

ICS 23.020.30

J 74

备案号: 29111-2010

NB

中 华 人 民 共 和 国 能 源 行 业 标 准

NB/T 20013—2010

含缺陷核承压设备完整性评定

**Structural integrity assessment
for nuclear pressure-retaining components containing defects**

2010 - 05 - 01 发布

2010 - 10 - 01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 3

5 总论 6

 5.1 完整性评定的一般原则 6

 5.2 资质 6

 5.3 失效模式判别 7

 5.4 完整性评定所需的参考资料和基础数据 7

 5.5 完整性评定中的基础工作 7

6 平面缺陷表征 8

 6.1 导则 8

 6.2 表面缺陷的规则化 9

 6.3 埋藏缺陷的规则化 9

 6.4 孔边角缺陷的规则化 10

 6.5 斜裂纹的规则化 11

 6.6 两共面缺陷的规则化 11

 6.7 非共面缺陷的规则化 12

7 应力的确定 14

 7.1 确定应力的原则 14

 7.2 缺陷评定中应考虑载荷和应力 14

 7.3 应力分类规则 15

 7.4 应力确定 15

8 材料力学性能的测定和选取方法 17

 8.1 选用原则 17

 8.2 材料拉伸性能的测试和选取 18

 8.3 材料 V 型缺口冲击性能的测试和选取 18

 8.4 材料断裂韧度的测试和选取 18

 8.5 材料的疲劳裂纹扩展速率测试 19

 8.6 材料辐照后的力学性能 19

9 裂纹疲劳扩展分析 19

 9.1 分析方法 19

 9.2 分析程序 19

9.3	缺陷表征.....	20
9.4	确定循环载荷的应力变化范围和循环次数.....	20
9.5	确定材料疲劳裂纹扩展性能数据.....	20
9.6	计算应力强度因子变化幅 ΔK	21
9.7	计算表面裂纹在评定周期末的裂纹尺寸.....	21
9.8	计算埋藏裂纹疲劳扩展尺寸的简化方法.....	22
10	厚壁容器平面缺陷脆性断裂评定.....	22
10.1	概述.....	22
10.2	评定流程.....	22
10.3	平面缺陷评定所需基本数据的确定.....	23
10.4	a_f 、 c_f 、 a_i 和 a_c 的确定.....	23
10.5	缺陷的验收准则.....	25
10.6	反应堆压力容器评定算例.....	26
11	基于失效评定图的平面缺陷断裂评定.....	26
11.1	评定流程.....	26
11.2	失效评定图.....	27
11.3	分安全系数.....	29
11.4	评定细则.....	29
11.5	核压力管道评定算例.....	31
12	核压力管道平面缺陷评定.....	31
12.1	范围.....	31
12.2	评定的基本方法.....	32
12.3	管道的评定方法.....	32
12.4	管道极限载荷评定.....	35
12.5	管道极限载荷评定的分析解.....	39
12.6	管道弹塑性断裂评定.....	40
12.7	铁素体钢管道脆性断裂评定.....	43
附录 A	(资料性附录) 局部减薄缺陷的评定.....	45
附录 B	(资料性附录) 焊接残余应力.....	51
附录 C	(资料性附录) 材料力学性能数据.....	63
附录 D	(规范性附录) 应力强度因子 K_I 的计算.....	78
附录 E	(资料性附录) 评定算例.....	87
附录 F	(规范性附录) 平面缺陷评定中 ρ 因子的计算.....	92
附录 G	(规范性附录) 载荷比 L_r 的计算.....	99

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由国家能源局提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准由核动力运行研究所负责起草，中核武汉核电运行技术股份有限公司、华东理工大学、上海核工程研究设计院、合肥通用机械研究院、南京工业大学、中国原子能科学研究院、武汉大学参加起草。

本标准主要起草人：聂勇、刘鸿运、李培宁、唐毅、李思源、惠虎、贺寅彪、包章根、陈学东、杨铁成、沈士明、赵建平、杨红义、余华金、张建强、曹明、关卫和、范志超、王月英、齐敏、胡荣。

含缺陷核承压设备完整性评定

1 范围

本标准规定了在役含缺陷核承压设备完整性评定方法，包括线弹性断裂评定、弹塑性断裂评定、塑性失效评定和裂纹疲劳扩展评定。

本标准适用于压水堆在役钢制含缺陷核安全1级承压设备的完整性评定。核安全2级和3级承压设备的完整性评定可参照使用。

对于役前检验发现的不可修复的缺陷，经业主和相关部门同意后，可参照本标准进行评定。

本标准不适用核承压设备中泵和阀门的评定，以及以质量控制标准验收的新建造核承压设备。

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，仅所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 228 金属材料 室温拉伸试验方法
- GB/T 229—2007 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 4161 金属材料 平面应变断裂韧度 K_{Ic} 试验方法
- GB/T 4338 金属材料 高温拉伸试验方法
- GB/T 6398 金属材料 疲劳裂纹扩展速率试验方法
- GB/T 6803 铁素体钢的无塑性转变温度 落锤试验方法
- GB/T 12778 金属夏比冲击断口测定方法
- GB/T 19744 铁素体钢平面应变止裂断裂韧度 K_{Ia} 试验方法
- GB/T 21143 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法
- EJ/T 560 轻水冷却反应堆压力容器辐照监督

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

核承压设备 nuclear pressure retaining component
核安全机械设备中的承压设备，包括核压力容器和管道。

3.2

结构完整性 structural integrity
核承压设备中所含缺陷对满足安全性与可靠性的影响程度。

3.3

完整性评定 structural integrity assessment
对含缺陷核承压设备能否继续安全使用的评价。

3.4

缺陷表征 defect characterization

将实际缺陷按规则简化为一个规定的几何形状的缺陷。

3.5

表征缺陷尺寸 defect characterization size

实际缺陷经表征或规则化所确定的缺陷尺寸。

3.6

断裂评定 fracture assessment

采用断裂力学的方法，评价含缺陷核承压设备是否发生断裂失效。

3.7

塑性失效评定 plastic collapse assessment

采用塑性极限分析的方法，评价含缺陷核承压设备是否发生塑性失效。

3.8

塑性极限载荷 plastic collapse load

采用极限分析方法，以构件材料的流变应力计算理想弹塑性材料结构所能承受的最大载荷。

3.9

使用限制 service limits

适用于设计技术规格书规定的所有使用载荷定义的应力和应力强度限制。

注：使用限制分为A、B、C和D级使用限制。

3.10

A级使用限制 service level A

设计技术规格书中指定的所有A级使用载荷应满足的限制。

注：这些载荷是设备或支承在执行其规定的使用功能时可能经历的。

3.11

B级使用限制 service level B

设计技术规格书中指定的所有B级使用载荷应满足的限制。

注：设备或支承应能经受这些载荷而不发生需要检修的损伤。

3.12

C级使用限制 service level C

设计技术规格书中指定的所有C级使用载荷应满足的限制。

注：这些限制允许在结构不连续区产生大的变形，这些变形可能需要在检查后更换设备或支承，或对设备或支承损伤进行修理才能继续工作。

3.13

D级使用限制 service level D

设计技术规格书中所有D级使用载荷应满足的限制。

注：这些限制允许产生显著的总体性变形，导致丧失尺寸稳定性和产生需要检修的损伤，这些损伤可能需要更换设备或支承方能继续使用。

3.14

辐照效应 irradiation effect

由于中子注量而引起的材料性能变化。

3.15

一次应力 primary stress

由所加载荷引起、需满足内、外力和力矩简单平衡规律的正应力或剪应力。

3.16

二次应力 secondary stress

由相邻部件的约束或结构的自身约束所引起的法向应力或剪应力。

4 符号

下列符号适用于本文件。

a ：平面缺陷规则化后的表征裂纹尺寸（穿透裂纹为其半长；表面裂纹的高度、埋藏裂纹自身高度的一半；角裂纹沿接管壁的高度），单位为毫米（mm）。

a_{aw} ：对应于评定周期末缺陷长度 l_t 的最大允许缺陷高度，单位为毫米（mm）。

a_c ：正常工况下最小临界缺陷尺寸，单位为毫米（mm）。

a_f ：裂纹疲劳扩展后 a 的最终尺寸，单位为毫米（mm）。

a_i ：紧急和事故工况下最小临界起始缺陷尺寸，单位为毫米（mm）。

a_0 ：疲劳分析初始裂纹的 a 值，单位为毫米（mm）。

CL ：试样的取向，对纵向平面裂纹的试样从周向方向进行加载。

c ：规则化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，单位为毫米（mm）。

c_f ：裂纹疲劳扩展后 c 的最终尺寸，单位为毫米（mm）。

c_0 ：疲劳分析初始裂纹的 c 值，单位为毫米（mm）。

D ：管道外径，单位为毫米（mm）。

D_i ：容器内直径、圆筒形容器或管道、球壳或球形封头的内径，单位为毫米（mm）。

D_{in} ：接管内直径，单位为毫米（mm）。

D_n ：接管平均直径，单位为毫米（mm）。

D_{on} ：接管外直径，单位为毫米（mm）。

da/dN ：疲劳裂纹扩展速率，单位为毫米每周（mm/cycle）。

E ：在评定温度下的材料弹性模量，单位为兆帕（MPa）。

e ：规则化椭圆埋藏裂纹中心偏离壁厚中心的偏心距，单位为毫米（mm）。

h ：缺陷沿壁厚方向的实测最大自身高度，单位为毫米（mm）。

h_w ：填角焊缝焊脚尺寸，单位为毫米（mm）。

I ：管道惯性矩，单位为四次方毫米（mm⁴）。

J ： J 积分值，单位为兆焦每平方米（MJ/m²）。

J_c ：材料稳定裂纹扩展量 $\Delta a < 0.2$ mm，即发生脆断或突进时所对应的脆断点或突进点的材料 J 积分断裂韧度，单位为兆焦每平方米（MJ/m²）。

J_{Ic} ：材料稳定裂纹扩展量 $\Delta a > 0.2$ mm 时，对应于 $\Delta a = 0.2$ mm 的材料 J 积分断裂韧度，单位为兆焦每平方米（MJ/m²）。

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/ $CTOD$ （裂纹尖端张开位移）

断裂韧度换算的以应力强度因子表示的材料断裂韧度，单位为兆帕根号米（MPa \sqrt{m} ）。

K_I ：I 型应力强度因子，单位为兆帕根号米（MPa \sqrt{m} ）。

K_I^{\max} ：最大应力强度因子，单位为兆帕根号米（MPa \sqrt{m} ）。

K_I^{\min} ：最小应力强度因子，单位为兆帕根号米（MPa \sqrt{m} ）。

K_{Ic} : 材料的平面应变断裂韧度, 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

K_{Jc} : 由 J 积分断裂韧度转换的应力强度因子断裂韧度, 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

K_p : 平面缺陷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, 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

K_t : 断裂比, 施加载荷作用下的应力强度因子与以应力强度因子表示的材料断裂韧度的比值, 无量纲。

K_I^P : 一次应力引起的应力强度因子, 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

K_I^S : 二次应力引起的应力强度因子, 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

KV_2 : v 型缺口试样在 2 mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量, 单位为焦 (J)。

L : 板长度的一半, 单位为毫米 (mm)。

LE : 侧向膨胀值, 单位为毫米 (mm)。

L_{msd} : 局部减薄区的边缘到最近的主结构不连续处的距离, 单位为毫米 (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, 无量纲。

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, 单位为毫米 (mm)。

L_r^{\max} : L_r 的容许极限, 无量纲。

l : 平面缺陷沿壳体自由表面方向的实测最大长度, 单位为毫米 (mm)。

l_{aw} : 轴向穿透缺陷允许的缺陷长度限值, 单位为毫米 (mm)。

M_b : 一次载荷组合产生的合成弯矩, 单位为牛毫米 (N·mm)。

M_c : 合成二次弯矩, 包括热膨胀载荷和地震锚固件移动产生的弯矩, 单位为牛毫米 (N·mm)。

N : 恒幅疲劳应力循环总次数, 单位为周 (cycle)。

n : 疲劳裂纹扩展速率与 ΔK 关系式中的指数, 无量纲。

P : 一次应力, 单位为兆帕 (MPa) 或包括压力在内的管道总轴向载荷, 单位为牛 (N)。

P_b : 一次弯曲应力, 单位为兆帕 (MPa)。

P_m : 总体一次薄膜应力, 单位为兆帕 (MPa)。

p : 评定工况下, 核承压设备的压力, 单位为兆帕 (MPa)。

p_1 、 p_2 : 埋藏缺陷距壳壁两表面的距离, 单位为毫米 (mm)。

Q : 二次应力, 单位为兆帕 (MPa)。

Q_b : 二次弯曲应力, 单位为兆帕 (MPa)。

Q_m : 二次薄膜应力, 单位为兆帕 (MPa)。

R_c : 管道平均半径, 单位为毫米 (mm)。

R_i : 容器内半径, 单位为毫米 (mm)。

R_m : 材料的抗拉强度, 单位为兆帕 (MPa)。

R_n : 接管平均半径, 单位为毫米 (mm)。

R_o : 容器外半径, 单位为毫米 (mm)。

R_{on} : 接管外半径, 单位为毫米 (mm)。

R_p^* : R_{pp} , R_{pw} 中的较低者, 单位为兆帕 (MPa)。

R_p^+ : R_{pp} , R_{pw} 中的较大者, 单位为兆帕 (MPa)。

R_{pp} : 母材金属屈服强度 (屈服应力或0.2%弹性极限应力; 对奥氏体钢为1%弹性极限应力), 单位为兆帕 (MPa)。

R_{pw} : 焊缝金属屈服强度 (屈服应力或0.2%弹性极限应力; 对奥氏体钢为1%弹性极限应力), 单位为兆帕 (MPa)。

$R_{p0.2}$: 屈服强度: 非比例延伸率为0.2%时的应力, 单位为兆帕 (MPa)。

RSF_a : 许用的剩余强度系数, $RSF_a = 0.9$, 无量纲。

RT_{NDT} : 参考无塑性转变温度, 单位为摄氏度 (°C)。

R_σ : 应力强度因子比, 等于 K_I^{\min} / K_I^{\max} , 无量纲。

r_0 : 厚板屈服区的尺寸, 单位为毫米 (mm)。

SR : 应力比 (stress ratio), 无量纲。

s_1 : 两共面裂纹之间沿壳壁表面方向的最短距离, 单位为毫米 (mm)。

s_2 : 两共面裂纹之间沿壁厚方向的最短距离, 单位为毫米 (mm)。

T : 温度, 单位为摄氏度 (°C)。

T_{NDT} : 无塑性转变温度, 单位为摄氏度 (°C)。

t : 名义厚度或由超声检测的实际壁厚, 单位为毫米 (mm)。

t_{FCA} : 局部减薄区未来一个检验周期的壁厚减薄量, 单位为毫米 (mm)。

t_{mm} : 最小测量壁厚, 单位为毫米 (mm)。

t_{no} : 缺陷附近实测接管壁厚, 单位为毫米 (mm)。

W : 试样宽度的一半, 单位为毫米 (mm)。

x : 厚度方向的位置变量, 离管道内表面的距离, 单位为毫米 (mm)。

y_0 : 薄板屈服区的尺寸, 单位为毫米 (mm)。

z : 厚度方向的位置变量, 离最后一道焊缝的表面的距离, 单位为毫米 (mm)。

ΔK : 裂纹尖端应力强度因子变化范围, 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

ΔK_a : a 方向裂纹尖端处的 ΔK , 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

ΔK_c : c 方向裂纹尖端处的 ΔK , 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

ΔK_{th} : 应力强度因子变化范围的门槛值, 单位为兆帕根号米 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)。

ΔT : 内外壁温差, 单位为摄氏度 (°C)。

δ : 裂纹尖端张开位移 (CTOD) 值, 单位为毫米 (mm)。

θ, φ : 角度, 单位为弧度 (rad)。

ν : 泊松比, 无量纲。

ρ : 平面缺陷评定中计算二次应力的塑性修正因子, 无量纲。

σ : 应力, 单位为兆帕 (MPa)。

σ_b : 由应力分布线性化得到的弯曲应力(由 P 引起的称 P_b , 由 Q 引起的称 Q_b); (第 12 章核压力管道平面缺陷评定中) 一次弯曲应力, 单位为兆帕 (MPa)。

σ'_b : 在极限载荷下, 任何一次应力组合的弯曲应力, 单位为兆帕 (MPa)。

σ_e : 二次弯曲应力, 包括热膨胀应力和地震锚固件移动引起的应力, 单位为兆帕 (MPa)。

σ_f : 流变应力, $\sigma_f = (R_{p0.2} + R_m)/2$; 对在使用温度下实测得到的材料屈服强度 $R_{p0.2}$ 和抗拉强度 R_m ; 如不能获取实测值时, 可采用标准规定的屈服强度 $R_{p0.2}$ 和抗拉强度 R_m 值。

σ_R : 残余应力, 单位为兆帕 (MPa)。

σ_m : 薄膜应力或 (第 12 章核压力管道平面缺陷评定中) 一次薄膜应力, 单位为兆帕 (MPa)。

σ'_m : 在极限载荷下的薄膜应力, 单位为兆帕 (MPa)。

σ_R^L : 纵向残余应力, 单位为兆帕 (MPa)。

σ_R^T : 横向残余应力, 单位为兆帕 (MPa)。

$\sigma_R^{T,B}$: 内表面的横向残余应力, 单位为兆帕 (MPa)。

$\sigma_R^{T,O}$: 外表面的横向残余应力, 单位为兆帕 (MPa)。

5 总论

5.1 完整性评定的一般原则

完整性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。

5.2 资质

核承压设备完整性评定的单位和人员应具有相应的设计经验和无损检查经验, 并具有充分的结构完整性评定能力。

5.3 失效模式判别

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。

应依据同类核承压设备的失效分析、完整性评定案例与经验、制造和检验资料、运行工况、对缺陷的理化检验和物理诊断结果判断该设备的失效模式，并充分考虑可能存在的环境影响因素等对失效模式和完整性评定的影响。

完整性评定应考虑在评定周期内核承压设备于规定工况（包括水压试验）下可能发生的上述三种失效模式。一种评定方法可评价相应的失效模式，在对各种可能的失效模式进行判断或评价后，可作出该核承压设备是否安全的结论。

5.4 完整性评定所需的参考资料和基础数据

5.4.1 完整性评定所需参考资料

完整性评定参考资料，应包含：

- 设备技术规格书；
- 核承压设备制造竣工图及强度计算书；
- 核承压设备验收的有关资料，包括材料数据、焊接记录、返修记录、无损检验资料、热处理报告和压力试验报告；
- 核承压设备运行状况的有关资料，包括瞬态运行记录、不符合项处理、在役检查记录、故障记录和维修记录；
- 设计基准所需考虑的基准载荷，包括循环操作载荷和发生次数、各种假想事故等。

5.4.2 完整性评定所需基础数据

完整性评定基础数据，应包含：

- 缺陷的类型、尺寸和位置；
- 结构和焊缝的几何形状和尺寸；
- 材料的物理性能、化学成分、力学性能（包括断裂韧性等）；
- 载荷；
- 残余应力；
- 环境对材料性能的影响，如辐照、腐蚀等。

5.5 完整性评定中的基础工作

5.5.1 缺陷检验

应根据完整性评定的要求，根据被评定对象结构和材料特点，采用无损检测方法检测可能存在的各种缺陷，检验结果应准确和可靠。

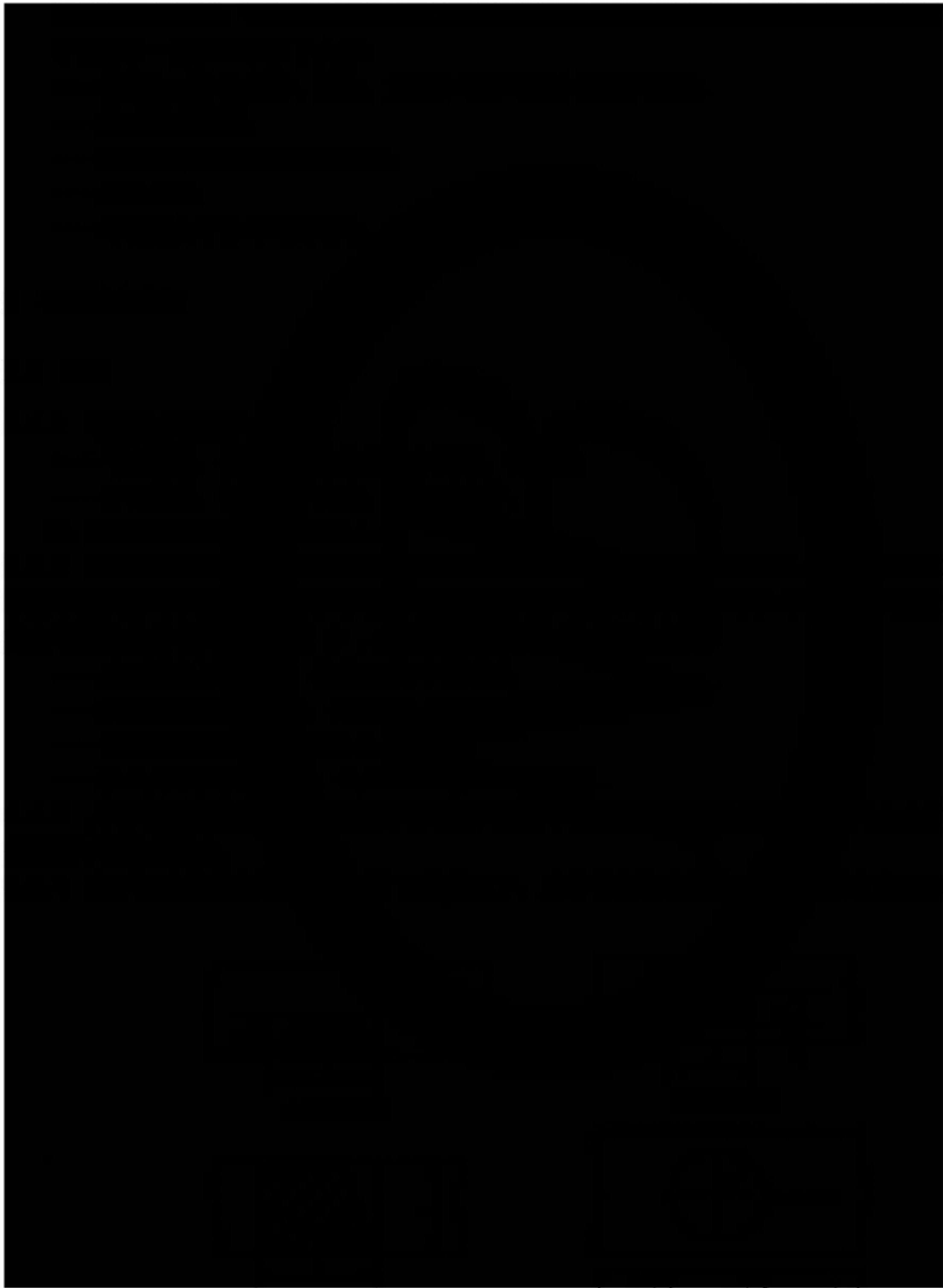
5.5.2 应力分析

应考虑各种可能的载荷，并根据具体的失效模式采用成熟、可靠的计算方法计算完整性评定所需应力。

5.5.3 材料力学性能的测试和选取

按第8章的规定选取。

5.5.4 评定结论与报告



使用的条件。

为表面缺陷、
矩形的长边

于堆焊层内

评定。

c) 穿透缺陷

d) 孔边角缺陷

图1 平面缺陷的表征图例

6.2 表面缺陷的规则化

对长为 l 、高为 h 的表面缺陷，表征如下：

——当 $h > 0.75t$ 时，规则化为长 $2a = l + h$ 的穿透裂纹（图2a））；

——当 $h \leq 0.75t$ ：

- $h < 0.5l$ 时，规则化为 $a = h$ ， $2c = l$ 的半椭圆形表面裂纹（图2b））；
- $h \geq 0.5l$ 时，规则化为 $a = h$ ， $2c = 2h$ 的半圆形表面裂纹（图2c））。



图2 表面缺陷的规则化图例

6.3 埋藏缺陷的规则化

若长为 l ，高为 h 的埋藏缺陷到壳体内外表面的最短距离分别为 p_1 和 p_2 ，且 $p_1 \leq p_2$ ，则：

——当 $p_1 \leq p_2 < 0.2h$ 时，规则化为 $2a = l + h$ 的穿透裂纹（图3a））；

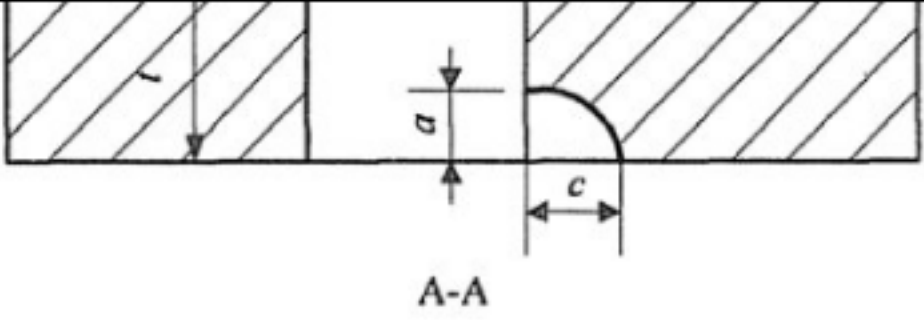
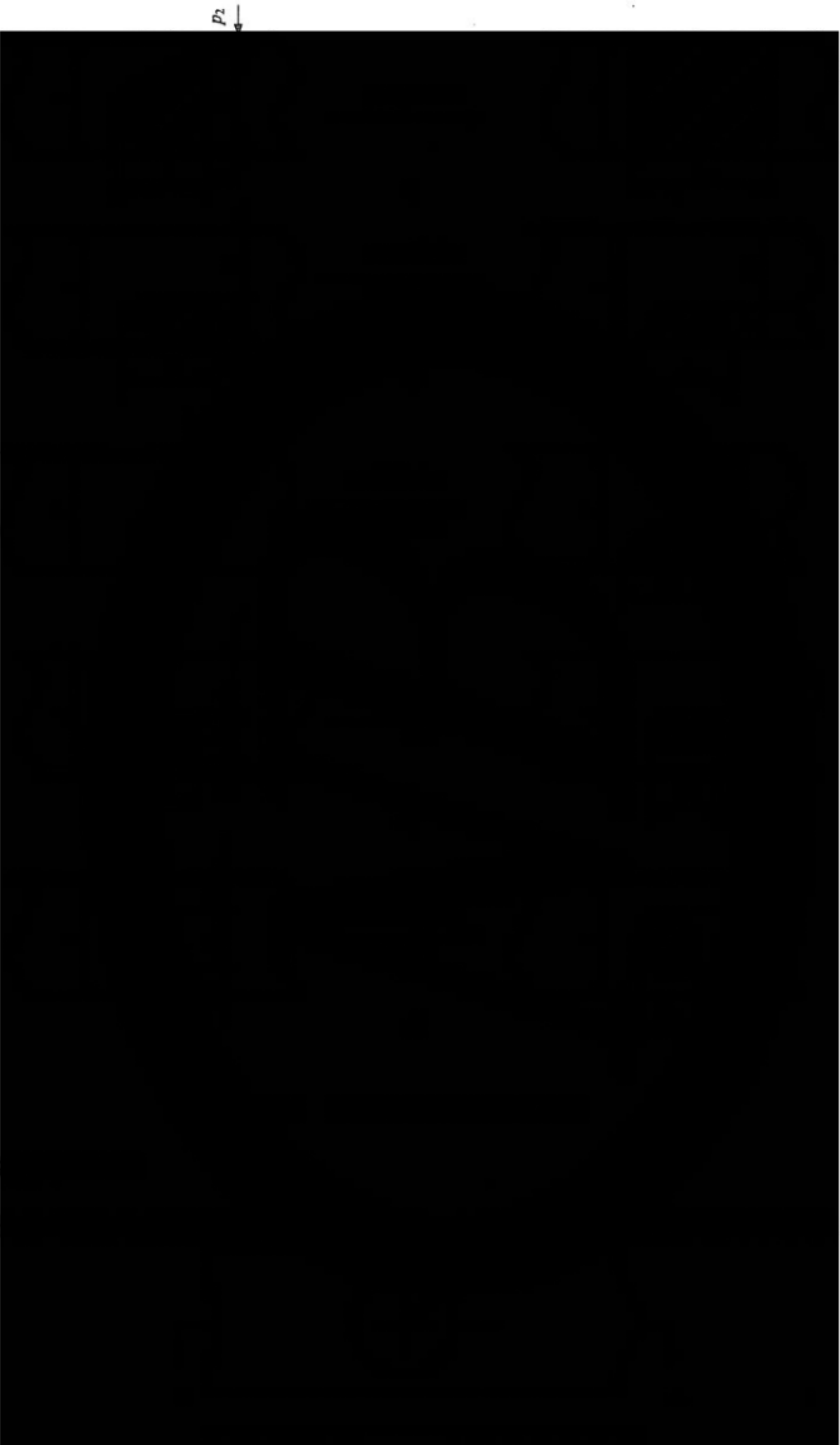
——当 $p_1 < 0.2h \leq p_2$ ：

- $h + p_1 < 0.5l$ 时，规则化为 $a = h + p_1$ ， $2c = l$ 的半椭圆形表面裂纹（图3b））；
- $h + p_1 \geq 0.5l$ 时，规则化为 $a = h + p_1$ ， $2c = 2(h + p_1)$ 的半圆形表面裂纹（图3c））；
- $a = h + p_1 \leq 0.8t$ 的表面裂纹不再规则化为穿透裂纹；
- $a = h + p_1 > 0.8t$ 的表面裂纹应规则化为 $2a = l + h + p_1$ 的穿透裂纹。

——当 $0.2h \leq p_1 \leq p_2$ ：

- $h \leq l$ 时，规则化为 $2a = h$ ， $2c = l$ 的椭圆形埋藏裂纹（图3d））；
- $h > l$ 时，规则化为 $2a = h$ ， $2c = h$ 的圆形埋藏裂纹（图3e））。

6.4 孔边角缺
高为 h ，



$2a=l+h$

$a=h+p_1$

$2c=l$

$a=h+p_1$

$2c=2(h+p_1)$

$2a=h$

$2c=l$

$2a=h$

$2c=h$

(图4)。

图4 孔边缺陷的规则化图例

6.5 斜裂纹的规则化

当裂纹平面与主应力方向不垂直时,应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规则化裂纹。

6.6 两共面缺陷的规则化

6.6.1 若图 5 a) 中的两表面缺陷满足下列条件之一,应规则化为 $a = \max(a_1, a_2)$, $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$ 的表面裂纹:

—— $\max(a_1/c_1, a_2/c_2) \geq 1$, 且 $s_1 \leq \min(2c_1, 2c_2)$;

—— $a_1/c_1 < 1$, $a_2/c_2 < 1$, 且 $s_1 = 0$ 。

6.6.2 若图 5 b) 中的两缺陷的间距 $s_2 \leq a_1 + a_2$ 时,应规则化为 $2a = 2a_1 + 2a_2 + s_2$, $2c = \max(2c_1, 2c_2)$ 的埋藏裂纹。

6.6.3 若图 5 c) 中的两缺陷满足下列条件之一,应规则化为 $2a = \max(2a_1, 2a_2)$, $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$ 的埋藏裂纹:

—— $\max(a_1/c_1, a_2/c_2) \geq 1$, 且 $s_1 \leq \min(2c_1, 2c_2)$;

—— $a_1/c_1 < 1$, $a_2/c_2 < 1$, 且 $s_1 = 0$ 。

6.6.4 若图 5 d) 中的两缺陷的间距 $s_2 \leq a_1 + a_2$ 时,应规则化为 $a = 2a_1 + a_2 + s_2$, $2c = \max(2c_1, 2c_2)$ 的表面裂纹。

6.6.5 若图 5 e) 中的两埋藏缺陷满足下列条件之一,应规则化为 $2a = 2a_1 + 2a_2 + s_2$, $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$ 的埋藏裂纹:

—— $\max(a_1/c_1, a_2/c_2) \geq 1$, 且 $s_1 \leq \min(2c_1, 2c_2)$, $s_2 \leq a_1 + a_2$;

—— $a_1/c_1 < 1$, $a_2/c_2 < 1$, 且 $s_1 \leq 0$, $s_2 \leq a_1 + a_2$ 。

6.6.6 若图 5 f) 中的两缺陷满足下列条件之一,应规则化为 $a = 2a_1 + a_2 + s_2$, $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$ 的表面裂纹:

—— $\max(a_1/c_1, a_2/c_2) \geq 1$, 且 $s_1 \leq \min(2c_1, 2c_2)$, $s_2 \leq a_1 + a_2$;

—— $a_1/c_1 < 1$, $a_2/c_2 < 1$, 且 $s_1 \leq 0$, $s_2 \leq a_1 + a_2$ 。

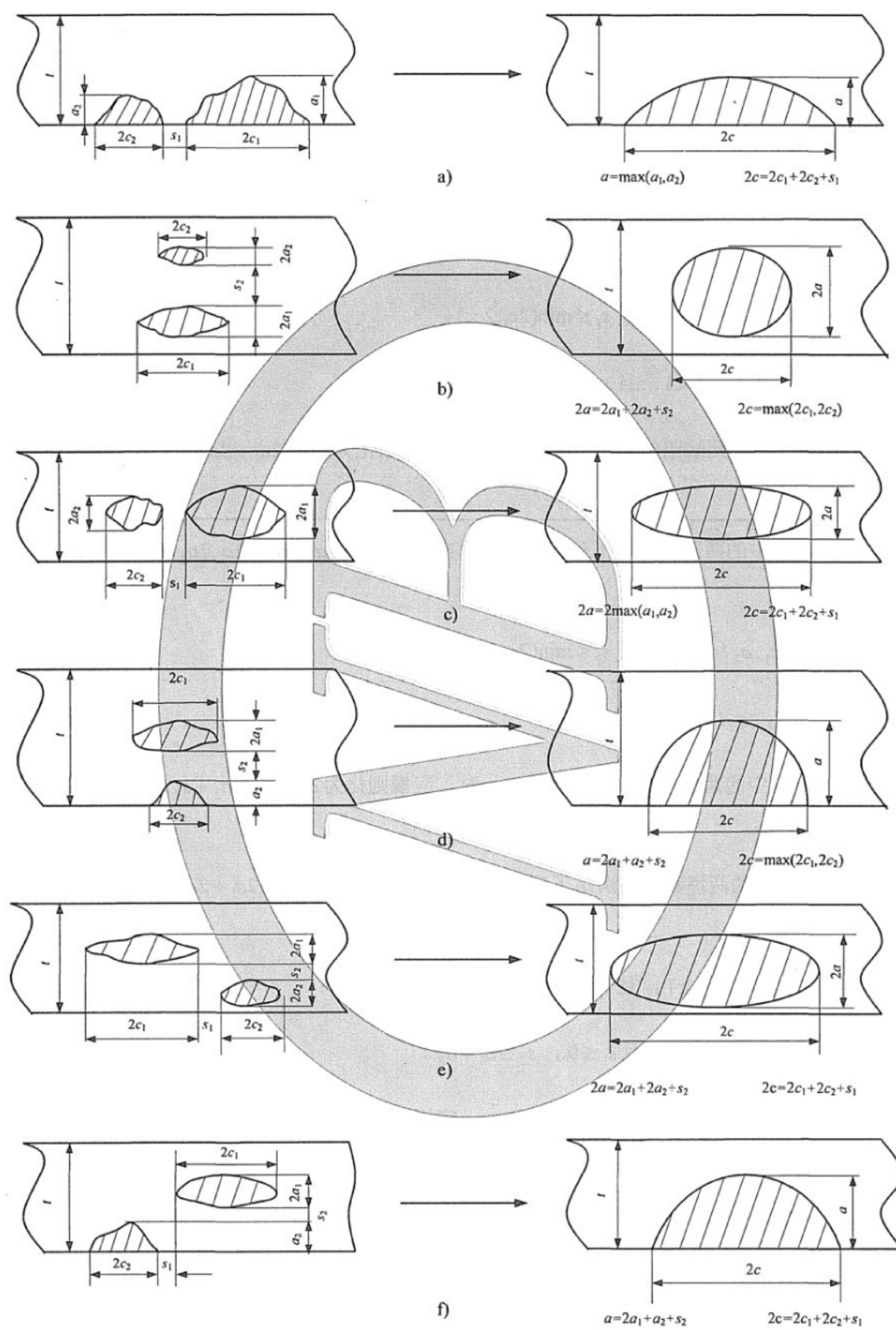


图5 共面两平面缺陷的规则化图例

6.7 非共面缺陷的规则化

6.7.1 若图 6 a) 或图 6 b) 中非共面的两埋藏缺陷满足下列条件之一, 则应规则化为 $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$,

$2a =$ (在垂直于焊缝中最大主应力的平面上包络矩形的最小高度) 的埋藏裂纹:

—— $\max(a_1/c_1, a_2/c_2) \geq 1$, 且 $s_2 \leq a_1 + a_2$, $s_1 \leq \min(2c_1, 2c_2)$;

—— $a_1/c_1 < 1$, $a_2/c_2 < 1$, 且 $s_2 \leq a_1 + a_2$, $s_1 \leq 0$ 。

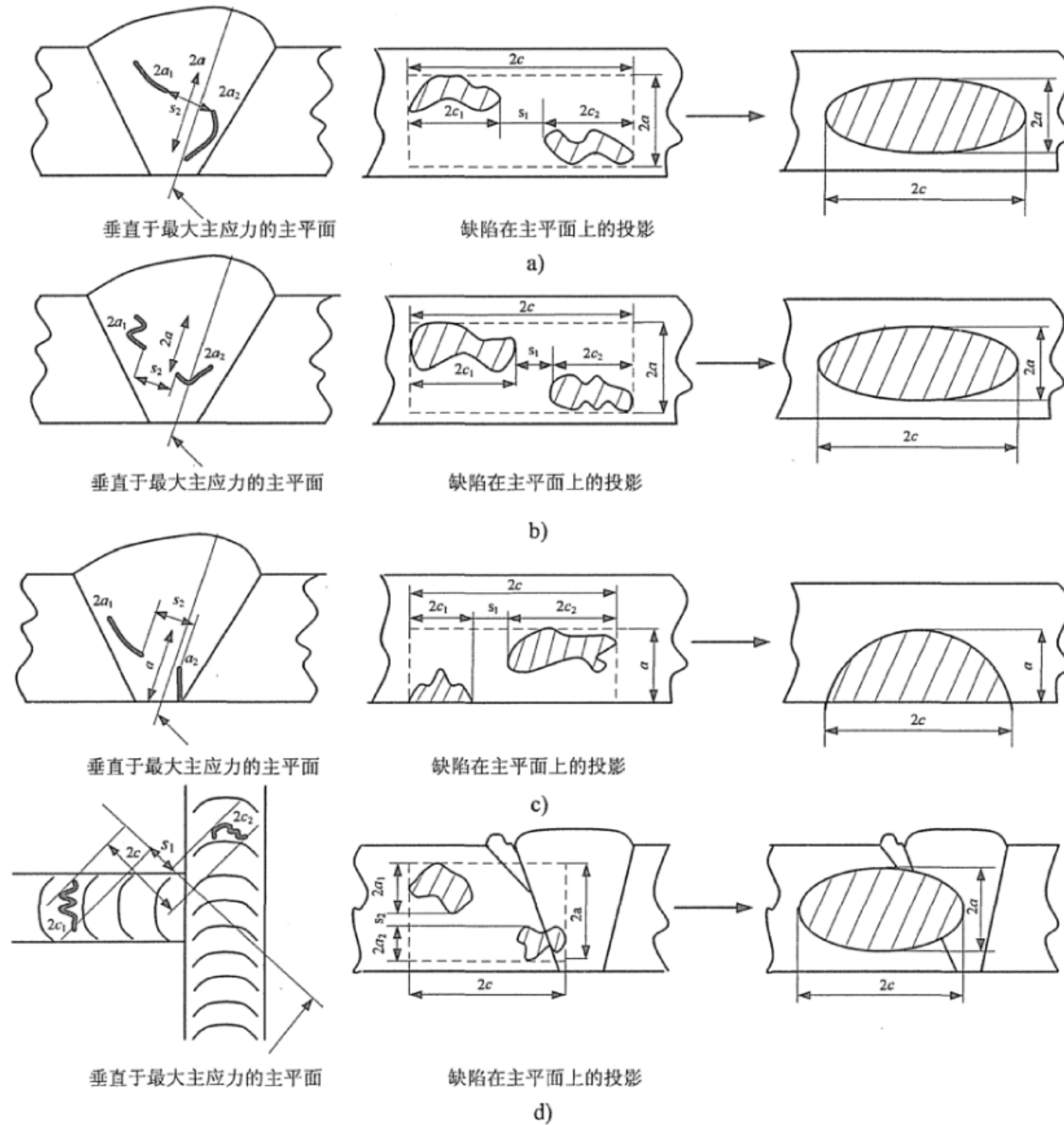


图6 非共面缺陷的规则化图例

6.7.2 若图 6 c) 中非共面的埋藏缺陷和表面缺陷满足下列条件之一, 则应规则化为 $a =$ (在垂直于焊缝中最大主应力的平面上包络矩形的最小高度), $2c = 2c_1 + 2c_2 + s_1$ 的表面裂纹:

—— $\max(a_1/c_1, a_2/c_2) \geq 1$, 且 $s_2 \leq a_1 + a_2$, $s_1 \leq \min(2c_1, 2c_2)$;

- $a_1/c_1 < 1$, $a_2/c_2 < 1$, 且 $s_2 \leq a_1 + a_2$, $s_1 \leq 0$ 。
- 6.7.3 若图 6 d) 中相交焊缝非共面的两埋藏缺陷满足下列条件之一, 则应规则化为 $2a = 2a_1 + 2a_2 + s_2$, $2c =$ (在垂直于焊缝中最大主应力的平面上包络矩形的最小长度) 的埋藏裂纹:
- $\max(a_1/c_1, a_2/c_2) \geq 1$, 且 $s_1 \leq \min(2c_1, 2c_2)$, $s_2 \leq a_1 + a_2$;

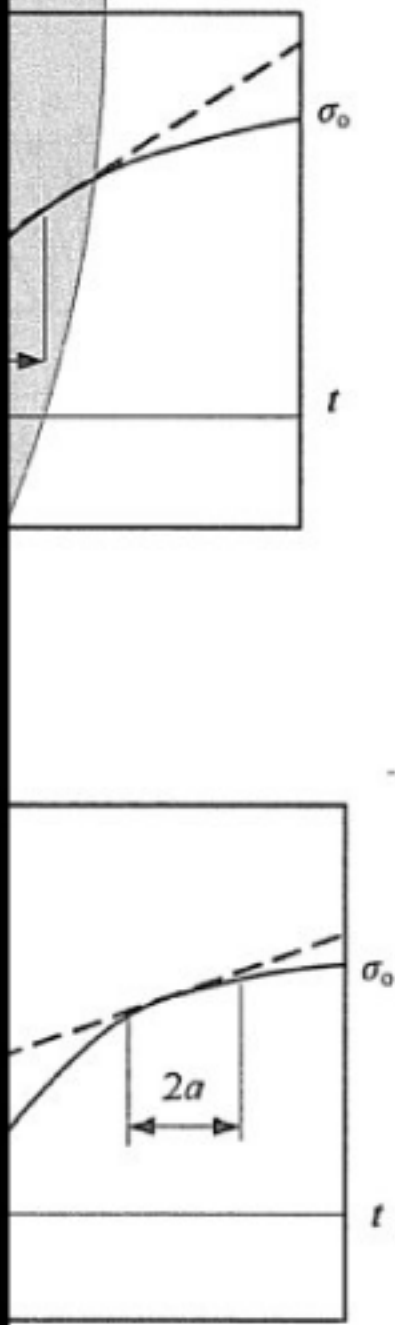
7 应力的

7.1 确定

确定

- a)
- b)
- c)

方法计算;
实线所示), 用于第
线(如图 7 实线所示),



b) 埋藏缺陷

图7 用于断裂评定的应力线性化规则示意图

7.2 缺陷评定中应考虑载荷和应力

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、角变形、壁厚局部减薄、不等厚度等结构几何不连续在载荷作用时产生的应力;
- g) 温度差、热胀冷缩不协调等产生的温差应力或热应力;
- h) 地震载荷及其产生的应力;
- i) 其他应考虑载荷或应力。

7.3 应力分类规则

将应力划分为一次应力*P*和二次应力*Q*。并特别规定:

- a) 管系的热膨胀引起的应力, 有弹性随动 (elastic follow-up) 效应的管系热膨胀应力按一次应力考虑, 其他按二次应力考虑;
- b) 焊接产生的残余应力, 按二次应力考虑;
- c) 由错边、角变形、壁厚厚度差引起的局部应力, 按二次应力考虑;
- d) 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。

7.4 应力确定

7.4.1 用于断裂评定的应力线性化规则

对7.1中的应力分布曲线进行线性化处理, 线性化后在裂纹面内的应力应都不低于计算应力。

图7为用于断裂评定的应力线性化规则示意图。图7 a) 为表面裂纹的应力线性化图例; 图7 b) 为埋藏裂纹的应力线性化图例。

7.4.2 确定应力 σ_m 和 σ_b

确定总应力在内外表面的线性化应力 σ_i 和 σ_o , 并用式 (1) 确定总应力的薄膜应力 σ_m 和弯曲应力

σ_b :

$$\begin{aligned}\sigma_m &= (\sigma_i + \sigma_o) / 2 \\ \sigma_b &= (\sigma_i - \sigma_o) / 2\end{aligned}$$

..... (1)

7.4.3 确定应力 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b

确定一次应力在内外表面的线性化应力 σ_{i1} 和 σ_{o1} , 并用式 (2) 确定一次薄膜应力 P_m 和一次弯曲应

力 P_b :

$$\begin{aligned}P_m &= (\sigma_{i1} + \sigma_{o1}) / 2 \\ P_b &= (\sigma_{i1} - \sigma_{o1}) / 2\end{aligned}$$

..... (2)

确定二次应力在内外表面的线性化应力 σ_{i2} 和 σ_{o2} , 并用式 (3) 确定二次薄膜应力 Q_m 和二次弯曲应

力 Q_b :

$$Q_m = (\sigma_{i2} + \sigma_{o2}) / 2$$
$$Q_b = (\sigma_{i2} - \sigma_{o2}) / 2$$

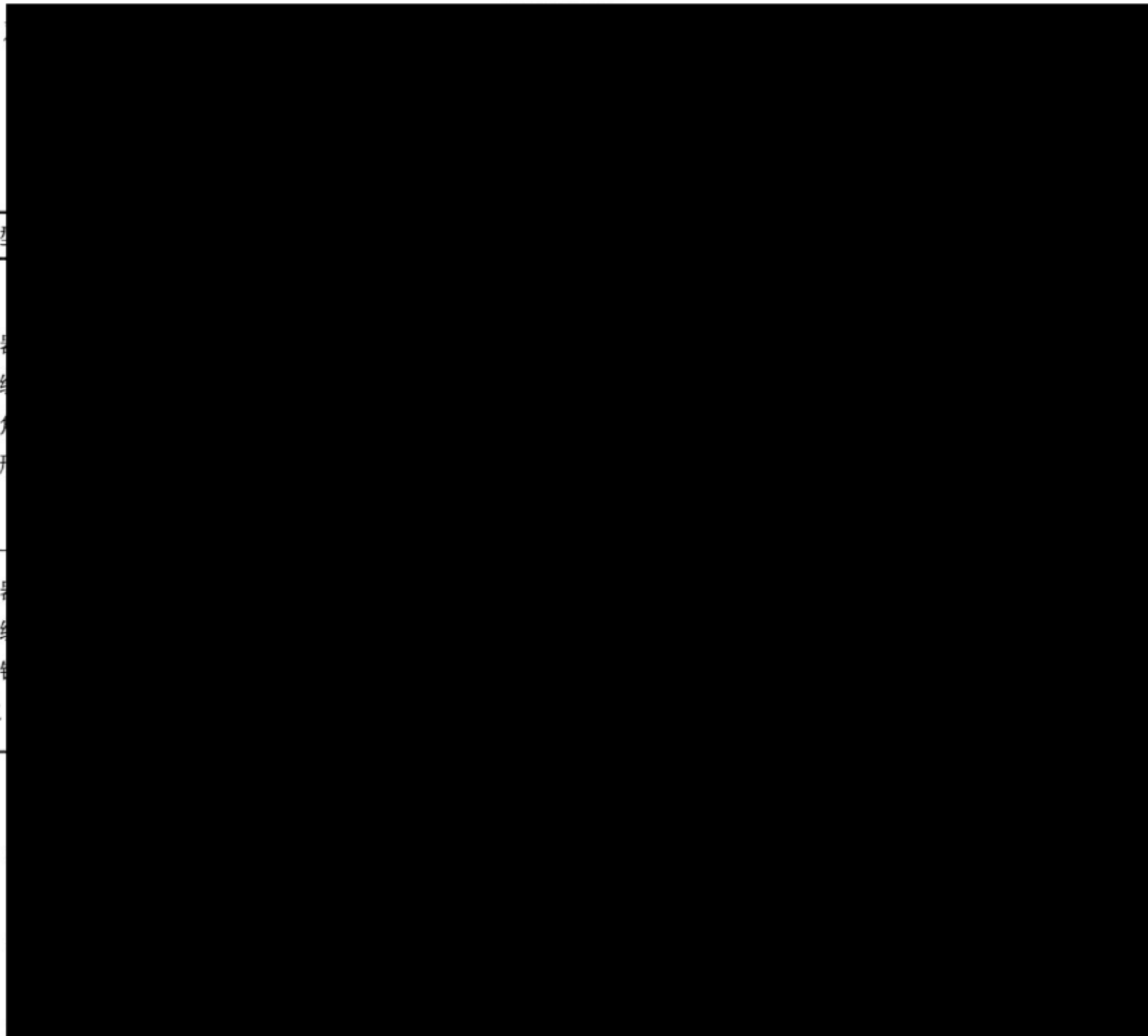
..... (3)

核承压设备在内压作用下，其焊缝由角变形和错边所产生的附加应力按二次应力考虑，且 $Q_m=0$ ， Q_b 的计算见表1。

当设备内外壁温差为 ΔT 时，其温差应力的 $Q_m=0$ ， Q_b 按式（4）或式（5）计算：
对铁素体钢：

$$Q_b = 1.6\Delta T$$

..... (4)

类型	
容器 焊缝 的角 变形	
容器 焊缝 的错 边	
<p>y——计算对接焊接接头中因角变形引起的二次弯曲应力时，在与焊缝垂直的截面上，角变形直边段在壁厚方向上的投影长度，单位为毫米（mm）；</p> <p>e_1——错边量，单位为毫米（mm）。</p>	

7.4.4 焊接残余应力

如已知焊接残余应力 σ_R 的分布曲线，则按其分布曲线确定 Q_m 和 Q_b 。

对于未经消除应力热处理的焊接部件，纵向最大残余应力 σ_{Rmax}^L 和横向最大残余应力 σ_{Rmax}^T 按式(6)

取值：

$$\begin{aligned}\sigma_{Rmax}^L &= \max\{R_{pw}, R_{pp}\} \\ \sigma_{Rmax}^T &= \min\{R_{pw}, R_{pp}\}\end{aligned}\dots\dots\dots (6)$$

对于焊接修补缺陷、焊接交叉处缺陷和浅缺陷，残余应力的 Q_m 和 Q_b 按式(7)取值：

$$\begin{aligned}Q_m &= \max\{R_{pw}, R_{pp}\} \\ Q_b &= 0\end{aligned}\dots\dots\dots (7)$$

对经炉内整体消除应力热处理的焊接部件，其纵向残余应力 σ_R^L 按式(8)取值，横向残余应力 σ_R^T 按式(9)取值：

对 σ_R^L ：

$$\begin{aligned}Q_m &= 0.3R_{pp} \\ Q_b &= 0\end{aligned}\dots\dots\dots (8)$$

对 σ_R^T ：

$$\begin{aligned}Q_m &= 0.2\min\{R_{pw}, R_{pp}\} \\ Q_b &= 0\end{aligned}\dots\dots\dots (9)$$

对于经局部消除应力热处理或现场整体热处理的焊接部件，可实测确定，或者依经验按式(10)和式(11)确定：

对 σ_R^L ：

$$\begin{aligned}Q_m &= (0.5 \sim 0.8)R_{pp} \\ Q_b &= 0\end{aligned}\dots\dots\dots (10)$$

对 σ_R^T ：

$$\begin{aligned}Q_m &= (0.4 \sim 0.7)\min\{R_{pw}, R_{pp}\} \\ Q_b &= 0\end{aligned}\dots\dots\dots (11)$$

对于未经消除应力热处理的焊接部件，在没有焊接残余应力 σ_R 分布曲线的情况下，可参考附录B典型焊接接头的焊接残余应力分布曲线确定 Q_m 和 Q_b 。

8 材料力学性能的测定和选取方法

8.1 选用原则

宜采用被评定部件的实测材料力学性能数据，包括拉伸性能、冲击性能和断裂韧性等。实测所用的试样应尽可能代表被评定缺陷部位的材料。

在无法获取实测数据并需要选取代用数据时，应经有关各方协商同意，并充分考虑材料化学成分，冶金工艺、试样和试验条件等的影响。附录C提供了部分材料力学性能数据及其确定方法，供参考选取。

8.2 材料拉伸性能的测试和选取

- 8.2.1 材料的强度指标和塑性指标，包括屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率等。
- 8.2.2 承压材料的室温拉伸试验按 GB/T 228 进行。当设计要求进行运行工况下 ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) 的拉伸试验时，承压材料的拉伸试验应按 GB/T 4338 进行。
- 8.2.3 在评定时若选用实测的材料拉伸性能，则在所有试样的拉伸性能满足材料技术条件的前提下，可按下述方法确定：
 - 如果用三个或三个以上试样做试验，取试验结果的平均值；
 - 两个试样则取试验的较小值。
- 8.2.4 在拉伸试验过程中，应记录力—伸长量或力—位移曲线图，并以此判断材料是否有明显屈服平台。

8.3 材料 V 型缺口冲击性能的测试和选取

- 8.3.1 承压材料在不同温度下的冲击吸收功，按 GB/T 229—2007 测定。冲击试样的晶状断面率（脆性断面率）和侧膨胀值按 GB/T 12778 测定。
- 8.3.2 应确定材料的韧脆转变温度和参考无塑性转变温度。材料的韧脆转变温度确定方法按照 GB/T 229—2007 的附录 D。反应堆压力容器等核承压设备的结构材料（包括母材、焊缝金属和热影响区）的参考无塑性转变温度 RT_{NDT} 确定方法如下：
 - a) 选定一个温度，记作 T_{NDT} ，该温度等于或高于按 GB/T 6803 测得的材料无塑性转变温度；
 - b) 在温度不大于 $T_{NDT} + 33^{\circ}\text{C}$ 的情况下，用一组（3 个）标准 V 型缺口试样进行冲击试验，每个试样的吸收能量应不小于 68 J，侧膨胀值应不小于 0.89 mm。当这些要求都满足时， T_{NDT} 就是参考无塑性转变温度 RT_{NDT} ；
 - c) 如果不能满足 b) 项的要求，则可进行以 3 个标准 V 型缺口试样为一组的多组补充冲击试验，以测定其中一组试样都满足 b) 项要求的温度 T_{CV} 。在此情况下， $RT_{NDT} = T_{CV} - 33^{\circ}\text{C}$ ；
 - d) 还可利用所进行的所有冲击试验的最小数据，做一条完整的冲击试验曲线（至少需 18 个试样），再从这条曲线上得到代表最低吸收能量为 68 J，最小侧膨胀值为 0.89 mm 的温度值。

8.4 材料断裂韧度的测试和选取

- 8.4.1 断裂韧度由材料性能参数 K_{Ia} 和 K_{Ic} 来确定。 K_{Ia} 根据 GB/T 19744 测得， K_{Ic} 根据 GB/T 4161 测得。评定中所用的 K_{Ia} 和 K_{Ic} 值应代表由特定材料和产品型式最适宜取得的保守值，并应考虑材料性能的可变性、断裂韧度的不确定性、试验技术造成的误差以及任何可能降低材料韧度的其他因素。
- 8.4.2 K_{Ic} 可通过材料的延性断裂韧度 J_{Ic} 按式 (12) 换算：

$$K_{Ic} = \sqrt{J_{Ic} E / (1 - \nu^2)} \dots\dots\dots (12)$$

- 8.4.3 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。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，应追加三个同样试样并采用全部六个试样测试数据中的第二低值作为评定用数据；如果使用更多的追加试验，则按以下规定选取评定用数据：
 - 试验次数为 3~5 次时，取最低值；
 - 试验次数为 6~10 次时，取第二低值；

——试验次数为 11~15 次时，取第三低值。

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。

8.5 材料的疲劳裂纹扩展速率测试

应按GB/T 6398测定。

8.6 材料辐照后的力学性能

8.6.1 测试方法

经辐照试样的测试方法和未经辐照试样的测试方法均采用如下标准规定的方法测试：

- 金属拉伸按 GB/T 228；
- 高温拉伸按 GB/T 4338；
- 冲击试验按 GB/T 229—2007；
- J_{Ic} 测试按 GB/T 21143。

8.6.2 ΔRT_{NDT} 的测定

应定期从反应堆堆内取出辐照监督试样测定其性能数据，获取材料因辐照引起的参考无塑性转变温度升高值，即 ΔRT_{NDT} 。

8.6.3 调整参考无塑性转变温度 ART 的确定

按EJ/T 560的有关规定确定调整参考无塑性转变温度 ART ，它等于参考无塑性转变温度 RT_{NDT} 加上8.6.2所述的 ΔRT_{NDT} 和适当的裕度 M ，即：

$$ART = RT_{NDT} + \Delta RT_{NDT} + M \dots\dots\dots (13)$$

9 裂纹疲劳扩展分析

9.1 分析方法

根据疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与裂纹尖端应力强度因子变化幅 ΔK 的关系式（14），确定规则化裂纹在规定的运行周期末的裂纹扩展量和最终尺寸：

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \dots\dots\dots (14)$$

9.2 分析程序

分析程序如下：

- 缺陷的表征；
- 应力变化范围的确定；
- 疲劳裂纹扩展性能数据的确定；
- 应力强度因子变化幅 ΔK 的计算；
- 疲劳裂纹扩展量的计算。

9.3 缺陷表征

对部件中检出的缺陷显示，根据缺陷的位置、形状和大小，按第6章的缺陷表征方法和规定对缺陷规则化，确定疲劳裂纹的初始裂纹尺寸 a_0 和 c_0 。

9.4 确定循环载荷的应力变化范围和循环次数

确定部件在评定工况下所承受的 k 种循环载荷 F_j ($j=1, 2, \dots, k$)， F_j 在评定周期内的循环次数为 n_j ($j=1, 2, \dots, k$)。

按第7章的规定确定载荷 F_j ($j=1, 2, \dots, k$) 在一个循环内的总应力变化范围 $\Delta\sigma_j$ 分布曲线 (图8中的实线)。

对 $\Delta\sigma_j$ 分布曲线进行线性化处理，应使裂纹面沿壁厚的线性化应力都不低于 $\Delta\sigma_j$ 分布曲线的对应值 (图8)，并由线性分布应力确定内外表面的应力变化范围值 $\Delta\sigma_{ij}$ 和 $\Delta\sigma_{oj}$ ($j=1, 2, \dots, k$)。

确定 $\Delta\sigma_{mj}$ 和 $\Delta\sigma_{bj}$ ，疲劳分析中使用的薄膜应力变化范围值 $\Delta\sigma_{mj}$ 和弯曲应力变化范围值 $\Delta\sigma_{bj}$ ，按式 (15) 确定：

$$\Delta\sigma_{mj} = \frac{\Delta\sigma_{ij} + \Delta\sigma_{oj}}{2}$$
$$\Delta\sigma_{bj} = \frac{\Delta\sigma_{ij} - \Delta\sigma_{oj}}{2}$$

..... (15)

式中 $j=1, 2, \dots, k$ 。

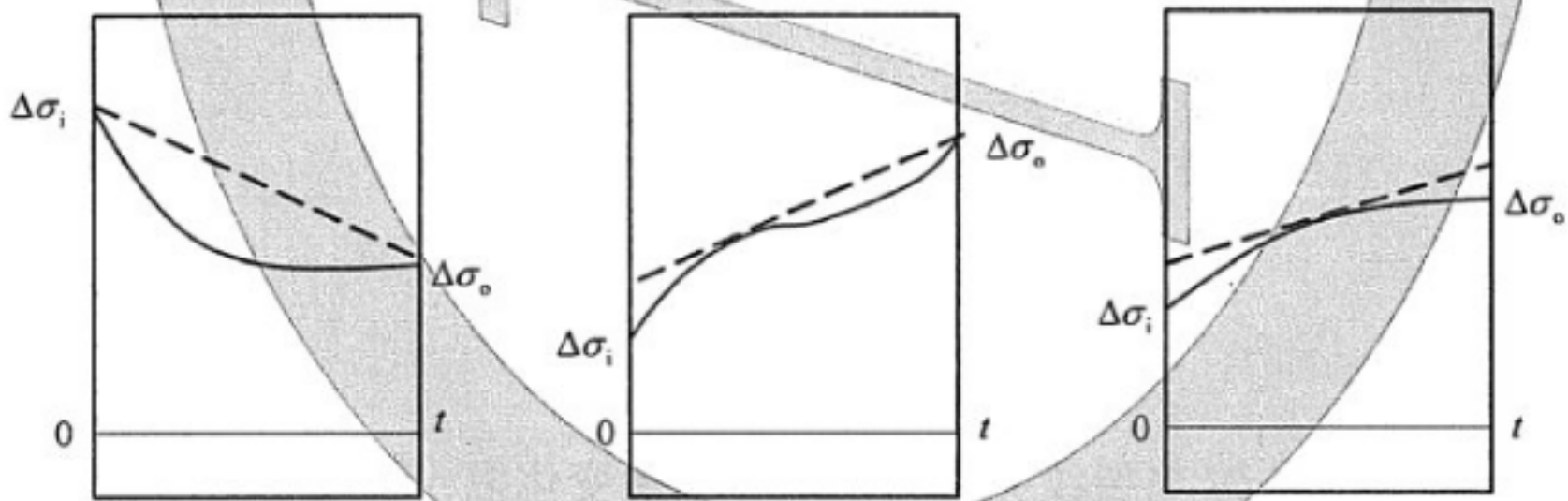


图8 用于疲劳分析的应力线性化示意图

9.5 确定材料疲劳裂纹扩展性能数据

9.5.1 确定原则

材料疲劳裂纹扩展速率式 (14) 中的 A 和 n 是由材料和环境决定的常数，原则上由试验测定。尽可能从被评定部件上取样，按 GB/T 6398 的规定进行试验，对试验数据采用最小二乘法回归得到系数 A_0 和指数 n_0 。

用式 (14) 进行疲劳分析，应取 $A = 4A_0$ ， $n = n_0$ 。

9.5.2 铁素体钢和奥氏体不锈钢疲劳裂纹扩展速率

对核容器铁素体钢和奥氏体不锈钢，若不能按9.5.1确定材料裂纹疲劳扩展速率，可参考附录C中C.3推荐的公式选取。

9.5.3 应力强度因子变化范围门槛值 ΔK_{th}

在大气和水环境中，疲劳裂纹扩展的应力强度因子变化范围门槛值 ΔK_{th} 用式(16)估算：

$$\Delta K_{th} = \begin{cases} 5.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} & \text{当 } R_g < 0 \text{ 时} \\ 5.5(1 - 0.8R_g) \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} & \text{当 } 0 \leq R_g < 1 \text{ 时} \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

当 $\Delta K < \Delta K_{th}$ 时，式(14)取 $da/dN = 0$ 。

9.6 计算应力强度因子变化幅 ΔK

根据9.3得到的表征裂纹及尺寸 a_0 、 c_0 ，相应的应力强度因子 K_I 的计算式在附录D中选取。

用9.4确定的应力变化范围 $\Delta\sigma_m$ 和 $\Delta\sigma_b$ 分别替换 K_I 计算式中的 σ_m 和 σ_b ，其 K_I 即为相应的应力强度因子变化范围 ΔK 。

对表面裂纹，用裂纹构形因子 f_m^A 和 f_b^A 计算裂纹深度方向A点的 ΔK_{aj} ；用裂纹构形因子 f_m^B 和 f_b^B 计算裂纹长度方向B点的 ΔK_{ej} 。

9.7 计算表面裂纹在评定周期末的裂纹尺寸

9.7.1 用循环载荷 F_1 计算 n_1 次循环后的裂纹尺寸 a_{n1} 、 c_{n1}

用9.3确定的初始裂纹尺寸 a_0 、 c_0 和 F_1 确定的应力变化范围 $\Delta\sigma_{m1}$ 、 $\Delta\sigma_{b1}$ ，按9.6计算第1个循环的 $(\Delta K_{a1})_0$ 和 $(\Delta K_{c1})_0$ ，用式(17)计算第1个循环后的裂纹尺寸 a_1 、 c_1 ：

$$a_1 = a_0 + A(\Delta K_{a1})_0^n \quad c_1 = c_0 + A(0.9K_{c1})_0^n \dots\dots\dots (17)$$

用 a_1 、 c_1 和 $\Delta\sigma_{m1}$ 、 $\Delta\sigma_{b1}$ 按9.6计算第2个循环的 $(\Delta K_{a1})_1$ 和 $(\Delta K_{c1})_1$ ，用式(18)计算第2个循环后的裂纹尺寸 a_2 、 c_2 ：

$$a_2 = a_1 + A(\Delta K_{a1})_1^n \quad c_2 = c_1 + A(0.9K_{c1})_1^n \dots\dots\dots (18)$$

用 a_{i-1} 、 c_{i-1} 和 $\Delta\sigma_{m1}$ 、 $\Delta\sigma_{b1}$ 按9.6计算第 i 个循环的 $(\Delta K_{a1})_{i-1}$ 、 $(\Delta K_{c1})_{i-1}$ ，用式(19)计算第 i 个循环后的裂纹尺寸 a_i 、 c_i ：

$$a_i = a_{i-1} + A(\Delta K_{a1})_{i-1}^n \quad c_i = c_{i-1} + A(0.9K_{c1})_{i-1}^n \dots\dots\dots (19)$$

式中 $i=1, 2, \dots, n_1$ 。

在式(19)中, 当 $i=n_1$ 时得到 n_1 次循环后的裂纹尺寸 a_{n1} 、 c_{n1} 。

9.7.2 用循环载荷 F_2 计算 n_2 次循环后的裂纹尺寸 a_{n2} 、 c_{n2}

对初始裂纹尺寸 $a_0 = a_{n1}$ 、 $c_0 = c_{n1}$ 和循环载荷 F_2 确定的应力变化范围 $\Delta\sigma_{m2}$ 、 $\Delta\sigma_{b2}$, 按9.6计算 $(\Delta K_{a2})_0$

和 $(\Delta K_{c2})_0$, 继续采用9.7.1的方法, 用式(20)计得第 i 次循环后的裂纹尺寸 a_i 、 c_i :

$$a_i = a_{i-1} + A(\Delta K_{a2})_{i-1}^n \quad c_i = c_{i-1} + A(0.9K_{c2})_{i-1}^n \dots\dots\dots (20)$$

式中 $i=1, 2, \dots, n_2$ 。

在式(20)中, 当 $i=n_2$ 时得到 n_2 次循环后的裂纹尺寸 a_{n2} 、 c_{n2} 。

9.7.3 用循环载荷 F_k 计算第 n_k 次循环后的裂纹尺寸 a_{nk} 、 c_{nk}

对初始裂纹尺寸 $a_0 = a_{n_{j-1}}$ 、 $c_0 = c_{n_{j-1}}$ 和循环载荷 F_j 确定的应力变化范围 $\Delta\sigma_{mj}$ 、 $\Delta\sigma_{bj}$, 按9.6计算

$(\Delta K_{aj})_0$ 和 $(\Delta K_{cj})_0$, 继续采用9.7.1的方法, 用式(21)计算第 i 次循环后的裂纹尺寸 a_i 、 c_i :

$$a_i = a_{i-1} + A(\Delta K_{aj})_{i-1}^n \quad c_i = c_{i-1} + A(0.9\Delta K_{cj})_{i-1}^n \dots\dots\dots (21)$$

式中 $i=1, 2, \dots, n_j$ 。

在式(21)中, 当 $i=n_j$ 时得到 n_j 次循环后的裂纹尺寸 a_{nj} 、 c_{nj} 。

在式(21)中, 当 $j=k$ 时得到: 在循环载荷 F_k 下经 n_k 次循环后的裂纹尺寸 a_{nk} 、 c_{nk} 。评定周期末的表面裂纹尺寸 $a_f = a_{nk}$ 、 $c_f = c_{nk}$ 。

9.8 计算埋藏裂纹疲劳扩展尺寸的简化方法

对于埋藏裂纹, 可将裂纹扩展尺寸的比 a/c 作为一常数, 只计算深度方向的尺寸 a_f 。评定周期末的埋藏缺陷尺寸为 a_f 、 $c_f = a_f c_0 / a_0$ 。

10 厚壁容器平面缺陷脆性断裂评定

10.1 概述

本章给出的评定方法以线弹性断裂力学为基础, 适用于厚度不小于100 mm且规定的最小屈服强度不超过350 MPa的铁素体钢制成的、几何形状和应力分布简单的部件。该方法的基本概念可推广到其他铁素体材料(包括堆焊的铁素体材料)和更为复杂的几何形状的部件, 但不适用于奥氏体钢和高镍合金钢。

10.2 评定流程

平面缺陷脆性断裂评定流程如图9，主要包括如下步骤：

- 根据无损检测确定缺陷形状；
- 按第6章的规定对缺陷进行表征；
- 确定缺陷部位在正常（包括异常）、紧急和事故工况下的应力；
- 计算每种工况下的应力强度因子；
- 确定所需要的材料性能，需要时包括辐照效应；
- 根据10.4的方法，确定缺陷参数： a_f 、 a_c 、 a_i ；
- 根据临界缺陷参数 a_f 、 a_c 和 a_i ，按照10.5规定的缺陷评定准则确定缺陷是否可接受。



图9 平面缺陷脆性断裂评定流程

10.3 平面缺陷评定所需基本数据的确定

10.3.1 缺陷的表征

根据缺陷形状、相邻最小距离和取向，按照第6章的缺陷表征方法确定评定用的缺陷尺寸。

10.3.2 评定应力的确定

应力计算应考虑残余应力和各种形式载荷的施加应力，包括压力产生的应力和堆焊层引起的应力。在评定中所取用的应力是缺陷部位的主应力，应力计算时假定结构不存在缺陷。

10.3.3 应力强度因子的确定

对于表面缺陷和埋藏缺陷，按第7.4.2规定的应力线性化方法将作用于缺陷位置的应力分解为薄膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_b ，然后根据附录D确定适用的应力强度因子 K_I 的求解方法计算 K_I 值。

10.3.4 材料性能

材料力学性能数据，包括辐照后的材料性能数据按第8章的规定进行确定。

10.4 a_f 、 c_f 、 a_i 和 a_c 的确定

10.4.1 a_f 和 c_f 的确定

按第9章规定的疲劳裂纹计算方法,按照瞬态发生近似的时间顺序依次分析各瞬态下的缺陷疲劳扩展,得到评定周期末的缺陷尺寸 a_f 和 c_f 。

应包括技术规格书中规定的部件在评定周期内或至寿期末的全部设计瞬态。

10.4.2 正常工况 a_c 的确定

正常工况(包括系统试验和运行期间预期会发生的所有瞬态工况和异常工况)下的最小临界缺陷尺寸 a_c 的确定按如下步骤:

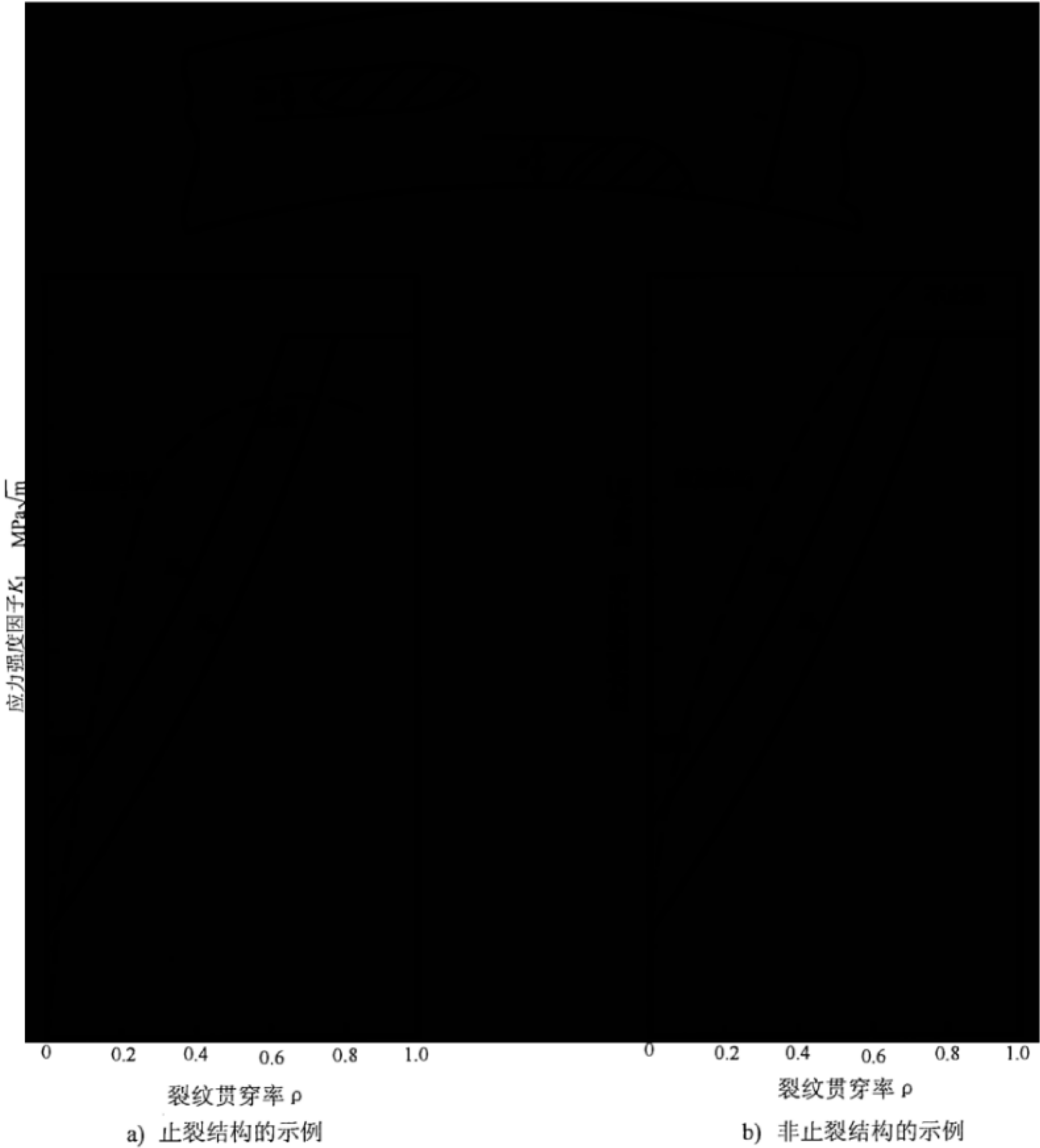
- 确定缺陷部位在评定周期末最大的辐照水平;
 - 根据辐照材料性能数据,确定断裂韧性 K_{Ic} 与温度的函数关系;
 - 对于不同的假定缺陷,采用附录D(或其他已有文件证明适用的方法)计算其应力强度因子,且该(椭圆或半椭圆)缺陷的 a/c 等于 a_f/c_f ;
 - 比较计算得到的应力强度因子 K_I 与材料断裂韧性 K_{Ic} ,确定适当温度下对应于 $K_I = K_{Ic}$ 时的临界缺陷尺寸 a_c ;
 - 对下一个瞬态,重复步骤a)~d)分析临界缺陷尺寸 a_c 。
- 在考虑所有瞬态工况后,得到的 a_c 的最小值,即为正常工况下该缺陷的最小临界缺陷尺寸 a_c 。

10.4.3 紧急和事故工况 a_i 的确定

确定紧急和事故工况下的最小临界缺陷尺寸 a_i 时,应根据断裂韧性 K_{Ic} 和 K_{Ia} 数据以及每一种假想事故,分析确定临界缺陷尺寸 a_i 。其计算程序如下:

- 确定缺陷部位在评定周期末时沿部件壁厚的最大辐照变化曲线;
- 确定沿部件壁厚温度和应力随时间变化的曲线;
- 根据辐照断裂韧性,确定在假想事故下沿部件壁厚、与时间相关的 K_{Ic} 和 K_{Ia} 曲线;
- 对于不同的假定缺陷,采用附录D(或其他已有文件证明适用的方法)计算其应力强度因子,计算时假定该椭圆或半椭圆缺陷 a_f/c_f 保持不变;
- 当计算应力强度因子 K_I 超过 K_{Ic} 分布曲线时,所对应的缺陷尺寸即为临界起裂尺寸 a_i ;当计算应力强度因子 K_I 降至 K_{Ia} 分布曲线时,所对应的缺陷尺寸即为临界止裂尺寸 a_s ;图10给出了止裂和不止裂两种情况的比较;
- 对于各假定工况下的不同时刻,应制定一系列如图10所示的曲线,以确定临界时间;
- 对那些 K_I 随时间单调下降的瞬态(例如:系统再加压受到限制),温态预应力是瞬态期间避免在发生峰值应力强度因子后不时地起裂或再起裂的主要因素。

按10.4.3确定的最小 a_i (其止裂的缺陷穿透率 ρ 大于0.75),即是紧急和事故工况下缺陷部位的最小临界起裂尺寸。



说明：t——壁厚
对埋藏缺陷： $\rho=2alt$ ；对表面缺陷： $\rho=alt$ 。

图10 假想事故工况下临界缺陷尺寸的确定

10.5 缺陷的验收准则

10.5.1 验收条件

通过对缺陷的分析评定后，如果满足下列条件，则该含缺陷的设备在评定周期内允许继续使用：

- a) 10.5.2 准则或 10.5.3 准则；
- b) 一次应力满足设计规定的限值（计算中，假定含缺陷部件承压壁厚局部减小面积等于规则化后的缺陷面积）。

10.5.2 基于缺陷尺寸的验收准则

超过在役检查标准规定限值的缺陷，若其临界尺寸满足式(22)准则，则缺陷可接收：

$$\begin{aligned} a_f &< 0.1a_c \\ a_f &< 0.5a_i \end{aligned}$$

..... (22)

式中 a_f 是在规定时间（可能是该设备的下一个计划检查时期，或直到容器设计寿期的期末）内缺陷扩展的最大尺寸。

10.5.3 基于应力强度因子的验收准则

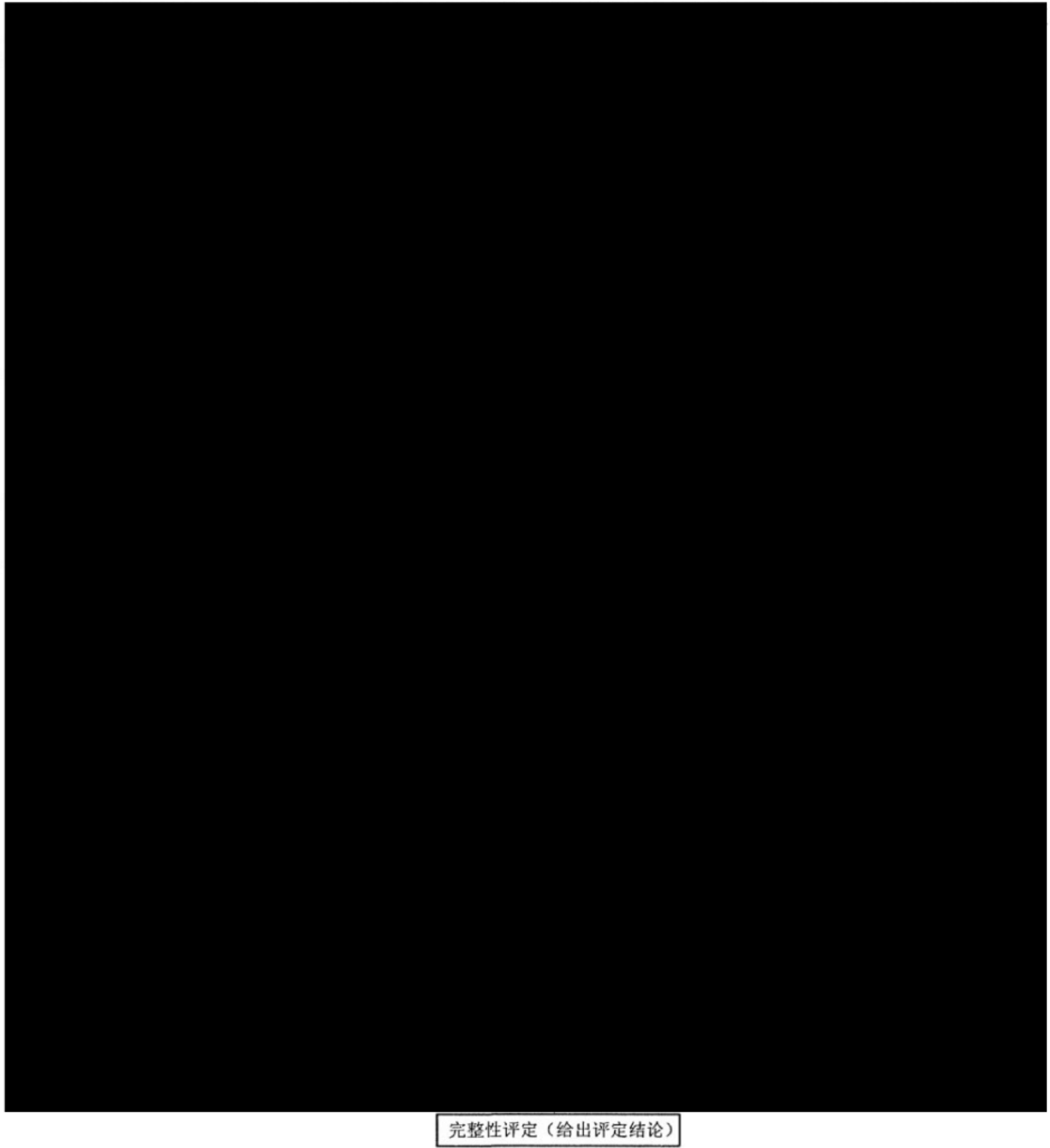


图11 平面缺陷断裂评定流程

11.2 失效评定图

11.2.1 概述

失效评定图(图12)由横坐标 L_r ，纵坐标 K_r ，失效评定曲线 $f(L_r)$ 和垂直截止线 $L_r = L_r^{\max}$ 组成。 L_r^{\max} 宜取值如下：

- 对铁素体钢和低合金钢， $L_r^{\max} = 1.25$ ；
- 对奥氏体不锈钢， $L_r^{\max} = 1.8$ ；
- 对奥氏体钢焊缝， $L_r^{\max} = 1.25$ ；
- 核承压容器用钢 SA-508， $L_r^{\max} = 1.15$ 。

在图12中，由横坐标 L_r ，纵坐标 K_r ，失效评定曲线 $f(L_r)$ 和垂直截止线 $L_r = L_r^{\max}$ 所围成的区域称为安全区。

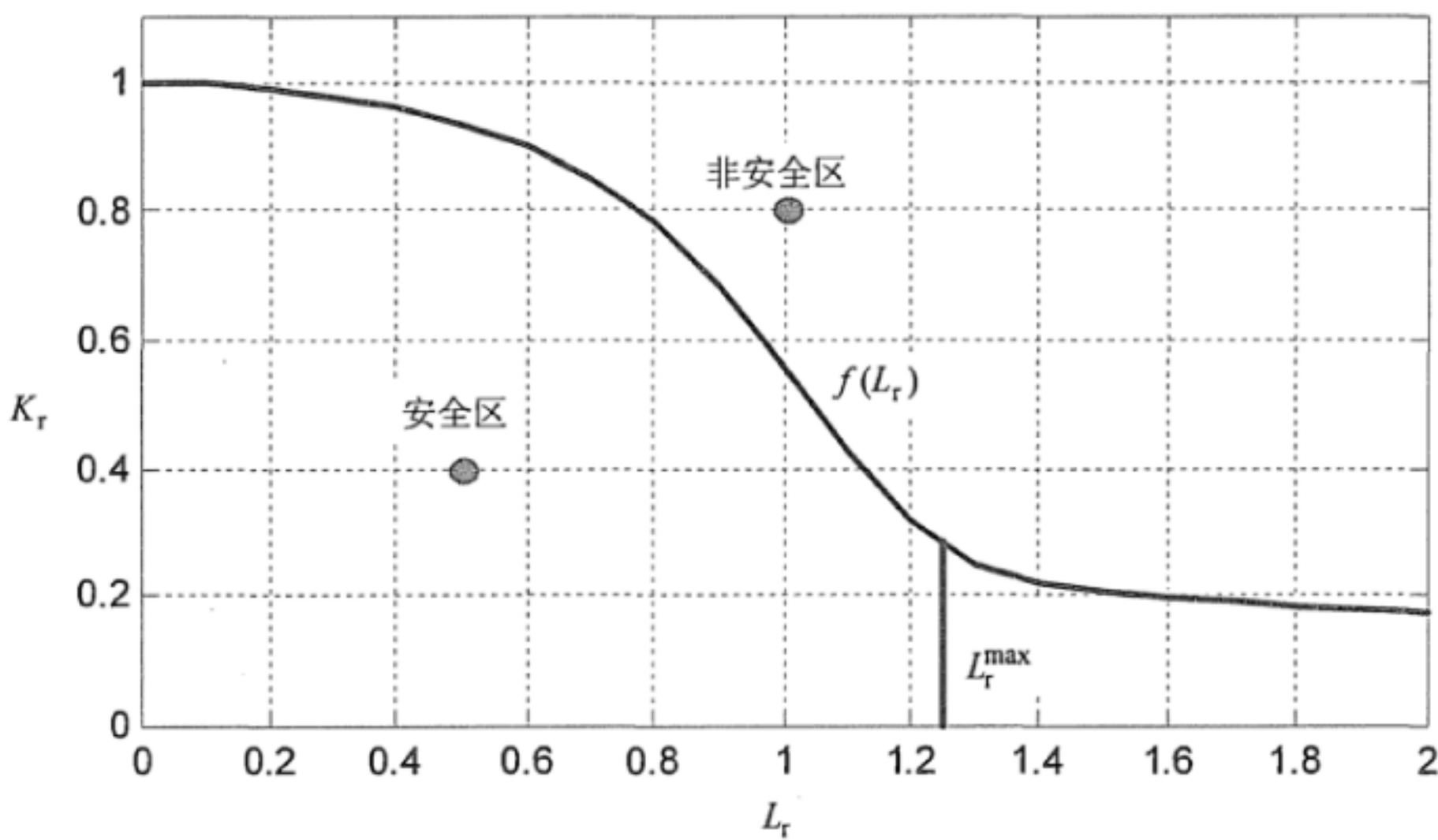


图12 失效评定图图例

11.2.2 通用失效评定曲线

$$f_0(L_r) = \begin{cases} (1 + 0.5L_r^2)^{-\frac{1}{2}} [0.3 + 0.7 \exp(-0.6L_r^6)] & L_r < 1 \\ (\lambda + \frac{1}{2\lambda})^{\frac{1}{2}} L_r^{\zeta} & L_r \geq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (25)$$

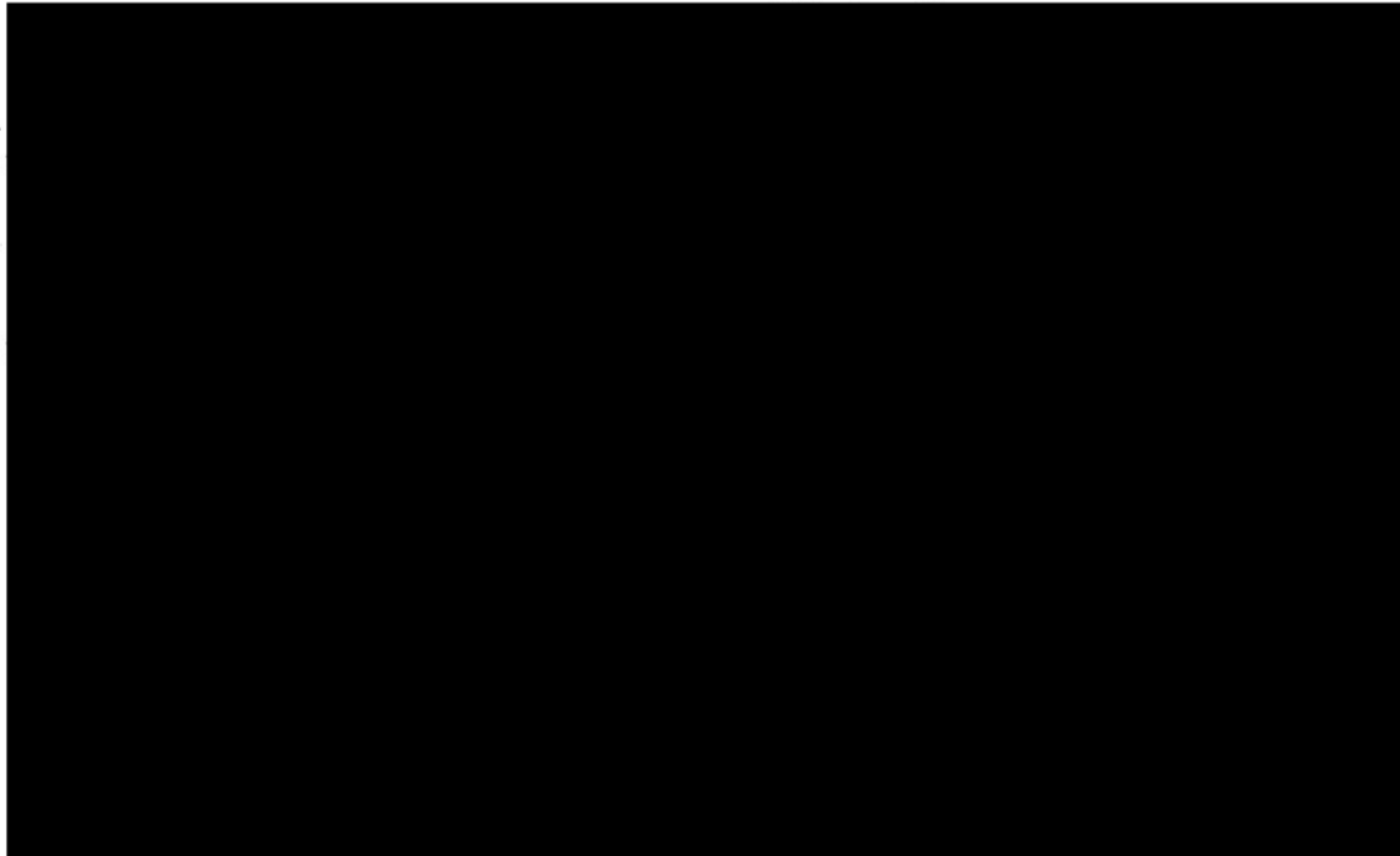
式中：

$$\lambda = 1 + E\Delta\varepsilon/R_{p0.2}, \quad \Delta\varepsilon = 0.0375(1 - R_{p0.2}/1000), \quad \zeta = \frac{7/3 + R_{p0.2}/R_m}{2(1 - R_{p0.2}/R_m)} \text{。}$$

11.2.3 有屈服平台材料的失效评定曲线

$$f_1(L_r)=\begin{cases} (1+0.5L_r^2)^{-\frac{1}{2}} & L_r<1 \\ (\lambda+\frac{1}{2\lambda})^{\frac{1}{2}}L_r^\zeta & L_r\geq 1 \end{cases} \cdots \cdots \cdots (26)$$

式中：



屈服应力 MPa	元素成分组成	加工工艺	热处理工艺
$R_{p0.2} \leq 350$	无微合金添加的普通结构钢	轧后态	——
	普通结构钢	正火	常规正火
	细晶粒结构钢	控轧	——
$R_{p0.2} \leq 400$	细晶粒结构钢	控轧	轻 TMCR ^a
$350 < R_{p0.2} \leq 500$	有 Mo 或 B 及添加微合金 Cr、V、Nb 或 Ti	淬火回火（调质）	高温回火
$500 < R_{p0.2} \leq 690$	无 Mo 或 B，但添加微合金 Cr、V、Nb 或 Ti	淬火回火（调质）	回火到 $R_{p0.2} \leq 690$ MPa
^a TMCR 为 Thermo-mechanically controlled rolled 控温控轧的钢板，焊前不需要预热，焊后不需要热处理。			

表3 材料拉伸曲线无屈服平台的条件

屈服应力 MPa	元素成分组成	加工工艺	热处理工艺
$R_{p0.2} \leq 350$	有 Mo、Cr、V、Nb、Al 或 Ti	轧后态	——
$690 < R_{p0.2} \leq 1050$	有 Mo 或 B 及添加微合金 Cr、V、Nb 或 Ti	淬火回火（调质）	回火到 $R_{p0.2} \geq 690$ MPa
$500 < R_{p0.2} \leq 1050$	所有组成	淬火后态	——

11.3 分安全系数

在评定中，断裂韧度的分安全系数 γ_K 和载荷比的分安全系数 γ_L 按表4选取。

表4 评定中所用的分安全系数

使用限制(service level)	γ_K	γ_L
正常工况（包括异常和试验工况）	3	1.5
紧急和事故工况	1.4	1.2

11.4 评定细则

11.4.1 确定评定裂纹尺寸

对检测出的缺陷显示，取缺陷显示面积的上限值。根据缺陷的位置和面积的上限值，按第6章的规定对缺陷规则化，得到评定裂纹尺寸 a 和 c 。

11.4.2 确定评定工况

对含裂纹构件分别在正常（包括异常和试验）工况和紧急及事故工况进行评定。

11.4.3 应力确定

按第7章的规定，分别计算评定工况下的 u 种载荷 $F_j(j=1,2,\cdots,u)$ 的一次应力和二次应力分布，并确定相应的线性化应力 P_{mj} 、 P_{bj} 、 Q_{mj} 、 Q_{bj} 。

评定使用的应力分量 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b 按式（28）和式（29）确定：

$$P_m = \sum_{j=1}^u P_{mj} \quad P_b = \sum_{j=1}^u P_{bj} \quad \cdots \cdots \cdots (28)$$

$$Q_m = \sum_{j=1}^u Q_{mj} \quad Q_b = \sum_{j=1}^u Q_{bj} \quad \cdots \cdots \cdots (29)$$

11.4.4 确定材料性能数据

按第8章的规定，确定评定工况下材料的屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、弹性模量 E 和 J 积分断裂韧度 J_{Ic} 。

材料断裂韧度 K_{Ic} 由 J_{Ic} 按式（30）计算：

$$K_{Ic} = \sqrt{EJ_{Ic}/(1-\nu^2)} \quad \cdots \cdots \cdots (30)$$

如果不能得到 J_{Ic} 值时，可采用平面应变断裂韧度 K_{Ic} ，并取 $K_c = K_{Ic}$ ；也可利用CTOD断裂韧度 δ_c 值，并按式（31）估算 K_c 的下限值：

$$K_c = \sqrt{1.5R_{p0.2}\delta_c E/[1000(1-\nu^2)]} \quad \cdots \cdots \cdots (31)$$

确定材料断裂韧度的下限值 K_{Ic} 。根据评定工况从表4中选取分安全系数 γ_K ，评定使用的材料断裂韧度 K_p 按式(32)计算：

$$K_p = K_{Ic} / \gamma_K \dots\dots\dots (32)$$

11.4.5 确定失效评定曲线

根据材料性能特征或参考表2和表3确定材料有无屈服平台，并按11.2确定失效评定曲线 $f_i(L_r)(i \in \{0,1,2\})$ 和 L_r^{\max} 。

11.4.6 应力强度因子 K_I^P 和 K_I^S 的计算

被评定的裂纹在评定工况下，由一次应力 P_m 、 P_b 和二次应力 Q_m 、 Q_b 产生的应力强度因子 K_I^P 、 K_I^S 按附录D的规定计算。

11.4.7 断裂比 K_r 的计算

对按11.4.4和11.4.6计得的 K_p 和 K_I^P 、 K_I^S ， K_r 按式(33)计算：

$$K_r = (K_I^P + K_I^S) / K_p + \rho \dots\dots\dots (33)$$

式中 ρ 的计算方法见附录F。

11.4.8 载荷比 L_r 的计算

裂纹在一次应力 P_m 、 P_b 下，按附录G的规定计算载荷比 L_r 。

11.4.9 完整性评定

当评定参量 L_r 、 K_r 分别满足不等式(34)和(35)时，则被检出缺陷的设备是可以接受的。

在正常工况下，按11.4.5确定的评定曲线 $f_i(L_r)$ 和11.4.7、11.4.8计算的 L_r 、 K_r 同时满足不等式(34)：

$$L_r < L_r^{\max} / 1.5 \quad K_r < f_i(1.5L_r) \dots\dots\dots (34)$$

在紧急及事故工况下，按11.4.5确定的评定曲线 $f_i(L_r)$ 和11.4.7、11.4.8计算的 L_r 、 K_r 同时满足不等式(35)：

$$L_r < L_r^{\max} / 1.2 \quad K_r < f_i(1.2L_r) \dots\dots\dots (35)$$

11.5 核压力管道评定算例

采用失效评定图（FAD），评定核压力管道的算例参见附录E。

12 核压力管道平面缺陷评定

12.1 范围

本章给出的评定方法适用于核设备的奥氏体管道、铁素体管道及奥氏体-铁素体异种钢焊接接头的完整性评定。当管道检出的缺陷显示超过表5或表6的规定时，可采用本章的方法进行评定。

表5和表6分别列出了铁素体钢管和奥氏体钢管在役检验允许的平面缺陷显示(a_{aw}/t)%值。

表5 铁素体钢管在役检验允许的平面缺陷显示(a_{aw}/t)%值

深长比 ^a	名义壁厚 ^b t /mm									
	$t = 8\text{mm}$		$t = 25\text{mm}$		$t = 50\text{mm}$		$t = 75\text{mm}$		$t \geq 100\text{mm}$	
	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}
0.00	11.1	13.8Y	10.0	12.6Y	8.5	10.8Y	7.0	8.7Y	5.5	8.9Y
0.05	11.8	14.4Y	10.8	13.0Y	9.3	11.2Y	7.5	9.1Y	6.0	7.2Y
0.10	13.0	15.6Y	11.8	14.2Y	10.2	12.1Y	8.2	9.9Y	6.4	7.8Y
0.15	14.4	17.2Y	13.2	15.7Y	11.2	13.5Y	9.1	10.9Y	7.2	8.7Y
0.20	14.4	17.2Y	14.8	17.7Y	12.6	15.1Y	10.3	12.3Y	8.1	9.7Y
0.25	14.4	17.2Y	14.8	17.7Y	14.2	17.1Y	11.7	13.9Y	9.1	10.9Y
0.30	14.4	17.2Y	14.8	17.7Y	14.2	17.1Y	13.2	15.7Y	10.3	12.3Y
0.35	14.4	17.2Y	14.8	17.7Y	14.2	17.1Y	13.2	17.7Y	10.3	15.6Y
0.40	14.4	17.2Y	14.8	17.7Y	14.2	17.1Y	13.2	17.7Y	10.3	17.4Y
0.45	14.4	17.2Y	14.8	17.7Y	14.2	17.1Y	13.2	17.7Y	10.3	17.4Y
0.50	14.4	17.2Y	14.8	17.7Y	14.2	17.1Y	13.2	17.7Y	10.3	17.4Y
铁素体钢应满足 40℃ 规定的最小屈服强度≤350MPa。										
^a 对居于两值之间的缺陷，其深长比 a/l 和厚度 t 允许用线性内插法求取。										
^b t 为名义壁厚或由超声检验测定的实际壁厚。										
^c 埋藏缺陷显示的总高度为 $2a$ 。										
^d $Y = (p_1/t)/(a/t) = p_1/a$ ，如果 $Y < 0.4$ ，则缺陷显示按表面缺陷来分类，如果 $Y > 1.0$ ，则取 $Y = 1.0$ 。										

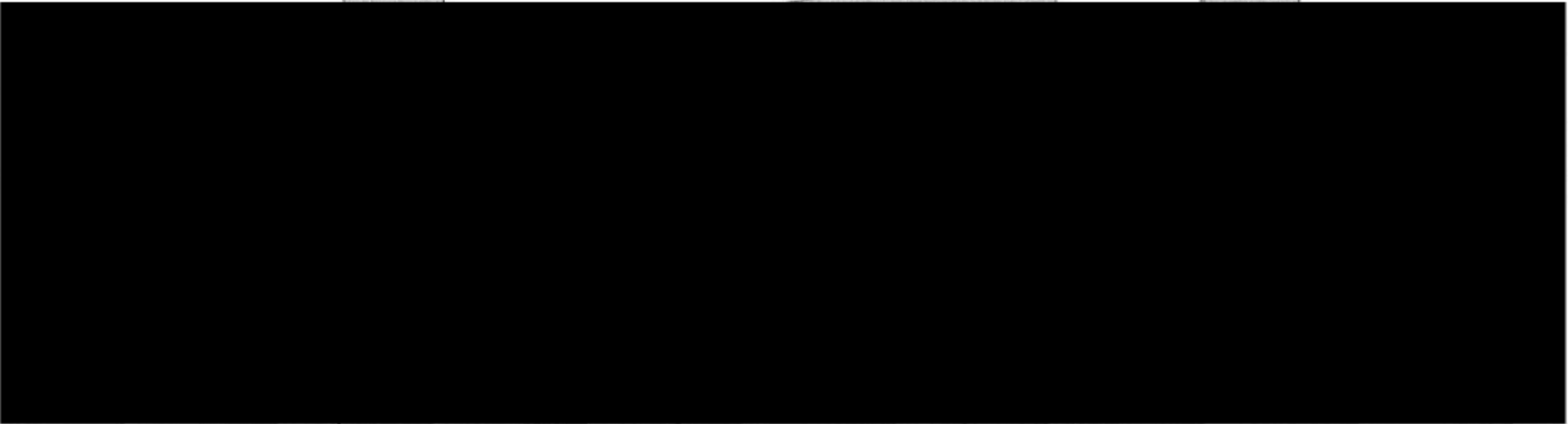
表6 奥氏体钢管在役检验允许的平面缺陷显示(a_{aw}/t)%值

深长比 ^a a/l	名义壁厚 ^b t /mm									
	$t = 8\text{mm}$		$t = 25\text{mm}$		$t = 50\text{mm}$		$t = 75\text{mm}$		表面检验方法	
	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	名义壁厚 $t^{a,b}$ /mm	显示长度 l /mm
0.00	11.7	11.7Y	10.6	10.6Y	10.1	10.1Y	9.5	9.5Y	8	5
0.05	12.0	12.0Y	10.7	10.7Y	10.2	10.2Y	9.6	9.6Y		
0.10	12.2	12.2Y	11.0	11.0Y	10.4	10.4Y	9.7	9.7Y	25	6

表6（续）

名义壁厚 ^b <i>t</i> /mm										
深长比 ^a <i>a</i> / <i>l</i>	<i>t</i> = 8mm		<i>t</i> = 25mm		<i>t</i> = 50mm		<i>t</i> = 75mm		表面检验方法	
	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	表面缺陷	埋藏缺陷 ^{c,d}	名义壁厚 <i>t</i> ^{a,b} /mm	显示长度 <i>l</i> /mm
0.15	12.4	12.4 Y	11.1	11.1 Y	10.5	10.5 Y	9.9	9.9 Y		
0.20	12.5	12.5 Y	11.4	11.4 Y	10.7	10.7 Y	10.1	10.1 Y	51	11
0.25	12.5	12.5 Y	11.5	11.5 Y	10.9	10.9 Y	10.2	10.2 Y		
0.30	12.5	12.5 Y	11.7	11.7 Y	11.1	11.1 Y	10.4	10.4 Y	76	16
0.35	12.5	12.5 Y	11.9	11.9 Y	11.2	11.2 Y	10.6	10.6 Y		
0.40	12.5	12.5 Y	12.1	12.1 Y	11.4	11.4 Y	10.7	10.7 Y		
0.45	12.5	12.5 Y	12.2	12.2 Y	11.6	11.6 Y	10.9	10.9 Y		
0.50	12.5	12.5 Y	12.5	12.5 Y	11.7	11.7 Y	11.1	11.1 Y		
奥氏体钢应满足 40°C 规定的最小屈服强度 ≤240MPa。										
^a 对居于两值之间的缺陷，其深宽长比 <i>a</i> / <i>l</i> 和厚度 <i>t</i> 允许用线性内插法求取。										
^b <i>t</i> 为名义壁厚或由超声检验测定的实际壁厚。										
^c 埋藏缺陷显示的总高度为 2 <i>a</i> 。										
^d $Y = (p_1/t)/(a/t) = p_1/a$ ，如果 $Y < 0.4$ ，则缺陷显示按表面缺陷来分类，如果 $Y > 1.0$ ，则取 $Y = 1.0$ 。										

12.2 评定的基本方法



使用限制	周向缺陷		轴向缺陷
	薄膜应力 <i>SF_m</i>	弯曲应力 <i>SF_b</i>	薄膜应力 <i>SF_m</i>
A	2.7	2.3	2.7
B	2.4	2.0	2.4
C	1.8	1.6	1.8
D	1.3	1.4	1.3

12.3 管道的评定方法

12.3.1 管道失效模式

管道失效模式分三类：

- 塑性失效；
- 弹塑性断裂失效；
- 脆性断裂失效。

12.3.2 奥氏体钢管道的失效模式及评定方法

锻造管道，铁素体含量小于20%的铸造不锈钢管道、无填充金属焊缝、焊缝金属的失效属于塑性失效，采用极限载荷评定。

锻造管道的有填充金属焊缝采用弹塑性断裂准则评定。

12.3.3 铁素体钢管的失效模式及评定方法

12.3.3.1 筛选准则

判定失效模式的参量SC按式（36）计算：

$$SC = K_r / S_r, \quad K_r = K_1 / \sqrt{EJ_{lc} / (1 - \nu^2)} \dots\dots\dots (36)$$

式中S_r是作用应力与极限载荷下应力之比。

12.3.3.2 分析评定方法

分析评定方法如下：

- 当 SC < 0.2 时为塑性失效，采用极限载荷评定；
- 当 0.2 ≤ SC < 1.8 时为弹塑性断裂失效，采用弹塑性断裂准则评定；
- 当 SC ≥ 1.8 时为脆性断裂失效，采用线弹性断裂准则评定。

12.3.4 S_r和K_r的计算

12.3.4.1 周向缺陷 SC 的计算

12.3.4.1.1 S_r的计算式

对周向缺陷（图13所示）按式（37）计算：

$$S_r = \begin{cases} \sigma_m / \sigma'_m & \text{当} (\sigma_b + \sigma_e) < \sigma_m \text{时} \\ (\sigma_b + \sigma_e) / \sigma'_b & \text{当} (\sigma_b + \sigma_e) \geq \sigma_m \text{时} \end{cases} \dots\dots\dots (37)$$

式中：

$$\sigma_m = p D / 4t ;$$

$$\sigma_b = D M_b / 2I ;$$

$$\sigma_e = D M_e / 2I 。$$

对任何规定的薄膜应力σ_m，在极限载荷下，薄膜应力σ_m'和弯曲应力σ_b'分别用式（38）、（39）、（40）计算：

$$\sigma'_m = R_{p0.2} \left(1 - \frac{a}{t} \frac{\theta}{\pi} - \frac{2\varphi}{\pi} \right) \dots\dots\dots (38)$$

式中 $\varphi = \arcsin(0.5 \frac{a}{t} \sin \theta)$ 。

当 $\beta = \frac{\pi}{2} (1 - \frac{a}{t} \frac{\theta}{\pi} - \frac{\sigma_m}{\sigma_f})$ ，且 $\theta + \beta \leq \pi$ 时：

$$\sigma'_b = \frac{2R_{p0.2}}{\pi} (2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta) \dots\dots\dots (39)$$

当 $\beta = \pi (1 - \frac{a}{t} \frac{\theta}{\pi} - \frac{\sigma_m}{\sigma_f}) / (2 - \frac{a}{t})$ ，且 $\theta + \beta > \pi$ 时：

$$\sigma'_b = \frac{2R_{p0.2}}{\pi} (2 - \frac{a}{t}) \sin \beta \dots\dots\dots (40)$$

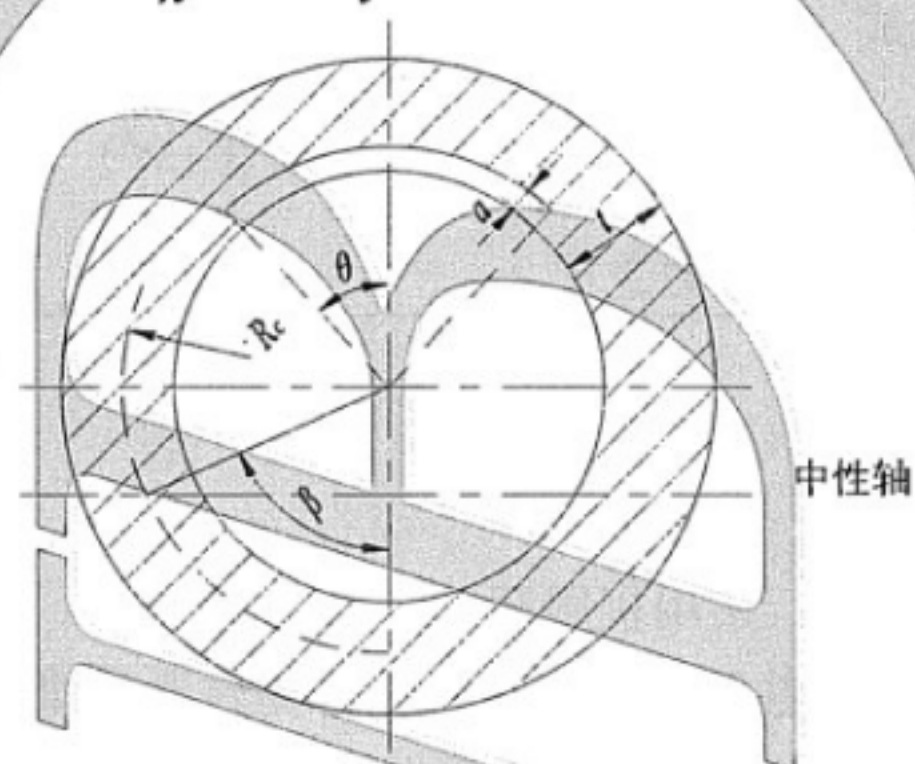


图13 周向缺陷几何尺寸

12.3.4.1.2 K_I 的计算

周向缺陷的应力强度因子 K_I 规定为式 (41)：

$$K_I = K_{lm} + K_{lb} = \sqrt{\pi a / 1000} [f_m P / 2 + f_b (M_b + M_e) / R_c] / (\pi R_c t) \dots\dots\dots (41)$$

式中：

$$x = a / t ;$$

$$f_m = 1.1 + x [0.1524 + 16.772 (x\theta / \pi)^{0.855} - 14.944 x\theta / \pi] ;$$

$$f_b = 1.1 + x [-0.09967 + 5.0057 (x\theta / \pi)^{0.565} - 2.833 x\theta / \pi] .$$

f_m 和 f_b 的有效范围为：

$$l/a \geq 2; \quad 0.08 \leq x \leq 0.8; \quad 0.05 \leq \theta / \pi \leq 1.0;$$

当 $\theta / \pi > 0.5$ 时，在 f_m 和 f_b 中取 $\theta / \pi = 0.5$ 。

12.3.4.2 轴向缺陷 SC 的计算

对轴向缺陷（图14所示）按式 (42) 计算：

$$S = \sqrt[4]{1000QEJ_{lc}}$$

(42)

式中：

$Q=1+4.593(a/l)^{1.65}$ ；

$\alpha=l/t$ ；

$f=1.12+0.053\alpha+0.0055\alpha^2+(1+0.02\alpha+0.0191\alpha^2)\times(20-R_c/t)^2/1400$ ；

σ_1 为极限载荷下的周向应力，由式（43）计算：

$$\sigma_1=R_{p0.2}(1-x)/(1-x/M_2),\quad M_2=\sqrt{1+0.4025l^2/(R_c t)}$$

(43)

式中： $x=a/t$ 。



图14 轴向缺陷几何尺寸

12.4 管道极限载荷评定

12.4.1 一般原则

对完全塑性失效的管道，用极限载荷准则进行评定得到允许的缺陷高度。

12.4.2 周向缺陷的允许缺陷高度

12.4.2.1 对 A、B（包括试验工况）、C、D 级使用限制，在组合（薄膜+弯曲）应力下，周向缺陷在给定的缺陷长度下，其允许缺陷高度 h_{aw}/t 分别由表 8、9、10 和 11 查出。表中的应力比 SR 按式（44）计算：

$$SR=(\sigma_m+\sigma_b)/\sigma_f$$

(44)

12.4.2.2 对 A、B（包括试验工况）、C、D 级使用限制，在薄膜应力 σ_m 下，应用表 7 中的安全系数，周向缺陷在给定的缺陷长度 l_f 下，其允许缺陷高度 h_{aw}/t 分别由表 12 查出。表中的应力比 SR 按式（45）计算：

$$SR=(SF_m)\sigma_m/\sigma_f$$

(45)

12.4.2.3 从表 8 至表 12 查得相应工况的允许缺陷高度以后，取其中最小的高度作为周向缺陷的允许缺陷高度。

表8 周向缺陷评定周期末的允许缺陷高度 (h_{aw}/t) 值—A 级使用限制

SR^b	$(h_{aw}/t)^a$ 值 ^a							
	$(l_r/\pi D)^c$							
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	≥ 0.75
≥ 0.60	0.75	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
0.55	0.75	0.44	0.23	0.16	0.13	0.12	0.11	0.11
0.50	0.75	0.75	0.44	0.31	0.25	0.23	0.21	0.21
0.45	0.75	0.75	0.65	0.46	0.37	0.33	0.31	0.30
0.40	0.75	0.75	0.75	0.59	0.48	0.42	0.39	0.38
0.35	0.75	0.75	0.75	0.73	0.58	0.51	0.47	0.46
0.30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.69	0.60	0.55	0.52
0.25	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.68	0.63	0.59
0.20	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.70	0.65
0.15	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74
≤ 0.10	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
(1) 应根据相应的工况确定适用的验收标准。								
^a $h_{aw} = a_{aw}$ (对表面缺陷); $h_{aw} = 2a_{aw}$ (对埋藏缺陷)。 t ——管壁厚; 允许线性插值。 ^b $SR = (\sigma_m + \sigma_b)/\sigma_f$ (对极限载荷评定); $SR = Z[\sigma_m + \sigma_b + \sigma_c/SF_b]/\sigma_f$ (对弹塑性断裂评定); 对 $\sigma_m \leq 0.2\sigma_f$ 表列值有效, 否则用分析解方法; Z 由12.6.1得到的 Z 因子载荷系数。 ^c 依据管道外径得到的周长。								

表9 周向缺陷评定周期末的允许缺陷高度 (h_{aw}/t) 值—B 级使用限制

SR^b	$(h_{aw}/t)^a$ 值 ^a							
	$(l_r/\pi D)^c$							
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	≥ 0.75
≥ 0.70	0.75	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
0.65	0.75	0.30	0.15	0.11	(1)	(1)	(1)	(1)
0.60	0.75	0.66	0.34	0.24	0.20	0.18	0.17	0.17
0.55	0.75	0.75	0.53	0.37	0.30	0.27	0.25	0.25
0.50	0.75	0.75	0.70	0.49	0.40	0.35	0.33	0.32
0.45	0.75	0.75	0.75	0.61	0.49	0.43	0.40	0.39
0.40	0.75	0.75	0.75	0.73	0.59	0.51	0.48	0.46
0.35	0.75	0.75	0.75	0.75	0.67	0.59	0.54	0.52
0.30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.66	0.61	0.57
0.25	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.73	0.67	0.63
0.20	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.68
≤ 0.15	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
(1) 应根据相应的工况确定适用的验收标准。								
^a $h_{aw} = a_{aw}$ (对表面缺陷); $h_{aw} = 2a_{aw}$ (对埋藏缺陷)。 t ——管壁厚;								

表9（续）

允许线性插值。								
^b $SR = (\sigma_m + \sigma_b) / \sigma_f$ （对极限载荷评定）； $SR = Z[\sigma_m + \sigma_b + \sigma_e / SF_b] / \sigma_f$ （对弹塑性断裂评定）； 对 $\sigma_m \leq 0.2\sigma_f$ 表列值有效，否则用分析解方法； Z 由 12.6.1 得到的 Z 因子载荷系数。								
^c 依据管道外径得到的周长。								

表10 周向缺陷评定周期末的允许缺陷高度（ h_{aw}/t ）值——C 级使用限制

SR ^b	(h_{aw}/t) 值 ^a							
	$(l_f/\pi D)$ ^c							
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	≥ 0.75
≥ 0.90	0.75	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
0.80	0.75	0.41	0.21	0.15	0.12	0.11	0.10	0.10
0.70	0.75	0.75	0.48	0.34	0.27	0.24	0.22	0.22
0.60	0.75	0.75	0.74	0.52	0.42	0.36	0.34	0.32
0.50	0.75	0.75	0.75	0.69	0.55	0.48	0.44	0.42
0.40	0.75	0.75	0.75	0.75	0.69	0.60	0.55	0.51
0.30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.70	0.64	0.59
0.20	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.73
≤ 0.10	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
(1) 应根据相应的工况确定适用的验收标准。								
^a $h_{aw} = a_{aw}$ （对表面缺陷）； $h_{aw} = 2a_{aw}$ （对埋藏缺陷）。 t ——管壁厚； 允许线性插值。								
^b $SR = (\sigma_m + \sigma_b) / \sigma_f$ （对极限载荷评定）； $SR = Z[\sigma_m + \sigma_b + \sigma_e / SF_b] / \sigma_f$ （对弹塑性断裂评定） 对 $\sigma_m \leq 0.3\sigma_f$ 表列值有效，否则用分析解方法； Z 由 12.6.1 得到的 Z 因子载荷系数。								
^c 依据管道外径得到的周长。								

表11 周向缺陷评定周期末的允许缺陷高度（ h_{aw}/t ）值——D 级使用限制

SR ^b	(h_{aw}/t) 值 ^a							
	$(l_f/\pi D)$ ^c							
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	≥ 0.75
≥ 1.10	0.75	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
1.00	0.75	0.19	0.10	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
0.90	0.75	0.62	0.32	0.22	0.18	0.16	0.15	0.14
0.80	0.75	0.75	0.54	0.38	0.30	0.26	0.24	0.23
0.70	0.75	0.75	0.75	0.52	0.42	0.36	0.33	0.31
0.60	0.75	0.75	0.75	0.66	0.53	0.46	0.42	0.39
0.50	0.75	0.75	0.75	0.75	0.64	0.55	0.50	0.46
0.40	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.64	0.59	0.54
0.30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.71	0.65

表11 (续)

SR ^b	(h _{aw} /t) 值 ^a									
	(l _f /πD) ^c									
0.90	0.75	0.50	0.26	0.18	0.14	0.12	0.11	0.10		
	0.75	0.75	0.52	0.36	0.28	0.24	0.22	0.20		
	0.75	0.75	0.75	0.54	0.43	0.37	0.33	0.30		
	0.75	0.75	0.75	0.71	0.57	0.49	0.44	0.40		
	0.75	0.75	0.75	0.75	0.71	0.61	0.55	0.50		

12.4.3 轴向缺陷的允许缺陷高度

对每种使用限制所给定的缺陷长度 l_f ，轴向缺陷的允许高度 h_{aw}/t 由表13查出。表中的应力比 SR 按式(46)计算：

$SR = SF_m \sigma_h / \sigma_f \dots\dots\dots (46)$

式中 $\sigma_h = pR_c / t$ 。

表13 轴向缺陷评定周期末的允许缺陷高度（ h_{aw}/t ）值——极限载荷分析

SR^b	(h_{aw}/t) 值 ^a										
	$(l_f/\sqrt{R_c t})^c$										
	0.0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	≥ 12.0
≥ 1.00	0.75	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
0.90	0.75	0.70	0.42	0.23	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11
0.80	0.75	0.75	0.62	0.40	0.32	0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22
0.70	0.75	0.75	0.73	0.53	0.44	0.40	0.38	0.36	0.35	0.34	0.33
0.60	0.75	0.75	0.75	0.64	0.55	0.51	0.49	0.47	0.45	0.44	0.43
0.50	0.75	0.75	0.75	0.72	0.65	0.61	0.59	0.57	0.55	0.54	0.53
0.40	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.70	0.68	0.67	0.65	0.64	0.63
0.30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.73	0.73
≤ 0.20	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
(1) 应根据相应的工况确定适用的验收标准。											
^a $h_{aw} = a_{aw}$ (对表面缺陷); $h_{aw} = 2a_{aw}$ (对埋藏缺陷)。 t ——管壁厚; 允许线性插值。 ^b $SR = SF_m \sigma_h / \sigma_f$ (对极限载荷评定); $\sigma_h = p R_c / t$, 式中 R_c -管道平均半径, p -内压; σ_f -流变应力; ^c l_f ——评定周期末的缺陷长度。 l_f 应限制在小于 l_{aw} 范围内, 这里 $l_{aw} = 1.58(R_c t)^{0.5}[(\sigma_f / \sigma_h)^2 - 1]^{0.5}$ 。											

12.5 管道极限载荷评定的分析解

12.5.1 周向缺陷的允许应力

12.5.1.1 一般原则

对于（薄膜+弯曲）组合载荷和只有薄膜载荷的情况，可用分析解确定管道的允许应力。

12.5.1.2 对组合载荷

对管道在评定周期末的周向缺陷尺寸 a_f ，该管道起始塑性垮塌应力 σ_b^c 按式（47）和（48）计算。

当周向缺陷未贯穿管道的受压缩侧，即 $\theta + \beta \leq \pi$ 时， σ_b^c 按式（47）计算：

$$\sigma_b^c = \frac{2\sigma_f}{\pi} (2\sin\beta - \frac{a}{t}\sin\theta) \dots\dots\dots (47)$$

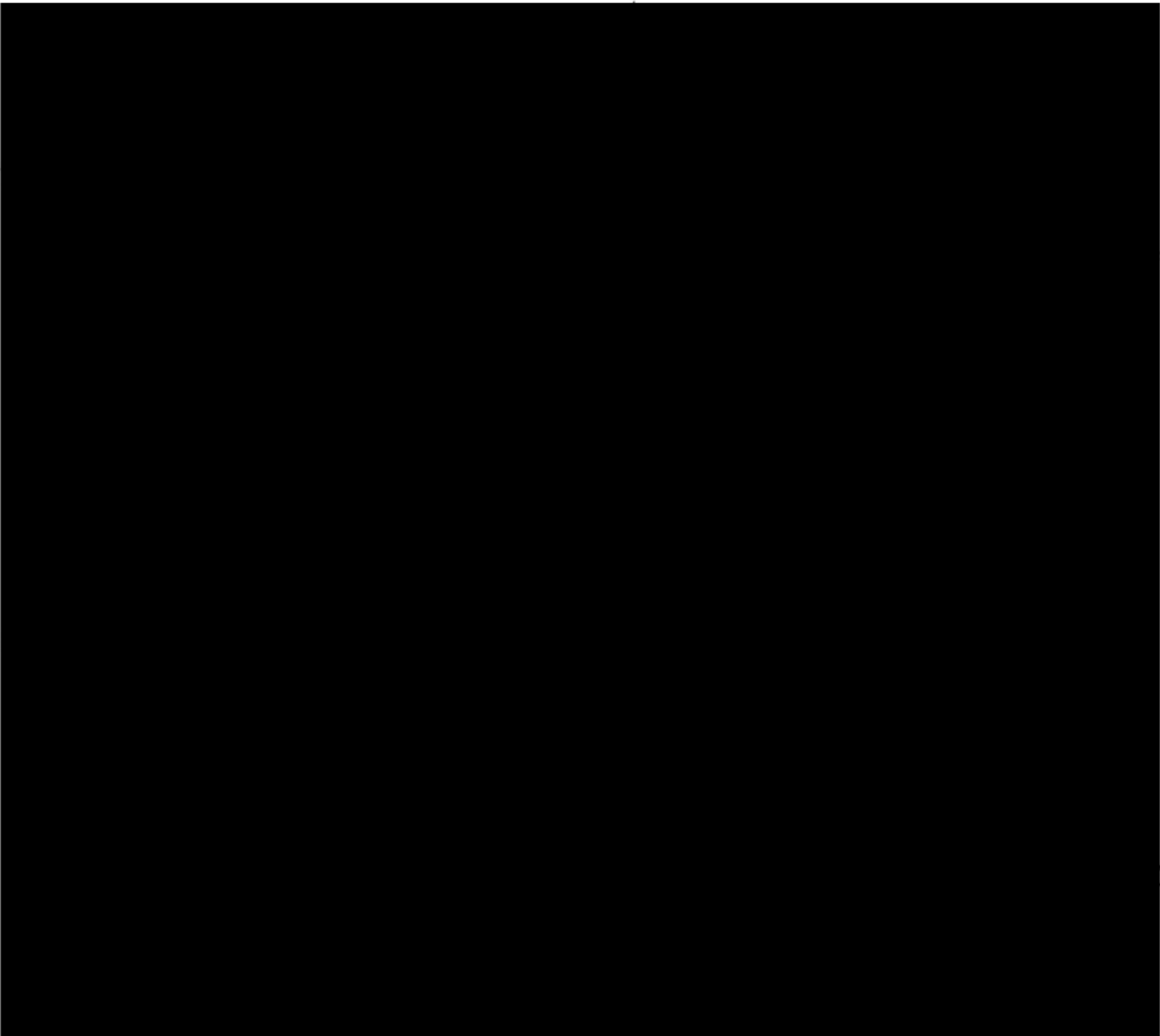
式中 $\beta = \frac{\pi}{2} (1 - \frac{a}{t} \frac{\theta}{\pi} - \frac{\sigma_m}{\sigma_f})$ 。

当周向缺陷贯穿至管道的受压缩侧，即 $\theta + \beta > \pi$ 时， σ_b^c 按式（48）计算：

$$\sigma_b^c = \frac{2\sigma_f}{\pi} (2 - \frac{a}{t}) \sin\beta \dots\dots\dots (48)$$

式中 $\beta = \frac{\pi}{2 - a/t} (1 - \frac{a}{t} - \frac{\sigma_m}{\sigma_f})$ 。

管道对每种使用限制，在组合载荷下，作用于管道轴向的最大一次薄膜应力 σ_m 和最大一次弯曲应力 σ_b 应满足式（49）：



式中：

$\gamma = (SF_m)\sigma_h / \sigma_f$ ；

$M_t = \sqrt{1 + 0.4025 l_f^2 / R_c t}$ 。

12.6 管道弹塑性断裂评定

12.6.1 Z 因子载荷系数

12.6.1.1 概述

Z 因子为含缺陷结构塑性失效极限载荷与韧性撕裂失稳载荷之比。它与材料强度、断裂韧度及 R_c/t 有关。先求出 Z 因子, 然后用实际载荷的 Z 倍作为施加载荷, 估算含缺陷结构达到塑性极限载荷时的临界裂纹尺寸。通过 Z 因子放大应力比, 仍然采用 12.4 中的表格完成弹塑性断裂评定。

12.6.1.2 奥氏体焊接件的 Z 因子

由手工电弧焊 (SMAW) 或埋弧焊 (SAW) 制造的奥氏体焊接件, 其 Z 因子按式 (54) 计算:

$$Z = 1.3[1 + 0.0004(D - 100)] \dots\dots\dots (54)$$

12.6.1.3 铁素体钢和相关焊接金属的 Z 因子

对第 1 类材料—无缝的或焊接的轧制碳钢管和管材, 具有规定的最小屈服强度不大于 280MPa 及用 E7015、E7016 和 E7018 焊条焊接的焊缝, 其 Z 因子用式 (55) 计算:

$$Z = 1.20[1 + 0.00084A(D - 100)] \dots\dots\dots (55)$$

$$\text{式中 } A = \begin{cases} [0.125R_c/t - 0.25]^{0.25} & \text{当 } 5 \leq R_c/t \leq 10 \\ [0.4R_c/t - 3.0]^{0.25} & \text{当 } 10 \leq R_c/t \leq 20 \end{cases}。$$

对第 2 类材料—所有规定的最小抗拉强度不大于 550MPa 的其他铁素体钢手工电弧焊和埋弧焊焊缝, 其 Z 因子用式 (56) 计算:

$$Z = 1.35[1 + 0.00074A(D - 100)] \dots\dots\dots (56)$$

$$\text{式中 } A = \begin{cases} [0.125R_c/t - 0.25]^{0.25} & \text{当 } 5 \leq R_c/t \leq 10 \\ [0.4R_c/t - 3.0]^{0.25} & \text{当 } 10 \leq R_c/t \leq 20 \end{cases}。$$

12.6.2 周向缺陷的允许缺陷高度

对 A、B (包括试验工况)、C、D 级使用限制, 在组合 (薄膜+弯曲) 应力及给定的缺陷长度 l_f 下, 周向缺陷的允许缺陷高度 h_{aw}/t 也从表 8 至表 11 查出。但各表中的应力比 SR 采用 Z 因子修正后的式 (57) 计算:

$$SR = Z(\sigma_m + \sigma_b + \sigma_c/SF_b)/\sigma_f \dots\dots\dots (57)$$

式中 SF_b 从表 7 取值, Z 按 12.6.1 取值。

对 A、B (包括试验工况)、C、D 级使用限制, 在薄膜应力和给定的缺陷长度 l_f 下, 周向缺陷的允许缺陷高度 h_{aw}/t 从表 12 查出。但表中的应力比 SR 采用 Z 因子修正后的式 (58) 计算:

$$SR = Z(SF_m \sigma_m)/\sigma_f \dots\dots\dots (58)$$

从表 8 至表 12 查出相应工况的允许缺陷尺寸后, 取其中最小的高度作为周向缺陷的允许缺陷高度。

12.6.3 周向缺陷的允许应力

12.6.3.1 一般原则

对于 (薄膜+弯曲) 组合载荷和只有薄膜载荷的情况, 可用分析解确定管道的允许应力。

12.6.3.2 组合载荷

给定管道在评定周期末的周向缺陷尺寸 a_f ，对每种使用限制，在组合载荷下，作用于管道轴向的最大一次薄膜应力 σ_m 、最大一次弯曲应力 σ_b 和二次应力 σ_e 应满足式（59）：

$$[1-1/Z(SF_m)]\sigma_m + \sigma_b + \sigma_e/SF_b \leq \sigma_b^c/[Z(SF_b)] \dots\dots\dots (59)$$

式中 σ_b^c 由式（47）或式（48）确定。

，作用于管道轴

$$\dots\dots\dots (60)$$

陷长度 l_f 下，轴
表15查出。表14

$$\dots\dots\dots (61)$$

列)

2.4	2.6	2.8
(1)	(1)	(1)
(1)	(1)	(1)
(1)	(1)	(1)
(1)	(1)	(1)
(1)	(1)	(1)

0.55	0.75	0.75	0.75	0.62	0.48	0.43	0.39	0.37	0.36	0.29	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
0.5	0.75	0.75	0.75	0.71	0.51	0.49	0.47	0.44	0.42	0.41	0.34	(1)	(1)	(1)	(1)
0.45	0.75	0.75	0.75	0.75	0.68	0.62	0.57	0.54	0.52	0.5	0.49	0.48	0.39	(1)	(1)
≤0.4	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.7	0.66	0.63	0.61	0.59	0.58	0.57	0.56	0.45	(1)
(1) 应根据相应的工况确定适用的验收标准。															
^a $h_{aw} = a_{aw}$ (对表面缺陷); $h_{aw} = 2a_{aw}$ (对埋藏缺陷)。 t ——管壁厚。允许线性插值。															
^b $SR = \sigma_h / \sigma_f$ ，其中 $\sigma_h = pR_c / t$ ， R_c ——平均管径。表中的值已包含了安全系数。															
^c l_f ——评定周期末缺陷长度， $l_f \leq l_{aw}$ 。															

表15 轴向缺陷评定周期末的允许缺陷高度 h_{aw}/t 值 (C 级、D 级使用限制)

SR^b	h_{aw}/t 值 ^a														
	$(l_f/\sqrt{R_m t})^c$														
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8
≥ 1.6	0.75	0.5	0.12	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
1.5	0.75	0.6	0.38	0.15	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
1.4	0.75	0.7	0.59	0.3	0.27	0.19	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
1.3	0.75	0.75	0.7	0.38	0.33	0.28	0.23	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
1.2	0.75	0.75	0.68	0.51	0.38	0.35	0.32	0.26	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
1.1	0.75	0.75	0.75	0.62	0.48	0.43	0.39	0.37	0.36	0.29	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
1	0.75	0.75	0.75	0.71	0.51	0.49	0.47	0.44	0.42	0.41	0.34	(1)	(1)	(1)	(1)
0.9	0.75	0.75	0.75	0.75	0.68	0.62	0.57	0.54	0.52	0.5	0.49	0.48	0.39	(1)	(1)
≤ 0.8	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.7	0.66	0.63	0.61	0.59	0.58	0.57	0.56	0.45	(1)
(1) 应根据相应的工况确定适用的验收标准。															
^a $h_{aw} = a_{aw}$ (对表面缺陷); $h_{aw} = 2a_{aw}$ (对埋藏缺陷)。 t ——管壁厚; 允许线性插值。 ^b $SR = \sigma_h / \sigma_r$, 其中 $\sigma_h = pR_c / t$, R_c ——平均管径; 表中的值已包含了安全系数。 ^c l_f ——评定周期末缺陷长度, $l_f \leq l_{aw}$ 。															

12.7 铁素体钢管道脆性断裂评定

12.7.1 一般原则

当含缺陷铁素体钢管道的 $SC \geq 1.8$ 时, 应采用线弹性断裂力学准则评定。

12.7.2 周向裂纹评定

周向裂纹的应力强度因子 K_I 用式 (62) 计算:

$$K_I = K_{lm} + K_{lb} + K_{lr} = \sqrt{\pi a / 1000} \{ (SF_m) \sigma_m f_m + [(SF_b) \sigma_b + \sigma_e] f_b + \sigma_R \} \dots \dots \dots (62)$$

式中: σ_R ——管道缺陷部位的残余应力; SF_m 和 SF_b 从表7选取; f_m 和 f_b 按12.3.4.1.2计算。

周向裂纹评定判据如下: 用管道使用限制参数和评定周期末的周向裂纹尺寸 a_f 、 l_f 代入式 (62) 计

算 K_I , 若 $K_I < K_c = \sqrt{J_c E / (1 - \nu^2)}$, 则含周向裂纹管道在使用工况下继续使用是允许的。

12.7.3 轴向裂纹评定

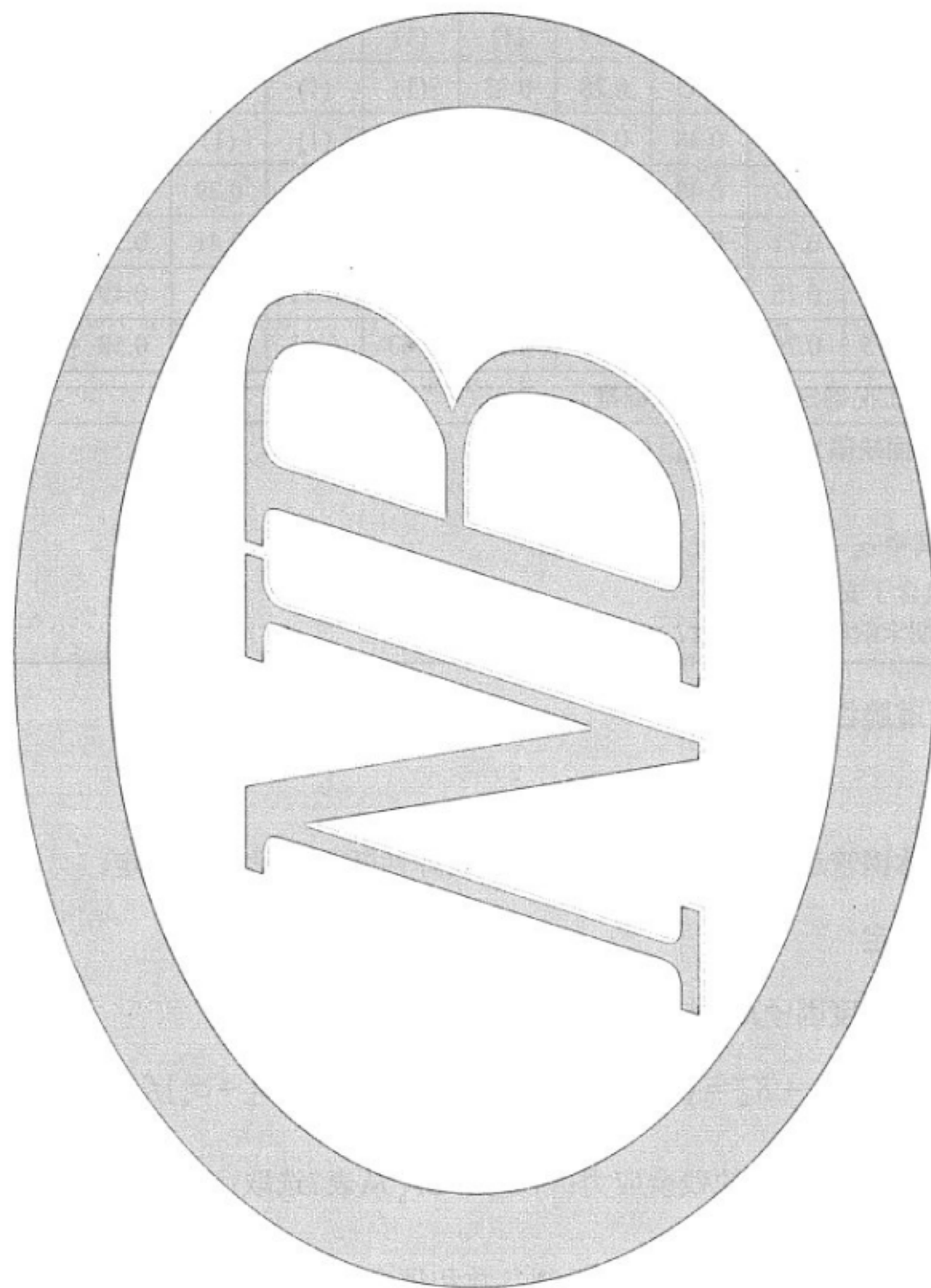
轴向裂纹的应力强度因子 K_I 用式 (63) 计算:

$$K_I = K_{lm} + K_{lr} = \sqrt{\pi a / 1000 Q} [(SF_m) f p R_c / t + \sigma_R] \dots \dots \dots (63)$$

式中 SF_m 从表7选取, f 和 Q 按12.3.4.2计算。

轴向裂纹评定判据如下: 用管道使用限制参数和评定周期末的轴向裂纹尺寸 a_f 、 l_f 代入式(63)计

算 K_I , 若 $K_I < K_c = \sqrt{J_c E / (1 - \nu^2)}$, 则含轴向裂纹管道在使用工况下继续使用是允许的。



附录 A
(资料性附录)
局部减薄缺陷的评定

A.1 概述

本附录给出了承受内压核设备的局部减薄评定方法。适用于由于局部腐蚀、局部机械损伤引起的局部减薄缺陷或采用打磨的方法消除面型缺陷时产生的局部减薄缺陷的完整性评定。

A.2 评定方法的适用条件

A.2.1 被评定的核承压设备应符合下列条件:

- a) 原设计准则符合相应的设计规范与标准;
- b) 局部减薄缺陷区域及周围无平面缺陷;
- c) 容器与管道的材料未出现明显的脆化, 且具有足够的韧性;
- d) 容器与管道所承受的载荷不包括交变载荷;
- e) 容器与管道不在材料蠕变温度范围内服役。

A.2.2 承受内压含局部减薄缺陷核压力容器与核压力管道的评定采用两级评定的方法:

- a) 1级评定用于评价壁厚断面尺寸变化不很大的局部减薄缺陷, 评定可能给出保守的结果;
- b) 2级评定方法可用于评价壁厚断面尺寸变化较大的局部减薄缺陷, 也可用于几个靠近的局部减薄缺陷的评定。

A.3 1级评定

A.3.1 含缺陷圆筒形容器和管道的1级评定

评定流程如下:

- a) 确定主要壁厚断面图和参数: D_i 、 t_{FCA} 、 L_{msd} 、 RSF_a , 其中 L_{msd} 按图A.1确定;
- b) 根据相应的设计规范, 用设计压力确定圆筒形容器或管道所需的最小壁厚 t_{min} ;
- c) 确定最小测量壁厚 t_{mm} 和缺陷的轴向长度 s 及周向长度 c (图A.2), 并用式(A.1)~式(A.3)

计算参数:

$$R_1 = \frac{t_{mm} - t_{FCA}}{t_{min}} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{D_i t_{min}}} \dots\dots\dots (A.2)$$

$$g_c = \begin{cases} 0.2 & c/D_i \leq 0.348 \\ \frac{-0.7359 + 10.51(c/D_i)^2}{1 + 13.84(c/D_i)^2} & c/D_i > 0.348 \end{cases} \dots\dots\dots (A.3)$$

d) 评定判据:

若圆筒形容器和管道上的局部减薄缺陷参数同时满足式 (A.4) ~ 式 (A.6):

$$t_{\text{mm}} - t_{\text{FCA}} \geq 2.5\text{mm} \quad L_{\text{msd}} \geq 1.8\sqrt{D_i t_{\text{min}}} \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

$$R_t \geq g_c \dots\dots\dots (\text{A.5})$$

$$RSF = \frac{R_t}{1 - (1 - R_t) / \sqrt{1 + 0.48\lambda^2}} \geq 0.9 \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

则该部件上的缺陷是允许的。

A.3.2 含缺陷球壳的1级评定

评定流程如下:

- 确定主要壁厚的断面图和下列参数: D_i 、 t_{FCA} 、 L_{msd} 、 RSF_a ;
- 根据相应的设计规范, 用设计压力确定球壳所需要最小壁厚 t_{min} ;
- 确定最小测量壁厚 t_{mm} 和减薄缺陷最大的外接圆直径 d_s , 并用式 (A.7) 和式 (A.8) 计算参数 R_t 和 λ :

$$R_t = \frac{t_{\text{mm}} - t_{\text{FCA}}}{t_{\text{min}}} \dots\dots\dots (\text{A.7})$$

$$\lambda = \frac{1.285d_s}{\sqrt{D_i t_{\text{min}}}} \dots\dots\dots (\text{A.8})$$

d) 评定判据:

若球壳上的局部减薄缺陷参数同时满足式 (A.9) ~ 式 (A.11):

$$R_t \geq 0.20 \dots\dots\dots (\text{A.9})$$

$$t_{\text{mm}} - t_{\text{FCA}} \geq 2.5\text{mm} \quad L_{\text{msd}} \geq 1.8\sqrt{D_i t_{\text{min}}} \dots\dots\dots (\text{A.10})$$

$$RSF = \frac{R_t}{1 - (1 - R_t) / \sqrt{1 + 0.48\lambda^2}} \geq 0.9 \dots\dots\dots (\text{A.11})$$

则该球壳上的缺陷是允许的。

A.4 2级评定

A.4.1 含缺陷圆筒形容器和管道的2级评定

评定流程如下:

- 确定主要壁厚的断面图和下列参数: D_i 、 t_{FCA} 、 L_{msd} 、 RSF_a , 其中 L_{msd} 按图 A.1 确定;
- 根据相应的设计规范, 用设计压力确定圆筒形容器或管道所需要最小壁厚 t_{min} ;
- 确定最小测量壁厚 t_{mm} 和缺陷的轴向长度 s 及周向长度 c (图 A.2), 并用式 (A.12) ~ 式 (A.14) 计算参数:

$$R_t = \frac{t_{\text{mm}} - t_{\text{FCA}}}{t_{\text{min}}} \dots\dots\dots (\text{A. 12})$$

$$\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{D_i t_{\text{min}}}} \dots\dots\dots (\text{A. 13})$$

$$g_c = \begin{cases} 0.2 & c/D_i \leq 0.348 \\ \frac{-0.7359 + 10.51(c/D_i)^2}{1 + 13.84(c/D_i)^2} & c/D_i > 0.348 \end{cases} \dots\dots\dots (\text{A. 14})$$

d) 验证缺陷的参数满足条件式 (A. 15) 和式 (A. 16) :

$$t_{\text{mm}} - t_{\text{FCA}} \geq 2.5\text{mm} \quad R_t \geq g_c \dots\dots\dots (\text{A. 15})$$

$$L_{\text{msd}} \geq 1.8\sqrt{D_i t_{\text{min}}} \quad \lambda \leq 5.0 \dots\dots\dots (\text{A. 16})$$

e) 确定剩余强度系数:

- 1) 根据局部减薄缺陷的主要壁厚断面图进行分段, 第 1 段为最大减薄处 (图 A. 3), 分段数 k 与各段的范围根据计算精度决定;
- 2) 利用式 (A. 17) 计算第 i 段的剩余强度系数 RSF^i :

$$RSF^i = \frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_0^i}\right)}{1 - \frac{1}{M_t^i} \left(\frac{A^i}{A_0^i}\right)} \dots\dots\dots (\text{A. 17})$$

式中:

$$M_t^i = \left[\frac{1.02 + 0.4411(\lambda^i)^2 + 0.006124(\lambda^i)^4}{1.0 + 0.02642(\lambda^i)^2 + 1.533(10^{-6})(\lambda^i)^4} \right]^{0.5};$$

$$\lambda^i = 1.285s^i / \sqrt{D_i t_{\text{min}}};$$

A^i ——第 i 段的壁厚减薄面积 (图 A. 3), 单位为平方毫米 (mm^2);

A_0^i ——第 i 段的原始壁厚面积 $A_0^i = s^i t_{\text{min}}$, , 单位为平方毫米 (mm^2);

s^i ——壁厚减薄区第 i 段的长度 (图 A. 3), 单位为毫米 (mm)。

- 3) 确定剩余强度系数。评定所用的剩余强度系数 RSF 用 (A. 18) 计算:

$$RSF = \min_{1 \leq i \leq k} \{RSF^i\} \dots\dots\dots (\text{A. 18})$$

f) 评定判据: 如果 $RSF = \min_{1 \leq i \leq k} \{RSF^i\} \geq 0.9$, 则该部件上的缺陷是允许的。

A. 4. 2 含缺陷球壳的 2 级评定

评定流程如下:

- a) 确定主要壁厚断面图和下列参数: D_i 、 t_{FCA} 、 L_{msd} 、 RSF_a ;
- b) 根据相应的设计规范, 用设计压力确定球壳所需的最小壁厚 t_{min} ;
- c) 确定最小测量壁厚 t_{mm} 和减薄缺陷最大的外接圆直径 d_s , 并用式 (A. 19) 和式 (A. 20) 计算参数 R_t 和 λ :

$$R_t = \frac{t_{\text{mm}} - t_{\text{FCA}}}{t_{\text{min}}} \dots\dots\dots (\text{A. 19})$$

$$\lambda = \frac{1.285d_s}{\sqrt{D_i t_{\text{min}}}} \dots\dots\dots (\text{A. 20})$$

- d) 验证缺陷的参数满足式 (A. 21) 和式 (A. 22):

$$R_t \geq 0.20 \quad t_{\text{mm}} - t_{\text{FCA}} \geq 2.5\text{mm} \dots\dots\dots (\text{A. 21})$$

$$L_{\text{msd}} \geq 1.8\sqrt{D_i t_{\text{min}}} \quad \lambda \leq 5.0 \dots\dots\dots (\text{A. 22})$$

- e) 确定剩余强度系数:

- 1) 根据局部减薄缺陷的主要壁厚断面图进行分段, 第 1 段为最大减薄处 (图 A. 3), 分段数 k 与各段的范围根据计算精度决定;
- 2) 利用式 (A. 23) 计算第 i 段的剩余强度系数 RSF^i :

$$RSF^i = \frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_0^i} \right)}{1 - \frac{1}{M_t^i} \left(\frac{A^i}{A_0^i} \right)} \dots\dots\dots (\text{A. 23})$$

式中:

$$M_t^i = \frac{1.0005 + 0.4900(\lambda^i) + 0.32409(\lambda^i)^2}{1.0 + 0.50144(\lambda^i) - 0.011067(\lambda^i)^2};$$

$$\lambda^i = 1.285s^i / \sqrt{D_i t_{\text{min}}};$$

A^i ——第 i 段的壁厚减薄面积 (图 A. 3), 单位为平方毫米 (mm^2);

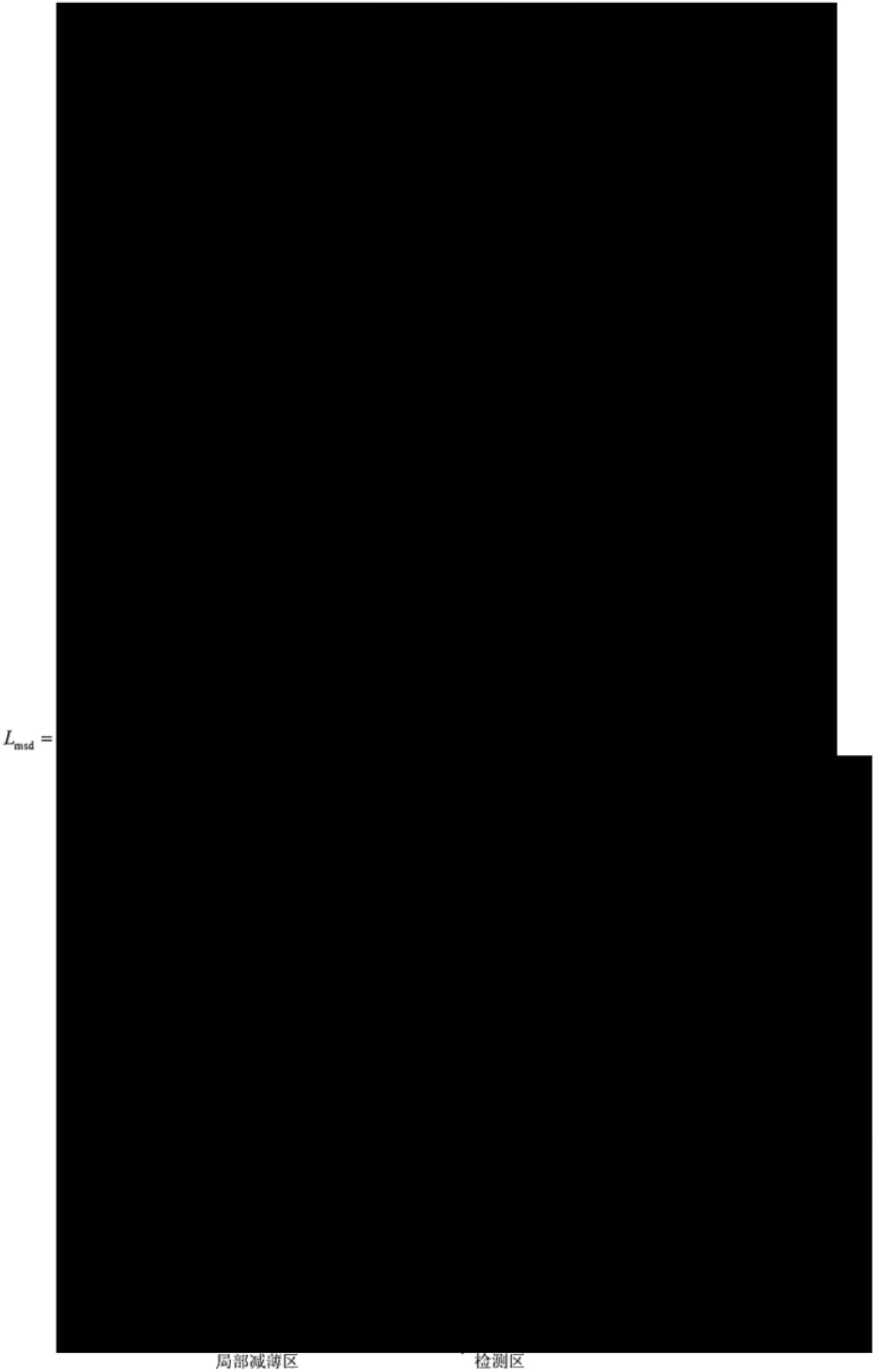
A_0^i ——第 i 段的原始壁厚面积 $A_0^i = s^i t_{\text{min}}$, 单位为平方毫米 (mm^2);

s^i ——壁厚减薄区第 i 段的长度 (图 A. 3), 单位为毫米 (mm)。

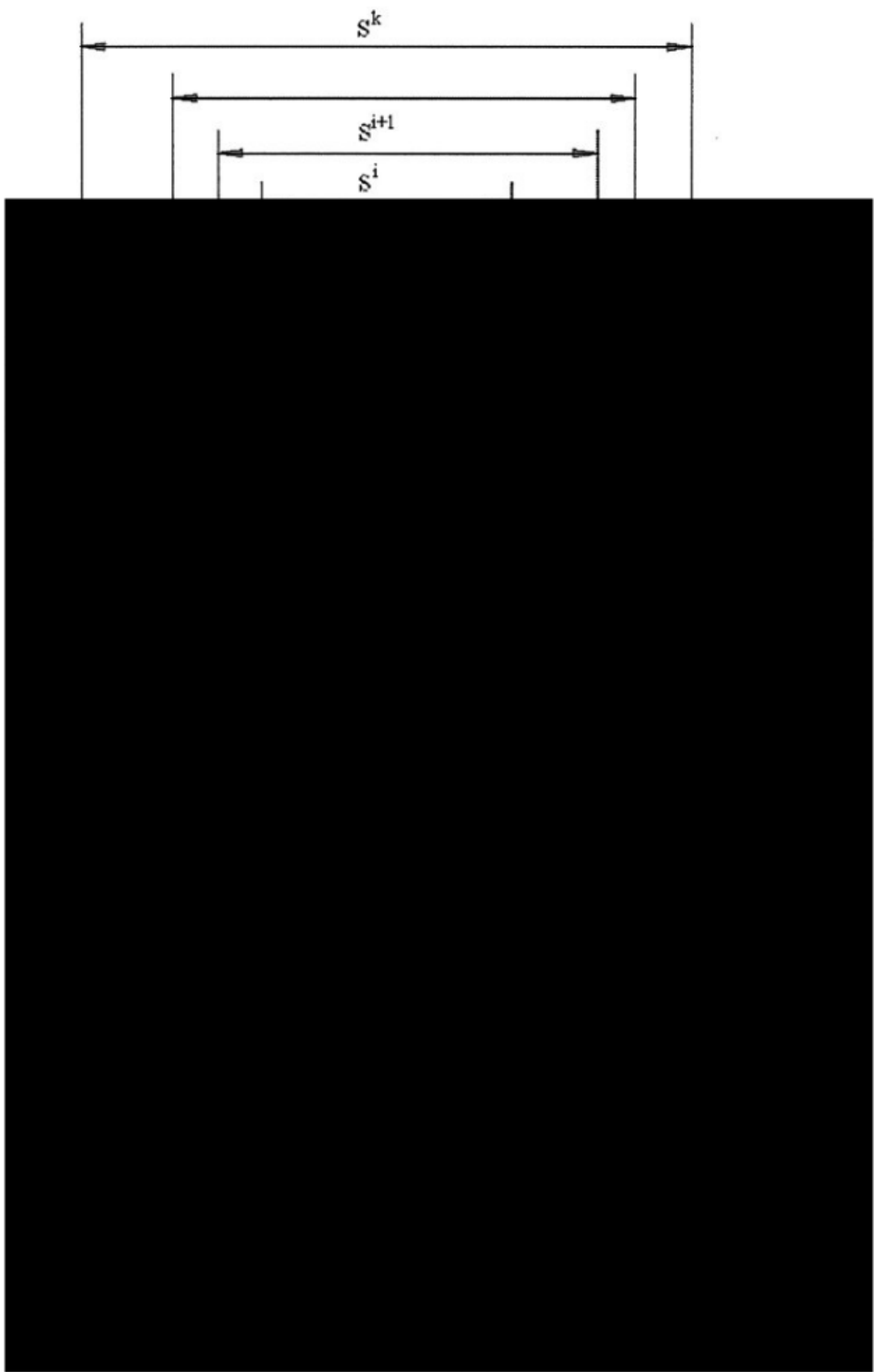
- 3) 确定剩余强度系数。评定所用的剩余强度系数 RSF 用式 (A. 24) 计算:

$$RSF = \min_{1 \leq i \leq k} \{ RSF^i \} \dots\dots\dots (\text{A. 24})$$

- f) 评定判据: 如果 $RSF = \min_{1 \leq i \leq k} \{ RSF^i \} \geq 0.9$, 则该球壳上的缺陷是允许的。



图A. 2 局部减薄缺陷检测区与缺陷尺寸



附录 B
(资料性附录)
焊接残余应力

B.1 概述

本附录给出了一些在完整性评定中常见的焊态下残余应力分布,包括沿表面和全厚度截面方向上的纵向和横向残余应力,其适用范围见表B.1。其中应力单位为兆帕(MPa),焊件和焊缝几何尺寸的单位为毫米(mm)。

表B.1 焊接残余应力分布适用范围

几何结构	厚度 mm	屈服强度 MPa	单位长度热输入 KJ/mm
板对接焊缝	24~300	310~740	1.6~4.9
管道环向对接焊缝	9~84	225~780	0.35~1.9
管道纵向对接焊缝	50~80	345~780	/
T型接头	25~100	375~420	1.4
管-板、管-管T型焊缝	22~50	360~490	0.6~2.0
修复焊缝	75~152	500~590	1.2~1.6

B.2 屈服区尺寸计算

表面残余应力屈服区尺寸参数 r_0 和 y_0 的计算方法如下:

a) 若 $r_0 < t$ (厚板):

$$r_0 = \sqrt{\frac{K}{R_{pp}} \cdot \frac{\eta q}{v}} \dots\dots\dots (B.1)$$

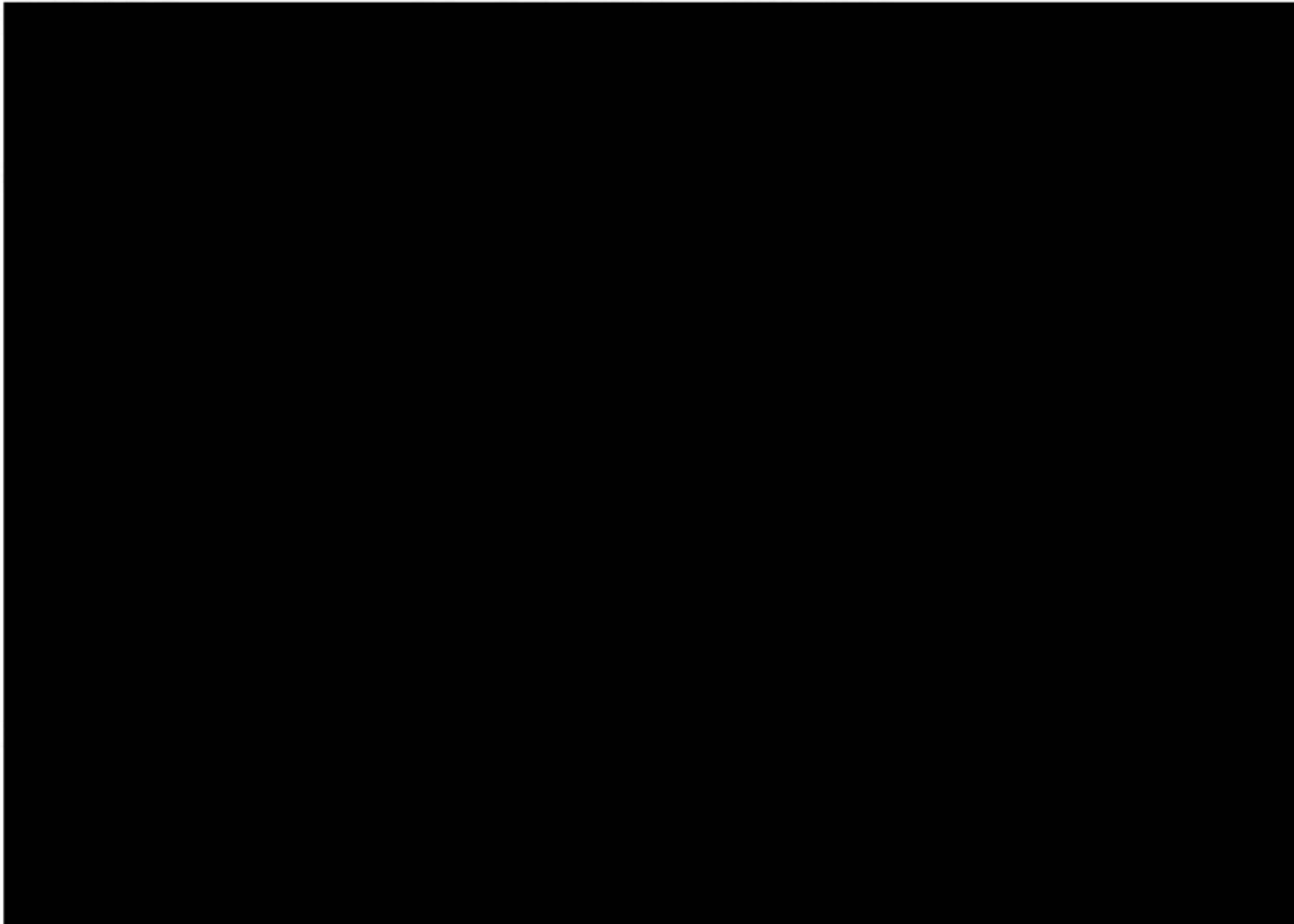
式中:

- r_0 ——屈服区半径,单位为毫米(mm);
 - K ——材料常数,牛顿毫米每焦耳(Nmm/J);
 - I ——电流,单位为安(A);
 - q ——电弧能量, $q = IV$, 单位为焦每秒(J/s);
 - V ——电压,单位为伏(V);
 - η ——工艺效率(电弧能量作为热进入板中部分);
 - v ——焊接速度,单位为毫米每秒(mm/s)。
- 厚板公式通常适用于熔敷焊道尺寸小于板厚的场合,如多焊道焊缝或厚板上小的单边角焊缝。

b) 若 $r_0 > t$ (薄板):

$$y_0 = \frac{1.033K}{R_{pp}} \cdot \frac{\eta q}{\nu t} \dots\dots\dots (B.2)$$

对于对接焊缝, t 等于板厚; 对于T型接头, $t = t_b + 0.5t_a$, 其中 t_b 是基础板厚度, t_a 是连接板厚度;



特性	铁素体钢	奥氏体钢
热膨胀系数 $\alpha / (^{\circ}\text{C}^{-1})$	12×10^{-6}	16×10^{-6}
杨氏模量 E / MPa	207000	193000
容积比热 $\rho_d c_{sh} / (\text{Jmm}^3/^{\circ}\text{C})$	0.0038	0.0036
$K = 2aE / (e\pi\rho_d c_{sh}) / (\text{Nmm/J})$	153	201

B.3 板和管道(纵缝)对接焊缝¹⁾(铁素体、奥氏体钢)

1) W 在附录 B 中表示焊缝宽度, 单位为毫米 (mm)

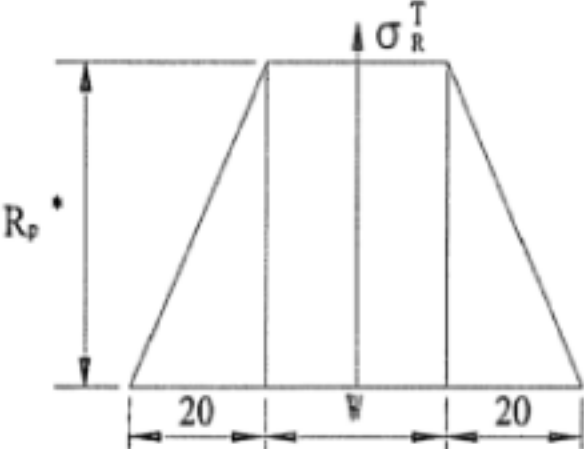
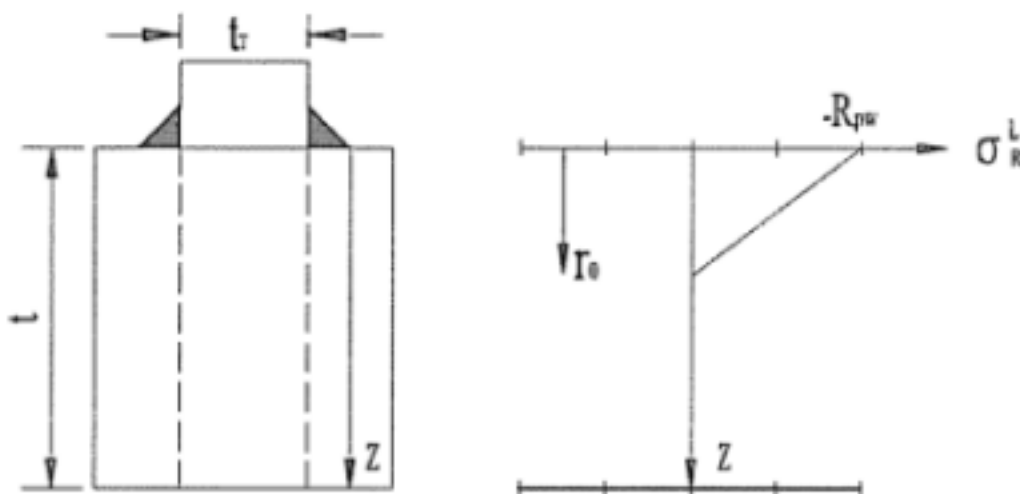
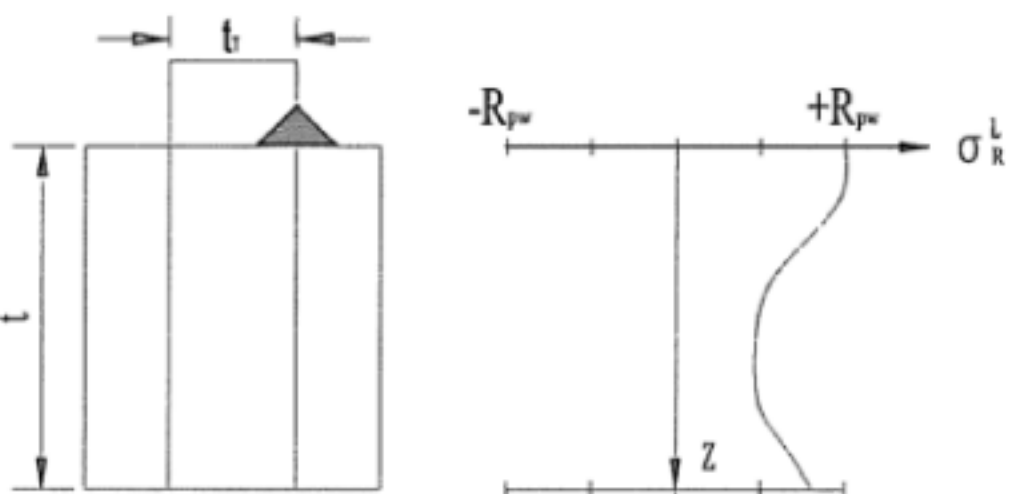
表B.3 板和管道(纵缝)对接焊缝残余应力分布

几何结构		
表面残余应		
全厚度截面上 余应力		<p>铁素体钢: $\frac{\sigma_R}{R_{pw}}(\frac{z}{t}) = 1.0$</p> <p>奥氏体钢: $\frac{\sigma_R^L}{R_{pw}}(\frac{z}{t}) = 0.95 + 1.505(\frac{z}{t}) - 8.287(\frac{z}{t})^2 + 10.571(\frac{z}{t})^3 - 4.08(\frac{z}{t})^4$</p>

表 B. 3 (续)

全厚度截面上残余应力	横	<div></div>	<div></div> <div>T R</div> <div>$-96.36(\frac{z}{t})^6$</div>
B. 4 板-板T型接头			
几何结构		<div></div>	
表面残余应力	纵	<div></div>	<div></div> <div>第一面: $W=W1$ $R_{p0.2}=R_{pw}$ 第二面: $W=W2$ $R_{p0.2}=R_{pw}$ 第三面: $W=W2$ $R_{p0.2}=R_{pp}$</div> <div>厚壁材料($r_0 \leq t$) 薄壁材料($r_0 > t$)</div>

表 B.4 (续)

表面残余应力	横向	
全厚度截面上残余应力	纵向	
	横向	

注：t_T为T型接头的

B.5 管子对接环焊

几何结构	
------	--

表 B. 5 (续)

表面残余应力	
全厚度截面上残余应力	<div>$\sigma_{\text{R}}^{\text{T}} = R_{\text{p}}^* [1.0 - 0.22(\frac{x}{t}) - 3.06(\frac{x}{t})^2 + 1.88(\frac{x}{t})^3]$<p>对于中等热输入的铁素体钢焊缝($q/(vt) \leq 120 J/mm^2$):</p>$\sigma_{\text{R}}^{\text{T}} = R_{\text{p}}^* [1.0 - 4.43(\frac{x}{t}) + 13.53(\frac{x}{t})^2 - 16.93(\frac{x}{t})^3 + 7.03(\frac{x}{t})^4]$<p>对于低热输入的铁素体钢焊缝($q/(vt) \leq 50 J/mm^2$)和中等热输入的奥氏体钢焊缝($q/(vt) \leq 120 J/mm^2$): $\sigma_{\text{R}}^{\text{T}} = R_{\text{p}}^* [1.0 - 6.80(\frac{x}{t}) + 24.30(\frac{x}{t})^2 - 28.68(\frac{x}{t})^3 + 11.18(\frac{x}{t})^4]$</p><p>式中: $x = t - z$</p></div>

B.6 管-板、管-管T型焊缝(铁素体钢、奥氏体钢(除表面纵向))

表B.6 管-板、管-管 T 型焊缝残余应力分布

几何结构(一)			
几何结构(二)			
表面残余应力	纵		
	横		
全厚度截面上残余应力	纵	<p>铁素体钢: $\frac{\sigma}{R_p}(\frac{r}{t}) = 1.025 + 3.487(\frac{r}{t}) - 27.801(\frac{r}{t})^2 + 45.788(\frac{r}{t})^3 - 21.8(\frac{r}{t})^4$</p>	

表 B 6 (续)

			+R _p *	T
				
		薄壁材料($r_0 > t$)		
	横向	$\sigma_{R_i}^T = R_p^*$		

表 B.7 (续)

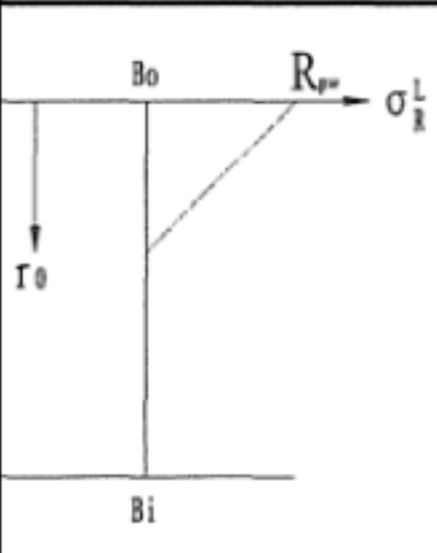

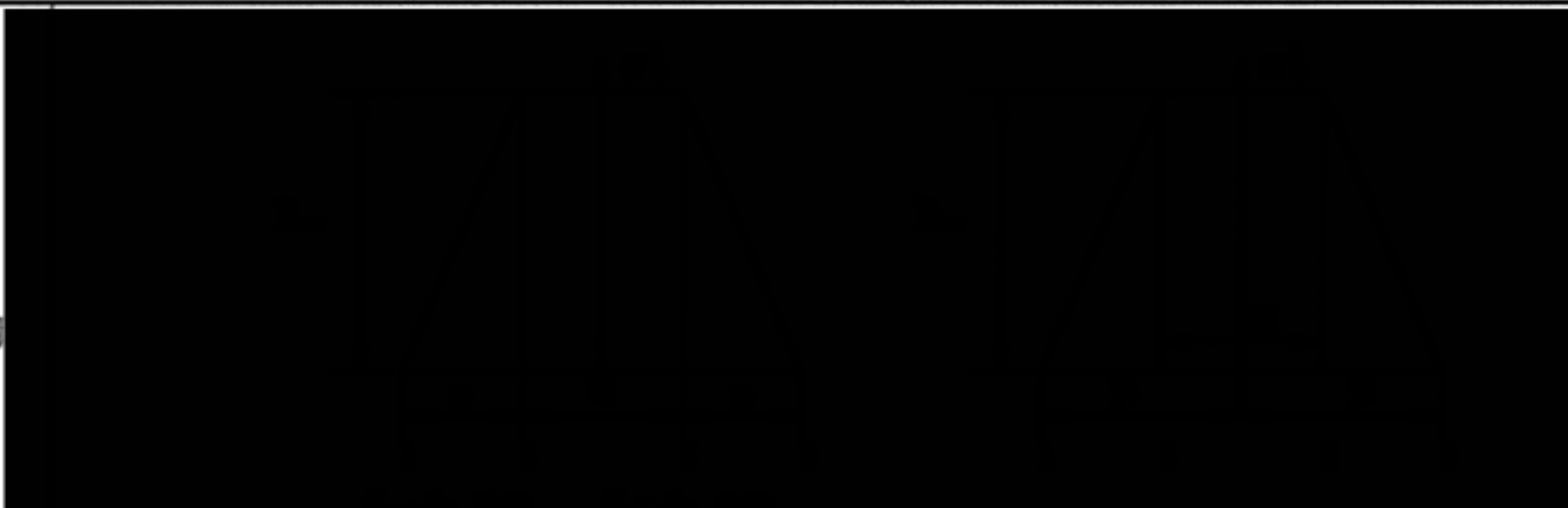
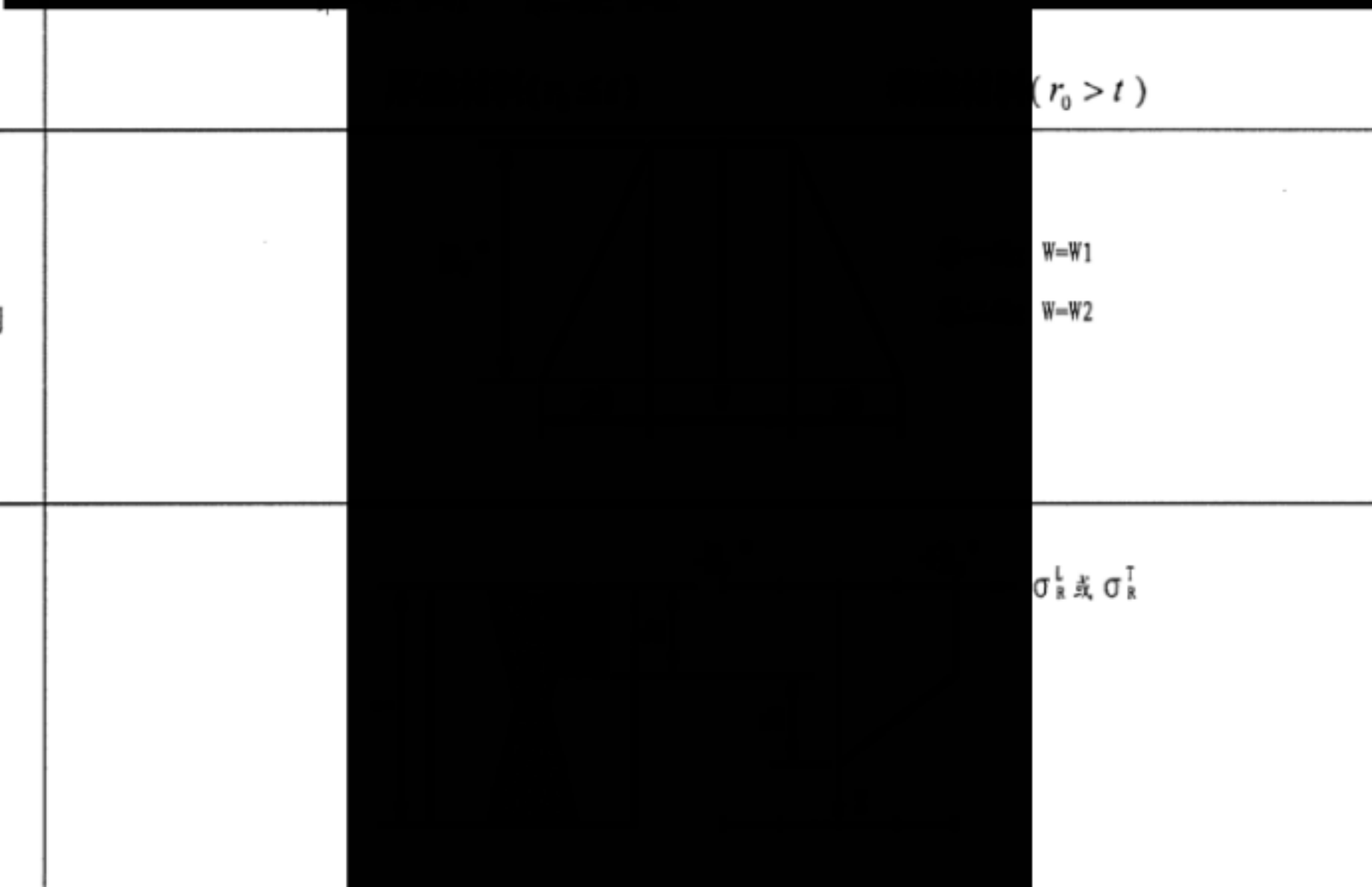
全厚度截面上残余应力	纵		
	横		
B.8 安放式接管角			
几何结构			
表面残余应力			
<div><div>R_{σ^L}</div><div>第一面形貌</div><div>第一面: $W=W1$ 第二面: $W=W2$</div><div>薄壁材料($r_0 > t$)</div></div>			

表 B 2 (续)

7-8-1781

表B. 9（续）

表面残余应力	纵向		
	横向		
全厚度截面上残余应力	纵、横向相同	$\sigma_R^L(\frac{z}{t}) = \frac{\sigma_R^T}{R_p^*}(\frac{z}{t}) = 1$ $z \leq z_r$	
		$\frac{\sigma_R^L}{R_p^*}(\frac{z}{t}) = \frac{\sigma_R^T}{R_p^*}(\frac{z}{t}) = (z_0 + z_r - z)/z_0$ $z_r < z \leq (z_r + z_0)$	
		$\frac{\sigma_R^L}{R_p^*}(\frac{z}{t}) = \frac{\sigma_R^T}{R_p^*}(\frac{z}{t}) = 0$ $z > (z_r + z_0)$	
		$z_0 = \sqrt{122(q/v)/R_p^*}$	

B. 10 异种钢过渡焊缝

表B. 10 异种钢过渡焊缝残余应力分布

位置		残余应力分布
1	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
2	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
3	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
4	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
5	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
6	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
7	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
8	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
9	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
10	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
11	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
12	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
13	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
14	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
15	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
16	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
17	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
18	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
19	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
20	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
21	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
22	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
23	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
24	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
25	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
26	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
27	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
28	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
29	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
30	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
31	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
32	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
33	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
34	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
35	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
36	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
37	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
38	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
39	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
40	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
41	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
42	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
43	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
44	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
45	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
46	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
47	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
48	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
49	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
50	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
51	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
52	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
53	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
54	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
55	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
56	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
57	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
58	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
59	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
60	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
61	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
62	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
63	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
64	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
65	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
66	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
67	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
68	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
69	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
70	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
71	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
72	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
73	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
74	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
75	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
76	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
77	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
78	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
79	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
80	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
81	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
82	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
83	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
84	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
85	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
86	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
87	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
88	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
89	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
90	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
91	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
92	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
93	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
94	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
95	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
96	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
97	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
98	1	[Redacted]
	2	
	3	
	4	
99	1	[Redacted]
	2	

附 录 C
(资料性附录)
材料力学性能数据

C.1 三种断裂韧度值的相互关系

缺陷评定中所使用的材料断裂韧度宜采用标准实验方法来确定。优先选用 J 积分断裂韧度,也可采用CTOD断裂韧度。如果被测材料较脆,测定 J_{Ic} 值有困难,可按GB/T 4161或ASTM E399测定平面应变断裂韧度 K_{Ic} 用于评定。在不能用标准方法进行断裂韧度测试时,允许采用金相剖面法测定获得CTOD起裂值 δ_{Is} 和估算 J 起裂值 J_{Is} 。如果被评定设备的服役条件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。

以 J 积分为基础的严格失效评定曲线的定义是 $f(L_r) = \sqrt{J_c/J} = \sqrt{G/J} = K_I / \sqrt{JE/(1-\nu^2)}$ 。失效评定图的纵坐标为 $K_r = K_I/K_c$,如果暂不考虑安全系数,当被评定裂纹的应力强度因子 K_I 的无因次断裂推动力与无因次外加载荷 L_r 组成的评定点 (L_r, K_r) 坐标落在上述严格失效评定曲线上时,即式(C.1):

$$\frac{K_I}{\sqrt{JE/(1-\nu^2)}} = \frac{K_I}{K_c} \dots\dots\dots (C.1)$$

如果式中的 K_c 是由 J 积分断裂韧度按小范围屈服条件下 J 积分与应力强度因子 K_I 之间的关系转换得到的,即式(C.2):

$$K_{Jc} = \sqrt{J_c E / (1-\nu^2)} \dots\dots\dots (C.2)$$

将式(C.2)代入式(C.1),可得 $J = J_c$,说明评定点落在失效评定曲线上表示为 $J = J_c$ 的弹塑性断裂条件。

鉴于 J_{Ic} 与CTOD临界值 δ_c 之间存在近似关系(C.3),从而以式(C.4)求得 K_{δ_c} :

$$J_c = m \sigma_f \delta_c / 1000 \dots\dots\dots (C.3)$$

$$K_{\delta_c} = \sqrt{\frac{m \sigma_f \delta_c E}{1000(1-\nu^2)}} \dots\dots\dots (C.4)$$

式中 σ_f 的单位为兆帕(MPa); δ_c 的单位为毫米(mm)。

宜按SINTAP取 $\sigma_f = R_{p0.2}$, $m = 1.5$ (与之相比,API579采用 σ_f 为流变应力, $m = 1.4$)。

C.2 材料断裂韧度估算的若干工程方法

C.2.1 概述

ASME B&PV Section XI附录A给出了辐照脆化后铁素体钢SA-508. Class 2和SA-508. Class 3钢的 K_{Ic} 和 K_{Ia} 下限值与温度的关系曲线法, API579及SINTAP给出了下边界断裂韧度法、材料夏比冲击功确定材料断裂韧度下限值的方法, 以及断裂韧度Master曲线法, 即ASTM E1921 “铁素体钢转变温度区参考温度 T_0 确定的标准试验法”等。

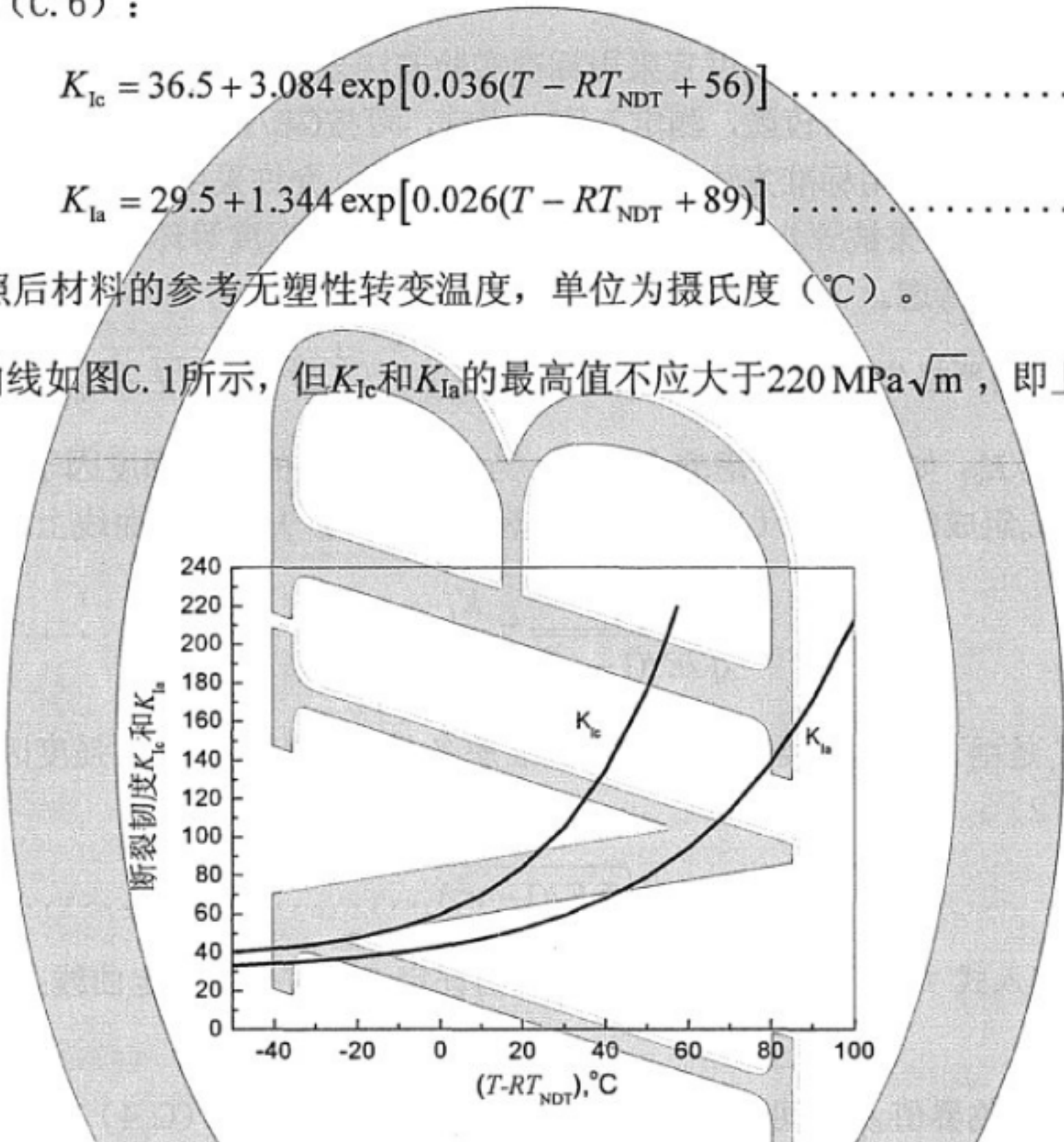
C. 2. 2 ASME B&PV Section XI铁素体钢辐照后断裂韧度确定的方法

核压力容器用铁素体钢SA-533B类1级和SA-508类2级和3级的断裂韧度 K_{Ic} 和 K_{Ia} 试验数据的下限值曲线如式 (C. 5)和式 (C. 6) :

$$K_{Ic} = 36.5 + 3.084 \exp[0.036(T - RT_{NDT} + 56)] \dots\dots\dots (C. 5)$$

$$K_{Ia} = 29.5 + 1.344 \exp[0.026(T - RT_{NDT} + 89)] \dots\dots\dots (C. 6)$$

式中 RT_{NDT} 为辐照后材料的参考无塑性转变温度, 单位为摄氏度 (°C)。
 K_{Ic} 和 K_{Ia} 下限值曲线如图C. 1所示, 但 K_{Ic} 和 K_{Ia} 的最高值不应大于 $220 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 即上平台断裂韧度为 $220 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。



图C. 1 核压力容器用铁素体钢断裂韧度下限值

式 (C. 5)和 (C. 6) 也可写为式 (C. 7)和 (C. 8) :

$$K_{Ic} = 36.5 + 23.16 \exp[0.036(T - RT_{NDT})] \dots\dots\dots (C. 7)$$

$$K_{Ia} = 29.5 + 13.59 \exp[0.026(T - RT_{NDT})] \dots\dots\dots (C. 8)$$

根据辐照监测试样来确定 RT_{NDT} , 该监测试样应按ASTM-E185标准的监测技术进行辐照。
无法取得有效的监测数据时, 可按ASME标准提供的在290°C下 RT_{NDT} 经辐照后的变化倾向曲线, 来估计中子辐照对 K_{Ic} 和 K_{Ia} 的影响。增量 ΔRT_{NDT} 值与中子辐照的剂量以及铁素体钢中的含Cu、P、Ni等有关。
NRC-RG1.99 (第2版, 1988) 提供了核容器材料辐照脆化估算的经验公式, 包括无辐照监督数据时和有辐照监督数据时材料 RT_{NDT} 的估算式, 此 RT_{NDT} 称为调整参考无塑性转变温度 ART (Adjusted Reference Temperature), 代入式 (C. 7)、(C. 8)就可得到所需的 K_{Ic} 和 K_{Ia} , 如式 (C. 9):

$$ART = RT_{NDT} + \Delta RT_{NDT} + M \dots\dots\dots (C. 9)$$

式中：

RT_{NDT} ——未经辐照时的参考无塑性转变温度；

ΔRT_{NDT} ——辐照脆化引起的参考温度的提高量；

M ——考虑初始 RT_{NDT} 及 ΔRT_{NDT} 估算误差而给的裕度，单位为摄氏度（℃），按（C. 10）计算：

$$M = 2\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_{\Delta}^2} \dots\dots\dots \text{(C. 10)}$$

式（C. 10）中， σ_1 为初始 RT_{NDT} 的标准差，由原材料精确测量时所获得的数值的分散带确定，无

此数据时可取10℃或12℃； σ_{Δ} 为初始 ΔRT_{NDT} 的标准差，对焊缝可取12℃，对母材取9℃，但其值不超

过 ΔRT_{NDT} 的一半，按式（C. 11）计算：

$$\Delta RT_{\text{NDT}} = (CF)f^{(0.28-0.10f)} \dots\dots\dots \text{(C. 11)}$$

式（C. 11）中， CF 为化学成分影响系数，单位为摄氏度（℃），是Cu和Ni含量的函数，焊缝及母材可分别查表C. 1及表C. 2； f 为评定点的快中子（ $E>1\text{MeV}$ ）的注量，单位为（ 10^{19}n/cm^2 ）。

如果需要知道容器壁内距内壁 x 英寸处的 ΔRT_{NDT} ，则式（C. 11）中的 f 需要代入 x 处的 f 值， x 英寸处的 f 值 f_x 与容器内表面的 f 值 f_0 的关系为式（C. 12）：

$$f_x / f_0 = e^{-0.24x} \dots\dots\dots \text{(C. 12)}$$

式中：

x ——距内壁 x 英寸的距离。

表C. 1 焊缝金属化学成分影响系数 CF/℃

铜含量 wt%	镍含量/wt%						
	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
0	11	11	11	11	11	11	11
0.01	11	11	11	11	11	11	11
0.02	12	14	15	15	15	15	15
0.03	12	19	23	23	23	23	23
0.04	13	24	30	30	30	30	30
0.05	14	27	37	38	38	38	38
0.06	16	29	43	46	46	46	46
0.07	18	31	47	53	53	53	53
0.08	20	32	50	59	60	60	60
0.09	22	34	52	64	68	68	68
0.10	24	36	54	68	74	75	75
0.11	27	38	56	72	80	82	82
0.12	29	40	57	75	85	89	89
0.13	32	42	59	77	90	96	98
0.14	34	44	61	79	93	101	104
0.15	37	47	62	81	97	106	111
0.16	39	49	64	83	99	111	117
0.17	42	51	66	84	102	115	123

表C.1 (续)

铜含量 wt%	镍含量/wt%						
	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
0.18	44	53	68	86	104	119	128
0.19	46	56	70	87	106	122	132
0.20	49	58	72	89	108	124	136
0.21	51	60	74	91	109	127	140
0.22	54	62	76	93	111	129	143
0.23	56	65	78	94	113	131	146
0.24	58	67	80	96	114	133	149
0.25	61	70	82	98	116	135	151
0.26	63	72	84	100	118	137	153
0.27	66	74	86	102	120	138	156
0.28	68	77	89	104	121	139	158
0.29	71	79	91	106	123	141	159
0.30	73	81	93	108	125	143	161
0.31	76	84	96	110	127	144	163
0.32	78	86	97	112	128	146	164
0.33	80	89	100	114	130	148	166
0.34	83	91	102	116	132	149	168
0.35	85	93	104	118	134	151	169
0.36	88	96	106	120	136	153	171
0.37	90	98	109	122	138	154	173
0.38	92	101	111	124	139	156	174
0.39	95	103	113	126	141	158	176
0.40	97	105	115	128	143	160	178

表C.2 母材金属化学成分影响系数 CF/℃

铜含量 wt%	镍含量/wt%						
	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
0	11	11	11	11	11	11	11
0.01	11	11	11	11	11	11	11
0.02	11	11	11	11	11	11	11
0.03	11	11	11	11	11	11	11
0.04	12	14	14	14	14	14	14
0.05	14	17	17	17	17	17	17
0.06	16	21	21	21	21	21	21
0.07	17	24	24	24	24	24	24
0.08	19	27	28	28	28	28	28
0.09	21	29	32	32	32	32	32
0.10	23	32	36	36	37	37	37
0.11	25	34	40	41	43	43	43
0.12	27	37	44	46	48	48	48
0.13	29	39	47	51	53	53	53
0.14	32	42	51	56	58	59	59
0.15	34	44	55	61	64	65	65
0.16	36	47	58	66	68	69	69
0.17	38	49	61	71	73	75	75

表C.2（续）

铜含量 wt%	镍含量/wt%						
	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
0.18	41	51	64	74	78	80	80
0.19	43	54	67	79	83	86	86
0.20	46	57	69	83	88	91	92
0.21	48	59	72	86	93	96	97
0.22	51	62	74	89	98	101	102
0.23	53	65	77	93	102	106	108
0.24	56	67	79	96	106	111	113
0.25	58	70	82	98	111	116	119
0.26	61	72	84	100	114	120	123
0.27	63	74	86	102	117	125	128
0.28	66	77	89	104	120	129	133
0.29	69	79	91	106	123	134	138
0.30	72	81	93	108	125	138	143
0.31	74	84	96	110	127	142	148
0.32	77	86	97	112	128	144	152
0.33	80	89	100	114	130	147	157
0.34	83	91	102	116	132	149	161
0.35	85	93	104	118	134	151	166
0.36	88	96	106	120	136	153	168
0.37	90	98	109	122	138	154	171
0.38	92	101	111	124	139	156	174
0.39	95	103	113	126	141	158	176
0.40	97	105	115	128	143	160	178

C.2.3 API579的下边界断裂韧度曲线法

ASME B&PV Section XI核容器专用的以 RT_{NDT} 为基础的断裂韧度曲线经转化后,可用于其他铁素体钢断裂韧度的估算,这就是下边界断裂韧度法,应将式(C.5)、(C.6)中的 RT_{NDT} 改为参考转变温度 T_{ref} , K_{Ia} 改为 K_{IR} , 如式(C.13)和(C.14):

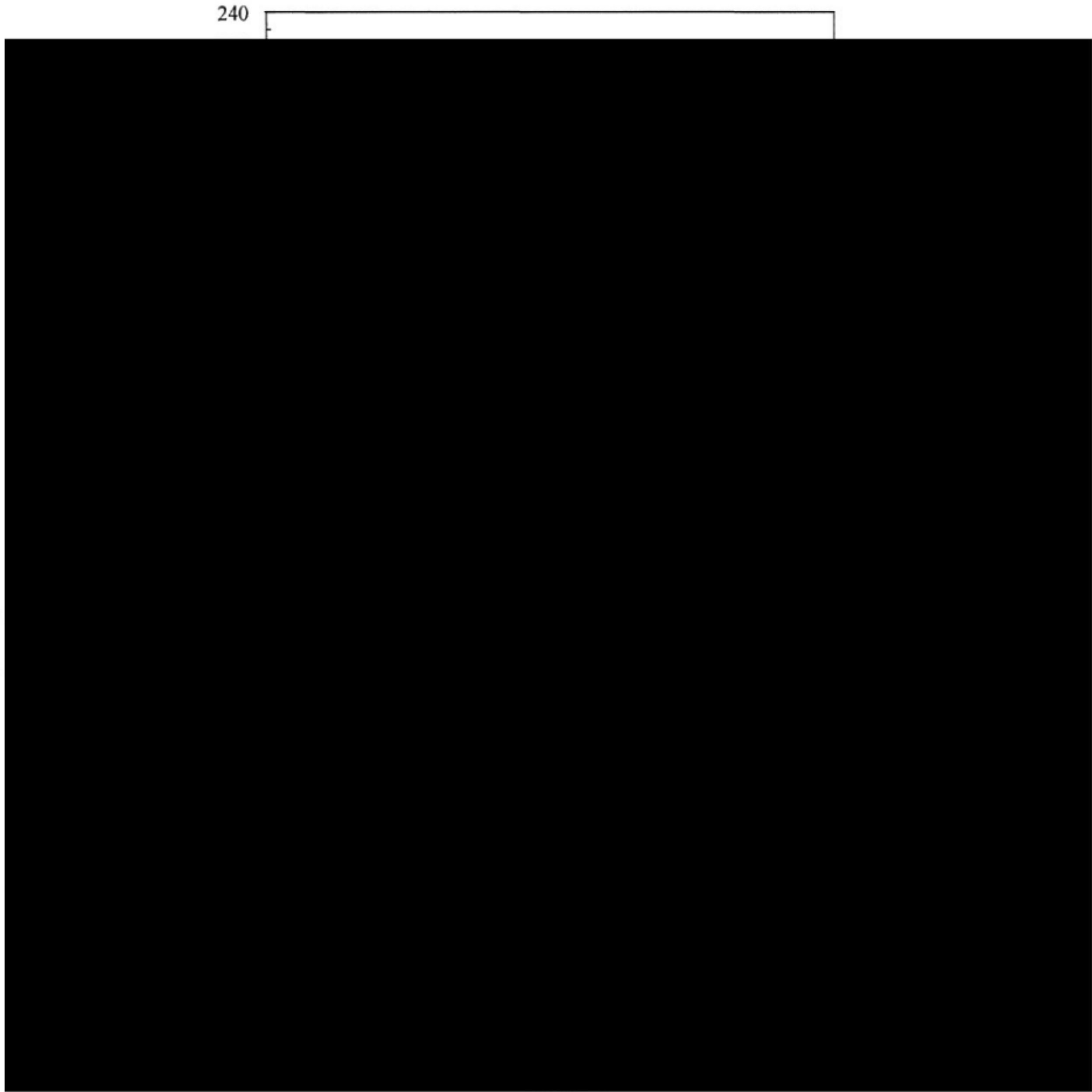
$$K_{Ic} = 36.5 + 3.084 \exp[0.036(T - T_{ref} + 56)] \dots\dots\dots (C.13)$$

$$K_{IR} = 29.5 + 1.344 \exp[0.026(T - T_{ref} + 89)] \dots\dots\dots (C.14)$$

式中: T_{ref} ——规定为材料夏比冲击功等于20.3J(碳钢)及27.1J(Cr-Mo钢)时的温度。

上述规律适用于碳钢板及其焊缝,也可用于不同热处理状态下的2.25Cr-1Mo钢。硫含量低于0.01%的碳钢和J系数不大于150的2.25Cr-1Mo钢的上平台断裂韧度仍取 $220\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$,但对高硫碳钢及其他化学成分用钢,可保守地取上平台断裂韧度为 $110\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。故对于使用环境不会引起材料脆化的材料或缺陷评定温度高于材料韧脆转变温度时,材料的断裂韧度处于上平台断裂韧度区,断裂韧度下限值的确

定较为简便。铁素体钢下边界断裂韧度曲线如图C. 2所示。下边界断裂韧度值很保守，用于评定不需再附加分安全系数。若希望在评定中采用平均断裂韧度值，不同标准差时的断裂韧度与下边界断裂韧度之比的解可参见API571表F. 6，从而求得所需失效概率的断裂韧度值。



入式(C. 15)可得 $P_f = 0.63$ ，可见 K_0 就是累积概率为63%的 K_{Jc} 断裂韧度，式(C. 15)只有一个自由度，有利于用小样本来拟合。

铁素体钢的断裂韧度—温度曲线形状相似，仅位置有所不同，其位置和温度的关系显示材料的断裂性能，高韧度钢具有低的转变温度。解理断裂的断裂韧度数据平均值即 $P_f = 50\%$ 的中值断裂韧度 $K_{Jc (med)}$ 与温度的关系可用式（C. 16）描述的Master曲线表示：

$$K_{Jc (med)} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)] \dots\dots\dots (C. 16)$$

式中：

$K_{Jc(\text{med})}$ —— K_{Jc} 的中位值；

T_0 ——参考转变温度，单位为摄氏度（℃）。

一旦测知 T_0 值，则其中值断裂韧度和温度的关系就已知。既然此时的 K_{Jc} 已知，则可由式（C. 15）

获得任一 P_f 值时的 K_{Jc} 值，从而可获得该材料在任一累积失效概率要求下的断裂韧度和温度的关系，即其断裂韧度概率分布与温度的关系。

T_0 的确定可采用单温度法或多温度法进行测试，参见ASTM 1921。当 T_0 已知，用式（C. 16）可作出

$K_{Jc(\text{med})} \sim T$ 曲线，得到不同失效概率 P_f 的 $K_{Jc} \sim T$ 曲线，如图C. 3所示。

任一 P_f 下的 $P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_{Jc} - 20}{K_0 - 20} \right)^4 \right]$ ， $P_f = 0.5$ 时为 $0.5 = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_{Jc(\text{med})} - 20}{K_0 - 20} \right)^4 \right]$ ， 两式相除得到

式（C. 17）：

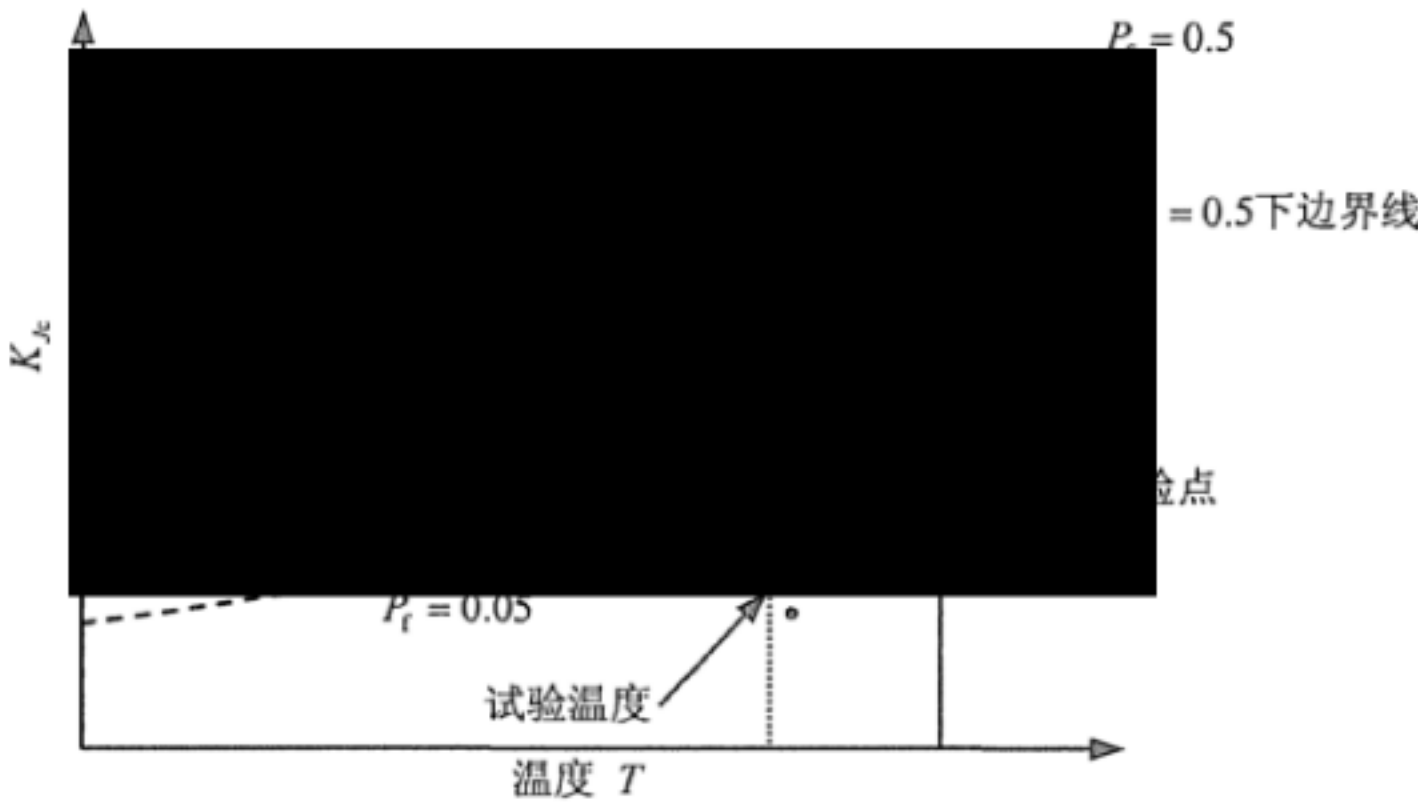
$$\frac{K_{Jc} - 20}{K_{Jc(\text{med})} - 20} = \left[\frac{\ln(1 - P_f)}{\ln(1 - 0.5)} \right]^{1/4} \dots\dots\dots \text{(C. 17)}$$

若希望得到 $P_f = 0.05$ 概率的下边界线，代入式（C. 13）可得 $\frac{K_{Jc} - 20}{K_{Jc(\text{med})} - 20} = 0.522$ ，即式（C. 18）：

$$K_{Jc}(P_f = 0.05) = 0.522 K_{Jc(\text{med})} + 9.56 \dots\dots\dots \text{(C. 18)}$$

因为 $K_{Jc(\text{med})} \sim T$ 曲线已知，从而可得到累积失效概率为5%的下边界线。同理可获得 $P_f = 0.95$ 的上

边界线或者其他 P_f ，例如 $P_f = 0.5\%$ 的更低的下边界线。



图C. 3 解理断裂韧度 master 曲线法

C.2.4.2 Master曲线法适用性

Master曲线适用于韧脆转变温度区,不适合下平台区,Master曲线随温度提高而越来越高,对上平台区则完全不适合。Master曲线法可应用的最低温度大约为 $T_0 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。上平台断裂韧度取决于材料,但一般在 $220\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 左右。

C.2.5 Master曲线法确定断裂韧度

C.2.5.1 ASTM E 1921中的Master曲线法

ASTM E1921-02“铁素体钢转变区参考温度 T_0 确定的标准试验方法”中,Master曲线由式(C.16)定义。由式(C.16)的形式可见曲线的形状与C.2.2及C.2.3的曲线均十分相似。

该方法适合于脆性解理断裂的断裂韧度的确定。通过转变温度 T_0 的确定取得不同失效概率(也包括失效概率为0.5的中位值)的 K_{Jc} 与温度之间的关系曲线可参见ASTM E1921(2002)标准。

C.2.5.2 BS 7910-99附录J.3的Master曲线法

C.2.5.2.1 T_{27J} 与 T_0 的关系

铁素体钢以冲击功等于27J定义的转变温度 T_{27J} 与ASTM E1921用断裂韧度 $K_{Jc}=100\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 定义的参考转变温度 T_0 之间的大致关系为式(C.19):

$$T_0 = T_{27J} - 18^{\circ}\text{C} (\pm 21^{\circ}\text{C}) \dots\dots\dots (\text{C. 19})$$

式中:

T_{27J} ——参考转变温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),试样冲击功等于27J时的转变温度。

C.2.5.2.2 断裂韧度的Master曲线估算

断裂韧度按式(C.20)计算:

$$K_{mat} = 19.93 + \{11.07 + 77.06 \exp[0.019(T - T_{27J} - 3)]\} \left(\frac{25}{t}\right)^{1/4} \left[\ln\left(\frac{1}{1 - P_f}\right)\right]^{1/4} \dots\dots\dots (\text{C. 20})$$

式中:

K_{mat} ——断裂韧度,单位为兆帕根号米($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$);

P_f ——失效概率;宜采用 $P_f = 0.05$ (即5%)。

若取 $P_f = 0.5$,及 $t = 25\text{ mm}$,则:

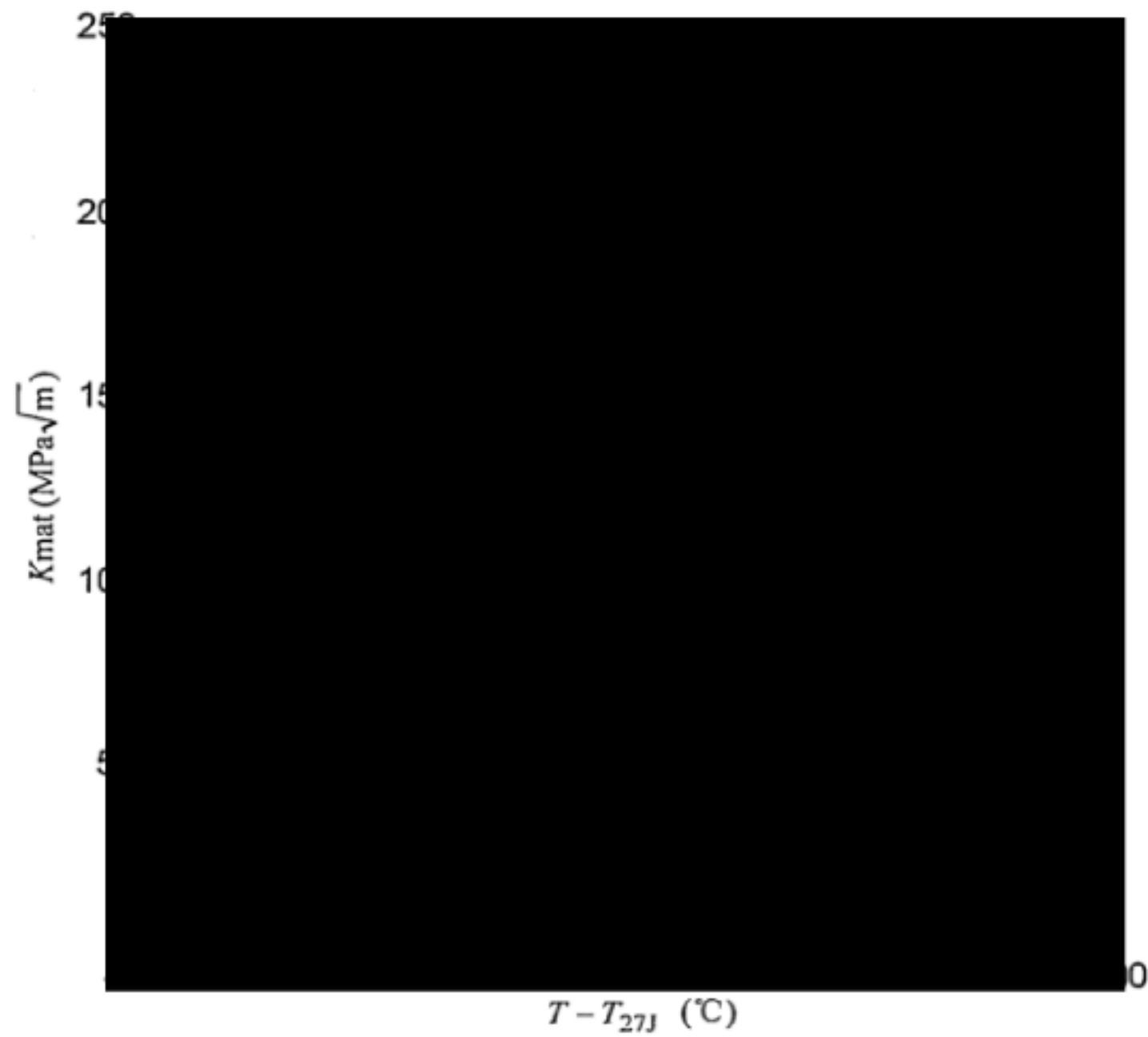
$$K_{mat(\text{med})} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_{27J} - 3)] \dots\dots\dots (\text{C. 21})$$

比较式(C.21)和式(C.16),得:

$$T_0 = T_{27J} + 3 = T_{27J} - 18 + 23\text{ }^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots (\text{C. 22})$$

比较式(C. 19)和式(C. 22)，可见API 579附录J3的式(E. 16)采用的 T_0 估算十分保守，即取式(C. 19)转换式的上限，比转变温度平均值提高了21℃。BS 7910附录J3的这一近似保守法，只采用了Master曲线的形式，通过 T_{27J} 与 T_0 的保守换算关系，取代了ASTM E1921中规定的 T_0 测试要求。

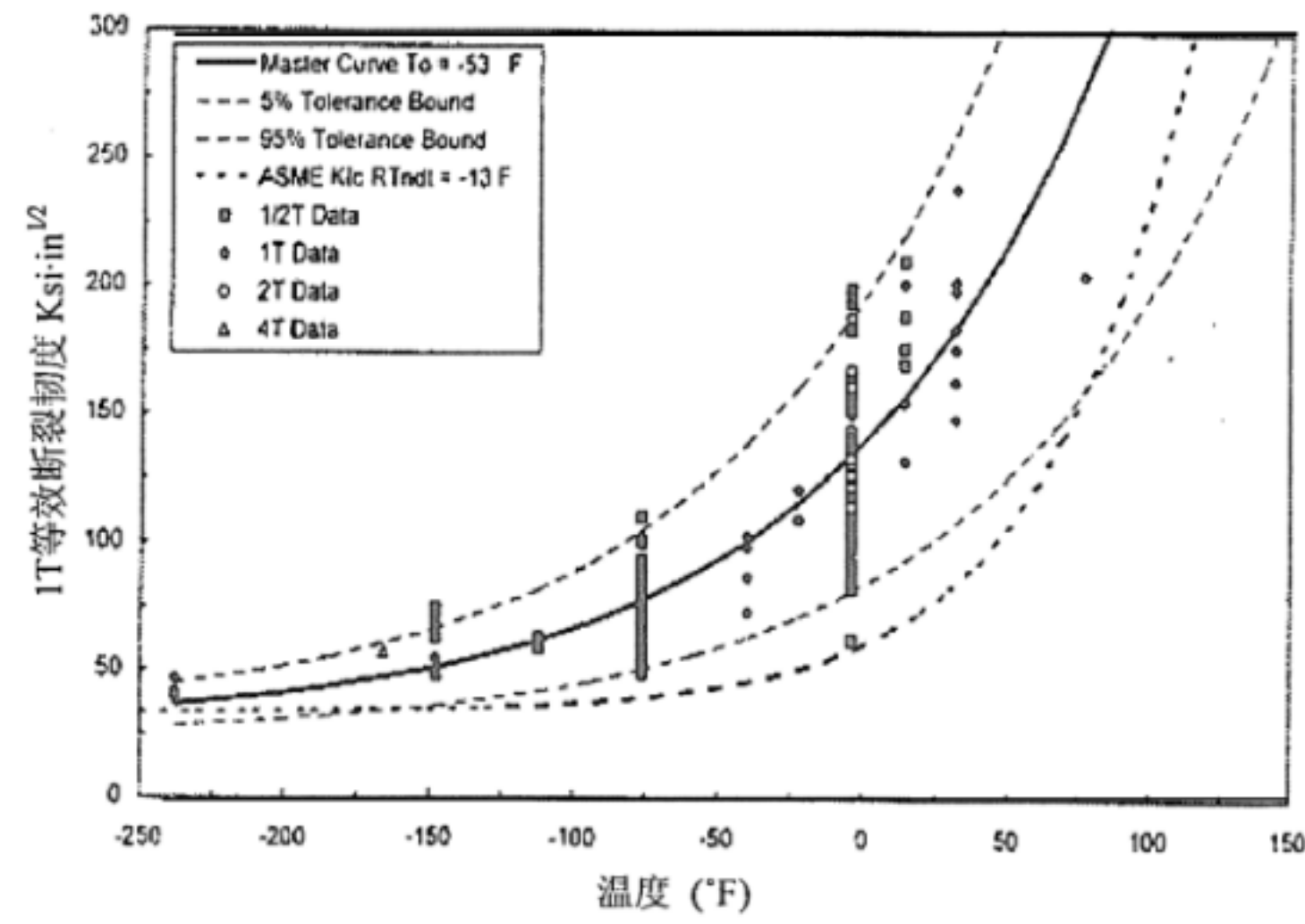
如果取 $P_f=0.05$ ，则不同厚度 t 的部件的 K_{mat} 下限值可由图C. 4列出的近似Master曲线查得。



图C. 4 失效概率为 5%的断裂韧度值的近似 Master 曲线

C. 2. 5. 3 部分钢的Master曲线

图C. 5列出了SA508 Class 3, JSW1 的Master曲线及实验断裂韧性，对于其他材料，曲线基本类似，仅 T_0 不同，列于表C. 3。

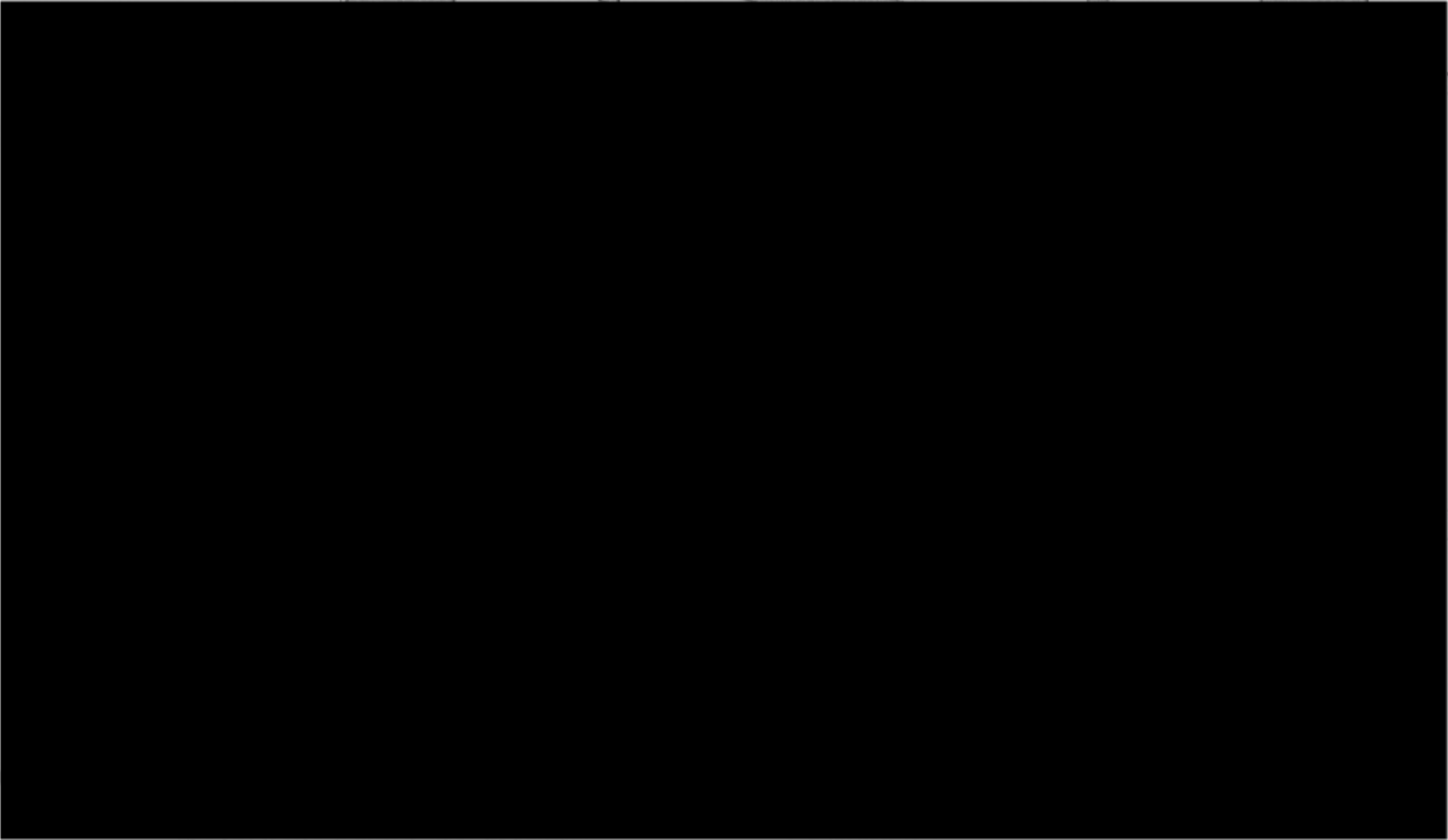


图C. 5 SA508 Class 3, JSW1 Master Curve 及断裂韧性

表C.3 Master 曲线中的 T_0

材料	T_0 (°C)
SA-508 Class 3, JSW2	-93
SA-508 Class 3(MPC Round Robin) JSW3	-107
SA-508 Class 3A, JSW4A	-83
SA-508 Class 3B, JSW4B	-50
SA-508 Class 2, JSW4C	-82
SA-33 Grade B Cl. 2, JSW4D	-87
SA-508 Class 1, JSW5	-112
SA-533 B Class 1 7HA	-66
SA-533 B Class 1 7HB	-69
SA-533 Class 1 8HA	-69
SA-533 Class 1 8HB	-86
SA-533 Class 1 8HC	-100
SA-533 Class 3 8HD	-53

注：Master曲线法确定断裂韧度，SINTAP称之为最大似然（MML）法，API579称之为概率断裂韧度分布法



量与内壁剂量

.... (C. 23)

) :

.... (C. 24)

C. 2. 6. 1 铁素体核容器钢断裂韧度

按式 (C. 25) 计算：

$$K_{Ia} = 29.43 + 1.355 \exp[0.0261(T - RT_{NDT}) + 2.32] \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{ (C. 25)}$$

C. 2. 6. 2 铁素体钢管道断裂韧度

铁素体钢管道断裂韧度如表C. 4。

表C.4 碳钢管道母材及焊缝的断裂韧度

材料类别	温度区域 ^c	裂纹方向	$J_{Ic}/(KJ/m^2)$	$K_{Ic}/(MPa\sqrt{m})$
1 ^a	大于等于上平台	周向	105	150
1	低于上平台	周向	7.9	42
2 ^b	大于等于上平台	周向	61.3	115
2	低于上平台	周向	7.9	42
1, 2	大于或等于上平台	轴向	52.5	106
1, 2	低于上平台	轴向	7.9	42

^a 1类材料： $R_{p0.2}\leq 276$ MPa的碳钢管母材及E 7015、E 7016或E 7018型焊条（ $R_{p0.2}\approx 500$ MPa，在-29 时的 $A_{KV}\geq 27$ J）焊缝。

^b 2类材料：所有 $R_m\leq 552$ MPa用SMAW或SAW焊接的其他铁素体钢管道。

^c 上平台温度可近似地取为93℃。

C.2.6.3 镍基合金及奥氏体不锈钢堆焊层的断裂韧度

镍基合金及奥氏体不锈钢堆焊层的断裂韧度如表C.5和表C.6：

表C.5 未辐照不锈钢堆焊层的断裂韧度

温度/℃	$J_{Ic}/(MJ/m^2)$	$K_{Ic}/(MPa\sqrt{m})$
20	157	186
120	132	167
288	75	122

表C.6 Inconel 182 的断裂韧度下限值

温度/℃	$J_{Ic}/(MJ/m^2)$	$K_{Ic}/(MPa\sqrt{m})$
20	180	200
285	200	205

Inconel 182焊缝在常温时 J_{Ic} 值换算的 $K_{Ic}=154 MPa\sqrt{m}$ 。

C.2.6.4 奥氏体不锈钢断裂韧度

无法获得奥氏体不锈钢的断裂韧度值时，若确信没有σ相脆化及韧脆转变温度，API 579 建议其断裂韧度可取为 $220 MPa\sqrt{m}$ （母材）及 $132 MPa\sqrt{m}$ （焊缝）。

在288℃时， K_{Ic} 取值如下：

——304 及 316 等母材： $K_{Ic} = 350 MPa\sqrt{m}$ ；

——SMAW 焊缝： $K_{Ic} = 182 MPa\sqrt{m}$ ；

——SAW 焊缝： $K_{Ic} = 117 MPa\sqrt{m}$ 。

室温断裂韧度不比288℃时的低。
TIG焊缝的断裂韧度要远高于SMAW及SAW的焊缝的断裂韧度，略低于母材的断裂韧度。

C.3 ASME B&PV Section XI推荐的裂纹疲劳扩展速率

C.3.1 奥氏体不锈钢在大气中的裂纹疲劳扩展速率

奥氏体不锈钢（包括铸造和锻造不锈钢及其焊缝）在大气中的表面裂纹和埋藏裂纹疲劳扩展速率

<div></div>				(C. 26)
				(C. 27)
				(C. 28)
				埋藏缺陷)
				Pa√m)
				$K_I^{\max} / 3$
				$- K_I^{\min}$
				max
$1 \geq R_\sigma \geq 0$	3.07	$9.73 \times 10^{-8} (2.88 - R_\sigma)^{-3.07}$	$K_I^{\max} - K_I^{\min}$	
表中 $\sigma_f = (R_{p0.2} + R_m) / 2$				

C.3.2.2 暴露于轻水堆水环境中材料疲劳裂纹扩展速率的推荐数据

对暴露于轻水堆水环境中材料疲劳裂纹扩展速率，若 $R_\sigma < 0$ 则取 $R_\sigma = 0$ 。疲劳裂纹扩展的行为在高 ΔK_I 段和低 ΔK_I 段不同，当 ΔK_I 大于表C. 8中的 ΔK_{Is} 时称为高 ΔK_I ，反之称为低 ΔK_I 。

表C. 9给出了SA-533 Grade B Class 1，SA-508 Class 2和SA-508 Class 3，暴露于水环境中材料疲劳裂纹扩展常数A和n的值。

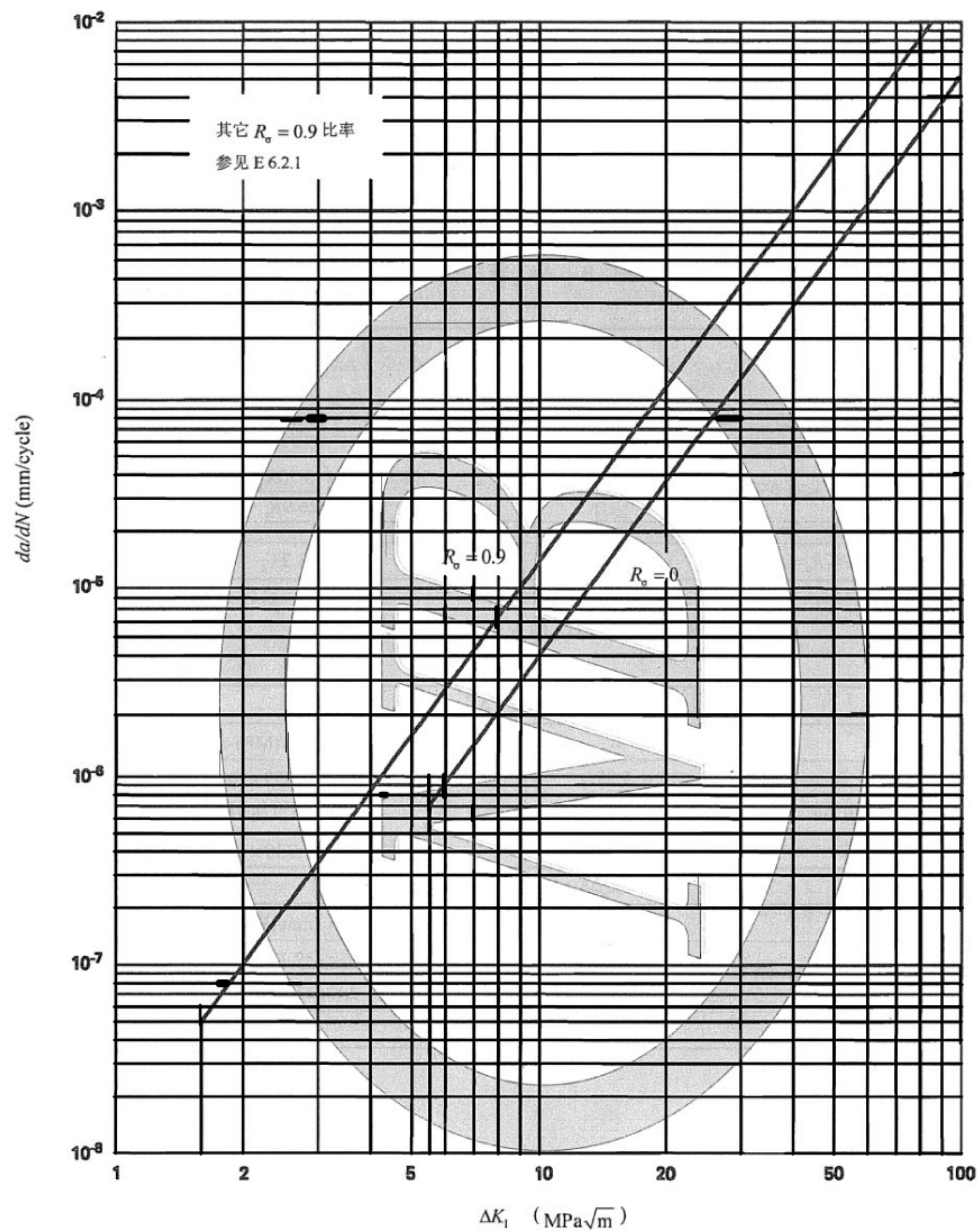
图C. 7给出了暴露于水环境中碳钢和低合金钢疲劳裂纹扩展速率曲线。

表C. 8 ΔK_{Is} 值的确定

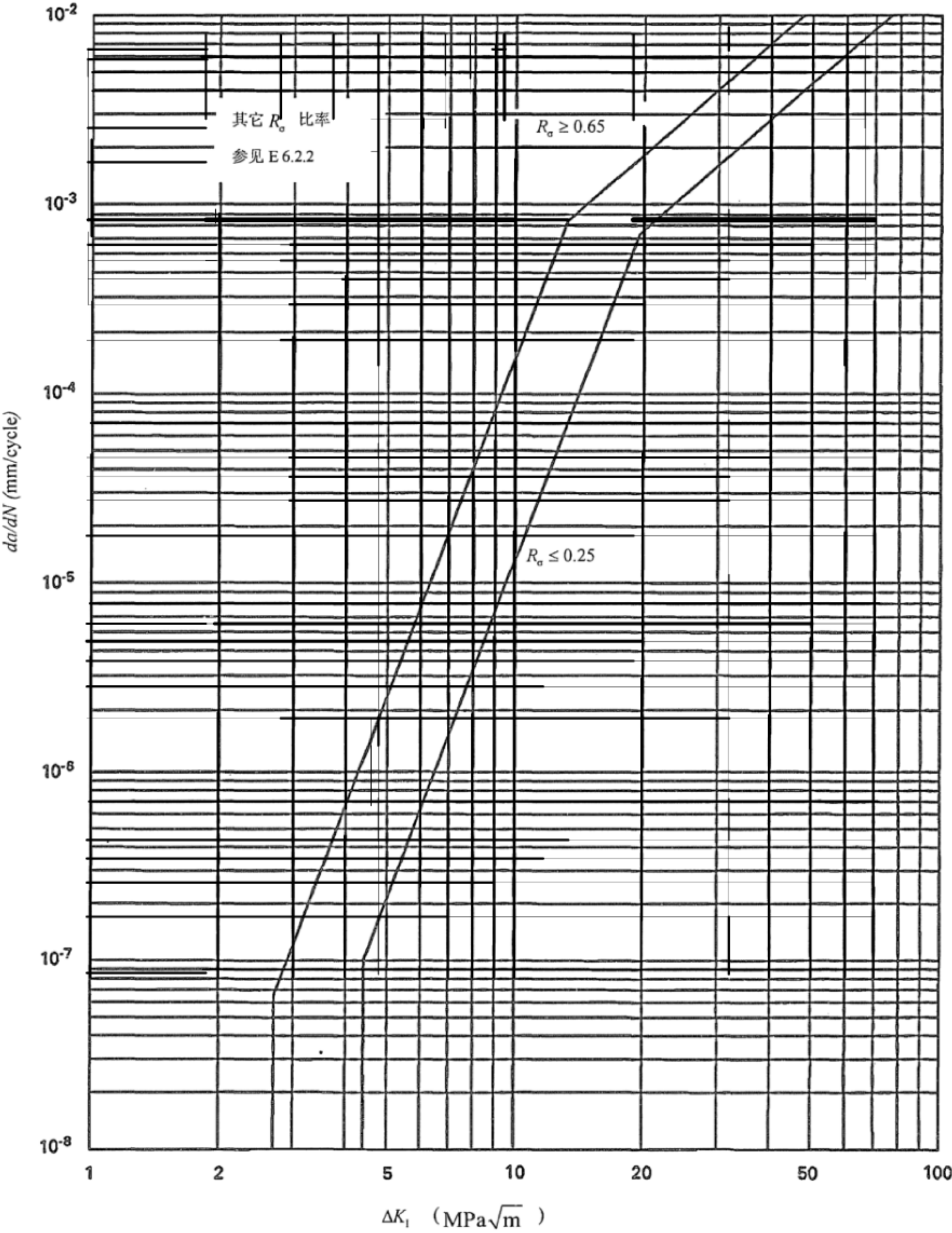
R_σ	$\Delta K_{Is}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
$0 \leq R_\sigma \leq 0.25$	19.49
$0.25 < R_\sigma < 0.65$	$19.49 \left(\frac{3.75R_\sigma + 0.06}{26.9R_\sigma - 5.725} \right)^{0.25}$
$0.65 \leq R_\sigma \leq 1$	13.23

表C. 9 水环境中 R_σ 、A和n的值

低 ΔK_I ($\Delta K_I < \Delta K_{Is}$)		
R_σ	n	$A(\text{mm}/(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^n)$
$0 \leq R_\sigma \leq 0.25$	5.95	1.479×10^{-11}
$0.25 < R_\sigma < 0.65$	5.95	$1.479 \times 10^{-11}(26.9R_\sigma - 5.725)$
$0.65 \leq R_\sigma \leq 1$	5.95	1.739×10^{-10}
高 ΔK_I ($\Delta K_I > \Delta K_{Is}$)		
R_σ	n	$A(\text{mm}/(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^n)$
$0 \leq R_\sigma \leq 0.25$	1.95	2.135×10^{-6}
$0.25 < R_\sigma < 0.65$	1.95	$2.135 \times 10^{-6}(3.75R_\sigma + 0.06)$
$0.65 \leq R_\sigma \leq 1$	1.95	5.337×10^{-6}



图C.6 暴露于空气环境（埋藏缺陷）中碳钢和低合金钢疲劳裂纹扩展速率曲线



图C.7 暴露于水环境中碳钢和低合金钢疲劳裂纹扩展速率曲线

附 录 D
(规范性附录)
应力强度因子 K_I 的计算

D.1 概述

本附录给出了几种典型结构缺陷尖端部位应力强度因子 K_I 的计算式, 以及 K_I 中函数 f 的计算值。适用于平面缺陷的断裂评定, 也适用于疲劳裂纹扩展分析中有关 ΔK 、 ΔK_a 、 ΔK_c 的计算。

D.2 计算 K_I 时所需裂纹尺寸和应力值的确定

计算 K_I 时所输入的裂纹尺寸 a 、 c 和应力值 σ_m 、 σ_b 或者 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b , 应按本标准第6章和第7章的规定确定:

- 当输入的应力为 σ_m 和 σ_b 时, 则得到总应力强度因子 K_I ;
- 当输入的应力为 P_m 和 P_b 时, 则得到一次应力强度因子 K_I^P ;
- 当输入的应力为 Q_m 和 Q_b 时, 则得到二次应力强度因子 K_I^S 。

D.3 疲劳评定 ΔK 的确定

确定疲劳评定所需应力强度因子变化范围 ΔK 时, 本附录所列 K_I 的几种计算式中的符号 σ_m 、 σ_b 、 P_m 、 P_b 、 Q_m 、 Q_b 分别变换为: $\Delta\sigma_m$ 、 $\Delta\sigma_b$ 、 ΔP_m 、 ΔP_b 、 ΔQ_m 、 ΔQ_b 。

D.4 几种典型结构的 K_I 计算式

D.4.1 含长 $2a$ 穿透裂纹的板壳 (板宽 $2w$ 、板长 $2L$) 按式 (D.1) 计算:

$$K_I = \sqrt{\pi a / 1000} (\sigma_m + \sigma_b) \dots\dots\dots (D.1)$$

适用范围: $a/w \leq 0.15$, $a/L \leq 0.15$ 。

D.4.2 含半椭圆表面裂纹 $a \times 2c$ 的板壳 (图D.1, 板宽 $2w$ 、板长 $2L$ 、板厚 t) 按式 (D.2) 计算:

$$\begin{aligned} \text{在A点} \quad K_I &= \sqrt{\pi a / 1000} (\sigma_m f_m^A + \sigma_b f_b^A) \\ \text{在B点} \quad K_I &= \sqrt{\pi a / 1000} (\sigma_m f_m^B + \sigma_b f_b^B) \end{aligned} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

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

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

$$f_m^B = \left\{ \left[1.1 + 0.35 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] \left(\frac{a}{c} \right)^{0.5} \right\} f_m^A ;$$

$$f_b^B = \left[1 - (0.34 + 0.11a/c) \frac{a}{t} \right] f_m^B .$$

适用范围： $a/t \leq 0.8$ ， $a/c \leq 1.0$ ， $c/L \leq 0.15$ ， $c/w \leq 0.15$ 。

注： f_m^A 、 f_b^A 的值可由表D-1和D-2分别查出。



图D.1 表面裂纹A点和B点位置

D.4.3 含椭圆埋藏裂纹 $2a \times 2c$ 的板壳（图D.2，板宽 $2w$ 、板厚 t ）按式（D.3）计算：

$$\begin{aligned} \text{在A点} \quad K_I &= \sqrt{\pi a / 1000} (\sigma_m f_m^A + \sigma_b f_b^A) \\ \text{在B点} \quad K_I &= \sqrt{\pi a / 1000} (\sigma_m f_m^B + \sigma_b f_b^B) \end{aligned} \quad \text{..... (D.3)}$$

式中：

$$f_m^A = \left(1.01 - 0.37 \frac{a}{c} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{2a/t}{1 - 2e/t} \right)^{1.8} \left[1 - 0.4 \frac{a}{c} - \left(\frac{e}{t} \right)^2 \right] \right\}^{-0.54} ;$$

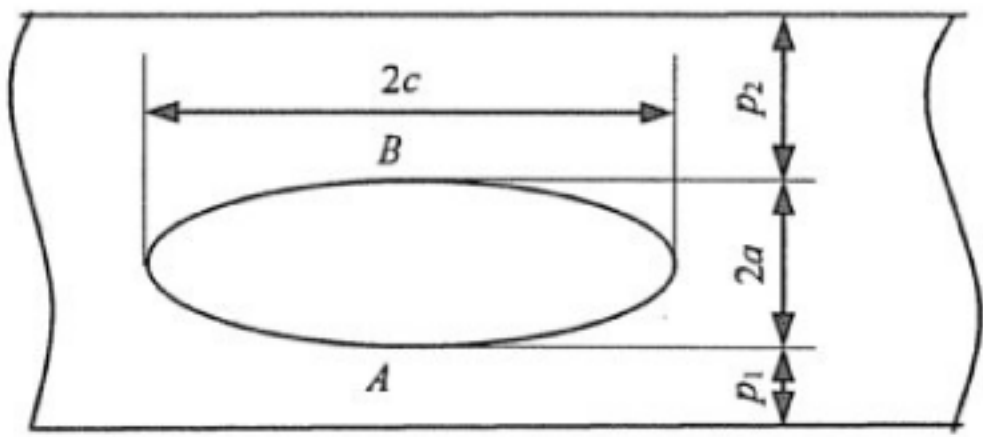
$$f_b^A = \{ 2e/t + a/t + 0.34a^2/(ct) \} f_m^A ;$$

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

$$f_b^B = \{ 2e/t - a/t - 0.34a^2/(ct) \} f_m^B .$$

e ——埋藏裂纹中心与厚板中心的偏移量。

适用范围： $a/t \leq 0.45(1 - 2e/t)$ ， $a/c \leq 1.0$ ， $c/w \leq 0.15$ 。



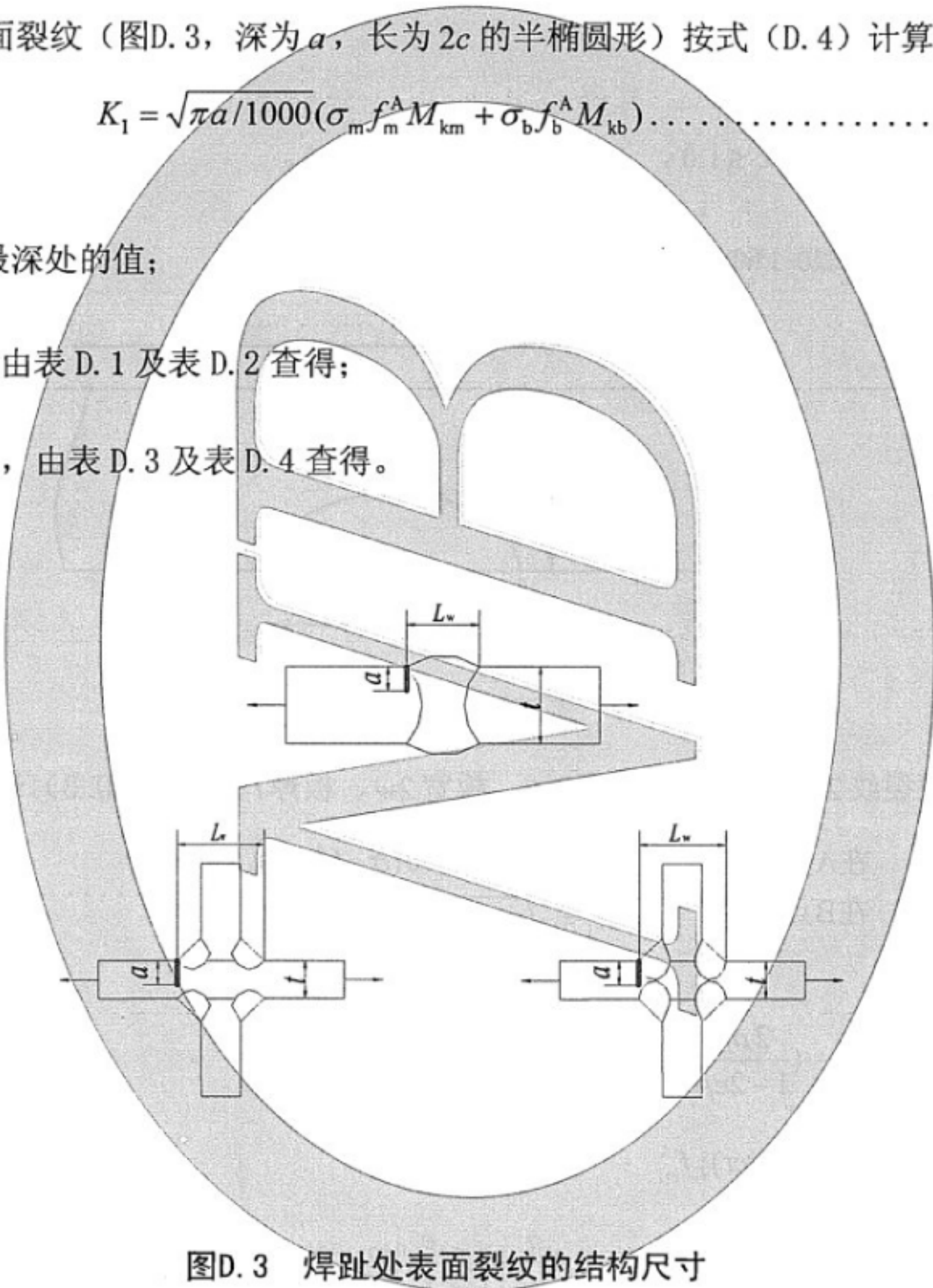
图D.2 埋藏裂纹 A 点和 B 点位置

D.4.4 焊趾处的表面裂纹（图D.3，深为 a ，长为 $2c$ 的半椭圆形）按式（D.4）计算：

$$K_I = \sqrt{\pi a / 1000} (\sigma_m f_m^A M_{km} + \sigma_b f_b^A M_{kb}) \dots \dots \dots (D.4)$$

式中：

- K_I 是裂纹最深处的值；
- f_m^A 、 f_b^A ，由表 D.1 及表 D.2 查得；
- M_{km} 、 M_{kb} ，由表 D.3 及表 D.4 查得。



图D.3 焊趾处表面裂纹的结构尺寸

D.4.5 十字接头中的焊根裂纹（见图D.4）按式（D.5）计算：

$$K_I = \sigma_m M_k \sqrt{(\pi a / 1000) \sec(\pi a / L_w)} \dots \dots \dots (D.5)$$

式中 M_k 值由表D.5查得。

适用范围： $0.2 \leq h_w / t \leq 1.2$ ， $0.0 \leq 2a / L_w \leq 0.7$ 。

图D.4

D.4.6 仅受内压圆筒的四分之一圆形接管

算:

$$K_I = P_m \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (D.6)$$

式中 f_{cc} 由表D.6查

适用范围: $a/t \leq 0$

D.4.7 仅受内压圆筒接管

$$K_I = M_\sigma F_{ch} P_e \frac{\sqrt{\pi a}}{\Phi \sqrt{1000}} \left[\left(\frac{4}{\pi} + \frac{ac}{2t_{in} R_{in}} \right) / \left(\frac{4}{\pi} + \frac{ac}{t_{in} R_{in}} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

a 、 c ——拐角裂纹在接管侧和圆筒侧的裂纹长度;

R_{in} ——接管内半径;

Φ ——椭圆裂纹形状因子, 其经验表达式: $\begin{cases} \Phi = \sqrt{1 + 1.46(a/c)^{1.65}} & \text{当 } a/c \leq 1.0 \text{ 时} \\ \Phi = \sqrt{1 + 1.46(c/a)^{1.65}} & \text{当 } a/c > 1.0 \text{ 时} \end{cases}$;

M_o ——应力集中修正因子, 可用 $M_o = K_t/3$ 计算。其中 K_t 是接管拐角的弹性应力集中系数, 应优

先选用实测值, 无实测值时用式 (D.8) 计算:

$$K_t = \frac{2 + 2 \frac{D_n}{D_m} \left(\frac{D_n t_n}{D_m t} \right)^{1/2} + 1.25 \frac{D_n}{D_m} \left(\frac{D_m}{t} \right)^{1/2}}{1 + \frac{t_n}{t} \left(\frac{D_n t_n}{D_m t} \right)^{1/2}} \dots\dots\dots (D.8)$$

式 (D.8) 中: D_m ——圆筒平均直径; t_n ——接管壁厚。

式 (D.7) 中的 F_{ch} 是接管拐角裂纹的边界修正因子, 可用式 (D.9) 计算:

$$F_{ch} = [M_1 + M_2(a_{45}/t_{45})^2 + M_3(a_{45}/t_{45})^4] g_1 g_2 g_3 g_4 f_\varphi \dots\dots\dots (D.9)$$

式中:

—— $f_\varphi = [(a/c)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi]^{1/4}$ (拐角裂纹在筒内壁处 C 点 (图 D.5) 的 $\varphi = 0$, 在接管内壁处的

B 点的 $\varphi = \pi/2$);

—— a_{45} 和 t_{45} 分别为接管拐角平分线方向的拐角裂纹深度和圆筒壁厚;

——对 $a/c \leq 1.0$:

$$\bullet \quad M_1 = 1.13 - 0.09 a/c, \quad M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + a/c}, \quad M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + a/c} + 14(1 - a/c)^{24};$$

$$\bullet \quad g_1 = 1 + [0.1 + 0.35(a_{45}/t_{45})^2](1 - \sin \varphi)^2;$$

$$\bullet \quad g_2 = \frac{1 + 0.358\lambda + 1.425\lambda^2 - 1.578\lambda^3 + 2.156\lambda^4}{1 + 0.13\lambda^2};$$

$$\bullet \quad g_3 = (1 + 0.04a/c)[1 + 0.1(1 - \cos \varphi)^2][0.85 + 0.15(a_{45}/t_{45})^{1/4}];$$

$$\bullet \quad g_4 = 1 - 0.7(1 - a_{45}/t_{45})(a/c - 0.2)(1 - a/c)。$$

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

——对 $a/c > 1.0$:

$$\bullet \quad M_1 = (c/a)^{1/2}(1 + 0.04c/a), \quad M_2 = 0.2(c/a)^4, \quad M_3 = -0.1(c/a)^4;$$

$$\bullet \quad g_1 = 1 + [0.1 + 0.35(c/a)(a_{45}/t_{45})^2](1 - \sin \varphi)^2;$$

$$\bullet \quad g_2 \text{ 与 } a/c \leq 1 \text{ 时的 } g_2 \text{ 相同};$$

$$\bullet \quad g_3 = (1.13 - 0.09c/a)[1 + 0.1(1 - \cos \varphi)^2][0.85 + 0.15(a_{45}/t_{45})^{1/4}];$$

$$\bullet \quad g_4 = 1。$$

由表 D.7、D.8、D.9 和 D.10 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 之值则可得到 F_{ch} 。

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

表D.1 半椭圆表面裂纹的 f_m^A

a/t	a/c										
	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.00	1.122	1.103	1.059	1.007	0.951	0.896	0.843	0.792	0.746	0.702	0.663
0.10	1.180	1.127	1.075	1.018	0.959	0.902	0.847	0.796	0.748	0.704	0.664
0.20	1.367	1.199	1.122	1.051	0.983	0.920	0.860	0.806	0.755	0.709	0.668
0.30	1.660	1.320	1.199	1.104	1.022	0.948	0.881	0.821	0.767	0.718	0.674
0.40	2.111	1.492	1.301	1.175	1.072	0.985	0.908	0.841	0.782	0.729	0.681
0.50	2.825	1.717	1.424	1.258	1.132	1.028	0.940	0.865	0.799	0.741	0.690
0.60	4.033	1.999	1.561	1.349	1.195	1.074	0.974	0.889	0.817	0.755	0.700
0.70	6.355	2.340	1.706	1.441	1.259	1.119	1.006	0.913	0.834	0.767	0.709

表D.2 半椭圆表面裂纹的 f_b^A

a/t	a/c										
	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.00	1.122	1.103	1.059	1.007	0.951	0.896	0.843	0.792	0.746	0.702	0.663
0.10	1.047	0.992	0.944	0.892	0.839	0.787	0.738	0.692	0.650	0.611	0.575
0.20	1.055	0.922	0.855	0.795	0.740	0.688	0.640	0.596	0.556	0.520	0.488
0.30	1.124	0.877	0.781	0.708	0.646	0.592	0.544	0.501	0.464	0.431	0.401
0.40	1.261	0.847	0.711	0.622	0.553	0.495	0.447	0.405	0.370	0.339	0.313
0.50	1.497	0.822	0.637	0.531	0.454	0.394	0.345	0.306	0.273	0.246	0.223
0.60	1.914	0.793	0.552	0.430	0.347	0.285	0.237	0.200	0.171	0.148	0.130
0.70	2.725	0.756	0.453	0.316	0.228	0.167	0.122	0.089	0.065	0.047	0.034
0.80	4.676	0.704	0.338	0.189	0.100	0.040	0.000	-0.027	-0.046	-0.058	-0.065

表D.3 焊趾处表面裂纹的 M_{km}

L_w/t	a/t																	
	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

表D.3 (续)

L_w/t	a/t																	
	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
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.4 焊趾处表面裂纹的 M_{kb}

L_w/t	a/t																	
	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	
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.5 十字接头的焊根裂纹的 M_k

h_w / t	$2a / L_w$							
	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70
0.20	0.741	0.773	0.805	0.837	0.869	0.901	0.933	0.965
0.30	0.755	0.780	0.806	0.832	0.858	0.884	0.910	0.935
0.40	0.743	0.762	0.781	0.799	0.818	0.837	0.856	0.874
0.50	0.720	0.732	0.744	0.756	0.769	0.781	0.793	0.805
0.60	0.690	0.697	0.704	0.711	0.718	0.725	0.732	0.739
0.70	0.658	0.661	0.664	0.667	0.670	0.674	0.677	0.680
0.80	0.626	0.626	0.626	0.627	0.627	0.627	0.628	0.628
0.90	0.594	0.592	0.591	0.589	0.588	0.586	0.584	0.583
1.00	0.563	0.560	0.558	0.555	0.552	0.549	0.546	0.543
1.10	0.534	0.531	0.527	0.523	0.520	0.516	0.512	0.509
1.20	0.507	0.503	0.499	0.495	0.491	0.487	0.483	0.479

表D.6 f_{cc} 的取值

a_{45}/t_{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
0.10	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
0.20	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
0.30	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
0.40	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
0.50	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
0.60	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
0.70	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
0.80	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.8 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.9 受内压接管拐角焊缝的 F_{ch}/g_2 (容器内壁处 $\varphi=\pi/2$)

a_{45}/t_{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	0.814	0.795

附录 E
(资料性附录)
评定算例

E.1 反应堆压力容器评定算例

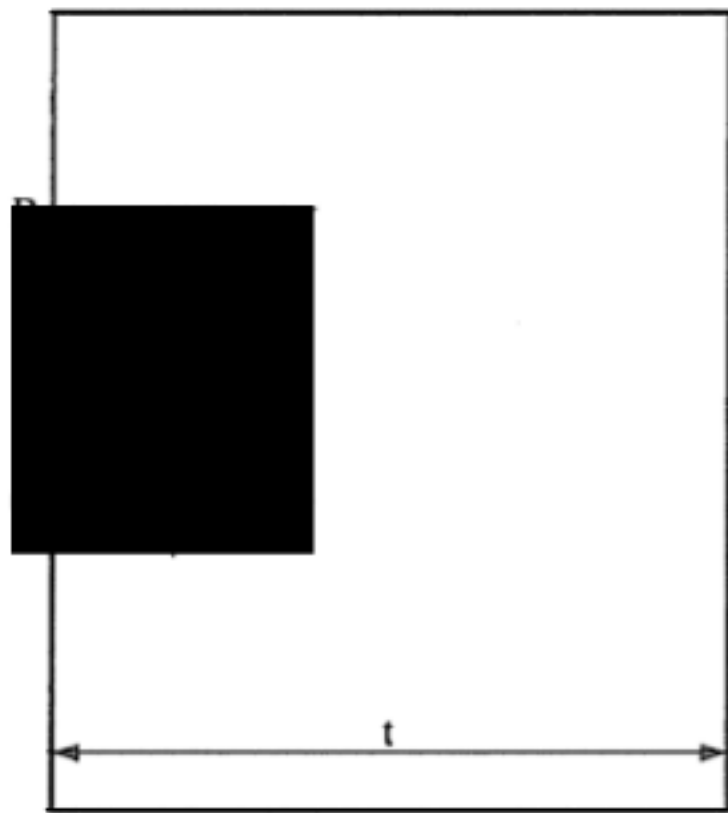
E.1.1 概述

某900MWe压水堆核电站反应堆压力容器（RPV）堆芯筒体，材料为 SA-508 Gr.3 Cl.1、内径 3987 mm、筒体壁厚207.5 mm、运行压力为15.5 MPa、运行温度290℃。在运行寿期内，长期受到高温、高压和强放射性的一回路冷却剂的影响。

假想在堆芯带区内存在轴向表面裂纹，缺陷尺寸 $a=19.5\text{mm}$ 、 $l=117\text{mm}$ ，其形状尺寸见图E. 1。

瞬态工况：正常工况选取反应堆升温降温，寿期内允许发生次数150次；事故工况选取具有热冲击性质的SB-LOCA瞬态作为载荷条件，寿期内允许发生次数5次。

分析中考虑辐照脆化效应对材料断裂韧性的影响。并按本标准第10章对其进行分析评定。



图E.1 假想裂纹形式与尺寸示意图

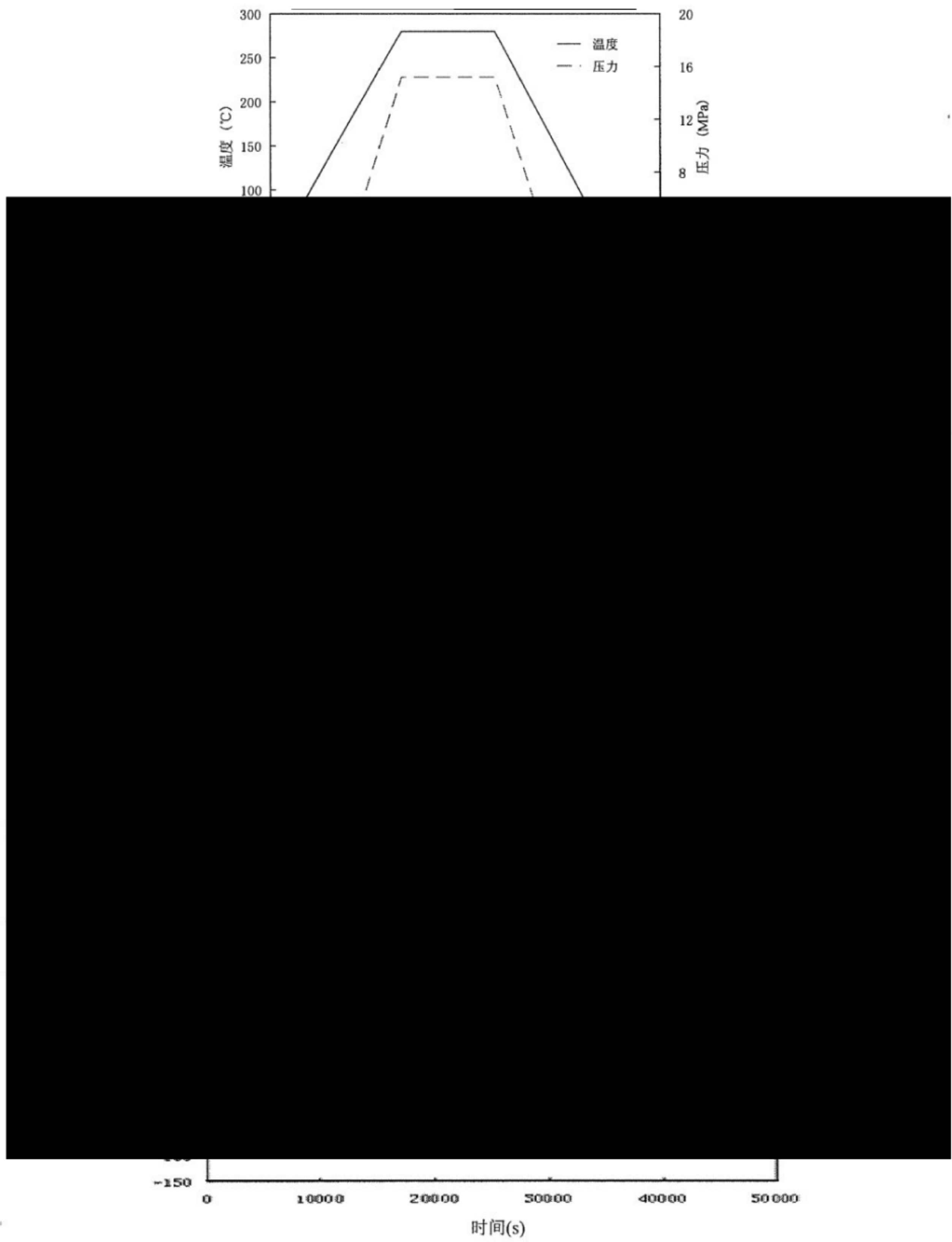
E.1.2 缺陷的表征

对RPV堆芯带区内存在的表面裂纹，按第6章进行规则化后，该轴向半椭圆形表面裂纹尺寸为 $a \times 2c = 19.5\text{mm} \times 117\text{mm}$ 。

E.1.3 载荷

确定评定寿期末的缺陷尺寸时，考虑核电站升温 and 降温工况，各150次，升温降温共同作为一个载荷循环，温度和压力变化情况如图E. 2所示。

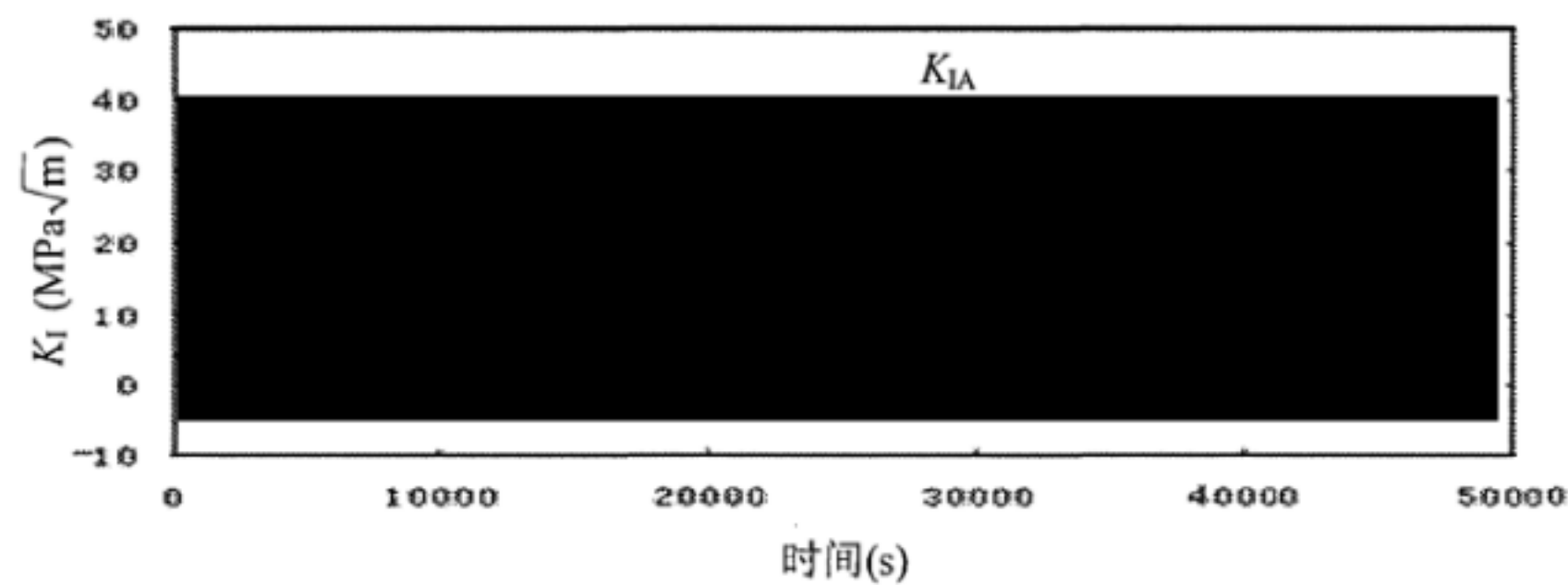
进行断裂分析和评定时，采用小破口失水事故下（SB-LOCA）的温度压力瞬态作为输入载荷，瞬态温度和压力变化情况如图E. 3所示。



图E.4 核电厂升温降温工况下缺陷位置 σ_m 、 σ_b 变化情况

E. 1. 5 确定应力强度因子 K_I 及其最大波动范围 ΔK_I

按附录D中式 (D. 2)，求解升温 and 降温两种瞬态下 K_I 的波动曲线。经计算，得到A、B两点处应力强度因子 K_{IA} 和 K_{IB} 波动曲线如图E. 5所示，进而得到 ΔK_{IA} 和 ΔK_{IB} 。



图E. 5 核电厂升温降温工况下缺陷 K_{IA} 和 K_{IB} 波动曲线

E. 1. 6 确定缺陷最终尺寸

按9章的分析方法计算缺陷在循环载荷作用下的最终尺寸 a_f 和 c_f 。由于假想缺陷位于RPV内表面，因此，按附录C. 6计算缺陷在轻水堆水环境中的参考疲劳裂纹扩展速率，则第9章式 (14) 可改写为 (E. 1) 和 (E. 2)：

$$da/dN = A(\Delta K_{IA})^n = 2.135 \times 10^{-6} (\Delta K_{IA})^{1.95} \dots\dots\dots (E. 1)$$

$$dc/dN = A(\Delta K_{IB})^n = 2.135 \times 10^{-6} (\Delta K_{IB})^{1.95} \dots\dots\dots (E. 2)$$

根据式 (E. 1) 和 (E. 2)，按 $N=150$ 次计得：

$$\Delta a = A(\Delta K_{IA})^n N = 0.402 \text{ mm} \dots\dots\dots (E. 3)$$

$$\Delta c = A(\Delta K_{IB})^n N = 0.181 \text{ mm} \dots\dots\dots (E. 4)$$

则裂纹的最终尺寸为：

$$a_f \times 2c_f = 19.902\text{mm} \times 117.362\text{mm} \dots\dots\dots (E. 5)$$

E. 1. 7 缺陷断裂评定

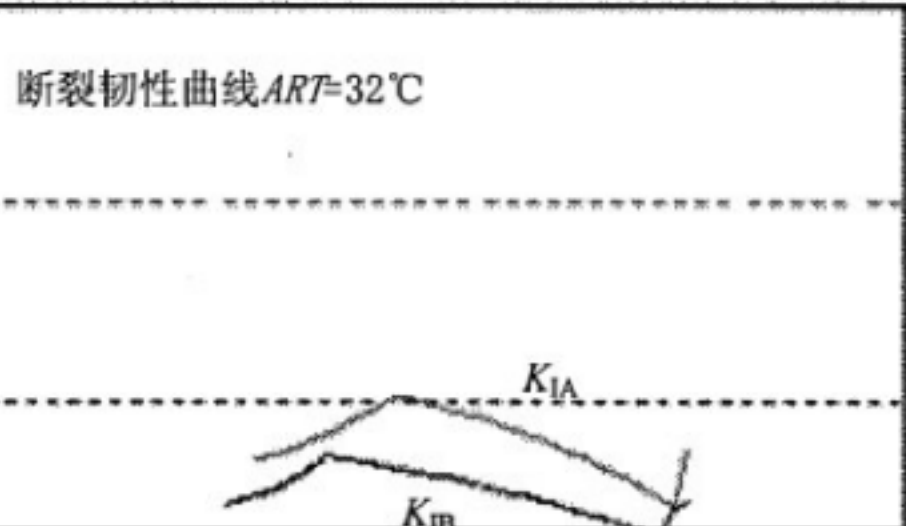
考虑辐照效应，ART 假设为32℃。在运行工况下， K_{Ic} 取220 MPa√m。

小破口失水 (SB-LOCA) 事故工况下的断裂评定，计算结果参见图E. 6。

E. 1. 8 结论

由上可知，在小破口失水 (SB-LOCA) 事故工况下，该RPV中的缺陷是可接收的。

实际工程问题需要考虑各种循环操作引起的疲劳裂纹扩展，脆性断裂评定考虑的瞬态也要以PSA (概率风险评价) 为基础进行选择。



304
韧度

P_m ,

. 6)

根据式 (E. 7)，求得A点和B点的 K_I^P ：

$$K_I^P = \begin{cases} \sqrt{\pi a/1000}(\sigma_m f_m^A + \sigma_b f_b^A) \\ \sqrt{\pi a/1000}(\sigma_m f_m^B + \sigma_b f_b^B) \end{cases} \dots\dots\dots (E. 7)$$

式中：

$f_m^A = 1.1569$ ， $f_b^A = 0.8172$ ， $f_m^B = 0.5764$ ， $f_b^B = 0.5243$ 。

A点： $K_I^P = 7.7035\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ，B点： $K_I^P = 3.8972\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

E.2.5 缺陷扩展分析

假设在反应堆停启过程中，此管道承受压力波动，假设其压力幅值为8 MPa，则应力强度因子变化幅：A点： $\Delta K_I^P = 7.7035 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ，B点： $\Delta K_I^P = 3.8972 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ，并假设在20年内的波动次数为300次，则按第9章计得 $\Delta a = 0.0134 \text{ mm}$ ； $\Delta c = 0.0014 \text{ mm}$ 。

裂纹的最终尺寸为： $a_f \times c_f = 5.0134 \text{ mm} \times 25.0014$ 。

E.2.6 评定参量计算

E.2.6.1 K_r 的确定

由11.2取断裂韧度的分安全系数 $\gamma_K = 3$ ，则： $K_P = K_c / \gamma_K = 73.33 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

由11.4.7节公式(33)计得 K_r ，其中 ρ 和 K_I^S 取0，则：A点： $K_r = 0.1052$ ；B点： $K_r = 0.0533$ 。

E.2.6.2 L_r 的确定

$$L_r = \gamma_L L_{r(\text{内压圆筒})} = \gamma_L \left[\frac{1.2 P_m}{R_{p0.2}} \right] \frac{1 - a/(t \cdot M_g)}{1 - a/t} = 0.6478 \dots\dots\dots (E.8)$$

式中：

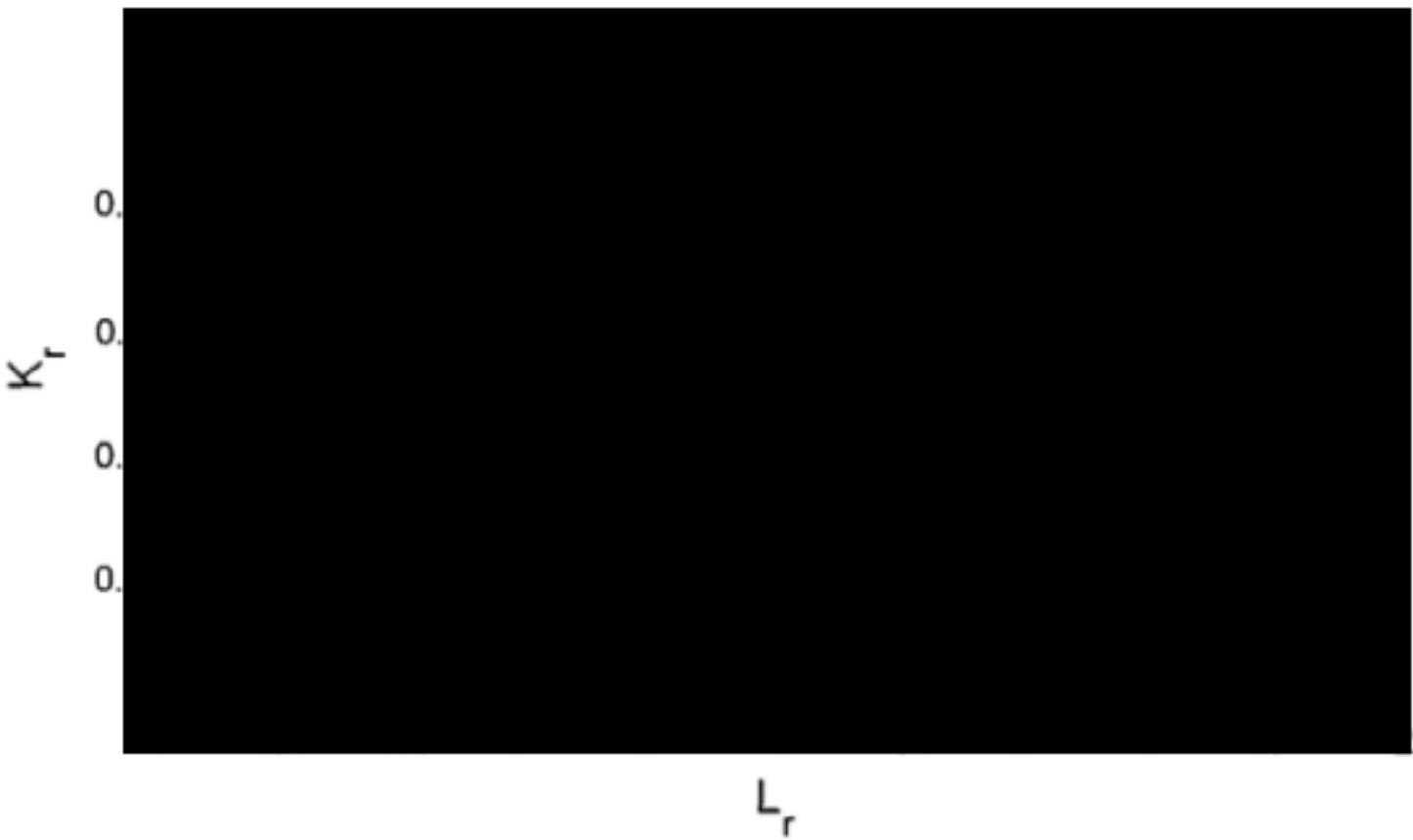
$L_{r(\text{内压圆筒})}$ ——采用G.2.6给出的内压圆筒上表面裂纹公式计算 L_r ；

$$M_g = \sqrt{1 + 1.6 \left[c^2 / (R t) \right]}。$$

E.2.7 结论

由于奥氏体不锈钢304为无屈服平台材料，因此，选择11.2.4的失效评定曲线绘于图E.7，再将计算得到的A点和B点的 (L_r , K_r) 绘入图E.7中。

由图E.7得到，在工作压力下，评定点A点、B都点落在评定图安全区域内，因此，含缺陷管道在工作压力下是安全的。



图E.7 评定点 A 和 B

附录 F
(规范性附录)
平面缺陷评定中 ρ 因子的计算

F.1 总则

当结构在一次应力和二次应力组合作用时,塑性影响不能通过简单地将两种应力作用的结果线性叠加评价。本附录给出在一次应力和二次应力载荷组合作用下塑性修正因子 ρ 的计算方法。

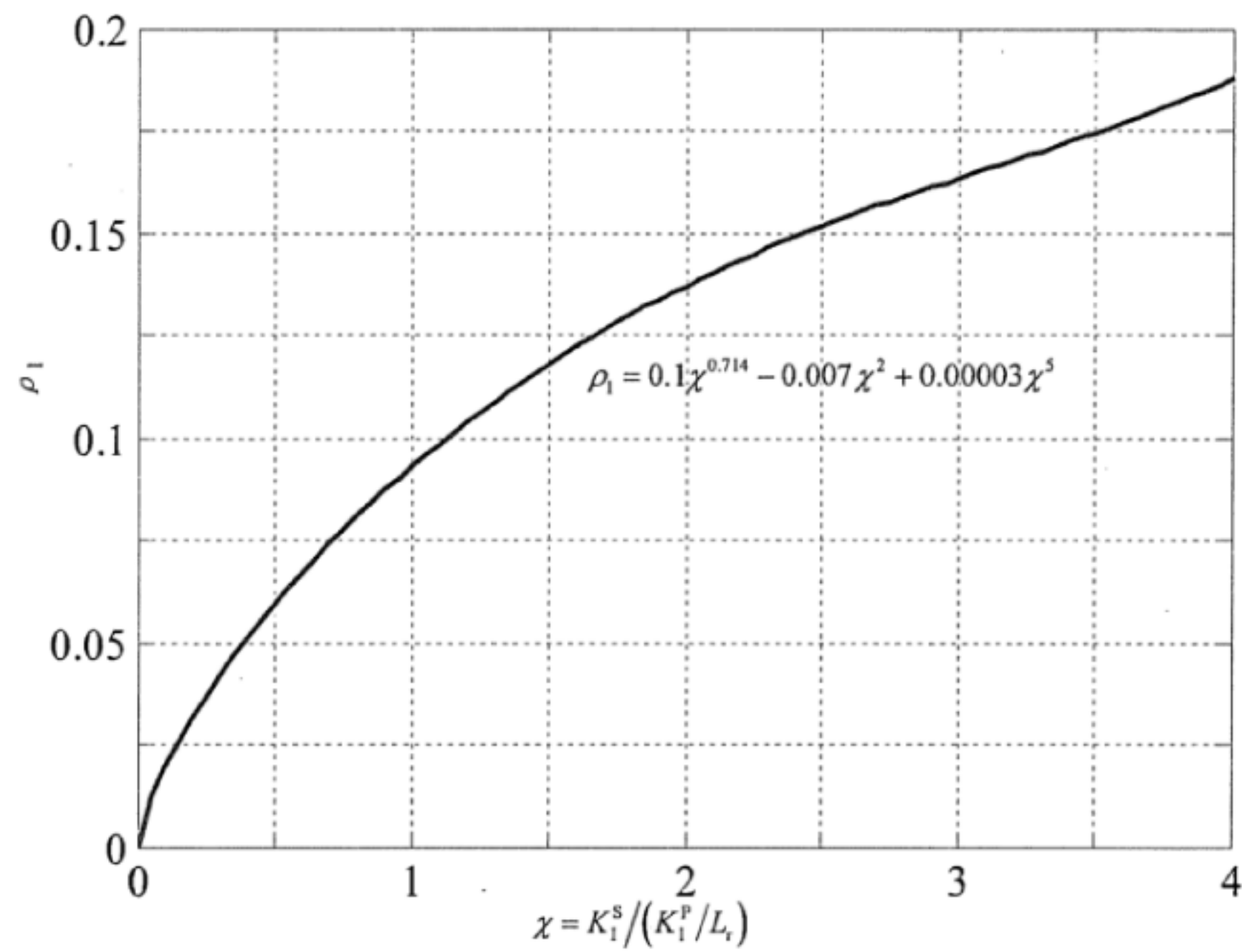
F.2 当 $K_I^S / (K_I^P / L_r) \leq 4$ 时, ρ 的计算方法

当施加的机械载荷较大时,二次应力的塑性修正可忽略,当载荷超出结构的屈服载荷时, ρ 值趋于 0。 ρ 值依赖于 L_r 和 $K_I^S / (K_I^P / L_r)$ 的值。

本计算方法不适用于仅有二次应力作用的情况。对于较大的二次应力作用 (即 $K_I^S / (K_I^P / L_r) > 4$) 时,应用该计算方法所得的 ρ 值过于保守;较小的一次应力和二次应力组合作用时也导致过于保守的结果。在上述情况下,计算方法应采用 F.3。当判定缺陷区域的弹性行为重要时,也采用 F.3 中的计算方法。

本方法计算步骤如下:

- a) 确定 K_I^S : K_I^S 值为正时,促进裂纹开裂; K_I^S 值为负或 0 时,取 $\rho = 0$;
- b) 确定 K_I^P / L_r ;
- c) 确定 $K_I^S / (K_I^P / L_r)$: 采用 a) 和 b) 的结果计算 $K_I^S / (K_I^P / L_r)$ 。当 $K_I^S / (K_I^P / L_r) > 4$ 时,采用 F.3 中的方法;
- d) 根据图 F.1 确定 ρ_1 值;
- e) 确定 ρ 值:
 - $L_r \leq 0.8$ 时, $\rho = \rho_1$;
 - $0.8 < L_r < 1.05$ 时, $\rho = 4\rho_1(1.05 - L_r)$;
 - $L_r \geq 1.05$ 时, $\rho = 0$ 。



图F.1 ρ_1 值的确定

F.3 当 $K_1^S / (K_1^P / L_r) > 4$ 时, ρ 的计算方法

该方法计算步骤如下:

- a) 确定 K_1^S 、 K_J^S : K_J^S 为二次应力单独作用时的有效应力强度因子。计算方法见 F.4。
若 K_1^S 为负值或0, 取 $\rho=0$; 若二次应力单独作用, $\rho=0$, $K_1^S = K_J^S$;
- b) 确定 $K_J^S / (K_1^P / L_r)$;
- c) 确定参数 ψ 。根据 L_r 和 b) 中确定的 $K_J^S / (K_1^P / L_r)$, 从表 F.1 中确定参数 ψ , 没有列出的值可通过线性插值得到。如果 $K_J^S \leq K_1^S$, 取 $\rho = \psi$;
- d) 确定参数 ϕ 。根据 L_r 和 b) 中确定的 $K_J^S / (K_1^P / L_r)$, 从中表 F.2 确定参数 ϕ , 没有列出的值可通过线性插值得到;
- e) 确定 ρ 值。按式 (F.1) 计算 ρ :

$$\rho = \psi - \phi \left(\frac{K_1^S}{K_J^S} - 1 \right) \dots\dots\dots (F.1)$$

若计算所得 ρ 值为负, 取 $\rho=0$ 。

F.4 K_J^S 的计算

K_J^S 可由下述两种方法计算得出:

- a) 确定 K_J^S 。假设缺陷所在位置在无缺陷时的应力 σ_{yy} 以及机械应变 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} 通过对未裂体的弹—塑性分析为已知 (x、z 轴位于裂纹面内, y 轴垂直于裂纹面), 这些应力、应变称为原场应力、原场应变。其中原场应变为机械应变, 即将由热膨胀引起的应变从总应变中减去。计算步骤如下:

- 1) 由垂直于裂纹平面的应力 σ_{yy} 确定有效应力强度因子 $K_o^S(a)$ (注意这里的 K_o^S 不同于 K_I^S);

- 2) 由垂直于裂纹平面的应力 $\bar{\sigma}_{yy}$ 确定有效应力强度因子 $K_e^S(a)$, $\bar{\sigma}_{yy}$ 为假设材料响应为线弹性时, 由弹—塑性未裂体机械应变定义的应力, 由式 (F.2) 确定:

$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{ (1-\nu)\varepsilon_{yy} + \nu(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) \} \dots\dots\dots (F.2)$$

- 3) 确定有效裂纹尺寸 a_{eff}^o , 按式 (F.3) 计算:

$$a_{\text{eff}}^o = a + \frac{1}{2\pi\beta} \{ K_o^S(a) / R_{p0.2} \}^2 \dots\dots\dots (F.3)$$

式中: $\beta=1$ 或 3 , 分别对应平面应力和平面应变情况 (有效裂纹尺寸在某些情况下可能超过结构厚度); $R_{p0.2}$ 为材料屈服强度。

- 4) 确定有效裂纹尺寸 a_{eff}^e , 按式 (F.4) 计算:

$$a_{\text{eff}}^e = a + \frac{1}{2\pi\beta} \{ K_e^S(a) / R_{p0.2} \}^2 \dots\dots\dots (F.4)$$

式中: $\beta=1$ 或 3 , 分别对应平面应力和平面应变情况。有效裂纹尺寸在某些情况下可能超过结构厚度。

- 5) 确定 K_J^S , 按式 (F.5) 计算:

$$K_J^S(a) = \left(\frac{a_{\text{eff}}^o a_{\text{eff}}^e}{a^2} \right)^{1/4} [K_o^S(a) K_e^S(a)]^{1/2} \dots\dots\dots (F.5)$$

- b) 线弹性方法计算 K_J^S 。如果不考虑弹—塑性分析, 可用式 (F.6) 对 K_J^S 进行保守的计算, 当弹性应力不是远大于屈服应力时, 得到的结果可能过于保守, 但是该方法提供了近似的计算值。

$$K_J^S = \left(\frac{a_{\text{eff}}}{a} \right)^{1/2} K_I^S(a) \dots\dots\dots (F.6)$$

式中: $a_{\text{eff}} = a + \frac{1}{2\pi\beta} [K_I^S(a) / R_{p0.2}]^2$, $\beta=1$ 或 3 , 分别对应平面应力和平面应变情况。 a_{eff} 可能大于结构的厚度。

表F.1 由参数 L_e 和 $K_j^s/(K_1^p/L_e)$ 确定的 ψ 值

L_e	$K_j^s/(K_1^p/L_e)$																		
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.002	0.003	0.010	0.016	0.019	0.024	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031
0.02	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.019	0.030	0.036	0.040	0.042	0.044	0.046	0.048	0.045
0.03	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004	0.006	0.008	0.024	0.039	0.045	0.052	0.053	0.055	0.056	0.057	0.058
0.04	0	0	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.010	0.029	0.044	0.052	0.057	0.060	0.063	0.066	0.070	0.074
0.06	0	0	0.001	0.001	0.002	0.002	0.005	0.007	0.010	0.014	0.035	0.052	0.062	0.067	0.071	0.075	0.079	0.083	0.089
0.08	0	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.006	0.009	0.013	0.017	0.040	0.059	0.069	0.075	0.079	0.083	0.088	0.092	0.099
0.1	0	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.007	0.011	0.015	0.020	0.043	0.063	0.074	0.081	0.086	0.090	0.095	0.100	0.107
0.12	0	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.008	0.013	0.018	0.022	0.046	0.067	0.078	0.086	0.091	0.096	0.101	0.106	0.114
0.14	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.009	0.015	0.020	0.024	0.048	0.070	0.082	0.090	0.096	0.101	0.106	0.112	0.121
0.16	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.011	0.016	0.022	0.026	0.049	0.072	0.085	0.094	0.100	0.105	0.111	0.117	0.126
0.18	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.012	0.018	0.023	0.027	0.050	0.074	0.088	0.097	0.104	0.109	0.115	0.122	0.132
0.2	0	0.001	0.002	0.004	0.005	0.006	0.013	0.019	0.025	0.028	0.052	0.076	0.091	0.100	0.107	0.113	0.120	0.127	0.137
0.3	0	0.002	0.003	0.005	0.007	0.009	0.017	0.025	0.030	0.033	0.057	0.085	0.102	0.114	0.122	0.130	0.138	0.147	0.160
0.4	0	0.002	0.005	0.007	0.009	0.011	0.022	0.029	0.033	0.037	0.064	0.094	0.113	0.126	0.136	0.146	0.156	0.167	0.182
0.5	0	0.003	0.006	0.009	0.012	0.014	0.026	0.033	0.039	0.043	0.074	0.105	0.125	0.139	0.149	0.160	0.172	0.185	0.201
0.6	0	0.004	0.007	0.011	0.014	0.017	0.029	0.038	0.045	0.051	0.085	0.114	0.133	0.147	0.159	0.170	0.184	0.200	0.215
0.7	0	0.004	0.008	0.012	0.016	0.019	0.032	0.043	0.051	0.058	0.091	0.117	0.134	0.147	0.158	0.171	0.186	0.202	0.214
0.8	0	0.004	0.008	0.012	0.015	0.019	0.032	0.042	0.050	0.057	0.085	0.105	0.119	0.130	0.141	0.155	0.169	0.182	0.190
0.9	0	0.003	0.006	0.009	0.012	0.014	0.025	0.032	0.038	0.043	0.060	0.073	0.082	0.090	0.101	0.113	0.123	0.130	0.132

表 F. 1 (续)

L_r	$K_f^s/(K_1^p/L_r)$																		
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1.0	0	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.010	0.013	0.015	0.016	0.019	0.022	0.025	0.031	0.039	0.043	0.044	0.041	0.033
1.1	0	0	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.005	-0.008	-0.010	-0.013	-0.025	-0.033	-0.036	-0.037	-0.042	-0.051	-0.061	-0.073	-0.084
1.2	0	-0.002	-0.003	-0.005	-0.006	-0.008	-0.015	-0.021	-0.028	-0.034	-0.058	-0.075	-0.090	-0.106	-0.122	-0.137	-0.151	-0.164	-0.175
1.3	0	-0.002	-0.004	-0.006	-0.008	-0.010	-0.018	-0.027	-0.035	-0.043	-0.075	-0.103	-0.126	-0.147	-0.167	-0.181	-0.196	-0.209	-0.220
1.4	0	-0.002	-0.004	-0.006	-0.008	-0.010	-0.019	-0.028	-0.036	-0.044	-0.080	-0.109	-0.134	-0.155	-0.173	-0.189	-0.203	-0.216	-0.227
1.5	0	-0.002	-0.004	-0.005	-0.007	-0.009	-0.018	-0.026	-0.034	-0.041	-0.075	-0.103	-0.127	-0.147	-0.165	-0.180	-0.194	-0.206	-0.218
1.6	0	-0.002	-0.003	-0.005	-0.007	-0.008	-0.016	-0.023	-0.030	-0.037	-0.069	-0.095	-0.117	-0.136	-0.153	-0.168	-0.181	-0.194	-0.205
1.7	0	-0.001	-0.003	-0.004	-0.006	-0.007	-0.014	-0.021	-0.027	-0.033	-0.062	-0.086	-0.107	-0.125	-0.141	-0.155	-0.168	-0.180	-0.191
1.8	0	-0.001	-0.003	-0.004	-0.005	-0.006	-0.012	-0.018	-0.024	-0.030	-0.055	-0.077	-0.097	-0.114	-0.129	-0.142	-0.155	-0.166	-0.177
1.9	0	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004	-0.006	-0.011	-0.016	-0.021	-0.026	-0.049	-0.069	-0.086	-0.102	-0.116	-0.129	-0.141	-0.152	-0.162
2.0	0	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004	-0.005	-0.009	-0.014	-0.018	-0.023	-0.043	-0.061	-0.076	-0.091	-0.104	-0.116	-0.128	-0.137	-0.146

表F. 2 由参数 L_r 和 $K_f^s/(K_1^p/L_r)$ 确定的 ϕ 值

L_r	$K_f^s/(K_1^p/L_r)$																		
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.01	0	0.667	0.800	0.857	0.875	0.909	0.952	0.967	0.974	0.978	0.978	0.978	0.975	0.974	0.973	0.973	0.972	0.971	0.971
0.02	0	0.500	0.666	0.750	0.799	0.833	0.907	0.935	0.949	0.956	0.962	0.958	0.955	0.953	0.952	0.950	0.949	0.948	0.951
0.03	0	0.400	0.571	0.666	0.727	0.768	0.867	0.906	0.925	0.936	0.950	0.945	0.941	0.940	0.939	0.938	0.937	0.936	0.935
0.04	0	0.333	0.500	0.599	0.666	0.713	0.830	0.878	0.902	0.916	0.934	0.931	0.929	0.928	0.927	0.926	0.924	0.922	0.918

表 F.2 (续)

L_t	$K_J^S/(K_I^P/L_t)$																		
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0.06	0	0.250	0.400	0.499	0.570	0.623	0.765	0.827	0.860	0.880	0.910	0.911	0.910	0.910	0.910	0.909	0.907	0.905	0.900
0.08	0	0.200	0.333	0.428	0.498	0.553	0.709	0.781	0.822	0.846	0.888	0.893	0.894	0.895	0.896	0.895	0.894	0.891	0.886
0.1	0	0.166	0.285	0.374	0.443	0.498	0.661	0.740	0.786	0.815	0.869	0.877	0.880	0.882	0.883	0.883	0.882	0.879	0.874
0.12	0	0.143	0.249	0.332	0.398	0.452	0.618	0.703	0.754	0.787	0.850	0.862	0.867	0.870	0.872	0.872	0.871	0.868	0.863
0.14	0	0.125	0.221	0.298	0.361	0.414	0.581	0.670	0.724	0.760	0.833	0.848	0.855	0.859	0.861	0.862	0.861	0.858	0.853
0.16	0	0.111	0.199	0.271	0.331	0.381	0.548	0.639	0.696	0.735	0.817	0.835	0.843	0.848	0.851	0.852	0.851	0.849	0.843
0.18	0	0.099	0.181	0.248	0.305	0.354	0.518	0.611	0.670	0.712	0.801	0.822	0.832	0.838	0.841	0.842	0.842	0.840	0.834
0.2	0	0.090	0.165	0.229	0.283	0.329	0.491	0.585	0.646	0.690	0.786	0.810	0.821	0.828	0.833	0.833	0.833	0.831	0.825
0.3	0	0.062	0.116	0.164	0.206	0.245	0.388	0.481	0.547	0.596	0.715	0.752	0.769	0.780	0.786	0.789	0.789	0.787	0.780
0.4	0	0.046	0.088	0.126	0.161	0.193	0.318	0.406	0.471	0.521	0.651	0.696	0.718	0.732	0.740	0.745	0.745	0.743	0.735
0.5	0	0.037	0.071	0.102	0.131	0.157	0.266	0.347	0.408	0.457	0.589	0.640	0.666	0.683	0.693	0.698	0.699	0.696	0.688
0.6	0	0.030	0.058	0.084	0.108	0.130	0.225	0.297	0.354	0.399	0.528	0.582	0.612	0.631	0.642	0.648	0.648	0.644	0.638
0.7	0	0.024	0.047	0.069	0.089	0.108	0.189	0.252	0.303	0.344	0.466	0.522	0.554	0.575	0.587	0.593	0.593	0.589	0.587
0.8	0	0.020	0.038	0.056	0.072	0.088	0.156	0.210	0.253	0.290	0.403	0.460	0.493	0.516	0.528	0.533	0.534	0.534	0.535
0.9	0	0.015	0.030	0.044	0.057	0.069	0.124	0.168	0.205	0.236	0.399	0.395	0.430	0.452	0.464	0.470	0.475	0.480	0.486
1.0	0	0.011	0.022	0.032	0.042	0.051	0.094	0.129	0.159	0.185	0.276	0.330	0.364	0.386	0.400	0.411	0.423	0.435	0.449
1.1	0	0.008	0.015	0.023	0.030	0.036	0.067	0.094	0.118	0.139	0.218	0.269	0.302	0.326	0.347	0.367	0.387	0.406	0.423
1.2	0	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.048	0.068	0.087	0.104	0.172	0.219	0.256	0.287	0.315	0.340	0.362	0.382	0.399
1.3	0	0.004	0.008	0.011	0.015	0.019	0.036	0.052	0.068	0.082	0.142	0.190	0.229	0.263	0.291	0.316	0.338	0.357	0.375
1.4	0	0.003	0.006	0.009	0.012	0.015	0.030	0.044	0.057	0.070	0.126	0.171	0.209	0.241	0.269	0.293	0.314	0.333	0.350
1.5	0	0.003	0.005	0.008	0.011	0.013	0.026	0.039	0.050	0.062	0.112	0.155	0.190	0.220	0.247	0.270	0.290	0.309	0.326
1.6	0	0.002	0.005	0.007	0.010	0.012	0.023	0.034	0.045	0.055	0.100	0.139	0.172	0.200	0.225	0.247	0.267	0.285	0.301

表 F.2 (续)

L_t	$K_j^s/(K_i^p/L_t)$									
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
1.7	0	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.015	0.020	0.024	0.0276
1.8	0	0.002	0.004	0.005	0.007	0.009	0.013	0.017	0.0202	0.0250
1.9	0	0.002	0.003	0.005	0.006	0.008	0.011	0.015	0.0180	0.0225
2.0	0	0.001	0.003	0.004	0.005	0.007	0.009	0.012	0.0157	0.0199

附 录 G
(规范性附录)
载荷比 L_r 的计算

G.1 概述

G.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。

G.1.2 L_r^{\max} 的确定方法见本标准11.2的规定。

G.1.3 L_r 计算中所需应力的确定：在 L_r 的计算中只考虑一次应力，不考虑二次应力。计算需要的应力（ P_m 及 P_b ）和缺陷尺寸（ a 及 c ）分别按本标准第7章和第6章的规定确定。

G.2 典型结构的 L_r 计算式

G.2.1 平板上半椭圆表面裂纹（裂纹 $a \times 2c$ ，板厚 t ，板宽 $2W$ ）按式（G.1）计算：

$$L_r = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9(1-\zeta)^2 P_m^2}}{3(1-\zeta)^2 R_{p0.2}} \dots\dots\dots (G.1)$$

式中 $\zeta = \frac{ac}{t(c+t)}$ 。

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

G.2.2 平板上椭圆形埋藏裂纹（裂纹 $2a \times 2c$ ，板厚 t ，板宽 $2W$ ）按式（G.2）计算：

$$L_r = \frac{(3\zeta P_m + P_b) + \sqrt{(3\zeta P_m + P_b)^2 + 9[(1-\zeta)^2 + 4\zeta\gamma]P_m^2}}{3[(1-\zeta)^2 + 4\zeta\gamma]R_{p0.2}} \dots\dots\dots (G.2)$$

式中：

$$\zeta = \frac{ac}{t(c+t)}; \quad \gamma = \frac{P_1}{t};$$

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： $2a/t \leq 0.8$ 且 $(c+t)/W \leq 1.0$ ，可用于压力容器。

G.2.3 平板中长 $2a$ 穿透裂纹（板厚 t ，板宽 $2W$ ）按式（G.3）计算：

$$L_r = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9P_m^2}}{3(1-2a/W)R_{p0.2}} \dots\dots\dots (G.3)$$

适用范围： $a \ll W$ 。

G.2.4 内压圆筒壁上长 $2a$ 纵向穿透裂纹(板厚 t , 内径 R_i)按式(G.4)计算:

$$L_r = \frac{1.2P_m}{R_{p0.2}} \sqrt{1 + 1.6a^2/(R_i t)} \dots\dots\dots (G.4)$$

适用范围: $t/R_i \leq 0.1$ 。

G.2.5 内压球壳上长 $2a$ 穿透裂纹(板厚 t , 内径 R_i)按式(G.5)计算:

$$L_r = \left(\frac{P_m}{R_{p0.2}} \right) \frac{1 + \sqrt{1 + 8a^2/[R_i t \cos^2(a/R_i)]}}{2} \dots\dots\dots (G.5)$$

适用范围: $t/R_i \leq 0.1$ 。

G.2.6 内压圆筒壁上表面裂纹(裂纹 $a \times 2c$, 板厚 t , 内径 R_i)按式(G.6)计算:

$$L_r = \left(\frac{1.2P_m}{R_{p0.2}} \right) \frac{1 - a/(tM_g)}{1 - a/t} \dots\dots\dots (G.6)$$

式中 $M_g = \sqrt{1 + 1.6[c^2/(R_i t)]}$ 。

G.2.7 容器接管拐角裂纹(四分之一圆形裂纹)按式(G.7)计算:

$$L_r = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9(1-\zeta)^2 P_m^2}}{3(1-\zeta)^2 R_{p0.2}} \dots\dots\dots (G.7)$$

式中:

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

t_{\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 t_{\min} 厚度上分布的应力。

适用范围: $a/t_{\min} \leq 0.8$ 。

G.2.8 仅受内压 p 的容器接管拐角裂纹(四分之一圆形裂纹)按式(G.8)计算:

$$L_r = \left(\frac{p}{R_{p0.2}} \right) \frac{A_p}{A_s - \pi a^2/4} \dots\dots\dots (G.8)$$

式中:

A_p ——内压 p 的作用面积;

A_s ——接管承载面积。详见图G.1、图G.2。

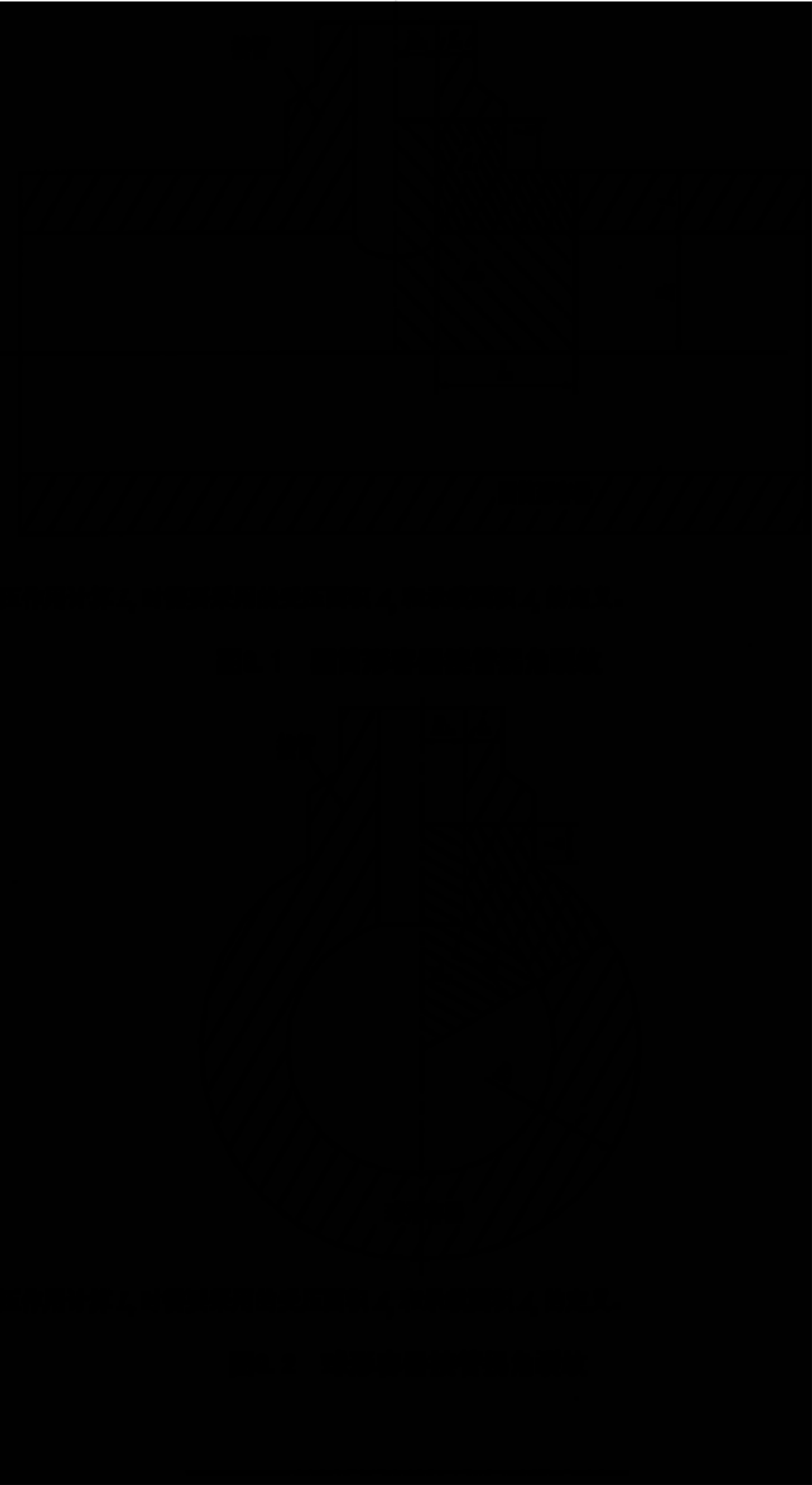
图中:

$l_s = 0.4\sqrt{R_{in} t_n}$;

$l_m = \min\{0.4\sqrt{R_i t}, 2R_{in}/3\}$, 适用于圆筒形容器;

$l_m = \min\{0.4\sqrt{R_i t}, 2R_{in}\}$ ，适用于球形容器。

适用范围： $a/\sqrt{4A_s/\pi} \leq 0.8$ 。



注：在仅受内

注：在仅受内

中 华 人 民 共 和 国
能 源 行 业 标 准
含缺陷核承压设备完整性评定

NB/T 20013-2010

*

原子能出版社出版

核工业标准化研究所发行

北京海淀区骚子营1号院

邮政编码：100091

电 话：010-62863505

总装备部军标出版发行部印刷车间印刷

版权专有 不得翻印

*

2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷

印数 1—200