^{1.65}} & (\text{当 } a/c > 1.0 \text{ 时}) \end{cases} \dots\dots\dots (D.20)$$

M_σ —— 应力集中修正因子, 可用式(D.21)计算:

$$M_\sigma = K_I / 3 \dots\dots\dots (D.21)$$

其中, K_I 为接管拐角的弹性应力集中系数, 优先选用实测值; 无实测值时用式(D.22)计算:

$$K_t = \frac{2 + 2 \frac{D_n}{D} \left(\frac{D_n B_n}{DB} \right)^{1/2} + 1.25 \frac{D_n}{D} \left(\frac{D}{B} \right)^{1/2}}{1 + \frac{B_n}{B} \left(\frac{D_n B_n}{DB} \right)^{1/2}} \dots\dots\dots (D.22)$$

F_{ch} ——接管拐角裂纹的边界修正因子,可用式(D.23)计算:

$$F_{ch} = [M_1 + M_2 (a_{45}/B_{45})^2 + M_3 (a_{45}/B_{45})^4] g_1 g_2 g_3 g_4 f_\varphi \dots\dots\dots (D.23)$$

其中, $f_\varphi = [(a/c)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi]^{1/4}$ 。拐角裂纹在筒内壁处 C 点(图 D.2)的 $\varphi = 0$,在接管内壁处的

B 点的 $\varphi = \frac{\pi}{2}$; a_{45}, B_{45} 分别为接管拐角平分线方向的拐角裂纹深度和容器壁厚。

其他系数计算如下:

对 $a/c \leq 1.0$:

$$\begin{cases} M_1 = 1.13 - 0.09a/c \\ M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + a/c} \\ M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + a/c} + 14(1 - a/c)^{24} \end{cases} \dots\dots\dots (D.24)$$

$$\begin{cases} g_1 = 1 + [0.1 + 0.35(a_{45}/B_{45})^2](1 - \sin\varphi)^2 \\ g_2 = \frac{1 + 0.358\lambda + 1.425\lambda^2 - 1.578\lambda^3 + 2.156\lambda^4}{1 + 0.13\lambda^2} \\ g_3 = (1 + 0.04a/c)[1 + 0.1(1 - \cos\varphi)^2][0.85 + 0.15(a_{45}/B_{45})^{1/4}] \\ g_4 = 1 - 0.7(1 - a_{45}/B_{45})(a/c - 0.2)(1 - a/c) \end{cases} \dots\dots (D.25)$$

式中: $\lambda = \frac{1}{1 + (c/R_{in}) \cos(0.85\varphi)}$ 。

对 $a/c > 1.0$:

$$\begin{cases} M_1 = (c/a)^{1/2} (1 + 0.04c/a) \\ M_2 = 0.2(c/a)^4 \\ M_3 = -0.1(c/a)^4 \end{cases} \dots\dots\dots (D.26)$$

$$\begin{cases} g_1 = 1 + [0.1 + 0.35(c/a)(a_{45}/B_{45})^2](1 - \sin\varphi)^2 \\ g_2 \text{ 与 } a/c \leq 1 \text{ 时的 } g_2 \text{ 相同} \\ g_3 = (1.13 - 0.09c/a)[1 + 0.1(1 - \cos\varphi)^2][0.85 + 0.15(a_{45}/B_{45})^{1/4}] \\ g_4 = 1 \end{cases} \dots\dots (D.27)$$

也可由表 D.19、表 D.20 及表 D.21、表 D.22 查得拐角裂纹在筒体表面及接管表面的 F_{ch}/g_2 及 g_2 值,由 F_{ch}/g_2 的值乘以 g_2 的值则可得到 F_{ch} 。

适用范围: $a_{45}/B_{45} \leq 0.8, a/c = 0.2 \sim 2.0, R_{in}/R_i \leq 0.4$ 。

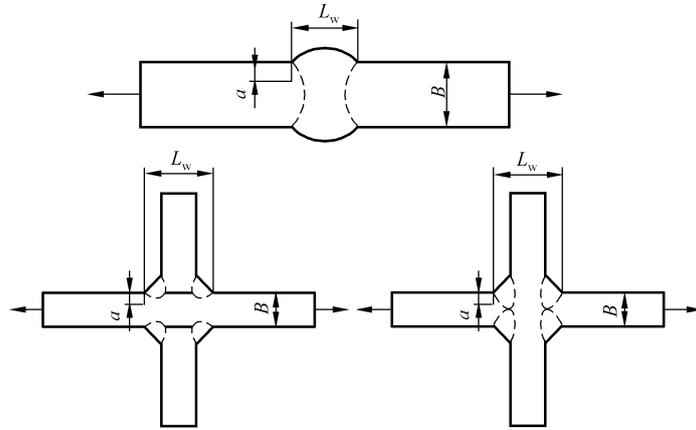


图 D.1 焊趾处表面裂纹的结构尺寸

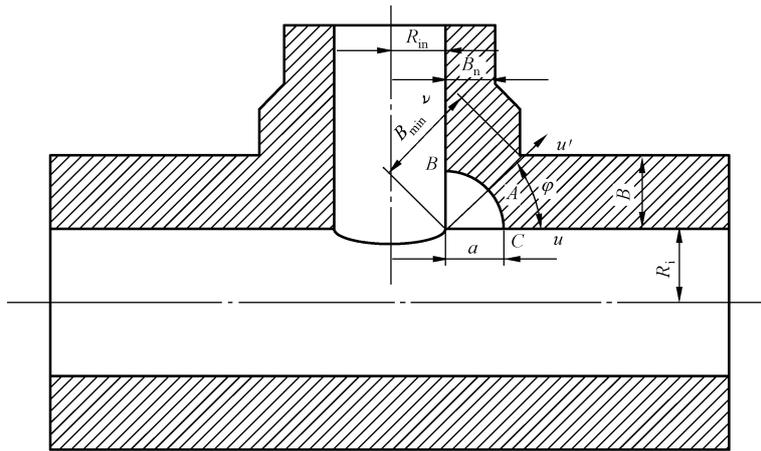


图 D.2 内压力容器接管四分之一圆形拐角裂纹的结构尺寸

表 9 半椭圆表面裂纹的标称

栅	栅度																				
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.00	1.122	1.120	1.103	1.082	1.059	1.033	1.007	0.979	0.951	0.923	0.896	0.869	0.843	0.817	0.792	0.769	0.746	0.724	0.702	0.682	0.663
0.05	1.140	1.127	1.109	1.087	1.063	1.037	1.009	0.981	0.953	0.925	0.897	0.870	0.844	0.818	0.793	0.769	0.746	0.724	0.703	0.682	0.663
0.10	1.180	1.150	1.127	1.102	1.075	1.047	1.018	0.989	0.959	0.930	0.902	0.874	0.847	0.821	0.796	0.772	0.748	0.726	0.704	0.684	0.664
0.15	1.265	1.189	1.157	1.126	1.095	1.063	1.032	1.000	0.969	0.939	0.909	0.881	0.853	0.826	0.800	0.775	0.751	0.728	0.706	0.685	0.665
0.20	1.367	1.245	1.199	1.159	1.122	1.086	1.051	1.017	0.983	0.951	0.920	0.889	0.860	0.832	0.806	0.780	0.755	0.732	0.709	0.688	0.668
0.25	1.498	1.320	1.253	1.202	1.157	1.115	1.075	1.037	1.001	0.966	0.933	0.900	0.870	0.841	0.813	0.786	0.761	0.736	0.713	0.691	0.670
0.30	1.660	1.416	1.320	1.253	1.199	1.150	1.104	1.062	1.022	0.984	0.948	0.914	0.881	0.850	0.821	0.793	0.767	0.742	0.718	0.695	0.674
0.35	1.861	1.535	1.400	1.313	1.247	1.189	1.138	1.090	1.046	1.004	0.965	0.929	0.894	0.861	0.831	0.801	0.774	0.748	0.723	0.700	0.677
0.40	2.111	1.681	1.492	1.381	1.301	1.234	1.175	1.121	1.072	1.027	0.985	0.945	0.908	0.874	0.841	0.811	0.782	0.754	0.729	0.704	0.681
0.45	2.425	1.857	1.598	1.457	1.360	1.282	1.215	1.155	1.101	1.052	1.006	0.963	0.924	0.887	0.853	0.820	0.790	0.762	0.735	0.710	0.686
0.50	2.825	2.067	1.717	1.540	1.424	1.334	1.258	1.191	1.132	1.077	1.028	0.982	0.940	0.901	0.865	0.831	0.799	0.769	0.741	0.715	0.690
0.55	3.343	2.316	1.851	1.628	1.491	1.388	1.303	1.229	1.163	1.104	1.051	1.002	0.957	0.915	0.877	0.841	0.808	0.777	0.748	0.721	0.695
0.60	4.033	2.609	1.999	1.723	1.561	1.444	1.349	1.267	1.195	1.132	1.074	1.022	0.974	0.930	0.889	0.852	0.817	0.785	0.755	0.726	0.700
0.65	4.984	2.950	2.162	1.822	1.633	1.501	1.395	1.306	1.228	1.158	1.097	1.041	0.990	0.944	0.901	0.862	0.826	0.792	0.761	0.732	0.705
0.70	6.355	3.346	2.340	1.925	1.706	1.557	1.441	1.343	1.259	1.185	1.119	1.059	1.006	0.957	0.913	0.872	0.834	0.800	0.767	0.737	0.709
0.75	8.453	3.804	2.534	2.031	1.778	1.612	1.484	1.379	1.288	1.209	1.139	1.077	1.021	0.970	0.923	0.881	0.842	0.806	0.773	0.742	0.713
0.80	11.956	4.330	2.746	2.140	1.848	1.664	1.525	1.412	1.315	1.231	1.158	1.092	1.033	0.981	0.933	0.889	0.849	0.812	0.778	0.746	0.717



表 10 半椭圆表面裂纹的校验

槽宽	槽宽																				
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.00	1.122	1.120	1.103	1.082	1.059	1.033	1.007	0.979	0.951	0.923	0.896	0.869	0.843	0.817	0.792	0.769	0.746	0.724	0.702	0.682	0.663
0.05	1.071	1.059	1.042	1.021	0.998	0.973	0.947	0.920	0.893	0.867	0.840	0.815	0.789	0.765	0.742	0.719	0.697	0.676	0.656	0.637	0.618
0.10	1.047	1.014	0.992	0.969	0.944	0.918	0.892	0.866	0.839	0.813	0.787	0.762	0.738	0.715	0.692	0.671	0.650	0.630	0.611	0.592	0.575
0.15	1.043	0.982	0.953	0.925	0.897	0.870	0.842	0.815	0.788	0.762	0.737	0.712	0.688	0.666	0.644	0.623	0.603	0.584	0.565	0.548	0.531
0.20	1.055	0.962	0.922	0.887	0.855	0.825	0.795	0.767	0.740	0.713	0.688	0.663	0.640	0.617	0.596	0.576	0.556	0.538	0.520	0.504	0.488
0.25	1.082	0.952	0.897	0.854	0.817	0.783	0.751	0.721	0.692	0.665	0.639	0.615	0.592	0.570	0.549	0.529	0.510	0.492	0.476	0.460	0.444
0.30	1.124	0.951	0.877	0.825	0.781	0.743	0.708	0.676	0.646	0.618	0.592	0.567	0.544	0.522	0.501	0.482	0.464	0.447	0.431	0.415	0.401
0.35	1.183	0.960	0.861	0.797	0.746	0.704	0.666	0.631	0.600	0.571	0.544	0.519	0.496	0.474	0.454	0.435	0.417	0.401	0.385	0.371	0.357
0.40	1.261	0.976	0.847	0.769	0.711	0.664	0.622	0.586	0.553	0.523	0.495	0.470	0.447	0.425	0.405	0.387	0.370	0.354	0.339	0.326	0.313
0.45	1.363	1.000	0.834	0.741	0.675	0.623	0.578	0.539	0.504	0.473	0.445	0.420	0.397	0.375	0.356	0.338	0.322	0.307	0.293	0.280	0.268
0.50	1.497	1.030	0.822	0.711	0.637	0.579	0.531	0.490	0.454	0.422	0.394	0.368	0.345	0.324	0.306	0.288	0.273	0.259	0.246	0.234	0.223
0.55	1.675	1.066	0.808	0.679	0.596	0.534	0.482	0.439	0.402	0.369	0.340	0.315	0.292	0.272	0.254	0.237	0.223	0.209	0.197	0.186	0.177
0.60	1.914	1.107	0.793	0.644	0.552	0.485	0.430	0.385	0.347	0.313	0.285	0.259	0.237	0.218	0.200	0.185	0.171	0.159	0.148	0.138	0.130
0.65	2.246	1.153	0.776	0.605	0.504	0.432	0.375	0.328	0.289	0.255	0.227	0.202	0.181	0.162	0.146	0.131	0.119	0.108	0.098	0.089	0.082
0.70	2.725	1.203	0.756	0.563	0.453	0.376	0.316	0.268	0.228	0.195	0.167	0.143	0.122	0.104	0.089	0.076	0.065	0.055	0.047	0.040	0.034
0.75	3.458	1.257	0.732	0.516	0.397	0.316	0.254	0.205	0.165	0.132	0.104	0.081	0.062	0.045	0.032	0.020	0.010	0.002	-0.005	-0.011	-0.016
0.80	4.676	1.314	0.704	0.465	0.338	0.253	0.189	0.140	0.100	0.067	0.040	0.018	0.000	-0.015	-0.027	-0.038	-0.046	-0.053	-0.058	-0.062	-0.065

表 B.11 半椭圆表面裂纹的应力强度因子

椭圆度	椭圆度																			
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.00	0.275	0.384	0.461	0.521	0.568	0.606	0.637	0.662	0.681	0.697	0.709	0.718	0.725	0.729	0.732	0.734	0.734	0.733	0.731	0.729
0.05	0.277	0.386	0.464	0.523	0.571	0.609	0.639	0.664	0.683	0.699	0.711	0.720	0.726	0.731	0.734	0.735	0.735	0.734	0.732	0.730
0.10	0.284	0.393	0.471	0.530	0.578	0.615	0.645	0.670	0.689	0.704	0.715	0.724	0.730	0.735	0.737	0.738	0.738	0.737	0.735	0.733
0.15	0.295	0.405	0.483	0.542	0.589	0.626	0.656	0.679	0.698	0.712	0.724	0.732	0.738	0.741	0.744	0.744	0.744	0.742	0.740	0.737
0.20	0.310	0.422	0.500	0.559	0.605	0.641	0.670	0.693	0.711	0.724	0.735	0.742	0.748	0.751	0.752	0.753	0.752	0.750	0.747	0.744
0.25	0.331	0.445	0.522	0.580	0.625	0.661	0.688	0.710	0.727	0.740	0.749	0.756	0.760	0.763	0.764	0.763	0.762	0.759	0.756	0.752
0.30	0.358	0.472	0.549	0.607	0.650	0.684	0.711	0.731	0.747	0.758	0.767	0.772	0.776	0.777	0.777	0.776	0.774	0.771	0.767	0.762
0.35	0.392	0.506	0.581	0.637	0.680	0.712	0.737	0.756	0.770	0.780	0.787	0.792	0.794	0.794	0.793	0.791	0.788	0.784	0.779	0.774
0.40	0.434	0.546	0.619	0.672	0.713	0.744	0.767	0.784	0.796	0.805	0.810	0.813	0.814	0.814	0.812	0.808	0.804	0.799	0.794	0.788
0.45	0.486	0.592	0.661	0.712	0.751	0.779	0.800	0.815	0.826	0.833	0.837	0.838	0.837	0.835	0.832	0.828	0.822	0.816	0.810	0.803
0.50	0.549	0.645	0.708	0.756	0.792	0.818	0.837	0.850	0.858	0.863	0.865	0.865	0.863	0.859	0.854	0.849	0.842	0.835	0.828	0.820
0.55	0.625	0.706	0.761	0.804	0.837	0.861	0.877	0.887	0.893	0.896	0.896	0.894	0.890	0.885	0.879	0.872	0.864	0.856	0.847	0.838
0.60	0.715	0.775	0.818	0.856	0.885	0.906	0.919	0.927	0.931	0.931	0.929	0.925	0.919	0.912	0.905	0.896	0.887	0.878	0.868	0.858
0.65	0.823	0.853	0.881	0.911	0.936	0.954	0.964	0.969	0.970	0.968	0.963	0.957	0.950	0.941	0.932	0.922	0.912	0.901	0.890	0.879
0.70	0.951	0.941	0.948	0.970	0.990	1.003	1.010	1.012	1.010	1.006	0.999	0.991	0.981	0.971	0.960	0.949	0.937	0.926	0.914	0.902
0.75	1.103	1.039	1.020	1.031	1.045	1.054	1.058	1.057	1.052	1.045	1.036	1.025	1.014	1.002	0.990	0.977	0.964	0.951	0.938	0.925
0.80	1.282	1.150	1.097	1.094	1.101	1.106	1.106	1.101	1.094	1.084	1.072	1.060	1.047	1.033	1.019	1.005	0.991	0.977	0.963	0.949

表 A12 半椭圆表面裂纹的扩展

椭圆	椭圆																			
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.00	0.275	0.384	0.461	0.521	0.568	0.606	0.637	0.662	0.681	0.697	0.709	0.718	0.725	0.729	0.732	0.734	0.734	0.733	0.731	0.729
0.05	0.273	0.379	0.455	0.514	0.560	0.597	0.627	0.651	0.670	0.685	0.696	0.705	0.711	0.715	0.718	0.719	0.719	0.718	0.716	0.713
0.10	0.274	0.379	0.454	0.511	0.556	0.592	0.621	0.644	0.662	0.676	0.687	0.695	0.700	0.704	0.706	0.707	0.706	0.705	0.703	0.700
0.15	0.279	0.384	0.457	0.513	0.557	0.591	0.618	0.640	0.657	0.670	0.680	0.687	0.692	0.695	0.696	0.697	0.696	0.694	0.691	0.687
0.20	0.289	0.393	0.465	0.519	0.561	0.593	0.619	0.640	0.655	0.667	0.676	0.682	0.686	0.688	0.689	0.688	0.687	0.684	0.681	0.677
0.25	0.302	0.406	0.476	0.528	0.568	0.599	0.623	0.642	0.656	0.667	0.674	0.679	0.682	0.683	0.683	0.682	0.679	0.676	0.672	0.667
0.30	0.321	0.423	0.491	0.541	0.579	0.608	0.630	0.647	0.660	0.669	0.675	0.678	0.680	0.680	0.679	0.676	0.673	0.669	0.664	0.659
0.35	0.345	0.444	0.509	0.556	0.592	0.619	0.639	0.654	0.665	0.672	0.677	0.679	0.679	0.678	0.676	0.673	0.668	0.663	0.658	0.652
0.40	0.374	0.469	0.530	0.575	0.608	0.633	0.651	0.664	0.672	0.678	0.681	0.681	0.680	0.678	0.674	0.670	0.665	0.659	0.653	0.646
0.45	0.411	0.498	0.555	0.596	0.626	0.648	0.664	0.675	0.681	0.685	0.686	0.685	0.682	0.679	0.674	0.668	0.662	0.655	0.648	0.640
0.50	0.454	0.532	0.582	0.619	0.646	0.666	0.679	0.687	0.691	0.693	0.692	0.689	0.685	0.680	0.674	0.667	0.660	0.652	0.644	0.635
0.55	0.506	0.570	0.611	0.644	0.668	0.684	0.694	0.700	0.702	0.701	0.699	0.694	0.689	0.682	0.674	0.666	0.658	0.649	0.640	0.631
0.60	0.567	0.612	0.643	0.670	0.690	0.703	0.710	0.713	0.713	0.710	0.706	0.699	0.692	0.684	0.675	0.666	0.656	0.647	0.637	0.627
0.65	0.638	0.658	0.677	0.697	0.713	0.722	0.727	0.727	0.724	0.719	0.713	0.705	0.696	0.686	0.676	0.665	0.655	0.644	0.633	0.622
0.70	0.721	0.710	0.711	0.724	0.735	0.741	0.743	0.740	0.735	0.728	0.719	0.709	0.699	0.688	0.676	0.665	0.653	0.641	0.629	0.618
0.75	0.817	0.766	0.748	0.751	0.757	0.759	0.757	0.752	0.745	0.735	0.725	0.713	0.701	0.689	0.676	0.663	0.651	0.638	0.625	0.613
0.80	0.928	0.827	0.784	0.777	0.778	0.776	0.771	0.763	0.753	0.741	0.729	0.716	0.702	0.688	0.675	0.661	0.647	0.634	0.621	0.608

表 犐13 椭圆埋藏裂纹的犐犐犐

埋 槽	狃 ₁ 槽	犐犐犐																				
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.0	0.05	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.10	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.15	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.20	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.25	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.30	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.35	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.40	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.45	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.50	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
0.05	0.05	1.172	1.146	1.120	1.095	1.069	1.044	1.019	0.994	0.969	0.945	0.921	0.897	0.873	0.849	0.826	0.802	0.779	0.756	0.733	0.711	0.688
	0.10	1.083	1.062	1.040	1.018	0.997	0.976	0.954	0.933	0.912	0.891	0.870	0.849	0.828	0.808	0.787	0.766	0.746	0.725	0.705	0.684	0.664
	0.15	1.053	1.033	1.013	0.993	0.973	0.952	0.932	0.912	0.892	0.872	0.852	0.832	0.813	0.793	0.773	0.753	0.733	0.714	0.694	0.675	0.655
	0.20	1.039	1.020	1.000	0.980	0.961	0.941	0.922	0.902	0.883	0.863	0.844	0.824	0.805	0.785	0.766	0.747	0.727	0.708	0.689	0.670	0.650
	0.25	1.031	1.012	0.993	0.973	0.954	0.935	0.916	0.896	0.877	0.858	0.839	0.820	0.800	0.781	0.762	0.743	0.724	0.705	0.686	0.667	0.648
	0.30	1.026	1.007	0.988	0.969	0.950	0.931	0.912	0.893	0.874	0.855	0.836	0.817	0.798	0.779	0.760	0.741	0.722	0.703	0.684	0.665	0.646
	0.35	1.023	1.004	0.985	0.966	0.947	0.928	0.909	0.890	0.871	0.852	0.833	0.815	0.796	0.777	0.758	0.739	0.720	0.701	0.683	0.664	0.645
	0.40	1.021	1.002	0.983	0.964	0.945	0.926	0.907	0.888	0.870	0.851	0.832	0.813	0.794	0.775	0.757	0.738	0.719	0.700	0.682	0.663	0.644
	0.45	1.019	1.000	0.981	0.962	0.943	0.925	0.906	0.887	0.868	0.849	0.831	0.812	0.793	0.774	0.756	0.737	0.718	0.699	0.681	0.662	0.643
	0.10	0.05	1.359	1.322	1.286	1.251	1.216	1.182	1.149	1.116	1.084	1.052	1.021	0.991	0.961	0.931	0.902	0.874	0.845	0.818	0.790	0.764
0.10		1.189	1.163	1.136	1.110	1.084	1.059	1.033	1.008	0.983	0.958	0.933	0.909	0.884	0.860	0.836	0.813	0.789	0.766	0.743	0.720	0.697
0.15		1.124	1.101	1.078	1.055	1.032	1.009	0.986	0.963	0.941	0.918	0.896	0.874	0.852	0.830	0.808	0.786	0.764	0.743	0.721	0.700	0.679
0.20		1.091	1.069	1.047	1.026	1.004	0.982	0.961	0.940	0.918	0.897	0.876	0.855	0.834	0.813	0.792	0.771	0.751	0.730	0.709	0.689	0.668
0.25		1.071	1.050	1.029	1.008	0.987	0.967	0.946	0.925	0.905	0.884	0.864	0.843	0.823	0.803	0.782	0.762	0.742	0.722	0.702	0.682	0.662
0.30		1.058	1.037	1.017	0.997	0.976	0.956	0.936	0.916	0.896	0.876	0.856	0.836	0.816	0.796	0.776	0.756	0.736	0.717	0.697	0.677	0.657
0.35		1.048	1.028	1.008	0.988	0.968	0.949	0.929	0.909	0.889	0.869	0.850	0.830	0.810	0.791	0.771	0.752	0.732	0.713	0.693	0.674	0.654
0.40		1.041	1.022	1.002	0.982	0.963	0.943	0.923	0.904	0.884	0.865	0.845	0.826	0.806	0.787	0.768	0.748	0.729	0.710	0.690	0.671	0.652

表 13 续 5

槽 棚	抽 棚	覆 板																				
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.15	0.05	1 540	1 491	1 444	1 398	1 353	1 310	1 268	1 227	1 187	1 148	1 110	1 073	1 038	1 003	0 968	0 935	0 902	0 870	0 839	0 808	0 778
	0.10	1 300	1 268	1 236	1 204	1 173	1 143	1 112	1 083	1 053	1 024	0 996	0 967	0 940	0 912	0 885	0 858	0 832	0 806	0 780	0 754	0 729
	0.15	1 202	1 175	1 148	1 122	1 095	1 069	1 044	1 018	0 992	0 967	0 942	0 918	0 893	0 869	0 844	0 821	0 797	0 773	0 750	0 727	0 704
	0.20	1 149	1 125	1 101	1 076	1 053	1 029	1 005	0 982	0 958	0 935	0 912	0 889	0 866	0 843	0 821	0 798	0 776	0 754	0 732	0 710	0 688
	0.25	1 116	1 094	1 071	1 048	1 026	1 003	0 981	0 958	0 936	0 914	0 892	0 870	0 849	0 827	0 805	0 784	0 763	0 741	0 720	0 699	0 678
0.20	0.30	1 094	1 072	1 051	1 029	1 007	0 986	0 964	0 943	0 921	0 900	0 879	0 858	0 837	0 816	0 795	0 774	0 753	0 732	0 712	0 691	0 671
	0.35	1 079	1 057	1 036	1 015	0 994	0 973	0 952	0 931	0 910	0 890	0 869	0 848	0 828	0 807	0 787	0 766	0 746	0 726	0 705	0 685	0 665
	0.05	1 721	1 658	1 597	1 539	1 484	1 430	1 379	1 329	1 282	1 236	1 191	1 148	1 107	1 066	1 027	0 989	0 952	0 916	0 881	0 847	0 814
	0.10	1 413	1 373	1 335	1 298	1 261	1 225	1 190	1 155	1 121	1 088	1 055	1 023	0 992	0 961	0 931	0 901	0 871	0 842	0 814	0 786	0 759
	0.15	1 282	1 251	1 220	1 190	1 160	1 130	1 101	1 072	1 044	1 016	0 988	0 961	0 934	0 907	0 880	0 854	0 828	0 803	0 777	0 752	0 727
0.25	0.20	1 210	1 183	1 156	1 129	1 102	1 076	1 050	1 024	0 999	0 973	0 948	0 923	0 898	0 874	0 849	0 825	0 801	0 778	0 754	0 731	0 707
	0.25	1 165	1 139	1 115	1 090	1 065	1 041	1 017	0 993	0 969	0 945	0 922	0 898	0 875	0 852	0 829	0 806	0 783	0 761	0 738	0 716	0 694
	0.30	1 133	1 110	1 086	1 063	1 040	1 017	0 994	0 971	0 948	0 925	0 903	0 880	0 858	0 836	0 814	0 792	0 770	0 748	0 727	0 705	0 684
	0.05	1 906	1 825	1 750	1 678	1 610	1 546	1 485	1 426	1 370	1 317	1 266	1 217	1 169	1 124	1 080	1 038	0 997	0 957	0 919	0 882	0 846
	0.10	1 524	1 478	1 433	1 389	1 346	1 305	1 264	1 224	1 186	1 148	1 112	1 076	1 041	1 006	0 973	0 940	0 908	0 876	0 845	0 815	0 785
0.30	0.15	1 362	1 326	1 291	1 257	1 223	1 190	1 157	1 125	1 093	1 062	1 032	1 002	0 972	0 943	0 914	0 885	0 857	0 830	0 803	0 776	0 749
	0.20	1 271	1 240	1 210	1 181	1 151	1 122	1 094	1 066	1 038	1 010	0 983	0 956	0 929	0 903	0 877	0 851	0 825	0 800	0 775	0 750	0 726
	0.25	1 213	1 185	1 158	1 131	1 105	1 078	1 052	1 026	1 001	0 975	0 950	0 925	0 900	0 875	0 851	0 827	0 803	0 779	0 755	0 732	0 709
	0.10	1 634	1 580	1 527	1 476	1 427	1 380	1 334	1 289	1 246	1 204	1 163	1 124	1 085	1 047	1 011	0 975	0 940	0 906	0 873	0 840	0 809
	0.15	1 439	1 399	1 359	1 321	1 283	1 246	1 210	1 174	1 140	1 106	1 072	1 039	1 007	0 975	0 944	0 914	0 884	0 854	0 825	0 797	0 769
0.35	0.20	1 329	1 296	1 263	1 230	1 198	1 166	1 135	1 105	1 074	1 045	1 015	0 986	0 958	0 929	0 902	0 874	0 847	0 820	0 794	0 768	0 742
	0.10	1 739	1 676	1 616	1 558	1 502	1 449	1 397	1 348	1 300	1 254	1 209	1 166	1 124	1 083	1 044	1 005	0 968	0 932	0 897	0 862	0 829
	0.15	1 512	1 467	1 423	1 380	1 338	1 297	1 258	1 219	1 181	1 144	1 108	1 073	1 038	1 004	0 971	0 939	0 907	0 876	0 845	0 815	0 786

表 14 椭圆埋藏裂纹的校验

埋槽	种槽	埋深																				
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.0	0.05	0.909	0.892	0.876	0.859	0.842	0.826	0.809	0.792	0.776	0.759	0.742	0.726	0.709	0.693	0.676	0.659	0.643	0.626	0.609	0.593	0.576
	0.10	0.808	0.793	0.778	0.764	0.749	0.734	0.719	0.704	0.690	0.675	0.660	0.645	0.630	0.616	0.601	0.586	0.571	0.556	0.542	0.527	0.512
	0.15	0.707	0.694	0.681	0.668	0.655	0.642	0.629	0.616	0.603	0.590	0.577	0.565	0.552	0.539	0.526	0.513	0.500	0.487	0.474	0.461	0.448
	0.20	0.606	0.595	0.584	0.573	0.562	0.551	0.539	0.528	0.517	0.506	0.495	0.484	0.473	0.462	0.451	0.440	0.428	0.417	0.406	0.395	0.384
	0.25	0.505	0.496	0.486	0.477	0.468	0.459	0.449	0.440	0.431	0.422	0.412	0.403	0.394	0.385	0.375	0.366	0.357	0.348	0.338	0.329	0.320
	0.30	0.404	0.397	0.389	0.382	0.374	0.367	0.360	0.352	0.345	0.337	0.330	0.323	0.315	0.308	0.300	0.293	0.286	0.278	0.271	0.263	0.256
	0.35	0.303	0.297	0.292	0.286	0.281	0.275	0.270	0.264	0.259	0.253	0.247	0.242	0.236	0.231	0.225	0.220	0.214	0.209	0.203	0.198	0.192
	0.40	0.202	0.198	0.195	0.191	0.187	0.183	0.180	0.176	0.172	0.169	0.165	0.161	0.158	0.154	0.150	0.146	0.143	0.139	0.135	0.132	0.128
	0.45	0.101	0.099	0.097	0.095	0.094	0.092	0.090	0.088	0.086	0.084	0.082	0.081	0.079	0.077	0.075	0.073	0.071	0.070	0.068	0.066	0.064
	0.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.05	0.997	0.975	0.954	0.933	0.912	0.892	0.871	0.851	0.830	0.810	0.790	0.770	0.751	0.731	0.712	0.692	0.673	0.654	0.635	0.616	0.597
	0.10	0.812	0.797	0.782	0.766	0.751	0.736	0.721	0.705	0.690	0.675	0.660	0.645	0.630	0.615	0.599	0.584	0.569	0.554	0.539	0.524	0.509
	0.15	0.685	0.672	0.660	0.648	0.635	0.623	0.611	0.598	0.586	0.574	0.561	0.549	0.536	0.524	0.512	0.499	0.487	0.474	0.462	0.449	0.437
	0.20	0.572	0.562	0.552	0.542	0.532	0.522	0.512	0.502	0.491	0.481	0.471	0.461	0.451	0.441	0.430	0.420	0.410	0.400	0.389	0.379	0.369
	0.25	0.464	0.456	0.448	0.441	0.433	0.425	0.417	0.409	0.401	0.393	0.385	0.376	0.368	0.360	0.352	0.344	0.336	0.327	0.319	0.311	0.303
	0.30	0.359	0.353	0.348	0.342	0.336	0.330	0.324	0.318	0.312	0.306	0.300	0.293	0.287	0.281	0.275	0.269	0.262	0.256	0.250	0.243	0.237
	0.35	0.256	0.252	0.248	0.244	0.240	0.236	0.232	0.228	0.224	0.220	0.215	0.211	0.207	0.203	0.198	0.194	0.190	0.185	0.181	0.177	0.172
	0.40	0.153	0.151	0.149	0.147	0.145	0.143	0.141	0.139	0.136	0.134	0.132	0.130	0.127	0.125	0.122	0.120	0.118	0.115	0.113	0.110	0.108
	0.45	0.051	0.051	0.051	0.051	0.050	0.050	0.050	0.050	0.049	0.049	0.049	0.048	0.048	0.048	0.047	0.047	0.046	0.046	0.044	0.044	0.043
	0.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.10	0.05	1.087	1.060	1.033	1.007	0.981	0.956	0.931	0.906	0.882	0.858	0.834	0.811	0.788	0.766	0.743	0.721	0.699	0.678	0.657	0.636	0.615
	0.10	0.833	0.816	0.799	0.783	0.766	0.750	0.734	0.717	0.701	0.685	0.669	0.653	0.637	0.621	0.605	0.590	0.574	0.558	0.543	0.527	0.512
	0.15	0.675	0.662	0.650	0.638	0.626	0.614	0.602	0.589	0.577	0.565	0.553	0.541	0.528	0.516	0.504	0.492	0.479	0.467	0.455	0.443	0.430
	0.20	0.545	0.536	0.527	0.518	0.509	0.500	0.490	0.481	0.472	0.462	0.453	0.443	0.434	0.424	0.415	0.405	0.396	0.386	0.376	0.367	0.357
	0.25	0.428	0.422	0.415	0.408	0.402	0.395	0.388	0.381	0.374	0.367	0.360	0.353	0.346	0.339	0.332	0.324	0.317	0.310	0.302	0.295	0.287
	0.30	0.317	0.313	0.309	0.304	0.300	0.295	0.290	0.286	0.281	0.276	0.271	0.266	0.261	0.256	0.251	0.246	0.241	0.236	0.230	0.225	0.220
	0.35	0.210	0.207	0.205	0.203	0.200	0.198	0.195	0.193	0.190	0.187	0.184	0.182	0.179	0.176	0.173	0.169	0.166	0.163	0.160	0.156	0.153
	0.40	0.104	0.104	0.104	0.103	0.103	0.102	0.102	0.101	0.101	0.100	0.100	0.099	0.098	0.097	0.096	0.095	0.094	0.093	0.091	0.089	0.087
	0.45	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 14 续 5

槽 槽	种 槽	槽																				
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.15	0.05	1.155	1.122	1.090	1.059	1.029	0.999	0.970	0.942	0.914	0.887	0.861	0.835	0.810	0.785	0.761	0.737	0.713	0.690	0.668	0.645	0.623
	0.10	0.845	0.827	0.810	0.792	0.775	0.757	0.740	0.723	0.706	0.689	0.673	0.656	0.640	0.623	0.607	0.591	0.575	0.559	0.543	0.527	0.511
	0.15	0.661	0.649	0.637	0.626	0.614	0.602	0.590	0.578	0.566	0.554	0.542	0.530	0.518	0.507	0.495	0.483	0.471	0.459	0.447	0.435	0.423
	0.20	0.517	0.509	0.501	0.493	0.484	0.476	0.468	0.459	0.451	0.442	0.434	0.425	0.416	0.407	0.399	0.390	0.381	0.372	0.363	0.354	0.345
	0.25	0.391	0.386	0.380	0.375	0.369	0.364	0.358	0.353	0.347	0.341	0.335	0.329	0.323	0.317	0.311	0.304	0.298	0.292	0.285	0.278	0.272
0.20	0.30	0.274	0.271	0.268	0.265	0.262	0.259	0.256	0.252	0.249	0.246	0.242	0.238	0.235	0.231	0.227	0.223	0.219	0.215	0.211	0.206	0.202
	0.35	0.162	0.161	0.161	0.160	0.159	0.158	0.157	0.156	0.155	0.154	0.152	0.151	0.149	0.148	0.146	0.144	0.142	0.140	0.138	0.136	0.134
	0.05	1.205	1.166	1.129	1.093	1.059	1.025	0.993	0.962	0.932	0.903	0.874	0.847	0.820	0.794	0.768	0.743	0.718	0.694	0.671	0.648	0.625
	0.10	0.848	0.829	0.810	0.792	0.774	0.756	0.738	0.721	0.703	0.686	0.669	0.652	0.636	0.619	0.603	0.586	0.570	0.554	0.538	0.522	0.507
	0.15	0.641	0.630	0.618	0.607	0.596	0.584	0.573	0.562	0.550	0.539	0.528	0.516	0.505	0.493	0.482	0.471	0.459	0.448	0.436	0.425	0.413
0.25	0.20	0.484	0.477	0.470	0.463	0.456	0.449	0.441	0.434	0.427	0.419	0.411	0.404	0.396	0.388	0.380	0.372	0.364	0.356	0.348	0.339	0.331
	0.25	0.349	0.346	0.342	0.338	0.334	0.330	0.326	0.321	0.317	0.312	0.308	0.303	0.298	0.293	0.288	0.283	0.278	0.272	0.267	0.261	0.255
	0.30	0.227	0.226	0.225	0.223	0.222	0.221	0.219	0.217	0.215	0.213	0.211	0.209	0.207	0.204	0.202	0.199	0.196	0.193	0.190	0.187	0.183
	0.05	1.239	1.194	1.152	1.112	1.074	1.038	1.003	0.969	0.937	0.906	0.877	0.848	0.820	0.793	0.766	0.741	0.716	0.691	0.668	0.644	0.622
	0.10	0.838	0.819	0.800	0.782	0.763	0.745	0.727	0.710	0.693	0.676	0.659	0.642	0.625	0.609	0.593	0.577	0.561	0.545	0.530	0.514	0.499
0.30	0.15	0.613	0.602	0.592	0.582	0.571	0.561	0.550	0.540	0.529	0.519	0.508	0.498	0.487	0.476	0.466	0.455	0.444	0.433	0.423	0.412	0.401
	0.20	0.445	0.439	0.434	0.428	0.423	0.417	0.411	0.405	0.398	0.392	0.386	0.379	0.373	0.366	0.359	0.352	0.345	0.338	0.330	0.323	0.316
	0.25	0.303	0.301	0.299	0.297	0.295	0.292	0.290	0.287	0.284	0.281	0.278	0.274	0.271	0.267	0.263	0.259	0.255	0.251	0.247	0.242	0.237
	0.10	0.817	0.798	0.779	0.761	0.743	0.725	0.708	0.691	0.674	0.657	0.641	0.625	0.609	0.593	0.578	0.562	0.547	0.532	0.517	0.502	0.487
	0.15	0.576	0.567	0.558	0.548	0.539	0.530	0.521	0.512	0.502	0.493	0.484	0.474	0.464	0.455	0.445	0.435	0.426	0.416	0.406	0.396	0.386
0.35	0.20	0.399	0.395	0.392	0.388	0.384	0.380	0.375	0.371	0.366	0.361	0.356	0.351	0.346	0.340	0.335	0.329	0.323	0.317	0.311	0.305	0.298
	0.10	0.783	0.764	0.746	0.729	0.712	0.695	0.679	0.663	0.647	0.631	0.616	0.601	0.586	0.571	0.557	0.542	0.528	0.514	0.499	0.485	0.471
	0.15	0.529	0.522	0.515	0.508	0.500	0.493	0.485	0.477	0.470	0.462	0.454	0.446	0.438	0.429	0.421	0.412	0.404	0.395	0.386	0.377	0.368

表 犐15 椭圆埋藏裂纹的犐犐犐

犐犐	犐犐 ₁	犐犐犐																				
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.0	0.05	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.10	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.15	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.20	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.25	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.30	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.35	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.40	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.45	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
	0.50	1.010	0.991	0.973	0.954	0.936	0.918	0.899	0.881	0.862	0.843	0.825	0.806	0.788	0.769	0.751	0.732	0.714	0.695	0.677	0.659	0.640
0.05	0.05	1.087	1.064	1.040	1.017	0.994	0.971	0.948	0.925	0.903	0.880	0.858	0.836	0.814	0.793	0.771	0.750	0.728	0.707	0.686	0.665	0.645
	0.10	1.048	1.027	1.006	0.985	0.965	0.944	0.924	0.903	0.883	0.863	0.842	0.822	0.802	0.782	0.762	0.742	0.722	0.703	0.683	0.663	0.644
	0.15	1.034	1.014	0.994	0.974	0.954	0.935	0.915	0.895	0.876	0.856	0.836	0.817	0.797	0.778	0.759	0.739	0.720	0.701	0.681	0.662	0.643
	0.20	1.027	1.007	0.988	0.968	0.949	0.930	0.910	0.891	0.872	0.853	0.833	0.814	0.795	0.776	0.757	0.738	0.719	0.700	0.681	0.662	0.643
	0.25	1.023	1.004	0.984	0.965	0.946	0.927	0.908	0.889	0.870	0.851	0.832	0.813	0.794	0.775	0.756	0.737	0.718	0.699	0.680	0.661	0.642
	0.30	1.020	1.001	0.982	0.963	0.944	0.925	0.906	0.888	0.869	0.850	0.831	0.812	0.793	0.774	0.755	0.736	0.718	0.699	0.680	0.661	0.642
	0.35	1.019	1.000	0.981	0.962	0.943	0.924	0.906	0.887	0.868	0.849	0.830	0.811	0.792	0.774	0.755	0.736	0.717	0.699	0.680	0.661	0.642
	0.40	1.018	0.999	0.980	0.961	0.943	0.924	0.905	0.886	0.867	0.849	0.830	0.811	0.792	0.773	0.755	0.736	0.717	0.699	0.680	0.661	0.642
	0.45	1.019	1.000	0.981	0.962	0.943	0.925	0.906	0.887	0.868	0.849	0.831	0.812	0.793	0.774	0.756	0.737	0.718	0.699	0.681	0.662	0.643
	0.50	1.162	1.133	1.105	1.077	1.049	1.022	0.995	0.968	0.942	0.916	0.891	0.866	0.841	0.816	0.792	0.768	0.744	0.721	0.698	0.675	0.653
0.10	0.10	1.099	1.075	1.051	1.028	1.004	0.981	0.958	0.935	0.912	0.889	0.867	0.845	0.823	0.801	0.779	0.757	0.735	0.714	0.693	0.672	0.651
	0.15	1.072	1.050	1.028	1.006	0.984	0.962	0.941	0.919	0.898	0.877	0.856	0.835	0.814	0.793	0.772	0.751	0.731	0.710	0.690	0.670	0.650
	0.20	1.057	1.036	1.015	0.994	0.973	0.952	0.931	0.911	0.890	0.870	0.849	0.829	0.809	0.789	0.768	0.748	0.728	0.708	0.688	0.669	0.649
	0.25	1.048	1.027	1.007	0.987	0.966	0.946	0.926	0.906	0.886	0.866	0.846	0.826	0.806	0.786	0.766	0.746	0.727	0.707	0.687	0.668	0.648
	0.30	1.042	1.022	1.002	0.982	0.962	0.942	0.922	0.902	0.883	0.863	0.843	0.824	0.804	0.784	0.765	0.745	0.726	0.706	0.687	0.668	0.648
	0.35	1.039	1.019	0.999	0.979	0.960	0.940	0.920	0.901	0.881	0.862	0.842	0.823	0.803	0.784	0.764	0.745	0.726	0.706	0.687	0.668	0.648
	0.40	1.041	1.022	1.002	0.982	0.963	0.943	0.923	0.904	0.884	0.865	0.845	0.826	0.806	0.787	0.768	0.748	0.729	0.710	0.690	0.671	0.652

表 15 续 5

槽	槽	槽																				
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.15	0.05	1 226	1 192	1 160	1 128	1 096	1 065	1 035	1 005	0 976	0 948	0 920	0 892	0 865	0 838	0 812	0 786	0 761	0 736	0 711	0 687	0 663
	0.10	1 151	1 124	1 097	1 071	1 044	1 018	0 993	0 967	0 942	0 917	0 893	0 868	0 844	0 820	0 797	0 773	0 750	0 728	0 705	0 682	0 660
	0.15	1 114	1 090	1 066	1 042	1 018	0 994	0 970	0 947	0 924	0 901	0 878	0 855	0 833	0 811	0 788	0 766	0 745	0 723	0 701	0 680	0 659
	0.20	1 093	1 070	1 047	1 025	1 002	0 980	0 957	0 935	0 913	0 891	0 869	0 848	0 826	0 805	0 783	0 762	0 741	0 720	0 699	0 678	0 658
	0.25	1 080	1 058	1 036	1 014	0 993	0 971	0 949	0 928	0 907	0 885	0 864	0 843	0 822	0 801	0 780	0 760	0 739	0 718	0 698	0 678	0 657
0.20	0.30	1 072	1 051	1 030	1 008	0 987	0 966	0 945	0 924	0 903	0 882	0 862	0 841	0 820	0 800	0 779	0 759	0 739	0 718	0 698	0 678	0 658
	0.35	1 078	1 057	1 036	1 015	0 994	0 973	0 952	0 931	0 910	0 889	0 869	0 848	0 828	0 807	0 787	0 766	0 746	0 725	0 705	0 685	0 665
	0.05	1 287	1 249	1 213	1 177	1 142	1 108	1 075	1 042	1 010	0 979	0 949	0 919	0 890	0 861	0 833	0 805	0 778	0 752	0 726	0 700	0 675
	0.10	1 206	1 175	1 145	1 115	1 086	1 057	1 029	1 001	0 974	0 947	0 920	0 894	0 868	0 842	0 817	0 792	0 767	0 743	0 719	0 696	0 672
	0.15	1 162	1 135	1 108	1 081	1 055	1 029	1 004	0 978	0 953	0 928	0 904	0 879	0 855	0 831	0 808	0 784	0 761	0 738	0 715	0 693	0 670
0.25	0.20	1 136	1 111	1 086	1 061	1 037	1 013	0 989	0 965	0 941	0 917	0 894	0 871	0 848	0 825	0 802	0 780	0 758	0 735	0 713	0 692	0 670
	0.25	1 121	1 098	1 074	1 050	1 027	1 004	0 980	0 957	0 935	0 912	0 889	0 867	0 845	0 822	0 800	0 778	0 757	0 735	0 713	0 692	0 671
	0.30	1 133	1 109	1 086	1 062	1 039	1 016	0 993	0 970	0 948	0 925	0 902	0 880	0 858	0 836	0 814	0 792	0 770	0 748	0 726	0 705	0 684
	0.05	1 352	1 310	1 269	1 230	1 191	1 154	1 117	1 082	1 047	1 013	0 980	0 948	0 917	0 886	0 856	0 827	0 798	0 770	0 743	0 716	0 690
	0.10	1 265	1 231	1 198	1 165	1 133	1 101	1 070	1 040	1 010	0 980	0 952	0 923	0 895	0 868	0 841	0 814	0 788	0 762	0 737	0 712	0 687
0.30	0.15	1 217	1 187	1 158	1 129	1 100	1 071	1 043	1 016	0 988	0 961	0 935	0 909	0 883	0 857	0 832	0 807	0 782	0 758	0 734	0 710	0 686
	0.20	1 191	1 164	1 136	1 109	1 082	1 056	1 029	1 003	0 978	0 952	0 927	0 902	0 877	0 853	0 828	0 804	0 781	0 757	0 734	0 711	0 688
	0.25	1 212	1 184	1 157	1 130	1 104	1 078	1 051	1 026	1 000	0 974	0 949	0 924	0 899	0 875	0 851	0 826	0 802	0 779	0 755	0 732	0 708
	0.10	1 338	1 300	1 262	1 225	1 189	1 154	1 120	1 087	1 054	1 022	0 990	0 959	0 929	0 900	0 870	0 842	0 814	0 786	0 759	0 733	0 707
	0.15	1 291	1 257	1 224	1 191	1 159	1 128	1 097	1 066	1 036	1 006	0 977	0 949	0 920	0 893	0 865	0 838	0 812	0 786	0 760	0 734	0 709
0.35	0.20	1 328	1 294	1 261	1 229	1 197	1 165	1 134	1 103	1 073	1 044	1 014	0 985	0 957	0 929	0 901	0 873	0 846	0 819	0 793	0 767	0 741
	0.10	1 442	1 397	1 353	1 311	1 270	1 230	1 191	1 153	1 117	1 081	1 046	1 012	0 978	0 946	0 914	0 882	0 852	0 822	0 793	0 764	0 736
	0.15	1 512	1 466	1 422	1 380	1 338	1 297	1 258	1 219	1 181	1 144	1 108	1 073	1 038	1 004	0 971	0 939	0 907	0 876	0 845	0 815	0 785

表 16 椭圆埋藏裂纹的扩展

椭圆	轴 ₁ / 椭圆	椭圆																					
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	
0.0	0.05	0.909	0.892	0.876	0.859	0.842	0.826	0.809	0.792	0.776	0.759	0.742	0.726	0.709	0.693	0.676	0.659	0.643	0.626	0.609	0.593	0.576	
	0.10	0.808	0.793	0.778	0.764	0.749	0.734	0.719	0.704	0.690	0.675	0.660	0.645	0.630	0.616	0.601	0.586	0.571	0.556	0.542	0.527	0.512	
	0.15	0.707	0.694	0.681	0.668	0.655	0.642	0.629	0.616	0.603	0.590	0.577	0.565	0.552	0.539	0.526	0.513	0.500	0.487	0.474	0.461	0.448	
	0.20	0.606	0.595	0.584	0.573	0.562	0.551	0.539	0.528	0.517	0.506	0.495	0.484	0.473	0.462	0.451	0.440	0.428	0.417	0.406	0.395	0.384	
	0.25	0.505	0.496	0.486	0.477	0.468	0.459	0.449	0.440	0.431	0.422	0.412	0.403	0.394	0.385	0.375	0.366	0.357	0.348	0.338	0.329	0.320	
	0.30	0.404	0.397	0.389	0.382	0.374	0.367	0.360	0.352	0.345	0.337	0.330	0.323	0.315	0.308	0.300	0.293	0.286	0.278	0.271	0.263	0.256	
	0.35	0.303	0.297	0.292	0.286	0.281	0.275	0.270	0.264	0.259	0.253	0.247	0.242	0.236	0.231	0.225	0.220	0.214	0.209	0.203	0.198	0.192	
	0.40	0.202	0.198	0.195	0.191	0.187	0.183	0.180	0.176	0.172	0.169	0.165	0.161	0.158	0.154	0.150	0.146	0.143	0.139	0.135	0.132	0.128	
	0.45	0.101	0.099	0.097	0.095	0.094	0.092	0.090	0.088	0.086	0.084	0.082	0.081	0.079	0.077	0.075	0.073	0.071	0.070	0.068	0.066	0.064	
	0.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.05	0.05	0.816	0.797	0.778	0.760	0.742	0.724	0.706	0.688	0.671	0.654	0.636	0.619	0.602	0.586	0.569	0.553	0.536	0.520	0.504	0.488	0.472	
	0.10	0.681	0.667	0.652	0.638	0.624	0.610	0.596	0.582	0.568	0.554	0.540	0.527	0.513	0.500	0.486	0.473	0.460	0.447	0.433	0.420	0.407	
	0.15	0.568	0.557	0.545	0.533	0.522	0.510	0.498	0.487	0.476	0.464	0.453	0.442	0.430	0.419	0.408	0.397	0.386	0.375	0.364	0.354	0.343	
	0.20	0.462	0.452	0.443	0.433	0.424	0.414	0.405	0.396	0.386	0.377	0.368	0.359	0.350	0.341	0.332	0.323	0.314	0.305	0.296	0.287	0.278	
	0.25	0.358	0.350	0.343	0.335	0.328	0.321	0.313	0.306	0.299	0.291	0.284	0.277	0.270	0.263	0.256	0.249	0.242	0.235	0.228	0.221	0.214	
	0.30	0.255	0.249	0.244	0.238	0.233	0.227	0.222	0.217	0.211	0.206	0.201	0.195	0.190	0.185	0.180	0.175	0.170	0.165	0.160	0.155	0.150	
	0.35	0.153	0.149	0.145	0.142	0.138	0.135	0.131	0.128	0.124	0.121	0.117	0.114	0.111	0.108	0.104	0.101	0.098	0.095	0.092	0.088	0.085	
	0.40	0.051	0.049	0.047	0.046	0.044	0.042	0.041	0.039	0.037	0.036	0.034	0.033	0.032	0.030	0.029	0.027	0.026	0.025	0.024	0.022	0.021	
	0.45	-0.051	-0.051	-0.051	-0.051	-0.050	-0.050	-0.050	-0.050	-0.049	-0.049	-0.049	-0.049	-0.048	-0.048	-0.047	-0.047	-0.046	-0.046	-0.045	-0.044	-0.043	
	0.10	0.05	0.697	0.678	0.659	0.640	0.622	0.604	0.587	0.569	0.552	0.536	0.519	0.503	0.487	0.472	0.456	0.441	0.426	0.412	0.397	0.383	0.369
0.10		0.550	0.536	0.522	0.509	0.495	0.482	0.469	0.456	0.444	0.431	0.419	0.407	0.394	0.383	0.371	0.359	0.348	0.336	0.325	0.314	0.303	
0.15		0.429	0.418	0.408	0.397	0.387	0.377	0.367	0.357	0.347	0.337	0.328	0.318	0.309	0.300	0.290	0.281	0.272	0.264	0.255	0.246	0.238	
0.20		0.317	0.309	0.301	0.293	0.285	0.278	0.270	0.262	0.255	0.248	0.240	0.233	0.226	0.219	0.212	0.205	0.199	0.192	0.185	0.179	0.173	
0.25		0.210	0.204	0.198	0.192	0.187	0.181	0.176	0.170	0.165	0.160	0.155	0.150	0.145	0.140	0.135	0.130	0.126	0.121	0.116	0.112	0.108	
0.30		0.104	0.100	0.097	0.093	0.090	0.086	0.083	0.080	0.076	0.073	0.070	0.067	0.064	0.061	0.058	0.056	0.053	0.050	0.048	0.045	0.043	
0.35		0.000	-0.002	-0.003	-0.005	-0.007	-0.008	-0.009	-0.011	-0.012	-0.013	-0.014	-0.015	-0.016	-0.017	-0.018	-0.019	-0.020	-0.020	-0.021	-0.022	-0.022	
0.40		-0.104	-0.104	-0.104	-0.103	-0.103	-0.102	-0.102	-0.102	-0.101	-0.100	-0.100	-0.099	-0.098	-0.097	-0.096	-0.095	-0.094	-0.093	-0.091	-0.090	-0.089	-0.087

表 16 续 5

槽	槽	槽																				
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
	0.05	0.552	0.534	0.516	0.499	0.482	0.466	0.450	0.435	0.419	0.405	0.390	0.376	0.363	0.349	0.336	0.324	0.311	0.299	0.287	0.276	0.264
	0.10	0.403	0.391	0.378	0.367	0.355	0.343	0.332	0.321	0.311	0.300	0.290	0.280	0.270	0.260	0.250	0.241	0.232	0.223	0.214	0.206	0.197
	0.15	0.279	0.270	0.261	0.252	0.244	0.236	0.228	0.220	0.212	0.205	0.197	0.190	0.183	0.176	0.169	0.162	0.156	0.149	0.143	0.137	0.131
0.15	0.20	0.164	0.158	0.152	0.146	0.140	0.134	0.129	0.124	0.118	0.113	0.108	0.103	0.099	0.094	0.090	0.085	0.081	0.077	0.073	0.069	0.065
	0.25	0.054	0.050	0.047	0.043	0.040	0.036	0.033	0.030	0.027	0.024	0.021	0.019	0.016	0.014	0.011	0.009	0.007	0.005	0.003	0.001	-0.001
	0.30	-0.054	-0.055	-0.057	-0.058	-0.059	-0.061	-0.062	-0.063	-0.064	-0.064	-0.065	-0.066	-0.066	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.067	-0.066
	0.35	-0.162	-0.161	-0.161	-0.160	-0.159	-0.158	-0.157	-0.156	-0.155	-0.154	-0.152	-0.151	-0.149	-0.148	-0.146	-0.144	-0.142	-0.140	-0.138	-0.136	-0.134
	0.05	0.386	0.371	0.356	0.341	0.327	0.314	0.300	0.288	0.276	0.264	0.252	0.241	0.231	0.220	0.210	0.201	0.191	0.182	0.173	0.165	0.157
	0.10	0.241	0.231	0.221	0.212	0.202	0.194	0.185	0.176	0.168	0.160	0.153	0.145	0.138	0.131	0.125	0.118	0.112	0.106	0.100	0.094	0.089
0.20	0.15	0.116	0.110	0.103	0.097	0.091	0.085	0.080	0.075	0.069	0.064	0.060	0.055	0.051	0.046	0.042	0.038	0.035	0.031	0.028	0.025	0.021
	0.20	0.000	-0.004	-0.007	-0.011	-0.014	-0.017	-0.020	-0.023	-0.026	-0.028	-0.030	-0.033	-0.035	-0.036	-0.038	-0.040	-0.041	-0.043	-0.044	-0.045	-0.046
	0.25	-0.112	-0.113	-0.115	-0.116	-0.117	-0.117	-0.118	-0.119	-0.119	-0.119	-0.119	-0.119	-0.119	-0.119	-0.119	-0.118	-0.117	-0.116	-0.115	-0.114	-0.113
	0.30	-0.227	-0.226	-0.225	-0.223	-0.222	-0.221	-0.219	-0.217	-0.215	-0.213	-0.211	-0.209	-0.207	-0.204	-0.201	-0.199	-0.196	-0.193	-0.190	-0.187	-0.183
	0.05	0.203	0.191	0.180	0.169	0.158	0.149	0.139	0.130	0.121	0.113	0.105	0.098	0.091	0.084	0.078	0.071	0.065	0.060	0.055	0.050	0.045
	0.10	0.063	0.056	0.050	0.043	0.037	0.032	0.026	0.021	0.016	0.012	0.007	0.003	-0.001	-0.005	-0.008	-0.011	-0.014	-0.017	-0.020	-0.022	-0.024
0.25	0.15	-0.061	-0.064	-0.068	-0.071	-0.074	-0.076	-0.079	-0.081	-0.083	-0.085	-0.086	-0.088	-0.089	-0.090	-0.091	-0.092	-0.092	-0.093	-0.093	-0.093	-0.093
	0.20	-0.179	-0.179	-0.180	-0.180	-0.181	-0.181	-0.181	-0.180	-0.180	-0.179	-0.178	-0.177	-0.176	-0.175	-0.174	-0.172	-0.170	-0.168	-0.166	-0.164	-0.162
	0.25	-0.303	-0.301	-0.299	-0.297	-0.295	-0.292	-0.290	-0.287	-0.284	-0.281	-0.278	-0.274	-0.271	-0.267	-0.263	-0.259	-0.255	-0.251	-0.247	-0.242	-0.237
	0.10	-0.134	-0.137	-0.139	-0.141	-0.143	-0.145	-0.146	-0.147	-0.148	-0.149	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.149	-0.148	-0.147	-0.146	-0.144	-0.144	-0.143
0.30	0.15	-0.258	-0.258	-0.257	-0.257	-0.256	-0.254	-0.253	-0.251	-0.249	-0.247	-0.245	-0.243	-0.240	-0.238	-0.235	-0.232	-0.229	-0.225	-0.222	-0.218	-0.214
	0.20	-0.398	-0.395	-0.391	-0.387	-0.383	-0.379	-0.375	-0.370	-0.366	-0.361	-0.356	-0.351	-0.346	-0.340	-0.335	-0.329	-0.323	-0.317	-0.311	-0.304	-0.298
	0.10	-0.360	-0.358	-0.354	-0.351	-0.348	-0.344	-0.340	-0.336	-0.332	-0.328	-0.324	-0.319	-0.314	-0.310	-0.305	-0.299	-0.294	-0.289	-0.283	-0.277	-0.272
0.35	0.15	-0.529	-0.522	-0.515	-0.507	-0.500	-0.493	-0.485	-0.477	-0.470	-0.462	-0.454	-0.446	-0.437	-0.429	-0.421	-0.412	-0.404	-0.395	-0.386	-0.377	-0.368

表 D.17 焊趾处表面裂纹的 M_{km}

$\frac{L_w}{B}$	a/B																	
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
0.10	1.142	1.017	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.20	1.377	1.111	1.067	1.045	1.028	1.015	1.004	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.30	1.536	1.239	1.123	1.095	1.075	1.058	1.044	1.032	1.021	1.012	1.004	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.40	1.660	1.339	1.181	1.139	1.115	1.095	1.078	1.064	1.052	1.041	1.031	1.023	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.50	1.763	1.422	1.254	1.179	1.151	1.128	1.109	1.093	1.079	1.067	1.056	1.046	1.021	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.60	1.852	1.494	1.318	1.216	1.184	1.159	1.138	1.120	1.104	1.091	1.078	1.067	1.039	1.005	1.000	1.000	1.000	1.000
0.70	1.931	1.557	1.374	1.256	1.215	1.187	1.164	1.145	1.128	1.113	1.099	1.087	1.057	1.019	1.000	1.000	1.000	1.000
0.80	2.002	1.615	1.424	1.302	1.245	1.215	1.190	1.168	1.150	1.134	1.119	1.106	1.073	1.032	1.001	1.000	1.000	1.000
0.90	2.066	1.667	1.470	1.345	1.274	1.241	1.214	1.191	1.171	1.153	1.138	1.124	1.088	1.045	1.012	1.000	1.000	1.000
1.00	2.126	1.715	1.512	1.383	1.291	1.266	1.237	1.212	1.191	1.172	1.156	1.141	1.103	1.057	1.022	1.000	1.000	1.000
1.10	2.181	1.760	1.552	1.419	1.325	1.290	1.259	1.233	1.211	1.191	1.173	1.157	1.117	1.068	1.031	1.002	1.000	1.000
1.20	2.233	1.801	1.589	1.453	1.356	1.313	1.281	1.253	1.229	1.208	1.190	1.173	1.131	1.079	1.041	1.010	1.000	1.000
1.30	2.282	1.841	1.623	1.485	1.386	1.336	1.302	1.273	1.248	1.226	1.206	1.188	1.144	1.090	1.049	1.018	1.000	1.000
1.40	2.328	1.878	1.656	1.515	1.414	1.336	1.322	1.292	1.265	1.242	1.222	1.203	1.157	1.100	1.058	1.025	1.000	1.000
1.50	2.372	1.913	1.687	1.543	1.440	1.361	1.342	1.310	1.283	1.258	1.237	1.218	1.170	1.110	1.066	1.032	1.003	1.000
1.60	2.414	1.947	1.717	1.571	1.466	1.385	1.362	1.328	1.300	1.274	1.252	1.232	1.182	1.120	1.074	1.039	1.009	1.000
1.70	2.454	1.979	1.745	1.596	1.490	1.408	1.381	1.346	1.316	1.290	1.267	1.246	1.194	1.130	1.082	1.045	1.015	1.000
1.80	2.492	2.010	1.772	1.621	1.513	1.430	1.400	1.364	1.332	1.305	1.281	1.259	1.205	1.139	1.090	1.052	1.020	1.000
1.90	2.528	2.039	1.799	1.645	1.535	1.451	1.383	1.381	1.348	1.320	1.295	1.272	1.216	1.148	1.098	1.058	1.026	1.000
2.00	2.564	2.068	1.824	1.668	1.557	1.471	1.402	1.398	1.364	1.335	1.309	1.285	1.228	1.157	1.105	1.064	1.031	1.003
>2.00	2.564	2.068	1.824	1.668	1.557	1.471	1.402	1.375	1.343	1.315	1.291	1.268	1.213	1.145	1.095	1.056	1.024	1.000

表 D.18 焊趾处表面裂纹的 M_{kb}

$\frac{L_w}{B}$	a/B																
	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125	0.130	0.135
0.01	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.02	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.03	1.034	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.04	1.061	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.05	1.084	1.011	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.06	1.104	1.026	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.07	1.122	1.040	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.08	1.138	1.053	1.006	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 D.18 (续)

$\frac{L_w}{B}$	a/B																
	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125	0.130	0.135
0.09	1.153	1.065	1.016	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.10	1.166	1.075	1.025	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.20	1.338	1.155	1.094	1.052	1.020	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.30	1.457	1.211	1.141	1.093	1.058	1.030	1.007	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.40	1.548	1.255	1.178	1.126	1.088	1.057	1.032	1.010	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.50	1.622	1.308	1.210	1.154	1.112	1.079	1.052	1.030	1.010	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.60	1.685	1.359	1.237	1.178	1.134	1.099	1.071	1.046	1.026	1.007	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.70	1.741	1.404	1.262	1.199	1.153	1.117	1.087	1.061	1.040	1.020	1.012	1.003	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.80	1.790	1.444	1.284	1.219	1.171	1.132	1.101	1.075	1.052	1.032	1.023	1.015	1.006	1.000	1.000	1.000	1.000
0.90	1.835	1.480	1.305	1.237	1.187	1.147	1.115	1.087	1.064	1.043	1.034	1.025	1.016	1.008	1.001	1.000	1.000
1.00	1.876	1.513	1.334	1.253	1.201	1.161	1.127	1.099	1.074	1.053	1.043	1.034	1.026	1.017	1.009	1.002	1.000
>1.00	1.876	1.513	1.334	1.253	1.201	1.161	1.127	1.099	1.074	1.053	1.043	1.034	1.026	1.017	1.009	1.002	1.000

表 D.19 受内压接管拐角焊缝的 F_{ch}/g_2 (容器内壁处 $\varphi=0$)

$\frac{a_{45}}{B_{45}}$	a/c																		
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
0.00	0.469	0.544	0.602	0.655	0.709	0.768	0.836	0.917	1.011	1.016	1.019	1.022	1.025	1.027	1.029	1.031	1.032	1.034	1.035
0.05	0.510	0.593	0.657	0.715	0.774	0.838	0.912	0.997	1.097	1.102	1.105	1.109	1.111	1.114	1.116	1.117	1.119	1.120	1.122
0.10	0.525	0.609	0.676	0.736	0.795	0.860	0.934	1.019	1.117	1.121	1.125	1.127	1.130	1.132	1.134	1.135	1.137	1.138	1.139
0.15	0.542	0.628	0.695	0.756	0.817	0.882	0.955	1.039	1.135	1.138	1.141	1.143	1.145	1.147	1.148	1.150	1.151	1.152	1.153
0.20	0.562	0.649	0.718	0.779	0.840	0.905	0.977	1.059	1.154	1.155	1.156	1.158	1.159	1.160	1.161	1.162	1.163	1.164	1.165
0.25	0.587	0.675	0.743	0.805	0.865	0.930	1.001	1.082	1.174	1.173	1.173	1.173	1.173	1.174	1.175	1.175	1.176	1.176	1.177
0.30	0.617	0.704	0.773	0.834	0.894	0.958	1.028	1.106	1.196	1.192	1.190	1.189	1.189	1.188	1.188	1.188	1.188	1.188	1.188
0.35	0.651	0.738	0.806	0.867	0.926	0.989	1.057	1.134	1.220	1.213	1.209	1.207	1.205	1.203	1.202	1.202	1.201	1.201	1.201
0.40	0.690	0.776	0.843	0.903	0.962	1.023	1.089	1.163	1.246	1.236	1.230	1.225	1.222	1.219	1.218	1.216	1.215	1.214	1.213
0.45	0.733	0.818	0.884	0.943	1.000	1.060	1.124	1.196	1.275	1.262	1.252	1.245	1.240	1.237	1.234	1.231	1.229	1.228	1.226
0.50	0.781	0.864	0.929	0.986	1.042	1.100	1.162	1.230	1.307	1.289	1.276	1.267	1.260	1.255	1.251	1.247	1.245	1.242	1.240
0.55	0.833	0.914	0.977	1.032	1.087	1.142	1.202	1.268	1.340	1.318	1.302	1.290	1.281	1.274	1.269	1.264	1.261	1.258	1.255
0.60	0.890	0.967	1.028	1.082	1.134	1.188	1.245	1.307	1.376	1.349	1.329	1.315	1.304	1.295	1.288	1.283	1.278	1.274	1.270
0.65	0.950	1.023	1.082	1.134	1.184	1.236	1.290	1.349	1.414	1.381	1.358	1.341	1.327	1.317	1.308	1.302	1.296	1.291	1.287
0.70	1.013	1.082	1.138	1.188	1.236	1.285	1.337	1.393	1.453	1.416	1.388	1.368	1.352	1.340	1.330	1.322	1.315	1.309	1.304
0.75	1.080	1.143	1.196	1.243	1.289	1.336	1.386	1.438	1.495	1.452	1.420	1.396	1.378	1.364	1.352	1.343	1.335	1.328	1.322
0.80	1.149	1.205	1.255	1.300	1.344	1.388	1.435	1.485	1.537	1.489	1.453	1.426	1.406	1.389	1.376	1.365	1.355	1.347	1.340

表 D.20 受内压接管拐角焊缝的 g_2 (容器内壁处 $\varphi = 0$)

c/R_{in}	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
g_2	2.519	2.215	2.001	1.846	1.730	1.641	1.570	1.513	1.466	1.426	1.393	1.364	1.339	1.318	1.298	1.281	1.266	1.252	1.240	1.228
c/R_{in}	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00
g_2	1.218	1.208	1.199	1.191	1.184	1.177	1.170	1.164	1.158	1.153	1.148	1.143	1.139	1.135	1.131	1.127	1.123	1.120	1.117	1.114
c/R_{in}	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.60	4.70	4.80	4.90	5.00	5.10	5.20	5.30	5.40	5.50	5.60	5.70	5.80	5.90	6.00
g_2	1.111	1.108	1.105	1.103	1.100	1.098	1.096	1.094	1.092	1.090	1.088	1.086	1.084	1.083	1.081	1.079	1.078	1.076	1.075	1.074

表 D.21 受内压接管拐角焊缝的 F_{ch}/g_2 (容器内壁处 $\varphi = \pi/2$)

$\frac{a_{45}}{B_{45}}$	a/c																			
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	
0.00	1.048	0.993	0.952	0.926	0.915	0.918	0.935	0.966	1.011	0.968	0.930	0.897	0.866	0.839	0.814	0.791	0.769	0.750	0.732	
0.05	1.140	1.081	1.038	1.011	0.999	1.001	1.019	1.050	1.096	1.050	1.008	0.972	0.939	0.909	0.882	0.857	0.834	0.812	0.793	
0.10	1.169	1.109	1.065	1.037	1.024	1.025	1.041	1.070	1.114	1.066	1.024	0.986	0.953	0.922	0.895	0.869	0.846	0.824	0.804	
0.15	1.202	1.138	1.092	1.062	1.047	1.046	1.060	1.087	1.127	1.078	1.035	0.997	0.963	0.932	0.904	0.878	0.854	0.833	0.812	
0.20	1.242	1.171	1.120	1.088	1.070	1.068	1.078	1.102	1.139	1.089	1.044	1.006	0.971	0.939	0.911	0.885	0.861	0.839	0.819	
0.25	1.288	1.208	1.153	1.116	1.096	1.090	1.097	1.118	1.151	1.098	1.053	1.013	0.978	0.946	0.917	0.891	0.867	0.844	0.824	
0.30	1.341	1.250	1.188	1.147	1.122	1.113	1.117	1.134	1.162	1.108	1.061	1.021	0.984	0.952	0.923	0.896	0.872	0.849	0.828	
0.35	1.401	1.297	1.227	1.180	1.151	1.138	1.138	1.150	1.174	1.117	1.069	1.027	0.991	0.958	0.928	0.901	0.876	0.854	0.833	
0.40	1.468	1.348	1.269	1.215	1.181	1.163	1.159	1.167	1.186	1.127	1.077	1.034	0.996	0.963	0.933	0.906	0.881	0.858	0.837	
0.45	1.541	1.403	1.313	1.253	1.213	1.190	1.181	1.184	1.198	1.136	1.085	1.041	1.002	0.968	0.938	0.910	0.885	0.861	0.840	
0.50	1.618	1.461	1.360	1.292	1.246	1.218	1.203	1.201	1.210	1.146	1.092	1.047	1.008	0.973	0.942	0.914	0.888	0.865	0.843	
0.55	1.700	1.522	1.409	1.332	1.280	1.246	1.226	1.219	1.222	1.155	1.100	1.053	1.013	0.978	0.946	0.918	0.892	0.868	0.847	
0.60	1.785	1.584	1.458	1.373	1.314	1.274	1.249	1.237	1.234	1.164	1.107	1.060	1.018	0.982	0.950	0.922	0.895	0.872	0.850	
0.65	1.872	1.647	1.508	1.413	1.347	1.302	1.272	1.254	1.246	1.174	1.115	1.066	1.023	0.987	0.954	0.925	0.899	0.875	0.853	
0.70	1.961	1.709	1.557	1.453	1.380	1.329	1.293	1.270	1.257	1.182	1.122	1.071	1.028	0.991	0.958	0.929	0.902	0.878	0.855	
0.75	2.048	1.770	1.604	1.491	1.412	1.355	1.314	1.286	1.268	1.190	1.128	1.077	1.033	0.995	0.962	0.932	0.905	0.880	0.858	
0.80	2.134	1.827	1.648	1.527	1.441	1.379	1.333	1.300	1.277	1.198	1.134	1.082	1.037	0.999	0.965	0.935	0.908	0.883	0.860	

表 D.22 受内压接管拐角焊缝的 g_2 (容器内壁处 $\varphi = \pi/2$)

c/R_{in}	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
g_2	2.850	2.738	2.636	2.544	2.460	2.383	2.313	2.249	2.190	2.135	2.085	2.038	1.995	1.955	1.918	1.883	1.851	1.820	1.792	1.765
c/R_{in}	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00
g_2	1.740	1.717	1.695	1.674	1.654	1.635	1.618	1.601	1.585	1.570	1.555	1.542	1.529	1.516	1.504	1.493	1.482	1.471	1.461	1.452
c/R_{in}	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.60	4.70	4.80	4.90	5.00	5.10	5.20	5.30	5.40	5.50	5.60	5.70	5.80	5.90	6.00
g_2	1.442	1.434	1.425	1.417	1.409	1.401	1.394	1.387	1.380	1.373	1.367	1.361	1.355	1.349	1.343	1.338	1.332	1.327	1.322	1.318

附录 E
(规范性附录)
缺陷间的干涉效应系数

E.1 总则

E.1.1 压力容器在局部范围同时存在多个缺陷时,在缺陷安全评定中应考虑缺陷间的干涉效应。本附录给出了线弹性干涉效应系数 M 和弹塑性干涉效应系数 G 的确定方法。

E.1.2 本附录的干涉效应系数确定方法仅适用于共面缺陷。

E.2 线弹性干涉效应系数 M 的估算方法

线弹性干涉效应系数 M 按式(E.1)估算:

$$M = 1 + 0.053 \frac{s_0}{s} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中: s 和 s_0 按 5.3 的规定确定。

E.3 弹塑性干涉效应系数 G 的估算方法

E.3.1 应力应变关系符合 Ramberg—Osgood(ROR)关系的材料, G 按式(E.2)估算:

$$G = \begin{cases} M & (0 \leq L_r \leq L_1) \\ M + A_1(0.076n - 0.19)(L_r - L_1) & (L_1 < L_r \leq 1.0) \\ G_1 & (1.0 < L_r < L_r^{\max}) \end{cases} \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

n ——材料硬化指数;

L_r ——两个裂纹中较大裂纹的 L_r 值,按第 5 章和附录 C 确定;

$$L_1 = 0.24 + 0.04(n - 5);$$

$$A_1 = 0.016n - 0.056 + 1.024 \left(\frac{s_0}{s}\right) - 0.048 \left(\frac{s_0}{s}\right)^2;$$

$$G_1 = M + A_1(0.076n - 0.190)(1 - L_1)。$$

式(E.2)对 $5 \leq n \leq 12$ 有效,但对 $n < 5$ 的材料可保守地取 $n = 5$ 进行计算。

不同 n 下的 L_1 列于表 E.1。不同 s/s_0 和 n 下的 M 和 G_1 值列于表 E.2。

E.3.2 屈服应变平台长度小于 0.02 的短屈服平台材料, G 按式(E.3)估算:

$$G = \begin{cases} M & (0 \leq L_r \leq L_2) \\ M + 0.1(L_r - L_2) & (L_2 < L_r \leq L_3) \\ G_2 + B_1(L_r - L_3) & (L_3 < L_r \leq 0.90) \\ G_3 + B_2(L_r - 0.90) & (0.90 < L_r \leq 1.00) \\ G_4 - B_3(L_r - 1.00) & (1.00 < L_r \leq 1.05) \\ G_5 & (1.05 < L_r \leq L_r^{\max}) \end{cases} \dots\dots\dots (E.3)$$

式中： L_r 取两个裂纹中较大裂纹的 L_r 值，按第5章和附录C确定；其他参数计算公式如下：

$$L_2 = 0.30 + 0.50 \lg(s/s_0);$$

$$L_3 = 0.63 + 0.31 \lg(s/s_0);$$

$$B_1 = 1.22 + 0.60 \lg(s/s_0);$$

$$B_2 = 6.97 - 4.50 \lg(s/s_0);$$

$$B_3 = 18.2 - 12.5 \lg(s/s_0);$$

$$G_2 = M + 0.1(L_3 - L_2);$$

$$G_3 = G_2 + B_1(0.90 - L_3);$$

$$G_4 = G_3 + 0.1B_2;$$

$$G_5 = G_4 - 0.05B_3。$$

不同 s/s_0 下的 L_2 、 L_3 、 M 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 值列于表E.3。

E.3.3 屈服应变平台长度大于0.02及理想弹塑性材料，当 $L_r \leq 0.95$ 时， G 值可按式(E.2)估算。

表 E.1 ROR 关系材料裂纹干涉效应系数计算中不同 n 下的 L_1 值

n	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
L_1	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44

表 E.2 ROR 关系材料裂纹干涉效应系数计算中不同 s/s_0 和 n 下的 M 和 G_1 值

s/s_0	M	n										
		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
		G_1										
1.0	1.053	1.197	1.223	1.247	1.270	1.293	1.313	1.333	1.351	1.368	1.383	1.397
1.2	1.044	1.166	1.187	1.208	1.228	1.247	1.265	1.282	1.298	1.313	1.326	1.339
1.4	1.038	1.143	1.162	1.180	1.198	1.215	1.231	1.246	1.260	1.273	1.285	1.296
1.6	1.033	1.126	1.143	1.159	1.175	1.190	1.204	1.218	1.231	1.243	1.254	1.264
1.8	1.029	1.112	1.128	1.143	1.157	1.171	1.184	1.196	1.208	1.219	1.230	1.239
2.0	1.027	1.102	1.116	1.129	1.143	1.155	1.167	1.179	1.190	1.200	1.210	1.219
2.2	1.024	1.093	1.106	1.118	1.131	1.143	1.154	1.165	1.175	1.185	1.194	1.202
2.4	1.022	1.085	1.098	1.109	1.121	1.132	1.143	1.153	1.162	1.172	1.180	1.188
2.6	1.020	1.079	1.091	1.102	1.112	1.123	1.133	1.143	1.152	1.161	1.169	1.177
2.8	1.019	1.074	1.084	1.095	1.105	1.115	1.125	1.134	1.143	1.151	1.159	1.166
3.0	1.018	1.069	1.079	1.089	1.099	1.108	1.117	1.126	1.135	1.143	1.150	1.158
3.2	1.017	1.065	1.075	1.084	1.093	1.102	1.111	1.120	1.128	1.136	1.143	1.150
3.4	1.016	1.061	1.071	1.080	1.089	1.097	1.106	1.114	1.122	1.129	1.136	1.143
3.6	1.015	1.058	1.067	1.076	1.084	1.093	1.101	1.109	1.116	1.124	1.130	1.137
3.8	1.014	1.055	1.064	1.072	1.080	1.088	1.096	1.104	1.111	1.118	1.125	1.132
4.0	1.013	1.053	1.061	1.069	1.077	1.085	1.092	1.100	1.107	1.114	1.120	1.127
4.2	1.013	1.050	1.058	1.066	1.074	1.081	1.089	1.096	1.103	1.110	1.116	1.122
4.4	1.012	1.048	1.056	1.063	1.071	1.078	1.085	1.092	1.099	1.106	1.112	1.118
4.6	1.012	1.046	1.054	1.061	1.068	1.075	1.082	1.089	1.096	1.102	1.109	1.115
4.8	1.011	1.045	1.052	1.059	1.066	1.073	1.080	1.086	1.093	1.099	1.105	1.111
5.0	1.011	1.043	1.050	1.057	1.063	1.070	1.077	1.084	1.090	1.096	1.102	1.108

表 E.3 短屈服平台材料干涉效应系数计算中诸函数与 s/s_0 的关系的对照表

s/s_0	L_2	L_3	M	G_2	G_3	G_4	G_5
1.0	0.300	0.630	1.053	1.086	1.415	2.112	1.202
1.2	0.340	0.655	1.044	1.076	1.387	2.048	1.188
1.4	0.373	0.675	1.038	1.068	1.362	1.993	1.174
1.6	0.402	0.693	1.033	1.062	1.340	1.945	1.162
1.8	0.428	0.709	1.029	1.058	1.320	1.902	1.151
2.0	0.451	0.723	1.027	1.054	1.301	1.863	1.141
2.2	0.471	0.736	1.024	1.051	1.284	1.827	1.131
2.4	0.490	0.748	1.022	1.048	1.268	1.794	1.122
2.6	0.507	0.759	1.020	1.046	1.253	1.763	1.113
2.8	0.524	0.769	1.019	1.043	1.239	1.735	1.104
3.0	0.539	0.778	1.018	1.042	1.226	1.708	1.096
3.2	0.553	0.787	1.017	1.040	1.213	1.682	1.088
3.4	0.566	0.795	1.016	1.038	1.200	1.658	1.080
3.6	0.578	0.802	1.015	1.037	1.189	1.635	1.073
3.8	0.590	0.810	1.014	1.036	1.117	1.614	1.066
4.0	0.601	0.817	1.013	1.035	1.167	1.593	1.059
4.2	0.612	0.823	1.013	1.034	1.156	1.573	1.052
4.4	0.622	0.829	1.012	1.033	1.146	1.554	1.046
4.6	0.631	0.835	1.012	1.032	1.136	1.535	1.039
4.8	0.641	0.841	1.011	1.031	1.127	1.517	1.033
5.0	0.649	0.847	1.011	1.030	1.118	1.500	1.027

附录 F

(资料性附录)

平面缺陷的分析评定方法

F.1 特殊和附加的主要符号

下列符号适用于本附录。

- A ——长表面裂纹形状因子的修正系数；
- A_0 ——半椭圆环向表面裂纹形状因子的修正系数；
- $A_1 \sim A_5$ ——环向表面裂纹极限载荷的影响系数；
- a ——表面裂纹深度, mm；
- a_0 ——表面裂纹原始深度, mm；
- a_e ——考虑塑性区修正的表面裂纹深度, mm；
- B ——容器壁厚, mm；
- B_R ——表面裂纹塑性区修正的影响因子；
- c ——表面裂纹半长, mm；
- c_0 ——表面裂纹原始半长, mm；
- F ——表面裂纹的形状因子；
- F_e ——考虑塑性区修正的表面裂纹形状因子；
- G_0 ——均匀残余应力的等效因子；
- G_i ——非均匀残余应力时的等效因子；
- H —— J 积分全塑性解；
- H_1 ——长屈服平台材料应力应变曲线分两段进行 ROR 关系拟合时, 相应 α_1 、 n_1 的 EPRI 全塑性解；
- H_2 ——长屈服平台材料应力应变曲线分两段进行 ROR 关系拟合时, 相应 α_2 、 n_2 的 EPRI 全塑性解；
- J_e ——考虑塑性区修正的弹性 J 积分值, N/mm；
- J_p ——全塑性 J 积分值, N/mm；
- m ——等效残余应力的等效因子计算参数；
- n_1 ——长屈服平台材料应力应变曲线分两段进行 ROR 关系拟合时, 第一段的应变硬化指数；
- n_2 ——长屈服平台材料应力应变曲线分两段进行 ROR 关系拟合时, 第二段的应变硬化指数；
- n_L ——结构塑性失稳破坏模式的安全系数；
- n_{ins} ——裂纹延性撕裂失稳破坏模式的安全系数；
- P ——轴向拉伸荷载, N；
- P_0 ——表面裂纹的参考轴向拉伸荷载, N；
- P_c ——长屈服平台材料应力应变曲线分两段进行 ROR 关系拟合时, 联接点处的荷载值, N；
- P_L ——结构塑性极限载荷, 轴向拉力, N；

- P_f ——延性撕裂失稳载荷,轴向拉力,N;
 $[P]$ ——许用载荷,轴向拉力,N;
 $[P_f]$ ——裂纹撕裂失稳破坏模式的许用载荷,轴向拉力,N;
 $[P_L]$ ——结构塑性失稳破坏模式的许用载荷,轴向拉力,N;
 p_f ——延性撕裂失稳载荷,内压,MPa;
 p_L ——结构塑性极限载荷,内压,MPa;
 $[p]$ ——许用载荷,内压,MPa;
 $[p_f]$ ——裂纹撕裂失稳破坏模式的许用载荷,内压,MPa;
 $[p_L]$ ——结构塑性失稳破坏模式的许用载荷,内压,MPa;
 Z ——残余应力分布曲线的厚度坐标值,mm;
 α ——ROR 材料应力应变关系曲线的应变应变硬化系数;
 α_1 ——长屈服平台材料应力应变曲线分两段进行 ROR 关系拟合时,第一段的应变硬化系数;
 α_2 ——长屈服平台材料应力应变曲线分两段进行 ROR 关系拟合时,第二段的应变硬化系数;
 α_0 ——容器轴向表面裂纹形状因子的修正系数;
 α_e ——考虑塑性区修正的轴向表面裂纹形状因子的修正系数;
 α_L ——环向表面裂纹塑性极限载荷的塑性极限角,rad;
 α_i ——残余应力等效因子的计算参数;
 Δa ——裂纹扩展量,mm;
 Δa_f ——裂纹由稳定扩展至失稳扩展的临界裂纹扩展量,mm;
 σ_e ——材料应力应变关系分两段拟合时,交点处应力,MPa;
 σ_f ——裂纹延性撕裂失稳应力,MPa;
 σ_R ——容器的实际残余应力值,MPa;
 σ_R^e ——容器的等效残余应力值,MPa;
 $\sigma_{(i)}$ ——残余应力分布曲线应力系数,MPa;
 θ ——环向裂纹半角,rad;
 ξ ——环向表面裂纹极限载荷计算公式中,容器厚度与外半径之比, $\xi=B/R_0$ 。

F.2 评定方法

平面缺陷的分析评定方法在于确定当裂纹起裂后,在裂纹发生延性稳定扩展至失稳临界尺寸过程中,构件所能承受的许用载荷,并对结构的安全性进行评价。

F.3 适用范围

平面缺陷的分析评定方法适用于 ROR 关系材料及具有较长屈服平台材料的容器内表面的环向裂纹、整圈环向裂纹、轴向裂纹及超长轴向裂纹等。

F.4 评定程序

平面缺陷的分析评定按下列步骤进行:

- a) 裂纹构形及材料断裂性能确定；
- b) 裂纹延性撕裂失稳载荷(应力)确定；
- c) 构件塑性极限载荷(应力)确定；
- d) 安全系数的选取及许用载荷确定；
- e) 含裂纹结构安全性的评价。

F.5 分析评定所需基本数据的确定

分析评定时所需确定的裂纹构形尺寸和材料性能等基本数据如下：

- a) 容器壁厚、表面裂纹原始深度、裂纹原始半长(B, a_0, c_0)。
- b) 容器内、外半径(R_i, R_o)。
- c) ROR 关系材料的应变硬化系数和指数(α, n)。
- d) 对具有较长屈服平台材料应力应变曲线,分两段进行 ROR 关系拟合得到的应变硬化系数和指数($\alpha_1, \alpha_2, n_1, n_2$),两段拟合曲线交点处应力(σ_c)。
- e) 材料屈服强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比($\sigma_s, \sigma_b, E, \nu$)。
- f) 材料的 J_R 阻力曲线数据(参照可靠的标准试验方法进行测试。如果采用单试样(柔度)法测定时,可以从三个单试样试验所获得的最低曲线中得到评定数据。如果采用多试样法,至少应有四个有效试样的数据,并且要从下包络曲线或回归曲线减去一个标准偏差的下分散带来获得数据)。
- g) 焊接残余应力。对于轴向表面裂纹,如确认沿筒体壁厚分布有环向残余应力,则应在评定前,通过实验或其他可靠方法确定残余应力 σ_R ,并将残余应力沿壁厚方向的分布函数用式(F.1)的形式表示:

$$\sigma_R = \sigma_{(0)} + \sigma_{(1)} \frac{Z}{B} + \sigma_{(2)} \left(\frac{Z}{B}\right)^2 + \sigma_{(3)} \left(\frac{Z}{B}\right)^3 \quad (\text{在内壁, } Z=0) \quad \dots\dots\dots (\text{F.1})$$

F.6 安全系数的选取

安全系数按以下规定选取：

- a) 对于裂纹撕裂失稳的破坏模式,安全系数 n_{ins} 取 1.5~2.2,具体数值可根据评定要求、失效后果以及评定经验综合确定。
- b) 对于结构塑性失稳的破坏模式,安全系数 n_1 按下述原则选取:失效后果一般的取 1.3;失效后果严重的取 1.5。

F.7 裂纹延性撕裂失稳载荷的确定

F.7.1 计算步骤

计算步骤如下：

- a) 给定一系列裂纹扩展量 $\Delta a(i) (i=1, 2, \dots, n)$ 。

注: $\Delta a(i)$ 由评定计算者根据经验给定,数据间距越小计算精度越高。

- b) 在材料 J_R 阻力曲线上确定一系列与 $\Delta a(i)$ 相对应的材料撕裂断裂韧度 $J_R [\Delta a(i)] (i=1, 2, \dots, n)$ 。

c) 由式(F.2)解出平衡应力 $\sigma(i) (i=1, 2, \dots, n)$:

$$J(a_0 + \Delta a(i), \sigma(i)) = \Delta J_R [\Delta a(i)] \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

方程左端项为被评定结构含深为 $a_0 + \Delta a(i)$ 、半长为 c_0 的裂纹在外载应力 $\sigma(i)$ 作用下的 J 积分, 计算公式由式(F.28)给出, 式(F.39)、式(F.40)给出考虑残余应力时的 J 积分计算公式。式(F.2)是以 $\sigma(i)$ 为单一未知数的非线性方程, 需迭代求解, 验敛误差应不大于 2%。

d) 在由 n 对离散点 $[\sigma(i), \Delta a(i)]$ 描述的 $\sigma \sim \Delta a$ 曲线上, 确定 $\frac{\partial \sigma}{\partial \Delta a} = 0$ 处的 σ 和 Δa ; 也可用 $(\sigma$

$(i), \Delta a(i))$ 数据系列中的最大 $\sigma(i)$ 所对应的位置近似作为 $\sigma \sim \Delta a$ 曲线上 $\frac{\partial \sigma}{\partial \Delta a} = 0$ 的位置。

e) 上步中确定的 σ 即为裂纹撕裂失稳应力 σ_f , 相应的载荷即为延性撕裂失稳载荷 P_f 或 p_f , Δa 即为裂纹由稳定扩展至失稳扩展的临界裂纹扩展量 Δa_f 。

F.7.2 含裂纹构件的弹塑性 J 积分

F.7.2.1 含裂纹结构 J 积分计算公式

含裂纹构件的弹塑性 J 积分等于弹性 J 积分 J_e 与全塑性 J 积分 J_p 之和, 即:

$$J = J_e + J_p \quad \dots\dots\dots (F.3)$$

本附录给出四种典型裂纹构形的 J 积分表达式。计算全塑性 J 积分 J_p 时需要的全塑性解系数 H_1 由式(F.44)给出。

F.7.2.2 容器内表面环向裂纹 J 积分表达式

$$J_e = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\pi(1 - \nu^2) \cdot F_e^2 \cdot \left(\frac{B}{a}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (F.4)$$

$$\frac{a_c}{B} = \frac{a}{B} + \frac{n-1}{6(n+1)} \cdot F^2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2 / \left[1 + B_R \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (F.5)$$

$$\begin{cases} F = 0.25 + 0.5298 \cdot \left(\frac{a}{BA_0}\right) + 0.3835 \cdot \left(\frac{a}{BA_0}\right)^2 & \left(\text{当 } \frac{a}{BA_0} \geq 0.25 \text{ 时} \right) \\ F = 3.72 \cdot \left(\frac{a}{BA_0}\right) - 13.475 \cdot \left(\frac{a}{BA_0}\right)^2 + 19.988 \cdot \left(\frac{a}{BA_0}\right)^3 & \left(\text{当 } \frac{a}{BA_0} < 0.25 \text{ 时} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (F.6)$$

$$A_0 = (0.25 + a/c)^{0.58} \quad \dots\dots\dots (F.7)$$

$$B_R = \left\{ (R_o^2 - R_i^2) / \left[R_o^2 - (R_i + a)^2 + \left(1 - \frac{c}{4R_i}\right) (2R_i a + a^2) \right] \right\}^2 \quad \dots\dots\dots (F.8)$$

$$\sigma = P / [\pi(R_o^2 - R_i^2)] \quad \dots\dots\dots (F.9)$$

$$\begin{cases} J_p = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\alpha_1 \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{n_1+1} \right] & \left(\text{当 } \sigma \leq \sigma_c \text{ 时} \right) \\ J_p = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\alpha_1 \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_1 \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_s}\right)^{n_1+1} + \alpha_2 \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_2 \cdot \left\{ \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{n_2+1} - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_s}\right)^{n_2+1} \right\} \right] & \left(\text{当 } \sigma > \sigma_c \text{ 时} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (F.10)$$

F.7.2.3 容器内表面全周长环向裂纹 J 积分表达式

$$J_e = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\pi(1 - \nu^2) \cdot F_e^2 \cdot \left(\frac{a_c}{a}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (F.11)$$

$$\frac{a_e}{a} = 1 + \frac{n-1}{6(n+1)} \cdot F^2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2 / \left[1 + \left(\frac{P}{P_o}\right)^2\right] \dots\dots\dots (F.12)$$

$$F = 1.1 + A \left[1.948 \cdot \left(\frac{a}{B}\right)^{1.5} + 0.334 \cdot 2 \cdot \left(\frac{a}{B}\right)^{4.2}\right] \dots\dots\dots (F.13)$$

$$\begin{cases} A = [0.125 \cdot (R_i/B) - 0.25]^{0.25} \text{ (当 } 5 \leq (R_i/B) \leq 10 \text{ 时)} \\ A = [0.4 \cdot (R_i/B) - 3.0]^{0.25} \text{ (当 } 10 \leq (R_i/B) \leq 20 \text{ 时)} \end{cases} \dots\dots\dots (F.14)$$

$$\frac{P}{P_o} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{R_o^2 - R_i^2}{R_o^2 - (R_i + a)^2} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right) \dots\dots\dots (F.15)$$

$$\sigma = P / [\pi(R_o^2 - R_i^2)] \dots\dots\dots (F.16)$$

$$\begin{cases} J_p = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\alpha_1 \left(\frac{B}{a}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{B}\right)^2 \cdot H_1 \cdot \left(\frac{P}{P_o}\right)^{n_1+1} \right] \text{ (当 } \sigma \leq \sigma_c \text{ 时)} \\ J_p = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left\{ \alpha_1 \left(\frac{B}{a}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{B}\right)^2 \cdot H_1 \cdot \left(\frac{P_c}{P_o}\right)^{n_1+1} + \alpha_2 \left(\frac{B}{a}\right) \cdot \right. \\ \left. \left(1 - \frac{a}{B}\right)^2 \cdot H_2 \cdot \left[\left(\frac{P}{P_o}\right)^{n_2+1} - \left(\frac{P_c}{P_o}\right)^{n_2+1} \right] \right\} \text{ (当 } \sigma > \sigma_c \text{ 时)} \end{cases} \dots\dots\dots (F.17)$$

$$\frac{P_c}{P_o} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{R_o^2 - R_i^2}{R_o^2 - (R_i + a)^2} \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_s}\right) \dots\dots\dots (F.18)$$

F.7.2.4 容器内表面轴向裂纹 J 积分表达式

$$J_e = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\pi(1 - \nu^2) \cdot F_e^2 \cdot \left(\frac{B}{a}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2 \right] \dots\dots\dots (F.19)$$

$$F_e = 0.25 + 0.475 \cdot 9\alpha_e + 0.126 \cdot 2\alpha_e^2 \dots\dots\dots (F.20)$$

$$\alpha_e = \left[\frac{a}{B} + \frac{n-1}{6(n+1)} \cdot \frac{F^2 \cdot (\sigma/\sigma_s)^2}{1 + B_R \cdot (\sigma/\sigma_s)^2} \right] / (a/c)^{0.58} \dots\dots\dots (F.21)$$

$$F = 0.25 + 0.475 \cdot 9\alpha_0 + 0.126 \cdot 2\alpha_0^2 \dots\dots\dots (F.22)$$

$$\alpha_0 = \left(\frac{a}{B}\right) / \left(\frac{a}{c}\right)^{0.58} \dots\dots\dots (F.23)$$

$$B_R = 1.045 \cdot 3 \left\{ \left[1 - \frac{a}{B} / \left(1 + 0.153 \cdot 3 \frac{c^2}{B^2}\right)^{0.5} \right] / \left(1 - \frac{a}{B}\right) \right\} \dots\dots\dots (F.24)$$

$$\sigma = p \cdot \frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \dots\dots\dots (F.25)$$

$$\begin{cases} J_p = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\alpha_1 \cdot \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{n_1+1} \right] \text{ (当 } \sigma \leq \sigma_c \text{ 时)} \\ J_p = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left\{ \alpha_1 \cdot \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_1 \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_s}\right)^{n_1+1} + \alpha_2 \cdot \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_2 \cdot \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{n_2+1} - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_s}\right)^{n_2+1} \right] \right\} \text{ (当 } \sigma > \sigma_c \text{ 时)} \end{cases} \dots\dots\dots (F.26)$$

F.7.2.5 容器内表面长轴向裂纹 J 积分表达式

$$J_e = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\pi(1 - \nu^2) \cdot F_e^2 \cdot \left(\frac{a_e}{a}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2 \right] \dots\dots\dots (F.27)$$

$$\frac{a_e}{a} = 1 + \frac{n-1}{6(n+1)} \cdot \frac{F^2 \cdot (\sigma/\sigma_s)^2}{1+B_R(\sigma/\sigma_s)^2} \dots\dots\dots (F.28)$$

$$F = 1.1 + A \left\{ 4.951 \cdot \left(\frac{a}{B}\right)^2 + 1.092 \cdot \left(\frac{a}{B}\right)^4 \right\} \dots\dots\dots (F.29)$$

$$\begin{cases} A = [0.125 \cdot (R_i/B) - 0.25]^{0.25} \text{ (当 } 5 \leq (R_i/B) \leq 10 \text{ 时)} \\ A = [0.2 \cdot (R_i/B) - 1.0]^{0.25} \text{ (当 } 10 \leq (R_i/B) \leq 20 \text{ 时)} \end{cases} \dots\dots\dots (F.30)$$

$$B_R = \frac{3}{16} [(1 - R_i^2/R_o^2) (R_i + a) / (B - a)]^2 \dots\dots\dots (F.31)$$

$$\sigma = 2pR_o^2 / (R_o^2 - R_i^2) \dots\dots\dots (F.32)$$

$$\begin{cases} J_p = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\alpha_1 \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{n_1+1} \right] & \text{(当 } \sigma \leq \sigma_c \text{ 时)} \\ J_p = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left\{ \alpha_1 \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{n_1+1} + \alpha_2 \cdot \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H_2 \cdot \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{n_2+1} - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_s}\right)^{n_2+1} \right] \right\} & \text{(当 } \sigma > \sigma_c \text{ 时)} \end{cases} \dots\dots\dots (F.33)$$

F.8 构件塑性极限载荷的确定

F.8.1 计算裂纹扩展至临界尺寸时含裂纹构件的塑性极限载荷 P_L 或 p_L 。本附录给出四种裂纹构形的塑性极限载荷表达式,应以 $a_0 + a_f$ 作为裂纹深度 a 代入公式计算。

F.8.2 容器内表面环向裂纹的塑性极限载荷如下:

$$P_L = 2\pi RB\bar{\sigma} \left[\frac{2\alpha_L}{\pi} - \left(\frac{a}{B}\right) \left(\frac{\theta}{\pi}\right) \cdot \left(2 - 2\xi + \frac{a}{B}\xi\right) / (2 - \xi) \right] \dots\dots\dots (F.34)$$

$$\alpha_L = \arccos(A_1 \sin\theta) \dots\dots\dots (F.35)$$

$$A_1 = \frac{a}{B} \left[(1 - \xi) \left(2 - 2\xi + \frac{a}{B}\xi\right) + \left(1 - \xi + \frac{a}{B}\xi\right)^2 \right] / [1 + (2 - \xi)(1 - \xi)] / 2 \dots\dots\dots (F.36)$$

$$\theta = \frac{\pi c}{4R_i} \dots\dots\dots (F.37)$$

$$\xi = B/R_o \dots\dots\dots (F.38)$$

F.8.3 容器内表面全周长环向裂纹的塑性极限载荷如下:

$$P_L = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}}\right) \bar{\sigma} [R_o^2 - (R_i + a)^2] \dots\dots\dots (F.39)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2} (\sigma_s + \sigma_b) \dots\dots\dots (F.40)$$

F.8.4 容器内表面轴向裂纹的塑性极限载荷如下:

$$p_L = \bar{\sigma} \left[\left(\frac{B}{R_o}\right) \left(1 - \frac{a}{B}\right) / \left(1 - \frac{a}{B} / M_g\right) \right] \dots\dots\dots (F.41)$$

$$M_g = [1 + 1.61c^2 / (RB)]^{0.5} \dots\dots\dots (F.42)$$

F.8.5 容器内表面长轴向裂纹的塑性极限载荷如下:

$$p_L = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \bar{\sigma} \left(\frac{B}{R_i}\right) \left\{ \left(1 - \frac{a}{B}\right) / \left[1 + \frac{a}{B} / (R_i/B)\right] \right\} \dots\dots\dots (F.43)$$

F.9 残余应力 σ_R 在延性断裂评定中的考虑

在 J 积分计算中, 只需考虑残余应力对线弹性部分 J_e 中的附加影响:

$$J = \frac{\sigma_s^2 a}{E} \left[\pi(1 - \nu^2) \cdot F_e^2 \cdot \left(\frac{B}{a}\right) \cdot \left(\frac{\sigma + \sigma_R^e}{\sigma_s}\right)^2 + \alpha \left(\frac{B}{a}\right) \cdot H \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^{n+1} \right] \dots\dots\dots (F.44)$$

式中, 等效残余应力 σ_R^e 由实际残余应力 σ_R 分布曲线[式(F.1)]根据“应力强度因子相等”原则换算。

$$K_1 = \sqrt{\pi B} \sum_0^3 \sigma_{(i)} G_i \dots\dots\dots (F.45)$$

等效的均匀残余应力 σ_R^e 产生的应力强度因子为:

$$K_1 = \sqrt{\pi B} \cdot \sigma_R^e \cdot G_0 \dots\dots\dots (F.46)$$

$$\sigma_R^e = \left(\sum_0^3 \sigma_{(i)} G_i \right) / G_0 \dots\dots\dots (F.47)$$

$$G_i = (A_1 \alpha_i + A_2 \alpha_i^2 + A_3 \alpha_i^3 + A_4 \alpha_i^4 + A_5 \alpha_i^5) / \left(0.102 \frac{R_i}{B} - 0.02 \right)^{0.05} \dots\dots\dots (F.48)$$

$$\alpha_i = \left(\frac{a}{B}\right) / \left(\frac{a}{c}\right)^m \dots\dots\dots (F.49)$$

式(F.48)、式(F.49)中的系数 $A_1 \sim A_5$ 及 m 的取值见表 F.1。

表 F.1 计算等效残余应力时各系数的取值

G_i	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	m
G_0	1.776 7	-2.597 5	2.752 0	-1.323 7	0.236 3	0.58
G_1	0.104 5	0.418 9	0	0	0	0.22
G_2	0.020 4	-0.004 0	0.421 3	0	0	0.10
G_3	0.072 8	-0.360 1	0.668 8	0	0	0.05

F.10 许用载荷的确定

裂纹撕裂失稳破坏模式下的许用载荷为:

$$[P_f] = \frac{P_f}{n_{ins}} \text{ 或 } [p_f] = \frac{p_f}{n_{ins}} \dots\dots\dots (F.50)$$

结构塑性失稳破坏模式下的许用载荷为:

$$[P_L] = \frac{P_L}{n_L} \text{ 或 } [p_L] = \frac{p_L}{n_L} \dots\dots\dots (F.51)$$

结构的许用载荷为:

$$[P] = \min\{[P_f], [P_L]\} \text{ 或 } [p] = \min\{[p_f], [p_L]\} \dots\dots\dots (F.52)$$

F.11 安全性评价

如果工作载荷小于许用载荷, 则认为该缺陷是安全或可接受的; 否则, 不能保证安全或不可接受。

F.12 各种裂纹构形的 J 积分全塑性解

F.12.1 容器内表面有限长环向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$

容器内表面有限长环向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$ 按表 F.2 确定。

表 F.2 容器内表面有限长环向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$ 的取值

a/B	$\theta/\pi (n=1)$						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.100	0.373	0.377	0.380	0.383	0.386	0.388	0.389
0.125	0.466	0.471	0.481	0.488	0.492	0.495	0.498
0.150	0.560	0.572	0.585	0.596	0.603	0.608	0.611
0.200	0.746	0.772	0.799	0.822	0.838	0.848	0.856
0.250	0.933	0.995	1.057	1.101	1.130	1.150	1.165
0.300	1.119	1.239	1.362	1.436	1.485	1.520	1.546
0.350	1.306	1.530	1.717	1.832	1.909	1.965	2.007
0.400	1.492	1.854	2.122	2.291	2.407	2.492	2.557
0.450	1.679	2.211	2.580	2.818	2.985	3.108	3.202
0.500	1.866	2.600	3.090	3.415	3.646	3.817	3.950
0.550	2.052	3.021	3.655	4.085	4.394	4.627	4.808
0.600	2.239	3.473	4.274	4.829	5.234	5.542	5.784
0.650	2.471	3.955	4.949	5.650	6.169	6.568	6.883
0.700	2.715	4.467	5.678	6.550	7.202	7.708	8.112
0.750	2.966	5.009	6.463	7.529	8.337	8.969	9.476
0.800	3.223	5.580	7.303	8.588	9.575	10.354	10.983
a/B	$\theta/\pi (n=1)$						
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
0.100	0.391	0.393	0.394	0.394	0.394	0.394	0.394
0.125	0.500	0.502	0.504	0.504	0.505	0.505	0.506
0.150	0.614	0.616	0.617	0.619	0.620	0.621	0.622
0.200	0.862	0.867	0.870	0.874	0.876	0.879	0.881
0.250	1.176	1.186	1.193	1.199	1.205	1.209	1.213
0.300	1.566	1.583	1.596	1.607	1.616	1.624	1.631
0.350	2.040	2.067	2.089	2.107	2.122	2.136	2.147
0.400	2.608	2.649	2.682	2.711	2.735	2.755	2.774
0.450	3.276	3.337	3.387	3.429	3.465	3.496	3.523
0.500	4.056	4.142	4.214	4.274	4.326	4.370	4.409
0.550	4.954	5.073	5.172	5.256	5.328	5.391	5.446
0.600	5.979	6.139	6.273	6.387	6.485	6.570	6.645
0.650	7.138	7.350	7.527	7.678	7.808	7.922	8.021
0.700	8.440	8.713	8.943	9.140	9.309	9.458	9.588
0.750	9.892	10.239	10.532	10.783	11.001	11.191	11.350
0.800	11.501	11.934	12.303	12.619	12.894	13.135	13.348

表 F.2 (续)

a/B	$\theta/\pi (n=2)$						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.100	0.376	0.386	0.444	0.456	0.490	0.501	0.510
0.125	0.473	0.485	0.550	0.565	0.577	0.621	0.654
0.150	0.574	0.595	0.665	0.705	0.725	0.753	0.781
0.200	0.787	0.840	0.920	1.006	1.053	1.082	1.095
0.250	0.987	1.095	1.240	1.380	1.450	1.465	1.495
0.300	1.196	1.410	1.614	1.820	1.895	2.000	2.040
0.350	1.435	1.832	2.160	2.378	2.710	2.720	2.730
0.400	1.681	2.322	2.954	3.250	3.505	3.567	3.563
0.450	1.919	2.843	3.665	3.945	4.420	4.572	4.730
0.500	2.181	3.479	4.682	5.385	5.779	6.120	6.150
0.550	2.430	4.135	5.768	6.852	7.478	7.692	8.110
0.600	2.638	4.710	6.944	8.408	9.306	9.860	10.250
0.650	2.882	5.270	7.949	10.194	11.488	12.586	13.100
0.700	3.149	5.894	9.244	12.414	14.447	15.637	17.000
0.750	3.542	6.955	11.533	15.948	19.577	22.489	24.791
0.800	3.980	8.200	14.690	21.104	27.066	32.987	38.199
a/B	$\theta/\pi (n=2)$						
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
0.100	0.513	0.512	0.510	0.510	0.505	0.493	0.481
0.125	0.658	0.655	0.653	0.651	0.649	0.645	0.633
0.150	0.781	0.780	0.779	0.777	0.775	0.759	0.743
0.200	1.089	1.080	1.072	1.076	1.073	1.067	1.050
0.250	1.495	1.495	1.492	1.490	1.488	1.485	1.379
0.300	2.040	1.998	1.945	1.940	1.900	1.840	1.800
0.350	2.730	2.700	2.680	2.660	2.640	2.620	2.590
0.400	3.560	3.560	3.558	3.556	3.554	3.551	3.546
0.450	4.720	4.710	4.700	4.680	4.660	4.640	4.620
0.500	6.140	6.120	6.100	6.090	6.080	6.070	6.065
0.550	8.100	8.100	8.090	8.080	8.080	8.070	8.060
0.600	10.490	10.490	10.480	10.470	10.460	10.450	10.440
0.650	13.455	13.460	13.610	13.750	13.937	14.083	14.188
0.700	18.150	18.150	18.120	18.100	18.080	18.060	18.040
0.750	26.955	27.937	28.919	29.960	30.332	30.489	30.368
0.800	41.337	42.933	43.828	45.754	46.255	46.369	45.877

表 F.2 (续)

a/B	$\theta/\pi (n=5)$						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.100	0.404	0.438	0.488	0.532	0.566	0.588	0.584
0.125	0.505	0.549	0.654	0.708	0.740	0.775	0.764
0.150	0.617	0.682	0.810	0.910	0.940	0.976	0.946
0.200	0.842	0.951	1.155	1.370	1.488	1.550	1.258
0.250	1.079	1.290	1.590	1.920	2.200	2.410	2.056
0.300	1.336	1.720	2.284	2.767	3.350	3.380	3.184
0.350	1.681	2.410	3.410	4.140	4.790	4.900	4.813
0.400	2.038	3.210	4.983	6.090	7.250	7.585	7.689
0.450	2.415	4.150	6.692	8.454	9.980	10.572	10.835
0.500	2.780	5.150	8.624	11.318	13.347	14.481	15.021
0.550	3.173	6.320	10.973	15.040	17.331	18.672	18.991
0.600	3.446	7.220	13.016	18.382	21.341	23.548	25.252
0.650	3.855	8.385	15.164	21.288	26.262	29.944	32.630
0.700	4.272	9.590	17.803	26.942	35.817	40.120	47.572
0.750	4.680	10.800	20.760	33.771	45.377	55.325	61.093
0.800	5.092	12.050	27.214	45.447	63.942	92.010	123.42
a/B	$\theta/\pi (n=5)$						
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
0.100	0.580	0.576	0.570	0.569	0.568	0.564	0.559
0.125	0.752	0.723	0.703	0.705	0.699	0.700	0.693
0.150	0.923	0.901	0.871	0.877	0.874	0.878	0.809
0.200	1.251	1.208	1.167	1.180	1.191	1.200	1.209
0.250	1.977	1.896	1.820	1.851	1.879	1.900	1.919
0.300	3.078	2.943	2.807	2.872	2.929	2.979	3.023
0.350	4.880	4.771	4.665	4.788	5.017	5.049	5.068
0.400	7.575	7.296	7.035	7.260	7.455	7.626	7.777
0.450	10.841	10.510	10.370	10.821	11.225	11.654	11.863
0.500	15.406	15.329	15.103	16.273	17.248	17.945	18.510
0.550	19.773	19.832	19.594	21.435	22.932	24.061	25.122
0.600	26.025	26.944	24.495	30.745	33.685	36.280	38.502
0.650	35.470	36.570	37.588	42.747	47.957	51.955	57.190
0.700	51.278	57.918	60.911	70.669	80.656	90.835	99.868
0.750	71.198	81.073	89.904	109.40	131.05	151.77	177.07
0.800	152.564	182.68	211.65	272.98	338.76	414.65	494.48

表 F.2 (续)

a/B	θ/π ($n=10$)						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.100	0.430	0.549	0.599	0.613	0.617	0.612	0.608
0.125	0.580	0.755	0.875	0.915	0.919	0.909	0.899
0.150	0.730	0.960	1.133	1.200	1.240	1.262	1.262
0.200	0.954	1.400	1.715	1.875	1.911	1.915	1.894
0.250	1.206	2.010	2.525	2.920	3.140	3.160	3.141
0.300	1.480	2.840	4.014	4.826	5.120	5.210	5.231
0.350	2.100	4.150	5.800	7.350	8.550	9.200	9.400
0.400	2.900	5.700	8.588	11.000	13.341	15.100	16.150
0.450	4.445	8.650	12.955	17.055	20.909	24.520	27.640
0.500	6.720	13.570	20.400	27.200	34.352	41.550	48.150
0.550	7.329	14.800	23.100	34.007	46.000	58.050	72.100
0.600	8.040	16.240	27.050	41.950	59.937	78.336	103.476
0.650	9.181	20.852	34.732	53.864	76.959	99.227	142.173
0.700	10.660	27.592	45.960	71.275	101.890	131.395	178.462
0.750	12.430	35.720	59.836	92.050	126.000	162.170	230.736
0.800	15.230	45.271	86.057	135.996	183.140	208.219	340.498
a/B	θ/π ($n=10$)						
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
0.100	0.604	0.600	0.597	0.593	0.589	0.585	0.581
0.125	0.889	0.879	0.869	0.859	0.849	0.839	0.829
0.150	1.248	1.229	1.209	1.186	1.170	1.151	1.131
0.200	1.872	1.851	1.830	1.808	1.787	1.766	1.744
0.250	3.122	3.103	3.083	3.064	3.045	3.026	3.007
0.300	5.252	5.274	5.296	5.317	5.339	5.360	5.381
0.350	9.670	9.820	10.050	10.140	10.280	10.420	10.560
0.400	17.180	18.100	19.100	19.850	20.480	21.120	22.050
0.450	30.400	33.760	36.850	39.550	42.070	44.800	47.150
0.500	55.950	63.600	71.110	78.390	85.660	92.940	100.25
0.550	89.040	101.10	118.50	132.60	150.50	170.20	189.90
0.600	133.47	172.43	240.60	262.00	339.40	402.00	480.20
0.650	182.20	258.30	357.00	490.20	670.00	889.00	1150.0
0.700	244.56	334.29	474.63	768.72	1181.8	1851.8	2854.7
0.750	348.47	546.32	878.52	1741.8	3218.7	4980.8	6552.2
0.800	568.38	970.86	1 724.2	3624.7	6 988.8	1 1407.3	18 691.3

F.12.2 容器内表面全周长环向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$

容器内表面全周长环向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$ 按表 F.3 确定。

表 F.3 容器内表面全周长环向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$ 的取值

a/B	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=5$	$n=7$	$n=10$	$n=20$
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.241	0.270	0.308	0.400	0.500	0.690	1.300
0.10	0.519	0.586	0.696	0.879	1.039	1.280	2.000
0.15	0.854	0.900	1.200	1.350	1.800	1.900	2.400
0.20	1.262	1.300	1.520	1.820	2.000	2.200	2.600
0.25	1.764	1.783	2.030	2.310	2.433	2.470	2.650
0.30	2.380	2.450	2.800	2.840	2.770	2.640	2.690
0.35	3.133	3.200	3.500	3.390	3.000	2.830	2.720
0.40	4.053	3.950	4.240	3.880	3.220	3.000	2.780
0.45	5.170	4.840	5.000	4.300	3.400	3.100	2.790
0.50	6.522	5.900	5.630	4.510	3.490	3.250	2.790
0.55	8.153	6.900	6.190	4.600	3.640	3.300	2.800
0.60	10.114	8.000	6.650	4.680	3.750	3.210	2.800
0.65	12.464	9.100	7.090	4.700	3.800	3.220	2.800
0.70	15.277	10.230	7.400	4.750	3.880	3.220	2.800
0.75	18.635	11.500	7.680	4.790	3.920	3.250	2.800
0.80	22.640	12.700	7.860	4.800	3.970	3.300	2.820

F.12.3 容器内表面超长轴向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$

容器内表面超长轴向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$ 按表 F.4 确定。

表 F.4 容器内表面超长轴向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$ 的取值

a/B	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=5$	$n=7$	$n=10$	$n=20$
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.050	0.233	0.320	0.425	0.535	0.714	1.764	1.288
0.100	0.498	0.684	0.861	1.144	1.798	3.800	3.034
0.125	0.653	0.897	1.225	1.590	2.517	5.021	4.236
0.150	0.830	1.140	1.616	2.250	3.427	6.324	5.618
0.200	1.273	1.748	2.715	4.000	5.820	10.178	9.045
0.250	1.882	2.584	4.135	6.000	8.990	14.521	13.760
0.300	2.731	3.750	6.000	9.125	12.920	21.035	25.000
0.325	3.323	4.625	7.250	11.281	15.730	25.513	34.000
0.350	3.914	5.500	8.500	13.636	18.800	31.213	54.000
0.375	4.735	6.750	10.250	16.612	22.920	38.542	87.000
0.400	5.555	8.000	12.000	20.000	28.090	48.856	135.00
0.425	6.686	9.500	14.250	25.000	34.830	65.000	185.00
0.450	7.817	11.000	16.500	30.000	41.778	97.284	265.00
0.475	9.360	13.000	20.179	36.575	50.000	150.00	—
0.500	10.903	15.000	23.858	43.150	68.500	240.16	—

表 F.4 (续)

a/B	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=5$	$n=7$	$n=10$	$n=20$
0.525	12.990	18.000	27.500	50.000	100.00	400.00	—
0.550	15.077	21.000	32.000	61.707	147.70	650.00	—
0.575	17.872	24.500	37.000	75.000	200.00	1075.0	—
0.600	20.667	28.500	43.000	93.499	300.07	2000.0	—
0.625	24.376	32.500	50.000	120.00	450.00	3900.0	—
0.650	28.085	39.000	58.000	151.92	658.33	6750.0	—
0.700	37.840	51.500	80.000	269.61	1 635.8	—	—
0.750	50.563	68.042	113.77	538.23	4 813.9	—	—
0.800	67.022	89.000	175.00	1 270.60	18 171.0	—	—

F.12.4 容器内表面有限长轴向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$

容器内表面有限长轴向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$ 按表 F.5 确定。

表 F.5 容器内表面有限长轴向裂纹全塑性解 $H(R_i/B=10)$ 的取值

a/B	$a/2c$ ($n=2$)					
	1/3	1/4	1/6	1/10	1/20	1/40
0.100	0.341	0.383	0.431	0.476	0.534	0.592
0.125	0.410	0.462	0.524	0.636	0.686	0.774
0.150	0.478	0.610	0.621	0.785	0.859	0.981
0.200	0.617	0.754	0.869	1.121	1.297	1.501
0.250	0.772	1.012	1.178	1.495	1.902	2.218
0.300	0.955	1.210	1.542	2.053	2.750	3.219
0.325	1.092	1.420	1.809	2.505	3.387	3.970
0.350	1.206	1.590	2.090	2.954	4.025	4.722
0.375	1.379	1.774	2.502	3.600	4.938	5.797
0.400	1.527	2.007	2.901	4.243	5.850	6.872
0.425	1.732	2.282	3.379	5.015	6.947	8.163
0.450	1.848	2.538	3.848	5.785	8.044	9.454
0.475	1.992	2.805	4.481	6.816	9.507	11.176
0.500	2.165	3.171	5.104	7.845	10.972	12.899
0.525	2.382	3.537	6.056	9.396	13.170	15.483
0.550	2.598	3.841	6.997	10.945	15.371	18.069
0.575	2.858	4.268	8.093	12.755	17.939	21.087
0.600	2.900	4.695	9.345	14.825	20.877	24.538
0.625	3.378	5.244	10.588	16.896	23.818	27.990
0.650	3.724	5.854	12.634	20.267	28.595	33.599
0.700	4.504	7.439	16.535	26.759	37.799	44.396
0.750	5.803	9.939	21.705	35.369	49.995	58.694
0.800	7.622	13.537	28.262	46.304	65.469	76.821

表 F.5 (续)

a/B	$a/2c (n=3)$					
	1/3	1/4	1/6	1/10	1/20	1/40
0.100	0.425	0.439	0.505	0.552	0.627	0.714
0.125	0.563	0.671	0.673	0.748	0.841	1.048
0.150	0.632	0.696	0.783	1.047	1.178	1.381
0.200	0.866	0.950	1.118	1.393	1.847	2.226
0.250	1.039	1.195	1.491	2.000	2.784	3.387
0.300	1.208	1.585	1.949	2.793	4.018	4.915
0.325	1.318	1.768	2.256	3.327	4.848	5.940
0.350	1.516	1.951	2.546	3.857	5.678	6.965
0.375	1.689	2.134	2.970	4.608	6.842	8.402
0.400	1.819	2.439	3.377	5.354	8.007	9.839
0.425	1.992	2.683	3.908	6.319	9.507	11.688
0.450	2.165	3.000	4.425	7.280	11.009	13.538
0.475	2.339	3.293	5.306	8.867	13.466	16.563
0.500	2.598	3.574	6.167	10.449	15.926	19.590
0.525	2.772	3.953	7.003	12.013	18.363	22.589
0.550	3.031	4.634	8.043	13.951	21.378	26.296
0.575	3.378	5.244	9.194	16.106	24.731	30.417
0.600	3.638	6.000	10.579	18.697	28.758	35.365
0.625	4.071	6.890	12.196	21.723	33.459	41.139
0.650	4.504	8.049	14.043	25.187	38.838	47.741
0.700	5.717	10.610	19.140	34.733	53.643	65.905
0.750	7.276	14.268	26.986	49.425	76.401	93.809
0.800	9.276	19.144	41.257	76.110	117.694	144.413
a/B	$a/2c (n=5)$					
	1/3	1/4	1/6	1/10	1/20	1/40
0.100	0.502	0.552	0.586	0.644	0.771	0.915
0.125	0.665	0.732	0.743	0.822	1.044	1.266
0.150	0.725	0.798	0.896	1.089	1.454	1.788
0.200	0.966	1.078	1.290	1.772	2.543	3.174
0.250	1.169	1.463	1.709	2.523	3.787	4.760
0.300	1.429	1.829	2.344	3.719	5.741	7.243
0.325	1.559	2.012	2.915	4.763	7.427	9.380
0.350	1.732	2.156	3.459	5.797	9.113	11.520
0.375	1.819	2.439	3.998	6.852	10.840	13.710
0.400	1.992	2.805	4.523	7.904	12.570	15.900
0.425	2.165	3.087	5.538	9.841	15.720	19.880
0.450	2.382	3.526	6.530	11.770	18.870	23.870
0.475	2.598	4.024	7.843	14.320	23.020	29.120
0.500	2.945	4.512	9.137	16.870	27.170	34.400
0.525	3.205	5.219	10.480	19.530	31.500	39.800
0.550	3.551	6.243	12.810	24.080	38.900	49.200
0.575	4.071	7.380	15.460	29.300	47.300	59.800
0.600	4.623	8.975	19.150	36.500	59.100	75.000
0.625	5.652	11.270	24.500	46.800	76.000	96.000
0.650	6.844	13.993	30.800	59.300	96.000	121.000
0.700	11.235	24.046	54.400	105.000	171.000	216.000
0.750	21.021	46.819	108.200	211.000	342.000	431.000
0.800	47.032	108.438	255.000	499.000	808.000	1018.000

表 F.5 (续)

a/B	$a/2c (n=7)$					
	1/3	1/4	1/6	1/10	1/20	1/40
0.100	0.856	0.925	0.954	1.028	1.218	1.440
0.125	1.010	1.106	1.169	1.322	1.662	2.008
0.150	1.126	1.296	1.414	1.686	2.227	2.728
0.200	1.386	1.672	2.050	2.620	3.720	4.626
0.250	1.602	2.039	2.653	3.842	5.704	7.145
0.300	1.906	2.406	3.440	5.352	8.172	10.272
0.325	2.079	2.691	4.023	6.446	9.942	12.510
0.350	2.237	2.980	4.648	7.640	11.879	14.960
0.375	2.449	3.391	5.505	9.254	14.481	18.240
0.400	2.714	3.907	6.584	11.283	17.750	22.370
0.425	3.065	4.584	7.996	13.936	22.020	27.750
0.450	3.551	5.233	9.424	16.670	26.420	33.300
0.475	4.071	6.734	12.485	22.360	35.550	44.800
0.500	5.197	9.051	17.238	31.220	49.730	62.700
0.525	6.458	11.125	21.710	39.700	63.400	79.800
0.550	8.958	15.927	31.780	58.590	93.700	118.000
0.575	11.448	20.975	42.720	79.300	126.900	159.800
0.600	16.288	30.703	63.690	119.000	190.600	240.000
0.625	23.267	45.047	95.000	178.500	286.000	360.000
0.650	32.556	64.636	138.400	261.300	419.000	527.000
0.700	74.827	155.500	341.900	650.000	1 043.000	1 310.000
0.750	206.387	446.337	1 002.600	1 918.000	3 074.000	3 860.000
0.800	738.377	1 653.025	3 779.000	7 257.000	11 625.000	14 585.000



附录 G

(规范性附录)

压力管道直管段平面缺陷安全评定方法

G.1 总则

本附录给出了在内压、轴向拉力、弯矩为主的组合载荷作用下,含裂纹、未熔合、未焊透等平面缺陷的钢制压力管道直管段的安全评定方法。

G.2 符号

下列符号适用于本附录,未规定者按第 3 章的规定。

- L_r^F ——起裂时载荷比;
- M_B ——缺陷处管道横截面的弯矩, $N \cdot mm$;
- N ——缺陷处管道横截面的拉力, N ;
- n_p ——规定按载荷取的安全系数;
- U —— U 因子,为塑性极限载荷与起裂断裂载荷之比;
- θ ——缺陷周长包角为之半角, rad ;
- θ/π ——缺陷的无量纲长度,即周向缺陷长度与管周长之比;
- $[\bar{\sigma}]$ ——许可流变应力比,即周向缺陷管道塑性极限载荷应力 $(\sigma_m + \sigma_B)_L$ 与材料流变应力 $\bar{\sigma}$ 值之比;
- k_1, k_2, k_3, k_4 ——计算起裂载荷比 L_r^F 时采用的方程系数。

G.3 轴向平面缺陷的评定

轴向平面缺陷,应按第 5 章或第 6 章的规定进行评定。

G.4 环向平面缺陷的评定

G.4.1 材料性能数据确定的特殊规定

材料性能数据确定的特殊规定如下:

- 材料拉伸性能 σ_s 及 σ_b :对焊缝取母材与焊缝材料二者的较低值。
- 评定用材料断裂韧度的下限值 $(J_{IC})_{\text{下限}}$ 可取 $1.1KV_2$,对未焊透缺陷可取 $2.2KV_2$ (由 KV_2 估算 J_{IC} 下限值时, J_{IC} 单位为 N/mm , KV_2 单位为 J),也可根据评定者过去使用该种材料的历史经验决定。
- 在缺乏在用材料的 KV_2 数据的情况下,如评定者能判断该材料适用于压力管道,且在使用状况下无脆化倾向,使用温度不低于韧脆转变温度,则在评定计算时可取压力管道材料容许的最低值 $KV_2 = 27J$ 。
- 在使用上述断裂韧度值进行评定不能获得保证安全的结论时,可通过实物取样实测 A_{KV} 值或

断裂韧度值,重新评定。对在使用工况下无脆化倾向的 20# 或奥氏体不锈钢管道及壁厚不大于 13 mm 的 16 Mn 管道的未焊透缺陷允许采用附录 H 进行评定。

- e) 断裂韧度 J_{IC} 的测定: 对大直径的厚壁管, 可按本标准的有关规定进行; 对小直径的薄壁管, 在取样不能满足测试试件厚度要求时, 可用该管材制备周向穿透裂纹的管段试件在四点弯曲加载下进行实测。
- f) 评定计算用 K_C 值, 可由 J_{IC} 值按式(G.1)进行估算:

$$K_C = \sqrt{EJ_{IC}/(1-\nu^2)} \quad \dots\dots\dots (G.1)$$

G.4.2 U 因子评定法

G.4.2.1 应力的计算

根据管系应力分析确定缺陷处管道横截面的弯矩 M_B 、拉力 N 和内压 p , 按式(G.2)、式(G.3)计算评定所需的轴向膜应力 σ_m 及弯曲应力 σ_B :

$$\sigma_m = \frac{N + \pi R_i^2 p}{2\pi R B} \quad \dots\dots\dots (G.2)$$

$$\sigma_B = \frac{M_B}{\pi R^2 B} \quad \dots\dots\dots (G.3)$$

G.4.2.2 起裂时载荷比 L_r^F 的确定

计算 $\sigma_s \sqrt{B}/K_C$, 并根据缺陷无量纲长度 θ/π 值和相对深度 a/B 值, 按式(G.4)计算评定所需的起裂时载荷比 L_r^F :

$$L_r^F = k_1 \exp(k_2 \sigma_s \sqrt{B}/K_C) + k_3 \exp(k_4 \sigma_s \sqrt{B}/K_C) \quad \dots\dots\dots (G.4)$$

其中, k_1, k_2, k_3, k_4 由查表获得。当 $\sigma_s \sqrt{B}/K_C \leq 0.5$ 时, 查表 G.1; 当 $\sigma_s \sqrt{B}/K_C > 0.5$ 时, 查表 G.2。

G.4.2.3 U 因子值的计算

U 因子值按式(G.5)计算:

$$U = \frac{\sigma_s + \sigma_b}{2L_r^F \sigma_s} \quad \dots\dots\dots (G.5)$$

当 $U < 1$ 时, 取 $U = 1$ 。

G.4.2.4 许可流变应力比 $[\bar{\sigma}]$ 的确定

由缺陷尺寸 θ/π 值及 a/B 值, 由表 G.3 查得 $[\bar{\sigma}]$ 。

G.4.3 安全性评价

如果式(G.6)所表述的判据成立, 则评定结论为安全或可接受; 否则, 认为不能保证安全或不可接受。

$$(\sigma_m + \sigma_B) \leq \left(\frac{\sigma_s + \sigma_b}{2} \right) \frac{[\bar{\sigma}]}{Un_p} \quad \dots\dots\dots (G.6)$$

表 G.1 评定方程系数表($\sigma_s\sqrt{B}/K_c \leq 0.5$)

a/B	k_1	k_2	k_3	k_4	k_1	k_2	k_3	k_4	k_1	k_2	k_3	k_4
	$\theta/\pi=0.10$				$\theta/\pi=0.15$				$\theta/\pi=0.20$			
0.10	1.585 8	-21.756	1.215 8	-0.555 8	1.587 2	-22.052	1.214 6	-0.559 3	1.588 6	-22.327	1.213 5	-0.562 5
0.15	1.600 2	-25.794	1.206 3	-0.635 5	1.600 2	-25.797	1.206 3	-0.635 3	1.600 2	-25.767	1.206 3	-0.634 5
0.20	1.609 8	-28.847	1.199 4	-0.697 7	1.607 9	-28.445	1.201 6	-0.695 1	1.605 8	-27.970	1.204 0	-0.691 3
0.25	1.618 4	-31.820	1.192 4	-0.756 4	1.616 1	-31.315	1.195 6	-0.755 0	1.613 3	-30.685	1.199 1	-0.751 7
0.30	1.624 8	-34.483	1.187 5	-0.813 1	1.622 2	-33.870	1.191 8	-0.813 8	1.618 9	-33.061	1.196 8	-0.811 5
0.35	1.631 4	-37.405	1.181 6	-0.871 5	1.627 0	-36.237	1.190 1	-0.874 6	1.620 8	-34.716	1.200 1	-0.873 2
0.40	1.637 0	-40.266	1.177 0	-0.931 4	1.631 1	-38.467	1.190 8	-0.939 5	1.620 8	-36.040	1.207 8	-0.942 1
0.45	1.641 5	-43.074	1.173 6	-0.993 8	1.635 8	-40.895	1.191 8	-1.009 4	1.622 3	-37.760	1.214 9	-1.018 8
0.50	1.645 5	-45.892	1.171 4	-1.059 9	1.640 5	-43.297	1.194 8	-1.085 6	1.622 6	-39.309	1.225 9	-1.105 2
0.55	1.649 9	-48.569	1.172 2	-1.131 8	1.644 6	-45.466	1.201 7	-1.170 2	1.619 4	-40.405	1.243 1	-1.204 6
0.60	1.655 7	-51.357	1.174 5	-1.209 8	1.649 1	-47.602	1.211 3	-1.264 0	1.611 8	-41.103	1.266 4	-1.318 7
0.65	1.662 9	-54.237	1.178 3	-1.294 3	1.656 8	-50.468	1.216 4	-1.357 0	1.618 8	-43.720	1.272 4	-1.416 3
0.70	1.671 2	-57.195	1.183 3	-1.385 0	1.665 8	-53.393	1.222 2	-1.454 4	1.626 0	-46.288	1.278 4	-1.514 1
a/B	$\theta/\pi=0.25$				$\theta/\pi=0.30$				$\theta/\pi=0.35$			
0.10	1.590 3	-22.699	1.212 0	-0.566 8	1.592 0	-23.052	1.210 5	-0.570 8	1.589 9	-22.600	1.212 3	-0.565 3
0.15	1.601 4	-26.020	1.205 0	-0.636 5	1.602 6	-26.249	1.203 8	-0.638 1	1.600 3	-25.774	1.206 1	-0.633 9
0.20	1.606 0	-28.020	1.203 7	-0.691 5	1.606 2	-28.036	1.203 4	-0.691 0	1.603 9	-27.563	1.206 0	-0.687 8
0.25	1.611 4	-30.258	1.201 6	-0.749 4	1.609 2	-29.764	1.204 2	-0.746 0	1.605 6	-29.041	1.208 4	-0.742 5
0.30	1.614 1	-32.008	1.203 3	-0.808 3	1.608 2	-30.801	1.210 4	-0.802 9	1.602 4	-29.721	1.217 2	-0.799 2
0.35	1.614 5	-33.377	1.208 9	-0.871 2	1.606 5	-31.806	1.218 7	-0.866 2	1.598 6	-30.461	1.227 7	-0.863 6
0.40	1.612 0	-34.320	1.219 7	-0.942 4	1.600 2	-32.259	1.233 4	-0.938 6	1.588 9	-30.546	1.245 8	-0.937 7
0.45	1.608 9	-35.339	1.232 7	-1.023 2	1.589 4	-32.357	1.254 2	-1.023 2	1.574 6	-30.396	1.269 1	-1.023 3
0.50	1.601 6	-35.957	1.252 1	-1.117 3	1.567 9	-31.668	1.286 4	-1.127 0	1.547 4	-29.372	1.305 0	-1.128 3
0.55	1.596 5	-37.080	1.269 2	-1.217 2	1.5618	-32.866	1.302 4	-1.224 8	1.535 3	-30.037	1.325 3	-1.225 4
0.60	1.587 3	-37.852	1.291 0	-1.327 4	1.552 8	-33.784	1.321 2	-1.326 7	1.518 4	-30.297	1.349 4	-1.325 8
0.65	1.587 3	-39.588	1.302 4	-1.426 1	1.541 0	-34.389	1.340 9	-1.426 5	1.503 4	-30.570	1.370 0	-1.416 2
0.70	1.586 1	-41.115	1.314 3	-1.524 2	1.525 2	-34.568	1.363 0	-1.526 3	1.483 9	-30.393	1.392 7	-1.502 9
a/B	$\theta/\pi=0.40$				$\theta/\pi=0.45$				$\theta/\pi=0.50$			
0.10	1.587 7	-22.130	1.214 1	-0.559 4	1.586 1	-21.780	1.215 5	-0.555 0	1.584 3	-21.416	1.216 8	-0.550 4
0.15	1.597 9	-25.271	1.208 5	-0.629 2	1.596 4	-24.989	1.210 0	-0.627 0	1.594 9	-24.691	1.211 5	-0.624 5
0.20	1.601 4	-27.052	1.208 7	-0.684 1	1.600 4	-26.894	1.209 8	-0.684 0	1.599 4	-26.717	1.210 9	-0.683 5
0.25	1.601 5	-28.247	1.212 9	-0.737 9	1.600 5	-28.088	1.214 2	-0.738 5	1.599 3	-27.901	1.215 6	-0.738 6
0.30	1.595 7	-28.516	1.224 6	-0.793 9	1.594 4	-28.347	1.226 1	-0.795 2	1.593 0	-28.138	1.227 8	-0.795 7

表 G.1 (续)

a/B	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄
	θ/π=0.40				θ/π=0.45				θ/π=0.50			
0.35	1.589 2	-28.936	1.237 6	-0.858 7	1.586 5	-28.568	1.240 6	-0.859 7	1.583 5	-28.140	1.243 8	-0.859 4
0.40	1.574 8	-28.574	1.259 8	-0.933 9	1.569 2	-27.898	1.265 2	-0.934 8	1.563 2	-27.137	1.271 0	-0.933 7
0.45	1.556 0	-28.120	1.286 1	-1.020 0	1.545 4	-26.963	1.295 9	-1.020 8	1.533 1	-25.648	1.306 4	-1.018 9
0.50	1.521 5	-26.695	1.326 8	-1.125 4	1.499 8	-24.767	1.345 1	-1.129 4	1.473 4	-22.552	1.366 4	-1.131 2
0.55	1.501 2	-26.724	1.353 0	-1.221 6	1.477 7	-24.676	1.371 8	-1.220 6	1.449 7	-22.346	1.393 2	-1.215 7
0.60	1.473 0	-26.208	1.385 0	-1.321 2	1.448 1	-24.035	1.403 3	-1.310 8	1.419 5	-21.605	1.423 6	-1.294 2
0.65	1.454 4	-26.147	1.406 4	-1.399 4	1.428 2	-23.700	1.424 2	-1.374 2	1.399 1	-21.005	1.443 0	-1.339 6
0.70	1.431 9	-25.654	1.429 5	-1.469 8	1.404 7	-22.924	1.446 2	-1.425 4	1.376 3	-19.953	1.462 0	-1.367 0
a/B	θ/π=0.55				θ/π=0.60				θ/π=0.65			
0.10	1.583 4	-21.219	1.217 5	-0.547 7	1.582 5	-21.018	1.218 2	-0.544 9	1.582 0	-20.917	1.218 5	-0.543 5
0.15	1.594 2	-24.555	1.212 1	-0.623 1	1.593 6	-24.420	1.212 7	-0.621 7	1.593 3	-24.356	1.213 0	-0.621 1
0.20	1.599 3	-26.695	1.211 0	-0.683 1	1.599 3	-26.672	1.211 0	-0.682 6	1.599 3	-26.672	1.211 0	-0.682 6
0.25	1.599 0	-27.826	1.215 8	-0.737 3	1.598 7	-27.752	1.216 0	-0.736 0	1.598 7	-27.742	1.216 1	-0.736 0
0.30	1.592 4	-27.996	1.228 2	-0.793 3	1.591 8	-27.854	1.228 6	-0.790 8	1.591 6	-27.829	1.228 8	-0.790 7
0.35	1.582 8	-27.950	1.244 1	-0.854 8	1.582 1	-27.760	1.244 3	-0.850 3	1.582 0	-27.745	1.244 4	-0.850 3
0.40	1.562 6	-26.905	1.270 7	-0.925 8	1.562 1	-26.672	1.270 5	-0.917 9	1.562 1	-26.672	1.270 5	-0.917 9
0.45	1.532 6	-25.309	1.305 4	-1.004 9	1.532 2	-24.970	1.304 4	-0.991 0	1.531 9	-24.904	1.304 6	-0.989 4
0.50	1.473 9	-22.116	1.363 7	-1.107 7	1.474 5	-21.682	1.360 9	-1.084 1	1.473 6	-21.525	1.361 2	-1.080 1
0.55	1.450 7	-21.742	1.389 1	-1.180 8	1.452 0	-21.138	1.384 6	-1.145 6	1.451 8	-20.917	1.383 8	-1.135 5
0.60	1.421 5	-20.827	1.417 5	-1.245 5	1.424 1	-20.047	1.410 7	-1.195 7	1.425 3	-19.762	1.408 0	-1.177 3
0.65	1.394 3	-19.583	1.441 2	-1.281 0	1.391 5	-18.165	1.437 0	-1.218 3	1.393 6	-17.673	1.432 2	-1.186 8
0.70	1.363 4	-17.767	1.464 8	-1.296 2	1.355 9	-15.539	1.461 0	-1.213 9	1.362 3	-14.818	1.450 5	-1.162 3
a/B	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄								
	θ/π≥0.70											
0.10	1.581 6	-20.815	1.218 9	-0.542 1								
0.15	1.592 9	-24.292	1.213 3	-0.620 5								
0.20	1.599 3	-26.672	1.211 0	-0.682 6								
0.25	1.598 6	-27.732	1.216 1	-0.735 9								
0.30	1.591 5	-27.805	1.228 9	-0.790 6								
0.35	1.581 9	-27.729	1.244 5	-0.850 3								
0.40	1.562 1	-26.672	1.270 5	-0.917 9								
0.45	1.531 5	-24.837	1.304 7	-0.987 8								
0.50	1.472 7	-21.369	1.361 5	-1.076 1								
0.55	1.451 6	-20.697	1.382 9	-1.125 3								
0.60	1.426 5	-19.476	1.405 2	-1.158 6								
0.65	1.396 2	-17.182	1.426 9	-1.154 5								
0.70	1.370 9	-14.090	1.437 7	-1.107 2								

表 G.2 评定方程系数表($\sigma_s\sqrt{B}/K_C > 0.5$)

a/B	k_1	k_2	k_3	k_4	k_1	k_2	k_3	k_4	k_1	k_2	k_3	k_4
	$\theta/\pi=0.10$				$\theta/\pi=0.15$				$\theta/\pi=0.20$			
0.10	0.922 0	-0.495 3	0.208 0	-0.066 8	0.918 8	-0.491 8	0.206 6	-0.066 2	0.915 7	-0.488 1	0.205 2	-0.065 5
0.15	0.924 4	-0.612 4	0.205 7	-0.082 0	0.924 1	-0.611 5	0.205 6	-0.081 9	0.923 8	-0.609 8	0.205 6	-0.081 7
0.20	0.936 9	-0.722 9	0.202 8	-0.094 1	0.941 3	-0.727 3	0.203 9	-0.094 6	0.945 8	-0.730 1	0.205 1	-0.094 9
0.25	0.949 8	-0.825 7	0.198 4	-0.103 8	0.956 2	-0.833 8	0.199 6	-0.104 6	0.962 7	-0.839 3	0.201 0	-0.105 1
0.30	0.965 8	-0.928 4	0.194 3	-0.112 5	0.974 5	-0.941 2	0.195 5	-0.113 5	0.983 4	-0.950 1	0.197 1	-0.114 3
0.35	0.979 0	-1.026 8	0.189 4	-0.120 0	0.994 6	-1.049 3	0.191 3	-0.121 7	1.011 4	-1.067 0	0.193 9	-0.123 1
0.40	0.992 7	-1.125 1	0.184 6	-0.126 9	1.015 5	-1.158 3	0.187 1	-0.129 3	1.041 8	-1.186 7	0.190 6	-0.131 3
0.45	1.005 7	-1.221 8	0.179 7	-0.133 3	1.032 5	-1.262 6	0.182 3	-0.136 0	1.064 3	-1.297 4	0.186 1	-0.138 3
0.50	1.018 0	-1.319 8	0.175 1	-0.139 5	1.047 2	-1.365 8	0.177 5	-0.142 3	1.083 4	-1.405 4	0.181 5	-0.144 7
0.55	1.028 9	-1.414 7	0.170 4	-0.145 1	1.058 8	-1.464 1	0.172 5	-0.148 0	1.097 2	-1.504 9	0.176 5	-0.150 2
0.60	1.035 9	-1.505 6	0.165 5	-0.150 2	1.063 6	-1.553 9	0.167 1	-0.152 9	1.101 6	-1.593 2	0.171 0	-0.155 0
0.65	1.036 6	-1.587 7	0.160 2	-0.154 6	1.055 7	-1.625 9	0.161 0	-0.156 7	1.083 9	-1.649 5	0.164 1	-0.157 9
0.70	1.030 9	-1.661 7	0.154 7	-0.158 5	1.041 1	-1.687 5	0.154 8	-0.159 8	1.061 5	-1.697 2	0.157 4	-0.160 3
a/B	$\theta/\pi=0.25$				$\theta/\pi=0.30$				$\theta/\pi=0.35$			
0.10	0.912 0	-0.484 2	0.203 5	-0.064 8	0.908 4	-0.480 2	0.201 8	-0.064 1	0.912 6	-0.483 4	0.203 7	-0.064 7
0.15	0.920 9	-0.606 5	0.204 6	-0.081 2	0.918 2	-0.602 7	0.203 8	-0.080 7	0.922 9	-0.606 9	0.205 3	-0.081 3
0.20	0.945 0	-0.728 9	0.205 0	-0.094 8	0.944 1	-0.726 7	0.204 9	-0.094 6	0.949 5	-0.732 0	0.206 2	-0.095 2
0.25	0.967 2	-0.843 3	0.202 0	-0.105 5	0.971 8	-0.845 8	0.203 0	-0.105 8	0.980 3	-0.854 2	0.204 7	-0.106 6
0.30	0.995 2	-0.961 7	0.199 1	-0.115 3	1.007 9	-0.971 7	0.201 5	-0.116 2	1.021 0	-0.984 5	0.203 7	-0.117 2
0.35	1.026 4	-1.081 7	0.196 2	-0.124 2	1.042 9	-1.094 3	0.199 0	-0.125 2	1.059 0	-1.109 3	0.201 3	-0.126 3
0.40	1.060 5	-1.204 7	0.193 2	-0.132 5	1.081 8	-1.220 3	0.196 4	-0.133 6	1.101 8	-1.237 9	0.199 2	-0.134 8
0.45	1.088 6	-1.320 2	0.189 2	-0.139 7	1.118 5	-1.342 3	0.193 5	-0.141 1	1.139 5	-1.357 9	0.196 4	-0.142 1
0.50	1.113 5	-1.432 4	0.185 2	-0.146 3	1.153 2	-1.461 1	0.190 3	-0.148 0	1.175 6	-1.473 4	0.193 5	-0.148 7
0.55	1.121 6	-1.521 7	0.179 6	-0.151 2	1.154 1	-1.536 7	0.184 2	-0.152 1	1.178 0	-1.545 2	0.187 9	-0.152 6
0.60	1.121 0	-1.599 3	0.173 9	-0.155 4	1.147 9	-1.600 8	0.178 3	-0.155 5	1.174 1	-1.604 2	0.182 6	-0.155 7
0.65	1.104 2	-1.650 9	0.167 4	-0.158 0	1.135 0	-1.649 2	0.172 6	-0.157 9	1.162 7	-1.645 3	0.177 6	-0.157 8
0.70	1.082 9	-1.692 6	0.161 2	-0.160 1	1.117 6	-1.685 9	0.167 2	-0.159 8	1.149 3	-1.676 5	0.173 1	-0.159 3
a/B	$\theta/\pi=0.40$				$\theta/\pi=0.45$				$\theta/\pi=0.50$			
0.10	0.916 9	-0.486 6	0.205 6	-0.065 3	0.920 5	-0.490 1	0.207 2	-0.066 0	0.924 3	-0.493 7	0.208 9	-0.066 6
0.15	0.928 0	-0.611 1	0.206 9	-0.081 9	0.931 5	-0.615 4	0.208 0	-0.082 5	0.935 1	-0.619 7	0.209 1	-0.083 1
0.20	0.955 1	-0.736 9	0.207 5	-0.095 7	0.958 0	-0.741 8	0.208 0	-0.096 2	0.961 0	-0.746 3	0.208 6	-0.096 7
0.25	0.989 4	-0.862 0	0.206 5	-0.107 3	0.992 8	-0.868 0	0.207 0	-0.107 8	0.996 1	-0.873 2	0.207 4	-0.108 3
0.30	1.035 5	-0.996 9	0.206 2	-0.118 2	1.039 2	-1.003 5	0.206 5	-0.118 7	1.043 0	-1.009 0	0.206 9	-0.119 1

表 G.2 (续)

a/B	k_1	k_2	k_3	k_4	k_1	k_2	k_3	k_4	k_1	k_2	k_3	k_4
	$\theta/\pi=0.40$				$\theta/\pi=0.45$				$\theta/\pi=0.50$			
0.35	1.077 1	-1.124 0	0.204 2	-0.127 3	1.083 1	-1.131 9	0.204 8	-0.127 9	1.089 2	-1.138 3	0.205 6	-0.128 3
0.40	1.125 0	-1.255 4	0.202 5	-0.135 9	1.134 3	-1.264 9	0.203 6	-0.136 5	1.144 1	-1.272 8	0.205 0	-0.137 0
0.45	1.164 5	-1.373 5	0.200 1	-0.143 1	1.178 8	-1.384 7	0.202 0	-0.143 8	1.194 6	-1.394 0	0.204 1	-0.144 3
0.50	1.203 0	-1.485 3	0.197 6	-0.149 4	1.224 9	-1.499 0	0.200 3	-0.150 1	1.251 6	-1.514 0	0.203 9	-0.151 0
0.55	1.208 8	-1.553 5	0.192 8	-0.153 0	1.229 8	-1.560 4	0.196 0	-0.153 4	1.255 6	-1.567 3	0.200 0	-0.153 8
0.60	1.209 4	-1.608 4	0.188 4	-0.155 9	1.231 2	-1.608 5	0.192 2	-0.156 0	1.258 4	-1.608 1	0.197 0	-0.156 0
0.65	1.200 5	-1.641 4	0.184 2	-0.157 6	1.226 5	-1.634 8	0.189 1	-0.157 3	1.259 0	-1.627 5	0.195 3	-0.156 9
0.70	1.192 4	-1.666 1	0.181 0	-0.158 8	1.225 3	-1.653 9	0.187 4	-0.158 2	1.265 8	-1.639 9	0.195 4	-0.157 5
a/B	$\theta/\pi=0.55$				$\theta/\pi=0.60$				$\theta/\pi=0.65$			
0.10	0.926 3	-0.495 2	0.209 7	-0.066 9	0.928 3	-0.496 8	0.210 5	-0.067 2	0.929 4	-0.497 6	0.211 0	-0.067 3
0.15	0.936 5	-0.620 6	0.209 5	-0.083 2	0.937 8	-0.621 5	0.209 9	-0.083 3	0.938 5	-0.622 1	0.210 1	-0.083 4
0.20	0.960 9	-0.745 7	0.208 6	-0.096 6	0.960 9	-0.745 1	0.208 7	-0.096 6	0.960 9	-0.745 1	0.208 7	-0.096 6
0.25	0.996 2	-0.871 7	0.207 6	-0.108 2	0.996 3	-0.870 2	0.207 7	-0.108 0	0.996 4	-0.870 3	0.207 8	-0.108 1
0.30	1.043 3	-1.006 4	0.207 3	-0.119 0	1.043 6	-1.003 9	0.207 6	-0.118 8	1.044 0	-1.004 2	0.207 6	-0.118 8
0.35	1.089 1	-1.133 0	0.206 1	-0.128 0	1.089 0	-1.127 8	0.206 5	-0.127 6	1.089 2	-1.128 0	0.206 6	-0.127 6
0.40	1.143 7	-1.264 4	0.205 6	-0.136 5	1.143 2	-1.255 8	0.206 3	-0.136 0	1.143 2	-1.255 8	0.206 3	-0.136 0
0.45	1.195 3	-1.382 9	0.205 4	-0.143 7	1.195 6	-1.371 0	0.206 6	-0.143 0	1.196 0	-1.369 9	0.206 8	-0.143 0
0.50	1.255 3	-1.500 2	0.205 8	-0.150 2	1.258 9	-1.486 8	0.207 8	-0.149 5	1.260 6	-1.485 1	0.208 3	-0.149 4
0.55	1.263 2	-1.550 5	0.202 8	-0.152 9	1.270 2	-1.532 7	0.205 6	-0.152 0	1.272 7	-1.527 7	0.206 5	-0.151 7
0.60	1.271 7	-1.589 1	0.200 9	-0.155 0	1.283 8	-1.568 1	0.204 9	-0.153 9	1.288 0	-1.559 9	0.206 4	-0.153 5
0.65	1.282 8	-1.609 8	0.201 1	-0.156 1	1.306 4	-1.589 7	0.207 0	-0.155 0	1.315 1	-1.578 2	0.209 6	-0.154 4
0.70	1.302 0	-1.622 6	0.203 1	-0.156 7	1.340 8	-1.605 0	0.211 7	-0.155 9	1.356 1	-1.590 1	0.215 8	-0.155 1
a/B	$\theta/\pi \geq 0.70$											
0.10	0.930 4	-0.498 5	0.211 4	-0.067 5								
0.15	0.939 2	-0.622 7	0.210 4	-0.083 5								
0.20	0.960 9	-0.745 1	0.208 7	-0.096 6								
0.25	0.996 5	-0.870 4	0.207 8	-0.108 1								
0.30	1.044 3	-1.004 5	0.207 7	-0.118 8								
0.35	1.089 4	-1.128 2	0.206 6	-0.127 7								
0.40	1.143 2	-1.255 8	0.206 3	-0.136 0								
0.45	1.196 5	-1.368 8	0.207 0	-0.142 9								
0.50	1.262 3	-1.483 5	0.208 8	-0.149 4								
0.55	1.275 1	-1.522 6	0.207 4	-0.151 4								
0.60	1.292 0	-1.551 4	0.207 9	-0.153 0								
0.65	1.323 4	-1.565 9	0.212 2	-0.153 8								
0.70	1.370 9	-1.574 2	0.220 0	-0.154 3								

表 G.3 许可流变应力比 $[\bar{\sigma}]$

a/B	θ/π							
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.10	1.254	1.245	1.236	1.229	1.221	1.216	1.211	1.209
0.15	1.244	1.230	1.216	1.205	1.193	1.185	1.177	1.173
0.20	1.234	1.215	1.196	1.181	1.165	1.154	1.143	1.137
0.25	1.224	1.200	1.176	1.156	1.136	1.121	1.107	1.098
0.30	1.213	1.185	1.156	1.132	1.107	1.089	1.070	1.059
0.35	1.203	1.169	1.135	1.106	1.076	1.054	1.031	1.017
0.40	1.193	1.154	1.114	1.080	1.045	1.019	0.992	0.975
0.45	1.183	1.138	1.093	1.053	1.013	0.982	0.951	0.929
0.50	1.172	1.122	1.071	1.026	0.981	0.945	0.909	0.884
0.55	1.161	1.105	1.049	0.998	0.948	0.906	0.865	0.835
0.60	1.150	1.089	1.027	0.971	0.914	0.868	0.821	0.787
0.65	1.139	1.072	1.004	0.942	0.879	0.827	0.775	0.736
0.70	1.128	1.055	0.981	0.913	0.844	0.787	0.729	0.685
a/B	θ/π							
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.80	0.90	1.00
0.10	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206
0.15	1.169	1.168	1.168	1.168	1.168	1.168	1.168	1.168
0.20	1.131	1.130	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129	1.129
0.25	1.090	1.087	1.085	1.085	1.085	1.085	1.085	1.085
0.30	1.048	1.045	1.041	1.041	1.041	1.041	1.041	1.041
0.35	1.003	0.997	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992
0.40	0.957	0.950	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942
0.45	0.908	0.897	0.887	0.886	0.885	0.885	0.885	0.885
0.50	0.858	0.845	0.832	0.830	0.827	0.827	0.827	0.827
0.55	0.806	0.789	0.772	0.767	0.762	0.762	0.762	0.762
0.60	0.753	0.733	0.712	0.705	0.697	0.697	0.697	0.697
0.65	0.697	0.672	0.648	0.637	0.626	0.623	0.623	0.623
0.70	0.640	0.612	0.583	0.569	0.554	0.549	0.549	0.549



附录 H

(规范性附录)

压力管道直管段体积缺陷安全评定方法

H.1 总则

本附录给出了在内压和弯矩的组合载荷作用下,含气孔、夹渣和局部厚度减薄等体积缺陷及特定未焊透缺陷的钢制在用压力管道直管段的安全评定方法。

H.2 符号

下列符号适用于本附录,未规定者按第 3 章的规定。

- A —— 缺陷轴向半长,mm;
 a —— 无量纲化的缺陷相对轴向长度;
 B —— 缺陷环向半长,mm;
 b —— 无量纲化的缺陷相对环向长度;
 C —— 体积缺陷的深度,mm;
 c —— 以管道计算壁厚无量纲化的缺陷相对深度;
 c_0 —— 以管道公称壁厚无量纲化的缺陷相对深度;
 M —— 弯矩载荷,kN·m;
 M_{L0} —— 无缺陷管道在纯弯矩下的塑性极限弯矩,kN·m;
 M_{LS} —— 含缺陷管道在纯弯矩下的塑性极限弯矩,kN·m;
 m_{LS} —— 无量纲的含缺陷管道在纯弯矩下的塑性极限弯矩;
 P —— 内压载荷,MPa;
 P_{L0} —— 无缺陷管道在纯内压下的塑性极限内压,MPa;
 P_{LS} —— 含缺陷管道在纯内压下的塑性极限内压,MPa;
 P_{max} —— 管道最大工作内压,MPa;
 p_{LS} —— 无量纲的含缺陷管道在纯内压下的塑性极限内压;
 R_i —— 管道内半径,mm;
 R_o —— 管道外半径,mm;
 T —— 管道计算壁厚,mm;
 T_0 —— 管道公称壁厚,mm;
 σ_b —— 管道材料抗拉强度,MPa;
 $\bar{\sigma}$ —— 管道材料流变应力,MPa;
 σ_s —— 管道材料屈服强度,MPa。

H.3 适用范围

H.3.1 本附录适用于同时满足如下条件的钢制在用压力管道:



- a) 在实际工况下,材料具有良好的延性,未发现劣化及劣化倾向;
- b) 管道最低工作温度不低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,或管道最低工作温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 但材料为奥氏体不锈钢;
- c) 管道径比 $R_o/R_i \leq 1.4$ 。

H.3.2 本附录适用于下列缺陷:

- a) 气孔、夹渣、局部减薄等体积型缺陷(其周围无裂纹、未熔合等面型缺陷);
- b) 在用工况下无脆化倾向的 20# 或奥氏体不锈钢管道及壁厚不大于 13 mm 的 16 Mn 管道的未焊透缺陷;
- c) 体积缺陷的深度 C 小于壁厚 T 的 70%,且缺陷底部最小壁厚($T-C$)不小于 2 mm。

H.3.3 对于不符合 H.3.1 和 H.3.2 限定条件或在服役期间表面有可能产生裂纹的含体积缺陷压力管道,应按附录 G 的规定进行评定。

H.4 评定程序

评定过程按下列步骤进行:

- a) 缺陷部位管道尺寸的确定;
- b) 缺陷的规则化;
- c) 材料性能数据的确定;
- d) 无缺陷管道在纯内压或纯弯矩下的塑性极限载荷的确定;
- e) 免于评定的判别;
- f) 典型工况载荷组合的确定与缺陷处弯矩的计算;
- g) 含缺陷管道在纯内压和纯弯矩下的塑性极限载荷的确定;
- h) 安全性评价。

H.5 缺陷部位管道尺寸的确定

根据实际情况确定缺陷附近管道的计算壁厚 T 和外径 R_o 。管道的计算壁厚应取管道实测壁厚与至下一个检验周期末的腐蚀量之差。

H.6 缺陷的规则化及无量纲化处理

H.6.1 缺陷的规则化

H.6.1.1 壁厚局部减薄缺陷的规则化

对经检测查明的壁厚局部减薄缺陷,根据其实际位置、形状和尺寸,按图 H.1 所示,将其规则化为轴向半长 A 、环向半长 B 、深度 C 的表面缺陷。其中, C 取实测最大减薄深度与至下一检验周期末体积缺陷扩展量之和。

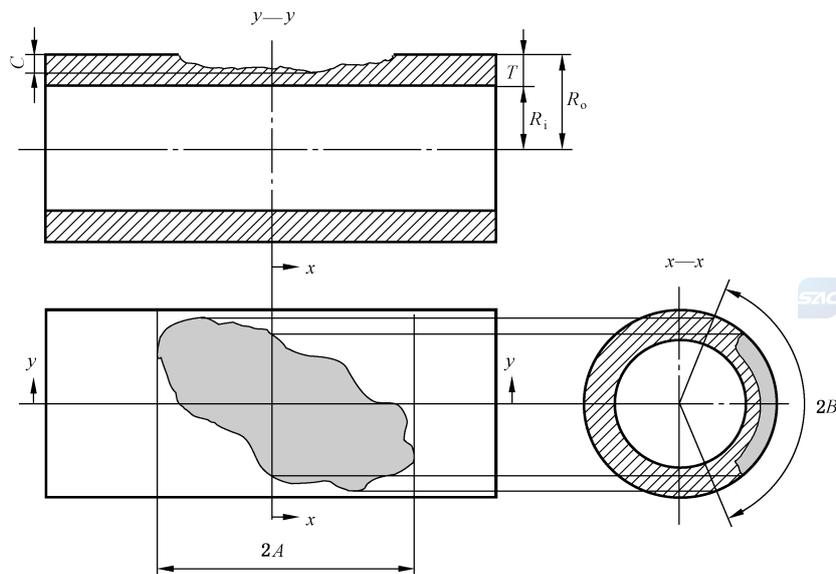


图 H.1 壁厚局部减薄缺陷表征示意图

H.6.1.2 未焊透缺陷的规则化

对经检验查明且符合 H.3.2 b) 的未焊透缺陷, 根据其实际位置、形状和尺寸, 按图 H.2 所示, 将其规则化为轴向半长 A 、环向半长 B 、深度 C 的表面缺陷。

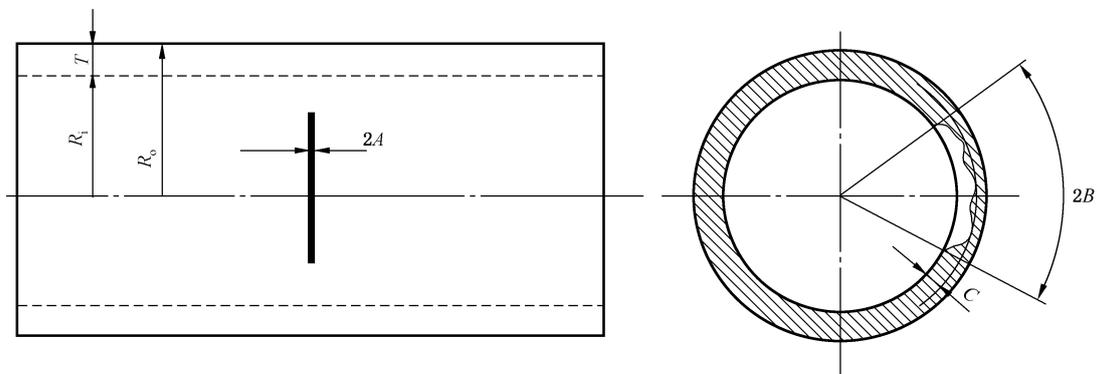


图 H.2 未焊透缺陷表征示意图

H.6.1.3 气孔、夹渣缺陷的规则化

对于经检验查明的气孔和夹渣缺陷, 首先应按 5.3.2 的规定分别用气孔率和夹渣长度进行表征。如表征后的气孔、夹渣缺陷不能通过 H.9.1、H.9.2 的免于评定判断, 则应根据其实际位置、形状和尺寸, 按图 H.3 所示, 将其规则化为轴向半长 A 、环向半长 B 、深度 C 的表面缺陷, 其中若能够获得可靠的缺陷自身高度 H 值, 则 $C=H$, 否则可近似取 $C=2A$ 。

H.6.2 缺陷规则化尺寸的无量纲化处理

对经规则化处理得到的缺陷尺寸, 按如下规定进行无量纲化处理:

相对轴向长度: $a = A / \sqrt{R_o T}$

相对环向长度: $b = B / (\pi R_o)$ (对于外表面缺陷)

$b = B / (\pi R_i)$ (对于内表面缺陷)

相对深度: $c = C / T$

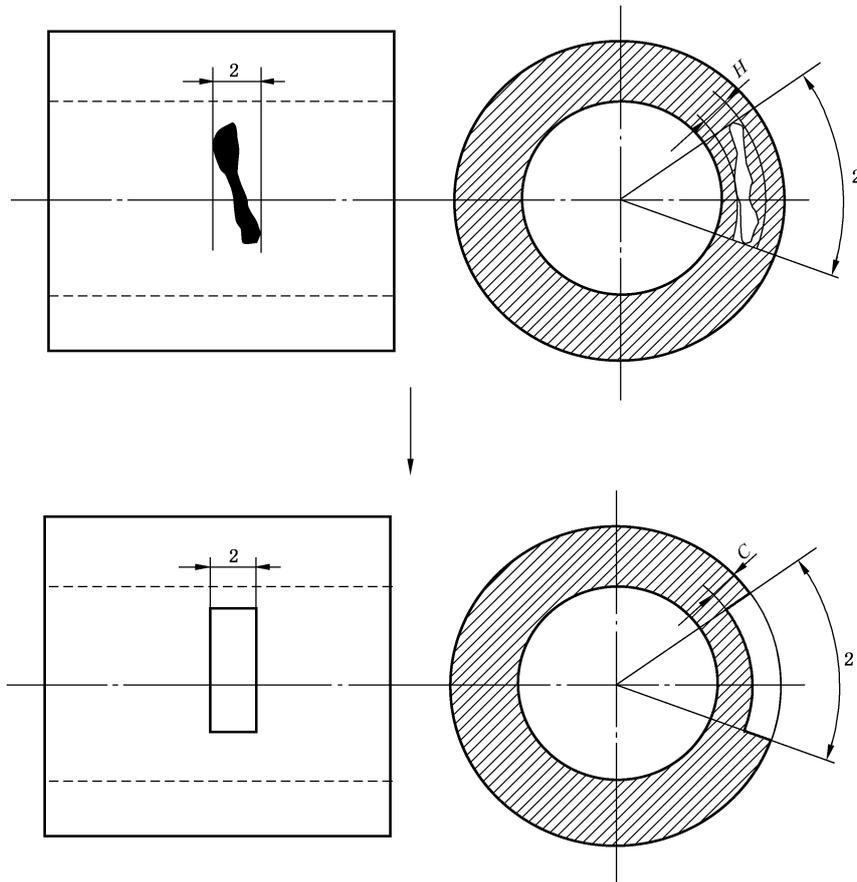


图 H.3 气孔、夹渣等埋藏缺陷表征示意图

H.7 材料性能数据的确定

按 5.5 和附录 B 的规定确定在评定工况下材料的屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b , 并按式 (H.1) 确定材料的流变应力:

$$\bar{\sigma}' = \frac{\sigma_s + \sigma_b}{2} \dots\dots\dots (H.1)$$

H.8 无缺陷管道在纯内压下的塑性极限内压 P_{L0} 和在纯弯矩下的塑性极限弯矩 M_{L0} 的计算

$$P_{L0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}' \ln \frac{R_o}{R_i} \dots\dots\dots (H.2)$$

$$M_{L0} = 4\bar{\sigma}' \frac{R_o^3 - R_i^3}{3} \dots\dots\dots (H.3)$$

H.9 免于评定的判别

H.9.1 气孔免于评定的判别

如果同时满足下列条件,则该气孔可免于评定:

- a) 气孔率不超过 6%;
- b) 单个气孔的长径小于 $0.5T$,并且小于 9 mm。

H.9.2 夹渣免于评定的判别

如果夹渣的自身高度或宽度不大于 $0.4T$,则该夹渣可免于评定。

H.9.3 局部减薄和未焊透缺陷免于评定的判别

如果同时满足下列条件,则该局部减薄或符合 H.3.2 b)的未焊透缺陷可免于评定:

- a) 管道结构符合设计制造要求;
- b) $P_{\max}/P_{L0} \leq 0.3$;
- c) 局部减薄或未焊透缺陷的相对深度 c_0 不超过表 H.1 规定的容限值,其中 $c_0 = [C + (T_0 - T)]/T_0$ 。

表 H.1 压力管道局部减薄与未焊透缺陷容限值

缺陷的相对环向长度 b	$b \leq 0.25$	$0.25 < b \leq 0.50$	$0.50 < b \leq 0.75$	$0.75 < b \leq 1.00$
容许的最大缺陷相对深度 c_0	0.45	0.40	0.35	0.25

如果缺陷可免于评定,则认为是安全的或可接受的;否则,应继续按 H.10~H.12 的规定进行评定。

H.10 典型工况载荷组合与缺陷处弯矩载荷的确定

根据实际情况,确定需要进行缺陷评定的载荷工况,给出相应的内压载荷 P ,并通过有限元方法或其他可靠的方法确定相应评定工况下缺陷处的弯矩载荷 M 。

H.11 含缺陷管道在纯内压和纯弯矩下的塑性极限载荷的确定

H.11.1 纯内压下的塑性极限内压

$$P_{LS} = p_{LS} \times P_{L0} \quad \dots\dots\dots (H.4)$$

式中:

$$p_{LS} = 0.95 - (0.85 + 0.013a/b)A_e \quad (0 < a/b < 60) \quad \dots\dots\dots (H.5)$$

$$A_e = c(a_e bc)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (H.6)$$

$$a_e = \min(3.0, a) \quad \dots\dots\dots (H.7)$$

H.11.2 纯弯矩下的塑性极限弯矩

$$M_{LS} = m_{LS} \times M_{L0} \quad \dots\dots\dots (H.8)$$

式中：

$$m_{LS} = \begin{cases} \cos\left(\frac{c\pi b}{2}\right) - \frac{c \sin(\pi b)}{2} & \left(c < \frac{1-b}{b}\right) \\ (1-c) \sin\left[\frac{\pi(1-bc)}{2(1-c)}\right] + \frac{c \sin(\pi b)}{2} & \left(c \geq \frac{1-b}{b}\right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (H.9)$$

H.12 安全性评价

如果式(H.10)成立,则该缺陷是安全或可接受的;否则,认为不能保证安全或不可接受。

$$\left(\frac{P}{P_{LS}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{LS}}\right)^2 \leq 0.44 \quad \dots\dots\dots (H.10)$$

对于气孔、夹渣等埋藏型体积缺陷,如未能通过本附录所规定的安全评定计算,可将其表征为埋藏平面缺陷并按附录 G 重新进行评定。



附录 I

(资料性附录)

压力管道弯头和三通体积缺陷安全评定方法

I.1 总则

本附录给出了在内压和弯矩的组合载荷作用下,含气孔、夹渣和局部厚度减薄等体积缺陷及特定未焊透缺陷的钢制在用压力管道弯头和三通的安全评定方法。

I.2 符号

下列符号适用于本附录,未规定者按第3章的规定。

- a ——无量纲化的缺陷相对轴向长度;
- b ——无量纲化的缺陷相对环向长度;
- B ——三通主管上底部局部减薄的环向半长,mm;
- B_1 ——三通主管上肩部局部减薄的环向半长,mm;
- B_2 ——三通支管上肩部局部减薄的环向半长,mm;
- C_1 ——三通主管上肩部局部减薄的深度,mm;
- C_2 ——三通支管上肩部局部减薄的深度,mm;
- C ——体积缺陷的深度,mm;
- c ——无量纲化的缺陷相对深度;
- D_i ——管道的内直径,mm;
- D_{i1} ——三通主管内直径,mm;
- D_{o1} ——三通主管外直径,mm;
- D_{o2} ——三通支管外直径,mm;
- D_o ——管道外直径,mm;
- h ——弯头几何因子;
- K ——管道径比, $K = R_o/R_i$;
- K_1 ——三通主管径比, $K_1 = D_{o1}/D_{i1}$;
- L ——三通底部局部减薄的轴向半长,mm;
- L_1 ——三通主管上肩部局部减薄的轴向长度,mm;
- L_2 ——三通支管上肩部局部减薄的轴向长度,mm;
- l ——三通局部减薄相对轴向长度;
- M_{in} ——三通面内弯矩载荷, $N \cdot mm$;
- M_{out} ——三通面外弯矩载荷, $N \cdot mm$;
- M_{L1} ——无缺陷三通主管在纯弯矩下的塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;
- $M_{L,T,in}$ ——无缺陷三通在纯弯矩下的面内塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;
- $M_{L,T,out}$ ——无缺陷三通在纯弯矩下的面外塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;
- $M_{LTP,in}^{bott}$ ——含底部缺陷三通在纯弯矩下的面内塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;
- $M_{LTP,out}^{bott}$ ——含底部缺陷三通在纯弯矩下的面外塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;
- $M_{LTP,in}^{shou}$ ——含肩部缺陷三通在纯弯矩下的面内塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;

- $M_{LTP_out}^{shou}$ ——含肩部缺陷三通在纯弯矩下的面外塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;
 M ——弯矩载荷, $N \cdot mm$;
 M_{LB} ——无缺陷弯头在纯弯矩下的塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;
 M_{LBP} ——含缺陷弯头在纯弯矩下的塑性极限弯矩, $N \cdot mm$;
 P ——管道内压载荷, MPa ;
 P_{L1} ——无缺陷三通主管在纯内压下的塑性极限内压, $P_{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_f \ln(K_1)$, MPa ;
 P_{LB} ——无缺陷弯头在纯内压下的塑性极限内压, MPa ;
 P_{LBP} ——含缺陷弯头在纯内压下的塑性极限内压, MPa ;
 P_{td} ——三通强度比, $P_{td} = \frac{T_2/T_1}{D_{o2}/D_{o1}}$;
 P_{LT} ——无缺陷三通在纯内压下的塑性极限内压, MPa ;
 P_{LTP}^{bott} ——含底部缺陷三通在纯内压下的塑性极限内压, MPa ;
 P_{LTP}^{shou} ——含肩部缺陷三通在纯内压下的塑性极限内压, MPa ;
 R ——弯头在中心线处的曲率半径, mm ;
 R_{o1} ——三通主管外半径, $R_{o1} = D_{o1}/2$, mm ;
 R_{o2} ——三通支管外半径, mm ;
 R_{i1} ——三通主管内半径, $R_{i1} = D_{o1}/2$, mm ;
 R_{i2} ——三通支管内半径, mm ;
 R_o ——管道外半径, $R_o = D_o/2$, mm ;
 R_i ——管道内半径, mm ;
 R_m ——管道平均半径, mm ;
 T_1 ——三通主管计算壁厚, mm ;
 T_2 ——三通支管计算壁厚, mm ;
 T ——管道计算厚度, mm ;
 γ ——弯头局部减薄所对应的轴向半长, mm ;
 θ ——弯头局部减薄所对应的环向半长, mm 。

1.3 适用范围

1.3.1 本附录适用于同时满足如下条件的钢制在用压力管道:

- 在实际工况下,材料具有良好的延性,未发现劣化及劣化倾向;
- 管道最低工作温度不低于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$,或管道最低工作温度低于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 但材料为奥氏体不锈钢;
- 管道径比 $R_o/R_i \leq 1.4$ 。

1.3.2 本附录适用于下列缺陷:

- 气孔、夹渣、局部减薄等体积型缺陷(其周围无裂纹、未熔合等面型缺陷);
- 在用工况下无脆化倾向的 20# 或奥氏体不锈钢管道及壁厚不大于 13 mm 的 16 Mn 管道的未焊透缺陷;
- 体积缺陷的深度 C 小于计算壁厚 T 的 70%,且缺陷底部最小壁厚($T-C$)不小于 2 mm。

1.4 评定程序

评定过程按下列步骤进行:

- a) 缺陷部位管道尺寸的确定；
- b) 缺陷的规则化；
- c) 材料性能数据的确定；
- d) 无缺陷管道在纯内压或纯弯矩下的塑性极限载荷的确定；
- e) 典型工况载荷组合的确定与缺陷处弯矩的计算；
- f) 含缺陷管道在纯内压和纯弯矩下的塑性极限载荷的确定；
- g) 安全性评价。

I.5 缺陷部位管道尺寸的确定

根据实际情况确定缺陷所在管道的各个几何尺寸参数。对于弯头评定,应包括弯头内外半径、弯曲半径、壁厚等,详见图 I.1;对于三通评定应包括主管、支管的内外半径,壁厚等,详见图 I.2。弯头、三通的各壁厚值均应取管道实测壁厚与至下一个检验周期末的内外壁腐蚀减薄总量之差。

I.6 缺陷的规则化及无量纲化处理

I.6.1 缺陷的规则化

I.6.1.1 壁厚局部减薄缺陷的规则化

对经检测查明的局部减薄,根据其实际位置、形状和尺寸,进行规则化。

对于弯头上的局部减薄,按图 I.1 所示,规则化后其轴向长度为 2γ ,环向长度为 2θ ,深度为 C 。对于腐蚀或冲蚀引起的局部减薄, C 取实测最大减薄深度与至下一检验周期末体积缺陷扩展量之和。

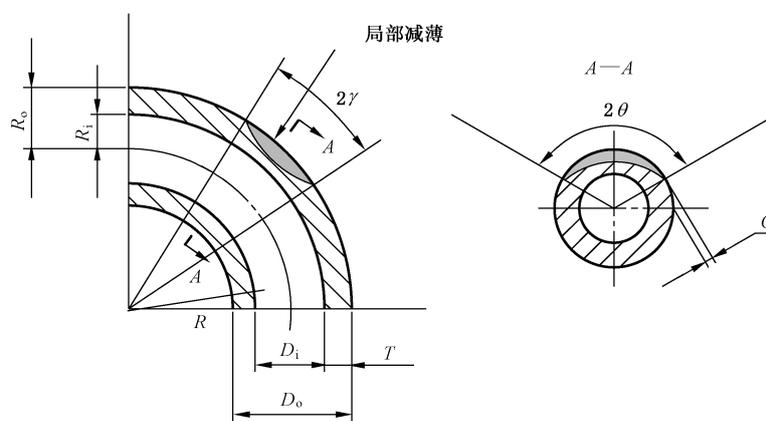
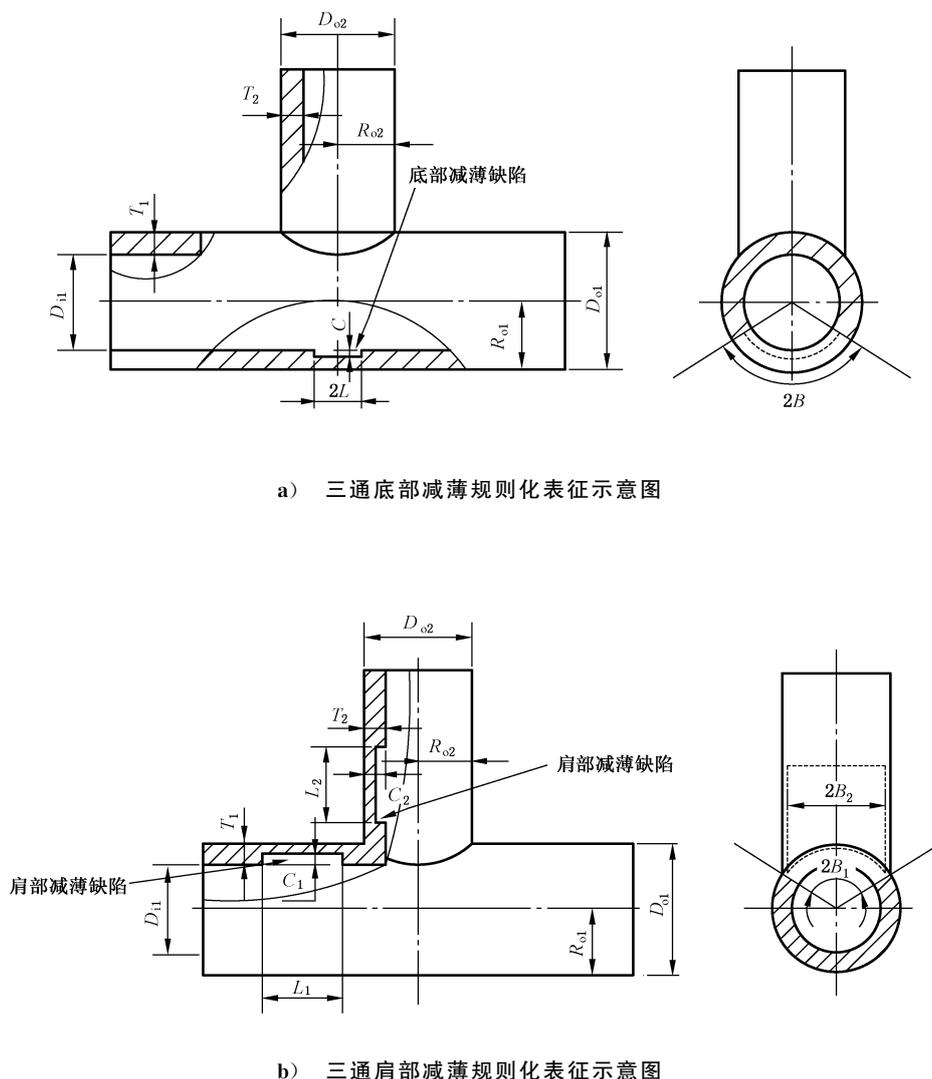


图 I.1 弯头缺陷规则化表征示意图

对于三通上的局部减薄,按位置可分为底部减薄和肩部减薄;其中底部减薄按图 I.2 a)所示规则化为轴向长度 $2L$,环向长度 $2B$,深度为 C 的缺陷,肩部减薄按图 I.2 b)所示规则化为主管轴向长度 L_1 、环向长度 $2B_1$ 、深度 C_1 ,支管轴向长度 L_2 ,环向长度 $2B_2$ 、深度 C_2 的缺陷。对于腐蚀或冲蚀引起的局部减薄, C 取实测最大减薄深度与至下一检验周期末体积缺陷扩展量之和。



a) 三通底部减薄规则化表征示意图

b) 三通肩部减薄规则化表征示意图

图 1.2 三通缺陷规则化表征示意图

1.6.1.2 未焊透、气孔、夹渣缺陷的规则化

对经检验查明且符合 I.3.2 b) 的未焊透缺陷、气孔、夹渣,按附录 H 进行规则化。

1.6.2 缺陷规则化尺寸的无量纲化处理

对弯头上经规则化处理得到的缺陷尺寸,按如下规定进行无量纲化处理:

相对轴向长度: $a = 4\gamma/\pi(R + R_o)$ (适用于 90° 弯头的外弯外表面缺陷)

$a = 4\gamma/\pi(R + R_i)$ (适用于 90° 弯头的外弯内表面缺陷)

$a = 4\gamma/\pi(R - R_o)$ (适用于 90° 弯头的内弯外表面缺陷)

$a = 4\gamma/\pi(R - R_i)$ (适用于 90° 弯头的内弯内表面缺陷)

相对环向长度: $b = \theta/\pi R_o$ (适用于弯头的外表面缺陷)

$b = \theta/\pi R_i$ (适用于弯头的内表面缺陷)

相对深度: $c = C/T$

对三通上经规则化处理得到的缺陷尺寸,按如下规定进行无量纲化处理:

a) 底部缺陷

相对轴向长度: $l = L/R_{o1}$

相对环向长度: $b = 2B/\pi R_{o1}$ (适用于三通底部的外表面缺陷)

$b = 2B/\pi R_{i1}$ (适用于三通底部的内表面缺陷)

相对深度: $c = C/T_1$

b) 肩部缺陷

相对轴向长度: $l = \max\left\{\frac{L_1}{R_{o1}}, \frac{L_2}{R_{o2}}\right\}$

相对环向长度: $b = \max(2B_1/\pi R_{o1}, 2B_2/\pi R_{o2})$ (适用于三通肩部的外表面缺陷)

$b = \max(2B_1/\pi R_{i1}, 2B_2/\pi R_{i2})$ (适用于三通肩部的内表面缺陷)

相对深度: $c = \max\left\{\frac{C_1}{T_1}, \frac{C_2}{T_2}\right\}$



1.7 材料性能数据的确定

按 5.5 和附录 B 的规定确定在评定工况下材料的屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b ,并按式(I.1)确定流变应力:

$$\bar{\sigma}' = \frac{\sigma_s + \sigma_b}{2} \dots\dots\dots (I.1)$$

1.8 无缺陷管道在纯内压下和纯弯矩下的极限载荷的确定

1.8.1 无缺陷弯头在纯内压下的塑性极限内压 P_{LB}

$$P_{LB} = \frac{2\bar{\sigma}'T}{R_m} \cdot \frac{G_{BP}}{\sqrt{\left(\frac{R}{R-R_m}\right)^2 + \frac{R}{R-R_m} + 1}} \dots\dots\dots (I.2)$$

式中: $G_{BP} = \begin{cases} 0.28K + 0.87 & R/D_o = 1.0 \\ 0.19K + 0.83 & R/D_o = 1.5 \end{cases}$

1.8.2 无缺陷弯头在纯弯矩下的塑性极限弯矩 M_{LB}

$$M_{LB} = \frac{2\pi}{3}\bar{\sigma}'(R_o^3 - R_i^3) \cdot G_{BM} \cdot \frac{0.95h^3 + 0.10h}{1.5h^2 + 0.10} \dots\dots\dots (I.3)$$

式中: $h = RT/R_m^2$; $G_{BM} = \begin{cases} 30K^2 - 74K + 47.0 & R/D_o = 1.0 \\ 15K^2 - 39K + 25.8 & R/D_o = 1.5 \end{cases}$

1.8.3 无缺陷三通在纯内压下的塑性极限内压 P_{LT}

$$P_{LT} = p_{LT} \cdot P_{L1} \dots\dots\dots (I.4)$$

式中: $p_{LT} = 0.23K_1 P_{td} + 0.43$; $P_{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}' \ln(K_1)$ 。

1.8.4 无缺陷三通在纯弯矩下的面内塑性极限弯矩 M_{LT_in}

$$M_{LT_in} = m_{LT_in} \cdot M_{L1} \quad \dots\dots\dots (I.5)$$

式中： $m_{LT_in} = 0.48G_{Tm_in}$, $G_{Tm_in} = K_1^{1.8768} P_{td}^{0.6705} \cdot \left(\frac{D_{o2}}{D_{o1}}\right)^{2.8436}$; $M_{L1} = \frac{4}{3}\sigma'(R_{o1}^3 - R_{i1}^3)$ 。

1.8.5 无缺陷三通在纯弯矩下的面外塑性极限弯矩 M_{LT_out}

$$M_{LT_out} = m_{LT_out} \cdot M_{L1} \quad \dots\dots\dots (I.6)$$

式中： $m_{LT_out} = 0.27G_{Tm_out} + 0.02$, $G_{Tm_out} = K_1^{4.0} P_{td}^{0.2} \cdot \left(\frac{D_{o2}}{D_{o1}}\right)^{3.0}$ 。

1.9 典型工况载荷组合与缺陷处弯矩载荷的确定

根据实际情况,确定需要进行缺陷评定的载荷工况,给出相应的内压载荷 P ,并通过有限元方法或其他可行方式确定相应评定工况下缺陷处的弯矩载荷 M ,对三通,应分别确定面内弯矩载荷 M_{in} 和面外弯矩载荷 M_{out} 。

1.10 含缺陷管道在纯内压和纯弯矩下的塑性极限载荷的确定

1.10.1 含缺陷弯头在纯内压下的塑性极限内压 P_{LBP}

$$P_{LBP} = P_{LB} \cdot p_{LBP} \cdot \eta_1 \quad \dots\dots\dots (I.7)$$

式中:

$$p_{LBP} = \begin{cases} 3.7G_{BPP}^2 - 3.2G_{BPP} + 1.0 & (a/b \leq 1.0) \\ 4.5G_{BPP}^2 - 3.4G_{BPP} + 1.0 & (1.0 < a/b \leq 2.0, G_{BPP} = c^2 \cdot \sqrt[3]{abc}) \\ 8.0G_{BPP}^2 - 4.5G_{BPP} + 1.0 & (2.0 < a/b \leq 9.0) \end{cases}$$

$$\eta_1 = (0.46 - 0.08 \frac{R}{D_i}) \cdot K + 0.60$$

1.10.2 含缺陷弯头在纯弯矩下的塑性极限弯矩 M_{LBP}

$$M_{LBP} = M_{LB} \cdot m_{LBP} \cdot \eta_2 \quad \dots\dots\dots (I.8)$$

式中:

$$m_{LBP} = 1 - 1.27 \cdot G_{BMP}, G_{BMP} = a^{0.243} bc; \eta_2 = (-0.23 + 0.32 \frac{R}{D_i} + 0.97K - 0.23 \frac{R}{D_i} K)^{-1}$$

1.10.3 含缺陷三通在纯内压下的塑性极限内压

1.10.3.1 含底部缺陷三通在纯内压下的塑性极限内压 P_{LTP}^{bott}

$$P_{LTP}^{bott} = p_{LTP}^{bott} \cdot P_{L1} \quad (\text{适用范围: } c < 0.5) \quad \dots\dots\dots (I.9)$$

式中:

$$p_{LTP}^{bott} = -0.001\nu^2 + 0.032\nu + 0.59, \nu = \frac{H}{J}, H = K_1^{1.6} P_{td}^{2.5}, J = b^{0.1} c^{0.16} l^{0.15}$$

I.10.3.2 含肩部缺陷三通在纯内压下的塑性极限内压 P_{LTP}^{shou}

$$P_{LTP}^{shou} = p_{LTP}^{shou} \cdot P_{L1} \cdot \eta_3 \quad \dots\dots\dots (I.10)$$

式中:

$$p_{LTP}^{shou} = \begin{cases} -0.845x^2 - 0.576x + 0.661 & (l/b \leq 1.0) \\ 0.121x^2 - 0.843x + 0.659 & (1.0 < l/b \leq 2.5, x = c \sqrt[3]{lbc}) \\ 0.996x^2 - 1.286x + 0.669 & (2.5 < l/b \leq 10.0) \end{cases}$$

$$\eta_3 = 0.226 5 K_1 P_{td}^{1.4} + 0.762 2$$

I.10.4 含缺陷三通在纯弯矩下的面内塑性极限弯矩

I.10.4.1 含底部缺陷三通在纯弯矩下的面内塑性极限弯矩 $M_{LTP_in}^{bott}$

$$M_{LTP_in}^{bott} = m_{LTP_in}^{bott} \cdot M_{L1} \quad \dots\dots\dots (I.11)$$

式中: $m_{LTP_in}^{bott} \approx 0.9$ 。

I.10.4.2 含肩部缺陷三通在纯弯矩下的面内塑性极限弯矩 $M_{LTP_in}^{shou}$

$$M_{LTP_in}^{shou} = m_{LTP_in}^{shou} \cdot M_{LT_in} \quad \dots\dots\dots (I.12)$$

式中: $m_{LTP_in}^{shou} = (-0.834 8 \chi_1^2 - 0.102 2 \chi_1 + 0.987 2) \cdot \eta_6, \chi_1 = l^{0.075} bc,$

$$\eta_6 = -0.561 4 (K_1 - 1.393 9)^2 + 0.248 3 (P_{td} - 1.437 8)^2 + 1.002 7$$

I.10.5 含缺陷三通在纯弯矩下的面外塑性极限弯矩

I.10.5.1 含底部缺陷三通在纯弯矩下的面外塑性极限弯矩 $M_{LTP_out}^{bott}$

$$M_{LTP_out}^{bott} = m_{LTP_out}^{bott} \cdot M_{LT_out} \quad \dots\dots\dots (I.13)$$

式中: $m_{LTP_out}^{bott} = (-0.526 6 G_{tm_out}^2 + 0.116 7 G_{tm_out} + 0.912 7) \cdot \eta_4, G_{tm_out} = l^{0.25} b^{1.5} c^{0.5},$

$$\eta_4 = -0.65 (K_1 - 1.4)^2 + 0.25 (P_{td} - 1.3)^2 + 1.1。$$

I.10.5.2 含肩部缺陷三通在纯弯矩下的面外塑性极限弯矩 $M_{LTP_out}^{shou}$

$$M_{LTP_out}^{shou} = \eta_5 M_{LTP_in}^{shou} \quad \dots\dots\dots (I.14)$$

式中:

$$\eta_5 = 0.914 3 K_1 - 0.251 4$$

I.11 安全性评价

I.11.1 弯头的安全性评价

如果式(I.15)成立,则该缺陷是安全或可接受的;否则,认为不能保证安全或不可接受。

$$\left(\frac{P}{P_{LBP}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{LBP}}\right)^2 \leq 0.44 \quad \dots\dots\dots (I.15)$$

I.11.2 三通的安全性评价

对底部缺陷,如果式(I.16)、式(I.17)成立,则该缺陷是安全或可接受的;否则,认为不能保证安全或

不可接受。

$$\left(\frac{P}{P_{LTP}^{bott}}\right)^2 + \left(\frac{M_{out}}{M_{LTP_out}^{bott}}\right)^2 \leq 0.44 \quad \dots\dots\dots(I.16)$$

$$\left(\frac{P}{P_{LTP}^{bott}}\right)^2 + \left(\frac{M_{in}}{M_{LTP_in}^{bott}}\right)^2 \leq 0.44 \quad \dots\dots\dots(I.17)$$

对肩部缺陷,如果式(I.18)、式(I.19)成立,则该缺陷是安全或可接受的;否则,认为不能保证安全或不可接受。

$$\left(\frac{P}{P_{LTP}^{shou}}\right)^2 + \left(\frac{M_{out}}{M_{LTP_out}^{shou}}\right)^2 \leq 0.44 \quad \dots\dots\dots(I.18)$$

$$\left(\frac{P}{P_{LTP}^{shou}}\right)^2 + \left(\frac{M_{in}}{M_{LTP_in}^{shou}}\right)^2 \leq 0.44 \quad \dots\dots\dots(I.19)$$



附录 J

(资料性附录)

材料断裂韧性替代取值经验公式

J.1 总则



本附录给出了碳钢、低合金钢、奥氏体钢断裂韧性确定的经验公式。评定时,可根据实际情况,选择本附录中相应的公式计算。

J.2 符号

下列符号适用于本附录。

- KV_{2US} ——夏比 V 型缺口标准试样上平台冲击吸收能量, J;
- K_C ——考虑壁厚影响材料韧脆转变区断裂韧性, $MPa \cdot \sqrt{m}$;
- T ——评价温度, $^{\circ}C$;
- T_{ref} ——参考温度, $^{\circ}C$;
- RT_{NDT} ——基准无塑性转变温度, $^{\circ}C$ 。

J.3 铁素体钢断裂韧性替代取值经验公式

J.3.1 断裂韧性下限值估算公式

对于碳钢和低合金钢,可按照式(J.1)保守给出断裂韧性下限值:

$$K_{IC} = 36.5 + 3.084 \exp [0.036(T - T_{ref} + 56)] \quad (\text{当 } T - T_{ref} \geq 0^{\circ}C)$$

.....(J.1)

式中, T_{ref} 可取为基准无塑性转变温度 RT_{NDT} 。

若没有数据表明材料断裂韧性的上平台有更高的数值,式(J.1)确定的 K_{IC} 最大值取值如下:

- a) 对于化学成分不明的材料取为 $110 MPa \cdot \sqrt{m}$;
- b) 对于低硫碳钢(硫含量不大于 0.01%)或 J 系数控制的 2.25Cr1Mo 钢(J 系数不大于 150)取为 $220 MPa \cdot \sqrt{m}$ 。

J.3.2 由夏比冲击功估算断裂韧性

J.3.2.1 在下平台及近下平台区域

不考虑壁厚影响时,可按式(J.2)估算:

$$K_{IC} = 14.6(KV_2)^{0.5} \quad \text{.....(J.2)}$$

考虑壁厚影响时,按以下方法估算 K_C :

- a) 对于高硫钢(含硫量大于 0.01%),取式(J.3)和式(J.4)计算所得的较小值;
- b) 对于低硫钢(含硫量不大于 0.01%),取式(J.3)和式(J.5)计算所得的较小值。

$$K_C = (12\sqrt{KV_2} - 20)(25/B)^{0.25} + 20 \dots\dots\dots (J.3)$$

$$K_C = 0.54KV_2 + 55 \dots\dots\dots (J.4)$$

$$K_C = \sqrt{\frac{E(0.53KV_{2US}^{1.28})(0.2^{0.133}KV_{2US}^{0.256})}{1\ 000(1-\nu^2)}} \dots\dots\dots (J.5)$$

J.3.2.2 在韧脆转变区

按照式(J.1)估算, T_{ref} 取材料夏比冲击功等于 20J(碳钢)及 27J(Cr-Mo 钢)时的温度。

J.3.2.3 在上平台区

按式(J.6)估算。

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_s} = 0.52 \left(\frac{KV_2}{\sigma_s} - 0.02 \right) \dots\dots\dots (J.6)$$

J.4 奥氏体钢断裂韧度替代取值经验公式

确定奥氏体钢材无 σ 相脆化条件下,奥氏体钢母材断裂韧度 K_{IC} 可取为 $220\text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$,焊缝断裂韧度 K_{IC} 可取为 $132\text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 。

参 考 文 献

- [1] GB/T 229—2007 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- [2] GB/T 15970.6 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第6部分:恒载荷或恒位移下的预裂纹试样的制备和应用
-



GB/T 19624—2019《在用含缺陷压力容器安全评定》 国家标准第 1 号修改单

本修改单经国家市场监督管理总局(国家标准化管理委员会)于 2024 年 4 月 25 日批准,自 2024 年 4 月 25 日起实施。

一、5.7.3.2 中的 b)

原文为:

b) 分别计算各类应力分量的代数和,并乘以表 1 所规定的应力分安全系数,由此所得到的各应力值即为用于评定计算的应力 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b 。

修改为:

b) 分别计算各类应力分量的代数和,乘以表 1 所规定的应力分安全系数后,用于 5.7.4 的 K_I^P 、 K_I^S 和 5.7.6 的 L_r 计算。

二、5.7.5 中的式(18)中的符号含义

原文为:

G ——相邻两裂纹间弹塑性干涉效应系数,按附录 E 的规定确定;

修改为:

G ——相邻两裂纹间弹塑性干涉效应系数;单一裂纹问题或符合 5.3.1.7.3 a) 或 c) 的规定时, $G = 1.0$;符合 5.3.1.7.3 b) 的规定时, G 按附录 E 的规定确定;

三、J.3.2.3 中的式(J.6)

原文为:

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_s} = 0.52 \left(\frac{KV_2}{\sigma_s} - 0.02 \right) \dots\dots\dots (J.6)$$

修改为:

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_s} \right)^2 = 0.52 \left(\frac{KV_2}{\sigma_s} - 0.02 \right) \dots\dots\dots (J.6)$$



在用含缺陷压力容器安全评定

中国标准出版社

