

ICS 23.020.30  
J 74



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 35013—2018

---

## 承压设备合于使用评价

Fitness-for-service assessment of pressure equipments

2018-05-14 发布

2018-12-01 实施

国家市场监督管理总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	I
引言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 通用要求 .....	2
5 均匀减薄评价 .....	3
6 局部减薄评价 .....	12
7 点蚀评价 .....	26
8 氢致开裂、氢鼓包和应力导向氢致开裂评价 .....	39
9 凹陷和沟槽评价 .....	46
10 错边、棱角和不圆评价 .....	50
11 火灾损伤评价 .....	62
12 蠕变损伤评价 .....	70
附录 A (资料性附录) 蠕变数据 .....	106
附录 B (规范性附录) 脆性断裂倾向评价 .....	115
附录 C (资料性附录) 腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子的确定方法 .....	123
附录 D (资料性附录) 常见材料硬度值范围 .....	125
附录 E (资料性附录) 常见材料国内外牌号对照 .....	128

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

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

本标准起草单位:中国特种设备检测研究院、国家质量监督检验检疫总局特种设备安全监察局、合肥通用机械研究院、南京工业大学、华东理工大学、北京航空航天大学、清华大学、浙江工业大学。

本标准主要起草人:王辉、贾国栋、陈学东、孙亮、赵建平、轩福贞、张峥、邵珊珊、范志超、汪逸安、刘应华、董杰、李翔、高增梁、吕运容、王笑梅、韩志远、艾志斌。

## 引 言

本标准编制的目的在于评价服役中的承压设备是否适合预期的工况及环境,制造缺陷、服役过程中产生的缺陷或损伤是否威胁其运行安全,使用本标准可以对设备继续运行或改造、维修、报废、更换等决策提供技术支撑。

本标准涉及多个交叉学科,使用者可根据评价的具体情况予以选用,并与 GB/T 19624 以及压力容器、管道、锅炉和陆上储罐等相关规范或标准配合使用。使用本标准给出的方法对超期服役承压设备进行评价,可以为设备的延寿提供参考,节约成本,提高企业经济效益。

# 承压设备合于使用评价

## 1 范围

- 1.1 本标准规定了金属制承压设备的合于使用评价方法。
- 1.2 本标准适用于金属制承压设备缺陷和损伤模式的评价,本标准适用的缺陷和损伤模式包括腐蚀减薄(均匀减薄、局部减薄和点蚀),氢致开裂、氢鼓包和应力导向氢致开裂,凹陷和沟槽,错边、棱角和不圆,火灾损伤,蠕变损伤和低温脆性断裂。平面缺陷的断裂和疲劳评价可按照 GB/T 19624 进行。
- 1.3 本标准不适用于下列承压设备:
- 核能装置中承受核辐射的承压设备;
  - 机器上非独立的承压部件(如压缩机、发电机、泵、柴油机的承压壳或气缸等);
  - 电力行业专用的封闭式电气设备的电容压力容器(封闭电器)。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 150.3 压力容器 第3部分:设计
- GB/T 1172 黑色金属硬度及强度换算值
- GB/T 6398 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法
- GB/T 19624 在用含缺陷压力容器安全评定
- GB/T 20801.2 压力管道规范 工业管道 第2部分:材料
- GB/T 30579 承压设备损伤模式识别

## 3 术语和定义

GB/T 19624 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**部件 components**

根据规范、标准设计制造的承压设备的受压元件或其组合。

### 3.2

**热暴露区 heat exposure zone**

部件承受某一特定火灾温度范围的区域。

### 3.3

**热暴露区等级 heat exposure level**

部件在火灾过程中的暴露温度等级,根据部件在火灾中达到的最高金属壁温确定。

### 3.4

**临界暴露温度 critical exposure temperature; CET**

操作条件或常压工况下,压力和附加载荷引起的主应力大于 55 MPa 时对应的最低金属温度。

注 1: 操作条件包括开停工、操作波动和停机。CET 可以是单一的温度,也可以是基于压力的温度系列值。

注2：常压储罐 CET 取最低日平均气温加 8℃，或者取水压试验的温度。低压储罐采用与压力容器相同的方法确定其 CET。

## 4 通用要求

### 4.1 单位和人员要求

采用本标准的单位在实施合于使用评价时应遵守国家相关法律、法规的规定，并建立相应的质量控制程序。进行合于使用评价的人员应具有必要的力学、材料、工艺、腐蚀、检验等知识背景和实践经验，并经过专业培训合格。

### 4.2 一般要求

4.2.1 承压设备的合于使用评价一般应包括对评定对象的状况调查(历史、工况、环境等)、缺陷和损伤检测、损伤模式识别和缺陷成因分析、材料性能获取、必要的实验与计算，并根据本标准的规定对评定对象的安全性进行综合分析和评价。

4.2.2 进行合于使用评价时应考虑各种可能存在的工况。

4.2.3 如果设备或部件包含多种缺陷或损伤，应结合针对所有缺陷类型和损伤的多种评价方法进行综合评价，对各种可能的损伤和失效模式进行判断和评价后，才能给出评价结论。

4.2.4 针对每种缺陷或损伤，本标准给出多级评价方法。应根据缺陷或损伤的类型和部件类型，选择合适的方法进行评价。

4.2.5 通过按照本标准进行的合于使用评价，不能作为提高承压设备设计压力的依据。

4.2.6 按照本标准进行合于使用评价的结果的采用，不免除承压设备的设计、制造、安装、修理、改造等各有关方应承担的相应责任。

### 4.3 合于使用评价中的基础工作

#### 4.3.1 损伤模式识别和缺陷成因分析

按照 GB/T 30579 进行损伤模式识别和缺陷成因分析。

#### 4.3.2 基础数据获得

##### 4.3.2.1 缺陷和损伤检测

对被评价对象可能存在的各种缺陷、损伤，应根据材料和结构等合理选择有效的检测方法和设备进行全面的检测，缺陷和损伤检测结果应准确、真实、可靠。

对于无法进行无损检测的部位存在缺陷和损伤的可能性应有足够的考虑，合于使用评价人员和无损检测人员应根据经验和具体情况作出保守的估计。

##### 4.3.2.2 材料性能获得

应按 GB/T 19624 和其他有关标准的规定确定材料性能数据。应充分考虑材料性能数据的分散性和材料性能劣化，并按偏于保守的原则确定所需的材料性能数值。

##### 4.3.2.3 应力水平确定

可按照相应设计标准计算应力，必要时进行应力分析。应力分析应采用成熟、可靠的方法，并考虑各种可能的载荷及其组合。

## 4.4 部件分类

### 4.4.1 A类

承受压力(含液柱静压力)或其他载荷,利用设计标准中的计算公式可以直接得到计算厚度的元件,主要包括:

- a) 圆筒或锥壳;
- b) 球壳;
- c) 凸形封头(球形、椭圆形、碟形、球冠形)和平盖;
- d) 直管段、弯管、弯头;
- e) 储罐壁板。

### 4.4.2 B类

承受压力(含液柱静压力)或其他载荷,设计标准中未提供直接计算厚度的公式,但提供了设计计算的方法,例如开孔补强、法兰设计。部件的设计计算涉及多个元件,元件厚度相互影响,无法单独确定其中一个元件的最小厚度。主要包括:

- a) 圆筒与接管、封头与接管、主管道与支管的连接处;
- b) 锥壳加强段或过渡段;
- c) 圆筒与平盖连接处;
- d) 整体管板;
- e) 法兰;
- f) 管道系统。

### 4.4.3 C类

承受压力(含液柱静压力)或其他载荷,设计标准中未提供计算厚度的公式,也未提供局部应力的计算方法,主要包括:

- a) 凸形封头和圆筒的连接处;
- b) 壳体加强圈;
- c) 压力容器的裙座或耳式支座;
- d) 储罐壁板和底板连接处。

## 5 均匀减薄评价

### 5.1 总则

本章规定了含减薄缺陷承压部件的壁厚测定、表征方法,以及含均匀减薄型缺陷的承压部件合于使用评价方法。本章的评价方法不适用于在蠕变温度范围内服役的部件,蠕变温度范围参见附录 A 表 A.1。

### 5.2 符号

- $A_R$ ——加强圈或支撑圈的截面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $c$ ——金属减薄区的环向长度,单位为  $\text{mm}$ ;
- COV——常规测厚所得壁厚实测值的变异系数;
- $D$ ——圆筒、球壳、椭圆封头、弯头的内直径,单位为  $\text{mm}$ ;

- $d_i$ ——接管内径,单位为 mm;
- $D_o$ ——圆筒、球壳、椭圆封头、弯头的外直径,单位为 mm;
- $D_{o1}$ ——三通主管外径,单位为 mm;
- $D_{o2}$ ——三通支管外径,单位为 mm;
- $F$ ——自重或自重加热载荷工况下有效截面上的轴向力,单位为 N;
- $\{\vec{F}\}$ ——广义载荷向量,采用与各载荷相适应的量纲;
- $\{\vec{F}^\circ\}$ ——参考载荷向量,采用与各载荷相适应的量纲;
- $\{\vec{F}_L\}$ ——极限载荷向量,采用与各载荷相适应的量纲;
- FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量,单位为 mm;
- $G_{BP}$ ——对内压载荷的弯头形状修正系数;
- $H$ ——当底部封头切线位于裙座内部时,裙座角焊缝至底部封头切线的距离,单位为 mm;
- $h_i$ ——椭圆封头内曲面深度,单位为 mm;
- $K$ ——外径与内径之比;
- $K_1$ ——三通主管外径与内径之比;
- $L$ ——部件的特征长度,单位为 mm;
- $L_{ni}$ ——不连续结构中,容器或主管道的环向测厚范围,单位为 mm;
- $L_{no}$ ——不连续结构中,接管或支管的轴向测厚范围,单位为 mm;
- $L_s$ ——测厚网格线间距,单位为 mm;
- $L_v$ ——不连续结构中,容器或主管道的轴向测厚范围,单位为 mm;
- $n$ ——常规测厚点的总数;
- $P$ ——评价计算压力,单位为 MPa;
- $p_L$ ——塑性极限内压载荷,单位为 MPa;
- $R$ ——圆筒的内半径或弯头的弯曲半径,单位为 mm;
- $R_L$ ——锥壳过渡段大端圆筒内半径,单位为 mm;
- $R_S$ ——锥壳过渡段小端圆筒内半径,单位为 mm;
- $r_m$ ——弯头的平均半径,  $r_m = \frac{D_o + D}{4}$ ,单位为 mm;
- $S_t$ ——常规测厚所得壁厚实测值的标准差,单位为 mm;
- $s$ ——金属减薄区的轴向长度,单位为 mm;
- $t$ ——弯头评价用计算壁厚,单位为 mm;
- $t_L$ ——锥壳过渡段大端圆筒供货壁厚,单位为 mm;
- $t_S$ ——锥壳过渡段小端圆筒供货壁厚,单位为 mm;
- $t_Z$ ——锥壳供货壁厚,单位为 mm;
- $t_{am}$ ——部件实测壁厚的表征值,单位为 mm;
- $t_{am}^C$ ——部件环向实测壁厚的表征值,单位为 mm;
- $t_{am}^S$ ——部件轴向实测壁厚的表征值,单位为 mm;
- $t_c$ ——评价用计算壁厚,单位为 mm;
- $t_c^C$ ——基于危险壁厚截面测厚的圆筒、锥壳、弯头的环向评价计算用壁厚,单位为 mm;
- $t_c^G$ ——基于危险壁厚截面测厚的球壳、凸形封头的评价计算用壁厚,单位为 mm;
- $t_c^S$ ——基于危险壁厚截面测厚的圆筒、锥壳、弯头的轴向评价计算用壁厚,单位为 mm;
- $t_e$ ——加强圈供货壁厚,单位为 mm;
- $t_{min}$ ——根据设计规范或标准确定的部件所需最小壁厚,单位为 mm;
- $t_{min}^C$ ——根据设计规范或标准确定的部件环向所需最小壁厚,单位为 mm;



- $t_{\min}^S$ ——根据设计规范或标准确定的部件轴向所需最小壁厚,单位为 mm;
- $t_{\min}$ ——危险壁厚截面法测厚所得部件最小实测壁厚,单位为 mm;
- $t_n$ ——不连续结构接管的名义壁厚,单位为 mm;
- $t_{\text{nom}}$ ——名义壁厚,单位为 mm;
- $t_{\text{rd}}$ ——远离金属减薄区的实测壁厚,单位为 mm;
- $\bar{t}_1$ ——常规测厚所得壁厚实测值的平均值,单位为 mm;
- $\bar{t}_i$ ——常规测厚所得壁厚实测值,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 单位为 mm;
- $\bar{t}_{\text{tm}}$ ——常规测厚所得部件最小实测壁厚,单位为 mm;
- $t_v$ ——不连续结构圆筒或主管道的供货壁厚,单位为 mm;
- $t_1$ ——三通主管评价用计算壁厚,单位为 mm;
- $t_2$ ——三通支管评价用计算壁厚,单位为 mm;
- $\text{Time}_{\max}$ ——结构失稳时的加载系数;
- $\sigma_{\text{ys}}$ ——评价温度下的屈服强度,单位为 MPa。

### 5.3 金属减薄的判定与分析步骤

按以下步骤进行金属减薄的判定与分析,如图 1 所示:

- 按 5.4.2 进行常规测厚及金属减薄的均匀性判断;
- 若壁厚变异系数  $\text{COV} \leq 0.1$ , 则判定为均匀减薄,按 5.5 和 5.6 进行评价;否则,进行下一步;
- 按 5.4.3 进行基于危险壁厚截面法的测厚及分析,若减薄区范围大于特征长度,则判定为均匀减薄,按 5.5 和 5.6 进行评价;否则,判定为局部减薄,按第 6 章进行评价。

### 5.4 壁厚测定与减薄缺陷的尺寸表征

#### 5.4.1 壁厚测定范围

5.4.1.1 应以独立计算壁厚的承压部件为检测对象进行测厚和壁厚分析统计,确定壁厚表征值。壁厚测定分常规测厚和危险壁厚截面法测厚。

5.4.1.2 首先应对检测对象进行常规测厚,根据常规测厚结果进行分析,必要时进行基于危险壁厚截面法的测厚和分析。

5.4.1.3 如果金属减薄区相距很近,或金属减薄区位于总体结构不连续处,则应保证测厚区具有足够的覆盖范围,以获取足够的壁厚读数值,图 2~图 4 为推荐的不连续结构测厚区域覆盖范围。

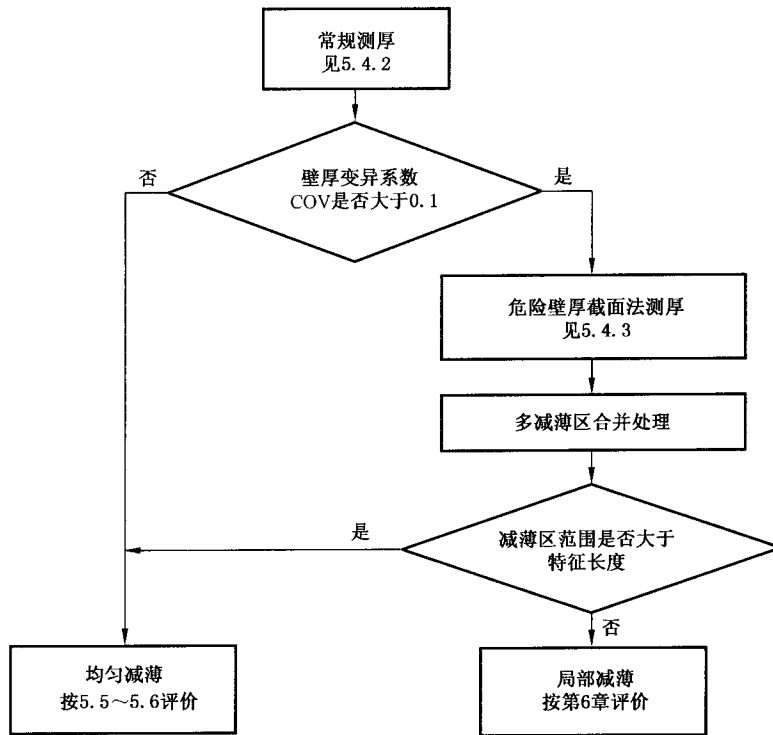


图 1 金属减薄的判定与分析步骤

5.4.2 常规测厚及分析

5.4.2.1 对承压部件进行均匀覆盖且不低于 15 点的壁厚测定, 所得壁厚实测值记为  $t_{vi}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n \geq 15$ )。

5.4.2.2 按式(1)计算 5.4.2.1 中获得的实测壁厚的变异系数。

$$COV = \frac{S_t}{\bar{t}_t} \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{t}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{vi} \dots\dots\dots (2)$$

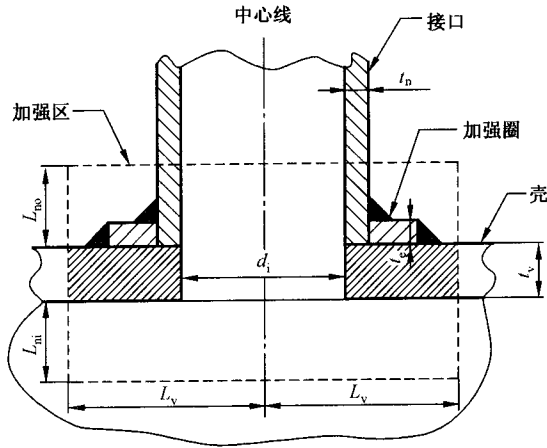
$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{vi} - \bar{t}_t)^2}{n-1}} \dots\dots\dots (3)$$

5.4.2.3 如果  $COV \leq 0.1$ , 则判定为均匀减薄, 按 5.5~5.6 进行评价。评价时, 取实测壁厚的平均值为壁厚表征值, 即:

$$t_{am} = \bar{t}_t \dots\dots\dots (4)$$

5.4.2.4 如果  $COV > 0.1$ , 则按 5.4.3 进行基于危险壁厚截面法的测厚与分析。取常规测厚所得壁厚实测值最小值为最小实测壁厚  $t_{tm}$ , 并确定部件上远离金属减薄区的实测壁厚  $t_{td}$ 。

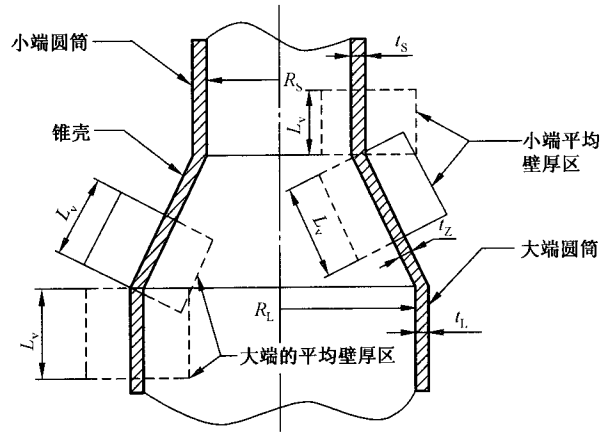
$$t_{tm} = \min\{t_{vi}, (i=1, 2, \dots, n)\} \dots\dots\dots (5)$$



说明：

- $L_v = \max\{d_i, d_i/2 + t_n + t_v\}$ ;
- $L_{no} = \min\{2.5t_v, 2.5t_n + t_c\}$ ;
- $L_{ni} = \min\{2.5t_v, 2.5t_n\}$ ;
- $d_i$  取当前实测值并考虑 FCA。

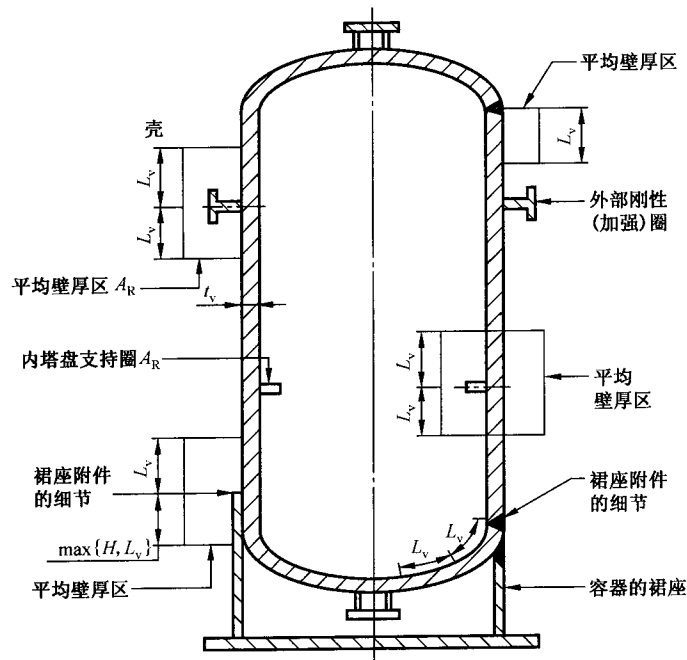
图 2 测厚区——接管或分支连接件



说明：

- 在小端圆筒,  $L_v = 0.78 \sqrt{R_s t_s}$ ;
- 在大端圆筒,  $L_v = 0.78 \sqrt{R_L t_l}$ ;
- 在锥壳小端,  $L_v = 0.78 \sqrt{R_s t_z}$ ;
- 在锥壳大端,  $L_v = 0.78 \sqrt{R_L t_z}$ ;
- $R_s, R_L$  取当前实测值并考虑 FCA。

图 3 测厚区——锥壳过渡段



说明：

- $L_v = \sqrt{R t_v}$ ;
- 当有  $\frac{A_R}{A_R + 156 t_v \sqrt{R t_v}} > 0.65$  时, 把加强圈或支持圈看成一个主要的轴对称不连续部件;
- $R$  取实测值并考虑 FCA。

图 4 测厚区——轴对称不连续区

5.4.3 基于危险壁厚截面法的测厚与分析

5.4.3.1 对应承压部件的轴向和环向,设置两组正交的能够完全覆盖金属减薄区的测厚网格线,网格线的间距应不大于按式(6)计算所得的  $L_s$ 。

$$L_s = \min\{0.36\sqrt{Dt_{1m}}, 2t_{rd}\} \dots\dots\dots(6)$$

5.4.3.2 测厚网格边缘处的实测壁厚应不低于  $t_{rd}$  的 90%, 否则,应增加测厚网格线所覆盖的范围。确定金属减薄区域的轴向长度  $s$  和环向长度  $c$ 。

5.4.3.3 设全部测厚网格有  $N_m$  条轴向网格线和  $N_c$  条环向网格线,在网格线交点处进行壁厚测定,且每条网格线上的测厚点应不小于 5 个。分别统计各轴向和环向网格线上的最小实测壁厚值。

5.4.3.4 使用各轴向网格线上的最小实测壁厚值建立环向危险壁厚截面图(CTP),使用各环向网格线上的最小实测壁厚值建立轴向危险壁厚截面图,如图 5 所示;对于常压或低压储罐,仅需建立轴向危险壁厚截面图。

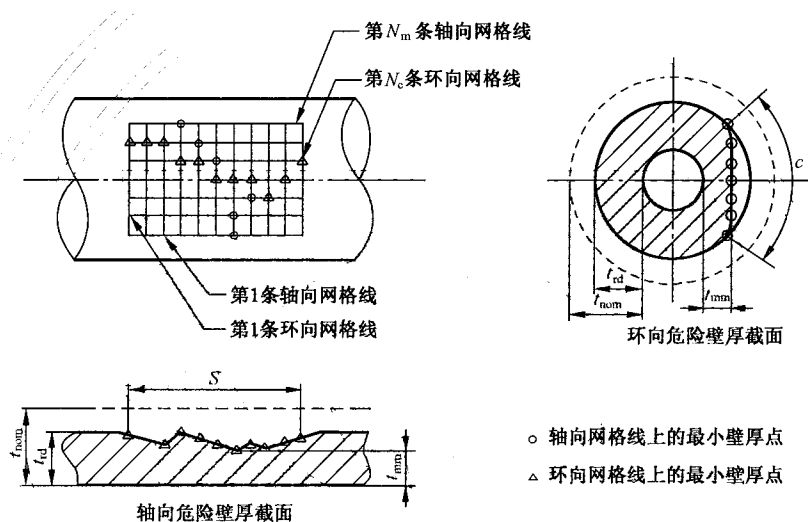


图 5 测厚网格与危险壁厚截面图

5.4.3.5 如果存在多个金属减薄区,应按以下方法考虑相邻金属减薄区的相互影响:

- a) 按面积从小到大对金属减薄区进行排序,作为待评价序列;
- b) 从最小的金属减薄区开始判断,以最小的金属减薄区中心为中心画矩形,矩形的轴向长度、环向长度应为当前金属减薄区轴向长度、环向长度的 2 倍;
- c) 如果在所画的矩形中没有其他金属减薄区,则当前的金属减薄区是独立的,需将其从待评价序列删除;
- d) 如果在所画的矩形中存在其他金属减薄区,则应将当前的金属减薄区与所画矩形中出现的金属减薄区合并为一个新的金属减薄区,将参与合并的金属减薄区从待评价序列删除,并根据面积大小将合并形成的新金属减薄区放入待评价序列的相应位置;
- e) 返回 b),直至待评价序列为空;
- f) 需对所有判定为独立的金属减薄区进行评价。

5.4.3.6 按以下方法确定部件特征长度  $L$ ,判断金属减薄是均匀减薄还是局部减薄,并确定相应的评价方法:

- a) 计算部件的特征长度  $L$ :

$$L = Q\sqrt{Dt_c} \dots\dots\dots(7)$$

$$t_c = t_{rd} - FCA \dots\dots\dots(8)$$

$$R_t = \left[ \frac{t_{mm} - FCA}{t_c} \right] \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{cases} Q = 1.123 \sqrt{\left( \frac{1 - R_t}{1 - R_t/0.9} \right)^2 - 1}, & \text{当 } R_t < 0.9 \text{ 时} \\ Q = 50, & \text{当 } R_t \geq 0.9 \text{ 时} \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

- b) 如果金属减薄区范围  $s$  和  $c$  大于或等于  $L$ , 则判定为均匀减薄, 按 5.4.3.7 进行壁厚表征, 按 5.5~5.6 进行评价。
- c) 如果金属减薄区范围  $s$  或  $c$  小于  $L$ , 则判定为局部减薄, 按第 6 章进行评价。

5.4.3.7 若基于危险壁厚截面法判定为均匀减薄, 在均匀减薄的轴向和环向危险截面图上, 建立以  $L$  为长度且包含最小实测壁厚点的统计区间, 以该区间内的壁厚平均值作为轴向壁厚表征值  $t_{am}^S$  和环向壁厚表征值  $t_{am}^C$ 。应尝试建立最小实测壁厚点位于不同位置的多个统计区间, 以使获得的壁厚表征值最小, 或保守的取  $t_{am}^S = t_{am}^C = t_{min}$ 。

5.5 均匀减薄评价方法限定条件

5.5.1 1 级评价适用于仅承受内压或外压而不计其他附加载荷的 A 类部件, 按设计准则进行评价。当不满足 1 级评价限定条件或 1 级评价结果不通过时, 可进行 2 级评价。2 级评价适用于材料韧性满足要求的承受内压、外压、附加载荷和上述载荷共同作用的 A 类、B 类或 C 类部件, 按塑性极限准则进行评价。

5.5.2 待评价部件应满足以下条件:

- a) 原设计满足相关的规范或标准要求;
- b) 材料具有足够的韧性;
- c) 所评价区域无裂纹类缺陷或其他焊接埋藏缺陷;
- d) 金属减薄区的表面及周边具有光滑的轮廓;
- e) 不承受循环载荷。

5.5.3 存在下列情况时, 还应与其他方法配合使用, 完成金属减薄缺陷的评价:

- a) 根据表 A.1 判断部件操作温度位于材料蠕变区时, 应进行蠕变评价;
- b) 碳钢和低合金钢材料有脆性断裂可能性时, 按附录 B 进行脆性断裂倾向评价;
- c) 部件在循环载荷下服役时, 应进行疲劳评价;
- d) 当判断材料性能有退化倾向时, 评价前应确定材料性能与继续服役时间的关系, 使用可靠的材料强度值进行评价;
- e) 对于位于结构不连续区的金属减薄缺陷, 应考虑结构不连续导致的应力集中效应;
- f) 对于腐蚀疲劳工况下的裂纹型缺陷, 应考虑腐蚀和疲劳的共同作用, 腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子的确定方法参见附录 C。

5.6 均匀减薄评价方法

5.6.1 1 级评价

5.6.1.1 使用常规测厚数据的 1 级评价:

- a) 按式(11)确定评价用计算壁厚:

$$t_c = t_{am} - FCA \dots\dots\dots (11)$$

- b) 按设计准则和实际使用条件确定待评价部件的所需最小壁厚  $t_{min}$ ;

- c) 满足式(12)所示评价准则则通过 1 级评价:

$$t_c \geq t_{min} \dots\dots\dots (12)$$

5.6.1.2 使用危险壁厚截面法测厚数据的 1 级评价:

a) 确定评价用计算壁厚:

1) 圆筒、锥壳或弯头:

$$t_c^S = t_{am}^S - FCA \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$t_c^C = t_{am}^C - FCA \quad \dots\dots\dots(14)$$

2) 球壳或凸形封头:

$$t_c^G = \min\{t_c^S, t_c^C\} \quad \dots\dots\dots(15)$$

b) 按设计准则和实际使用条件确定待评价部件的所需最小壁厚;

c) 若满足以下评价准则,则通过 1 级评价:

1) 圆筒、锥壳或弯头:

$$t_c^S \geq t_{min}^S \quad \text{且} \quad t_c^C \geq t_{min}^C \quad \dots\dots\dots(16)$$

2) 球壳或凸形封头:

$$t_c^G \geq t_{min} \quad \dots\dots\dots(17)$$

3) 常压储罐

$$t_c^S \geq t_{min} \quad \dots\dots\dots(18)$$

5.6.2 2 级评价

5.6.2.1 评价用结构参数的确定

评价用结构参数的确定方法如下:

- a) 根据均匀减薄的实际情况,考虑未来计划运行时间内的腐蚀量,确定所评价构件的直径、壁厚等结构参数的取值。
- b) 使用常规测厚数据,按式(11)确定评价用计算壁厚。
- c) 使用危险壁厚截面法测厚数据,按式(19)确定评价用计算壁厚。

$$t_c = \min\{t_{am}^S - FCA, t_{am}^C - FCA\} \quad \dots\dots\dots(19)$$

5.6.2.2 承受内压的典型部件评价方法

对于仅承受内压、附加载荷可忽略的圆筒、球壳、球形封头、椭圆封头、弯管、焊制三通(接管)结构(结构示意图见图 6~图 10),按以下公式确定部件塑性极限内压载荷  $P_L$ ,分析时应考虑未来计划运行时间内的腐蚀量:

a) 内压圆筒

$$p_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{ys} \ln(K) \quad (1.001 \leq K \leq 1.25) \quad \dots\dots\dots(20)$$

b) 内压球壳或球型封头

$$p_L = 2\sigma_{ys} \ln(K) \quad (1.001 \leq K \leq 1.25) \quad \dots\dots\dots(21)$$

c) 椭圆封头

$$p_L = \left[ 0.349 \cdot 1 \left( \frac{D}{2h_i} \right)^2 - 1.435 \cdot 9 \left( \frac{D}{2h_i} \right) + 3.086 \cdot 8 \right] \sigma_{ys} \ln(K) \\ \left( 1.2 \leq \frac{D}{2h_i} \leq 2.6, 1.001 \leq K \leq 1.25 \right) \quad \dots\dots\dots(22)$$

d) 弯管或弯头

$$p_L = \frac{2G_{BP}}{\sqrt{\left( \frac{R}{R-r_m} \right)^2 + \left( \frac{R}{R-r_m} \right) + 1}} \sigma_{ys} \frac{t}{r_m} \quad (1.03 \leq K \leq 1.25) \quad \dots\dots\dots(23)$$

式中：

$G_{BP}$ ——承受内压载荷弯头的形状修正系数，按式(24)计算：

$$G_{BP} = \begin{cases} 0.284\ 0K + 0.872\ 7 & R/D_o = 1.0 \\ 0.187\ 2K + 0.831\ 5 & R/D_o = 1.5 \end{cases} \dots\dots\dots(24)$$

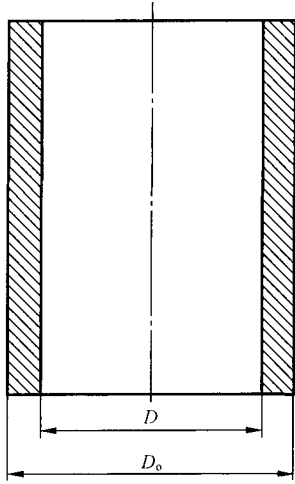


图 6 内压圆筒结构示意图

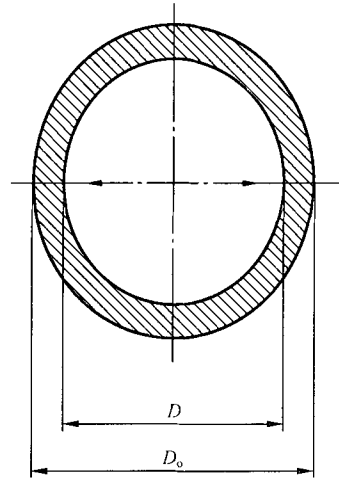


图 7 内压球壳结构示意图

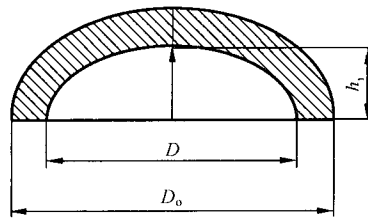


图 8 内压椭圆封头结构示意图

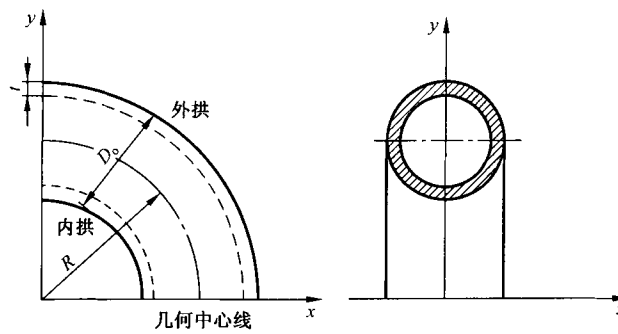


图 9 内压作用下弯头结构示意图

e) 接管或焊制三通

$$p_L = \left( 0.228 \ 8 K_1 \frac{t_2}{t_1} \frac{D_{o1}}{D_{o2}} + 0.432 \ 5 \right) \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{ys} \ln(K_1)$$

$$\left( 1.03 \leq K_1 \leq 1.25 \quad 1.0 \leq \frac{t_2}{t_1} \frac{D_{o1}}{D_{o2}} \leq 1.5 \right) \dots\dots\dots (25)$$

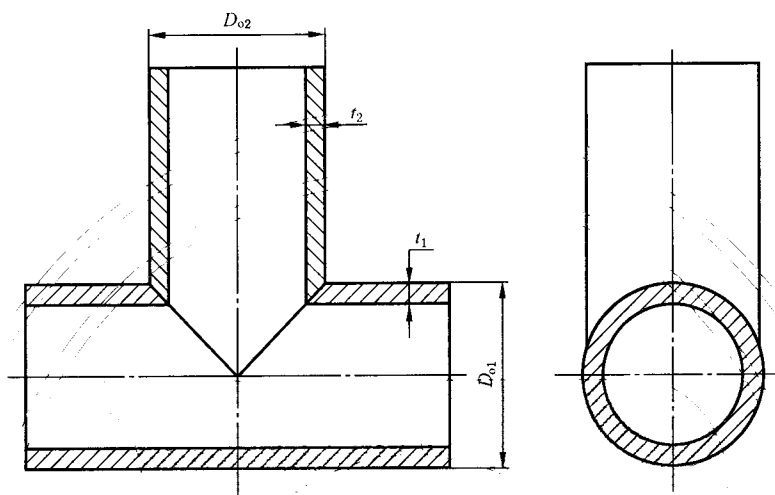


图 10 内压作用下三通结构示意图

若评价计算压力满足以下条件,则评价结果可接受:

$$P < p_L / 1.5 \dots\dots\dots (26)$$

### 5.6.2.3 任意部件承受组合内压、外压、附加载荷时的评价方法

采用基于有限元法的极限分析方法对承受组合内压、外压、附加载荷的任意部件进行 2 级评价。具体步骤和要求如下:

- a) 建立部件的有限元分析模型;
- b) 材料本构关系采用理想弹塑性模型;
- c) 采用小变形假设;
- d) 将一组与评价工况载荷  $\{\vec{F}\}$  相适应的广义载荷  $\{\vec{F}^0\} = \{F_1^0, F_2^0, \dots, F_n^0\}$  施加在分析模型上,载荷的数值可任意设定,但应保证各载荷之间的比例关系符合评价工况;
- e) 使用弧长法求解弹塑性问题,获得结构第一个失稳点对应的加载系数  $\text{Time}_{\max}$ ;
- f) 以 e) 步获得的加载系数与所施加的广义载荷值相乘,得到对应各载荷的极限载荷值:

$$\{\vec{F}_L\} = \{\vec{F}^0\} \cdot \text{Time}_{\max} \dots\dots\dots (27)$$

- g) 若评价工况的各载荷均满足式(28),则 2 级评价结果可接受:

$$\{\vec{F}\} < \{\vec{F}_L\} / 1.5 \dots\dots\dots (28)$$

## 6 局部减薄评价

### 6.1 总则

6.1.1 本章的评价方法可用于评价因腐蚀、冲蚀、机械损伤或因缓慢磨蚀等原因引起局部金属减薄(LTA),也可用于评价裂纹类缺陷被打磨后形成的局部金属减薄区。

6.1.2 对于存在局部减薄的压力容器,如果满足 GB/T 19624 中凹坑缺陷安全评定的限定条件,首先推



荐按 GB/T 19624 进行评价。如果不满足 GB/T 19624 中凹坑缺陷安全评定的限定条件,按本章的评定方法进行评价。

6.1.3 本章的评价方法不适用于在蠕变温度范围内服役的部件,蠕变温度范围参见表 A.1。

## 6.2 符号

- $A^i$ ——子区域  $i$  的金属减薄面积,包括 FCA 的影响(见图 14),单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_a$ ——圆筒内圆的横截面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_f$ ——局部金属减薄区的横截面积(在图 16 中标记为“局部金属减薄区”的无阴影区),单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_m$ ——圆筒的横截面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_o^i$ ——子区域  $i$  的初始金属面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_r$ ——计算没有金属减薄的横截面上的剪应力时采用的面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_{rf}$ ——计算有金属减薄的横截面上的剪应力时采用的面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_w$ ——压力作用的有效面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $b$ ——基于  $x$ - $x$  轴,  $A_w$  面的形心位置,单位为  $\text{mm}$ ;
- $c$ ——局部金属减薄区的环向长度,单位为  $\text{mm}$ ;
- $D$ ——圆筒、锥(在缺陷位置处)壳、球壳或成型封头的内直径,单位为  $\text{mm}$ ;
- $D_f$ ——局部金属减薄区底部的直径(见图 17),单位为  $\text{mm}$ ;
- $D_o$ ——圆筒外直径,单位为  $\text{mm}$ ;
- $d$ ——局部金属减薄区域的最大深度,单位为  $\text{mm}$ ;
- $E_c$ ——环向焊接接头系数;
- $E_L$ ——轴向焊接接头系数;
- $E_y$ ——评价温度下材料的弹性模量,单位为  $\text{MPa}$ ;
- $F$ ——自重或自重加热载荷工况下有效截面上的轴向力,单位为  $\text{N}$ ;
- FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量,单位为  $\text{mm}$ ;
- $H_f$ ——许用应力因子,取决于评价时考虑的载荷情况;
- $h_f$ ——从缺陷底部到储罐底板的距离,单位为  $\text{mm}$ ;
- $I_{LX}$ ——局部金属减薄区横截面  $A_f$  关于  $x$  轴的惯性矩,单位为  $\text{mm}^4$ ;
- $I_{LY}$ ——局部金属减薄区横截面  $A_f$  关于  $y$  轴的惯性矩,单位为  $\text{mm}^4$ ;
- $L_T$ ——圆筒的总长度,单位为  $\text{mm}$ ;
- $I_x$ ——圆筒关于  $x$ - $x$  轴的惯性矩,单位为  $\text{mm}^4$ ;
- $I_{\bar{x}}$ ——局部金属减薄区横截面关于  $\bar{x}$  轴的惯性矩,单位为  $\text{mm}^4$ ;
- $I_y$ ——圆筒关于  $y$ - $y$  轴的惯性矩,单位为  $\text{mm}^4$ ;
- $I_{\bar{y}}$ ——局部金属减薄区横截面关于  $\bar{y}$  轴的惯性矩,单位为  $\text{mm}^4$ ;
- $L_i$ ——圆筒  $i$  的长度(见图 15),单位为  $\text{mm}$ ;
- $L_{msd}$ ——缺陷到最近的总体结构不连续处的距离,单位为  $\text{mm}$ ;
- $M_T$ ——自重或自重加热载荷工况下有效截面上的扭矩,如图 16 所示,单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;
- $M_{al}$ ——载荷控制的弯矩,单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;
- $M_{as}$ ——应变控制的弯矩,单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;
- $M_s^C$ ——表面缺陷基于 LTA 环向长度的傅里叶值;
- $M_t$ ——穿透缺陷基于 LTA 轴向长度的傅里叶值;

- $M_i^c$ ——穿透缺陷基于 LTA 环向长度的傅里叶值；
- $M_i'$ ——子区域  $i$  的穿透缺陷基于 LTA 轴向长度的傅里叶值；
- $M_x$ ——自重或自重加热载荷工况下关于  $x$  轴的截面弯矩,如图 16 所示,单位为  $N \cdot m$ ；
- $M_y$ ——自重或自重加热载荷工况下关于  $y$  轴的截面弯矩,如图 16 所示,单位为  $N \cdot m$ ；
- MFH——无损伤或损伤可忽略储罐液体最大充装高度,单位为 mm；
- $MFH_r$ ——评价计算所得考虑缺陷或损伤影响的储罐液体最大充装高度,单位为 mm；
- $P^{max}$ ——采用评价用计算壁厚,按相应标准、规范计算所得的部件最大允许操作压力,单位为 MPa；
- $P_i^s$ ——圆筒  $i$  的允许外压,单位为 MPa；
- $P_i^{max}$ ——评价计算所得考虑缺陷或损伤影响的部件最大允许操作压力,单位为 MPa；
- $R$ —— $A_i$  区域的外半径,对 FCA 要做适当的修正,单位为 mm；
- $R_i$ ——待评价局部减薄区域剩余壁厚比；
- RSF——剩余强度因子；
- $RSF^i$ ——子区域  $i$  的剩余强度因子；
- $RSF_a$ ——允许剩余强度因子,一般取 0.9；
- $s$ ——局部金属减薄区的轴向长度,单位为 mm；
- $s^i$ ——局部金属减薄区的轴向长度增量(见图 14),单位为 mm；
- $t_c$ ——评价用计算壁厚,单位为 mm；
- $t_i$ ——圆筒划分为多层后第  $i$  层的壁厚值,用于确定圆筒的最大许用外压,单位为 mm；
- $t_{min}$ ——根据设计规范或标准确定的部件所需最小壁厚,单位为 mm；
- $t_{mm}$ ——局部金属减薄区的最小实测壁厚,单位为 mm；
- $t_{nom}$ ——名义壁厚,单位为 mm；
- $t_{rd}$ ——远离局部金属减薄区的实测壁厚,单位为 mm；
- $t_{sl}$ ——附加载荷所需壁厚,单位为 mm；
- TSF——抗拉强度系数；
- $V$ ——自重或自重加热载荷工况下的截面剪切力,单位为 N；
- $\bar{x}$ ——中性轴的位置(见图 17),单位为 mm；
- $x_A$ ——横截面上沿  $x$  轴从  $y$  轴到点  $A$  的距离(如图 17 所示),单位为 mm；
- $x_B$ ——横截面上沿  $x$  轴从  $y$  轴到点  $B$  的距离(如图 17 所示),单位为 mm；
- $\bar{y}$ ——中性轴的位置(如图 17 所示),单位为 mm；
- $y_A$ ——横截面上沿  $y$  轴从  $\bar{x}-\bar{x}$  轴到点  $A$  的距离(如图 17 所示),单位为 mm；
- $y_B$ ——横截面上沿  $y$  轴从  $\bar{x}-\bar{x}$  轴到点  $B$  的距离(如图 17 所示),单位为 mm；
- $\bar{y}_{LX}$ —— $A_i$  区域的质心到  $x$  轴的距离,单位为 mm；
- $\alpha$ ——锥壳半顶角,单位为  $(^\circ)$ ；
- $\theta$ ——描述横截面上局部金属减薄区范围的角度,单位为 rad；
- $\lambda^i$ ——子区域  $i$  的缺陷轴向长度参数增量,单位为 mm；
- $\lambda_c$ ——缺陷环向长度参数；
- $\lambda_s$ ——缺陷轴向长度参数；
- $[\sigma]$ ——根据原设计规范或标准确定的许用应力,单位为 MPa；
- $[\sigma]_{al}$ ——对载荷控制的部件,根据原设计规范或标准确定的许用应力,单位为 MPa；
- $[\sigma]_{as}$ ——对应变控制的部件,根据原设计规范或标准确定的许用应力,单位为 MPa；

- $\sigma_{em}$ ——最大环向应力,单位为 MPa;
- $\sigma_c^A$ ——自重或自重加热载荷工况下,点 A 处的等效薄膜应力(见图 17),单位为 MPa;
- $\sigma_c^B$ ——自重或自重加热载荷工况下,点 B 处的等效薄膜应力(见图 17),单位为 MPa;
- $\sigma_{lm}^A$ ——自重或自重加热载荷工况下,点 A 处的最大轴向薄膜应力(见图 17),单位为 MPa;
- $\sigma_{lm}^B$ ——自重或自重加热载荷工况下,点 B 处的最大轴向薄膜应力(见图 17),单位为 MPa;
- $\sigma_{lp}$ ——压力引起的轴向应力,单位为 MPa;
- $\tau$ ——自重或自重加热载荷工况下的最大剪应力,单位为 MPa。

### 6.3 评价方法限定条件

6.3.1 1 级评价仅适用于承受内压 A 类部件,2 级评价适用于承受内压、外压及附加载荷或任何组合载荷的 A 类或 B 类部件。采用 1 级或 2 级评价方法的部件,应满足以下所有的条件:

- a) 原设计满足相关的规范或标准要求;
- b) 材料具有足够的韧性;
- c) 不承受循环载荷。

6.3.2 当不满足 1 级和 2 级评价限定条件或 1 级和 2 级评价结果不通过时,可进行 3 级评价。包括但不限于局限于下列情况可进行 3 级评价:

- a) 承受内压、外压、附加载荷和上述载荷共同作用的 A 类、B 类和 C 类部件;
- b) 部件承受循环载荷,或在原始设计计算时部分进行过疲劳分析;
- c) 金属减薄位于椭圆形封头  $0.8D$  外的区域,碟形封头和带折边锥形封头的过渡区或锥段过渡区;
- d) 基于验证性试验设计的部件。

6.3.3 在评价局部减薄时,如存在其他缺陷或损伤,应考虑其他缺陷或损伤的影响;在评价其他损伤或缺陷时,如存在局部减薄,也应考虑局部减薄的影响。

### 6.4 评价流程

在未来计划运行时间内金属减薄量不会超过许用腐蚀裕量,仅需记录数据,可以免于评价;否则,应按照图 11 所示的评价步骤进行评价。

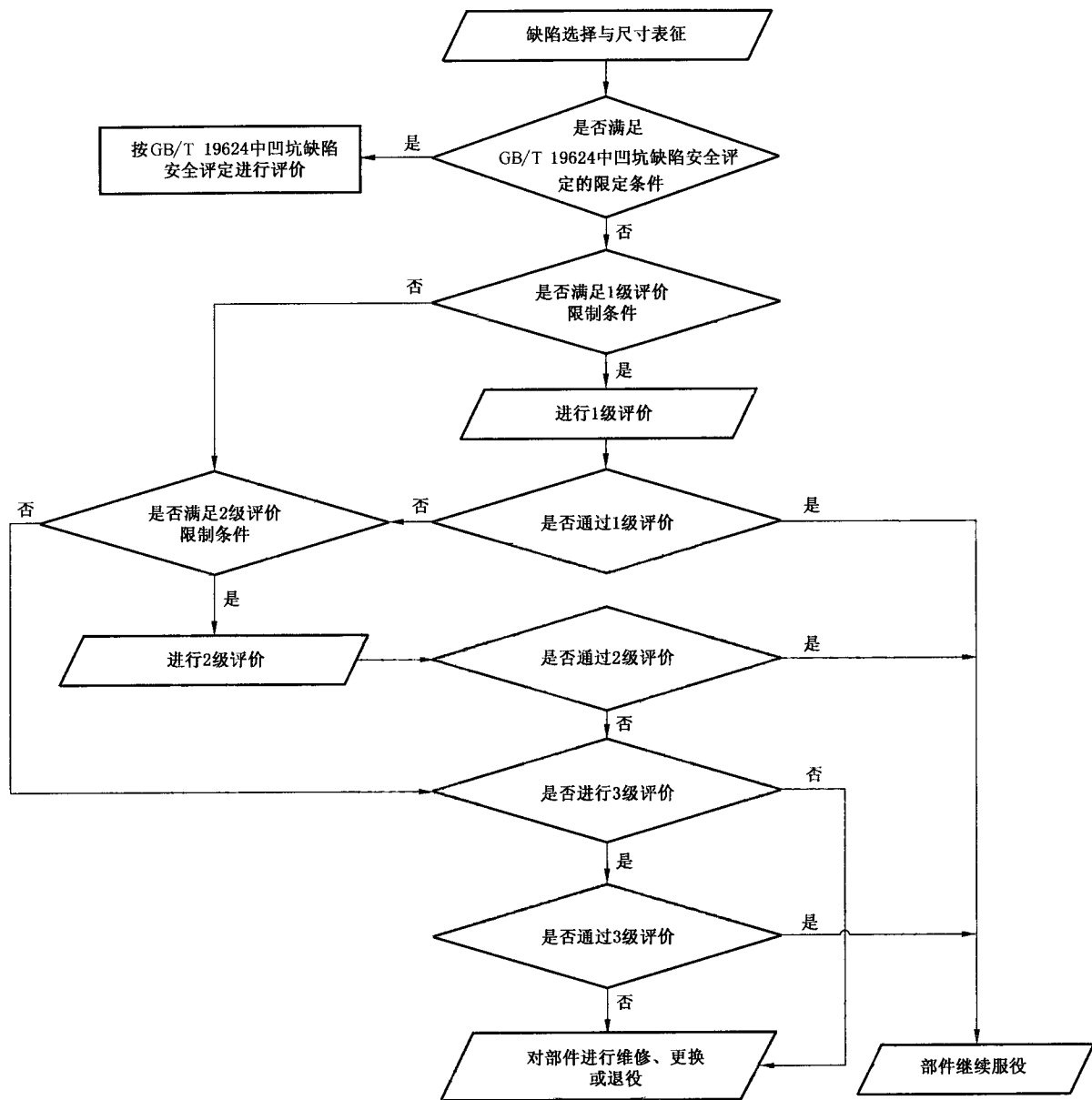
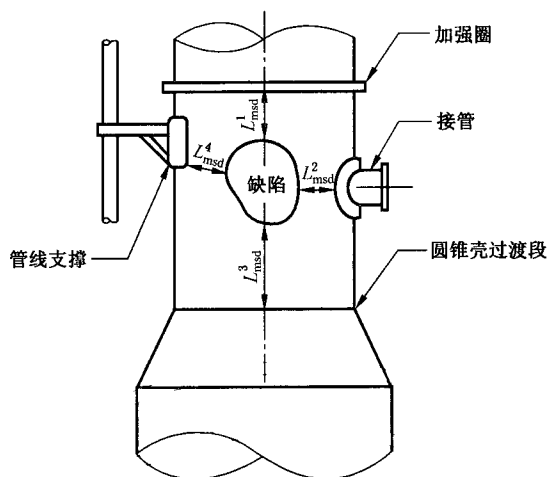


图 11 评价流程图

### 6.5 缺陷选择与尺寸表征

6.5.1 根据 5.4.3 给出的危险壁厚截面法确定危险壁厚截面图(CTP)、局部减薄区的轴向和环向尺寸。

6.5.2 局部金属减薄区到总体结构不连续处的距离按图 12 确定。



说明:

- 1) 缺陷到最近的总体结构不连续处的距离:  $L_{msd} = \min\{L^1_{msd}, L^2_{msd}, L^3_{msd}, L^4_{msd}\}$ 。
- 2) 图中给出了立式容器的典型总体结构不连续处。在确定  $L_{msd}$  时, 需要考虑缺陷与这些支撑、接管、管道/平台支架、锥壳过渡段、加强圈等的间距。
- 3) 图中定义的最小距离测量值, 是从局部减薄区最近的边缘到结构不连续处的最近焊缝处的距离。

图 12 确定  $L_{msd}$  的方法

## 6.6 评价方法

### 6.6.1 1 级评价

按照以下步骤对含局部减薄的部件进行 1 级评价, 对于常压储罐, 用 MFH 代替  $P^{max}$ :

- a) 确定评价用计算壁厚:

$$t_c = t_{rd} - FCA \quad \dots\dots\dots (29)$$

- b) 确定局部金属减薄区的最小实测壁厚  $t_{mm}$ , 局部金属减薄区的轴向长度  $s$  和缺陷到最近的总体结构不连续处的距离  $L_{msd}$ 。

- c) 按式(30)和式(31)确定剩余壁厚比  $R_t$  和缺陷轴向长度参数  $\lambda_s$ :

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_c} \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$\lambda_s = \frac{1,285s}{\sqrt{Dt_c}} \quad \dots\dots\dots (31)$$

- d) 如果同时满足下列条件, 则继续按 e) 进行评价; 否则, 不满足 1 级评价。

$$R_t \geq 0.20 \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$\begin{cases} t_{mm} - FCA \geq 2.5 \text{ mm} & \text{容器和储罐} \\ t_{mm} - FCA \geq 1.3 \text{ mm} & \text{管道} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$L_{msd} \geq 1.8\sqrt{Dt_c} \quad \dots\dots\dots (34)$$

- e) 采用  $t_c$ , 按照相应规范或标准计算部件的  $P^{max}$ 。

- f) 轴向评价:

按式(35)确定 RSF:

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)} \quad \dots\dots\dots (35)$$

式(35)中的参数  $M_1$  根据缺陷轴向长度参数  $\lambda$  由表 1 确定。

如果  $RSF \geq RSF_a$ , 且  $P_r^{max}$  可接受, 则局部减薄区的轴向长度可接受, 继续按 g) 进行评价; 对于球壳和成型封头, 其局部减薄区的环向或轴向长度都可接受。如果  $RSF < RSF_a$ , 则按式(36)计算  $P_r^{max}$ 。如果含局部减薄部件的操作压力不大于  $P_r^{max}$ , 则局部减薄区的轴向长度可接受, 继续按 g) 进行评价。否则, 1 级评价不通过。

$$\begin{cases} P_r^{max} = P_r^{max} \left( \frac{RSF}{RSF_a} \right) & \text{当 } RSF < RSF_a \text{ 时} \dots\dots\dots (36) \\ P_r^{max} = P_r^{max} & \text{当 } RSF \geq RSF_a \text{ 时} \end{cases}$$

对于储罐壁板

$$\begin{cases} MFH_r = h_f + (MFH - h_f) \left( \frac{RSF}{RSF_a} \right) & \text{当 } RSF < RSF_a \text{ 且 } MFH > h_f \text{ 时} \dots\dots\dots (37) \\ MFH_r = MFH & \text{当 } RSF \geq RSF_a \text{ 且 } MFH \leq h_f \text{ 时} \end{cases}$$

表 1 圆筒、锥壳和球壳的系数  $M_1$

$\lambda$	$M_1$	
	圆筒或锥壳	球壳
0.0	1.001	1.000
0.5	1.056	1.063
1.0	1.199	1.218
1.5	1.394	1.427
2.0	1.618	1.673
2.5	1.857	1.946
3.0	2.103	2.240
3.5	2.351	2.552
4.0	2.600	2.880
4.5	2.847	3.221
5.0	3.091	3.576
5.5	3.331	3.944
6.0	3.568	4.323
6.5	3.801	4.715
7.0	4.032	5.119
7.5	4.262	5.535
8.0	4.492	5.964
8.5	4.727	6.405
9.0	4.970	6.858
9.5	5.225	7.325

表 1 (续)

λ	M <sub>t</sub>	
	圆筒或锥壳	球壳
10.0	5.497	7.806
10.5	5.791	8.301
11.0	6.112	8.810
11.5	6.468	9.334
12.0	6.864	9.873
12.5	7.307	10.429
13.0	7.804	11.002
13.5	8.362	11.592
14.0	8.989	12.200
14.5	9.693	12.827
15.0	10.481	13.474
15.5	11.361	14.142
16.0	12.340	14.832
16.5	13.423	15.544
17.0	14.616	16.281
17.5	15.921	17.042
18.0	17.338	17.830
18.5	18.864	18.645
19.0	20.494	19.489
19.5	22.219	20.364
20.0	24.027	21.272

注 1: λ 是根据式(31)或式(38)计算所得的缺陷轴向或环向长度参数值。

注 2: λ 的中间值可以进行差值计算。

注 3: 圆筒的计算公式如下,如果 λ>20,则取 λ=20 进行计算:

$$M_t = \left[ \begin{array}{l} 1.001\ 0 - 0.014\ 195\lambda + 0.290\ 90\lambda^2 - 0.096\ 420\lambda^3 + 0.020\ 890\lambda^4 - \\ 0.003\ 054\ 0\lambda^5 + 2.957\ 0(10^{-1})\lambda^6 - 1.846\ 2(10^{-5})\lambda^7 + 7.155\ 3(10^{-7})\lambda^8 - \\ 1.563\ 1(10^{-8})\lambda^9 + 1.465\ 6(10^{-10})\lambda^{10} \end{array} \right]$$

注 4: 球壳的计算公式如下(λ 的值受壳体内周长的限制):

$$M_t = \left( \frac{1.000\ 5 + 0.490\ 01\lambda + 0.324\ 09\lambda^2}{1.0 + 0.501\ 44\lambda - 0.011\ 067\lambda^2} \right)$$

g) 环向评价:

1) 按式(38)确定缺陷环向长度参数 λ<sub>c</sub>:

$$\lambda_c = \frac{1.285c}{\sqrt{Dt_c}} \dots\dots\dots (38)$$

根据缺陷环向长度参数,按表 6.1 确定 M<sub>t</sub>,按式(35)确定 RSF。

2) 如果以下的条件都满足,继续按 3)进行评价;否则,1 级评价不通过。

$$\lambda_c \leq 9 \quad \dots\dots\dots( 39 )$$

$$\frac{D}{t_c} \geq 20 \quad \dots\dots\dots( 40 )$$

$$0.7 \leq \text{RSF} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots( 41 )$$

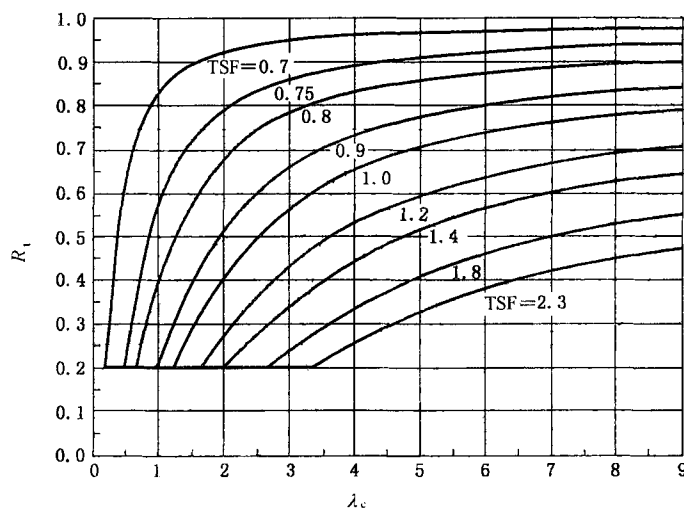
$$0.7 \leq E_L \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots( 42 )$$

$$0.7 \leq E_C \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots( 43 )$$

3) 按式(44)确定 TSF:

$$\text{TSF} = \frac{E_c}{2 \cdot \text{RSF}} \left[ 1 + \frac{\sqrt{4 - 3E_L^2}}{E_L} \right] \quad \dots\dots\dots( 44 )$$

4) 根据 TSF 在图 13 中选择合适的筛选曲线。用求得的  $\lambda_c$  和  $R_1$  值,在图 13 中作图。如果这两个值的交点落在所选择的筛选曲线上或高于所选择的筛选曲线,则通过 1 级评价。



注 1: 图中 TSF 的公式见表 2。

注 2: TSF 中间值可通过差值法确定。

图 13 圆筒、锥壳局部减薄环向 1 级评价准则

表 2 图 13 中的 TSF 曲线方程

TSF	$\lambda_{c-0.2}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
0.7	0.21	9.922 1E-01	-1.195 9E-01	-5.733 3E-02	1.694 8E-02	-1.797 6E-03	6.911 4E-05
0.75	0.48	9.680 1E-01	-2.378 0E-01	-3.267 8E-01	2.068 4E-01	-4.653 7E-02	3.943 6E-03
0.8	0.67	9.441 3E-01	-3.125 6E-01	-6.996 8E-01	6.502 0E-01	-2.210 2E-01	2.879 9E-02
0.9	0.98	8.996 2E-01	-3.886 0E-01	-1.648 5E+00	2.344 5E+00	-1.253 4E+00	2.533 1E-01
1.0	1.23	8.594 7E-01	-4.001 2E-01	-2.797 9E+00	5.072 9E+00	-3.521 7E+00	9.187 7E-01
1.2	1.66	7.865 4E-01	-2.532 2E-01	-5.798 2E+00	1.385 8E+01	-1.311 8E+01	4.643 6E+00



表 2 (续)

TSF	$\lambda_{c-0.2}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
1.4	2.03	7.233 5E-01	1.152 8E-02	-9.353 6E+00	2.603 1E+01	-2.937 2E+01	1.238 7E+01
1.8	2.66	6.073 7E-01	9.379 6E-01	-1.923 9E+01	6.426 7E+01	-9.130 7E+01	4.896 2E+01
2.3	3.35	4.930 4E-01	2.169 2E+00	-3.245 9E+01	1.224 5E+02	-2.024 3E+02	1.272 7E+02

注 1: 如果  $\lambda_c \leq \lambda_{c-0.2}$ , 则  $R_i = 0.2$ 。  
 注 2: 如果  $\lambda_{c-0.2} < \lambda_c \leq 9$ , 则对于一个给定的 TSF,  $R_i$  值可由以下公式确定:

$$R_i = C_1 + \frac{C_2}{\lambda_c} + \frac{C_3}{\lambda_c^2} + \frac{C_4}{\lambda_c^3} + \frac{C_5}{\lambda_c^4} + \frac{C_6}{\lambda_c^5}$$

6.6.2 2 级评价

6.6.2.1 A 类部件的 2 级评价

A 类部件的 2 级评价步骤如下:

- a) 按式(32)~式(34)进行校核,如果均满足相应要求,继续按 b) 进行评价;否则,2 级评价不通过。
- b) 采用评价用计算壁厚  $t_i$ ,按照相应规范或标准计算部件的  $P^{max}$ 。分别计算轴向和环向的最大允许操作压力,取两者中的小值为  $P^{max}$ 。计算时应考虑因为附加载荷所需附加壁厚  $t_{si}$ 。
- c) 轴向评价:
  - 1) 将 CTP 细分为一系列的子区域(见图 14)。根据期望的精度,选择子区域的个数和范围,区域的个数和范围应包含金属减薄的变化。
  - 2) 选取最大金属减薄位置为初始评价点,首先计算第一个区域交叉阴影的面积  $A^i$  和方框的面积  $A_o^i$ ,其次依次计算第  $i$  个区域交叉阴影的面积  $A^i$  和方框的面积  $A_o^i$ 。
  - 3) 对于每个子区域  $i$ (见图 14),按式(45)计算剩余强度因子 RSF<sup>*i*</sup> 的值。

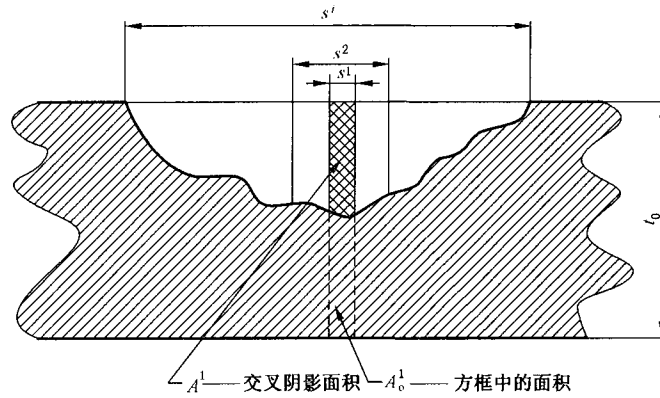
$$RSF^i = \frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_o^i}\right)}{1 - \frac{1}{M_i^i} \left(\frac{A^i}{A_o^i}\right)} \dots\dots\dots (45)$$

式中:

$$A_o^i = s^i t_c \dots\dots\dots (46)$$

式(45)中参数  $M_i^i$  按表 1 确定,取  $\lambda = \lambda^i$ ,  $\lambda^i$  按式(31)计算。

- 4) 部件的剩余强度因子 RSF 取所有子区域剩余强度因子的最小值。
- 5) 对于圆筒和锥壳,如果  $RSF \geq RSF_a$ ,且  $P^{max}$  可接受,则局部减薄区的轴向长度可接受;如果  $RSF < RSF_a$ ,采用 b) 中的  $P^{max}$ ,按式(36)计算  $P_r^{max}$  值,若  $P_r^{max}$  可接受,则局部减薄区的轴向长度可接受。否则,2 级评价不通过。对于球壳和成形封头,取金属减薄区环向长度和轴向长度的大者进行评价。
- d) 环向评价:
  - 1) 如果无附加载荷或附加载荷可忽略,由环向 CTP 确定的缺陷环向尺寸  $c$ ,满足 6.6.1g) 中式(39)~式(44)的要求,则通过 2 级评价。
  - 2) 如果附加载荷不可忽略,应按 6.6.2.3 评价局部金属减薄区的环向长度是否满足要求。



说明:

$A^i$ ---子区域  $i$  的金属减薄面积,与长度有关( $s^i$  交叉阴影区域),该区域可以采用数值积分技术评价(如辛普森或梯形法)。

$A_0^i$ ---子区域  $i$  的初始金属面积, $A_0^i = s^i t_c$ 。

图 14 2 级评价中确定局部金属减薄 RSF 的方法

6.6.2.2 受外压的圆筒和锥壳评价

受外压的圆筒和锥壳评价步骤如下:

- a) 根据轴向 CTP 图,将局部减薄壳体在厚度方向上分成若干个层(见图 15),每层的厚度记为  $t_i$ ,长度记为  $L_i$ 。

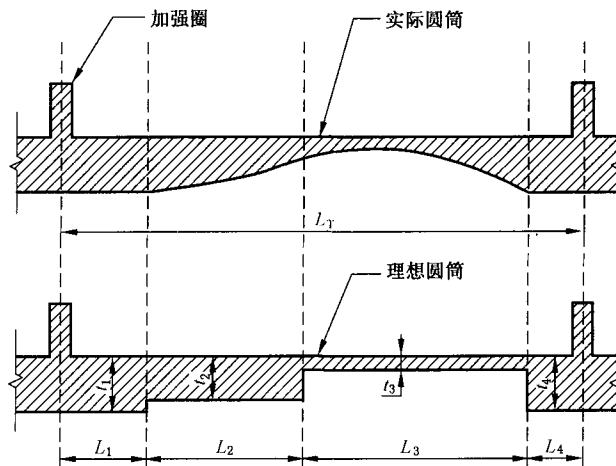


图 15 含 LTA 圆筒最大允许外压参数的确定

- b) 采用圆筒每一层的评价用计算壁厚  $t_c$  和圆筒两相邻支撑线间的距离  $L_T$ ,按设计规范计算圆筒每一层的许用外压。
- c) 按式(47)确定圆筒的许用外压:

$$p_r^{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{P_i^c}} \dots\dots\dots (47)$$

- d) 如果  $P_r^{\max}$  可接受,则通过 2 级评价。

6.6.2.3 承受附加载荷的圆筒和锥壳环向评价

6.6.2.3.1 附加载荷可能引起净横截面上的轴向力、弯矩、扭矩和剪力。这些载荷作用在含缺陷圆筒的横截面上,除了因内压产生的轴向和环向薄膜应力外,还将产生作用在缺陷上的轴向薄膜应力、弯曲应力和剪应力。

评价考虑的附加载荷应包括产生载荷控制和应变控制作用影响的载荷。载荷控制是指自重工况,应变控制是指自重加热载荷工况。因此,应计算两种载荷(自重及自重加热载荷)工况下,净横截面上的轴向力、弯曲弯矩、扭矩以及剪力。自重工况包括压力作用、部件的自重、风载荷、地震载荷和其他等可认为是载荷控制的载荷作用。自重加热载荷工况包括自重工况和热载荷共同作用工况,热载荷后者包括温度的影响、支撑的位移等和其他可认为是应变控制的载荷。计算时,应分别计算上述两种工况下净横截面上的轴向力、弯曲弯矩、扭矩以及剪力。

在没有详细的应力分析的情况下,可对 6.6.2.3.3 中的评价方法作如下修正:

- a) 计算由于压力引起的轴向应力,将其标记为  $\sigma_{ip}$ 。
- b) 对于载荷控制情况,许用应力  $[\sigma]_{cl}$  减去  $\sigma_{ip}$ ;对于应变控制情况,许用应力  $[\sigma]_{as}$  减去  $\sigma_{ip}$ 。
- c) 将 b) 中求出的应力值乘以没有腐蚀情况下圆筒的截面模量,即为载荷控制的弯矩  $M_{cl}$ ,以及应变控制的弯矩  $M_{as}$ 。
- d) 按式(52),设轴向力  $F$  为 0,在两种载荷工况下,计算点 A 的轴向应力  $\sigma_{im}^A$ 。用  $M_{cl}$  替换  $M_x$  和  $M_y$ ,可以得到最大载荷控制下的轴向应力;用  $M_{as}$  替换  $M_x$  和  $M_y$ ,可以得到最大应变控制下的轴向应力。
- e) 按式(53),通过设置轴向力  $F$  为 0,在两种载荷工况下,计算点 B 的轴向应力  $\sigma_{im}^B$ 。用  $M_{cl}$  替换  $M_x$  和  $M_y$ ,可以得到最大载荷控制下的轴向应力;用  $M_{as}$  替换  $M_x$  和  $M_y$ ,可以得到最大应变控制下的轴向应力。
- f) 按 6.6.2.3.3f) 评价载荷控制下和应变控制下的应力  $\sigma_{im}^A$  和  $\sigma_{im}^B$ 。当对 6.6.2.3.3f) 的结果进行评价时,设剪应力  $\tau$  为 0。

6.6.2.3.2 对于管线系统,应考虑管件壁厚、管子柔性、刚度以及应力之间的关系:

- a) 通过管线应力分析计算由于附加载荷引起的作用在含缺陷环向平面的力及弯矩。使用此种分析模型时,应考虑金属减薄的影响。根据 6.6.2.3.1 b) 可计算出最大弯矩。
- b) 如果局部金属减薄位于弯头或弯管处,需要一些特殊考虑。因为局部金属减薄区域的位置和分布会极大影响部件的柔性和应力分布,在设计时无法估算;局部金属减薄还会极大降低管线系统所能承受的塑性极限载荷。在某些情况下,当采用需要进行详细应力分析的 3 级评价时,应使用壳单元或连续单元。

6.6.2.3.3 评价时应考虑附加载荷,如图 16 所示。具体评价方法如下:

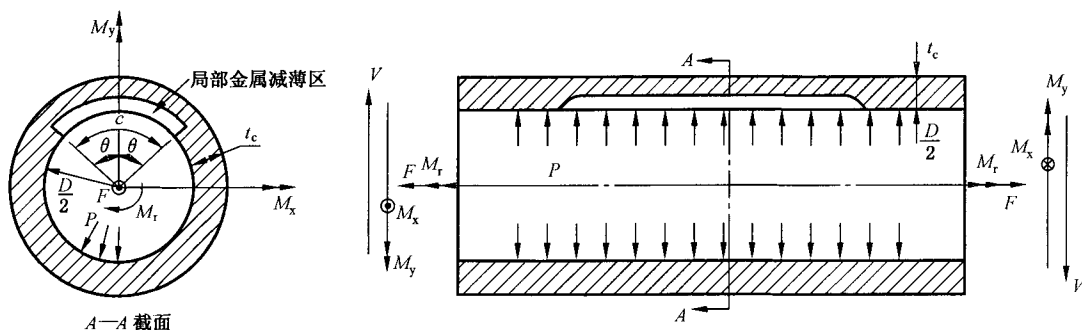


图 16 环向 CTP 评价附加载荷受力模型图

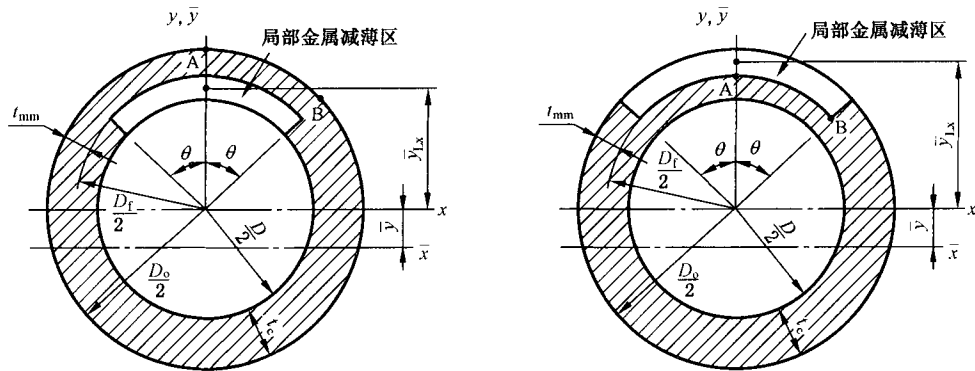


图 17 含 LTA 圆筒截面性能的相关参数示意图

- a) 确定环向 CTP。
- b) 确定局部金属减薄区的环向范围,表征为图 7 所示长方形区域,具体如下:
  - 1) 对位于内表面上的局部金属减薄区:

$$D_i = D_o - 2(t_{mm} - FCA) \quad \dots\dots\dots(48)$$

- 2) 对位于外表面上的局部金属减薄区:

$$D_i = D + 2(t_{mm} - FCA) \quad \dots\dots\dots(49)$$

- 3) 环向局部金属减薄区范围的角度:

$$\theta = \frac{c}{D_i} (\theta \text{ 以弧度表示}) \quad \dots\dots\dots(50)$$

- c) 确定剩余强度因子 RSF、评价计算所得考虑缺陷或损伤影响的部件最大允许操作压力  $P_r^{\max}$ , 以及作用在环向平面上的附加载荷。
- d) 采用按 c) 中确定的附加载荷,计算部件在缺陷相对于金属减薄区平面的总轴向弯矩  $M_x$  和  $M_y$  (不包括扭矩),见图 16。应考虑自重以及自重加热载荷的两种工况。
- e) 计算在自重和自重加热载荷两种工况下,在横截面 A 点和 B 点的环向应力(见图 17)。

$$\sigma_{cm} = \frac{P_r^{\max}}{RSF \cdot \cos\alpha} \left( \frac{D}{D_o - D} + 0.6 \right) \quad \dots\dots\dots(51)$$

- f) 计算在自重和自重加热载荷两种工况下,在横截面 A 点和 B 点的最大轴向薄膜应力和剪应力(见图 17)。在计算中应考虑所有可能的组合载荷。计算所需要的截面参数,见表 3(见图 16)。

$$\sigma_{lm}^A = \frac{M_s^C}{E_c \cdot \cos\alpha} \left\{ \frac{A_w}{A_m - A_f} P_r^{\max} + \frac{F}{A_m - A_f} + \frac{y_A}{I_{\bar{x}}} [F\bar{y} + (\bar{y} + b)P_r^{\max}A_w + M_x] + \frac{x_A}{I_{\bar{y}}} M_y \right\} \quad \dots(52)$$

$$\sigma_{lm}^B = \frac{M_s^C}{E_c \cdot \cos\alpha} \left\{ \frac{A_w}{A_m - A_f} P_r^{\max} + \frac{F}{A_m - A_f} + \frac{y_B}{I_{\bar{x}}} [F\bar{y} + (\bar{y} + b)P_r^{\max}A_w + M_x] + \frac{x_B}{I_{\bar{y}}} M_y \right\} \quad \dots(53)$$

$$\tau = \frac{M_T}{2(A_t + A_{tf})(t_{mm} - FCA)} + \frac{V}{A_m - A_f} \quad \dots\dots\dots(54)$$

表 3 规则化后环向 CTP 的截面参数

通用方程	
$I_{\bar{x}} = I_x + A_m \bar{y}^2 - I_{LX} - A_f (\bar{y}_{LX} + \bar{y})^2$ $I_{\bar{y}} = I_y - I_{LY}$ $I_x = I_y = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D^4)$ $I_{LX} = R^3 d \left[ \left( 1 - \frac{3d}{2R} + \frac{d^2}{R^2} - \frac{d^3}{4R^3} \right) \left( \theta + \sin\theta \cos\theta - \frac{2\sin^2\theta}{\theta} \right) + \frac{d^2 \sin^2\theta}{3R^2 \theta (2-d/R)} \left( 1 - \frac{d}{R} + \frac{d^2}{6R^2} \right) \right]$ $\bar{y}_{LX} = \frac{2R \sin\theta}{3\theta} \left( 1 - \frac{d}{R} + \frac{1}{2-d/R} \right)$ $I_{LY} = R^3 d \left[ \left( 1 - \frac{3d}{2R} + \frac{d^2}{R^2} - \frac{d^3}{4R^3} \right) (\theta - \sin\theta \cos\theta) \right]$ $A_f = \frac{[0.5\pi(D+D_o) - c](D+D_o)}{8}$ $A_s = \frac{\pi}{4} D^2$ $A_m = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D^2)$	
内表面局部金属腐蚀减薄区域	外表面的局部金属腐蚀减薄区域
$A_f = \frac{\theta}{4} (D_i^2 - D^2)$ $A_s = A_s + A_f$ $\bar{y} = \frac{1}{12} \frac{\sin\theta(D_i^3 - D^3)}{A_m - A_f}$ $x_A = 0, 0$ $y_A = \bar{y} + \frac{D_o}{2}$ $x_B = \frac{D_o}{2} \sin\theta$ $y_B = \bar{y} + \frac{D_o}{2} \cos\theta$ $b = \frac{1}{12} \frac{\sin\theta(D_i^3 - D^3)}{A_s + A_f}$ $R = \frac{D_i}{2}$ $d = \frac{(D_i - D)}{2}$ $t_{mm} = \frac{(D_o - D_i)}{2}$ $A_{if} = \frac{c(D_o + D_i)}{8}$	$A_f = \frac{\theta}{4} (D_o^2 - D_i^2)$ $A_w = A_s$ $\bar{y} = \frac{1}{12} \frac{\sin\theta(D_o^3 - D_i^3)}{A_m - A_f}$ $x_A = 0, 0$ $y_A = \bar{y} + \frac{D_i}{2}$ $x_B = \frac{D_i}{2} \sin\theta$ $y_B = \bar{y} + \frac{D_i}{2} \cos\theta$ $b = 0$ $R = \frac{D_o}{2}$ $d = \frac{(D_o - D_i)}{2}$ $t_{mm} = \frac{(D_i - D)}{2}$ $A_{if} = \frac{c(D + D_i)}{8}$

式中：

$$M_s^c = \frac{1 - \left( \frac{1}{M_i^c} \right) \left( \frac{d}{t_c} \right)}{1 - \left( \frac{d}{t_c} \right)} \dots\dots\dots (55)$$

$$M_i^c = \frac{1.0 + 0.140 \ 1(\lambda_c)^2 + 0.002 \ 046(\lambda_c)^4}{1.0 + 0.095 \ 56(\lambda_c)^2 + 0.000 \ 502 \ 4(\lambda_c)^4} \dots\dots\dots(56)$$

除 LTA 的环向范围为 360° 的情况外,式(56)适用于  $\lambda_c \leq 9$  的情况,  $\lambda_c > 9$  时应采用 3 级评价方法。LTA 的环向范围为 360° 时,取  $M_i^c = 1.0$ 。

g) 计算在自重和自重加热载荷两种工况下,在横截面 A 点和 B 点的等效薄膜应力:

$$\sigma_e^A = [(\sigma_{cm})^2 - (\sigma_{cm})(\sigma_{im}^A) + (\sigma_{im}^A)^2 + 3\tau^2]^{0.5} \dots\dots\dots(57)$$

$$\sigma_e^B = [(\sigma_{cm})^2 - (\sigma_{cm})(\sigma_{im}^B) + (\sigma_{im}^B)^2 + 3\tau^2]^{0.5} \dots\dots\dots(58)$$

h) 结果评价:

1) 在自重和自重加热载荷两种工况下,如果轴向薄膜应力满足式(59)的要求,则通过 2 级评价。自重工况下,  $H_f = 1.0$ ,自重和热载荷工况下,  $H_f = 3.0$ 。

$$\max\{\sigma_e^A, \sigma_e^B\} \leq H_f \left( \frac{[\sigma]}{RSF_n} \right) \dots\dots\dots(59)$$

2) 如果在 f) 中计算的最大轴向薄膜应力为压应力,该值应小于或等于许用压应力值和许用拉应力值中的较小值,则 2 级评价通过。

### 6.6.3 3 级评价

采用应力分类或极限载荷分析方法进行局部金属减薄的 3 级评价。

## 7 点蚀评价

### 7.1 总则

7.1.1 本章的评价方法适用于四种点蚀类型的评价:

- a) 广布点蚀;
- b) 局部点蚀;
- c) 局部减薄区内点蚀;
- d) 存在局部减薄的广布点蚀区。

7.1.2 本章的评价方法不适用于在蠕变温度范围内服役的部件,蠕变温度范围参见表 A.1。

### 7.2 符号

- $A_n$ ——圆筒内圆的横截面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_m$ ——圆筒的横截面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $A_t$ ——计算剪应力时采用的面积,单位为  $\text{mm}^2$ ;
- $a$ ——中心轴线到计算弯曲应力对应点的距离,单位为  $\text{mm}$ ;
- $B$ ——系数;
- $D$ ——圆筒内直径,单位为  $\text{mm}$ ;
- $D_f$ ——考虑点蚀损伤的圆筒直径修正值,单位为  $\text{mm}$ ;
- $D_o$ ——圆筒外直径,单位为  $\text{mm}$ ;
- $d_{\text{avg},k}$ ——点蚀对  $k$  的平均直径,单位为  $\text{mm}$ ;
- $d_c$ ——当前的点蚀坑直径表征值,单位为  $\text{mm}$ ;
- $d_f$ ——未来计划运行时间的点蚀坑直径表征值,单位为  $\text{mm}$ ;
- $d_{i,k}$ ——点蚀对  $k$  中点蚀坑  $i$  的直径,单位为  $\text{mm}$ ;
- $d_{j,k}$ ——点蚀对  $k$  中点蚀坑  $j$  的直径,单位为  $\text{mm}$ ;
- $E_C$ ——环向焊接接头系数;

- $E_y$ ——评价温度下材料的弹性模量,单位为 MPa;
- $F$ ——自重或自重加热载荷工况下有效截面上的轴向力,单位为 N;
- FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量,不能用于点蚀坑深度预测,单位为 mm;
- $H_f$ ——许用应力因子,取决于评价时考虑的载荷情况;
- $I_x$ ——圆筒惯性矩,单位为  $\text{mm}^4$ ;
- $M$ ——自重或自重加热载荷工况下的弯矩,单位为  $\text{N} \cdot \text{mm}$ ;
- $M_T$ ——自重或自重加热载荷工况下有效截面上的扭矩,单位为  $\text{N} \cdot \text{mm}$ ;
- MFH——采用评价用计算壁厚,按相应标准、规范计算所得的储罐液体最大充装高度,单位为 mm;
- $\text{MFH}_r$ ——评价计算所得考虑缺陷或损伤影响的储罐液体最大充装高度,单位为 mm;
- $N$ ——多层分析中的层数;
- $n$ ——所评价的点蚀坑数量;
- $P^{\max}$ ——采用评价用计算壁厚,按相应标准、规范计算所得的部件最大允许操作压力,单位为 MPa;
- $P_k$ ——点蚀对  $k$  中两个点蚀坑中心距,单位为 mm;
- $P_r^{\max}$ ——评价计算所得考虑缺陷或损伤影响的部件最大允许操作压力,单位为 MPa;
- $\text{PPR}_{\text{pit-depth}}$ ——点蚀坑深度的变化率,单位为 mm/年;
- $\text{PPR}_{\text{pit diameter}}$ ——点蚀坑直径的变化率,单位为 mm/年;
- $Q$ ——无量纲因子,与允许剩余强度因子和剩余壁厚比相关;
- $R_1$ ——待评价点蚀坑剩余壁厚比;
- $R_{\text{wt}}$ ——最深点蚀坑剩余壁厚比;
- RSF——剩余强度因子;
- $\text{RSF}_a$ ——允许剩余强度因子,一般取 0.9;
- $\text{RSF}_{\text{comb}}$ ——点蚀损伤和局部减薄工况下的联合剩余强度因子;
- $\text{RSF}_k$ ——点蚀对  $k$  的剩余强度因子;
- $\text{RSF}_{\text{ita}}$ ——局部减薄区域的剩余强度因子;
- $\text{RSF}_{\text{pit}}$ ——点蚀损伤的剩余强度因子;
- $t_c$ ——评价用计算壁厚,单位为 mm;
- $t_{\text{eq}}$ ——等效壁厚,单位为 mm;
- $t_L$ ——多层分析时某层的厚度,单位为 mm;
- $t_{\text{min}}$ ——根据设计规范或标准确定的部件所需最小壁厚,单位为 mm;
- $t_{\text{nom}}$ ——名义壁厚,单位为 mm;
- $t_{\text{rd}}$ ——远离点蚀区域的实测壁厚,单位为 mm;
- time——截至未来计划运行时间的运行时间,单位为年;
- $V$ ——自重或自重加热载荷工况下的截面剪切力,单位为 N;
- $w_{\text{avg},k}$ ——点蚀对  $k$  的点蚀坑平均深度,单位为 mm;
- $w_c$ ——当前点蚀坑深度,单位为 mm;
- $w_f$ ——未来计划运行时间的点蚀坑深度,单位为 mm;
- $w_{\text{max}}$ ——点蚀损伤区域内点蚀坑的最大深度,单位为 mm;
- $w_{i,k}$ ——点蚀对  $k$  中点蚀坑  $i$  的深度,单位为 mm;
- $w_{j,k}$ ——点蚀对  $k$  中点蚀坑  $j$  的深度,单位为 mm;
- $\alpha_1$ ——锥壳半顶角,单位为  $(^\circ)$ ;
- $\theta_k$ ——点蚀对  $k$  中两个点蚀坑连成的直线和  $\sigma_2$  方向之间的夹角,单位为  $(^\circ)$ ;

- [ $\sigma$ ]——根据原设计规范或标准确定的许用应力,单位为 MPa;
- $\sigma_{em}$ ——最大环向应力,单位为 MPa;
- $\sigma_e$ ——等效应力,单位为 MPa;
- $\sigma_{lm}$ ——最大轴向应力,单位为 MPa;
- $\sigma_1$ ——第一主应力,单位为 MPa;
- $\sigma_2$ ——第二主应力,单位为 MPa;
- $\tau$ ——自重或自重加热载荷工况下的最大剪应力,单位为 MPa。

### 7.3 评价方法限定条件

7.3.1 1级评价仅适用于承受内压载荷的 A 类部件。2级评价适用于承受内压、外压、附加载荷或任意组合载荷的 A 类或 B 类部件,可用于评价内表面或外表面存在点蚀损伤,或内外表面都存在点蚀损伤,但点蚀坑在厚度方向上没有重叠(见图 23)的情况。

7.3.2 采用 1 级或 2 级评价的部件,应同时满足以下条件:

- a) 原设计满足相关的规范或标准要求;
- b) 材料具有足够的韧性;
- c) 不承受循环载荷;
- d) 点蚀损伤由多个点蚀坑组成。

对于单个点蚀坑或独立的点蚀对,应按照第 6 章进行评价。

7.3.3 采用 1 级评价的部件,还应满足以下附加限定条件:

- a) 点蚀损伤不再进一步加剧;
- b) 点蚀位于单面(内表面或外表面)。

7.3.4 当不满足 1 级和 2 级评价限定条件或 1 级和 2 级评价结果不通过时,可进行 3 级评价,包括但不限于局限于下列情况可进行 3 级评价:

- a) 承受内压、外压、附加载荷和上述载荷共同作用的 A 类、B 类或 C 类部件;
- b) 部件承受循环载荷,或在原始设计计算时部分进行过疲劳分析;
- c) 点蚀位于椭圆封头  $0.8D$  外的区域、碟形封头、带折边锥形封头的过渡区或锥段过渡区;
- d) 基于验证性试验设计的部件。

### 7.4 评价流程

评价的基本流程见图 18。

### 7.5 缺陷选择与尺寸表征

7.5.1 测量点蚀坑尺寸时应先打磨或用刮刀刮削点蚀区表面,然后测量。

7.5.2 如果某一区域内的点蚀坑及其尺寸都是随机的,应选择损伤区域内有代表性的点蚀坑进行评价。将点蚀坑表征为等效圆柱,不同形状点蚀坑尺寸表征示意图见图 19。

7.5.3 选择点蚀对时,应至少选择 10 对有代表性的点蚀对进行评价,选择时不可重复选择某一点蚀坑组成点蚀对。点蚀对尺寸表征示意图见图 20。

7.5.4 局部点蚀和局部减薄区内的点蚀尺寸表征分别见图 21 和图 22。

7.5.5 双面点蚀损伤分层表征示意图见图 23,分层方法详见 7.6.2.3e)2)。

7.5.6 进行点蚀 2 级环向评价时,按第 6 章局部减薄进行表征。



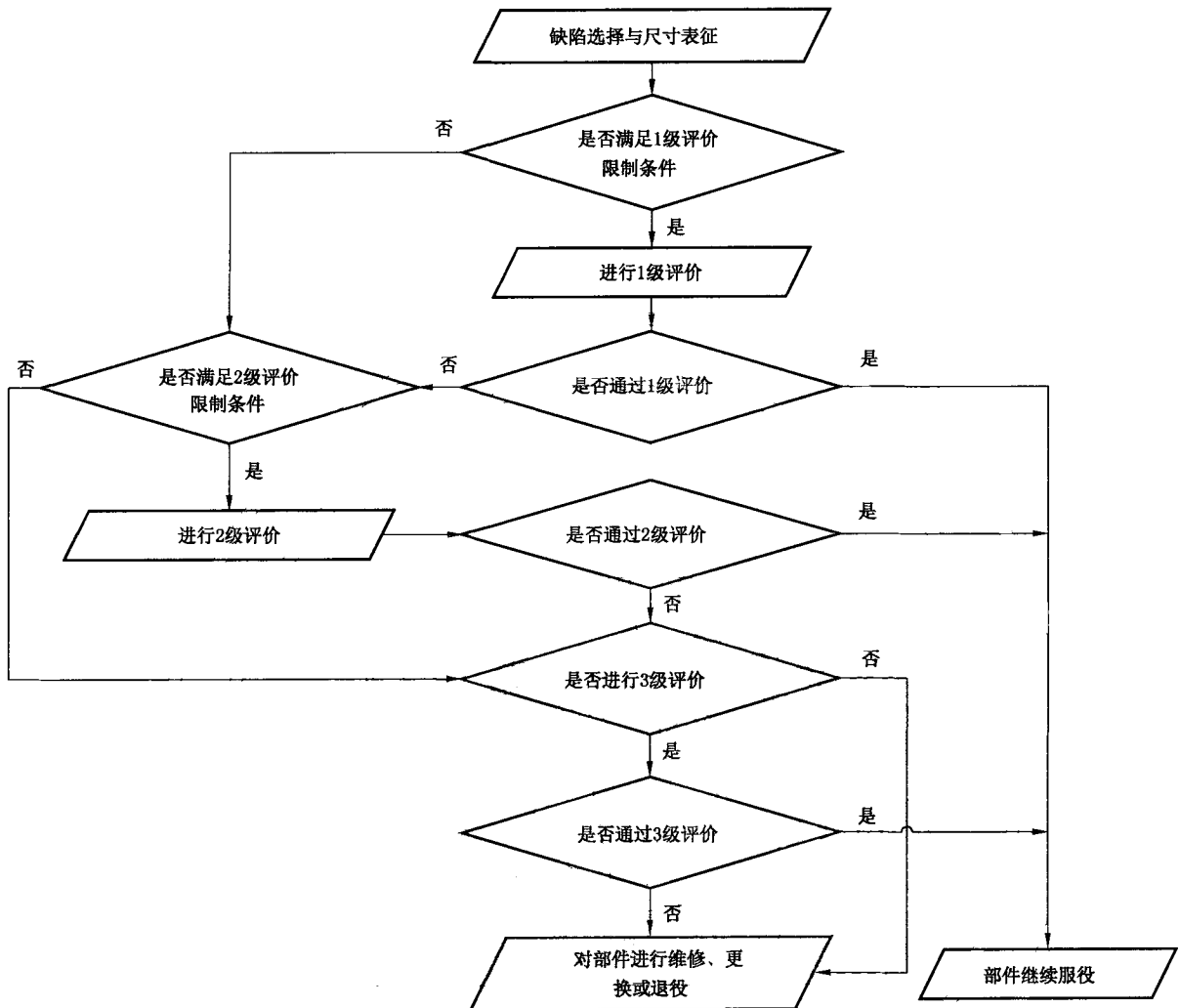


图 18 评价流程图

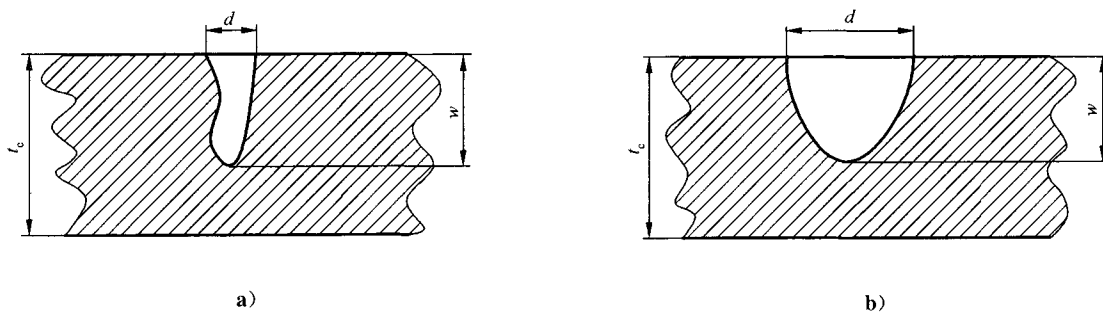


图 19 不同形状点蚀坑尺寸表征示意图

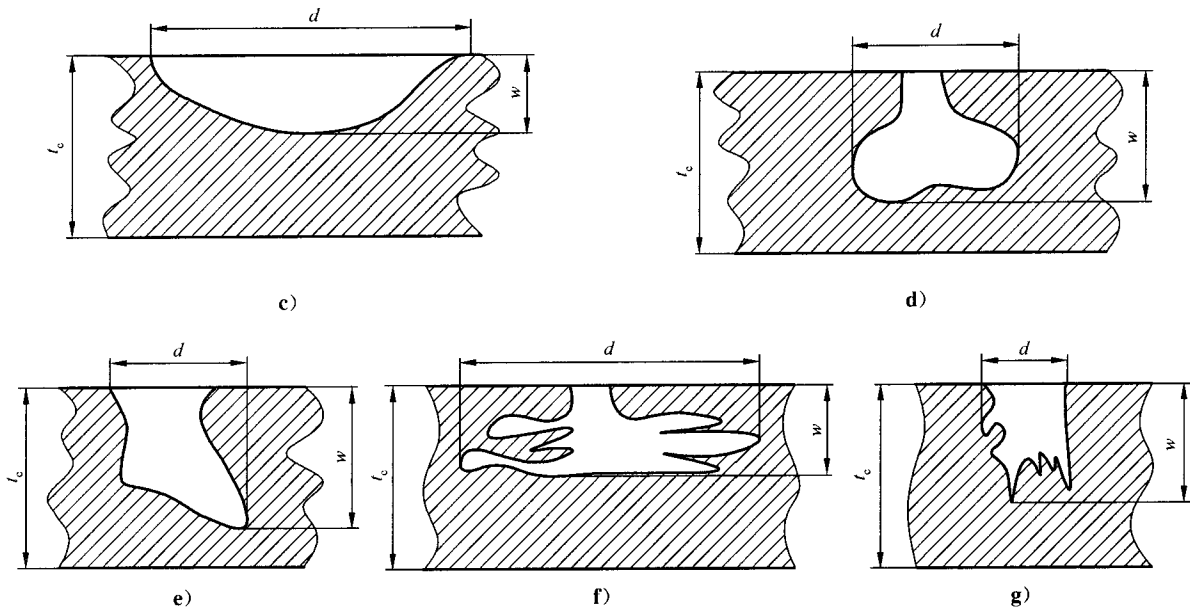
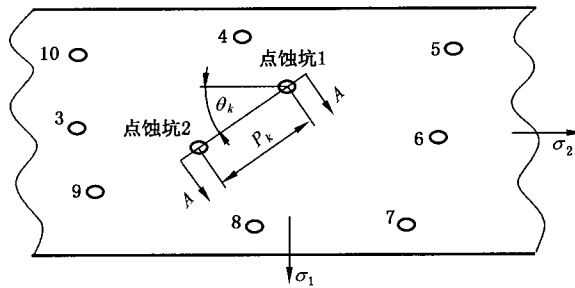
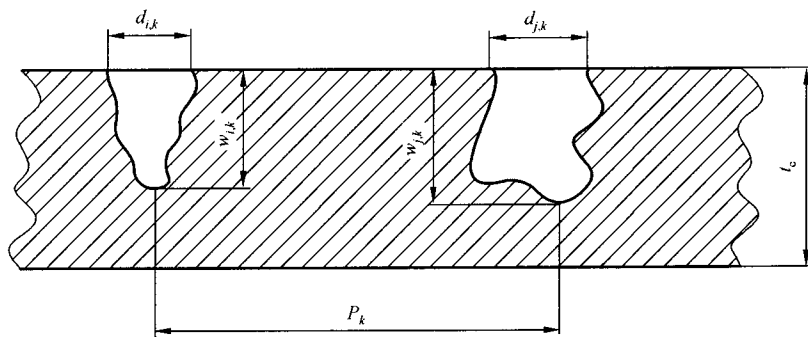


图 19 (续)



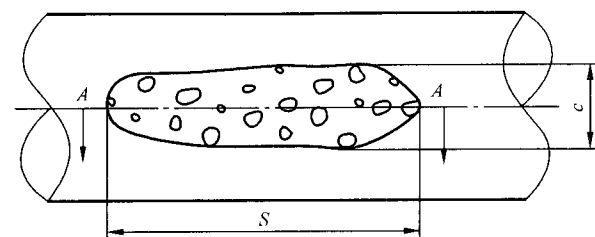
a) 点蚀对平面视图(\$\sigma\_1, \sigma\_2\$)



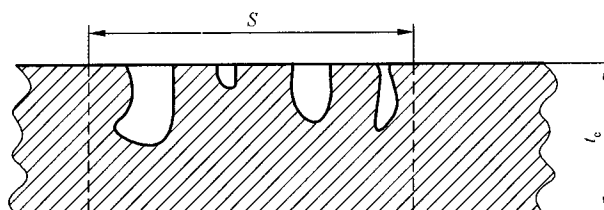
b) 点蚀对剖面视图(A—A 截面)

说明:  $w_{avg,k} = 0.5(w_{i,k} + w_{j,k}), d_{avg,k} = 0.5(d_{i,k} + d_{j,k})$

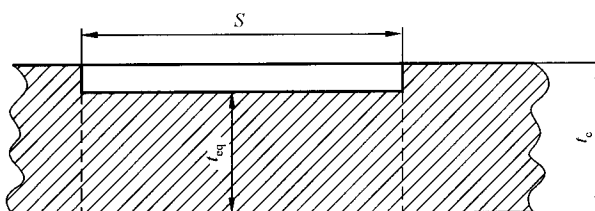
图 20 点蚀对尺寸表征示意图



a) 局部点蚀的平面视图

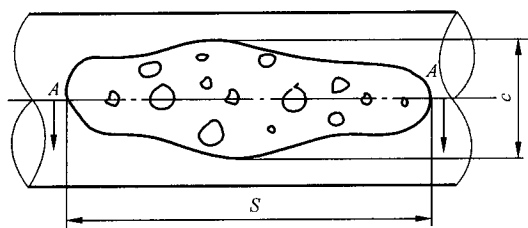


b) 局部点蚀的剖面视图(A—A 截面)

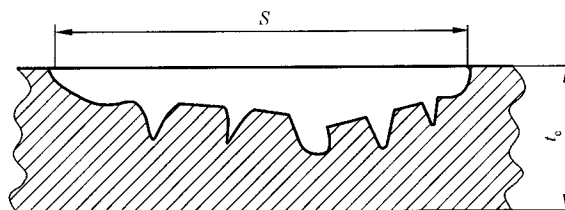


c) 局部点蚀当量 LTA 的剖面视图

图 21 局部点蚀尺寸表征示意图

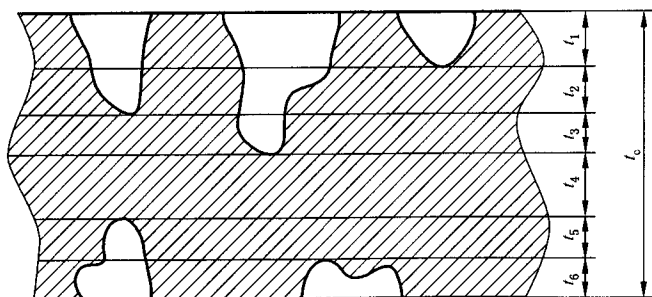


a) 局部减薄区点蚀的平面视图

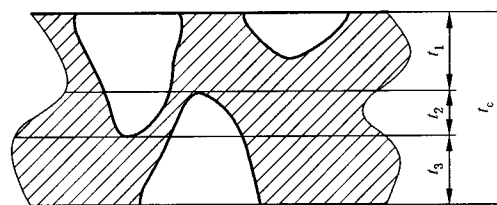


b) 局部减薄区点蚀的剖面视图(A—A 截面)

图 22 局部减薄区的点蚀尺寸表征示意图



a) 点蚀坑在壁厚方向上不重叠



b) 点蚀坑在壁厚方向上有重叠

图 23 双面点蚀损伤分层表征示意图

7.6 评价方法

7.6.1 1 级评价

1 级评价步骤如下:

a) 确定下列参数:  $D$ 、 $FCA$ 、 $t_{rd}$ 。

b) 按式(60)计算部件评价用计算壁厚  $t_c$ :

$$t_c = t_{rd} - FCA \quad \dots\dots\dots(60)$$

c) 根据点蚀坑的数量确定部件上点蚀密度最大的区域,对该区域拍照或拓印,并框定 150 mm × 150 mm 范围为评价区域。

d) 确定所评价区域内的点蚀坑的最大深度  $w_{max}$ 。

e) 计算最深点蚀坑剩余厚度比  $R_{wt}$ 。当点蚀和均匀或局部腐蚀减薄位于同一表面,且最深点蚀坑的深度大于  $FCA$  时,按式(61)计算最深点蚀坑  $R_{wt}$  值,点蚀坑处最小壁厚要求见式(62)。当点蚀和均匀或局部腐蚀减薄位于不同表面时,式(61)和式(62)中用  $t_c$  代替  $t_{rd}$ 。

$$R_{wt} = \frac{t_{rd} - w_{max}}{t_c} \quad \dots\dots\dots(61)$$

$$\begin{cases} t_{rd} - w_{max} \geq 2.5 \text{ mm} & \text{容器和储罐} \\ t_{rd} - w_{max} \geq 1.3 \text{ mm} & \text{管道} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(62)$$

如果  $R_{wt} \geq 0.2$ ,且满足式(62),则继续按 f) 进行评价;否则,1 级评价不通过。

f) 如果单个点蚀坑直径满足式(63),则继续按 g) 进行评价;否则,应将该点蚀坑作为局部减薄区域,按照存在局部减薄的广布点蚀区,进行点蚀 2 级评价。

$$d \leq Q\sqrt{D \cdot t_c} \quad \dots\dots\dots(63)$$

式中:

$Q$ ——每个点蚀坑剩余壁厚比  $R_t$  的函数,按表 4 选取或按式(64)计算。

$$\begin{cases} Q = 1.123 \left[ \left( \frac{1 - R_t}{1 - R_t / RSF_a} \right)^2 - 1 \right]^{0.25} & R_t < RSF_a \\ Q = 50.0 & R_t \geq RSF_a \end{cases} \quad \dots\dots\dots(64)$$

当点蚀和均匀或局部腐蚀减薄位于同一表面,且最深点蚀坑的深度大于  $FCA$  时, $R_t$  按式(65)计算;当点蚀和均匀或局部腐蚀减薄位于不同表面,式(65)中用  $t_c$  代替  $t_{rd}$ 。

$$R_t = \frac{t_{rd} - w_c}{t_c} \quad \dots\dots\dots(65)$$

式中:

$w_c$ ——待评价点蚀坑的深度。

g) 将实际表面点蚀损伤图片或拓印件与图 24 标准点蚀图对比,选择与部件实际损伤相接近的图,根据选定标准点蚀图下的表格和  $R_{wt}$  选取  $RSF$ 。对于表中所列  $R_{wt}$  的中间值,可采用插值确定  $RSF$ 。如果点蚀比图 24 h) 所示的情况严重,取  $RSF = R_{wt}$ 。

h) 采用评价用计算壁厚  $t_c$ ,按照相应规范或标准计算最高允许工作压力最大允许操作压力  $p^{max}$ 。

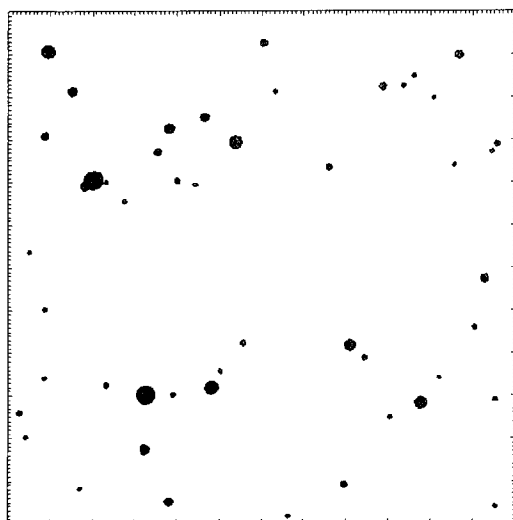
i) 如果  $RSF \geq RSF_a$ ,且  $P^{max}$  可接受,则 1 级评价通过,可以在  $p^{max}$  条件下继续服役;如果  $RSF < RSF_a$ ,按式(66)计算  $P_r^{max}$ :

$$P_r^{max} = P^{max} \left( \frac{RSF}{RSF_a} \right) \quad \dots\dots\dots(66)$$

若  $P_r^{max}$  可接受,则 1 级评价通过,可以在  $P_r^{max}$  条件下继续服役;若  $P_r^{max}$  不可接受,则 1 级评价不通过。

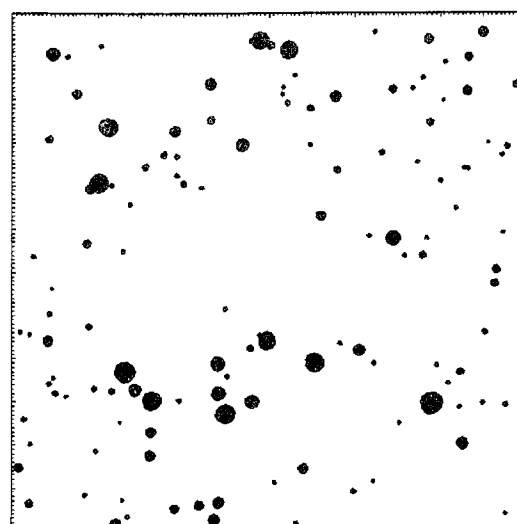
表 4 参数  $Q$  取值表

$R_1$	$Q$				
	$RSF_a=0.90$	$RSF_a=0.85$	$RSF_a=0.80$	$RSF_a=0.75$	$RSF_a=0.70$
0.900	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
0.895	21.19	50.00	50.00	50.00	50.00
0.875	4.93	50.00	50.00	50.00	50.00
0.850	2.82	50.00	50.00	50.00	50.00
0.845	2.62	29.57	50.00	50.00	50.00
0.825	2.07	6.59	50.00	50.00	50.00
0.800	1.68	3.65	50.00	50.00	50.00
0.795	1.62	3.38	36.82	50.00	50.00
0.775	1.43	2.63	8.01	50.00	50.00
0.750	1.26	2.11	4.35	50.00	50.00
0.745	1.23	2.03	4.01	42.94	50.00
0.725	1.12	1.77	3.10	9.20	50.00
0.700	1.02	1.54	2.45	4.93	50.00
0.695	1.00	1.51	2.36	4.53	47.94
0.675	0.93	1.37	2.05	3.47	10.16
0.650	0.86	1.24	1.77	2.73	5.39
0.625	0.80	1.13	1.56	2.26	3.77
0.600	0.74	1.04	1.40	1.95	2.94
0.575	0.70	0.96	1.27	1.71	2.43
0.550	0.65	0.89	1.16	1.53	2.07
0.525	0.61	0.83	1.07	1.38	1.81
0.500	0.58	0.77	0.99	1.26	1.61
0.475	0.55	0.72	0.92	1.15	1.45
0.450	0.51	0.68	0.86	1.06	1.32
0.425	0.49	0.64	0.80	0.98	1.20
0.400	0.46	0.60	0.74	0.91	1.10
0.375	0.43	0.56	0.70	0.84	1.01
0.350	0.41	0.53	0.65	0.78	0.93
0.325	0.38	0.50	0.61	0.73	0.86
0.300	0.36	0.46	0.57	0.67	0.79
0.275	0.34	0.43	0.53	0.63	0.73
0.250	0.31	0.40	0.49	0.58	0.67
0.200	0.27	0.35	0.42	0.49	0.57



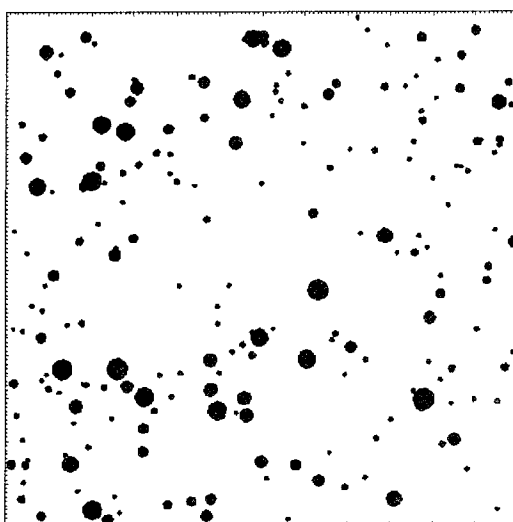
$R_{wt}$	RSF	
	圆筒	球壳
0.8	0.98	0.97
0.6	0.97	0.95
0.4	0.96	0.92
0.2	0.94	0.90

a) 1 级



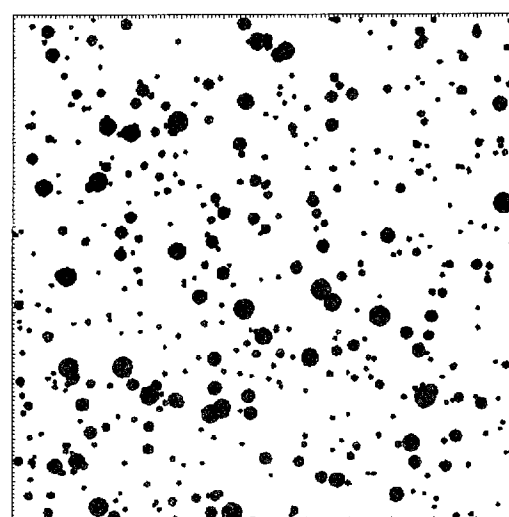
$R_{wt}$	RSF	
	圆筒	球壳
0.8	0.97	0.96
0.6	0.95	0.91
0.4	0.92	0.87
0.2	0.89	0.83

b) 2 级



$R_{wt}$	RSF	
	圆筒	球壳
0.8	0.96	0.95
0.6	0.93	0.89
0.4	0.89	0.84
0.2	0.86	0.79

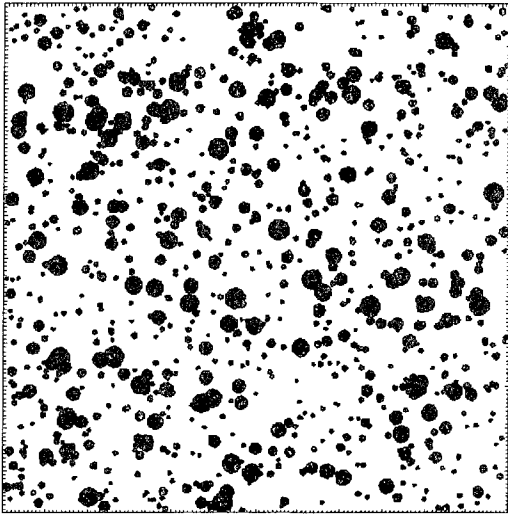
c) 3 级



$R_{wt}$	RSF	
	圆筒	球壳
0.8	0.95	0.93
0.6	0.90	0.86
0.4	0.85	0.79
0.2	0.79	0.72

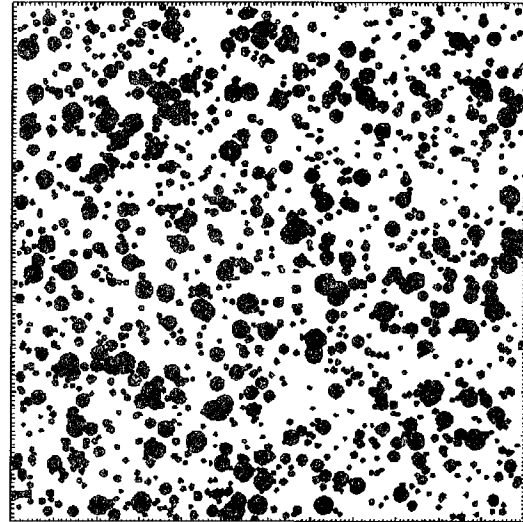
d) 4 级

图 24 标准点蚀图



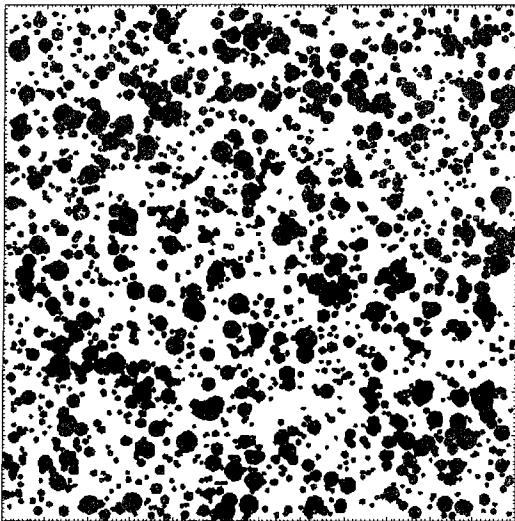
$R_{wt}$	RSF	
	圆筒	球壳
0.8	0.93	0.91
0.6	0.85	0.81
0.4	0.78	0.72
0.2	0.70	0.62

e) 5 级



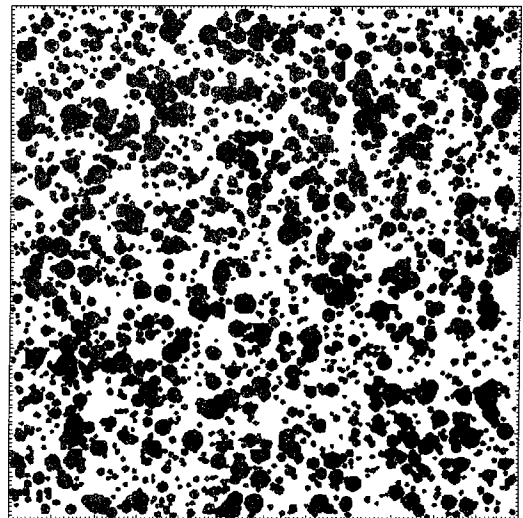
$R_{wt}$	RSF	
	圆筒	球壳
0.8	0.91	0.89
0.6	0.82	0.78
0.4	0.73	0.67
0.2	0.64	0.56

f) 6 级



$R_{wt}$	RSF	
	圆筒	球壳
0.8	0.89	0.88
0.6	0.79	0.76
0.4	0.68	0.63
0.2	0.58	0.51

g) 7 级



$R_{wt}$	RSF	
	圆筒	球壳
0.8	0.88	0.87
0.6	0.77	0.74
0.4	0.65	0.60
0.2	0.53	0.47

h) 8 级

注：图的尺寸为 150 mm×150 mm。

图 24 (续)

7.6.2 2级评价

7.6.2.1 2级评价的一般要求

含点蚀损伤的部件首先应满足 7.6.2.2 的要求。如果部件只承受压力载荷,不考虑自重或热载荷等附加载荷,只需要按照 7.6.2.3 对部件进行 2 级轴向评价;如果部件除了承受压力载荷,还需要考虑附加载荷,则应分别按照 7.6.2.3 和 7.6.2.4 对部件进行 2 级轴向和环向评价。

7.6.2.2 单个点蚀坑的尺寸限制

单个点蚀坑的尺寸限制如下:

- a) 确定下列参数: $D$ 、 $FCA$ 、 $t_{rd}$ 。
- b) 按式(60)计算部件的评价用计算壁厚  $t_c$ 。
- c) 按式(65)计算  $R_i$ 。如果  $R_i \geq 0.20$ ,且满足式(62),则继续按 d) 进行评价。
- d) 点蚀坑直径应满足式(63);否则,应将该点蚀坑作为局部减薄区域,按照存在局部减薄的广布点蚀区,进行点蚀 2 级评价。

7.6.2.3 点蚀损伤 2 级轴向评价

点蚀损伤 2 级轴向评价步骤如下:

- a) 确定评价用点蚀对和每个点蚀对的参数: $k$ 、 $d_{i,k}$ 、 $d_{j,k}$ 、 $P_k$ 、 $w_{i,k}$ 、 $w_{j,k}$ 、 $\theta_k$ (如图 20 所示)。对于相对保守的分析,可取  $\theta_k = 0.0$ 。
- b) 按式(67)计算每个点蚀对中两个点蚀坑的平均深度,式(67)中下标  $k$  指点蚀对  $k$ :

$$w_{avg,k} = \frac{(w_{i,k} + w_{j,k})}{2} \dots\dots\dots (67)$$

- c) 采用评价用计算壁厚  $t_c$ ,按相应设计规范或标准计算部件的主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ 。
- d) 采用评价用计算壁厚  $t_c$ ,按相应设计规范计算部件的最大允许操作压力  $P^{max}$ 。分别计算轴向和环向的最大允许操作压力,取两者中的小值为  $P^{max}$ 。计算时应考虑因为附加载荷所需附加壁厚  $t_{sl}$ 。若  $P^{max}$  可接受,则继续按 e) 进行评价;若  $P^{max}$  不可接受,则 2 级轴向评价不通过。
- e) 计算点蚀对  $k$  的剩余强度因子  $RSF_k$ :
  - 1) 单层分析:用于部件只有一个表面存在点蚀损伤的情况。

$$RSF_k = 1 - \frac{w_{avg,k}}{t_c} \cdot (1 - E_{avg,k}) \dots\dots\dots (68)$$

式中:

$$E_{avg,k} = \min \left\{ \frac{\Phi_k}{\sqrt{\Psi_k}}, 1.0 \right\} \dots\dots\dots (69)$$

$$\Phi_k = \mu_{avg,k} \cdot \max \{ |\rho_{1,k}|, |\rho_{2,k}|, |\rho_{1,k} - \rho_{2,k}| \} \dots\dots\dots (70)$$

$$\Psi_k = (\cos^4 \theta_k + \sin^2 2\theta_k)(\rho_{1,k})^2 - \frac{3(\sin^2 2\theta_k)\rho_{1,k}\rho_{2,k}}{2} + (\sin^4 \theta_k + \sin^2 2\theta_k)(\rho_{2,k})^2 \dots\dots\dots (71)$$

$$\rho_{1,k} = \frac{\sigma_1}{\mu_{avg,k}} \dots\dots\dots (72)$$

$$\rho_{2,k} = \frac{\sigma_2}{\mu_{avg,k}} \dots\dots\dots (73)$$

$$\mu_{avg,k} = \frac{P_k - d_{avg,k}}{P_k} \dots\dots\dots (74)$$



$$d_{\text{avg},k} = \frac{d_{i,k} + d_{j,k}}{2} \dots\dots\dots (75)$$

2) 多层分析:用于部件两个表面都存在点蚀损伤的情况。如果双面点蚀损伤在壁厚方向上有重叠,如图 23 b)所示,则 2 级轴向评价不通过。根据点蚀损伤分布情况将部件沿厚度方向分成  $N$  层,如图 23 a)所示,所选层数  $N$  由部件两面的点蚀坑深度确定。每一层的厚度  $t_L$  取决于点蚀对中较深点蚀坑的深度。考虑含点蚀对的所有分层,按式(76)计算点蚀对  $k$  的剩余强度因子  $\text{RSF}_k$ 。对于点蚀对  $k$  中较深点蚀坑没有穿透的其他分层,以及所有点蚀对都没有穿透的实体分层,  $E_{\text{avg},k}$  取 1.0。

$$\text{RSF}_k = 1 - \sum_{l=1}^N \left( \frac{t_L}{t_c} \right) (1 - E_{\text{avg},k})_l \dots\dots\dots (76)$$

f) 按式(77)计算所有点蚀对剩余强度因子的平均值  $\text{RSF}_{\text{pit}}$  :

$$\text{RSF}_{\text{pit}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \text{RSF}_k \dots\dots\dots (77)$$

g) 根据点蚀损伤类型,进行结果评价:

1) 广布点蚀:若  $\text{RSF}_{\text{pit}} \geq \text{RSF}_a$ , 2 级轴向评价通过;若  $\text{RSF}_{\text{pit}} < \text{RSF}_a$ , 按式(78)计算  $P_r^{\text{max}}$  :

$$P_r^{\text{max}} = P^{\text{max}} \left( \frac{\text{RSF}_{\text{pit}}}{\text{RSF}_a} \right) \dots\dots\dots (78)$$

若  $P_r^{\text{max}}$  可接受,则 2 级轴向评价通过;否则,2 级轴向评价不通过。

2) 局部点蚀:将点蚀损伤面积等效为局部减薄(LTA)区域,应根据观察到的点蚀坑的物理边界确定局部减薄区在轴向和环向的等效尺寸。按第 6 章进行轴向评价,取  $t_{\text{min}} = t_{\text{eq}} + \text{FCA}$ , 等效局部减薄区域的等效壁厚  $t_{\text{eq}}$  按式(79)计算:

$$t_{\text{eq}} = \text{RSF}_{\text{pit}} \cdot t_r \dots\dots\dots (79)$$

3) 存在局部减薄的广布点蚀区:首先按第 6 章对局部减薄区进行轴向评价,求得  $\text{RSF}_{\text{ita}}$ ;然后按照本节计算  $\text{RSF}_{\text{pit}}$ , 计算时取  $t_c = t_{\text{eq}} = \text{RSF}_{\text{ita}} \cdot t_{\text{rd}}$ ;按式(80)计算联合剩余强度因子:

$$\text{RSF}_{\text{comb}} = \text{RSF}_{\text{pit}} \cdot \text{RSF}_{\text{ita}} \dots\dots\dots (80)$$

若  $\text{RSF}_{\text{comb}} \geq \text{RSF}_a$ , 2 级轴向评价通过;若  $\text{RSF}_{\text{comb}} < \text{RSF}_a$ , 按式(81)计算  $P_r^{\text{max}}$  :

$$P_r^{\text{max}} = P^{\text{max}} \left( \frac{\text{RSF}_{\text{comb}}}{\text{RSF}_a} \right) \dots\dots\dots (81)$$

若  $P_r^{\text{max}}$  可接受,则 2 级轴向评价通过;否则,2 级轴向评价不通过。

4) 局部减薄区内点蚀:首先按照第 6 章对局部减薄区进行轴向评价,求得  $\text{RSF}_{\text{ita}}$ ;然后按照本节评价方法计算  $\text{RSF}_{\text{pit}}$ , 计算时取  $t_c = t_{\text{eq}} = \text{RSF}_{\text{ita}} \cdot t_{\text{rd}}$ ;按式(80)计算联合剩余强度因子,评价准则与 3)相同。

### 7.6.2.4 点蚀损伤 2 级环向评价

#### 7.6.2.4.1 广布点蚀的评价:

a) 根据 7.6.2.3, 计算含点蚀损伤部件的剩余强度因子  $\text{RSF}_{\text{pit}}$ 、最大允许操作压力  $P_r^{\text{max}}$ 。若  $\text{RSF}_{\text{pit}} > \text{RSF}_a$ , 则取  $P_r^{\text{max}} = P^{\text{max}}$ 。

b) 按式(82)计算含点蚀损伤圆筒的等效壁厚  $t_{\text{eq}}$  :

$$t_{\text{eq}} = B \cdot t_c \dots\dots\dots (82)$$

式中:  $B = \min \left[ \frac{\text{RSF}_{\text{pit}}}{\text{RSF}_a}, 1.0 \right]$ 。

c) 在自重、自重加热载荷工况下,按相应设计规范或标准分别计算轴向力  $F$ 、弯矩  $M$ 、扭矩  $M_T$  和

剪切力  $V$ 。

d) 按式(83)计算最大环向应力  $\sigma_{cm}$  :

$$\sigma_{cm} = \frac{P_r^{\max}}{RSF_{pit} \cdot \cos\alpha} \left( \frac{D}{2t_{eq}} + 0.6 \right) \dots\dots\dots(83)$$

e) 在自重、自重加热载荷工况下,分别按式(84)和式(85)计算最大轴向应力  $\sigma_{lm}$  和剪应力  $\tau$ ,计算所需截面属性见表 5。

$$\sigma_{lm} = \frac{1}{E_c \cdot \cos\alpha} \left[ \frac{A_n}{A_m} P_r^{\max} + \frac{F}{A_m} \pm \frac{Ma}{I_x} \right] \dots\dots\dots(84)$$

$$\tau = \frac{M_T}{2A_t t_{eq}} + \frac{V}{A_m} \dots\dots\dots(85)$$

表 5 计算用截面属性

点蚀损伤位于内表面	点蚀损伤位于外表面
$D_i = D_o - 2t_{eq}$	$D_i = D + 2t_{eq}$
$I_x = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4)$	$I_x = \frac{\pi}{64} (D_i^4 - D^4)$
$A_m = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$	$A_m = \frac{\pi}{4} (D_i^2 - D^2)$
$A_t = \frac{\pi}{16} (D_i + D_o)^2$	$A_t = \frac{\pi}{16} (D_i + D)^2$
$a = \frac{D_o}{2}$	$a = \frac{D_i}{2}$
$A_n = \frac{\pi}{4} D_i^2$	$A_n = \frac{\pi}{4} D^2$

f) 按式(86)计算在自重、自重加热载荷工况下的等效应力  $\sigma_e$  :

$$\sigma_e = [\sigma_{cm}^2 - \sigma_{cm}\sigma_{lm} + \sigma_{lm}^2 + 3\tau^2]^{0.5} \dots\dots\dots(86)$$

g) 结果评价:

1) 在自重、自重加热载荷工况下,若等效应力  $\sigma_e$  满足式(87),则 2 级环向评价通过。

$$\sigma_e \leq H_f \left( \frac{[\sigma]}{RSF_a} \right) \dots\dots\dots(87)$$

只考虑自重时  $H_f=1.0$ ,考虑自重加热载荷时  $H_f=1.67$ 。

2) 如果最大轴向应力  $\sigma_{lm}$  是压应力,该应力值小于或等于允许拉应力值和允许压应力值中的较小值时,2 级环向评价通过。

7.6.2.4.2 局部点蚀、存在局部减薄的广布点蚀区、局部减薄区内点蚀的评价:根据 7.6.2.3g) 求得的局部减薄区(LTA)等效面积,根据第 6 章局部减薄进行环向评价。

7.6.2.5 无设计公式部件的 2 级评价

对无设计公式的部件如接管,按第 5 章对点蚀损伤进行评价。评价时等效壁厚按式(82)计算。

7.6.3 3 级评价

采用应力分类或极限载荷分析方法进行 3 级评价。

## 8 氢致开裂、氢鼓包和应力导向氢致开裂评价

### 8.1 总则

8.1.1 本章的评价方法适用于低强度铁素体钢承压部件临氢环境中的氢致开裂(HIC)、氢鼓包(HB)、应力导向氢致开裂(SOHIC)的评价。

8.1.2 本章的评价方法不适用于下列情况：

- a) 高强度钢的硫化物应力开裂(SSC)和氢脆；
- b) 温度高于 204 ℃碳钢或低合金钢的高温氢腐蚀；
- c) 在蠕变温度范围内服役的部件，蠕变温度范围参见表 A.1。

### 8.2 符号

$B_p$ ——HB 凸起高度,单位为 mm；

$c$ ——HIC 或 HB 的环向长度,单位为 mm；

$c_1$ ——HIC 损伤区 1 的环向尺寸或 HB 的环向长度,单位为 mm；

$c_2$ ——HIC 损伤区 2 的环向尺寸或 HB 的环向长度,单位为 mm；

$D$ ——圆筒内直径,单位为 mm；

$D_H$ ——HIC 损伤参量,如无 HIC 损伤, $D_H=0.0$ ; HIC 损伤程度为 80%, $D_H=0.8$ ; HIC 损伤程度 100%, $D_H=1.0$ ；

$d_{HB}$ ——HB 直径,单位为 mm；

$d_{HIC}$ ——HIC 当量局部减薄深度,单位为 mm；

FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量,单位为 mm；

$L_B$ ——HB 之间或 HB 与 HIC 之间的距离(边缘到边缘),单位为 mm；

$L_{Hc}$ ——HIC 之间或 HIC-5HB 之间的环向距离,单位为 mm；

$L_H$ ——HIC 之间或 HIC 与 HB 之间的距离(边缘到边缘),单位为 mm；

$L_{Hs}$ ——HIC 之间或者 HIC 与 HB 之间的轴向距离,单位为 mm；

$L_R$ ——无损伤材料可用于加强 HIC 损伤区的长度,单位为 mm；

$L_w$ ——损伤到最近焊缝的距离,单位为 mm；

$L_{msd}$ ——缺陷到最近的总体结构不连续处的距离,单位为 mm；

MFH——采用评价用计算壁厚,按相应标准、规范计算所得的储罐液体最大充装高度,单位为 mm；

$MFH_r$ ——评价计算所得考虑缺陷或损伤影响的储罐液体最大充装高度,单位为 mm；

$P^{\max}$ ——采用评价用计算壁厚,按相应标准、规范计算所得的部件最大允许操作压力,单位为 MPa；

$P_r^{\max}$ ——评价计算所得考虑缺陷或损伤影响的部件最大允许操作压力,单位为 MPa；

RSF——剩余强度因子；

$RSF_a$ ——允许剩余强度因子,一般取 0.9；

$s$ ——HIC 或 HB 的轴向长度,单位为 mm；

$s_c$ ——HB 冠顶裂纹长度或排氢孔直径,单位为 mm；

$s_1$ ——HIC 损伤区 1 的轴向尺寸或 HB 的轴向长度,单位为 mm；

$s_2$ ——HIC 损伤区 2 的轴向尺寸或 HB 的轴向长度,单位为 mm；

$t_c$ ——评价用计算壁厚,单位为 mm；

- $t_{\text{mm}}$ ——HB 或 HIC 损伤区域最小实测壁厚,单位为 mm;
- $t_{\text{mm-ID}}$ ——HIC 损伤区域内壁侧最小实测壁厚,单位为 mm;
- $t_{\text{mm-OD}}$ ——HIC 损伤区域外壁侧最小实测壁厚,单位为 mm;
- $t_{\text{rd}}$ ——远离损伤区域的实测壁厚,单位为 mm;
- $w_{\text{H}}$ ——HIC 沿厚度方向上的损伤程度,单位为 mm。

### 8.3 评价方法限定条件

8.3.1 1 级评价适用于只承受内压载荷(即附加载荷可以忽略)的 A 类部件。2 级评价适用于承受内压、外压、附加载荷或任意组合载荷的 A 类或 B 类部件。

8.3.2 采用 1 级或 2 级评价的部件,应同时满足以下条件:

- a) 原设计满足相关的规范或标准要求;
- b) 材料具有足够的韧性;
- c) 不承受循环载荷。

8.3.3 HIC 1 级和 2 级评价不适用于表面 HIC,且应有防止 HIC 继续扩展的措施。

8.3.4 HB 2 级评价应有防止 HB 继续扩展的措施,或定期监控缺陷,确认缺陷扩展速率不超过预期。如果 HB 存在冠顶裂纹或边缘裂纹,则应有防止裂纹继续扩展的措施;否则,2 级评价不适用。

8.3.5 1 级和 2 级评价均不适用于 SOHIC。

8.3.6 对于不满足 1 级和 2 级评价限定条件,或 1 级和 2 级评价结果不通过时,可进行 3 级评价。但要定期监控缺陷,确认缺陷扩展速率不超过预期。

### 8.4 评价流程

HIC 或 HB 评价的基本流程见图 25。

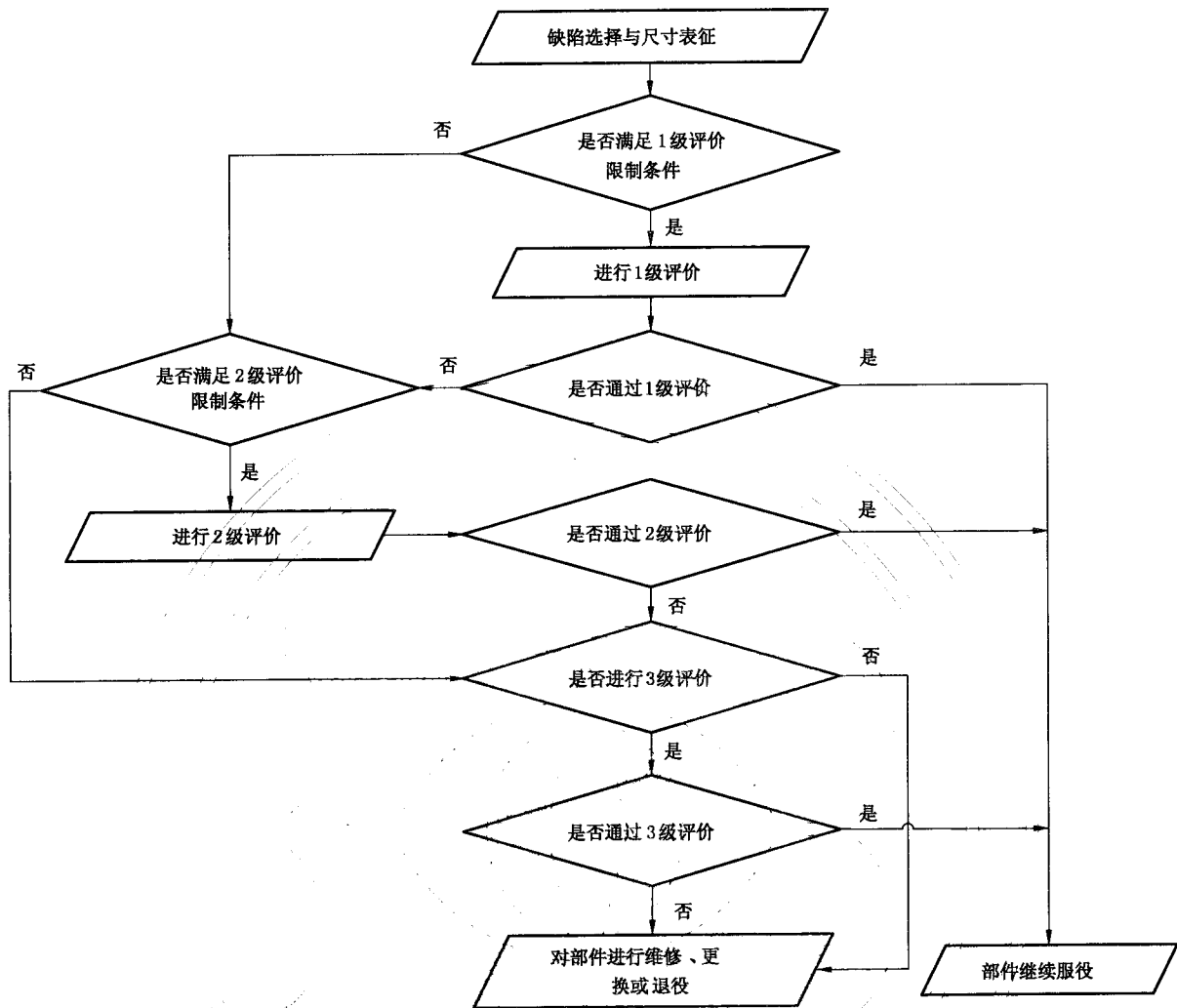


图 25 HIC 或 HB 评价流程图

8.5 缺陷尺寸表征

8.5.1 HIC

8.5.1.1 表面 HIC 和埋藏 HIC 的判定：

如果同时满足式(88)和式(89)(见图 26)，则 HIC 损伤表征为埋藏 HIC，否则表征为表面 HIC。

$$t_{mm-ID} \geq 0.2t_c \quad \dots\dots\dots (88)$$

$$t_{mm-OD} \geq 0.2t_c \quad \dots\dots\dots (89)$$

$$t_c = t_{rd} - FCA \quad \dots\dots\dots (90)$$

8.5.1.2 HIC 的尺寸表征：

- a) 若  $L_H \geq 8t_c$ ，则  $s$  和  $c$  取各自损伤区域的轴向和环向长度进行单独评价(见图 27)；
- b) 若  $L_H < 8t_c$ ，则按 5.4.3.5 进行合并和缺陷尺寸表征，确定 HIC 损伤区的  $s$  和  $c$ 。

8.5.2 HB

HB 的尺寸表征如下：

- a) 取 HB 轴向和环向长度  $s$  和  $c$  中的大者, 作为 HB 直径(见图 28), 即  $d_{HB} = \max\{s, c\}$ ; 如果 HB 存在冠顶裂纹或排氢孔(冠顶开孔), 其尺寸表征见图 29 和图 30。
- b) 若存在多个 HB, 则按 5.4.3.5 进行合并和缺陷尺寸表征, 确定 HB 损伤区的  $s$  和  $c$ 。
- c) 对于密集 HB, 选取最危险的单个 HB 进行评价, 并将密集 HB 表征为点蚀群, 分别按本章 HB 和按第 7 章点蚀进行评价。

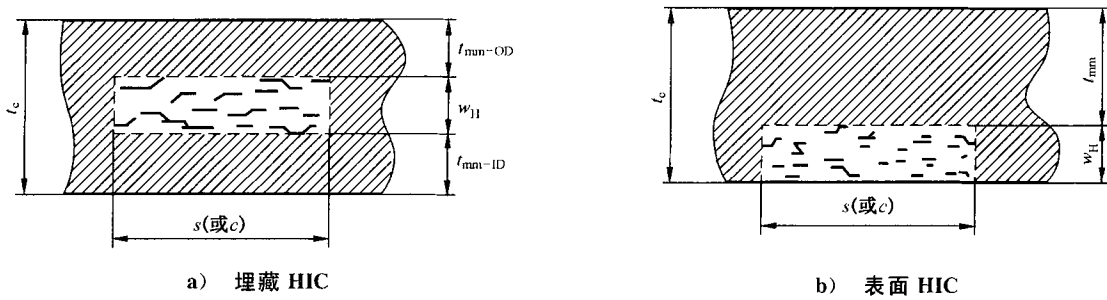


图 26 埋藏 HIC 和表面 HIC 示意图

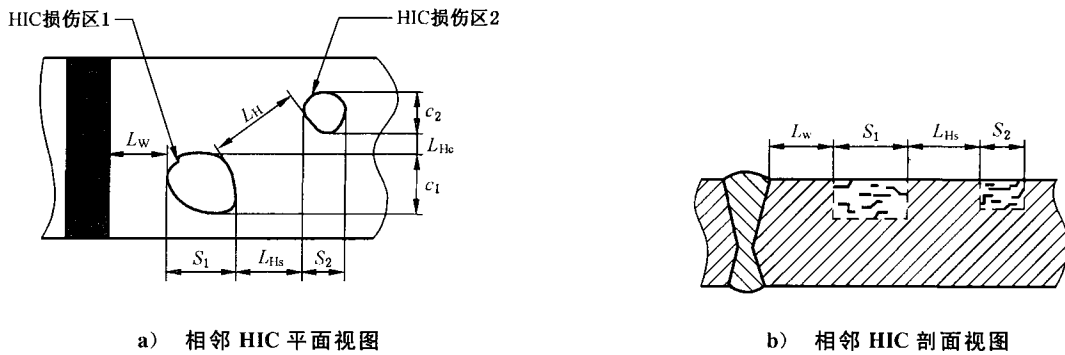


图 27 相邻 HIC 平面和剖面视图

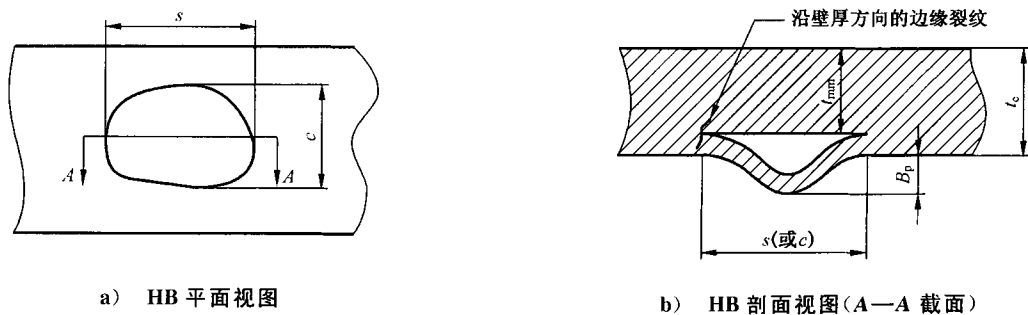


图 28 HB 平面和剖面视图

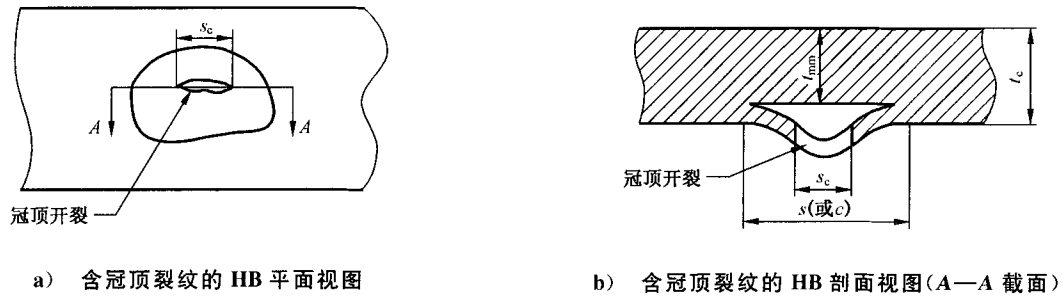


图 29 含冠顶裂纹的 HB 平面和剖面视图

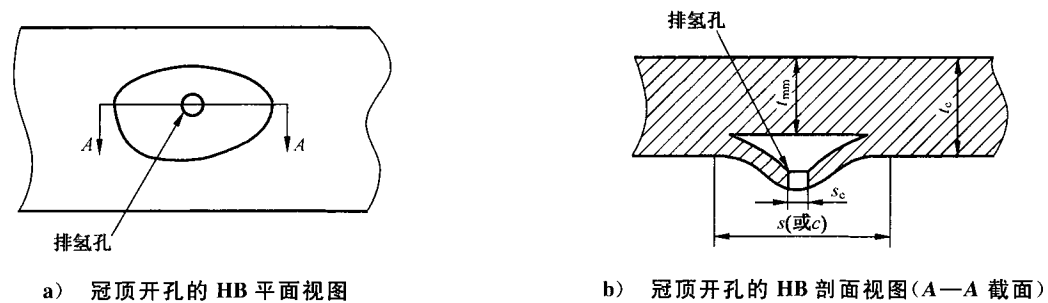


图 30 冠顶开孔的 HB 平面和剖面视图

8.6 评价方法和准则

8.6.1 1 级评价

8.6.1.1 埋藏 HIC 的 1 级评价：

- a) 按式(90)确定评价用计算壁厚  $t_c$ 。
- b) 评价准则：

若同时满足以下条件，则通过 1 级评价：

- 1) HIC 的二维尺寸  $s$  和  $c$  满足式(91)和式(92)：

$$s \leq 0.6 \sqrt{Dt_c} \quad \dots\dots\dots (91)$$

$$c \leq 0.6 \sqrt{Dt_c} \quad \dots\dots\dots (92)$$

- 2) 厚度方向上的损伤程度满足式(93)：

$$w_H \leq \min\{t_c/3, 13 \text{ mm}\} \quad \dots\dots\dots (93)$$

- 3) HIC 边缘到最近焊缝的距离(见图 27)满足式(94)：

$$L_w \geq \max\{2t_c, 25 \text{ mm}\} \quad \dots\dots\dots (94)$$

- 4) HIC 边缘到最近的总体结构不连续部位的距离满足式(95)：

$$L_{msd} \geq 1.8 \sqrt{Dt_c} \quad \dots\dots\dots (95)$$

8.6.1.2 HB 的 1 级评价：

- a) 按式(90)确定评价用计算壁厚  $t_c$ 。
- b) 评价准则：

若同时满足以下条件，则通过 1 级评价：

- 1) HB 直径  $d_{HB} \leq 51 \text{ mm}$ ，或 HB 有排氢孔且 HB 的二维尺寸  $s$  和  $c$  满足式(91)和式(92)。
- 2) HB 损伤区域最小实测壁厚  $t_{min}$ (见图 28)满足式(96)：

$$t_{mm} - FCA \geq 0.5t_c \quad \dots\dots\dots(96)$$

3) HB 凸起高度  $B_p$ (见图 28)满足式(97):

$$B_p \leq 0.10 \cdot \min\{s, c\} \quad \dots\dots\dots(97)$$

4) HB 边缘没有沿壁厚方向的裂纹,见图 28。

5) HB 边缘到最近焊缝的距离(见图 31)满足式(94)。

6) HB 边缘到最近的总体结构不连续部位的距离满足式(95)。

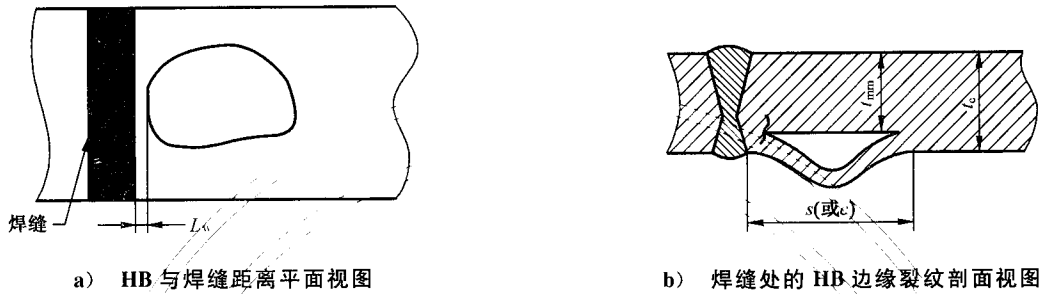


图 31 焊缝处的 HB 边缘裂纹

8.6.2 2 级评价

8.6.2.1 埋藏 HIC 的 2 级评价:

- a) 按式(90)确定评价用计算壁厚  $t_c$ 。
- b) 若 HIC 边缘到最近焊缝的距离满足式(94),则继续按 c)进行评价;否则,2 级评价不通过。
- c) 若 HIC 边缘到最近的总体结构不连续部位的距离满足式(95),则继续按 d)进行评价;否则,2 级评价不通过。
- d) 若厚度方向上的损伤程度满足式(93),则继续按 e)进行评价;否则,2 级评价不通过。
- e) 采用评价用计算壁厚  $t_c$ ,按照相应规范或标准计算最大允许操作压力  $P^{\max}$ 。对于常压储罐,用 MFH 代替  $P^{\max}$ 。
- f) 设 HIC 损伤参量  $D_H=0.8$ ,按式(98)计算剩余强度因子 RSF,式中参数  $L_R$ 按式(99)计算, $L_{Hs}$ 按图 27 确定:

$$RSF = \frac{2L_R + s[1 - w_H \cdot D_H/t_c]}{2L_R + s} \quad \dots\dots\dots(98)$$

$$L_R = \begin{cases} \min\left\{\frac{L_{Hs}}{2}, 8t_c\right\} & \text{存在多个损伤区域} \\ 8t_c & \text{仅有一个损伤区域} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(99)$$

g) 评价准则:

1) 轴向评价

若  $RSF \geq RSF_a$ ,且  $P^{\max}$ 可接受,则 2 级轴向评价通过;若  $RSF < RSF_a$ ,按式(100)计算  $P_r^{\max}$ 。若  $P_r^{\max}$ 可接受,则 2 级轴向评价通过。

$$P_r^{\max} = P^{\max} \left[ \frac{RSF}{RSF_a} \right] \quad \dots\dots\dots(100)$$

2) 环向评价

按当量 LTA 和第 6 章局部减薄进行 HIC 的环向评价。评价时,设埋藏 HIC 的当量 LTA 位于外表面,按式(101)计算当量 LTA 的深度,取 HIC 损伤区的环向长度为当量 LTA 的长度。



$$d_{\text{HIC}} = w_{\text{H}} D_{\text{H}} \dots\dots\dots (101)$$

8.6.2.2 HB 的 2 级评价：

- a) 按式(90)确定评价用计算壁厚  $t_c$ 。
- b) 若 HB 边缘到最近的总体结构不连续部位的距离满足式(95),则继续按 c) 进行评价;否则, 2 级评价不通过。
- c) 若 HB 边缘不存在沿着壁厚方向的裂纹,则继续按 d) 进行评价;若 HB 边缘存在沿着壁厚方向的裂纹,分以下两种情况:
  - 1) HB 边缘裂纹扩展方向与 HB 凸起反向,则 2 级评价不通过;
  - 2) 若 HB 边缘裂纹扩展方向与 HB 凸起同向,则将 HB 按 f) 和第 6 章局部减薄进行评价。
- d) 若不存在 HB 冠顶裂纹,则继续按 e) 进行评价;若存在 HB 冠顶裂纹,则将 HB 按 f) 和第 6 章局部减薄进行评价。
- e) 若 HB 凸起高度满足式(97),则 2 级评价通过;否则,将 HB 按 f) 和第 6 章局部减薄进行评价。
- f) 将 HB 按第 6 章局部减薄进行评价时,LTA 的最小实测壁厚取 HB 最小实测厚度  $t_{\text{mm}}$  (见图 28~图 31),局部减薄区二维尺寸用下列准则确定:
  - 1) 若 HB 凸起高度不满足式(97),且没有 HB 边缘裂纹,则 HB 的直径即为局部减薄区的尺寸;
  - 2) 若 HB 凸起高度满足公式(97),且 HB 仅有冠顶裂纹,则可将 HB 的直径或冠顶裂纹长度二者大值作为局部减薄区的尺寸;
  - 3) 若存在 HB 边缘裂纹,则将 HB 直径与 HB 边缘裂纹长度之和作为局部减薄区的尺寸。

8.6.3 3 级评价

对于 1 级或 2 级评价不适用或评价不能通过的 HB、HIC 和 SOHIC(见图 32),可进行 3 级评价,即按照 GB/T 19624 进行平面缺陷的断裂和塑性失效评价。对于不存在冠顶裂纹或边缘裂纹的 HB,可以仅进行强度评价。断裂评价时将 HIC 假设成轴向裂纹和环向裂纹两个裂纹类缺陷分别进行评价,其中轴向裂纹的长度等于 HIC 的轴向长度  $s$ ,深度等于  $w_{\text{H}}$ ;环向裂纹的长度等于 HIC 环向长度  $c$ ,深度等于  $w_{\text{H}}$ ;对于表面 HIC,  $w_{\text{H}} = w_{\text{H}} + \min\{t_{\text{mm ID}}, t_{\text{mm OD}}\}$ 。

断裂评价采用的断裂韧性应考虑氢的影响。

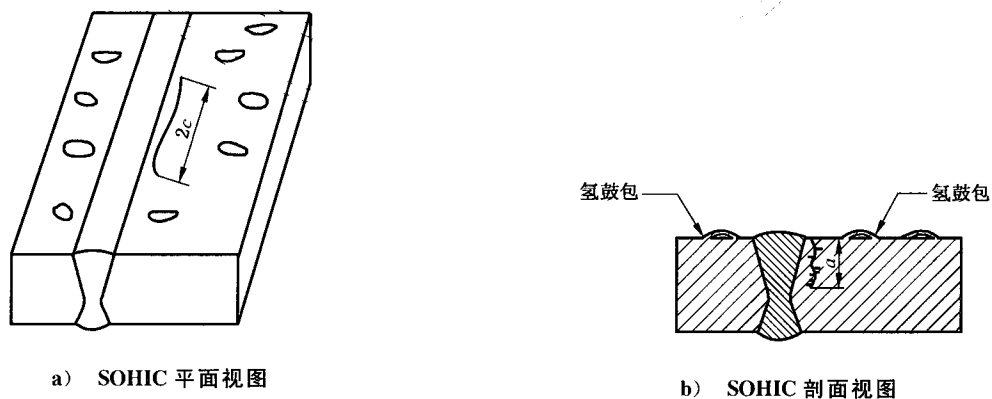


图 32 SOHIC 平面和剖面视图

## 9 凹陷和沟槽评价

## 9.1 总则

本章的评价方法适用于评价因机械作用在部件内、外表面造成的凹陷和沟槽。本章的评价方法不适用于在蠕变温度范围内服役的部件,蠕变温度范围参见表 A.1。

## 9.2 符号

- $A_{CVN}$ ——2/3 夏比试样的断口面积,  $A_{CVN} = 53.33 \text{ mm}^2$ ;
- $c$ ——沟槽投影后的环向长度,单位为 mm;
- CVN——夏比 V 型缺口试样冲击功,单位为 J;
- $D$ ——圆筒内直径,单位为 mm;
- $D_o$ ——圆筒外直径,单位为 mm;
- $d_{dp}$ ——承压状态下实测凹陷深度,单位为 mm;
- $d_{do}$ ——非承压状态下实测凹陷深度,单位为 mm;
- $d_g$ ——沟槽最大深度,单位为 mm;
- $d_{gc}$ ——腐蚀后的沟槽深度,单位为 mm;
- $E_y$ ——弹性模量,单位为 MPa;
- FCA——未来计划运行时间内的腐蚀量,单位为 mm;
- $g_l$ ——沟槽的长度,单位为 mm;
- $g_r$ ——沟槽缺陷的半径,单位为 mm;
- $g_w$ ——沟槽的宽度,单位为 mm;
- $L_{msd}$ ——凹陷、沟槽或凹陷-沟槽组合到最近总体结构不连续处的距离,单位为 mm;
- $L_w$ ——凹陷、沟槽或凹陷-沟槽组合到最近焊缝的距离,单位为 mm;
- $P$ ——评价计算压力,单位为 MPa;
- $P^{\max}$ ——采用评价用计算壁厚,按相应标准、规范计算所得的部件最大允许操作压力,单位为 MPa;
- $P_r^{\max}$ ——评价计算所得考虑缺陷或损伤影响的部件最大允许操作压力,单位为 MPa;
- $R_1$ ——剩余壁厚比;
- RSF——剩余强度因子;
- $RSF_a$ ——允许剩余强度因子,一般  $RSF_a = 0.9$ ;
- $r_d$ ——凹陷底部曲率半径,单位为 mm;
- $s$ ——沟槽投影后的轴向长度,单位为 mm;
- $t_c$ ——评价用计算壁厚,单位为 mm;
- $t_{mm}$ ——最小实测壁厚,单位为 mm;
- $t_{rd}$ ——远离损伤区域的实测壁厚,单位为 mm;
- $U_1, U_2$ ——转换系数,  $U_1 = 113, U_2 = 0.738$ ;
- $Y_1, Y_2$ ——计算凹陷-沟槽组合的 RSF 时所用参数;
- $\beta$ ——沟槽与轴向的夹角,单位为  $(^\circ)$ ;
- $\sigma_{ys}$ ——评价温度下的屈服强度,单位为 MPa;
- $\bar{\sigma}$ ——凹陷-沟槽组合中计算剩余强度的中间参量,单位为 MPa。

### 9.3 评价方法限定条件

9.3.1 采用 1 级评价,应同时满足以下条件:

- 原设计满足相关的规范或标准要求;
- 材料具有足够的韧性;
- 仅承受静态内压载荷。

9.3.2 采用凹陷及凹陷-沟槽组合的 1 级评价,还应同时满足以下条件:

- 部件材料为碳钢;
- 凹陷边缘没有裂纹;
- 圆筒应满足  $168\text{ mm} \leq D \leq 1\ 050\text{ mm}$  且  $5\text{ mm} \leq t_c \leq 19\text{ mm}$ ;
- 对于凹陷-沟槽组合评价,部件材料的标准屈服强度下限不超过 482 MPa;
- 损伤处壳体截面向内偏离;
- 仅适用于单个凹陷或凹陷-沟槽组合评价,即缺陷间距不小于  $L_{\text{mnd}}$  允许限值的 2 倍;
- 限圆筒上的凹陷、凹陷-沟槽组合,且远离总体结构不连续处。

9.3.3 对于不满足 1 级评价限定条件或 1 级评价不通过时,可进行 2 级评价。

### 9.4 评价流程

评价的基本流程如图 33 所示。

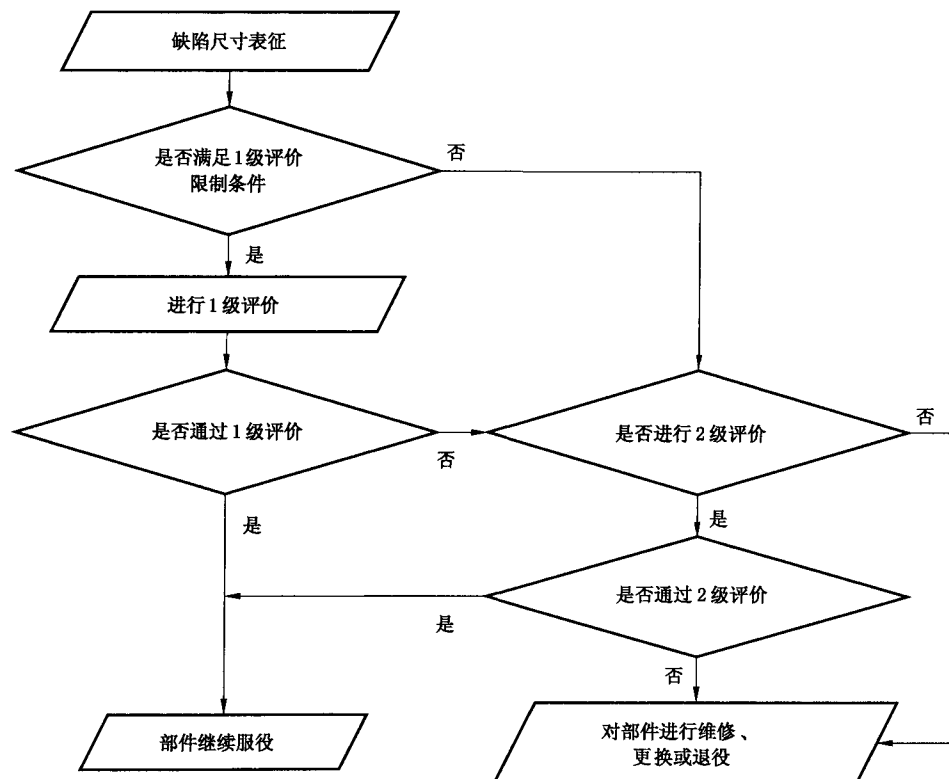


图 33 评价流程图

### 9.5 缺陷选择与尺寸表征

9.5.1 凹陷尺寸的表征方法见图 34a)。非承压状态下凹陷深度  $d_{\text{d0}}$  应采用实测值,承压状态下的凹陷

深度  $d_{ap}$  可采用实测值或者按式(102)确定:

$$d_{ap} = \begin{cases} 0.7d_{d0} & P \geq 0.7P^{\max} \\ d_{d0} & P < 0.7P^{\max} \end{cases} \dots\dots\dots (102)$$

9.5.2 沟槽在表征前应圆滑过渡,表征方法如图 35 所示。当沟槽的长度方向与壳体轴线不平行时,应按式(103)、式(104),将缺陷投影至轴向、环向平面,并分别确定缺陷的环向和轴向尺寸,如图 36 所示。

$$s = g_1 \cos\beta + g_w \sin\beta \quad (\beta < 90^\circ) \dots\dots\dots (103)$$

$$c = g_1 \sin\beta + g_w \cos\beta \quad (\beta < 90^\circ) \dots\dots\dots (104)$$

9.5.3 凹陷-沟槽组合的尺寸表征方法见图 34b)。

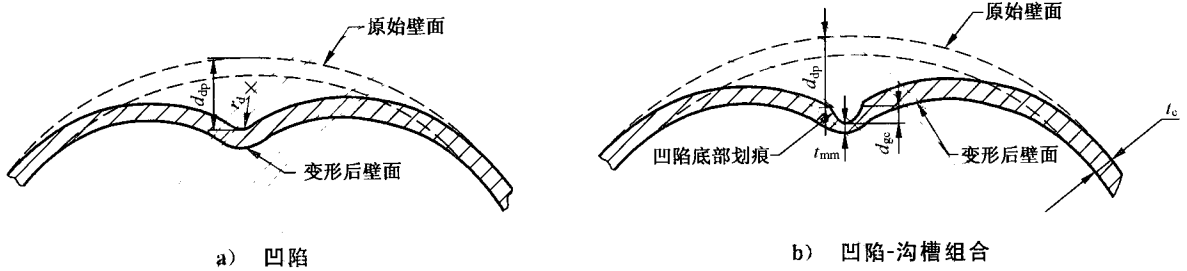


图 34 凹陷及凹陷-沟槽组合的尺寸表征示意图

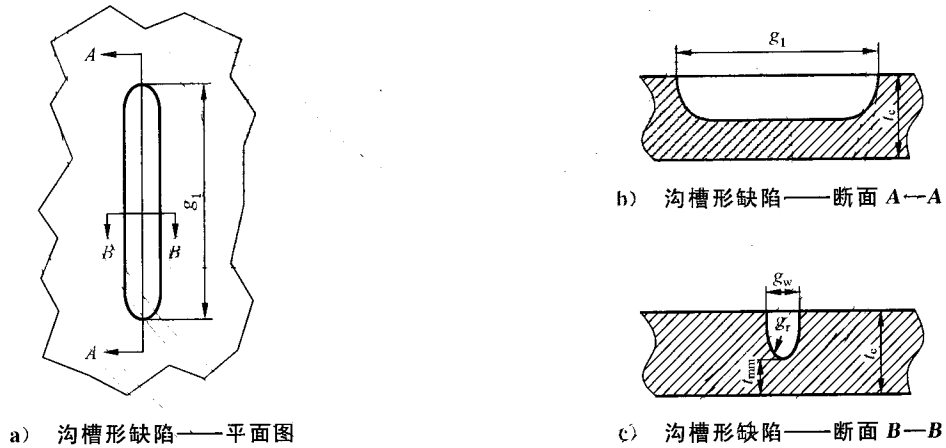


图 35 沟槽的尺寸表征示意图

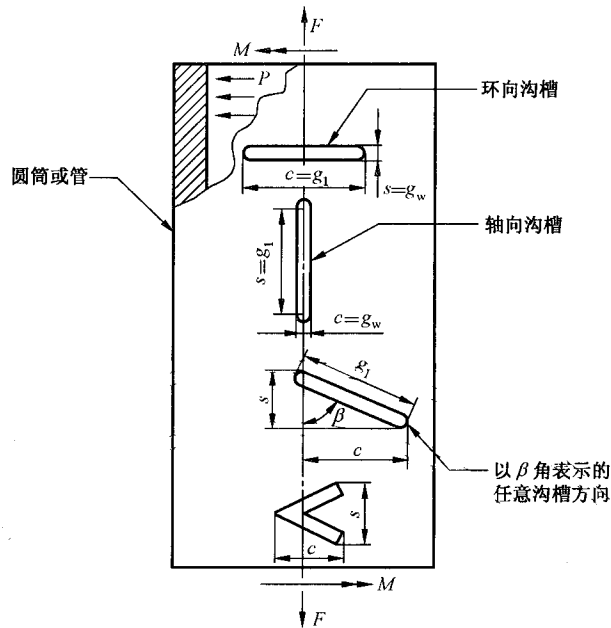


图 36 长度方向与壳体轴线不平行的沟槽尺寸表征示意图

9.6 评价方法

9.6.1 1级评价

9.6.1.1 凹陷的1级评价:

- a) 按式(105)确定评价用计算壁厚  $t_c$ :

$$t_c = t_{\text{rit}} - \text{FCA} \quad \dots\dots\dots(105)$$

- b) 若式(106)、式(107)和式(108)均满足,则继续按c)进行评价下一步,否则1级评价不通过。

$$L_{\text{msd}} \geq 1.8\sqrt{Dt_c} \quad \dots\dots\dots(106)$$

$$L_w \geq \max\{2t_c, 25 \text{ mm}\} \quad \dots\dots\dots(107)$$

$$d_{\text{dp}} \leq 0.07D_o \quad \dots\dots\dots(108)$$

- c) 采用  $t_c$ ,按照相应规范或标准计算部件的  $P^{\text{max}}$ 。如果  $P^{\text{max}}$ 可接受,1级评价通过。

9.6.1.2 沟槽的1级评价:

- a) 确定沟槽处最小实测壁厚  $t_{\text{mm}}$ 和远离金属减薄区的实测壁厚  $t_{\text{rd}}$ ;  
 b) 如果沟槽满足式(109),按照第6章局部减薄进行评价;否则,将沟槽表征为表面裂纹,按GB/T 19624的面型缺陷评价方法进行评价,取裂纹的深度等于沟槽的深度,裂纹的长度等于沟槽的长度。

$$g_r \geq t_{\text{rd}} - t_{\text{mm}} \quad \dots\dots\dots(109)$$

9.6.1.3 凹陷-沟槽组合的1级评价:

- a) 按式(105)确定评价用计算壁厚  $t_c$ ,按式(110)确定腐蚀后的沟槽深度  $d_{\text{gc}}$ :

$$d_{\text{gc}} = d_g + \text{FCA} \quad \dots\dots\dots(110)$$

- b) 若式(108)、式(111)和式(112)、式(113)和式(114)均满足,则继续按c)进行评价,否则1级评价不通过。

$$\begin{cases} t_{\text{mm}} - \text{FCA} \geq 2.5 \text{ mm} & \text{容器和储罐} \\ t_{\text{mm}} - \text{FCA} \geq 1.3 \text{ mm} & \text{管道} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(111)$$

$$L_{msd} \geq 1.8\sqrt{Dt_c} \quad \dots\dots\dots(112)$$

$$L_w \geq \max\{2t_c, 25 \text{ mm}\} \quad \dots\dots\dots(113)$$

$$d_{gc} \leq 0.66t_c \quad \dots\dots\dots(114)$$

c) 采用  $t_c$ ,按照相应规范或标准计算部件的  $P^{\max}$ 。

d) 按式(115)确定凹陷-沟槽组合的剩余强度因子 RSF:

$$RSF = \frac{2}{\pi} \arccos\left(\exp\left[\frac{-C_1 \cdot C_3}{C_2^2}\right]\right) \cdot \left(1 - \frac{d_{gc}}{t_c}\right) \quad \dots\dots\dots(115)$$

式中:

$$C_1 = \frac{1.5\pi E_y U_1}{\bar{\sigma}^2 A_{CVN} d_{gc}} \quad \dots\dots\dots(116)$$

$$C_2 = Y_1 \left(1 - \frac{1.8d_{d0}}{D}\right) + Y_2 \left(\frac{10.2d_{d0}}{2t_c}\right) \quad \dots\dots\dots(117)$$

$$C_3 = \exp\left[\frac{\ln(U_2 \cdot CVN) - 1.9}{0.57}\right] \quad \dots\dots\dots(118)$$

$$\bar{\sigma} = 1.15 \cdot \sigma_{ys} \left(1 - \frac{d_{gc}}{t_c}\right) \quad \dots\dots\dots(119)$$

$$Y_1 = 1.12 - 0.23\left(\frac{d_{gc}}{t_c}\right) + 10.6\left(\frac{d_{gc}}{t_c}\right)^2 - 21.7\left(\frac{d_{gc}}{t_c}\right)^3 + 30.4\left(\frac{d_{gc}}{t_c}\right)^4 \quad \dots\dots\dots(120)$$

$$Y_2 = 1.12 - 1.39\left(\frac{d_{gc}}{t_c}\right) + 7.32\left(\frac{d_{gc}}{t_c}\right)^2 - 13.1\left(\frac{d_{gc}}{t_c}\right)^3 + 14.0\left(\frac{d_{gc}}{t_c}\right)^4 \quad \dots\dots\dots(121)$$

e) 如果  $RSF \geq RSF_a$ ,且  $P^{\max}$  可接受,则 1 级评价通过。如果  $RSF < RSF_a$ ,则按式(122)计算  $P_r^{\max}$ 。如果部件的操作压力不大于  $P_r^{\max}$ ,则 1 级评价通过。

$$P_r^{\max} = P^{\max} \left(\frac{RSF}{RSF_a}\right) \quad \dots\dots\dots(122)$$

### 9.6.2 2 级评价

采用应力分类或极限载荷分析方法进行 2 级评价。

## 10 错边、棱角和不圆评价

### 10.1 总则

本章的评价方法适用于存在焊接接头对口错边、棱角和不圆的承压部件(圆筒、锥壳、球壳)的评价。本章的评价方法不适用于在蠕变温度范围内服役的部件,蠕变温度范围参见表 A.1。

### 10.2 符号

- $A_{ext}$ ——外压应变系数;
- $A_n$ ——计算圆筒一般不圆时傅里叶级数中的余弦项系数;
- $A_1$ ——测量中心偏离平均圆周实际中心的修正系数;
- $B_{ext}$ ——外压应力系数,单位为 MPa;
- $B_n$ ——计算圆筒一般不圆时傅里叶级数中的正弦项系数;
- $B_1$ ——测量中心偏离平均圆周实际中心的修正系数;

- $C_b$ ——计算长半径弯管整体不圆导致的  $R_b$  时所使用的中间参量；  
 $C_f$ ——计算圆筒轴向焊接接头棱角导致的  $R_b$  时所使用的中间参量；  
 $C_{ul}$ ——单位转换系数,  $C_{ul}=25$ ；  
 $C_s$ ——不圆系数, 壳体呈纯椭圆形时  $C_s=0.5$ , 与椭圆形明显不同时  $C_s=0.1$ ；  
 $C_1 \sim C_4$ ——计算  $R_b$  时所使用的中间参量；  
 $D$ ——内直径, 单位为 mm；  
 $D_L$ ——锥壳圆筒大端外直径, 单位为 mm；  
 $D_S$ ——锥壳圆筒小端外直径, 单位为 mm；  
 $D_c$ ——计算圆筒一般不圆导致的  $R_b$  时所使用的中间参量；  
 $D_m$ ——平均直径, 单位为 mm；  
 $D_{max}$ ——外直径最大值, 单位为 mm；  
 $D_{min}$ ——外直径最小值, 单位为 mm；  
 $D_o$ ——外直径, 单位为 mm；  
 $E$ ——焊接接头系数；  
 $E_t$ ——评定温度下材料的正切模量, 单位为 MPa；  
 $E_y$ ——评定温度下材料的弹性模量, 单位为 MPa；  
 $e$ ——焊接接头对口错边量, 或外压壳体评价时在  $2\theta$  角度弧长范围内的向内偏移最大值, mm；  
 $e_d$ ——偏离理想圆筒的最大偏移量, 单位为 mm；  
 $F$ ——有效截面上的轴向力, 仅适用于圆筒环向焊接接头中心线偏离的情况, 单位为 N；  
 $F_{lc}$ ——预期非弹性失稳应力, 单位为 MPa；  
 $F_{bc}$ ——仅受外压圆筒弹性压缩失效环向薄膜应力, 单位为 MPa；  
 $FCA$ ——未来计划运行时间内的腐蚀量, 单位为 mm；  
 $FS$ ——安全系数；  
 $H_f$ ——许用应力因子, 形状偏离产生的应力为一次应力时  $H_f=1.5$ , 为二次应力时  $H_f=3.0$ ；  
 $i$ ——圆筒圆周上的实际半径测量点序号；  
 $k$ ——计算圆筒轴向焊接接头整体棱角导致的  $R_b$  时所使用的中间参量；  
 $k_n$ ——计算圆筒一般不圆导致的  $R_b$  时所使用的中间参量；  
 $L$ ——棱角的表征长度, 单位为 mm；  
 $L_c$ ——锥壳无加强部分轴向当量长度, 单位为 mm；  
 $L_{msd}$ ——外凸边缘到最邻近总体结构不连续处距离或相邻缺陷间距离, 单位为 mm；  
 $L_u$ ——外压圆筒或锥壳计算时无加强部分的长度, 单位为 mm；  
 $M$ ——圆筒圆周上等间距测量点数量,  $M \geq 24$  且为偶数；  
 $N$ ——傅里叶级数数量, 取  $M/2$ ；  
 $n$ ——与傅里叶级数相关的谐波数, 或失稳圆筒的波数；  
 $P$ ——评价计算压力, 单位为 MPa；  
 $P_c$ ——外压圆筒非弹性失稳压力, 单位为 MPa；  
 $P_{cl}$ ——圆筒的弹性失稳压力, 单位为 MPa；  
 $P_{ec}$ ——外压圆筒最小弹性失稳压力, 单位为 MPa；  
 $P_{ext}$ ——许用外压载荷, 单位为 MPa；  
 $R$ ——圆筒或球壳的平均半径, 单位为 mm；  
 $R_b$ ——弯管中心线弯曲半径, 单位为 mm；

- $R_L$ ——缺陷处壳体的局部外半径,单位为 mm;  
 $R_a$ ——焊接接头对口处部件 1 和部件 2 平均半径的平均值,单位为 mm;  
 $R_b$ ——缺陷导致  $\sigma_m$  的放大系数;  
 $R_{bs}$ ——缺陷导致  $\sigma_{ms}$  的放大系数;  
 $R_i$ ——圆筒上  $i$  点处的半径实测值,单位为 mm;  
 $R_i^c$ ——圆筒上  $i$  点处的半径修正值,单位为 mm;  
 $R_m$ ——圆筒不圆时实测半径的平均值,单位为 mm;  
 $R_o$ ——壳体无缺陷处的外半径,单位为 mm;  
 $R_1$ ——焊接接头对口处部件 1 的平均半径(对应壁厚为  $t_1$ ),单位为 mm;  
 $R_2$ ——焊接接头对口处部件 2 的平均半径(对应壁厚为  $t_2$ ),单位为 mm;  
 $RSF_a$ ——允许剩余强度因子;  
 $R(\theta)$ ——在  $\theta$  处的半径,单位为 mm;  
 $S_p$ ——计算棱角导致的  $R_b$  时所使用的中间参量;  
 $t_c$ ——评价用计算壁厚(焊接接头两侧厚度不等时取较薄一侧的壁厚),单位为 mm;  
 $t_{rd}$ ——远离损伤区域的实测壁厚,单位为 mm;  
 $t_1$ ——焊接接头对口处部件 1 的壁厚(较薄一侧),单位为 mm;  
 $t_2$ ——焊接接头对口处部件 2 的壁厚(较厚一侧),单位为 mm;  
 $t_{1c}$ ——焊接接头对口处部件 1 的评价用计算壁厚(较薄一侧),单位为 mm;  
 $t_{2c}$ ——焊接接头对口处部件 2 的评价用计算壁厚(较厚一侧),单位为 mm;  
 $W$ ——计算长半径弯管整体不圆导致的  $R_b$  时所使用的中间参量;  
 $X$ ——计算长半径弯管整体不圆导致的  $R_b$  时所使用的中间参量;  
 $Y$ ——计算长半径弯管整体不圆导致的  $R_b$  时所使用的中间参量;  
 $\alpha$ ——锥壳二分之一圆锥顶角,单位为 rad;  
 $\beta$ ——计算圆筒棱角导致的  $R_{bs}$  时所使用的中间参量,单位为 rad;  
 $\delta$ ——棱角的高度,单位为 mm;  
 $\epsilon_i$ ——在  $i$  点处偏离理想平均半径的偏移量,单位为 mm;  
 $\theta$ ——应力计算点的角度位置,单位为 rad;  
 $\theta_p$ ——棱角度,单位为 rad;  
 $\lambda$ ——失稳参数;  
 $\nu$ ——泊松比;  
 $\rho$ ——计算圆筒环向焊接接头错边导致的  $R_b$  时所使用的中间参数;  
 $[\sigma]$ ——根据原设计规范或标准确定的许用应力,单位为 MPa;  
 $\sigma_m$ ——压力载荷产生的薄膜应力,单位为 MPa;  
 $\sigma_{ms}$ ——附加载荷产生的薄膜应力,单位为 MPa;  
 $\sigma_{ys}$ ——评价温度下的屈服强度,单位为 MPa;  
 $\psi$ ——计算球壳不圆导致的  $R_b$  时所使用的中间参数。

### 10.3 评价方法限定条件

#### 10.3.1 进行 1 级评价的部件,应同时满足以下条件:

- a) 原设计满足相关的规范或标准要求;
- b) 材料具有足够的韧性;



- c) 不承受循环载荷;
- d) 壳体未发生整体变形;
- e) 除错边、棱角及不圆导致的弯曲应力外,压力及附加载荷仅产生薄膜应力;
- f) 稳定性评价仅适用于受外压作用的锥壳和圆筒,且不包括附加载荷可产生较大轴向压应力的外压圆筒;
- g) 圆筒的不圆沿轴向为恒定值。

10.3.2 对于不满足 1 级评价限定条件,或 1 级评价不通过时,可进行 2 级评价。符合下列任一条件的应进行 2 级评价:

- a) 承受内压、外压、附加载荷,或上述载荷任意组合的部件;
- b) 基于验证性试验设计的部件;
- c) 圆筒整体不圆(轴向局部偏移);
- d) 载荷在错边、棱角、不圆处产生较大的应力梯度;
- e) 载荷产生的压应力会影响结构稳定性。

### 10.4 评价流程

评价的基本流程如图 37 所示。

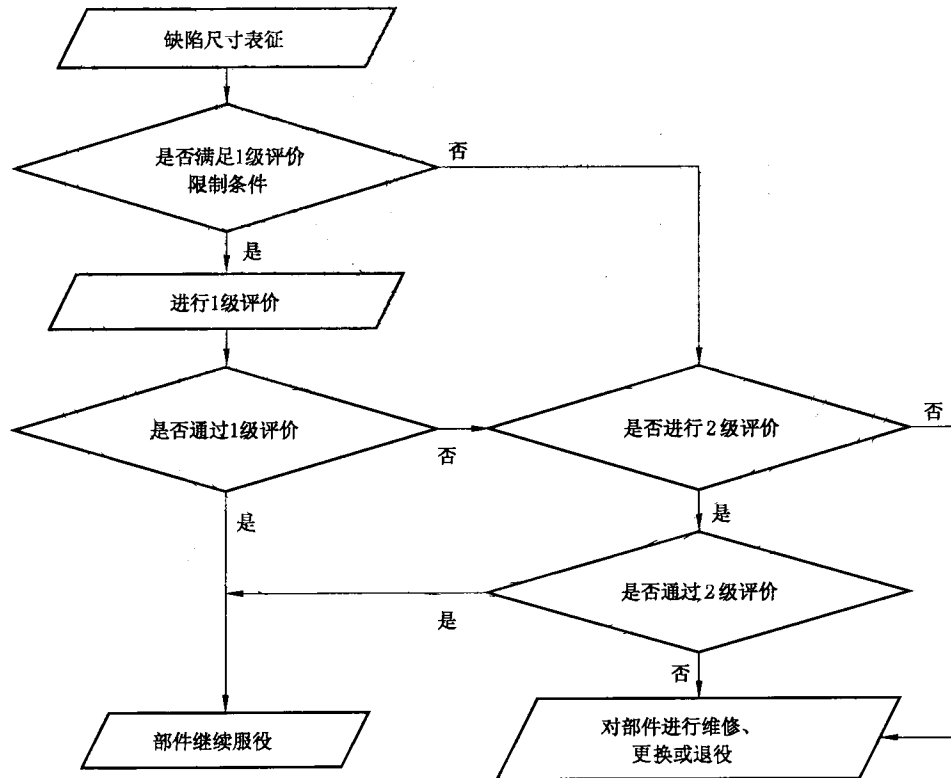


图 37 评价流程图

### 10.5 缺陷选择与尺寸表征

10.5.1 错边的尺寸表征见图 38 和图 39,棱角的尺寸表征见图 40~图 42,同时存在错边和棱角时其尺寸表征见图 43。

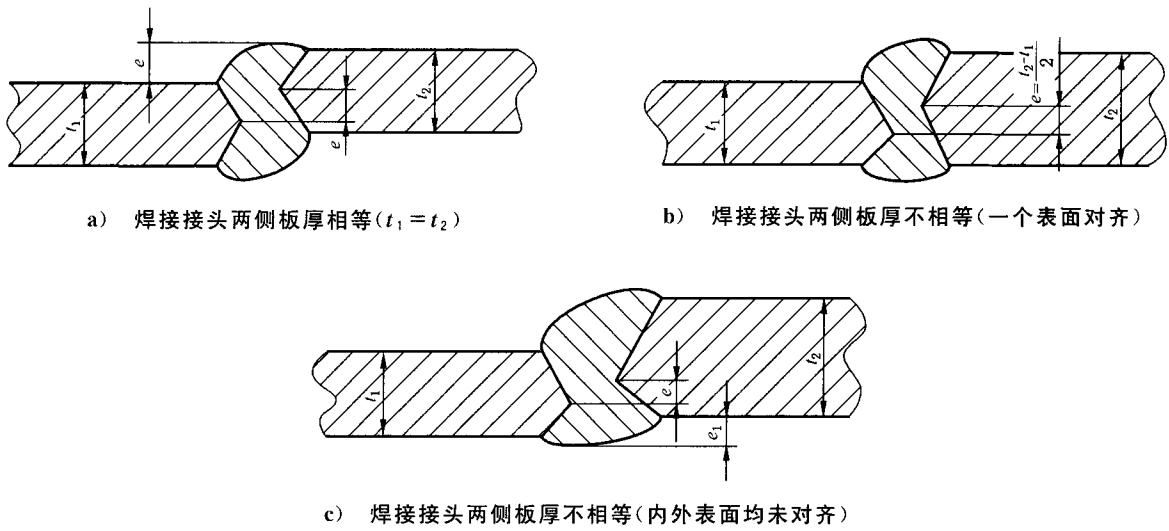


图 38 平板对接焊接接头对口错边

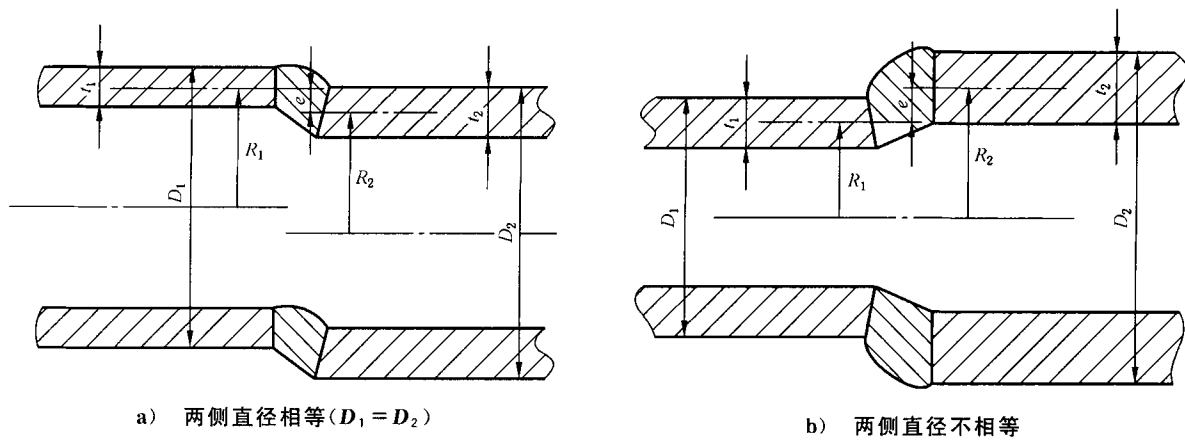


图 39 圆筒环向焊接接头对口错边

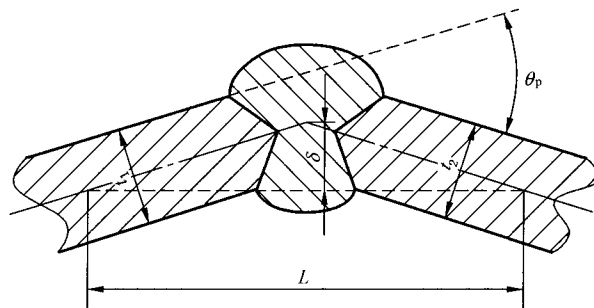


图 40 平板对接焊接接头的棱角( $t_1 = t_2$ )

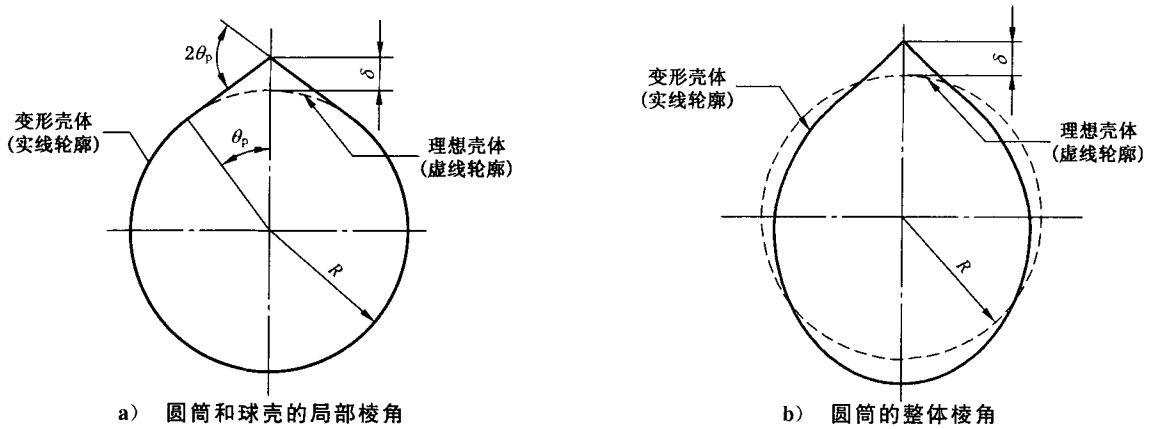


图 41 圆筒轴向焊接接头和球壳环向焊接接头的棱角

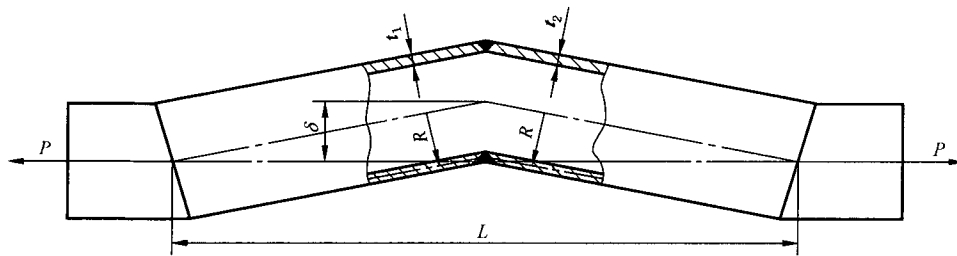


图 42 圆筒环向焊接接头的棱角 ( $t_1 = t_2$ )

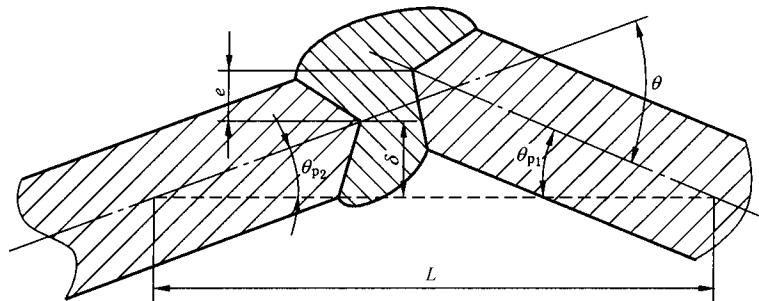


图 43 平板对接焊接接头同时存在对口错边和棱角

10.5.2 不圆的尺寸表征见图 44~图 46,具体如下:

a) 一般不圆应按图 45 及如下方法测量半径:

环向第  $i$  处测量点  $\theta$  角度处的半径按式(123)拟合:

$$R(\theta) = R_m + A_1 \cos\theta + B_1 \sin\theta + \epsilon_i \quad \dots\dots\dots(123)$$

式中,  $R_m$  按式(124)计算,  $A_1$  与  $B_1$  按式(125)及式(126)计算, 半径的修正值  $R_i^c$  和偏移量  $\epsilon_i$  按式(127)及式(128)计算。

$$R_m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_i \quad \dots\dots\dots(124)$$

$$A_1 = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M R_i \cos \left[ \frac{2\pi(i-1)}{M} \right] \quad \dots\dots\dots(125)$$

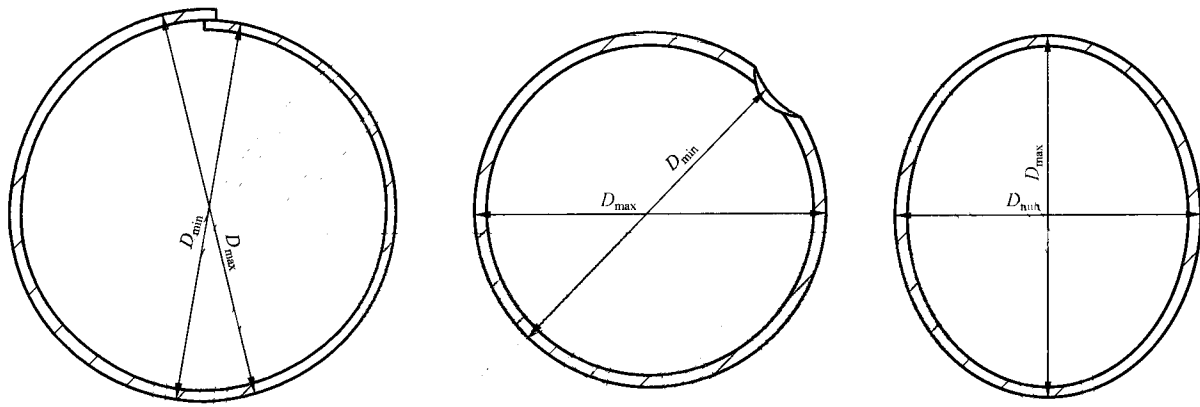
$$B_1 = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M R_i \sin \left[ \frac{2\pi(i-1)}{M} \right] \quad \dots\dots\dots(126)$$

$$R_i^c = R_i - A_1 \cos \left[ \frac{2\pi(i-1)}{M} \right] - B_1 \sin \left[ \frac{2\pi(i-1)}{M} \right] \dots\dots\dots (127)$$

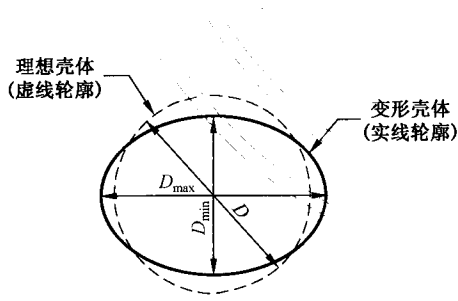
$$\epsilon_i = R_i^c - R_m \dots\dots\dots (128)$$

b) 发生变形的圆筒在计算许用外压时,特征参数按图 46 确定,  $R_L$  按式(129)计算,式中失稳圆筒的波数  $n$  按 10.6.1.2 b) 计算:

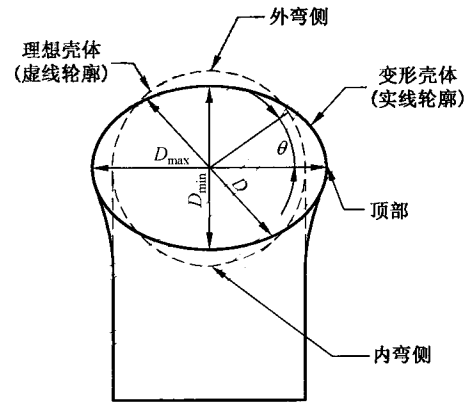
$$R_L = \frac{\left[ R_o \left( 1 - \cos \frac{90}{n} \right) - e_d \right]^2 + \left( R_o \sin \frac{90}{n} \right)^2}{2R_o \left( 1 - \cos \frac{90}{n} \right) - 2e_d} \dots\dots\dots (129)$$



a) 最大直径和最小直径



b) 整体不圆



c) 管子弯曲时的截面变形

图 44 环向整体不圆

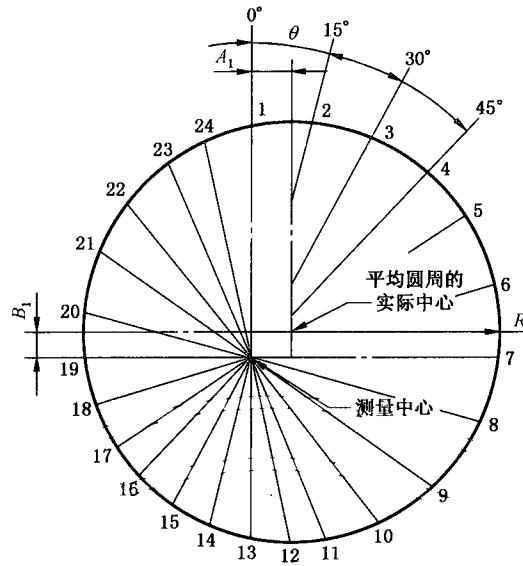


图 45 圆筒一般不圆的参数测量

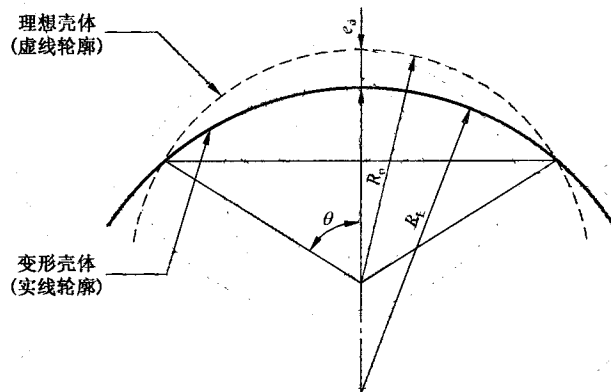


图 46 圆筒不圆后的许用外压计算时的特征参数

10.6 评价方法

10.6.1 1级评价

10.6.1.1 受内压部件错边、棱角、不圆的1级评价：

- a) 按式(130)确定评价用计算壁厚,焊接接头两侧厚度不等时计算较薄一侧的计算壁厚:

$$t_c = t_{rd} - FCA \dots\dots\dots(130)$$

- b) 确定壳体平面内垂直于焊缝方向压力载荷产生的薄膜应力  $\sigma_m$ ,及圆筒环焊缝中垂直于焊缝方向附加载荷产生的薄膜应力  $\sigma_{ms}$ 。

- c) 按式(131)确定剩余强度系数 RSF:

$$RSF = \min \left\{ \frac{H_t[\sigma]}{\sigma_m(1 + R_b) + \sigma_{ms}(1 + R_{bs})}, 1.0 \right\} \dots\dots\dots(131)$$

式(131)中  $R_b$  取部件存在的各类缺陷导致的  $R_b$  之和,  $R_{bs}$  取部件存在的各类缺陷导致的  $R_{bs}$  之和。错边、棱角及不圆导致的  $R_b$  和  $R_{bs}$  分别按表 6 计算。

- d) 若  $RSF \geq RSF_a$ , 则 1 级评价通过;若  $RSF < RSF_a$ , 则 1 级评价不通过。

表 6 存在错边、棱角、不圆时导致的  $R_b$  及  $R_{bs}$

放大系数 类型	结构类型	损伤类型	计算方法
$R_b$	圆筒	环向焊接 接头错边	$R_b = \left  \frac{12}{R_1 t_{1c}} \left[ 0.256 \cdot 72 R_2 t_{2c} \left( \frac{C_1}{C_3} \right) + \frac{e R_a}{2} \left( \frac{C_2}{C_3} \right) \right] \right $ <p>式中：  <math>\rho = \frac{t_{2c}}{t_{1c}}</math>  <math>C_1 = (\rho - 1)(\rho^2 - 1)</math>  <math>C_2 = \rho^2 + 2\rho^{1.5} + 1</math>  <math>C_3 = (\rho^2 + 1)^2 + 2\rho^{1.5}(\rho + 1)</math>  <math>e =  R_1 - R_2 </math>  <math>R_a = \frac{R_1 + R_2}{2}</math></p> <p>限定条件：<math>\frac{R_1}{t_{1c}} \geq 10.0</math> 和 <math>\frac{R_2}{t_{2c}} \geq 10.0</math>，并且 <math>0 &lt; \frac{e}{t_c} \leq 1.0</math></p>
		环向焊接 接头棱角	$R_b = \max \left\{ \frac{C_1}{C_2}, \frac{C_3}{C_4} \right\}$ <p>式中：  <math>C_1 = \left( -0.023 \ 748 - 0.010 \ 087 \ln(S_p) + 0.001 \ 457 \ 1 [\ln(S_p)]^2 \right) + 11.631 \theta_p + 10.476 \theta_p^2 - 23.792 \theta_p^3</math>  <math>C_2 = \left( 1.0 + 0.208 \ 21 \theta_p - 0.365 \ 81 \ln(S_p) + 0.062 \ 036 [\ln(S_p)]^2 \right) - 0.004 \ 423 \ 9 [\ln(S_p)]^3</math>  <math>C_3 = \left( -0.037 \ 285 - 0.005 \ 168 \ 7 \ln(S_p) + 0.007 \ 239 \ 5 [\ln(S_p)]^2 \right) + 14.865 \theta_p - 33.163 \theta_p^2 + 91.061 \theta_p^3</math>  <math>C_4 = \left( 1.0 - 0.359 \ 12 \ln(S_p) + 0.065 \ 885 [\ln(S_p)]^2 \right) - 0.005 \ 495 \ 9 [\ln(S_p)]^3 + 0.044 \ 263 \theta_p</math></p> $S_p = \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)PR^3}{E_y(t_c)^3}} \quad (\text{以下 } S_p \text{ 均采用此公式确定})$ $\theta_p = \arctan\left(\frac{2\delta}{L}\right)$ <p>限定条件：<math>10.0 \leq \frac{R}{t_c} \leq 500.0</math>，<math>0 \leq \theta_p \leq \frac{\pi}{18}</math>，且 <math>0 \leq S_p \leq 67.5</math></p>
		轴向焊接 接头错边	$R_b = \frac{C_1}{C_2}$ <p>式中：  <math>C_1 = \left[ \begin{aligned} &amp;3.839 \ 2 \times 10^{-3} + 3.163 \ 6 \left( \frac{e}{t_c} \right) + 1.237 \ 7 \left( \frac{e}{t_c} \right)^2 \\ &amp;- 4.058 \ 2 \times 10^{-3} \cdot S_p + 3.464 \ 7 \times 10^{-4} \cdot S_p^2 \\ &amp;+ 3.120 \ 5 \times 10^{-6} \cdot S_p^3 \end{aligned} \right]</math>  <math>C_2 = 1.0 + 0.419 \ 34 \left( \frac{e}{t_c} \right) + 9.739 \ 0 \times 10^{-3} \cdot S_p</math></p> <p>限定条件：<math>10.0 \leq \frac{R}{t_c} \leq 400.0</math>，<math>0 \leq \frac{e}{t_c} \leq 1.0</math>，且 <math>0 \leq S_p \leq 50.0</math></p>

表 6 (续)

放大系数 类型	结构类型	损伤类型	计算方法
$R_b$	圆筒	轴向焊接接头局部棱角	$R_b = \left(\frac{6\delta}{t_c}\right) C_f$ <p>式中:</p> $C_f = 1 - \frac{\theta_p}{3\pi} - \frac{4}{\pi\theta_p^2} (\theta_p - \sin\theta_p) - \frac{4S_p^2}{\pi\theta_p^2} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(n\theta_p - \sin n\theta_p)}{n^2 - 1 + S_p^2}$ <p>或按图 47 确定 <math>C_f</math></p> $\theta_p = \arccos\left(\frac{1}{1+\delta/R}\right)$ <p>限定条件: <math>\frac{R}{t_c} \geq 10.0</math> 且 <math>0 \leq S_p \leq 30.0</math></p>
		轴向焊接接头整体棱角	$R_b = \left(\frac{6\delta}{t_c}\right) C_f$ <p>式中:</p> <p><math>S_p^2 &lt; 1</math> 时, <math>k^2 = 1 - S_p^2</math>, 且</p> $C_f = 0.5 - \frac{\pi}{2k} \cot k\pi - \frac{k^2 - 1}{2k^2} + \frac{1}{2k^2 - 1}$ <p><math>S_p^2 \geq 1</math> 时, <math>k^2 = S_p^2 - 1</math>, 且</p> $C_f = 0.5 + \frac{\pi}{2k} \coth k\pi - \frac{k^2 + 1}{2k^2} - \frac{1}{k^2 + 1}$
		整体不圆	$R_b = \left  \frac{1.5(D_{\max} - D_{\min}) \cos 2\theta}{t_c \left(1 + C_s \frac{P(1-\nu^2)}{E_y} \left(\frac{D_m}{t_c}\right)^3\right)} \right $
		一般不圆	$R_b = \left\{ \left(\frac{6}{t_c}\right) \sum_{n=2}^N \left\{ \frac{[A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)]}{1 + k_n} \right\} \right\}$ <p>式中:</p> <p><math>n</math>——与傅里叶级数相关的谐波数</p> $A_n = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M R_i \cos\left[\frac{2\pi(i-1)}{M}n\right]$ $B_n = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M R_i \sin\left[\frac{2\pi(i-1)}{M}n\right]$ <p>当 <math>n \geq 2</math> 时, 用 <math>R(\theta)</math> 代替 <math>R_i</math>。</p> $k_n = \frac{PR^3}{(n^2 - 1)D_c} \quad D_c = \frac{E_y t_c^3}{12(1-\nu^2)}$
	球壳	错边	$R_b = \left[ \begin{aligned} &9.629 1 \times 10^{-3} + 3.079 1 \left(\frac{e}{t_c}\right) - 0.245 87 \left(\frac{e}{t_c}\right)^2 + \\ &0.025 734 \left(\frac{e}{t_c}\right)^3 + 0.059 281 \left(\frac{e}{t_c}\right)^4 - 6.197 9 \times 10^{-3} \cdot S_p \\ &+ 1.925 2 \times 10^{-4} \cdot S_p^2 + 1.981 5 \times 10^{-6} \cdot S_p^3 - 1.819 4 \times 10^{-7} \cdot S_p^4 \\ &+ 2.069 8 \times 10^{-9} \cdot S_p^5 \end{aligned} \right]$ <p>限定条件: <math>10.0 \leq \frac{R}{t_c} \leq 400.0</math>, <math>0 \leq \frac{e}{t_c} \leq 1.0</math>, 且 <math>0 \leq S_p \leq 50.0</math></p>

表 6 (续)

放大系数 类型	结构类型	损伤类型	计算方法
R <sub>b</sub>	球壳	棱角	$R_b = \frac{C_1}{C_2}$ <p>式中:</p> $C_1 = (3.082 + 1.7207 \times 10^{-3} \cdot S_p + 1.3641\psi)$ $C_2 = (1.0 + 8.9503 \times 10^{-3} \cdot S_p - 2.8724 \times 10^{-4} \cdot S_p^2)$ $C_2 = (1.0 + 8.9503 \times 10^{-3} \cdot S_p - 2.8724 \times 10^{-4} \cdot S_p^2)$ $C_2 = (1.0 + 8.9503 \times 10^{-3} \cdot S_p - 2.8724 \times 10^{-4} \cdot S_p^2)$ $C_2 = (1.0 + 8.9503 \times 10^{-3} \cdot S_p - 2.8724 \times 10^{-4} \cdot S_p^2)$ $\psi = \ln\left(\frac{\delta}{C_{ul}}\right)$ $\theta_p = \arctan\left(\frac{2\delta}{L}\right)$ <p>限定条件: <math>10.0 \leq \frac{R}{t_c} \leq 300.0, 0 \leq \theta_p \leq \frac{5\pi}{36}, 0 \leq S_p \leq 30.0</math></p>
	长半径弯头	整体不圆	$R_b = \left  \frac{C_b \cdot \cos 2\theta}{L_t} \right $ <p>式中:</p> $C_b = \left[ \begin{array}{l} -0.007281 + 0.05671Y + 0.0008353X + 0.01210XY + \\ 0.00001313X^2 - 0.00008362X^2Y + 0.04889W + 0.1827WY - \\ 0.003201WX - 0.01697WXY - 0.00003506WX^2 - \\ 0.0001021WX^2Y - 0.1386W^2 - 0.09795W^2Y + 0.007906W^2X + \\ 0.004694W^2XY - 0.00003833W^2X^2 + 0.0002649W^2X^2Y^2 \end{array} \right]$ $W = \frac{1000 \cdot PR}{E_y t_c}, X = \frac{R}{t_c}, Y = \frac{100(D_{max} - D_{min})}{D_o}$ <p>限定条件: <math>0.045 \leq W \leq 0.50, 20.0 \leq X \leq 40.0</math></p>
	弯头或弯管(弯曲半径无限制)	整体不圆	$R_b = \left  \frac{3R \cos 2\theta (D_{max} - D_{min})}{t_c L_t D_o} \right $ $L_t = \frac{\left( \frac{R_b + \sin\theta}{R_m} + \frac{\sin\theta}{2} \right)}{\left( \frac{R_b}{R_m} + \sin\theta \right)}$
R <sub>bs</sub>	平板	错边	$R_{bs} = 1 + \left( \frac{6e}{t_{1c}} \right) \left( 1 + \left( \frac{t_{2c}}{t_{1c}} \right)^{1.5} \right)^{-1}$
		棱角	$R_{bs} = \frac{3\delta \tanh \frac{\beta}{2}}{t_c \frac{\beta}{2}} \text{ (固支)}, R_{bs} = \frac{6\delta \tanh \beta}{t_c \beta} \text{ (铰支)}$ <p>式中: <math>\beta = \frac{L}{t_c} \sqrt{\frac{3\sigma_m}{E_y}}, \delta = \frac{L\theta_p}{4}</math></p>
	圆筒	环向焊接接头错边	$R_{bs} = 1 + \left( \frac{6e}{t_{1c}} \right) \left( 1 + \left( \frac{t_{2c}}{t_{1c}} \right)^{1.5} \right)^{-1}$ <p>限定条件: <math>\frac{R_1}{t_{1c}} \geq 10.0</math> 和 <math>\frac{R_2}{t_{2c}} \geq 10.0</math>, 并且 <math>0 &lt; \frac{e}{t_c} \leq 1.0</math></p>
		轴向焊接接头错边、棱角	$R_{bs} = 0$
		不圆	$R_{bs} = 0$
球壳	错边、棱角	$R_{bs} = 0$	
弯管	不圆	$R_{bs} = 0$	



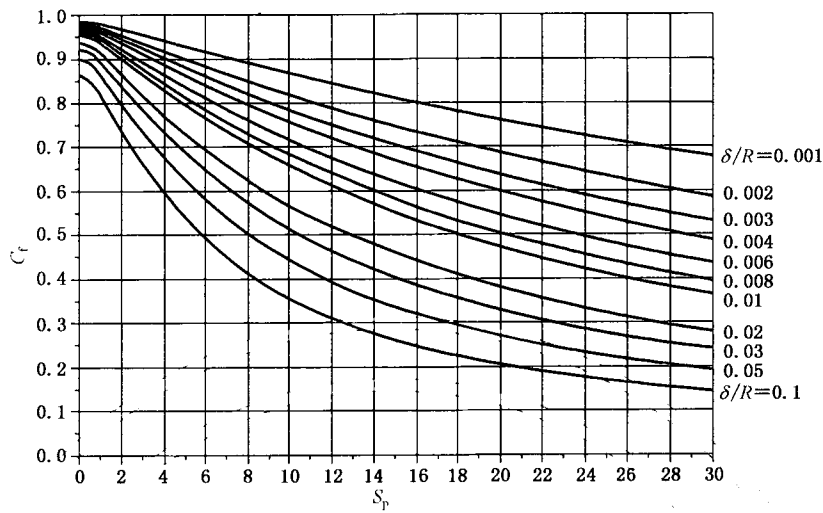


图 47 圆筒轴向焊接接头棱角相关系数

10.6.1.2 外压圆筒和锥壳不圆的 1 级评价:

- a) 若评价对象为圆筒,按 10.6.1.1 校核能通过,则继续按 b) 进行评价。对于锥壳,取  $R_o = 0.25 (D_L + D_S) / \cos \alpha$ ,  $L_u = L_c / \cos \alpha$ ,  $L_c$  按相应设计规范或标准计算。
- b) 按式(132)和式(133)确定使  $P_{el}$  达到最小值的无缺陷壳体的  $n$  值(从  $n=2$  开始以 0.1 为增量迭代计算直到  $P_{el}$  达到最小值):

$$P_{el} = \frac{1}{n^2 + 0.5\lambda^2 - 1} \left( \frac{E_y t_c}{R_o} \right) \left[ \frac{(n^2 + \lambda^2 - 1)^2}{12(1 - \nu^2)} \left( \frac{t_c}{R_o} \right)^2 + \frac{\lambda^4}{(n^2 + \lambda^2)^2} \right] \dots\dots\dots(132)$$

$$\lambda = \frac{\pi R_o}{L_u} \dots\dots\dots(133)$$

- c) 根据 10.6.1.2 b) 的  $n$  值和圆筒不圆的实测结果  $e_d$ ,按式(129)确定不圆处局部外半径值  $R_L$ 。
- d) 在式(132)中以  $R_L$  值代替  $R_o$ ,可得到有缺陷状态下的新  $n$  值及相应最小弹性失稳压力  $P_{ec}$ 。
- e) 按式(134)~式(136)计算非弹性失稳压力  $P_c$ :

1) 碳钢和低合金钢:

$$P_c = \frac{F_{he} t_c}{R_n} \dots\dots\dots(134)$$

$$F_{he} = \begin{cases} F_{he} & F_{he}/\sigma_{ys} \leq 0.552 \\ 0.7\sigma_{ys} \left( \frac{F_{he}}{\sigma_{ys}} \right)^{n,t} & 0.552 < F_{he}/\sigma_{ys} < 2.439 \\ \sigma_{ys} & F_{he}/\sigma_{ys} \geq 2.439 \end{cases} \dots\dots\dots(135)$$

$$F_{he} = \frac{P_{ec} R_o}{t_c} \dots\dots\dots(136)$$

2) 所有其他材料:按相应设计规范或标准确定外压应变系数  $A_{ext}$  和外压应力系数  $B_{ext}$ 。

$$P_c = \frac{F_{he} t_c E_t}{R_o E_y} \dots\dots\dots(137)$$

$$E_t = \frac{2B_{ext}}{A_{ext}} \dots\dots\dots(138)$$

f) 按式(139)确定许用外压:

$$P_{ext} = \frac{\min\{P_{ec}, P_c\}}{FS} \dots\dots\dots(139)$$

$$FS = \begin{cases} 2.0 & F_{hc} \leq 0.55\sigma_{ys} \\ 2.407 - 0.741 \left( \frac{F_{hc}}{\sigma_{ys}} \right) & 0.55\sigma_{ys} < F_{hc} < \sigma_{ys} \dots\dots\dots (140) \\ 1.667 & F_{hc} = \sigma_{ys} \end{cases}$$

g) 若  $P_{ext} \geq P$ , 则 1 级评价通过。若  $P_{ext} < P$ , 则 1 级评价不通过。

### 10.6.2 2 级评价

采用应力分类或极限载荷分析方法对存在错边、棱角、不圆的部件进行 2 级评价。

## 11 火灾损伤评价

### 11.1 总则

11.1.1 本章适用于压力容器、压力管道、储罐壁板承压部件在火灾中受火焰冲击、热辐射, 或在使用过程中因工艺超温导致损伤的合于使用评价。本章中所指的火灾包括承压部件外部或/和内部发生的火灾。

11.1.2 本章不适用于储罐浮顶及底板的火灾损伤合于使用评价。

### 11.2 符号

- $T$ —— $t$  时刻火灾温度, 单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $T_0$ ——火灾时的环境温度, 单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t$ ——火灾时间, 单位为  $\text{min}$ ;
- $n_b$ ——原设计规范或标准中抗拉强度对应的安全系数;
- $n_h$ ——由硬度转换得到的抗拉强度确定许用应力时采用的安全系数;
- $n_{ism}$ ——在用安全系数;
- $n_s$ ——原设计规范或标准中屈服强度对应的安全系数;
- $\sigma^{ht}$ ——由现场硬度测定值转换得到的抗拉强度换算值, 单位为  $\text{MPa}$ ;
- $[\sigma]^n$ ——现场硬度测量温度下材料的许用应力, 单位为  $\text{MPa}$ ;
- $[\sigma]^t$ ——设计温度下材料的许用应力, 单位为  $\text{MPa}$ ;
- $[\sigma]_{afd}$ ——承受火灾损伤的材料的许用应力, 单位为  $\text{MPa}$ ;
- $\sigma_{uth}$ ——火灾损伤模拟热处理后确定的材料在操作温度下的抗拉强度, 单位为  $\text{MPa}$ ;
- $\sigma_{us}$ ——承受火灾损伤的材料在操作温度下的抗拉强度, 单位为  $\text{MPa}$ ;
- $\sigma_{yh}$ ——火灾损伤模拟热处理后确定的材料在操作温度下的屈服强度, 单位为  $\text{MPa}$ ;
- $\sigma_{ys}$ ——承受火灾损伤的材料在操作温度下的屈服强度, 单位为  $\text{MPa}$ 。

### 11.3 评价方法分类、选择原则和限制条件

本章的评价方法分为 3 级, 即 1 级评价、2 级评价及 3 级评价:

- a) 1 级评价是一种筛选评价方法, 当部件在火灾中所处的热暴露区等级对部件材质不会造成损伤时, 可免于评价, 继续服役。
- b) 2 级评价是通过火灾部件的金相组织、硬度及尺寸变化的检测, 来评价火灾后部件的结构完整性, 包括对火灾期间部件产生的其他缺陷和损伤的评价。2 级评价一般用于高级热暴露区内, 或目视发现外形明显变化的部件的评价。

- c) 如果用 2 级评价不通过,可采用 3 级评价。3 级评价主要采用直接在火灾部件上取样或采用模拟火灾热处理试验试样进行力学性能试验,以消除 2 级评价的保守性。

11.4 评价流程

评价流程如图 48 所示。

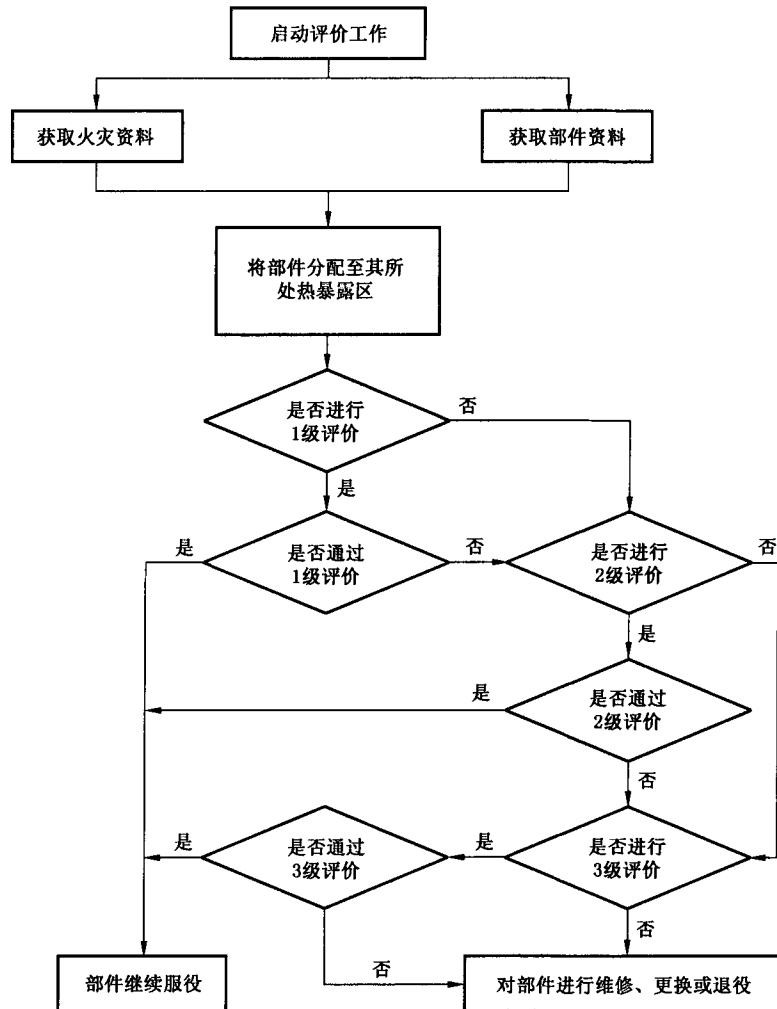


图 48 评价流程图

11.5 火灾资料

11.5.1 火灾基本信息：

- a) 火源位置,火灾发生时的风向；
- b) 火灾时间；
- c) 燃烧物的性质(包括但不限于闪点、着火点、自燃温度、熔点、沸点、分子式、燃烧极限)；
- d) 火灾发生前或发生时设备的温度、压力和安全阀泄放数据；
- e) 消防水炮和胶皮管用水的位置、流向以及类型；
- f) 灭火方式；

g) 灭火时间。

11.5.2 火灾热暴露区划分：

火灾热暴露区共划分为 6 个等级，每个等级热暴露区的温度范围及描述见表 7。

表 7 火灾损伤的热暴露区等级

热暴露区等级	温度范围	热暴露区等级描述
I	室温	无火灾损伤
II	室温 < T ≤ 65 °C	暴露于烟雾和水
III	65 °C < T ≤ 205 °C	轻度热暴露
IV	205 °C < T ≤ 425 °C	中度热暴露
V	425 °C < T ≤ 730 °C	重度热暴露
VI	T > 730 °C	严重热暴露

11.5.3 火灾温度确定方法：

a) 部件的火灾温度可通过火灾现场残留物烧损情况来判定，常见非金属及金属材料的燃点、熔化、变形等烧损特性见表 8~表 11；

b) 对于密闭部件内部发生火灾的情况，当表 8 中的信息不能确定火灾温度时，可通过式(141)确定：

$$T = T_{0.} + 345 \lg(8t + 1) \dots\dots\dots(141)$$

c) 对于非密闭部件内部发生火灾的情况，当表 8 中的信息仍不能确定火灾温度时，可通过其他可靠的方法确定；

d) 当出现多个可用于确定部件火灾温度的残留物烧损特征时，以各烧损特性推导的最高温度作为火灾损伤评价的温度。

表 8 燃烧物烧损特征

材料	燃烧特性	温度/°C	热暴露区等级
乙烯基涂料	熔化、流动、沸腾、涂料燃烧	90	III
醇酸树脂	颜色变化、表面龟裂	150	III
无机硅酸锌	熔化、流动、沸腾、可能会燃烧	400	IV
环氧树脂、聚氨酯	颜色变化、起泡、碳化	205	III
超高分子高密度聚乙烯	软化、熔化	190	III
合成橡胶、氯丁橡胶	软化、熔化、部分燃烧/碳化	175	III
铅/锡焊接材料	熔化	180	III
焙干酚醛树脂	表面变色、起泡	260	IV
丙烯酸乳酸脂	泥纹状裂纹、碳化	205	III
铝合金	强度降低(检查硬度和电阻率)	205	III
	熔化	655	V

表 8 (续)

材料	燃烧特性	温度/℃	热暴露区等级
木材	燃烧、碳化, 详见表 9	190~260	Ⅲ~Ⅳ
碳钢/低合金钢	回火黄色	200~220	Ⅳ
	回火褐紫色	240~260	Ⅳ
	回火蓝色	280~350	Ⅳ
	回火灰色	400	Ⅳ
	出现氧化皮, 具体温度详见表 10	480~675	Ⅴ
	热变形、蠕变	595	Ⅴ
	快速氧化-厚的黑色氧化皮	650	Ⅴ
	球化	760	Ⅵ
	出现淬火组织或碳化物形态发生变化	815	Ⅵ
	熔化, 具体温度详见表 11	>1 515	Ⅵ
不锈钢	强度降低	480	Ⅴ
	回火黄色	290~340	Ⅳ
	回火红色	450	Ⅴ
	回火蓝色	530~600	Ⅴ
	敏化	725~815	Ⅴ, Ⅵ
	出现 $\sigma$ 相	538~816	Ⅴ, Ⅵ
	出现氧化皮, 具体温度详见表 10	760~1 040	Ⅵ
沉淀硬化不锈钢	强度降低	620	Ⅴ
铅基巴氏合金	熔化	270	Ⅳ
光亮退火或冷拔铜	软化、下垂、晶粒变粗大	280	Ⅳ
铅	熔化	330	Ⅳ
锌/铝铸件	熔化	390	Ⅳ
锌	熔化	420	Ⅳ
	氧化成白色粉末或蒸发	905	Ⅵ
玻璃(灯泡)	变形和熔化	510	Ⅴ
玻璃(窗户)	熔化	695	Ⅴ
玻璃(管道、观察镜)	熔化	710	Ⅴ
玻璃(泡沫玻璃)	熔化	980	Ⅵ
铜	快速氧化-表面变黑	705	Ⅴ
	熔化	1 095	Ⅵ
银焊接材料	熔化	730	Ⅴ
C-276 合金	熔化	1 305	Ⅵ
钛合金	熔化	1 685	Ⅵ

表 9 部分木材着火点

木材类型	着火点/°C
花旗松	260
纸桦木	200
云杉	260
美国西部侧柏	190
柳条橡木	200
细枝松	260

表 10 金属氧化结垢温度

材 料	成 分	氧化结垢温度/°C
碳钢	Fe-0.1C	480
低合金钢	1-1/4Cr-1/2Mo	620
	2-1/4Cr-1Mo	620
	5Cr-0.5Mo	620
	7Cr-1Mo	650
	9Cr-1Mo	675
1Cr13	13Cr	760
1Cr17	17Cr	845
06Cr19Ni10	19Cr-10Ni	900
06Cr18Ni11Ti	18Cr-10Ni-Ti	900
0Cr18Ni11Nb	18Cr-11Ni-Nb	900
0Cr23Ni13	23Cr-13Ni	1 095
06Cr25Ni20	25Cr-20Ni	1 150
06Cr17Ni12Mo2	17Cr-12Ni-2Mo	900
022Cr22Ni5Mo3N	22Cr-5Ni-3Mo	1 040
022Cr23Ni5Mo3N	23Cr-5Ni-3Mo-N	1 040
NS312	72Ni-15Cr-8Fe	1 040
NS336	60Ni-22Cr-9Mo-3.5Cb	1 040
NS112	33Ni-39.5Fe-21Cr	1 040
NS142	42Ni-Fe-21.5Cr-3Mo-2.3Cu	1 040

表 11 常见金属和合金熔点(按碳钢、低合金钢、不锈钢、双相钢、有色金属)

材 料	熔点/℃
碳钢	1 525
1.25Cr-0.5Mo	1 510
2.25Cr-1Mo	1 515
9Cr-1Mo	1 500
06Cr19Ni10	1 450
06Cr18Ni11Ti	1 425
0Cr18Ni11Nb	1 425
06Cr17Ni12Mo2	1 400
06Cr25Ni20	1 450
0Cr17Ni4Cu4Nb	1 440
0Cr25Ni20	1 425
00Cr16Ni60Mo16W4V	1 315
NS112	1 385
NS142	1 400
NS312	1 415
NS336	1 350
锡	230
铅	330
锌	420
镁	650
纯铝/铝合金	650
黄铜	930
银	960
红铜	1 025
金	1 060
铜	1 085
铸铁	1 160
铁	1 535
钛	1 678
锆	1 850

## 11.6 评价方法

### 11.6.1 1级评价

根据收集的资料和数据,将部件分配到其所处的火灾热暴露区。当承压设备不存在机械损伤和尺

寸变化时,根据表 12 确定设备或部件材料是否处于免评热暴露区,如部件处于免评热暴露区,则通过 1 级评价。

表 12 各种材料的免评热暴露区

材 料	牌号(GB)	牌号(ASTM)	免评热暴露区
碳钢及低合金钢	10#, 20#, Q245R, Q345R, Q370R, 15CrMoR, 14Cr1MoR, 12Cr2Mo1R, 12Cr1MoVR, 12Cr2Mo1VR, 18MnNbR, 15CrMo, 12CrMo, 12Cr2Mo1, 1Cr5Mo, 12Cr1MoVG	A36, A53, A105, A106, A131, A181, A216, A234, A266, A283, A285, A333, A350, A352, A420, A515, A516, A537, A671, A672, API5L, A182, A217, A234, A335, A336, A387, A691	I, II, III, IV
奥氏体不锈钢 <sup>a</sup>	06Cr19Ni10, 022Cr19Ni10, 07Cr19Ni10, 06Cr25Ni20, 06Cr17Ni12Mo2, 022Cr17Ni12Mo2, 06Cr17Ni12Mo2Ti, 06Cr19Ni13Mo3, 022Cr19Ni13Mo3, 06Cr18Ni11Ti, 0Cr18Ni11Nb	A312, A358, A240, A403, A351	I, II, III, IV
20 合金	0Cr25Ni20	B366, B462, B463, B464, B729, B744	I, II, III, IV
400 合金	MCu-28-1.5-1.8	B127, B164, B165, B366, B564, A494	I, II, III
双相不锈钢 <sup>b</sup> 2205, 2507 合金	022Cr19Ni5Mo3Si2N, 022Cr22Ni5Mo3N, 022Cr23Ni5Mo3N	A182, A240, A789, A790, A815, (UNS S31803, UNS J92205) (2507-UNS S39275)	I, II
800, 800H 合金	NS112	B163, B366, B407, B409, B564	I, II, III, IV
825 合金	NS142	B163, B366, B423, B424, B704, B705	I, II, III, IV
600 合金	NS312	B163, B168, B366, B564	I, II, III, IV
625 合金	NS336	B167, B366, B133, B444, B564, A494	I, II, III, IV
C-276 合金	00Cr16Ni60Mo16W4V	B366, B575, B622	I, II, III, IV
铜合金	—	B68, B96, B111, B169, B171, B395, B584	I, II
铝合金	—	B209, B210, B241, B247	I, II
沉淀硬化合金钢 <sup>c</sup>	0Cr17Ni4Cu4Nb, 0Cr17Ni4Cu4Nb	17-4PH, 17-7PH	I, II, III

<sup>a</sup> 如果奥氏体不锈钢有隔热层,但隔热层下无防止应力腐蚀的涂层,且操作温度在 50℃~175℃之间,则需要进行检查或维修以确保隔热层下表面无卤化物污染,防止设备重新投入运行时发生卤化物应力腐蚀开裂。

<sup>b</sup> 温度超过 350℃时,双相合金的韧性会随温度升高和时间而降低,即使短时间暴露在 595℃~925℃时,也会发生严重的塑性损伤(形成σ相)。

<sup>c</sup> 暴露温度超过 260℃且缓冷后,沉淀硬化合金可能会发生塑性损伤。

## 11.6.2 2 级评价

### 11.6.2.1 评价步骤

按照以下步骤进行 2 级评价:



- a) 对设备或部件进行宏观检验和必要的无损检测；
- b) 对设备或部件进行硬度和金相检验及评价；
- c) 确定火灾后材料的许用应力；
- d) 进行强度校核；
- e) 如果发现火灾后设备或部件还存在其他类型损伤,应根据本标准其他章节规定的方法进行评价。

#### 11.6.2.2 宏观检验和无损检测

宏观检验和无损检测包括但不限于以下内容：

- a) 立式容器的垂直度；
- b) 球罐支柱垂直度；
- c) 储罐筒节垂直度；
- d) 局部变形；
- e) 周向及轴向膨胀量；
- f) 表面缺陷检测。

#### 11.6.2.3 硬度检测

选取部件火灾损伤代表性位置,打磨出新鲜金属表面后进行硬度检测,常见材料硬度值范围参见附录 D。常见材料国内外牌号对照参见附录 E。

#### 11.6.2.4 金相检测

在硬度检测位置进行金相检测,以判断组织服役适应性。金相检测的内容应包括以下组织的形态、分布和尺寸特征(包括晶粒度)：

- a) 碳钢和低合金钢：
  - 1) 游离渗碳体；
  - 2) 珠光体组织；
  - 3) 铁素体组织；
  - 4) 魏氏体组织；
  - 5) 马氏体组织；
  - 6) 索氏体组织。
- b) 高合金钢：
  - 1) 奥氏体组织；
  - 2) 铁素体组织；
  - 3) 马氏体组织；
  - 4)  $\sigma$  相组织。

#### 11.6.2.5 硬度及金相评价

常见材料硬度值范围参见附录 D。评价过程中应以设备出厂证明资料中硬度值要求为依据,表中硬度范围仅供参考。

当硬度结果正常,且金相检查结果存在以下情况之一者,则不通过 2 级评价：

- a) 不锈钢出现敏化；
- b) 不锈钢出现  $\sigma$  相组织；
- c) 评价人员认为其他异常的组织。

当硬度结果出现异常,且金相检查结果存在以下情况之一者,则不通过 2 级评价:

- a) 碳钢低合金钢发生严重的石墨化;
- b) 碳钢低合金钢球化达到 5 级;
- c) 碳钢低合金钢出现魏氏体组织;
- d) 低合金钢或高合金钢出现再热裂纹;
- f) 评价人员认为其他异常的组织。

### 11.6.2.6 许用应力的确定

许用应力的确定方法如下:

- a) 根据 GB/T 1172 将硬度测量值转换为抗拉强度值,高合金钢应充分考虑数据的分散性和误差。
- b) 由式(142)来确定承受火灾损伤材料的许用应力,  $n_{ism}$  可取原始设计标准中抗拉强度对应的安全系数,如果  $n_{ism}$  未知,也可取推荐值 3.0;  $n_h$  一般取 1.2,对于 Q245R 和 Q345R,  $n_h$  可取 1.05。

$$[\sigma]_{afd} = \min \left\{ \left( \frac{\sigma^{ht}}{n_h n_{ism}} \cdot \frac{[\sigma]^t}{[\sigma]^a} \right), [\sigma]^t \right\} \dots\dots\dots (142)$$

### 11.6.2.7 2 级评价准则

2 级评价准则如下:

- a) 对承受火灾损伤的部件按原设计规范或标准进行强度校核;
- b) 如存在其他损伤,应根据本标准相应的章节进行评价;
- c) 如以上强度校核和损伤评价结论均为可接受,则通过 2 级评价。

### 11.6.3 3 级评价

11.6.3.1 从承受火灾损伤的部件上直接取样(包括微试样)进行力学性能测试,或依据火灾热暴露温度、时间、灭火方式,采用与承受火灾损伤的部件相同的材料进行热处理模拟试验,并进行力学性能测试。

11.6.3.2 根据式(143)或式(144)确定承受火灾损伤材料的许用应力:

$$[\sigma]_{afd} = \min \left\{ \left( \frac{\sigma_{uts}}{n_b}, \frac{\sigma_{ys}}{n_s}, [\sigma]^t \right) \right\} \dots\dots\dots (143)$$

$$[\sigma]_{afd} = \min \left\{ \left( \frac{\sigma_{uth}}{n_b}, \frac{\sigma_{yh}}{n_s}, [\sigma]^t \right) \right\} \dots\dots\dots (144)$$

11.6.3.3 3 级评价准则如下:

- a) 对承受火灾损伤的部件按原设计规范或标准进行强度校核;
- b) 如存在其他损伤,应根据本标准相应的章节进行评价;
- c) 如以上强度校核和损伤评价结论均为可接受,则通过 3 级评价。

## 12 蠕变损伤评价

### 12.1 总则

本章的评价方法适用于含蠕变损伤的部件的评价。定义蠕变范围的温度极限参见表 A.1。

### 12.2 符号

$A_0 \sim A_4$ ——计算 Omega 应变率参数或拉尔森-米勒(L-M)参数的系数;

- ${}^i a$ ——第  $i$  个时间步的裂纹深度,单位为 mm;  
 $a_0$ ——裂纹初始深度,单位为 mm;  
 $B_0 \sim B_4$ ——计算 Omega 参数的系数;  
 $C^{*0}({}^i a, {}^i c)$ ——裂纹表面点整体稳态蠕变裂纹驱动力;  
 $C^{*90}({}^i a, {}^i c)$ ——裂纹最深点整体稳态蠕变裂纹驱动力;  
 $C_{LMP}$ ——L-M 常数;  
 $C_{intg}$ ——显式时间积分参数,建议取 0.005;  
 $C_1^0({}^i a, {}^i c)$ ——裂纹表面点稳态或瞬态蠕变裂纹扩展的驱动力;  
 $C_1^{90}({}^i a, {}^i c)$ ——裂纹最深点稳态或瞬态蠕变裂纹扩展的驱动力;  
 ${}^i c$ ——第  $i$  个时间步的蠕变裂纹半长,单位为 mm;  
 $c_0$ ——蠕变裂纹初始半长,单位为 mm;  
 $D$ ——圆筒内直径,单位为 mm;  
 ${}^i D_{ac}$ ——第  $i$  个时间步的裂纹萌生后的局部蠕变损伤;  
 $D_{bc}$ ——裂纹萌生前的局部蠕变损伤;  
 ${}^m D_c$ ——第  $m$  个操作工况的累积蠕变损伤;  
 $D_c^{allow}$ ——容许蠕变损伤,取 0.8;  
 $D_c^j$ ——第  $j$  个操作工况的蠕变损伤;  
 $D_c^{total}$ ——全部操作工况的总蠕变损伤;  
 $D_{mean}$ ——圆筒或球壳的平均直径,单位为 mm;  
 $D_o$ ——圆筒外直径,单位为 mm;  
 $\frac{{}^i da}{dt}$ ——第  $i$  个时间步表面裂纹最深点的裂纹扩展速率,单位为 mm/h;  
 $\frac{{}^i dc}{dt}$ ——第  $i$  个时间步表面裂纹表面点的裂纹扩展速率,单位为 mm/h;  
 $E_y$ ——操作工况平均温度下的弹性模量,单位为 MPa;  
 ${}^n E_y$ ——第  $n$  个时间步所对应的弹性模量,单位为 MPa;  
 $e$ ——错边量,单位为 mm;  
 $F$ ——本体、附件和介质自重引起的有效截面上的轴向力,单位为 N;  
 $H_c$ ——蠕变裂纹扩展模型系数;  
 $i$ ——第  $i$  个时间步;  
 $J$ ——总操作工况数;  
 $J_1$ ——计算 ${}^n S_{eff}$ 的参数,单位为 MPa;  
 $j$ ——第  $j$  个操作工况;  
 $K_t$ ——由焊缝形状引起的应力集中系数, $K_t = 1.5 \times [1 + 3(w + e)/t_c]$ ;  
 $K_1^0({}^i a, {}^i c)$ ——表面裂纹表面点的 I 型应力强度因子,单位为  $N/mm^{3/2}$ ;  
 $K_1^{90}({}^i a, {}^i c)$ ——表面裂纹最深点的 I 型应力强度因子,单位为  $N/mm^{3/2}$ ;  
 ${}^n L$ ——载荷历史第  $n$  个时间步的断裂时间,单位为 h;  
 ${}^i L_{ac}$ ——采用参考应力法计算第  $i$  个时间步的裂纹萌生后的断裂时间,单位为 h;  
 $L_t$ ——洛伦兹系数;  
 ${}^i L_r$ ——第  $i$  个时间步基于一次应力的载荷比;  
 $LMP({}^n S_{eff})$ ——基于应力 ${}^n S_{eff}$ 的 L-M 参数;  
 $M$ ——总操作工况数,单位为个;  
 $M_{bc}$ ——裂纹起裂前的总操作工况数;

- $m$ ——第  $m$  个操作工况；
- $m_2$ ——应变硬化指数；
- $N$ ——时间步数；
- $n$ ——第  $n$  个时间步；
- $n_{\text{BN}}$ ——Omega 模型基于参考应力确定的 Bailey-Norton 系数；
- $P$ ——评价计算压力,单位为 MPa；
- $P_L$ ——一次局部薄膜应力,单位为 MPa；
- $P_b$ ——一次弯曲应力,单位为 MPa；
- $R_b$ ——弯管中心线的弯曲半径,单位为 mm；
- $R_c$ ——单一操作工况的蠕变损伤速率,单位为  $\text{h}^{-1}$ ；
- $R_c^j$ ——第  $j$  个操作工况的蠕变损伤速率,单位为  $\text{h}^{-1}$ ；
- $R_i$ ——圆筒或球壳的内半径,单位为 mm；
- $R_o$ ——圆筒或球壳的外半径,单位为 mm；
- $R_{yt}$ ——材料屈服强度和抗拉强度比值；
- $r$ ——圆筒或球壳上所求应力处的径向长度,单位为 mm；
- ${}^n S_{\text{eff}}$ ——第  $n$  个时间步,采用 L-M 参数计算剩余寿命使用的有效应力,单位为 MPa；
- $S_s$ ——计算  ${}^n S_{\text{eff}}$  的参数,单位为 MPa；
- $S_1$ ——当量应力  $\sigma_e$  或参考应力  $\sigma_{1m}$  的常用对数,单位为 MPa；
- $t$ ——时间,单位为 h；
- ${}^i t$ ——第  $i$  个时间步结束时的累积时间,单位为 h；
- ${}^m t$ ——第  $m$  个操作工况的服役时间,单位为 h；
- ${}^n t$ ——时间步,单位为 h；
- $t_c$ ——评价用计算壁厚,单位为 mm；
- $t_{\text{comp}}$ ——每个操作工况末期部件远离缺陷或损伤处最小实测壁厚,单位为 mm；
- $t_{\text{ma}}$ ——最大允许运行时间,单位为 h；
- $t_{\text{relax}}^0(i, c)$ ——第  $i$  个时间步裂纹表面点裂纹驱动力的松弛项；
- $t_{\text{relax}}^{90}(i, c)$ ——第  $i$  个时间步裂纹最深点裂纹驱动力的松弛项；
- $t_{\text{se}}$ ——单一操作工况的服役时间,单位为 h；
- $t_{\text{se}}^j$ ——第  $j$  个操作工况的服役时间,单位为 h；
- $t_{\text{sl}}$ ——除压力之外产生轴向应力的机械载荷所需附加壁厚,单位为 mm；
- $T$ ——操作温度,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ；
- ${}^i T$ ——第  $i$  个时间步的操作温度,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ；
- ${}^n T$ ——与时间步  ${}^n t$  对应的操作温度,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ；
- $w$ ——棱角尺寸,单位为 mm；
- $\alpha_{\text{sl}}$ ——系数；
- $\alpha_{\Omega}$ ——Omega 模型基于应力状态的多轴参数,  $\alpha_{\Omega}$  对于承压球壳或成形封头  $\alpha_{\Omega}=3.0$ , 对于承压圆筒或锥壳  $\alpha_{\Omega}=2.0$ , 其他部件和受力状态  $\alpha_{\Omega}=1.0$ ；
- $\beta_{\Omega}$ ——Omega 参数,取 0.33；
- $\Delta_{\Omega}^{\text{cd}}$ ——Omega 模型中蠕变延性调整因子,取  $-0.3 \sim +0.3$ ；
- $\Delta_{\Omega}^{\sigma}$ ——Omega 模型中蠕变应变调整因子,取  $-0.5 \sim +0.5$ ；
- $\Delta t$ ——时间增量,单位为 h；
- $\delta$ ——延伸率,单位为 %；
- $\delta_{\Omega}$ ——Omega 参量；

- $\epsilon_L$ ——多轴应变极限；  
 $\epsilon_{L,u}$ ——单轴应变极限；  
 $\epsilon_{cf}$ ——成形应变；  
 $\dot{\epsilon}_{co}$ ——初始蠕变应变率，单位为  $h^{-1}$ ；  
 $\epsilon_{peq}$ ——总体当量塑性应变；  
 ${}^i\dot{\epsilon}_{ref}$ ——第  $i$  个时间步的参考应变率，为通过参考应力求出的单轴应变率，单位为  $h^{-1}$ ；  
 $\mu$ ——蠕变裂纹扩展方程指数；  
 $\sigma_c$ ——圆筒和球壳的环向应力，单位为 MPa；  
 $\sigma_e$ ——当量应力，单位为 MPa；  
 ${}^n\sigma_c$ ——第  $n$  个时间步的当量应力，单位为 MPa；  
 $\sigma_m$ ——圆筒和球壳的轴向应力，单位为 MPa；  
 $\sigma_{max}$ ——最大主应力，单位为 MPa；  
 $\sigma_r$ ——圆筒和球壳的径向应力，单位为 MPa；  
 ${}^i\sigma_{ref}$ ——第  $i$  个时间步的参考应力，单位为 MPa；  
 ${}^n\sigma_{ref}^p$ ——第  $n$  个时间步的一次参考应力，单位为 MPa；  
 $\sigma_{ys}$ ——评价温度下的屈服强度，单位为 MPa；  
 ${}^i\sigma_{ys}$ ——第  $i$  个时间步的评价温度下的屈服强度，单位为 MPa；  
 $\sigma_1$ ——第一主应力，单位为 MPa；  
 $\sigma_2$ ——第二主应力，单位为 MPa；  
 $\sigma_3$ ——第三主应力，单位为 MPa；  
 ${}^n\sigma_1$ ——第  $n$  个时间步的第一主应力，单位为 MPa；  
 ${}^n\sigma_2$ ——第  $n$  个时间步的第二主应力，单位为 MPa；  
 ${}^n\sigma_3$ ——第  $n$  个时间步的第三主应力，单位为 MPa；  
 $\psi$ ——断面收缩率，单位为 %；  
 $\Omega$ ——单轴 Omega 损伤参量；  
 $\Omega_m$ ——多轴 Omega 损伤参量；  
 $\Omega_n$ ——调整过的单轴 Omega 损伤参量。

### 12.3 评价方法限定条件

#### 12.3.1 采用 1 级评价的部件，应同时满足以下条件：

- 原设计满足相关的规范或标准要求。
- 不承受循环载荷。
- 材料最小布氏硬度或含碳量达到或超过表 13 的规定值。
- 部件不存在以下缺陷或损伤：局部减薄、沟槽、点蚀；氢鼓包、氢致开裂、应力导向氢致开裂、应力腐蚀开裂；超标的不圆、鼓胀、凹陷或凹陷-沟槽；裂纹类缺陷；微观组织异常如高温氢腐蚀或严重的石墨化等；部件无受火或过热导致的明显变形，如下垂、鼓胀或严重氧化。

#### 12.3.2 采用 2 级评价的部件，应同时满足以下条件：

- 原设计满足相关的规范或标准要求。
- 不承受循环载荷。
- 部件不存在以下缺陷：局部减薄、沟槽、点蚀；氢鼓包、氢致开裂、应力导向氢致开裂、应力腐蚀开裂；超标的不圆、鼓胀、凹陷或凹陷-沟槽；裂纹类缺陷；微观组织异常如高温氢腐蚀或严重的石墨化等；部件无受火或过热导致的明显变形，如下垂、鼓胀或严重氧化。
- 部件的操作工况历史有记录，且未来操作工况已知。

12.3.3 不满足 1 级和 2 级评价限定条件,或 1 级和 2 级评价结果不通过时,可进行 3 级评价。3 级评价限制条件为:

- a) 不承受循环载荷;
- b) 裂纹类缺陷不包含应力腐蚀开裂。

由于复杂的几何结构和/或载荷工况,需要采用先进的应力分析技术来明确应力状态时应采用 3 级评价。

表 13 适用 1 级评价的材料硬度或含碳量要求

材 料	布氏硬度(HB)	含碳量/%
碳钢(抗拉强度 $\leq$ 414 MPa)	95	—
碳钢(抗拉强度 $>$ 414 MPa)	100	—
碳钢(非严重的石墨化)	100	—
C-0.5Mo	110	—
1.25Cr-0.5Mo(正火回火)	130	—
1.25Cr-0.5Mo(退火)	120	—
2.25Cr-1Mo(正火回火)	140	—
2.25Cr-1Mo(退火)	130	—
2.25Cr-1Mo(淬火回火)	150	—
2.25Cr-1Mo-V	180	—
3Cr-1Mo-V	180	—
5Cr-0.5Mo	130	—
7Cr-0.5Mo	130	—
9Cr-1Mo	140	—
9Cr-1Mo-V	180	—
12Cr	180	—
304 & 304H	—	0.04
316 & 316H	—	0.04
321	—	0.04
321H	—	0.04
347	—	0.04
347H	—	0.04
合金 800	—	0.03
合金 800H	—	0.04
合金 800HT	—	0.05
HK-40	—	0.30

#### 12.4 评价流程

评价的基本流程如图 49 所示。

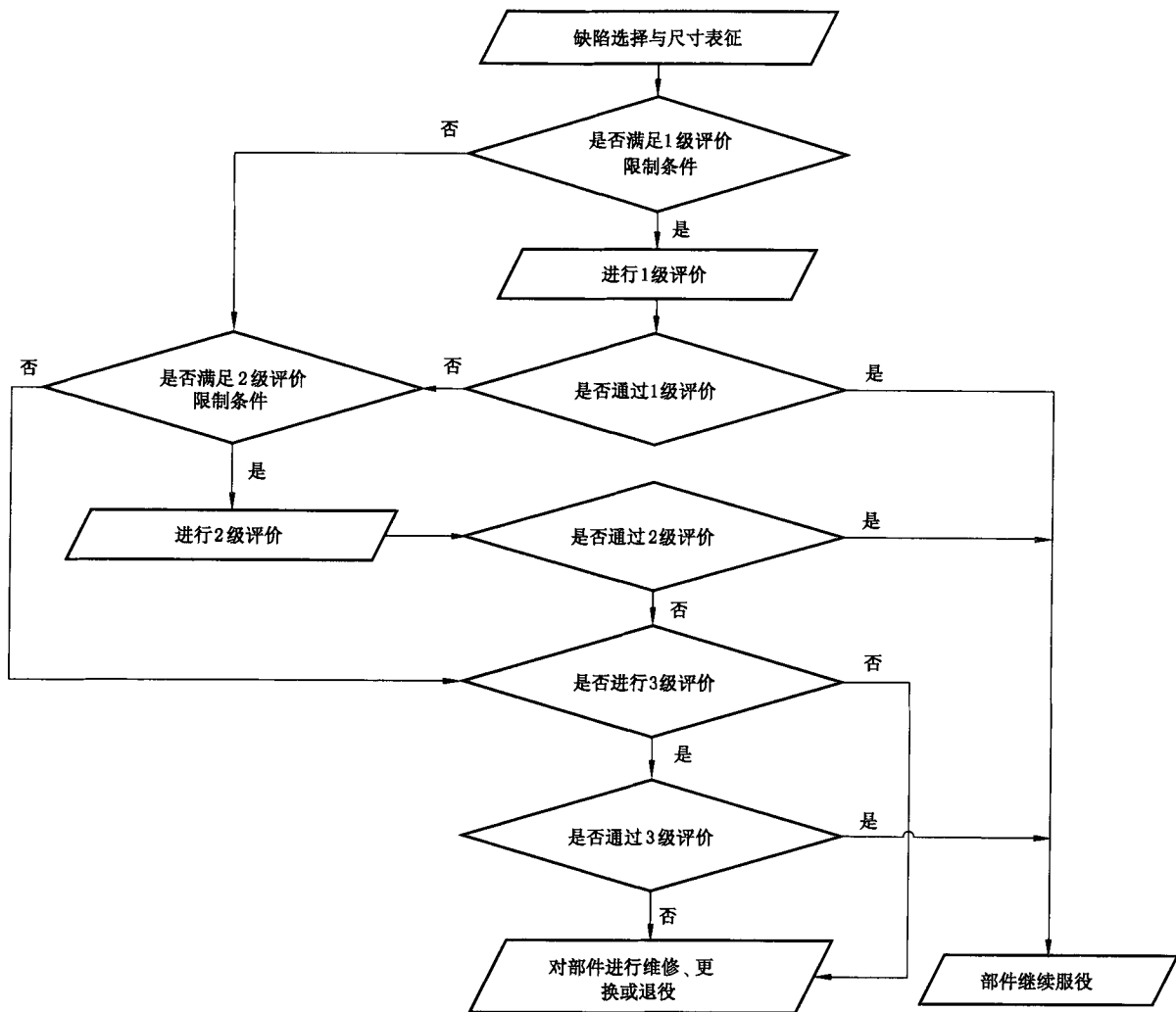


图 49 评价流程图

## 12.5 缺陷尺寸表征

对于含裂纹类缺陷的部件,应确定裂纹类缺陷是初始建造缺陷还是服役损伤导致的缺陷。如果裂纹类缺陷的来源不能确定,应归类为服役导致的缺陷。如果裂纹类缺陷在焊缝附近,应记录缺陷位置是热影响区、熔合线或熔敷金属。裂纹类缺陷表征按 GB/T 19624。

## 12.6 评价方法

### 12.6.1 1级评价

12.6.1.1 对于单一操作工况的部件,1级评价流程如下:

- 确定部件的操作温度  $T$ 、评价计算压力  $P$  及服役时间  $t_{se}$ 。如果部件中有承载焊缝垂直于控制计算壁厚的最大主应力方向,操作温度需增加  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  作为评价温度。服役时间应包括过去的运行时间和未来的计划运行时间。
- 按表 14 或采用有限元法计算主应力,部件的最大主应力  $\sigma_{\max} = \max\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ , 计算应力时应考虑服役过程中的壁厚减薄影响。
- 参照图 50~图 72 选取对应材料的筛选曲线和损伤曲线。

- d) 基于筛选曲线,由最大主应力  $\sigma_{\max}$  和操作温度  $T$  确定最大允许运行时间  $t_{\max}$ 。如最大允许运行时间  $t_{\max}$  大于服役时间  $t_{se}$  (包括已服役时间和未来需服役时间),则 1 级评价通过,否则继续按 e) 进行评价计算。
- e) 基于损伤曲线,由最大主应力  $\sigma_{\max}$  和操作温度  $T$  确定蠕变损伤速率  $R_c$ ,并按式(145)计算总蠕变损伤  $D_c^{\text{total}}$ :

$$D_c^{\text{total}} = R_c \cdot t_{se} \quad \dots\dots\dots(145)$$

- f) 如果满足式(146),则 1 级评价通过:

$$D_c^{\text{total}} \leq 0.25 \quad \dots\dots\dots(146)$$

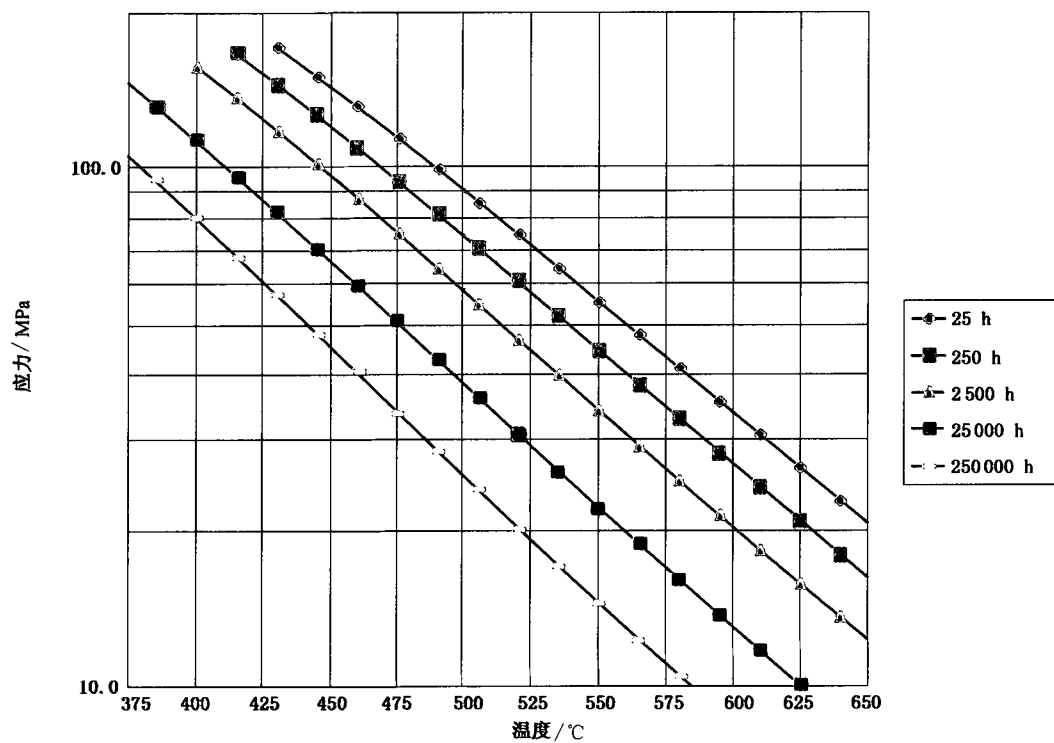
表 14 圆筒和球壳的应力方程

几何形状	应力方程
圆筒或弯管弹性应力解	$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{PD_{\text{mean}} L_f}{2t_{\text{comp}}}$ $\sigma_2 = \sigma_m = \frac{PD_{\text{mean}} L_f}{4(t_{\text{comp}} - t_{sl})}$ $\sigma_3 = \sigma_r = 0$
圆筒参考应力解	$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{P(1 - \ln[R_{r2}])}{\ln[R_{r1}]}$ $\sigma_2 = \sigma_m = \frac{P(1 - 2\ln[R_{r2}])}{2\ln[R_{r1}]}$ $\sigma_3 = \sigma_r = \frac{-P\ln[R_{r2}]}{\ln[R_{r1}]}$ $R_{r1} = \frac{R_o}{R_i}$ $R_{r2} = \frac{R_i}{r}$
圆筒或弯管稳态蠕变解	$\sigma_1 = \sigma_c = C \left[ 1 + \left( \frac{2 - n_{BN}}{n_{BN}} \right) \left( \frac{R_o}{r} \right)^{\left( \frac{2}{n_{BN}} \right)} \right] L_f$ $\sigma_2 = \sigma_m = C \left[ 1 + \left( \frac{1 - n_{BN}}{n_{BN}} \right) \left( \frac{R_o}{r} \right)^{\left( \frac{2}{n_{BN}} \right)} \right]$ $\sigma_3 = \sigma_r = C \left[ 1 - \left( \frac{R_o}{r} \right)^{\left( \frac{2}{n_{BN}} \right)} \right]$ $C = \frac{P}{\left[ \left( \frac{R_o}{R_i} \right)^{\left( \frac{2}{n_{BN}} \right)} - 1 \right]}$
球壳弹性应力解	$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{PD_{\text{mean}}}{4t_{\text{comp}}}$ $\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_c$ $\sigma_3 = \sigma_r = 0$

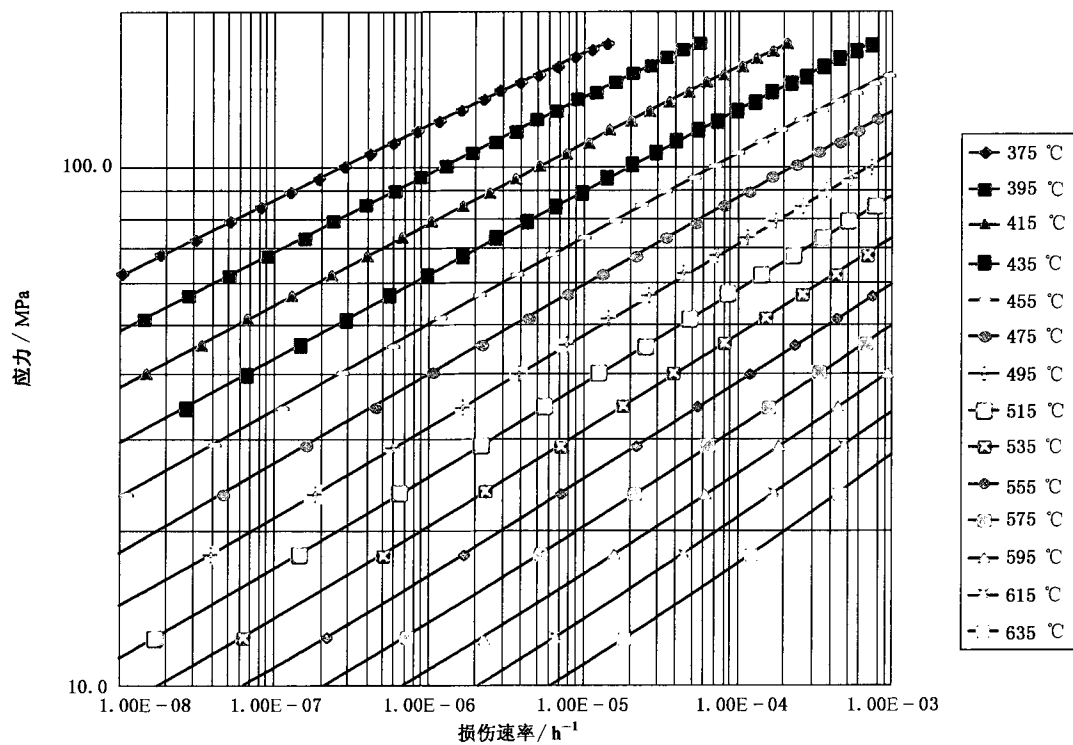


表 14 (续)

几何形状	应力方程
球壳参考应力解	$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{P(2 - 3\ln[R_{i2}])}{3\ln[R_{i1}]}$ $\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_c$ $\sigma_3 = \sigma_r = \frac{-P\ln[R_{i2}]}{\ln[R_{i1}]}$ $R_{i1} = \frac{R_o}{R_i}$ $R_{i2} = \frac{R_o}{r}$
球壳稳态蠕变解	$\sigma_1 = \sigma_c = C \left[ 1 + \left( \frac{3n_{BN} - 2}{2} \right) \left( \frac{R_o}{r} \right)^{(3n_{BN})} \right]$ $\sigma_2 = \sigma_m = C \left[ 1 + \left( \frac{3n_{BN} - 2}{2} \right) \left( \frac{R_o}{r} \right)^{(3n_{BN})} \right]$ $\sigma_3 = \sigma_r = C \left[ 1 - \left( \frac{R_o}{r} \right)^{(3n_{BN})} \right]$ $C = \frac{P}{\left[ \left( \frac{R_o}{R_i} \right)^{(3n_{BN})} - 1 \right]}$
<p>注 1: 上述公式不包括金属减薄和 FCA 的影响, 可根据服役过程对上述方程中内径、外径和壁厚做相应的调整。</p> <p>注 2: 若存在超标错边和棱角, 则应力均乘以应力集中系数 <math>K_t</math>。</p> <p>注 3: 圆筒的 <math>L_t = 1.0</math>, 弯管的 <math>L_t = \frac{\left[ \frac{R_b}{R_m} - 0.5 \right]}{\left[ \frac{R_b}{R_m} + 1.0 \right]}</math>。</p> <p>注 4: 稳态蠕变解考虑了蠕变范围内的应力再分布。 <math>n_{BN} = 1</math> 时可得到弹性解和 Lamé 方程。可先设定一个 <math>n_{BN}</math> 值, 按此表计算应力, 然后按式(159)计算 <math>n_{BN}</math> 值, 比较 <math>n_{BN}</math> 设定值和计算值直到其收敛。</p>	

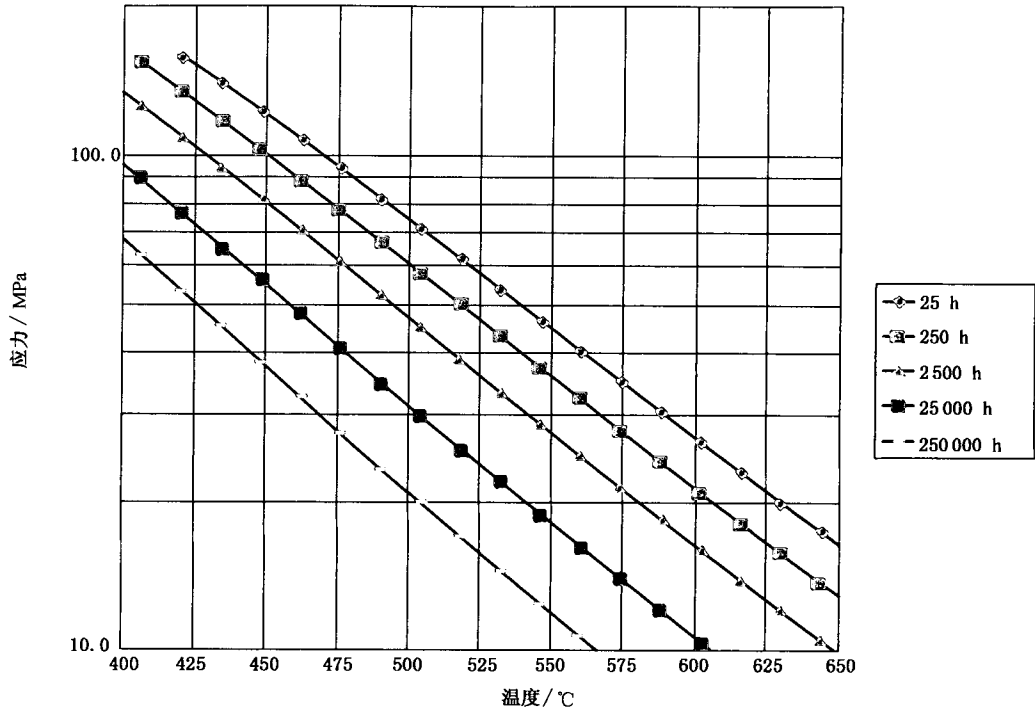


a) 筛选曲线

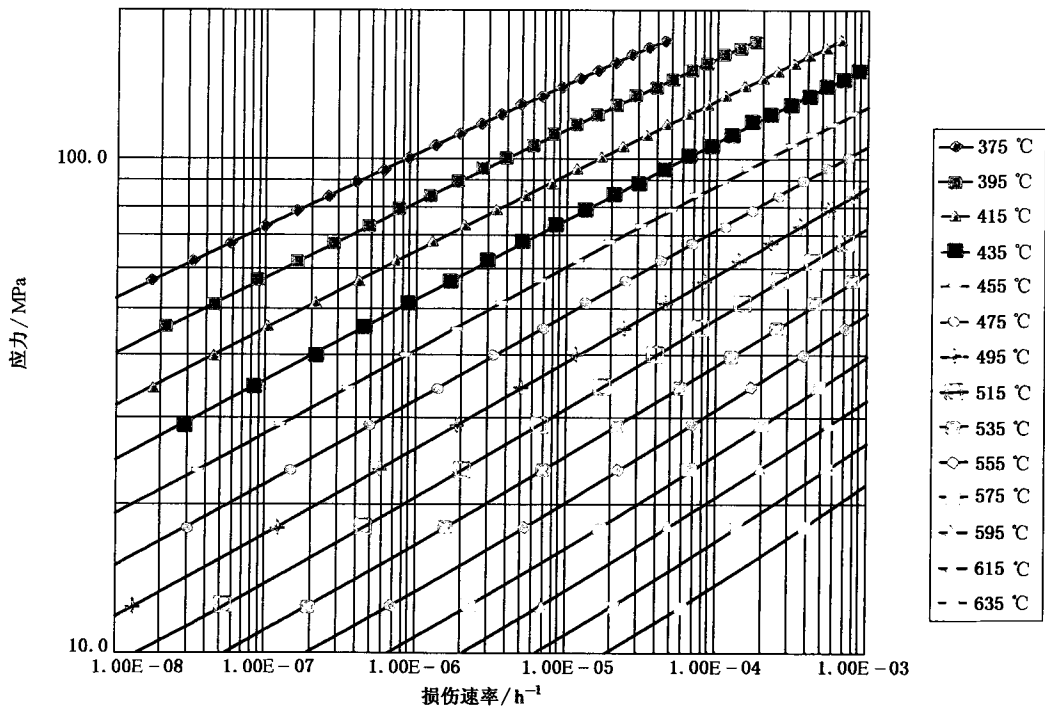


b) 损伤曲线

图 50 碳钢的 1 级评价曲线

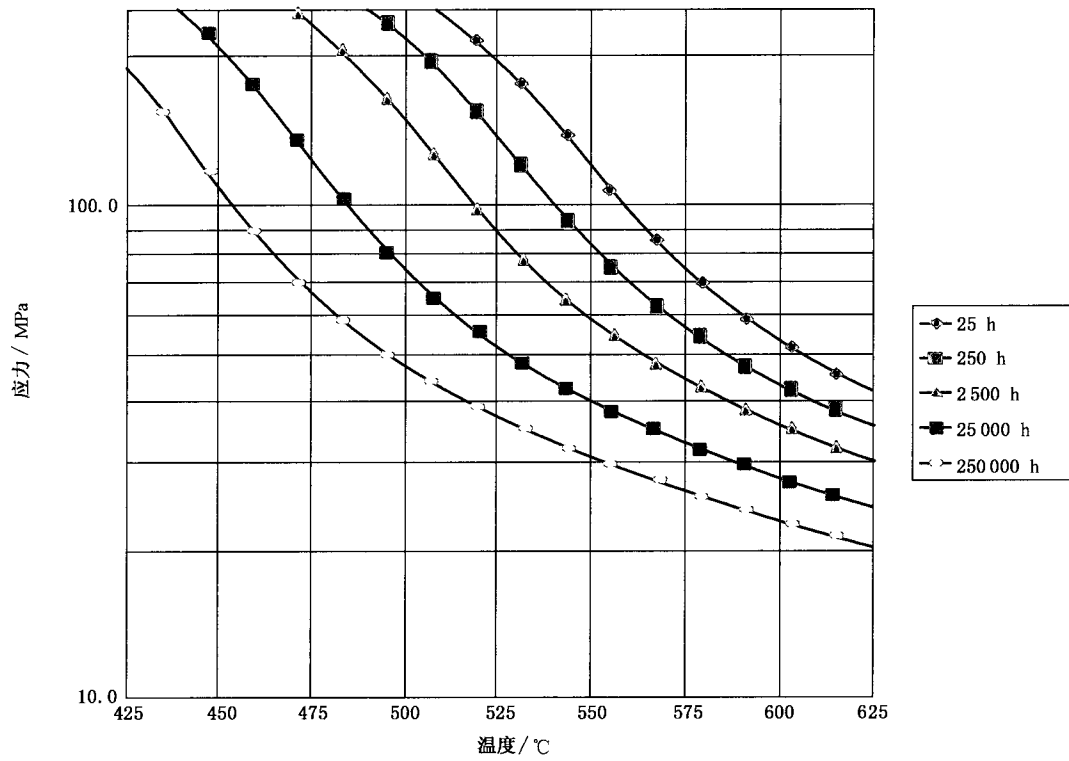


a) 筛选曲线

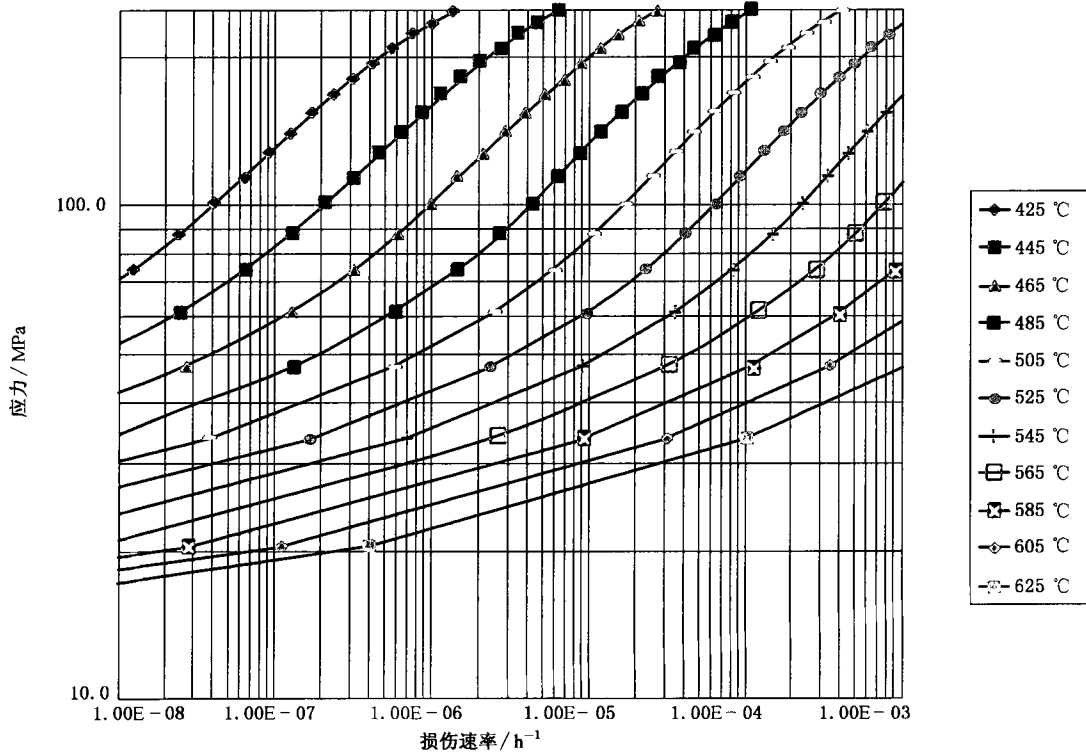


b) 损伤曲线

图 51 碳钢(非严重石墨化)的 1 级评价曲线

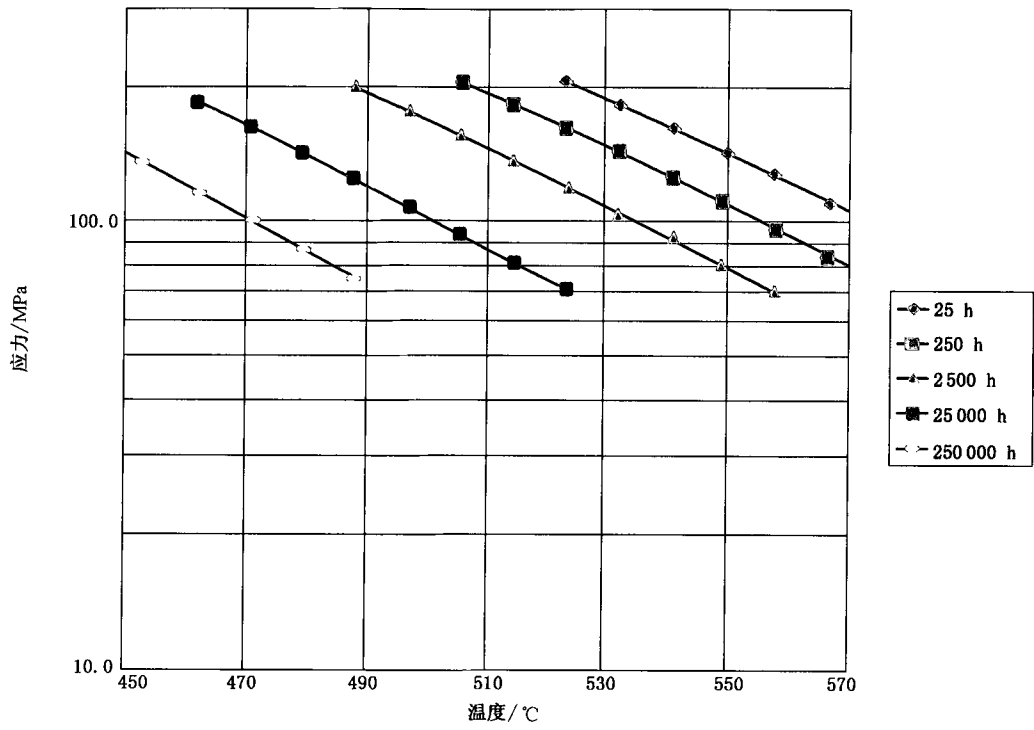


a) 筛选曲线

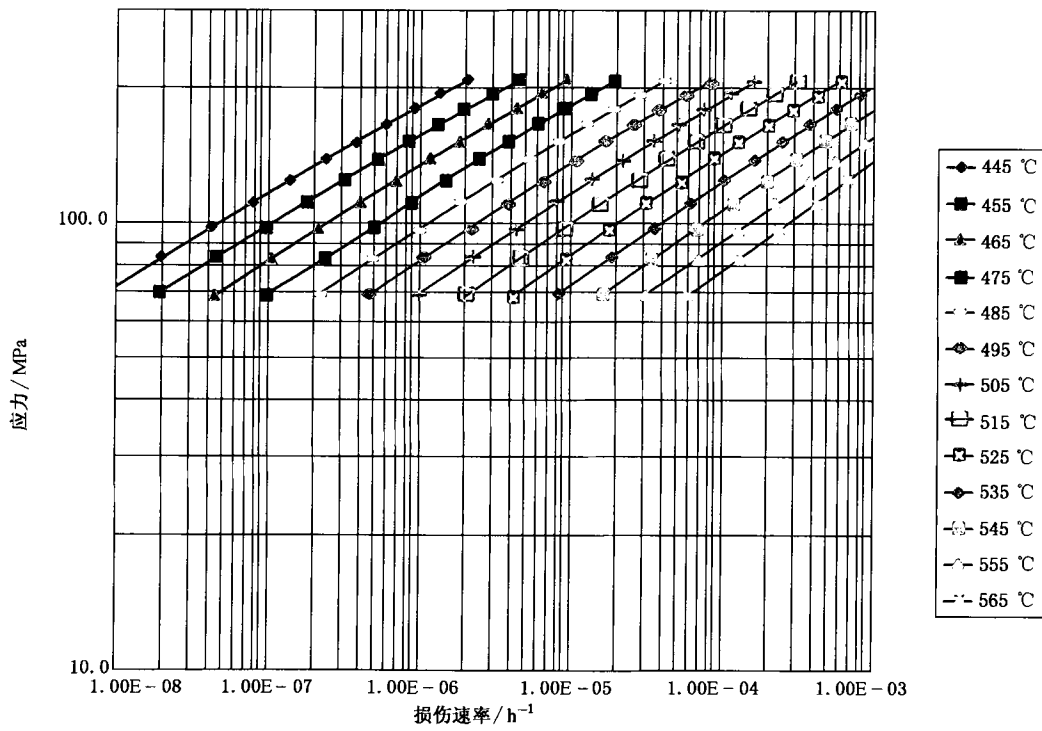


b) 损伤曲线

图 52 C-0.5Mo 材料的 1 级评价曲线

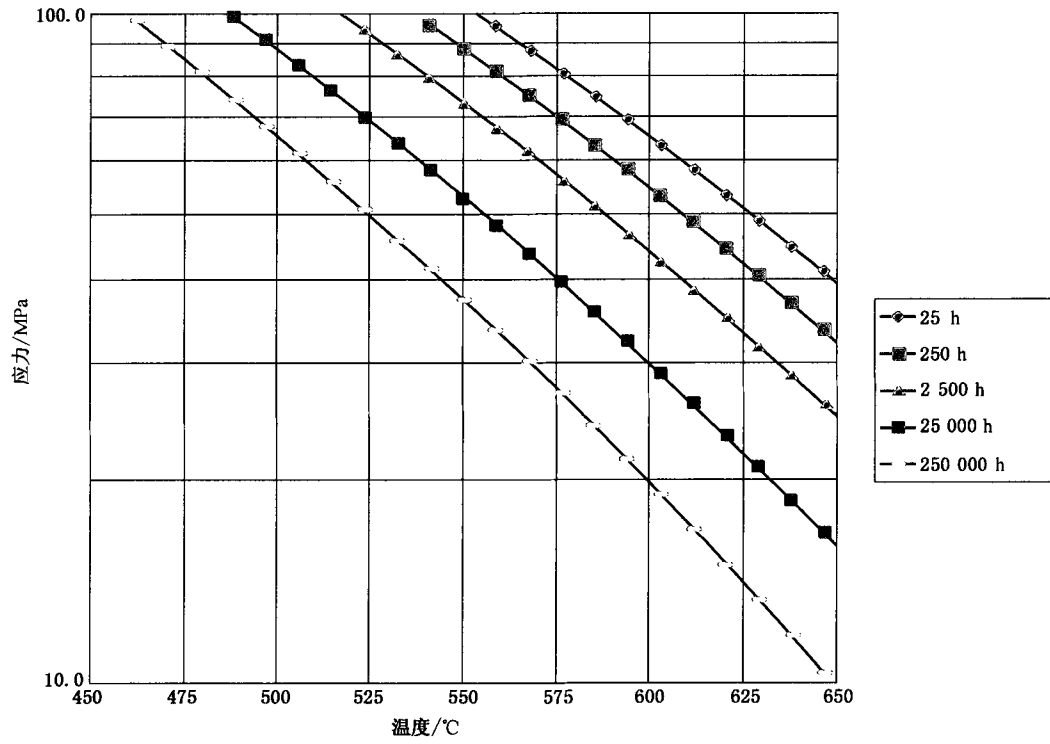


a) 筛选曲线

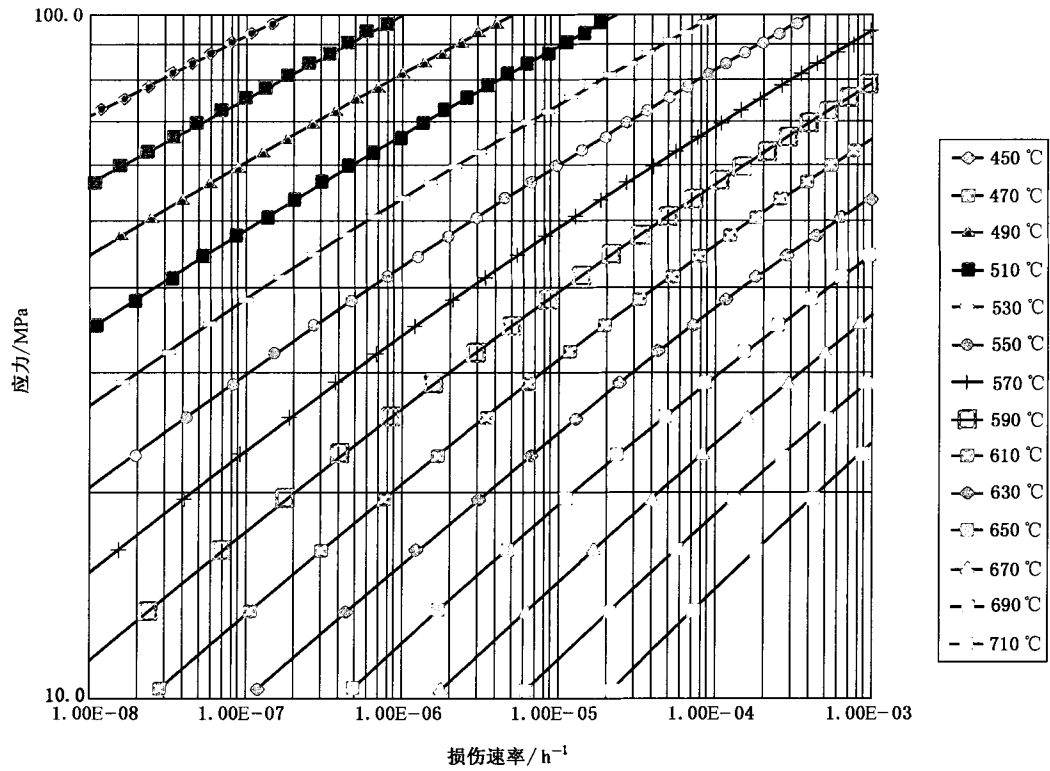


b) 损伤曲线

图 53 1.25Cr-0.5Mo-N&T 材料的 1 级评价曲线

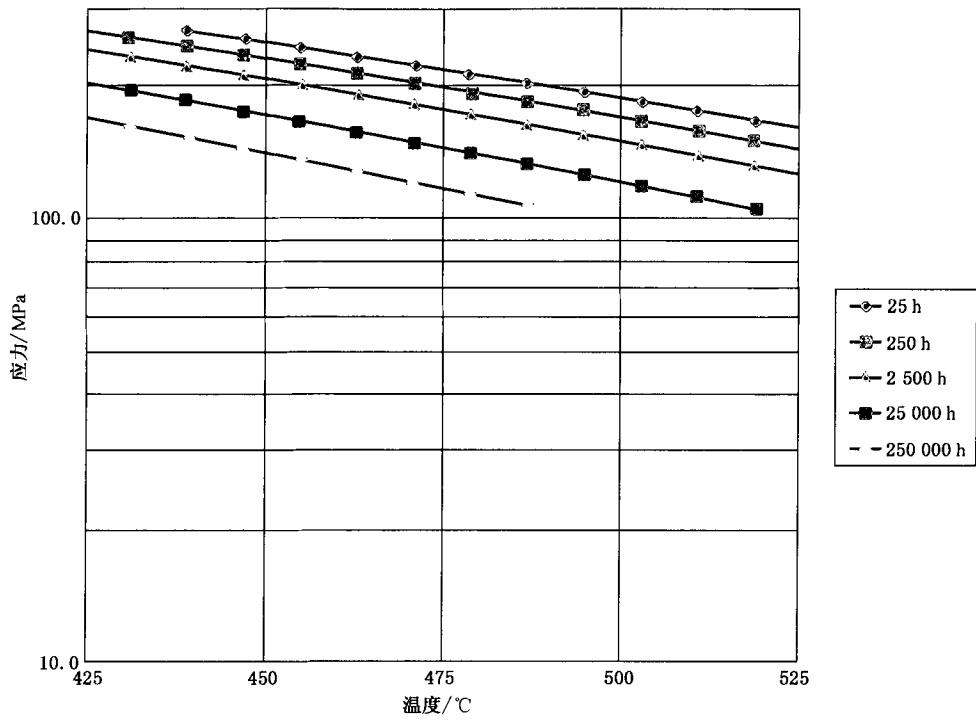


a) 筛选曲线

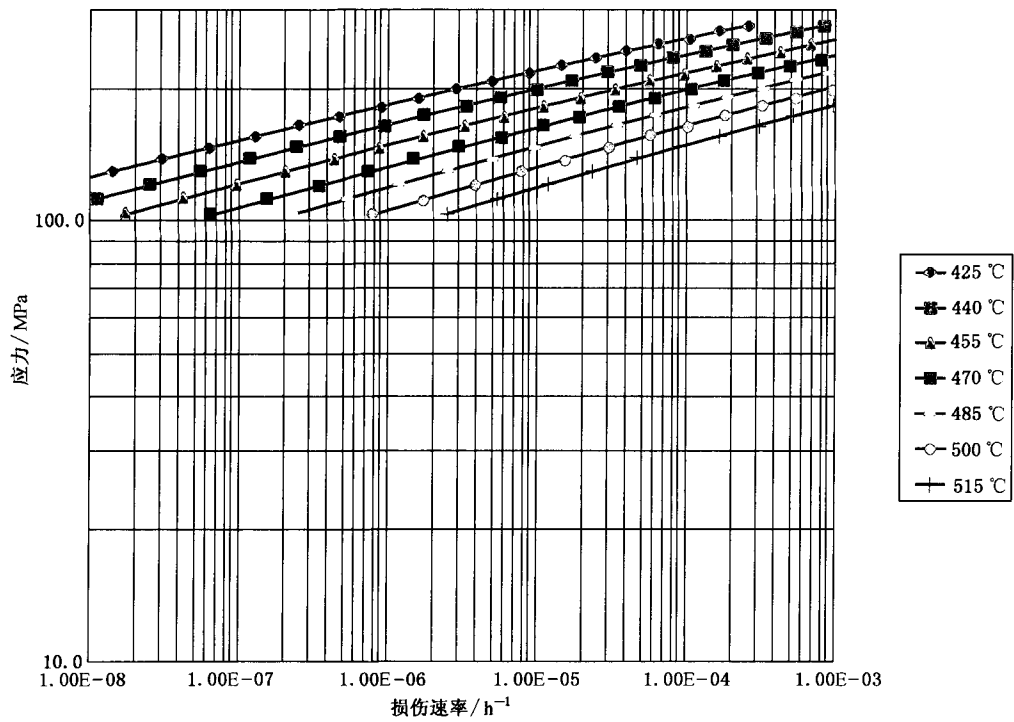


b) 损伤曲线

图 54 退火态 1.25Cr-0.5Mo 的 1 级评价曲线

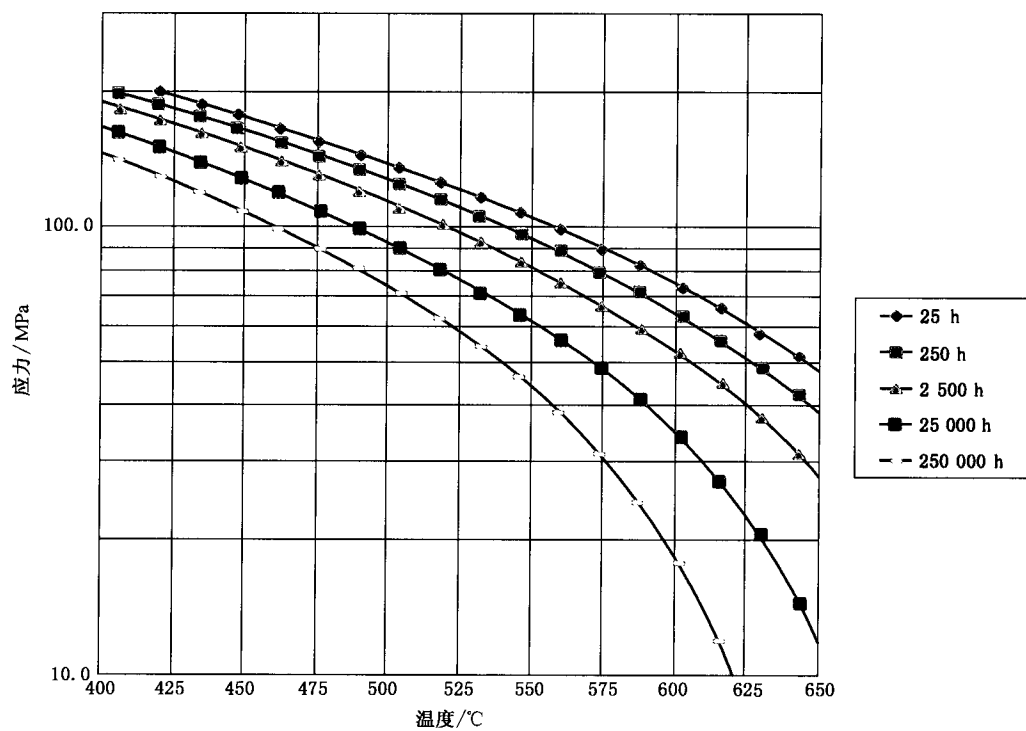


a) 筛选曲线

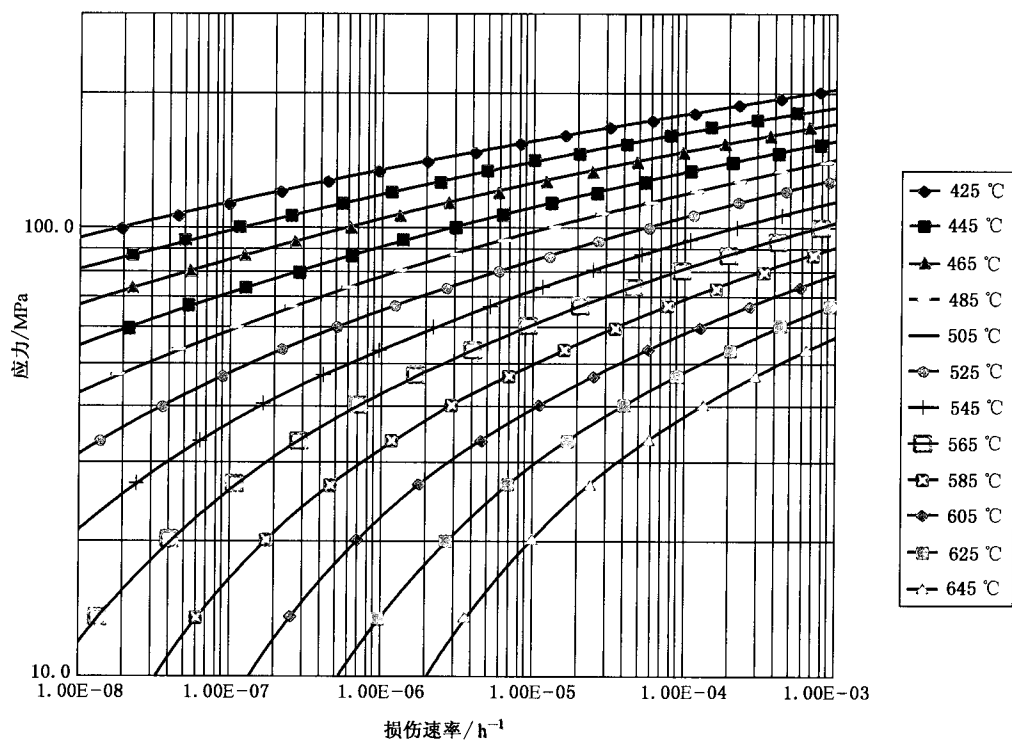


b) 损伤曲线

图 55 2.25Cr-1Mo-N&T 的 1 级评价曲线



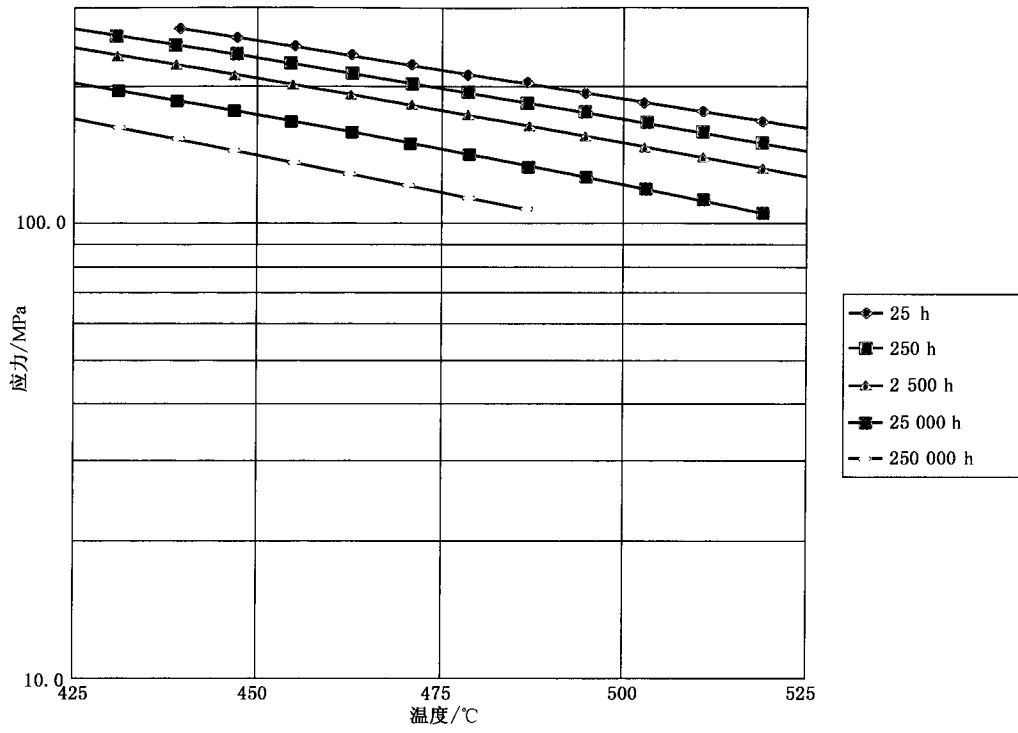
a) 筛选曲线



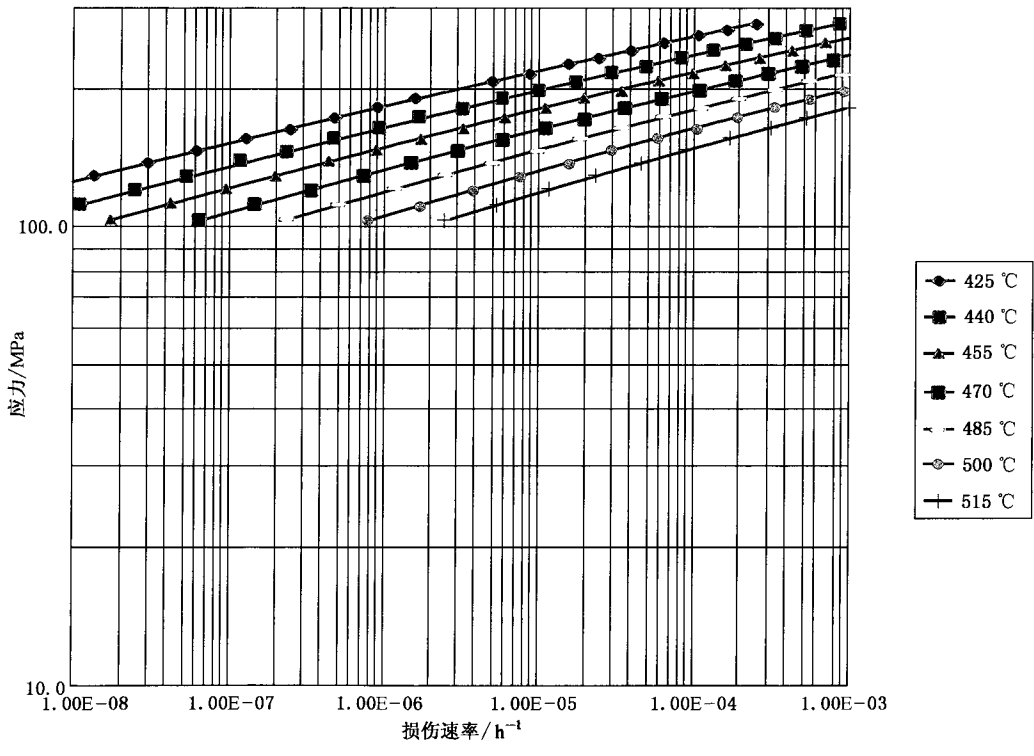
b) 损伤曲线

图 56 退火态 2.25Cr-1Mo 材料的 1 级评价曲线



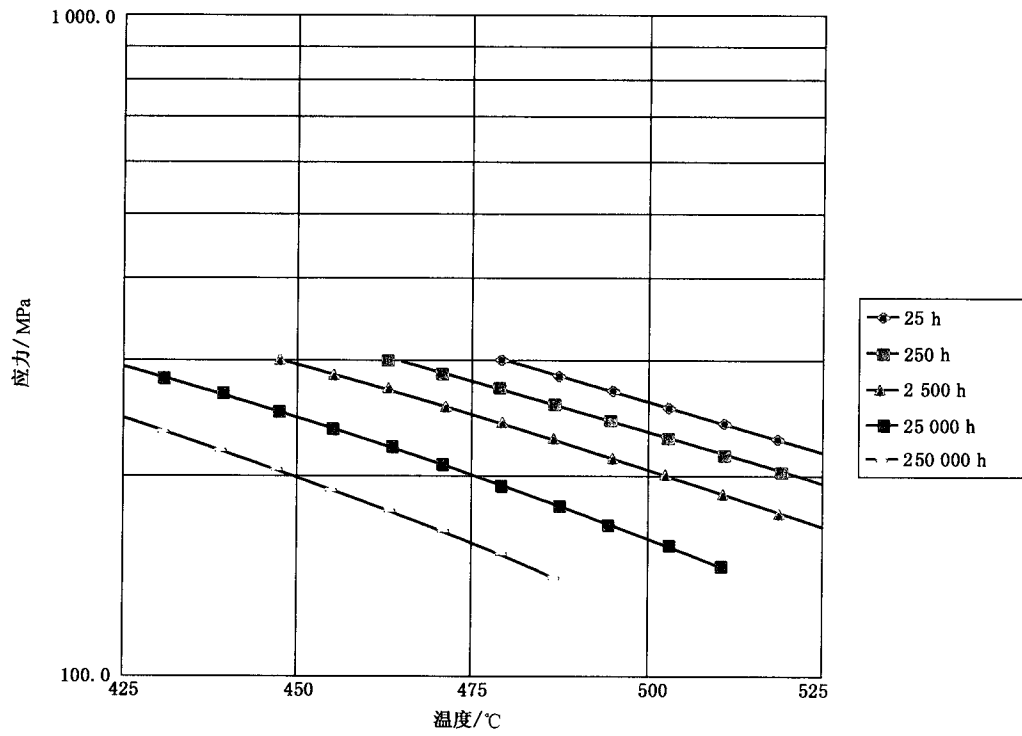


a) 筛选曲线

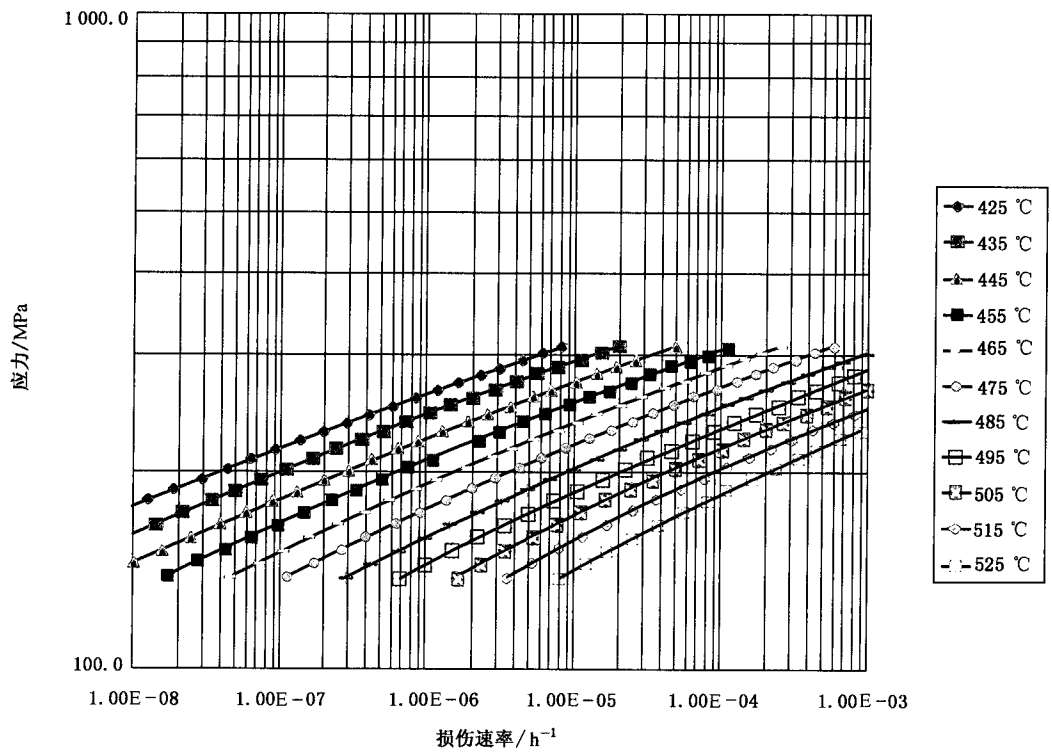


b) 损伤曲线

图 57 2.25Cr-1Mo-Q&T 的 1 级评价曲线

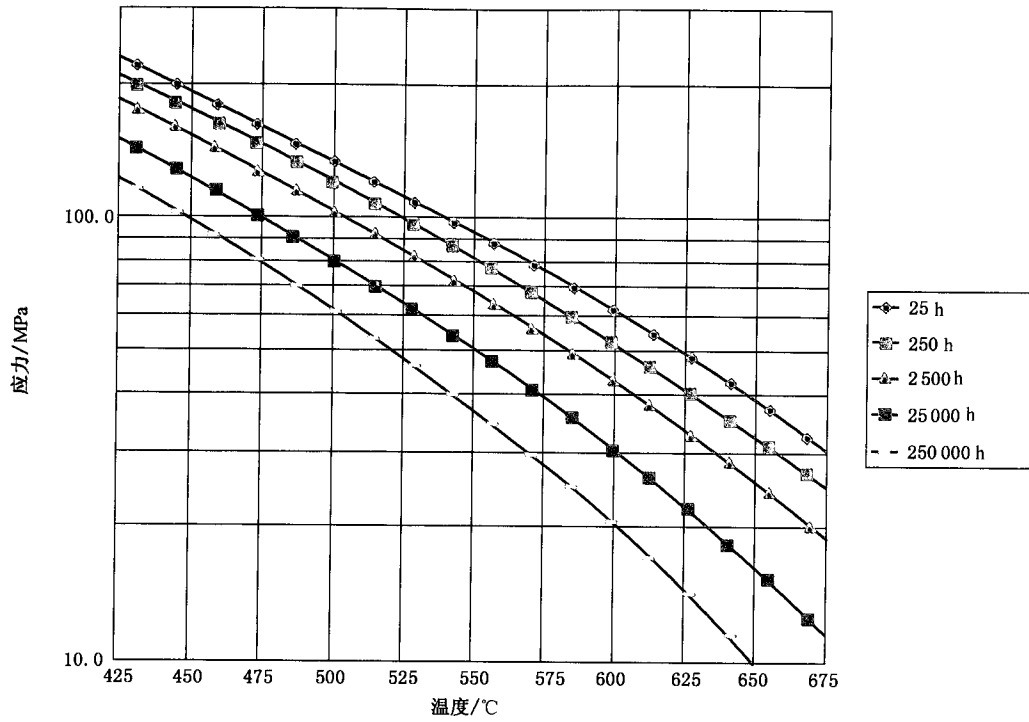


a) 筛选曲线

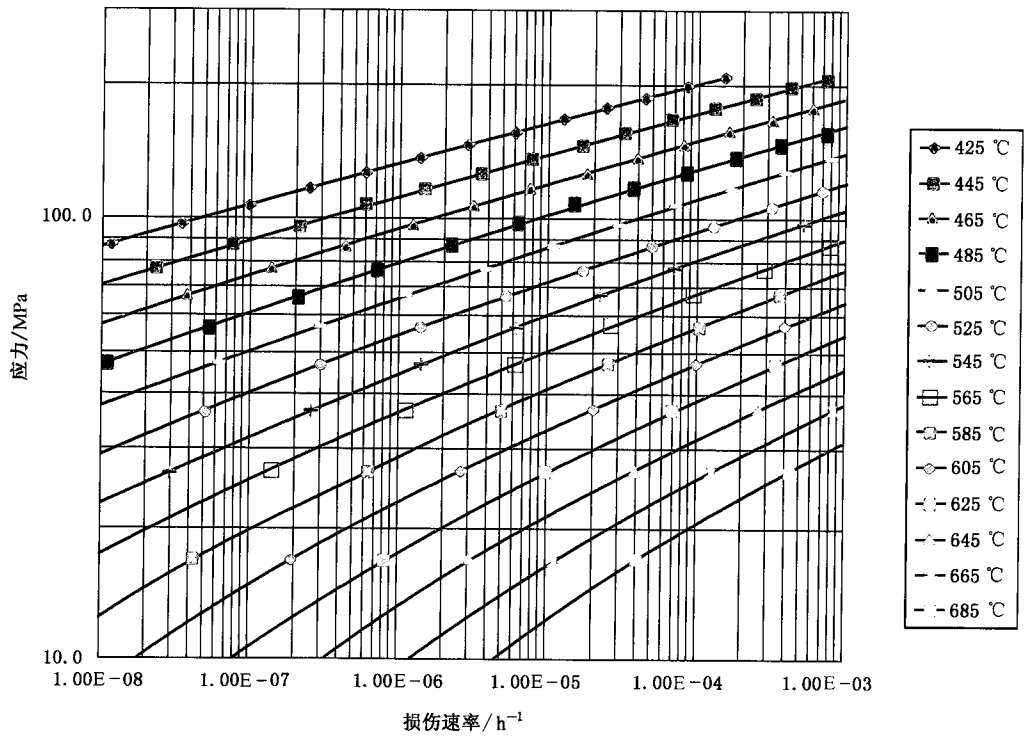


b) 损伤曲线

图 58 2.25Cr-1Mo-V 的 1 级评价曲线

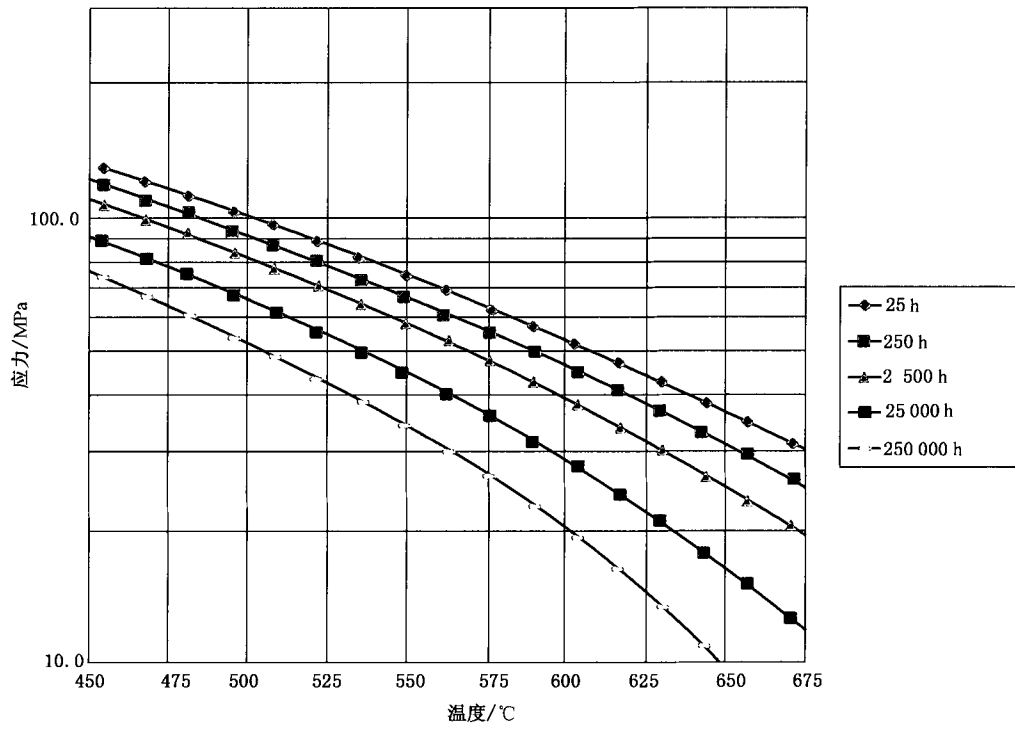


a) 筛选曲线

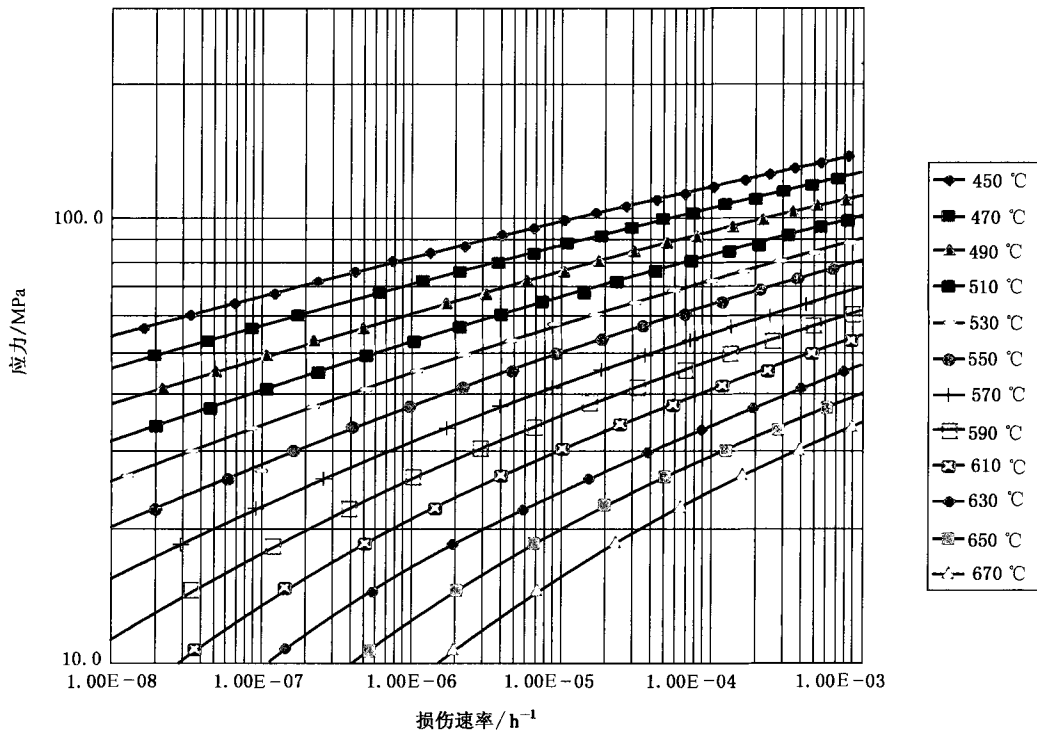


b) 损伤曲线

图 59 5Cr-0.5Mo 的 1 级评价曲线

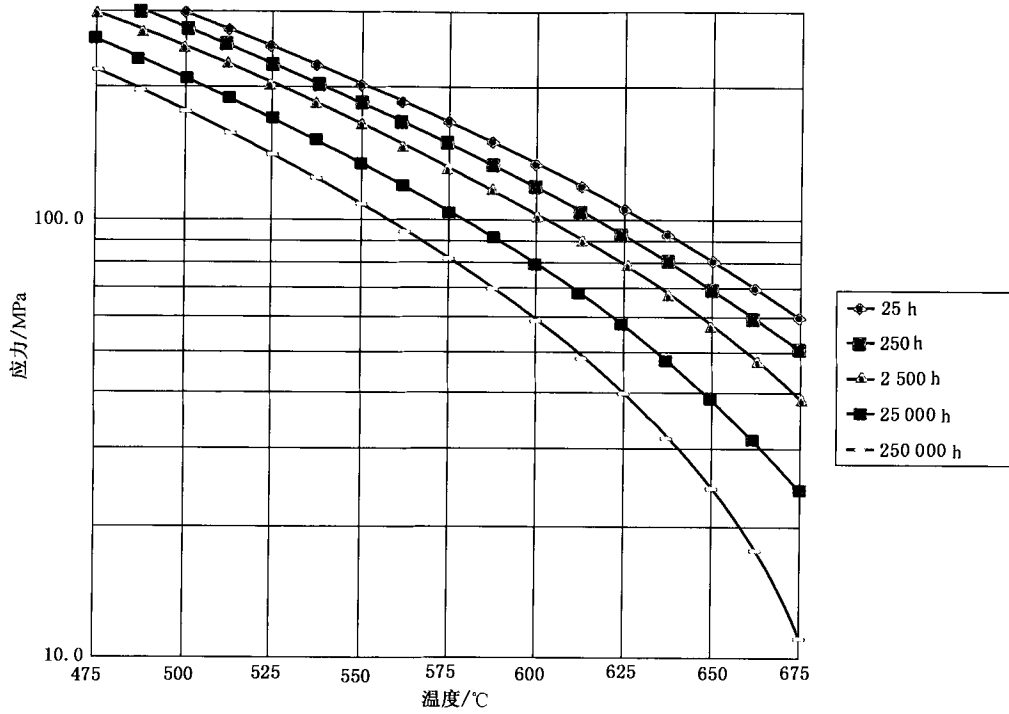


a) 筛选曲线

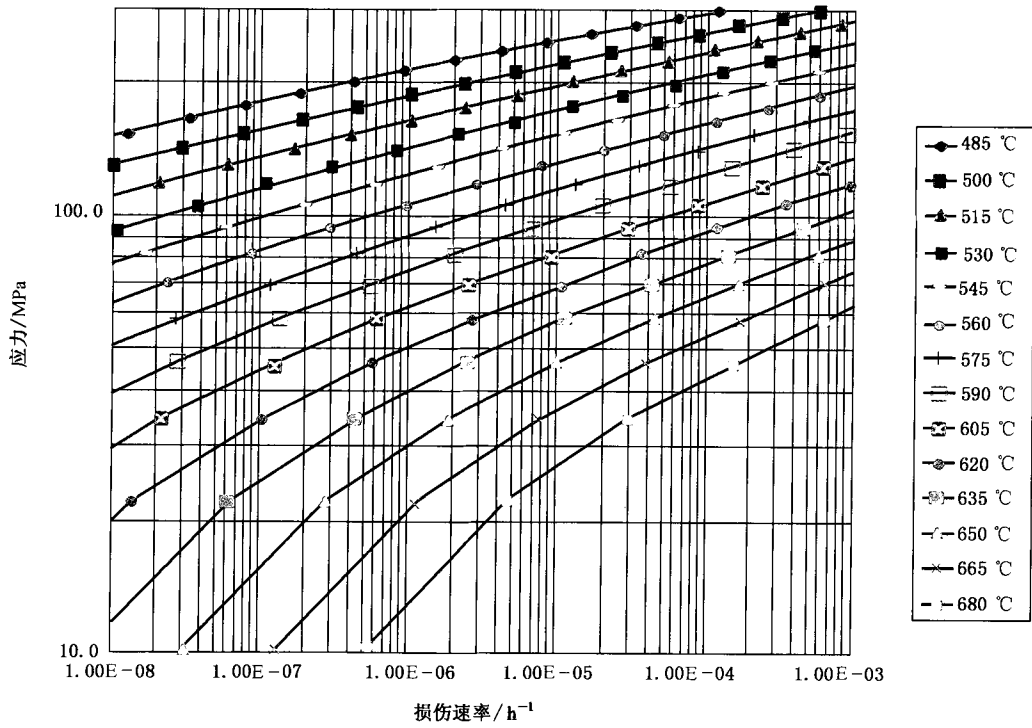


b) 损伤曲线

图 60 9Cr-1Mo 的 1 级评价曲线

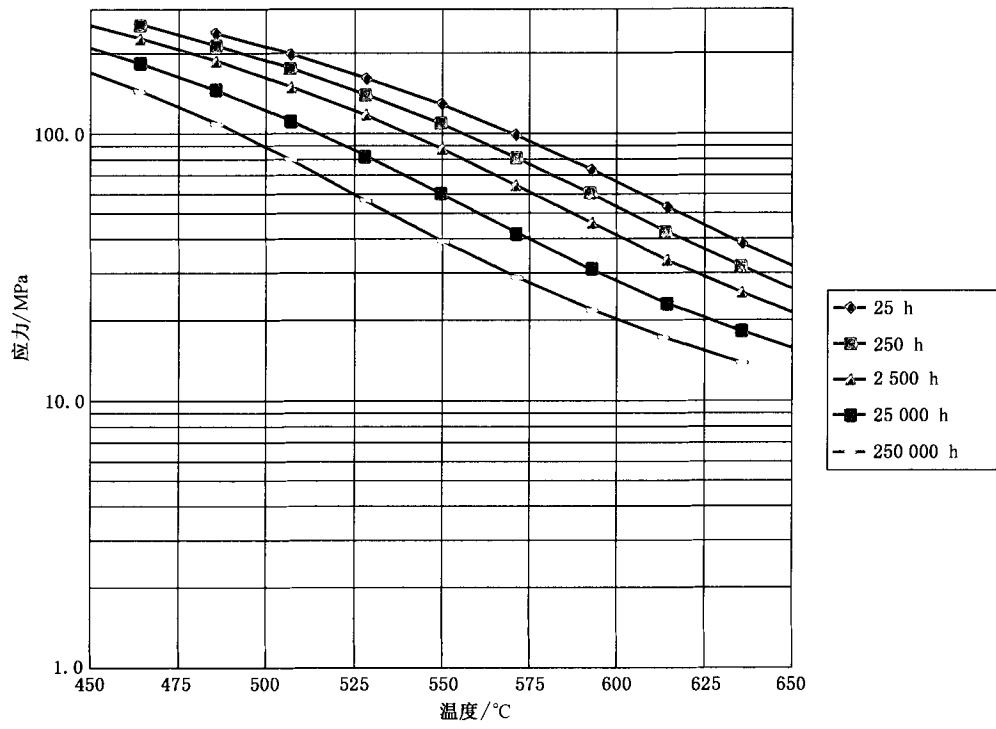


a) 筛选曲线

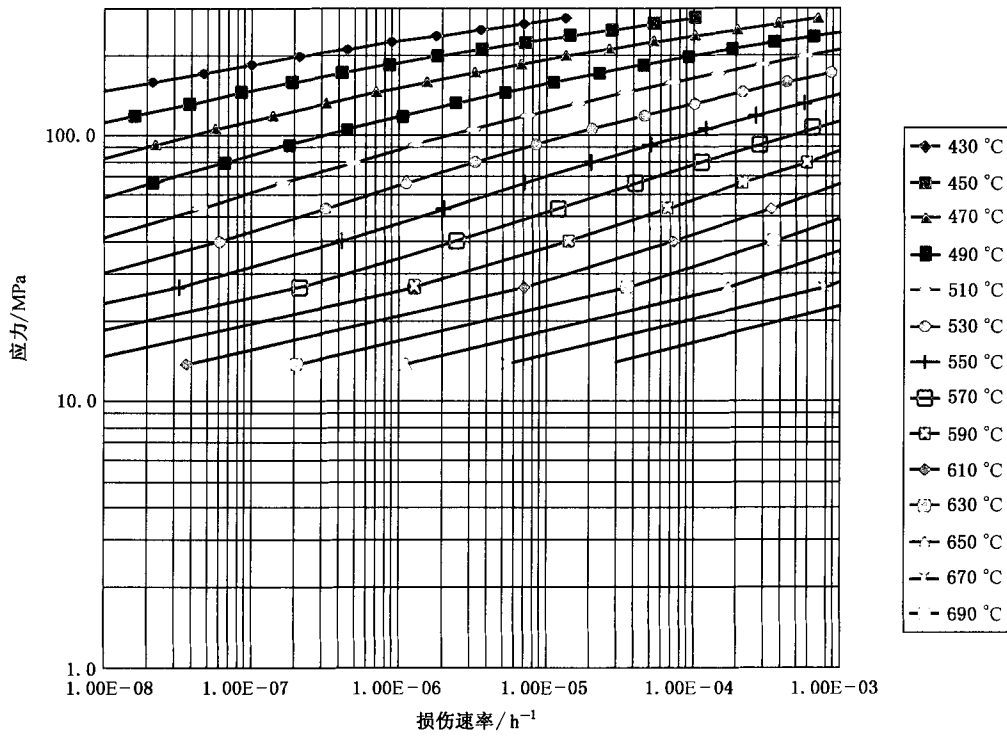


b) 损伤曲线

图 61 9Cr-1Mo-V 的 1 级评价曲线

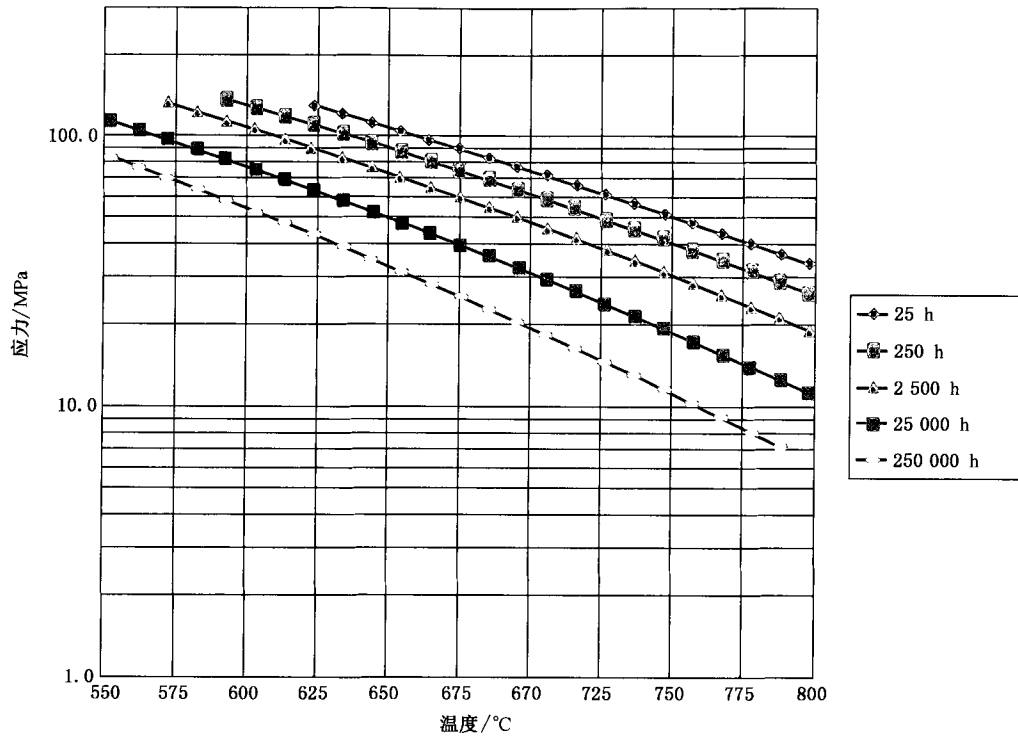


a) 筛选曲线

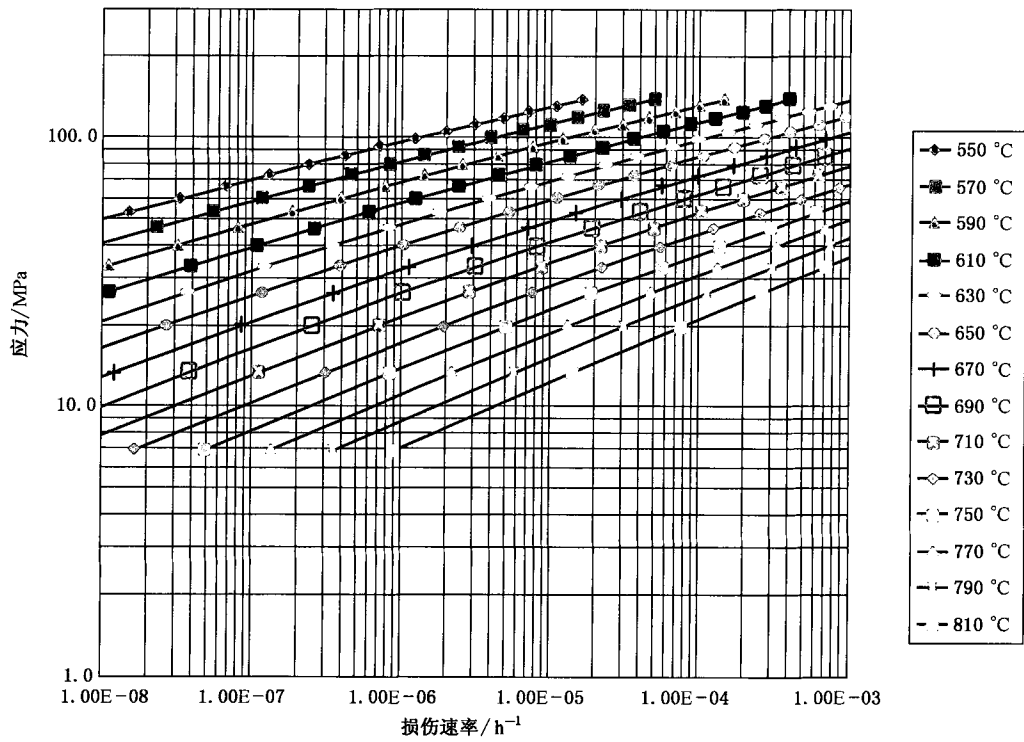


b) 损伤曲线

图 62 12Cr 的 1 级评价曲线

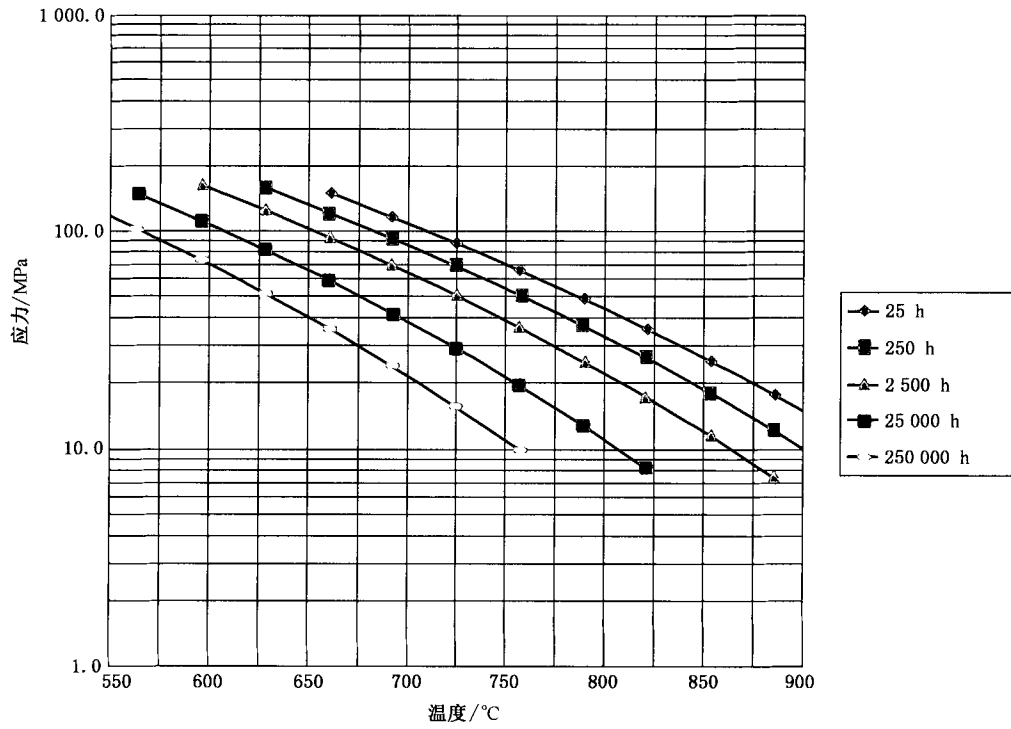


a) 筛选曲线

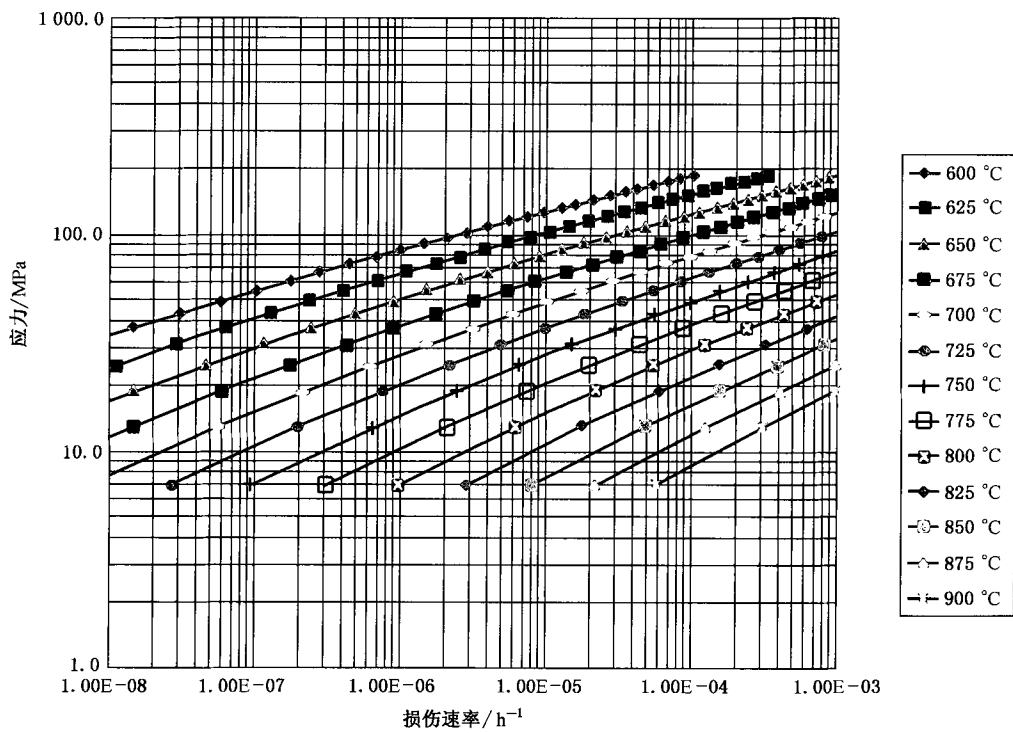


b) 损伤曲线

图 63 304&304H 的 1 级评价曲线



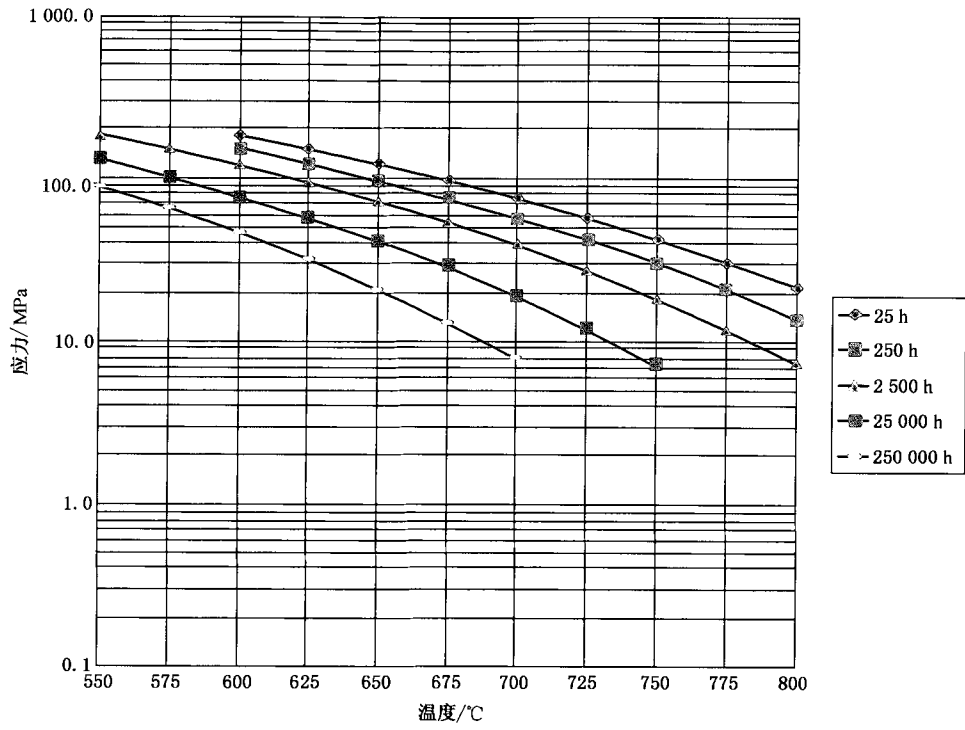
a) 筛选曲线



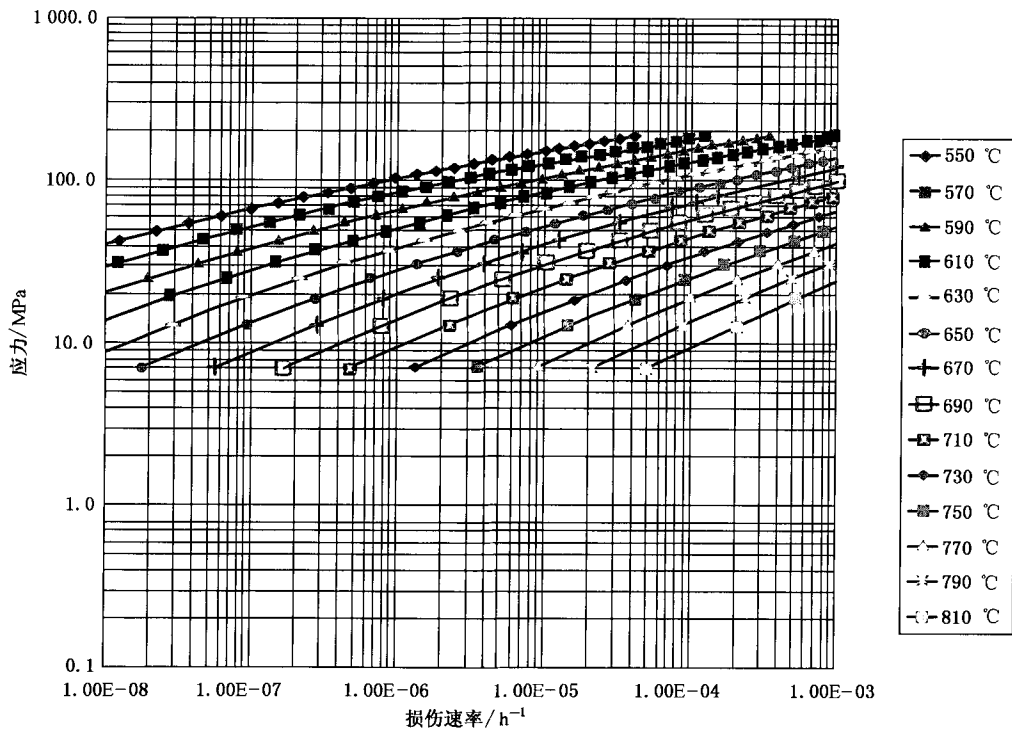
b) 损伤曲线

图 64 316&316H 的 1 级评价曲线





a) 筛选曲线



b) 损伤曲线

图 65 321 的 1 级评价曲线

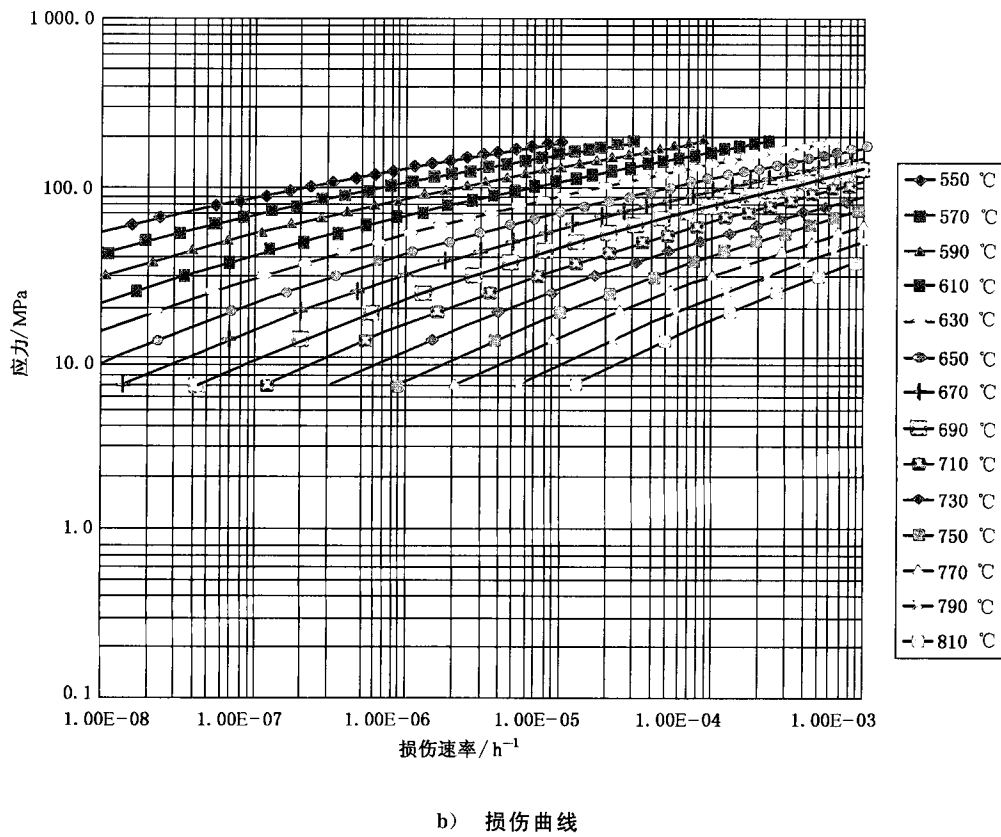
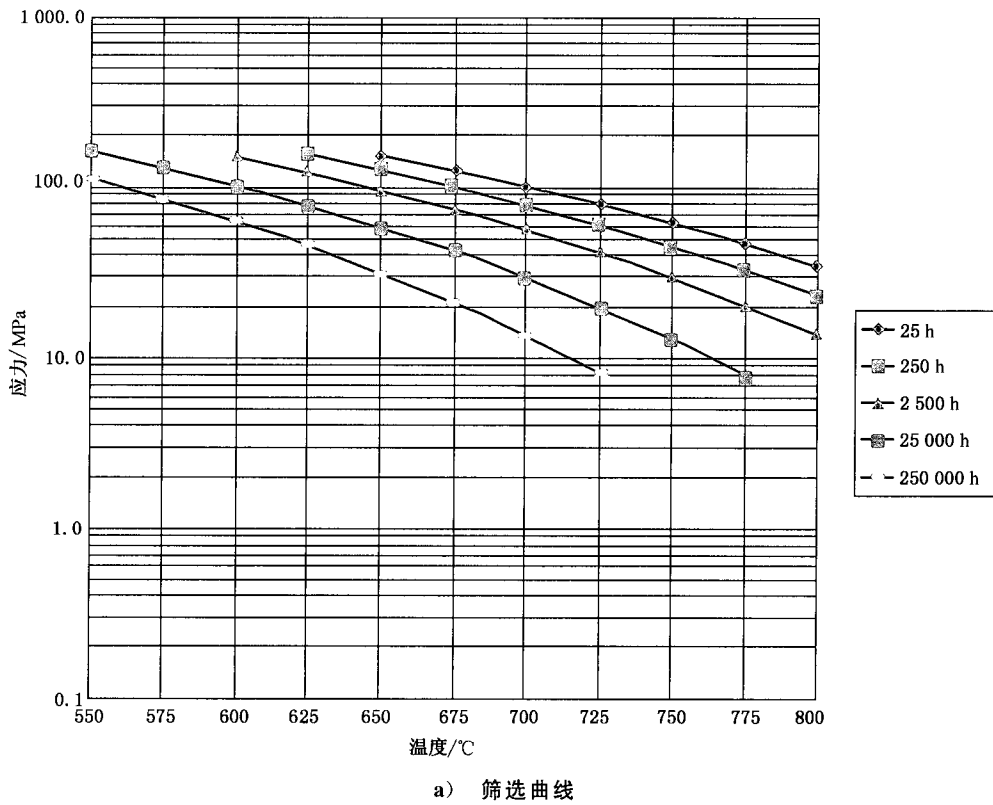
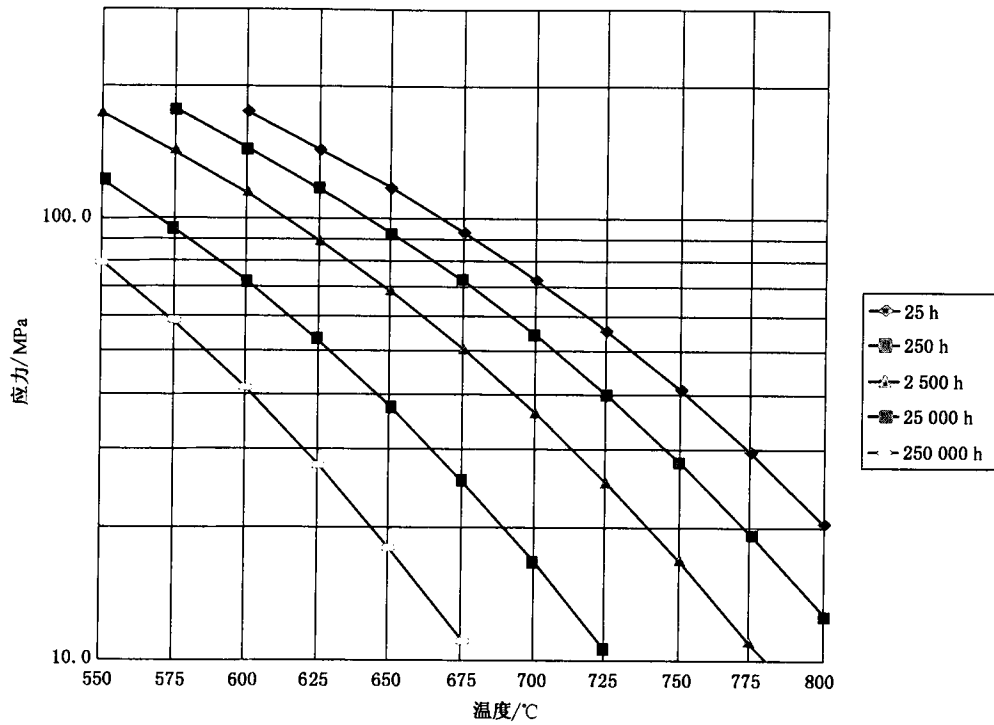
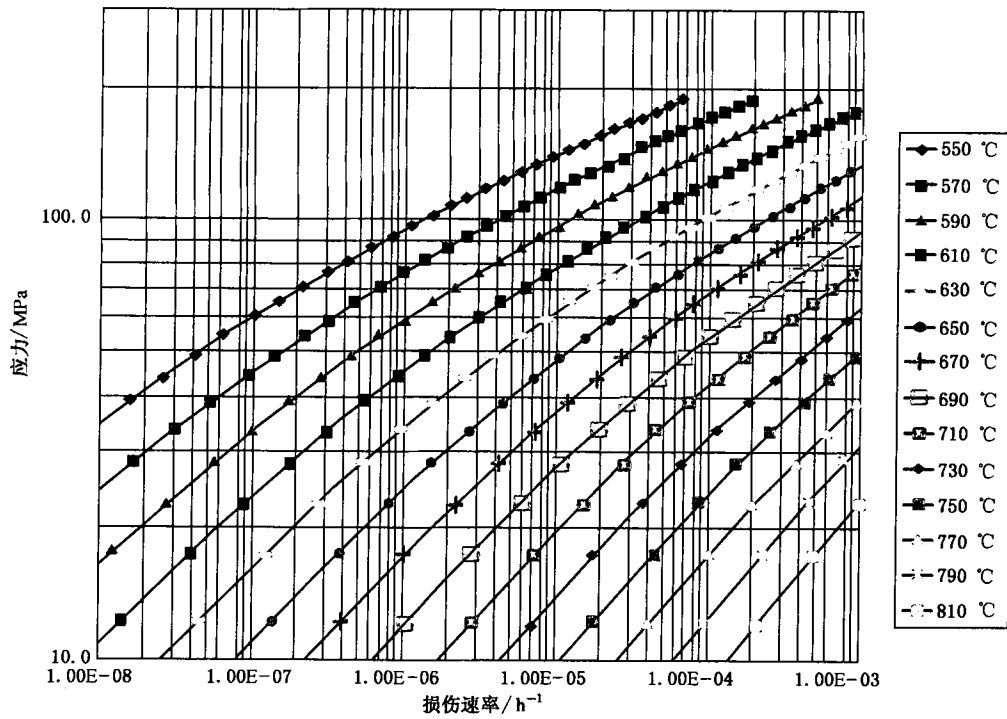


图 66 321H 的 1 级评价曲线

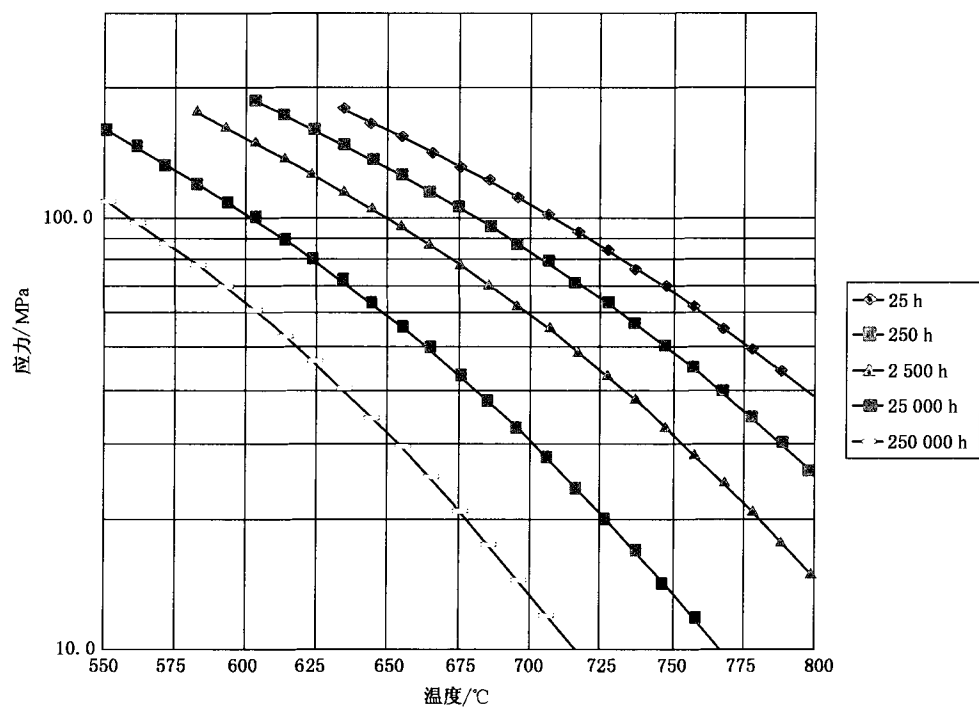


a) 筛选曲线

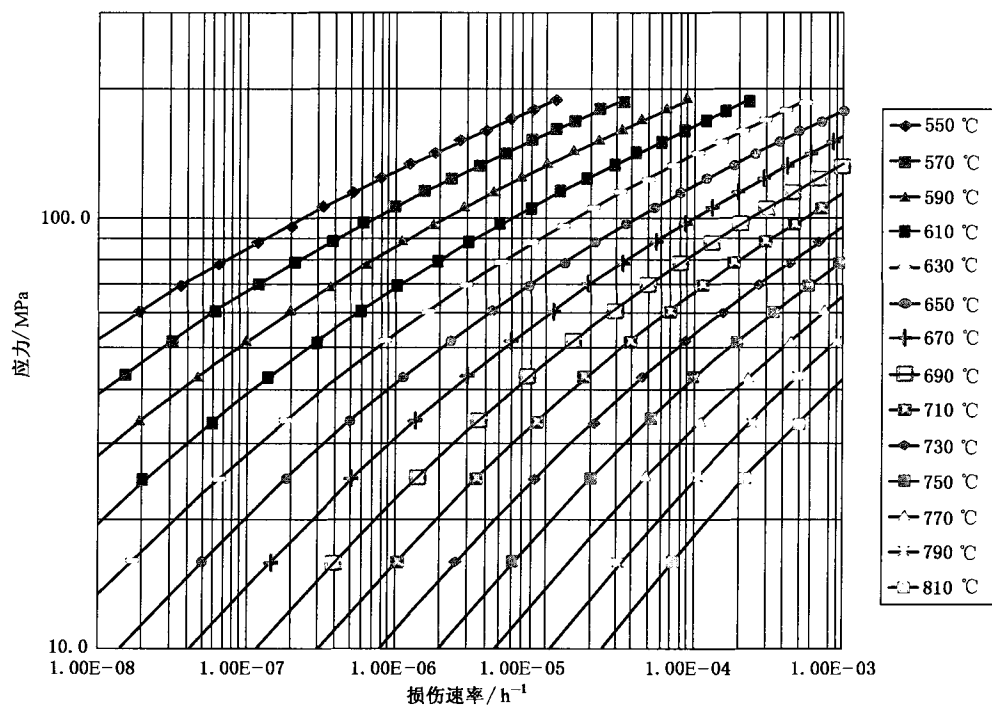


b) 损伤曲线

图 67 347 的 1 级评价曲线

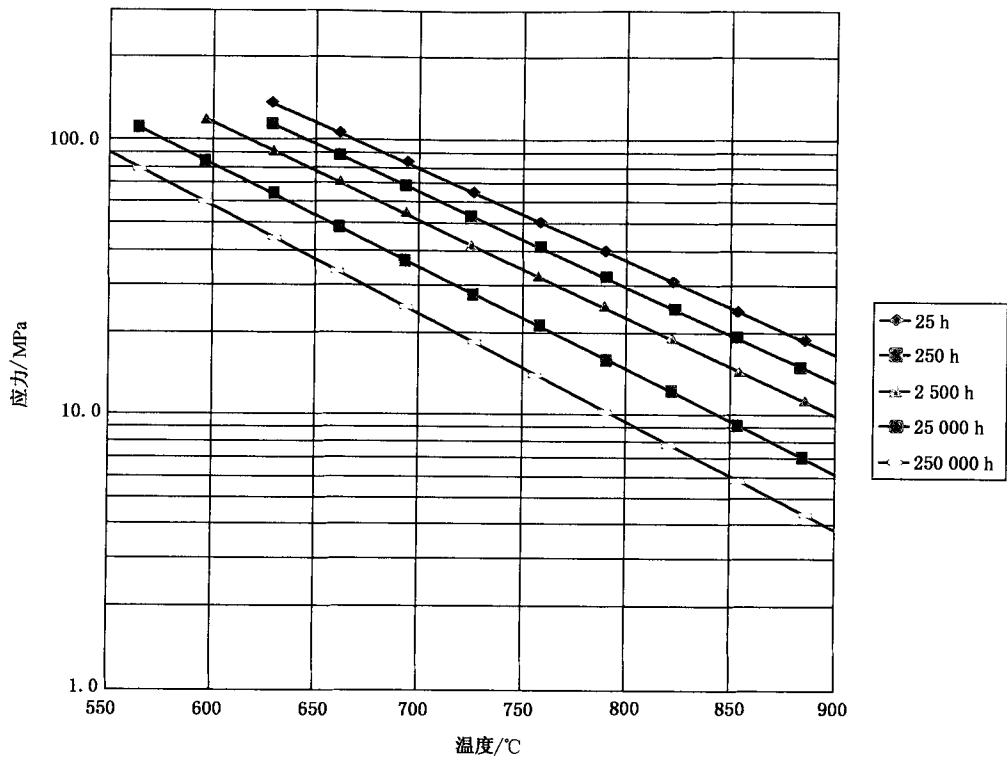


a) 筛选曲线

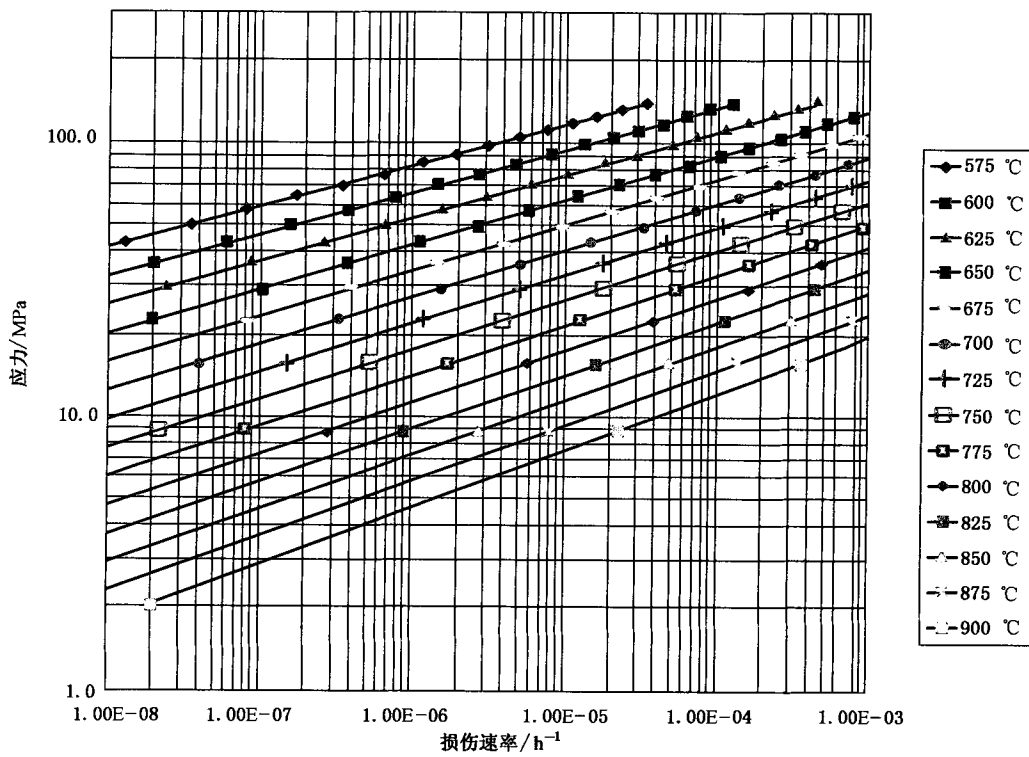


b) 损伤曲线

图 68 347H 的 1 级评价曲线

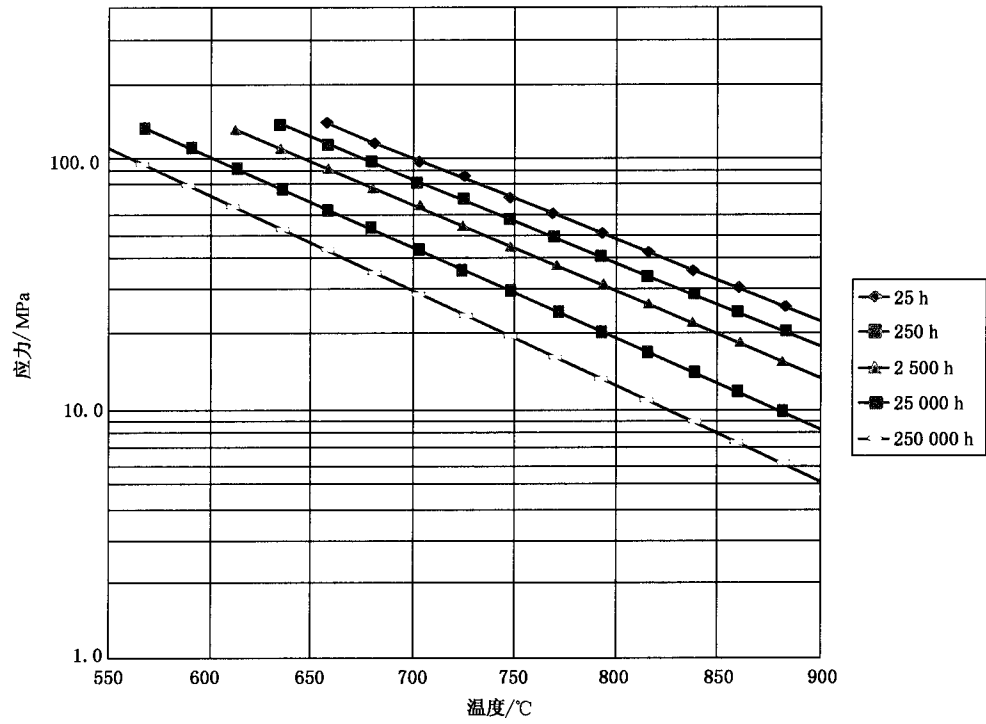


a) 筛选曲线

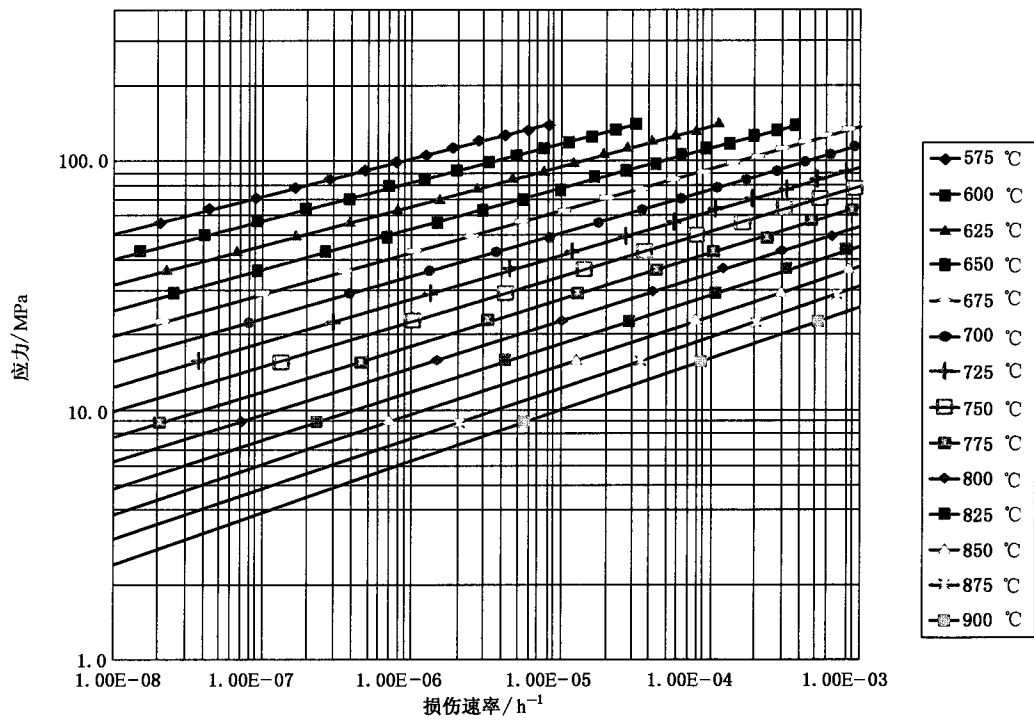


b) 损伤曲线

图 69 合金 800 的 1 级评价曲线

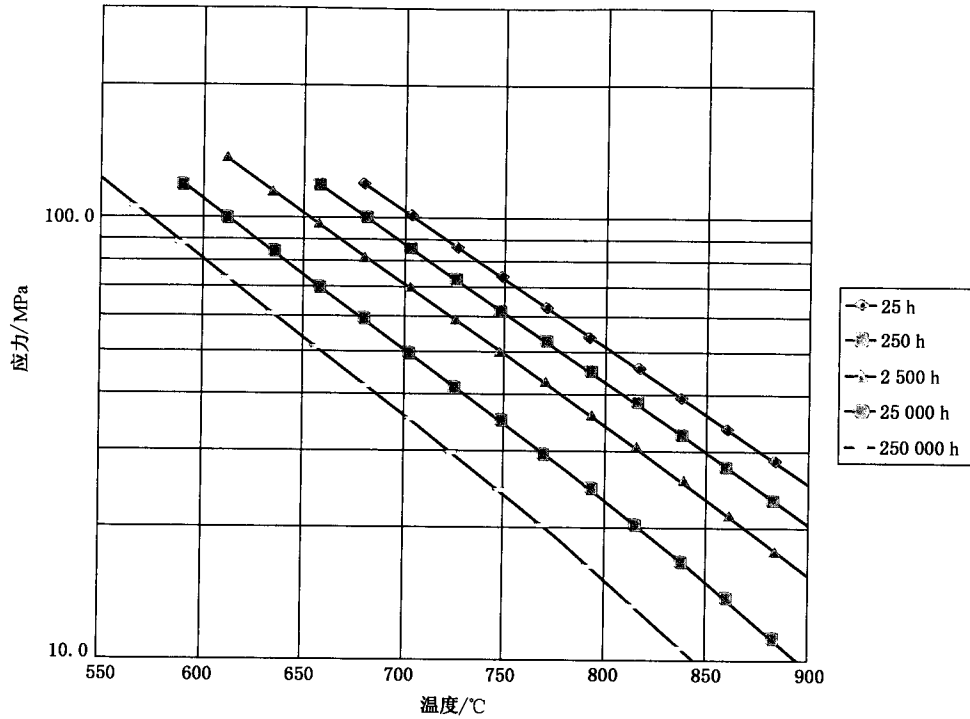


a) 筛选曲线

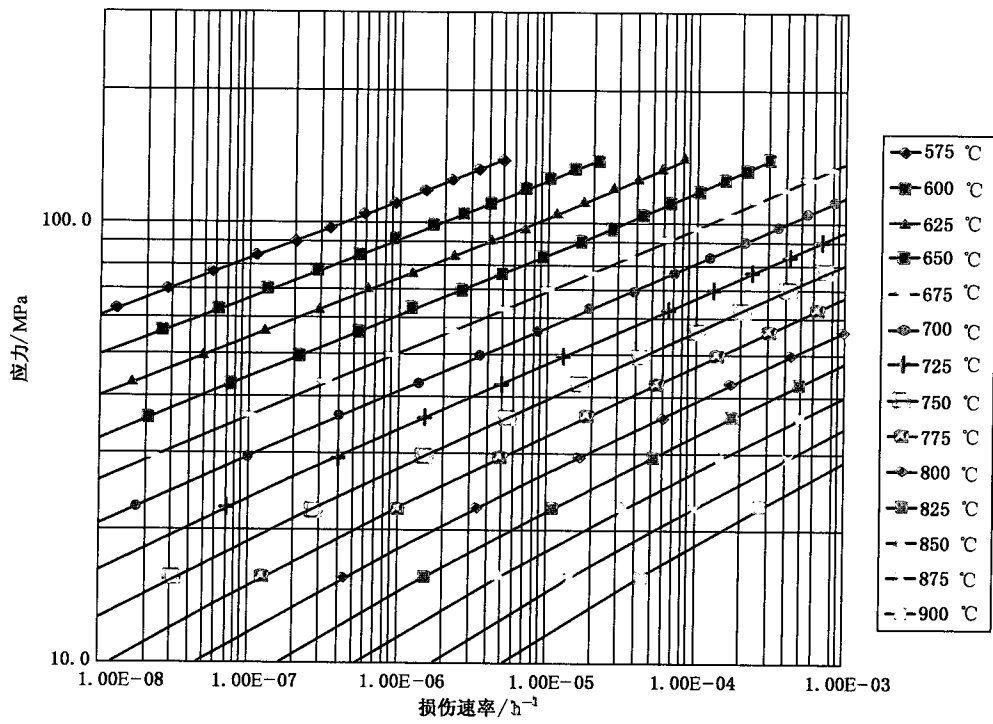


b) 损伤曲线

图 70 合金 800H 的 1 级评价曲线

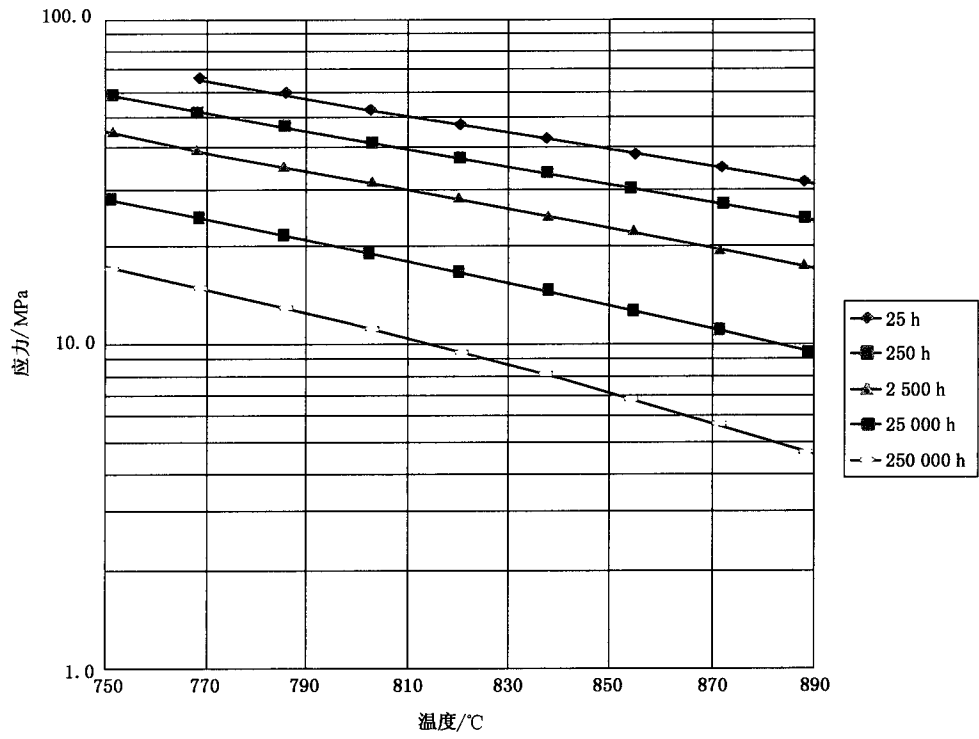


a) 筛选曲线

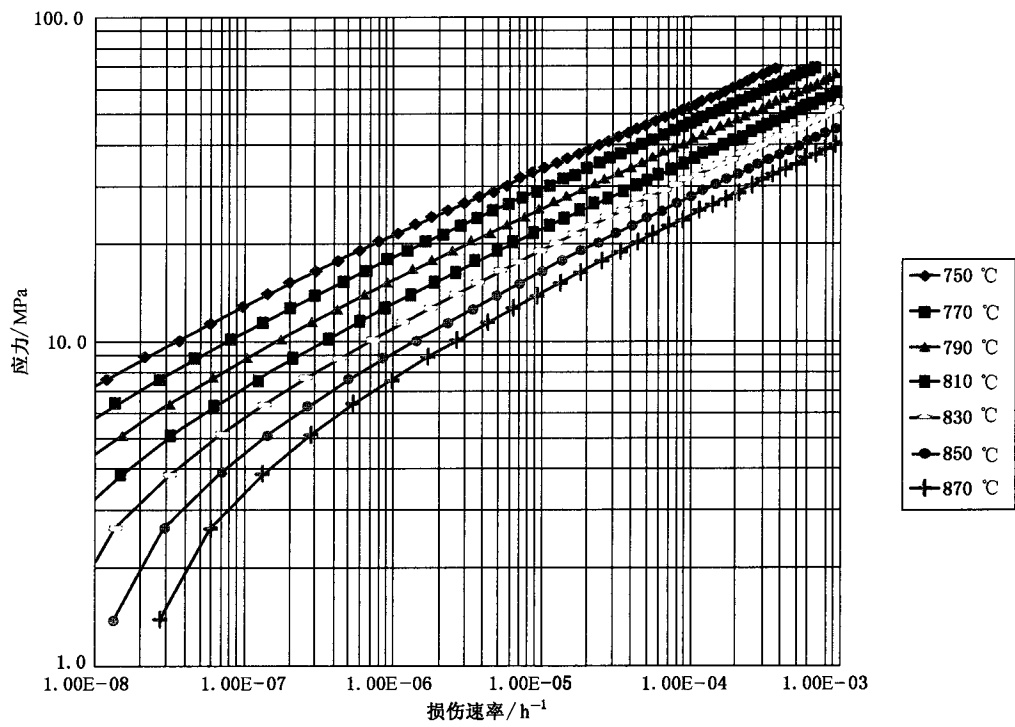


b) 损伤曲线

图 71 合金 800HT 的 1 级评价曲线



a) 筛选曲线



b) 损伤曲线

图 72 HK-40 的 1 级评价曲线



12.6.1.2 对于多操作工况的部件,1级评价流程如下:

- a) 基于过去操作历史和预设的未来操作条件确定操作工况,定义  $J$  为总操作工况数;
- b) 确定部件第  $j$  个操作工况的操作温度、评价计算压力和服役时间  $t_{se}^j$ ,如果部件中有承载焊缝垂直于控制计算壁厚的最大主应力方向,操作温度需增加  $14\text{ }^\circ\text{C}$  作为评价温度,服役时间需包括过去的运行时间和未来的计划运行时间;
- c) 按表 14 计算部件第  $j$  个操作工况的最大主应力,计算应力时应考虑服役过程中的壁厚减薄影响;
- d) 参照图 50~图 72 选取对应材料的损伤曲线;
- e) 基于损伤曲线,由最大主应力和操作温度确定第  $j$  个操作工况的蠕变损伤速率  $R_c^j$ ,并按式(147)计算第  $j$  个操作工况的蠕变损伤  $D_c^j$ :

$$D_c^j = R_c^j \cdot t_{se}^j \quad \dots\dots\dots(147)$$

- f) 按式(148)计算全部操作工况下的总蠕变损伤  $D_c^{\text{total}}$ :

$$D_c^{\text{total}} = \sum_{j=1}^J D_c^j \quad \dots\dots\dots(148)$$

- g) 如果满足式(149),则 1 级评价通过:

$$D_c^{\text{total}} \leq 0.25 \quad \dots\dots\dots(149)$$

12.6.2 2 级评价

12.6.2.1 蠕变断裂寿命计算基本过程如下:

- a) 基于过去操作历史和预设的未来操作条件确定操作工况(评价计算压力和操作温度),定义  $M$  为总操作工况数。
- b) 确定部件第  $m$  个操作工况的服役时间 <sup>$n$</sup>  $t$  ( $m=1\sim M$ ),服役时间 <sup>$n$</sup>  $t$  可分为  $N$  个时间步 <sup>$n$</sup>  $t$ , ( $n=1\sim N$ )未来操作条件的的时间步 <sup>$n$</sup>  $t$  应满足计算精度需要)。
- c) 对应时间步 <sup>$n$</sup>  $t$ ,确定评价计算压力  $P$  和操作温度 <sup>$n$</sup>  $T$ 。
- d) 对应时间步 <sup>$n$</sup>  $t$ ,按表 14 或采用有限元法计算主应力 <sup>$n$</sup>  $\sigma_1$ 、 <sup>$n$</sup>  $\sigma_2$ 、 <sup>$n$</sup>  $\sigma_3$ ,也可用有限元法计算主应力,计算应力时应考虑服役过程中的壁厚减薄影响。
- e) 对应时间步 <sup>$n$</sup>  $t$ ,按式(150)计算当量应力 <sup>$n$</sup>  $\sigma_e$ :

$${}^n\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [({}^n\sigma_1 - {}^n\sigma_2)^2 + ({}^n\sigma_1 - {}^n\sigma_3)^2 + ({}^n\sigma_2 - {}^n\sigma_3)^2]^{0.5} \quad \dots\dots\dots(150)$$

- f) 对应时间步 <sup>$n$</sup>  $t$ ,采用以下方法之一确定部件是否会发生塑性垮塌失效:

- 1) 基于弹性分析计算应力时,按式(151)计算一次参考应力 <sup>$n$</sup>  $\sigma_{\text{ref}}^p$ 。如果满足式(152),则继续按 f) 进行评价;否则,2 级评价不通过。

$${}^n\sigma_{\text{ref}}^p = \frac{{}^nP_b + ({}^nP_b^2 + 9 \cdot {}^nP_t^2)^{0.5}}{3} \quad \dots\dots\dots(151)$$

$${}^n\sigma_{\text{ref}}^p \leq \begin{cases} \sigma_{ys} & \text{奥氏体不锈钢或镍基合金} \\ 0.75 \times \sigma_{ys} & \text{其余材料} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(152)$$

- 2) 基于非弹性分析(包括塑性和蠕变)计算极限载荷,如果满足极限载荷准则,则继续按 g) 进行评价;否则,2 级评价不通过。

- g) 对应时间步 <sup>$n$</sup>  $t$ ,采用以下方法之一计算蠕变断裂寿命 <sup>$n$</sup>  $L$ :

- 1) 蠕变断裂寿命 <sup>$n$</sup>  $L$  按式(153)计算:

$${}^nL = \frac{1}{\dot{\epsilon}_{co}\Omega_m} \quad \dots\dots\dots(153)$$

式中:

$$\lg \dot{\epsilon}_{\infty} = - \left\{ (A_0 + \Delta_n^{\text{st}}) + \left[ \frac{1}{460 + (1.8 \times^n T + 32)} \right] [A_1 + A_2 S_1 + A_3 S_1^2 + A_4 S_1^3] \right\} \dots (154)$$

$$\Omega_m = \Omega_n^{\delta_n + 1} + \alpha_n \cdot n_{\text{BN}} \dots (155)$$

$$\Omega_n = \max\{(\Omega - n_{\text{BN}}), 3.0\} \dots (156)$$

$$\lg \Omega = \left\{ (B_0 + \Delta_n^{\text{cd}}) + \left[ \frac{1}{460 + (1.8 \times^n T + 32)} \right] [B_1 + B_2 S_1 + B_3 S_1^2 + B_4 S_1^3] \right\} \dots (157)$$

$$\delta_n = \beta_n \left( \frac{{}^n \sigma_1 + {}^n \sigma_2 + {}^n \sigma_3}{{}^n \sigma_e} - 1.0 \right) \dots (158)$$

$$n_{\text{BN}} = - \left\{ \left[ \frac{1}{460 + (1.8 \times^n T + 32)} \right] [A_2 + 2A_3 S_1 + 3A_4 S_1^2] \right\} \dots (159)$$

$$S_1 = \lg(0.145 \times^n \sigma_e) \dots (160)$$

系数  $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, B_0, B_1, B_2, B_3, B_4$  参见附录 A。焊接接头 2 级评价时, 取  $\Delta_n^{\text{st}} = -0.5$ 。

2) 蠕变断裂寿命  $L$  按式(161)计算。

$$\lg^n L = \left[ \frac{1\ 000 \times \text{LMP}({}^n S_{\text{eff}})}{460 + (1.8 \times^n T + 32)} \right] - C_{\text{LMP}} \dots (161)$$

式中:

$${}^n S_{\text{eff}} = {}^n \sigma_e \cdot \exp \left[ 0.24 \times \left( \frac{J_1}{S_s} - 1 \right) \right] \dots (162)$$

$$J_1 = {}^n \sigma_1 + {}^n \sigma_2 + {}^n \sigma_3 \dots (163)$$

$$S_s = ({}^n \sigma_1^2 + {}^n \sigma_2^2 + {}^n \sigma_3^2)^{0.5} \dots (164)$$

LMP( ${}^n S_{\text{eff}}$ )及  $C_{\text{LMP}}$  计算参见附录 A。

h) 按式(165)计算第  $m$  个操作工况的累积蠕变损伤  ${}^m D_c$ :

$${}^m D_c = \sum_{n=1}^N \frac{{}^n t}{{}^n L} \dots (165)$$

i) 按式(166)计算全部操作工况下的总蠕变损伤  $D_c^{\text{total}}$ :

$$D_c^{\text{total}} = \sum_{m=1}^M {}^m D_c \dots (166)$$

j) 评价准则:

- 1) 如果总蠕变损伤  $D_c^{\text{total}}$  小于或等于容许蠕变损伤  $D_c^{\text{allow}}$ , 则通过 2 级评价, 取  $D_c^{\text{total}} = D_c^{\text{allow}}$  的时间作为部件的剩余服役寿命;
- 2) 如果总蠕变损伤  $D_c^{\text{total}}$  大于容许蠕变损伤  $D_c^{\text{allow}}$ , 则 2 级评价不通过。

12.6.2.2 除了需要满足 12.6.2.1 中的准则之外, 如果应力计算是基于非弹性分析(塑性或蠕变), 总累积非弹性应变还应不大于累积非弹性应变的极限值(即多轴应变极限)。评价步骤如下:

- a) 考虑几何非线性影响进行非弹性应力分析, 确定部件评价部位的主应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , 以及当量塑性应变  $\epsilon_{\text{peq}}$ ;
- b) 按式(167)计算当量应力  $\sigma_e$ :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{0.5} \dots (167)$$

c) 按式(168)计算多轴应变极限  $\epsilon_L$ :

$$\epsilon_L = \epsilon_{L_u} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\alpha_{s1}}{1 + m_2} \right) \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_e} - \frac{1}{3} \right) \right] \dots (168)$$

式中： $\epsilon_{Lu}$ 、 $\alpha_{s1}$ 、 $m_2$  见表 15。

- d) 按照相应的设计规范或标准确定成形应变  $\epsilon_{cf}$ ，如果成形后进行了热处理，则  $\epsilon_{cf}=0$ ；
- e) 累积非弹性应变( $\epsilon_{peq} + \epsilon_{cf}$ )需满足式(169)：

$$\epsilon_{peq} + \epsilon_{cf} \leq \epsilon_L \dots\dots\dots(169)$$

表 15 多轴应变极限  $\epsilon_{Lu}$  计算参数

材料	最高操作温度/°C	应变硬化指数 $m_2$	$\epsilon_{Lu}$ 与延伸率关系式	$\epsilon_{Lu}$ 与断面收缩率关系式	$\alpha_{s1}$
铁素体钢	480	$0.6(1-R_{yt})$	$2 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\delta}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100-\psi} \right]$	2.2
不锈钢和镍基合金	480	$0.75(1-R_{yt})$	$3 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\delta}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100-\psi} \right]$	0.6
双相不锈钢	480	$0.7(0.95-R_{yt})$	$2 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\delta}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100-\psi} \right]$	2.2
沉淀硬化不锈钢	480	$1.9(0.93-R_{yt})$	$\ln \left[ 1 + \frac{\delta}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100-\psi} \right]$	2.2
铝	120	$0.52(0.98-R_{yt})$	$1.3 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\delta}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100-\psi} \right]$	2.2
铜	65	$0.5(1-R_{yt})$	$2 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\delta}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100-\psi} \right]$	2.2
钛和锆	260	$0.5(0.98-R_{yt})$	$1.3 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\delta}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100-\psi} \right]$	2.2

注 1：如果没有延伸率和断面收缩率，则  $\epsilon_{Lu} = m_2$ ；如果有延伸率或断面收缩率，则  $\epsilon_{Lu}$  取应变硬化指数、延伸率关系式、断面收缩率关系式中的大值。  
 注 2： $R_{yt}$  是屈服比， $\delta$  和  $\psi$  分别是材料标准中的延伸率%和断面收缩率%。

12.6.3 3 级评价

12.6.3.1 3 级评价采用有限元进行应力计算，评价程序与 2 级评价相同。3 级评价可用于存在 12.3.1d) 所示的缺陷或损伤的部件评价。对含不圆、鼓胀、凹陷、凹陷-沟槽等缺陷的部件，应力分析模型应考虑其对局部应力和应变的影响。对于存在裂纹类缺陷的部件的评价，应力分析时不考虑裂纹类缺陷的影响，在评价程序中予以考虑。

12.6.3.2 蠕变裂纹扩展评价方法如下：

- a) 按 12.6.2 和式(170)计算蠕变裂纹产生前的蠕变损伤  $D_{bc}$ ：

$$D_{bc} = \sum_{m=1}^{M_{bc}} m D_c \dots\dots\dots(170)$$

式中：

$M_{bc}$ ——蠕变裂纹产生前的总操作工况数。

- b) 设定蠕变裂纹的初始尺寸  $a_0$ 、 $c_0$ ，开裂时间和蠕变裂纹扩展损伤初始值：

$${}^{i=1}a = {}^{i=0}a = a_0 \dots\dots\dots(171)$$

$${}^{i-1}c = {}^{j=0}c = c_0 \quad \dots\dots\dots(172)$$

$${}^{i=0}t = 0.0 \quad \dots\dots\dots(173)$$

$${}^{i=0}D_{ac} = 0.0 \quad \dots\dots\dots(174)$$

- c) 确定部件第  $m$  个操作工况的服役时间 <sup>$m$</sup>  $t$  [ $m = (M_{bc} + 1) \sim M$ ], 服役时间 <sup>$m$</sup>  $t$  可分为  $N$  个时间步 <sup>$n$</sup>  $t$  ( $n = 1 \sim N$ , 未来操作条件的时间步 <sup>$n$</sup>  $t$  应满足计算精度需要), 每个时间步的结束时间标记为 <sup>$i$</sup>  $t$  ( $i = 1 \sim N$ ).
- d) 对应时间 <sup>$i$</sup>  $t$ , 确定评价计算压力  $P$  和操作温度 <sup>$i$</sup>  $T$ , 按 GB/T 19624 进行强度和断裂评价。若通过按 GB/T 19624 进行的强度和断裂评价, 则继续按 e) 进行评价, 否则不通过 3 级评价。
- e) 对应时间 <sup>$i$</sup>  $t$ , 按式(175)计算蠕变裂纹扩展损伤 <sup>$i$</sup>  $D_{ac}$ :

$${}^iD_{ac} = {}^{i-1}D_{ac} + \frac{({}^i t - {}^{i-1} t)}{{}^i L_{ac}} \quad \dots\dots\dots(175)$$

式中, 蠕变断裂寿命 <sup>$i$</sup>  $L_{ac}$  按式(153)计算,  $S_1 = \lg(0.145 \times {}^i \sigma_{ref})$ ,  ${}^i \sigma_{ref} = {}^i L_r \cdot {}^i \sigma_{ys}$ ,  ${}^i L_r$  按 GB/T 19624 计算, 焊接接头评价时基于焊接材料的成分和其余因素对  $\Delta \sigma_{ref}^s$  进行赋值。

若满足式(176)则继续下一步, 否则 3 级评价不通过:

$$D_{bc} + {}^i D_{ac} \leq 0.8 \quad \dots\dots\dots(176)$$

- f) 对应时间 <sup>$i$</sup>  $t$ , 计算蠕变裂纹扩展速率  $\frac{{}^i da}{dt}$  和  $\frac{{}^i dc}{dt}$ :
  - 1) 对应时间 <sup>$i$</sup>  $t$ , 按式(154)确定参考应变率 <sup>$i$</sup>  $\dot{\epsilon}_{ref}$ ,  $S_1 = \lg(0.145 \times {}^i \sigma_{ref})$ ;
  - 2) 对应时间 <sup>$i$</sup>  $t$ , 按 GB/T 19624 确定裂纹最深点的应力强度因子  $K_I^{90}({}^i a, {}^i c)$  和其表面点的应力强度因子  $K_I^0({}^i a, {}^i c)$ ;
  - 3) 对应时间 <sup>$i$</sup>  $t$ , 按式(177)~式(182)确定裂纹最深点的驱动力  $C_t^{90}({}^i a, {}^i c)$  和其表面点的驱动力  $C_t^0({}^i a, {}^i c)$ :

$$C_t^{90}({}^i a, {}^i c) = C^{*90}({}^i a, {}^i c) \cdot \left[ \left( \frac{t_{relax}^{90}({}^i a, {}^i c)}{{}^i t} \right)^{\frac{(n_{BN}-3)}{n_{BN}-1}} + 1 \right] \quad \dots\dots\dots(177)$$

$$C^{*90}({}^i a, {}^i c) = \left( \frac{{}^i \dot{\epsilon}_{ref}}{1 - D_{bc} - {}^i D_{ac}} \right) \frac{(K_I^{90}({}^i a, {}^i c))^2}{{}^i \sigma_{ref}} \quad \dots\dots\dots(178)$$

$$t_{relax}^{90}({}^i a, {}^i c) = \frac{0.91(K_I^{90}({}^i a, {}^i c))^2}{(n_{BN} + 1) \cdot E_y \cdot C^{*90}({}^i a, {}^i c)} \quad \dots\dots\dots(179)$$

$$C_t^0({}^i a, {}^i c) = C^{*0}({}^i a, {}^i c) \cdot \left[ \left( \frac{t_{relax}^0({}^i a, {}^i c)}{{}^i t} \right)^{\frac{(n_{BN}-3)}{n_{BN}-1}} + 1 \right] \quad \dots\dots\dots(180)$$

$$C^{*0}({}^i a, {}^i c) = \left( \frac{{}^i \dot{\epsilon}_{ref}}{1 - D_{bc} - {}^i D_{ac}} \right) \frac{(K_I^0({}^i a, {}^i c))^2}{{}^i \sigma_{ref}} \quad \dots\dots\dots(181)$$

$$t_{relax}^0({}^i a, {}^i c) = \frac{0.91(K_I^0({}^i a, {}^i c))^2}{(n_{BN} + 1) \cdot E_y \cdot C^{*0}({}^i a, {}^i c)} \quad \dots\dots\dots(182)$$

式中,  $n_{BN}$  按式(159)计算,  $S_1 = \lg(0.145 \times {}^i \sigma_{ref})$ 。

- 4) 对应时间 <sup>$i$</sup>  $t$ , 按式(183)和式(184)计算裂纹扩展速率  $\frac{{}^i da}{dt}$  和  $\frac{{}^i dc}{dt}$ :

$$\frac{{}^i da}{dt} = H_c \cdot [C_t^{90}({}^i a, {}^i c)]^\mu \quad \dots\dots\dots(183)$$

$$\frac{{}^i dc}{dt} = H_c \cdot [C_t^0({}^i a, {}^i c)]^\mu \quad \dots\dots\dots(184)$$

式中,  $H_c$  和  $\mu$  分别按式(185)和式(186)计算,  $\Omega$  和  $n_{BN}$  可分别按式(157)和式(159)计算,  $S_1 = \lg(0.145 \times {}^i \sigma_{ref})$ ;

$$H_c = \frac{\Omega}{500} \dots\dots\dots(185)$$

$$\mu = \frac{n_{BN}}{n_{BN} + 1} \dots\dots\dots(186)$$

g) 对应时间 $t$ ,按式(187)计算时间增量  $\Delta t$ ,建议取显式积分参数  $C_{intg}=0.005$ (若时间增量  $\Delta t$  大于时间步 $t$ ,则取  $\Delta t=t$ ):

$$\Delta t = \frac{C_{intg} \cdot t_c}{\max \left[ \frac{da}{dt}, \frac{dc}{dt} \right]} \dots\dots\dots(187)$$

h) 更新蠕变裂纹尺寸 $a, c$  和时间 $t$ :

$$a = a + \frac{da}{dt} \cdot \Delta t \dots\dots\dots(188)$$

$$c = c + \frac{dc}{dt} \cdot \Delta t \dots\dots\dots(189)$$

$$t = t + \Delta t \dots\dots\dots(190)$$

i) 如果 $t < t$ ,返回 d),否则继续下一步。

j) 更新操作工况数  $m = m + 1$ ,此时  $n, N$  和  $i$  重新赋值,重复 c)~ i),完成所有操作工况的裂纹扩展计算。

附 录 A  
(资料性附录)  
蠕变数据

## A.1 符号

$A_0 \sim A_4$ ——计算 Omega 应变率参数或拉尔森-米勒参数的系数；

$B_0 \sim B_4$ ——计算 Omega 参数的系数；

$C_{LMP}$ ——拉尔森-米勒常数；

$LMP_m$ ——最小拉尔森-米勒参数；

$LMP_a$ ——平均拉尔森-米勒参数；

$\dot{\epsilon}_0$ ——蠕变应变率；

$\sigma_a$ ——发生破裂的平均应力,单位为 MPa；

$\sigma_b$ ——抗拉强度,单位为 MPa；

$\sigma_{min}$ ——发生破裂的最小应力,单位为 MPa；

$\Omega$ ——单轴 Omega 损伤参量。

## A.2 蠕变温度范围

ASME 材料定义蠕变范围的温度极限见表 A.1,其他材料可参照采用。

表 A.1 定义蠕变范围的温度极限

材质	温度极限/°C
碳钢( $\sigma_b \leq 414$ MPa)	343
碳钢( $\sigma_b > 414$ MPa)	371
碳钢(石墨化)	371
C-0.5Mo	399
1.25Cr-0.5Mo(正火+回火)	427
1.25Cr-0.5Mo(退火)	427
2.25Cr-1Mo(正火+回火)	427
2.25Cr-1Mo(退火)	427
2.25Cr-1Mo(淬火+回火)	427
2.25Cr-1Mo-V	441
3Cr-1Mo-V	441
5Cr-0.5Mo	427
7Cr-0.5Mo	427
9Cr-1Mo	427
9Cr-1Mo-V	454
12Cr	482

表 A.1 (续)

材质	温度极限/℃
304/304H	510
316/316H	538
321	538
321H	538
347	538
347H	538
合金 800	565
合金 800H	565
合金 800HT	565
HK40(25Cr-20Ni)	649

## A.3 Omega 蠕变数据

Omega 蠕变数据见表 A.2。表 A.2 仅适用于 ASME 材料,国产材料适用性如下:

- 国产 ZG40Cr25Ni20 和 ZG40Cr25Ni20A 离心铸管的高温性能已达到国外 HK40 性能,因此 HK40 蠕变断裂强度曲线可以参考使用;
- 国产的 HP 和 HP-Nb 离心铸管已批量生产,性能与国外同类产品类似,因高温持久强度炉管生产厂家之间有一些差别,需要时可以咨询相关厂家或参考国外同类材料数据。

表 A.2 Omega 蠕变数据

材料	注释	应变率参数 $\dot{\epsilon}_0$		单轴 Omega 损伤参数 $\Omega$	
		$A_0$		$B_0$	
碳钢 A161 A192 A53 GradeB A106 GradeB A210 GradeA-1	—	$A_0$	-16.3	$B_0$	-1.0
		$A_1$	38 060	$B_1$	3 060.0
		$A_2$	-9 165	$B_2$	135.0
		$A_3$	1 200	$B_3$	-760.0
		$A_4$	-600	$B_4$	247.0
碳钢(石墨化) A161 A192 A53 GradeB A106 GradeB A210 GradeA-1	—	$A_0$	-16.8	$B_0$	-1.0
		$A_1$	38 060	$B_1$	3 060.0
		$A_2$	-9 165	$B_2$	135.0
		$A_3$	1 200	$B_3$	-760
		$A_4$	-600	$B_4$	247.0
C-0.5Mo A106 T1 A209 T1 A335 P1	—	$A_0$	-19.50	$B_0$	-1.30
		$A_1$	61 000.0	$B_1$	4 500.0
		$A_2$	-49 000.0	$B_2$	2 000.0
		$A_3$	33 000.0	$B_3$	-4 500.0
		$A_4$	-8 000.0	$B_4$	2 000.0

表 A.2 (续)

材料	注释	应变率参数 $\dot{\epsilon}_0$		单轴 Omega 损伤参数 $\Omega$	
		$A_0$		$B_0$	
1.25Cr-0.5Mo (正火+回火) A213 T11 A335 P11 A200 T11	只在温度低于 538 °C, 应力高于 69 MPa 的条 件下使用	$A_0$	-23.35	$B_0$	-4.40
		$A_1$	62 070.0	$B_1$	14 510.0
		$A_2$	-47 520.0	$B_2$	-24 671.0
		$A_3$	43 800.0	$B_3$	29 384
		$A_4$	-14 790.0	$B_4$	-10 630.0
1.25Cr-0.5Mo (退火) A213 T11 A335 P11 A200 T11	只用于服役软化 材料; 只在应力高 于 69 MPa 的条 件下使用	$A_0$	-23.5	$B_0$	-2.65
		$A_1$	52 610	$B_1$	6 110.0
		$A_2$	-4 500	$B_2$	3 000.0
		$A_3$	-5 190	$B_3$	-4 440
		$A_4$	825	$B_4$	1 375.0
2.25Cr-1Mo (正火+回火) A213 T22 A335 P22 A200 T22	只在温度低于 510 °C, 应力高于 103 MPa 的条 件下使用	$A_0$	-21.56	$B_0$	-1.12
		$A_1$	55 518.0	$B_1$	5 032.0
		$A_2$	-10 910.0	$B_2$	-360.0
		$A_3$	-1 705	$B_3$	-2 320.0
		$A_4$	0.0	$B_4$	1 210.0
2.25Cr-1Mo(退火) A213 T22 A335 P22 A200 T22	—	$A_0$	-21.86	$B_0$	-1.85
		$A_1$	50 205	$B_1$	7 205.0
		$A_2$	-5 436	$B_2$	-2 436.0
		$A_3$	500	$B_3$	0.0
		$A_4$	-3 400	$B_4$	0.0
2.25Cr-1Mo (淬火+回火) A213 T22 A335 P22 A200 T22	只在温度低于 510 °C, 应力高于 103 MPa 的条 件下使用	$A_0$	-21.56	$B_0$	-1.12
		$A_1$	55 518.0	$B_1$	5 032.0
		$A_2$	-10 910.0	$B_2$	-360.0
		$A_3$	-1 705	$B_3$	-2 320.0
		$A_4$	0.0	$B_4$	1 210.0
2.25Cr-1Mo-V	只在温度低于 510 °C, 应力高于 138 MPa 的条 件下使用	$A_0$	-25.0	$B_0$	-2.53
		$A_1$	50 315.0	$B_1$	9 000.0
		$A_2$	5 358.06	$B_2$	-3 500.0
		$A_3$	-7 580.0	$B_3$	225.0
		$A_4$	0.0	$B_4$	0.0
5Cr-0.5Mo A213 T5 A335 P5 A200 T5	—	$A_0$	-22.40	$B_0$	-1.40
		$A_1$	51 635.0	$B_1$	5 035.0
		$A_2$	-7 330.0	$B_2$	-1 330.0
		$A_3$	-2 577.0	$B_3$	423.0
		$A_4$	0.0	$B_4$	0.0



表 A.2 (续)

材料	注释	应变率参数 $\dot{\epsilon}_0$		单轴 Omega 损伤参数 $\Omega$	
		$A_0$		$B_0$	
9Cr-1Mo A213 T9 A335 P9 A200 T9	—	$A_0$	-20.85	$B_0$	-1.10
		$A_1$	49 672.0	$B_1$	5 400.0
		$A_2$	-6 038.0	$B_2$	-1 600.0
		$A_3$	-6 178.0	$B_3$	-1 000.0
		$A_4$	0.0	$B_4$	0.0
9Cr-1Mo-V A213 T91 A335 P91 A200 T91	—	$A_0$	-34.0	$B_0$	-2.00
		$A_1$	73 201.8	$B_1$	7 200
		$A_2$	-2 709.0	$B_2$	-1 500.0
		$A_3$	-4 673.0	$B_3$	0.0
		$A_4$	-569.0	$B_4$	0.0
12Cr	—	$A_0$	-30.29	$B_0$	-3.298
		$A_1$	67 110.0	$B_1$	6 508.0
		$A_2$	-21 093.0	$B_2$	3 016.0
		$A_3$	14 556.0	$B_3$	-2 784.0
		$A_4$	-5 884.0	$B_4$	480.0
304 & 304H A213 Type304&304H A271 Type304&304H A312 Type304&304H A376 Type304&304H	—	$A_0$	-19.17	$B_0$	-3.40
		$A_1$	53 762.4	$B_1$	11 250.0
		$A_2$	-13 442.4	$B_2$	-5 635.8
		$A_3$	3 162.6	$B_3$	3 380.4
		$A_4$	-1 685.2	$B_4$	-993.6
316 & 316H A213 Type316&316H A271 Type316&316H A312 Type316&316H A376 Type316&316H	—	$A_0$	-18.9	$B_0$	-4.163
		$A_1$	57 190.0	$B_1$	17 104.762
		$A_2$	-18 060.0	$B_2$	-12 620.0
		$A_3$	2 842.213	$B_3$	3 949.151
		$A_4$	200.2	$B_4$	400.0
321 A213 Type321 A271 Type321 A312 Type321 A376 Type321	—	$A_0$	-19	$B_0$	-3.4
		$A_1$	49 425	$B_1$	10 625
		$A_2$	-7 417	$B_2$	-3 217
		$A_3$	1 240	$B_3$	1 640
		$A_4$	-1 290	$B_4$	-490
321H A213 Type321H A271 Type321H A312 Type321H A376 Type321H	—	$A_0$	-18.4	$B_0$	-3.4
		$A_1$	49 425	$B_1$	10 625
		$A_2$	-7 417	$B_2$	-3 217
		$A_3$	1 240	$B_3$	1 640
		$A_4$	-1 290	$B_4$	-490

表 A.2 (续)

材料	注释	应变率参数 $\dot{\epsilon}_0$		单轴 Omega 损伤参数 $\Omega$	
		$A_0$	$A_1$	$B_0$	$B_1$
347 A213 Type347 A271 Type47 A312 Type347 A376 Type347	—	$A_0$	-18.3	$B_0$	-3.5
		$A_1$	47 140.0	$B_1$	10 000.0
		$A_2$	-5 434.0	$B_2$	-800.0
		$A_3$	500.0	$B_3$	-100.0
		$A_4$	-1 128.0	$B_4$	100.0
347H A213 Type347H A271 Typ347H A312 Type347H A376 Type347H	—	$A_0$	-17.70	$B_0$	-3.65
		$A_1$	47 140.0	$B_1$	10 000.0
		$A_2$	-5 434.0	$B_2$	-800.0
		$A_3$	500.0	$B_3$	-100.0
		$A_4$	-1 128.0	$B_4$	100.0
合金 800	—	$A_0$	-19.1	$B_0$	-3.6
		$A_1$	55 548	$B_1$	11 250
		$A_2$	-15 877	$B_2$	-5 635
		$A_3$	3 380	$B_3$	3 380
		$A_4$	-993	$B_4$	-993
合金 800H B407 Alloy 800H	—	$A_0$	-18.8	$B_0$	-3.6
		$A_1$	55 548	$B_1$	11 250
		$A_2$	-15 877	$B_2$	-5 635
		$A_3$	3 380	$B_3$	3 380
		$A_4$	-993	$B_4$	-993
合金 800HT	—	$A_0$	-20.25	$B_0$	-3.4
		$A_1$	59 415.0	$B_1$	11 250
		$A_2$	-13 677.0	$B_2$	-5 635
		$A_3$	-1 009.0	$B_3$	3 380
		$A_4$	625.0	$B_4$	-993
HK40(25Cr-20Ni) A608 Grade HK-40	—	$A_0$	-14.80	$B_0$	-4.40
		$A_1$	47 065.0	$B_1$	13 000.0
		$A_2$	-7 170.0	$B_2$	-400.0
		$A_3$	-2 962.0	$B_3$	0.0
		$A_4$	1 145.0	$B_4$	0.0

A.4 拉尔森-米勒参数

拉尔森-米勒参数见表 A.3。表 A.3 仅适用于 ASME 材料，国产材料适用性如下：

- a) 国产 ZG40Cr25Ni20 和 ZG40Cr25Ni20A 离心铸管的高温性能已达到国外 HK40 性能，因此 HK40 蠕变断裂强度曲线可以参考使用；

- b) 国产的 HP 和 HP-Nb 离心铸管已批量生产,性能与国外同类产品类似,因高温持久强度炉管生产厂家之间有一些差别,需要时可以咨询相关厂家或参考国外同类材料数据。

表 A.3 最小和平均拉尔森-米勒参数

材料	方程	参数	最小拉尔森-米勒参数 $LMP(^{\circ}S_{eff})_m$	平均拉尔森-米勒参数 $LMP(^{\circ}S_{eff})_a$
低碳钢 A161 A192	1	$A_0$	3.947 213 2E+01	3.979 371 3E+01
		$A_1$	-1.755 588 4E-01	-1.544 341 4E-01
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-2.549 558 1E+00	-2.626 006 5E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
中碳钢 A53 GradeB A106 GradeB A210 GradeA-1	1	$A_0$	4.058 830 7E+01	4.140 611 4E+01
		$A_1$	-1.771 267 9E-01	-9.441 237 3E-02
		$A_2$	0.0	-8.163 001 2E-04
		$A_3$	-2.606 211 7E+00	-2.822 298 9E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
C-0.5Mo A106 T1 A209 T1 A335 P1	1	$A_0$	4.057 240 7E+01	4.123 529 2E+01
		$A_1$	4.681 088 4E-02	3.775 948 6E-02
		$A_2$	-1.742 880 3E-03	-1.118 881 7E-03
		$A_3$	-2.428 754 5E+00	-2.440 363 6E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
1.25Cr-0.5Mo A213 T11 A335 P11 A200 T11	1	$A_0$	4.144 429 0E+01	4.260 525 0E+01
		$A_1$	-1.660 809 1E-03	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-2.584 263 2E+00	-2.623 605 2E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
2.25Cr-1Mo A213 T22 A335 P22 A200 T22	2	$A_0$	4.398 171 9E+01	4.349 415 9E+01
		$A_1$	-8.465 611 7E-01	-6.016 563 8E-01
		$A_2$	-4.048 300 5E+01	-2.804 047 1E+01
		$A_3$	2.623 608 1E-01	2.064 422 9E-01
		$A_4$	1.537 365 0E+01	1.098 229 0E+01
		$A_5$	4.967 378 1E-02	2.839 376 7E-02
		$A_6$	6.604 942 9E-01	3.606 702 4E-01
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
3Cr-1Mo A213 T5 A335 P5 A200 T5	1	$A_0$	4.405 183 8E+01	4.478 611 3E+01
		$A_1$	0.0	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-3.476 495 3E+00	-3.501 247 0E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0

表 A.3 (续)

材料	方程	参数	最小拉尔森-米勒参数 LMP( $^{\circ}S_{eff}$ ) <sub>m</sub>	平均拉尔森-米勒参数 LMP( $^{\circ}S_{eff}$ ) <sub>a</sub>
5Cr-0.5Mo A213 T5 A335 P5 A200 T5	1	$A_0$	4.406 030 7E+01	4.556 157 0E+01
		$A_1$	0.0	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-3.883 265 4E+00	-3.929 215 8E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
5Cr-0.5Mo-Si A213 T5b A335 P5b	1	$A_0$	4.341 243 5E+01	4.519 396 4E+01
		$A_1$	6.008 460 3E-04	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-4.087 394 4E+00	-4.063 741 9E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
7Cr-0.5Mo A213 T7 A335 P7 A200 T7	1	$A_0$	4.458 598 1E+01	4.579 547 8E+01
		$A_1$	0.0	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-4.415 908 0E+00	-4.425 012 8E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
9Cr-1Mo A213 T9 A335 P9 A200 T9	1	$A_0$	4.344 009 0E+01	4.471 337 5E+01
		$A_1$	0.0	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-3.127 434 8E+00	-3.108 735 3E+00
		$C_{LMP}$	20.0	20.0
9Cr-1Mo-V A213 T91 A335 P91 A200 T91	2	$A_0$	5.877 548 8E+01	6.029 315 1E+01
		$A_1$	6.303 042 7E-01	2.916 457 6E-01
		$A_2$	4.308 096 1E+01	2.062 404 6E+01
		$A_3$	-4.213 847 3E-02	8.144 697 5E-03
		$A_4$	-5.818 113 9E+00	-1.381 692 1E+00
		$A_5$	1.305 669 0E-03	1.279 138 8E-04
		$A_6$	2.821 542 9E-01	6.575 048 5E-02
		$C_{LMP}$	30	30
304 & 304H A213 Type304&304H A271 Type304&304H A312 Type304&304H A376 Type304&304H	1	$A_0$	4.160 448 1E+01	43.001 062 36
		$A_1$	0.0	-0.732 264 828
		$A_2$	0.0	0.036 452 889
		$A_3$	-4.159 030 9E+00	-2.366 28
		$C_{LMP}$	15.0	15.0

表 A.3 (续)

材料	方程	参数	最小拉尔森-米勒参数 LMP( $^{\circ}\text{S}_{\text{eff}}\text{)}_{\text{m}}$	平均拉尔森-米勒参数 LMP( $^{\circ}\text{S}_{\text{eff}}\text{)}_{\text{a}}$
316 & 316H A213 Type316&316H A271 Type316&316H A312 Type316&316H A376 Type316&316H	1	$A_0$	4.072 728 5E+01	4.147 465 5E+01
		$A_1$	0.0	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-3.377 714 2E+00	-3.374 496 2E+00
		$C_{\text{LMP}}$	15.0	15.0
316L A213 Type316L A312 Type316L	1	$A_0$	4.001 382 1E+01	4.073 449 8E+01
		$A_1$	0.0	-3.718 551 9E-03
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-3.279 506 8E+00	-3.232 797 5E+00
		$C_{\text{LMP}}$	15.0	15.0
321 A213 Type321 A271 Type321 A312 Type321 A376 Type321	1	$A_0$	3.788 681 4E+01	3.989 809 2E+01
		$A_1$	0.0	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-3.104 557 9E+00	-3.123 139 6E+00
		$C_{\text{LMP}}$	15.0	15.0
321H A213 Type321H A271 Type321H A312 Type321H A376 Type321H	1	$A_0$	4.046 384 5E+01	4.212 855 5E+01
		$A_1$	0.0	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-3.825 106 5E+00	-3.841 583 7E+00
		$C_{\text{LMP}}$	15.0	15.0
347 & 347H A213 Type347&347H A271 Type347&347H A312 Type347&347H A376 Type347&347H	1	$A_0$	4.097 819 1E+01	4.168 156 4E+01
		$A_1$	0.0	0.0
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-3.396 708 3E+00	-3.384 426 0E+00
		$C_{\text{LMP}}$	15.0	15.0
合金 800H B407 Alloy 800H	1	$A_0$	4.298 487 6E+01	4.397 204 4E+01
		$A_1$	1.045 320 5E-02	1.104 939 6E-02
		$A_2$	0.0	0.0
		$A_3$	-4.490 729 0E+00	-4.494 288 9E+00
		$C_{\text{LMP}}$	15.0	15.0

表 A.3 (续)

材料	方程	参数	最小拉尔森-米勒参数 LMP("S <sub>eff</sub> ) <sub>m</sub>	平均拉尔森-米勒参数 LMP("S <sub>eff</sub> ) <sub>a</sub>
HK40 A608 Grade HK-40	1	A <sub>0</sub>	4.434 780 6E+01	4.520 167 0E+01
		A <sub>1</sub>	-2.023 662 3E-01	-1.659 335 2E-01
		A <sub>2</sub>	0.0	0.0
		A <sub>3</sub>	-3.779 403 3E+00	-3.801 162 6E+00
		C <sub>LMP</sub>	15.0	15.0
<p>注 1: 方程 1 和方程 2 的一般形式如下:</p> <p>方程 1: <math>LMP("S_{eff}) = A_0 + A_1 (0.145 \times "S_{eff}) + A_2 (0.145 \times "S_{eff})^2 + A_3 \ln(0.145 \times "S_{eff})</math></p> <p>方程 2: <math>LMP("S_{eff}) = \frac{A_0 + A_2 \sqrt{(0.145 \times "S_{eff})} + A_4 (0.145 \times "S_{eff}) + A_5 (0.145 \times "S_{eff})^{1.5}}{1 + A_1 \sqrt{(0.145 \times "S_{eff})} + A_3 (0.145 \times "S_{eff}) + A_5 (0.145 \times "S_{eff})^{1.5}}</math></p> <p>注 2: 评价时, 可选用平均或最小 L-M 参数, 按本表选择相应的计算参数; 再按照方程 1 或方程 2, 计算相应的 LMP("S<sub>eff</sub>)<sub>m</sub> 或 LMP("S<sub>eff</sub>)<sub>a</sub>。</p>				

**附 录 B**  
(规范性附录)  
**脆性断裂倾向评价**

**B.1 总则**

**B.1.1** 本附录规定了碳钢和低合金钢压力容器、压力管道和储罐的脆性断裂倾向评价方法,不适用于锅炉、锅炉外管、储存制冷介质或埋地的常压和低压储罐。

**B.1.2** 出现下列情况之一时(不仅局限于下列情况),需要进行脆性断裂倾向评价:

- a) 开停车、操作工况波动或工况变化,导致金属壁温可能低于最低设计温度;
- b) 需要规定最低水压试验温度时;
- c) 在室温条件下,部件一次总体薄膜拉应力大于 55 MPa,且部件名义壁厚不小于 50 mm;
- d) 在室温条件下,部件一次总体薄膜拉应力大于 55 MPa,且怀疑部件存在脆断倾向的其他情况。

**B.2 符号**

CET —— 临界暴露温度,单位为℃;

$E$  —— 焊接接头系数;

$E^*$  —— 修正的焊接接头系数,  $E^* = \max\{E, 0.80\}$ ;

$E_y$  —— 弹性模量,单位为 MPa;

FCA —— 未来计划运行时间内的腐蚀量,单位为 mm;

LOSS —— 壁厚减薄量,单位为 mm;

MAT —— 最低许用温度,单位为℃;

$P$  —— 评价计算压力,单位为 MPa;

$P^{\max}$  —— 最大允许操作压力,单位为 MPa;

$P_{\text{rating}}$  —— 对应部件最低许用温度 MAT 的压力等级(相当于  $P^{\max}$ ,但对法兰等部件应输入压力等级),单位为 MPa;

$R_{ts}$  —— 应力比;

$T_R$  —— 基于应力比的温度降低值,单位为℃;

$T_s$  —— 储罐壁板金属温度,单位为℃;

$t_g$  —— 控制厚度,单位为 mm;

$t_{\min}$  —— 根据设计规范或标准确定的部件所需最小厚度,单位为 mm;

$t_{\text{nom}}$  —— 名义厚度,单位为 mm;

$[\sigma]$  —— 许用应力,单位为 MPa;

$\sigma^*$  —— 按相应设计规范或标准公式计算的部件最大主应力,单位为 MPa。

**B.3 评价方法限定条件****B.3.1 通用限定条件:**

- a) 原设计满足相关的规范或标准要求;
- b) 材料无材质劣化;
- c) 不承受循环载荷。

**B.3.2 1级评价附加限定条件：**

无流体激冷，即液相或气液两相流以超过 56 °C 温差，瞬间接触金属表面而造成的金属温度快速降低。

**B.3.3 2级评价附加限定条件：**

- a) 方法 A 限于设计许用应力小于或等于 173 MPa 的 ASME 材料制压力容器和压力管道。
- b) 方法 B 限于同时满足以下条件的 ASME 材料制压力管道：
  - 1) 名义厚度不超过 38 mm；
  - 2) CET 不低于 -104 °C；
  - 3) 流体激冷导致的金属壁温不低于 -30 °C；
  - 4) 不存在振动或低温冲击。
- c) 方法 C 限于 ASME 材料制造的常压和常温低压储罐。

**B.4 评价方法和准则**

**B.4.1 免评条件**

以下条件同时满足时，可免于脆性断裂倾向评价：

- a) 材料限于 ASME 中 P-1、P-3、采取了如升压前预热等预防脆断措施的 P-4、P-5，且图 B.1 中曲线 A 的所有部件控制厚度均不超过 13 mm，曲线 B、C、D 的所有部件控制厚度均不超过 25 mm；
- b) 已按照设计规范或标准进行了水压试验；
- c) 设计温度不高于 343 °C，且 CET 不低于 -29 °C，允许由于较低的季节性大气温度引起的偶尔操作温度低于 -29 °C；
- d) 无流体激冷。

**B.4.2 1级评价**

1级评价步骤如下：

- a) 确定 CET。以使用中(包括正常操作、开停车、压力试验)部件最低金属温度作为压力容器 CET 值。当无法获得最低金属温度时，取以下温度的最小值作为 CET 值：
  - 1) 日平均气温的最低值；
  - 2) 介质温度，需考虑减压时因吸热导致的温度下降。
- b) 确定部件 MAT。部件的 MAT 应优先取韧脆转变温度实测值；如果无法获得实测值，对于按照国内标准设计建造的部件，MAT 一般可取设计规范或标准中材料的使用温度下限，但满足“低温低应力工况”的，可按 GB/T 150.3 和 GB/T 20801.2 规定选取 MAT 值；对于按照 ASME 规范设计建造的部件，可根据部件控制厚度(见图 B.2)和材料冲击试验免除曲线，按以下步骤确定部件 MAT 值：
  - 1) 确定部件每个焊接接头的控制厚度  $t_g$ 。每个焊接接头的控制厚度取该焊接接头两侧母材名义厚度的小值。封头的最小成形厚度可以作为母材名义壁厚，管道使用扣除负偏差的壁厚作为母材名义厚度。
  - 2) 确定部件控制厚度  $t_g$ 。 $t_g$  取该部件所有焊接接头控制厚度的大值。
  - 3) 与其他部件焊接连接的平板件，如平盖法兰、平封头或管板部件的控制厚度取  $\max\{\text{平板件厚度的 } 1/4, \min(\text{平板件厚度, 与平板件焊接连接的筒体或接管名义厚度})\}$ 。
  - 4) 与其他部件非焊接连接(如螺栓连接)的平板件，如管法兰、设备法兰、平封头或管板部件的控制厚度取平板件厚度的 1/4。
  - 5) 与其他部件焊接连接的管法兰或设备法兰控制厚度分别取与其焊接连接的接管或筒体名义厚度。



- 6) 根据材料和表 B.1,在图 B.1 中选择适用的曲线。若缺少材质信息,则直接使用曲线 A。应按照 D、C、B、A 的顺序选择材料适用的曲线。
- 7) 根据图 B.1 中适用的曲线和部件控制厚度  $t_g$  确定部件 MAT。法兰 MAT 不低于  $-29\text{ }^\circ\text{C}$ ,控制厚度小于 2.5 mm 的碳钢部件 MAT 取  $-48\text{ }^\circ\text{C}$ 。
- 8) 下列条件全部满足时, MAT 可以降低  $17\text{ }^\circ\text{C}$ :
  - i) 部件由 ASME P1 Group1 & P1 Group2 材料制造;
  - ii) 部件焊接接头厚度小于或等于 38 mm;
  - iii) 部件经过焊后热处理且使用中未因修理改造使得焊后热处理状态发生变化。
- c) 确定设备 MAT 值。取各部件 MAT 的最大值作为设备 MAT 值。壳体、封头、接管、人孔、补强圈、法兰、管板、平盖、裙座和附件按部件分别处理。
- d) 评价准则:若 CET 不低于 MAT,则通过 1 级评价。

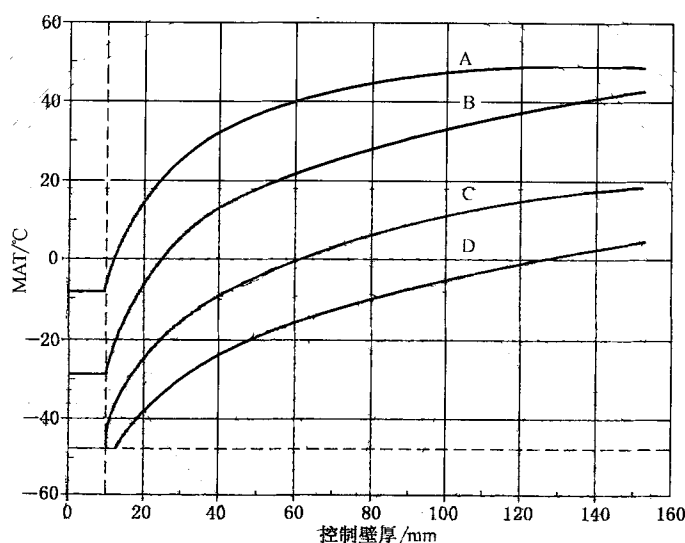


图 B.1 最低许用温度 MAT

注 1: 曲线 A~D 对应材料见表 B.1,曲线方程见表 B.2。

注 2: 曲线 A 在  $-8\text{ }^\circ\text{C}$  处与 MAT 轴相交;曲线 B 在  $-29\text{ }^\circ\text{C}$  处与 MAT 轴相交;曲线 C 和 D 在  $-48\text{ }^\circ\text{C}$  处与 MAT 轴相交。

注 3: 评价管道部件时,曲线 B 向右平移,使控制壁厚为 13 mm 的点对应的温度为  $-29\text{ }^\circ\text{C}$ 。为此,采用实际控制厚度减去 3 mm 作为有效控制厚度来确定 MAT 值。

表 B.1 图 B.1 中曲线对应材料

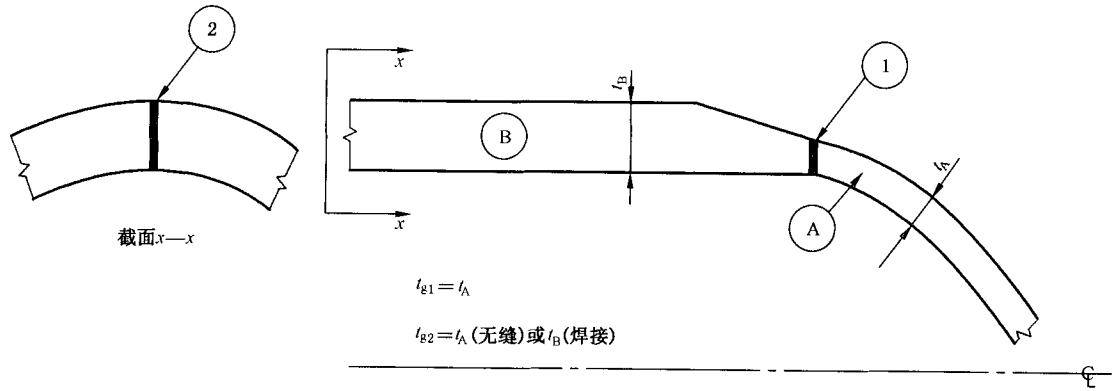
曲线 A	曲线 B
未列入曲线 B、C 和 D 的碳钢和低合金钢板材 SA216 Grade WCB & WCC (50 mm 以上) SA217 Grade WC6	SA285 Grade A & B SA414 Grade A SA515 Grade 60 SA516 Grade 65 & 70 SA612 SA662 Grade B SA216 Grade WCA SA216 Grade WCB & WCC (50 mm 及以下) SA217 Grade WC9 未列入曲线 C 和 D 的管材、管道元件和锻件曲线 A 中除铸件外,若经细化晶粒处理且未列入曲线 C 和 D 的材料 外协的预制或预成形标准件或非标件

表 B.1 (续)

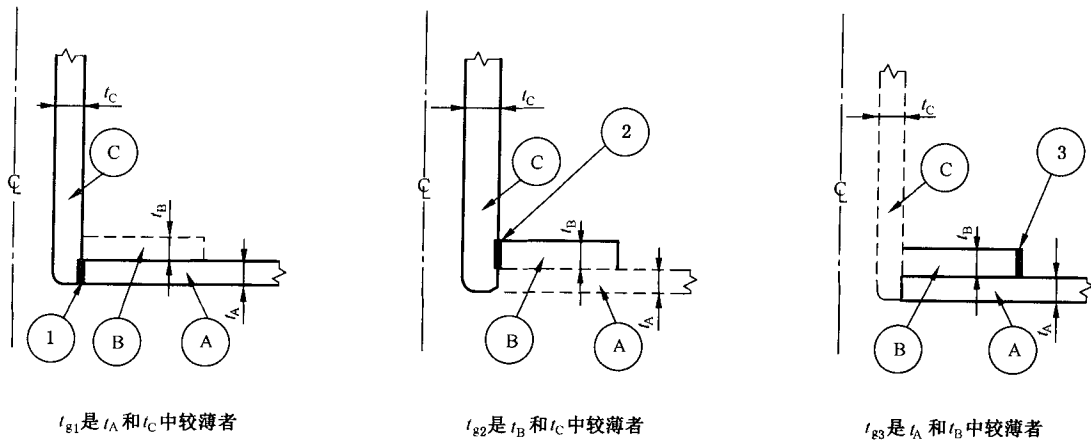
曲线 C	曲线 D
SA516 Grade55&60 SA662 GradeA SA387 Grade21 Class1&2, Grade 22 Class1&2 SA182 F21, F22Class1&3 SA336 F21 Class1&3, F22Class1&3 SA302 GradeC&D SA533 GradeB Class1, 2&3, GradeC Class1, 2&3 曲线 B 中材料, 若经细化晶粒+正火、正火+回火或 淬火+回火处理且未列入曲线 D 的材料	SA508 Grade 1 SA516 Grade55&60 SA516 Grade65&70 SA537 Class 1 SA537 Class 2&3 SA203 Grade A, B&D, E SA203 Grade F SA524 Class 1&2 SA612 SA662 GradeA, B&C SA738 GradeA

表 B.2 图 B.1 中曲线方程

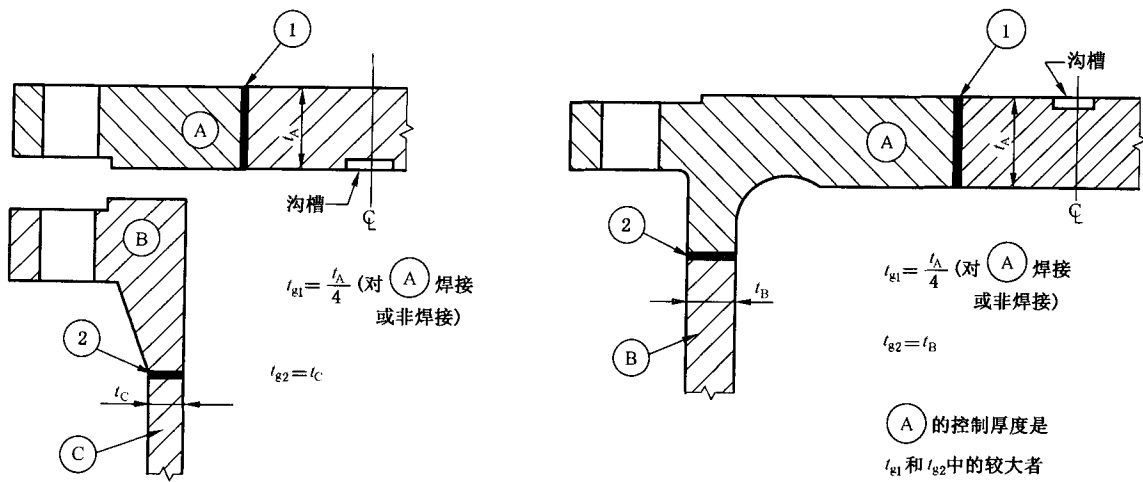
图号	公式
曲线 A	$MAT = -8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 0 \text{ mm} \leq t_R \leq 10 \text{ mm}$ $MAT = \left[ \left( \frac{-76.911 + 11.214 6t_R - 0.042 72t_R^2}{1.0 + 0.070 75t_R - 0.000 277t_R^2} \right) - 32 \right] \times \frac{5}{9} \text{ } (^\circ\text{C}) \quad 10 \text{ mm} \leq t_R \leq 152 \text{ mm}$
曲线 B	$MAT = -29 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 0 \text{ mm} \leq t_R \leq 10 \text{ mm}$ $MAT = \left[ \left( \frac{-135.79 + 34.312t_R^{0.5} + 4.079 9t_R - 1.343 6t_R^{1.5} + 0.114 3t_R^2 - 0.003 24t_R^{2.5}}{1.0 + 0.070 75t_R - 0.000 277t_R^2} \right) - 32 \right] \times \frac{5}{9} \text{ } (^\circ\text{C}) \quad 10 \text{ mm} \leq t_R \leq 152 \text{ mm}$
曲线 C	$MAT = -48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 0 \text{ mm} \leq t_R \leq 10 \text{ mm}$ $MAT = \left[ \left( \frac{101.29 - \frac{6 489.7}{t_R} + \frac{185 715.8}{t_R^2} - \frac{3 218 747}{t_R^3}}{1.0 + 0.070 75t_R - 0.000 277t_R^2} + \frac{28 910 186}{t_R^4} - \frac{103 695 019}{t_R^5} \right) - 32 \right] \times \frac{5}{9} \text{ } (^\circ\text{C}) \quad 10 \text{ mm} \leq t_R \leq 152 \text{ mm}$
B.1	$MAT = -48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 0 \text{ mm} \leq t_R \leq 10 \text{ mm}$ $MAT = \left[ \left( \frac{-92.065 + 3.703 3t_R - 0.061 709t_R^2 + 0.000 591t_R^3}{1.0 + 0.070 75t_R - 0.000 277t_R^2} - 2.810 46 \times 10^{-6} t_R^4 + 5.172 68 \times 10^{-9} t_R^5 \right) - 32 \right] \times \frac{5}{9} \text{ } (^\circ\text{C})$ $13 \text{ mm} \leq t_R \leq 152 \text{ mm}$
曲线 D	$MAT = -48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 0 \text{ mm} \leq t_R \leq 13 \text{ mm}$ $MAT = \left[ \left( \frac{-92.065 + 3.703 3t_R - 0.061 709t_R^2 + 0.000 591t_R^3}{1.0 + 0.070 75t_R - 0.000 277t_R^2} - 2.810 46 \times 10^{-6} t_R^4 + 5.172 68 \times 10^{-9} t_R^5 \right) - 32 \right] \times \frac{5}{9} \text{ } (^\circ\text{C})$ $13 \text{ mm} \leq t_R \leq 152 \text{ mm}$



a) 对接接头部件



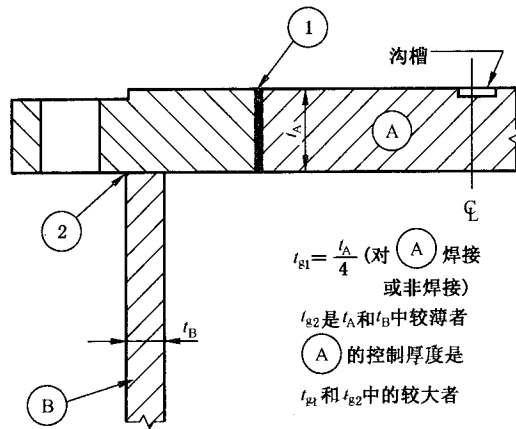
b) 补强板焊接部件



c) 螺栓连接平封头、管板和法兰部件

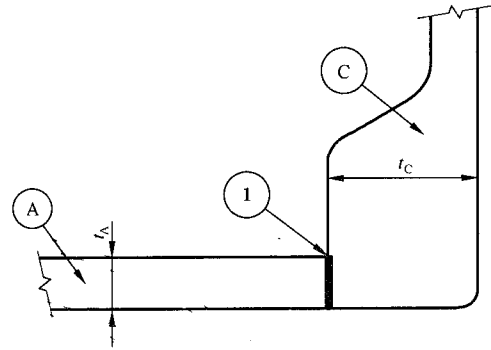
d) 整体平封头或管板部件

图 B.2 部件控制厚度



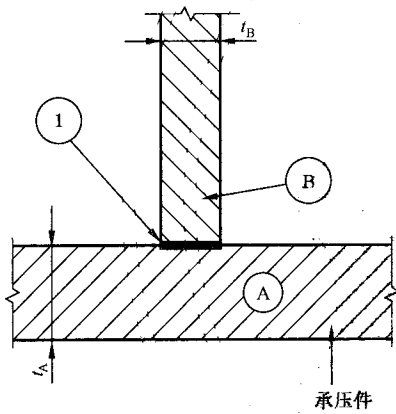
$t_{e1} = \frac{t_A}{4}$  (对 A 焊接或非焊接)  
 $t_{e2}$  是  $t_A$  和  $t_B$  中较薄者  
 A 的控制厚度是  $t_{e1}$  和  $t_{e2}$  中的较大者

e) 角接头平封头或管板部件

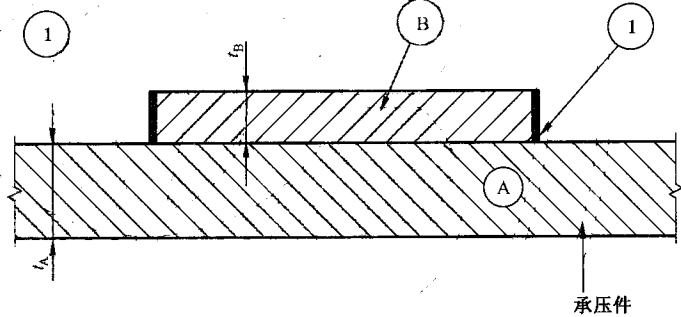


$t_{e1}$  是  $t_A$  和  $t_C$  中较薄者

f) 整体补强焊接部件



$t_{e1}$  是  $t_A$  和  $t_B$  中较薄者



g) T形接头和搭接接头部件

图 B.2 (续)

### B.4.3 2级评价

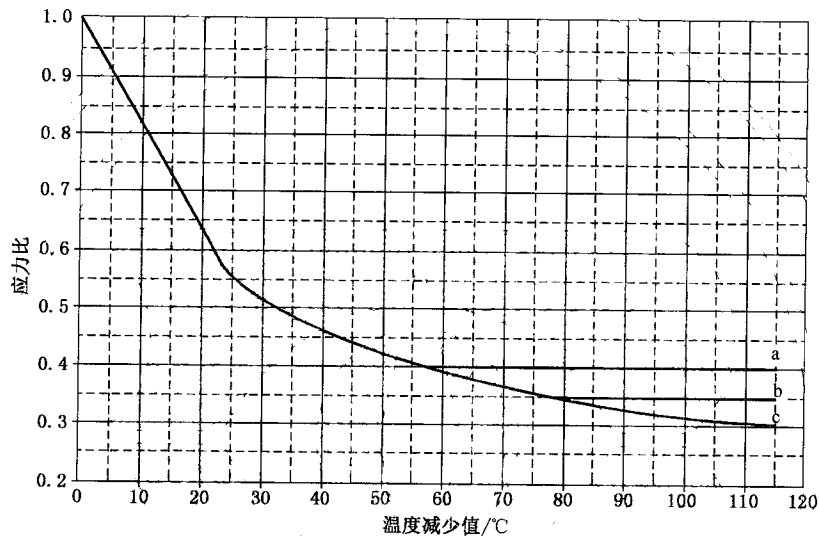
B.4.3.1 根据 B.3.3 适用范围,按照方法 A、B、C 进行评价,其中任一评价通过即通过 2 级评价。

B.4.3.2 方法 A(压力容器、压力管道和低压储罐 2 级评价)按以下进行:

- a) 按 B.4.2 确定 CET;
- b) 按 B.4.2 确定部件 MAT;
- c) 按式(B.1)确定应力比  $R_{ts}$ ;

$$R_{ts} = \begin{cases} \frac{t_{\min} \cdot E^*}{t_R - \text{LOSS-FCA}} & \text{基于厚度} \\ \frac{\sigma^* \cdot E^*}{[\sigma] \cdot E} & \text{基于应力} \\ \frac{P}{P_{\text{rating}}} & \text{基于压力 - 温度等级} \end{cases} \dots\dots\dots (B.1)$$

- d) 根据应力比  $R_{ts}$ , 按图 B.3(曲线方程见表 B.3)确定温度降低值  $T_R$ ;
- e) 根据  $R_{ts}$ 调整 MAT, 若  $R_{ts}$ 值小于或等于图 B.3 中  $R_{ts}$ 临界值, 调整后  $\text{MAT} = -104\text{ }^\circ\text{C}$ ; 若  $R_{ts}$ 值大于图 B.3 中  $R_{ts}$ 临界值, 调整后  $\text{MAT} = \max\{(\text{MAT} - T_R), -48\text{ }^\circ\text{C}\}$ ;
- f) 设备 MAT 值是所有部件 MAT 的最大值;
- g) 评价准则: 若 CET 不低于 MAT, 则通过 2 级评价。



- a) 用于室温下设计许用应力小于或等于 121 MPa 的部件,  $R_{ts}$ 临界值是 0.40。
- b) 用于室温下设计许用应力小于或等于 138 MPa 且大于 121 MPa 的部件,  $R_{ts}$ 临界值是 0.35。
- c) 用于室温下设计许用应力小于或等于 173 MPa 且大于 138 MPa 的部件,  $R_{ts}$ 临界值是 0.30。

图 B.3 碳钢和低合金钢部件 MAT 调整

表 B.3 图 B.3 中曲线方程

图号	公式
B.2	$T_R = [100(1.0 - R_{ts})] \times \frac{5}{9} (^\circ\text{C}) \quad R_{ts} \geq 0.6$
	$T_R = \left[ \frac{-9\,979.57 - 14\,125.0R_{ts}^{1.5} + 9\,088.11e^{R_{ts}} - 17.3893 \frac{\ln R_{ts}}{R_{ts}^2}}{R_{ts}^2} \right] \times \frac{5}{9} (^\circ\text{C}) \quad 0.3 < R_{ts} < 0.6$
	$T_R = 58\text{ }^\circ\text{C} \sim 153\text{ }^\circ\text{C} \quad 0.35 \leq R_{ts} \leq 0.40$
	$T_R = 78\text{ }^\circ\text{C} \sim 153\text{ }^\circ\text{C} \quad 0.30 \leq R_{ts} \leq 0.35$
	$T_R = 111\text{ }^\circ\text{C} \sim 153\text{ }^\circ\text{C} \quad R_{ts} \leq 0.30$

B.4.3.3 方法 B(压力管道 2 级评价)是:按 B.4.2 的 1 级评价方法确定 CET。满足以下条件之一,则管道 2 级评价通过:

- a) 若名义厚度小于或等于 13 mm 且 CET 不低于 -48 ℃；
- b) 无缝管轴向应力不超过 55 MPa, 焊接管轴向和环向应力均不超过 55 MPa。

**B.4.3.4** 方法 C(碳钢材料常压和常温低压储罐 2 级评价)是碳钢材料常压及常温操作的低压储罐若满足以下条件之一, 则通过 2 级评价:

- a) 壁板薄膜应力不超过 55 MPa;
- b) 位于图 B.4(曲线方程见表 B.4)安全区;
- c) 历年来月平均最低气温最低值下储罐达到最大充装高度。

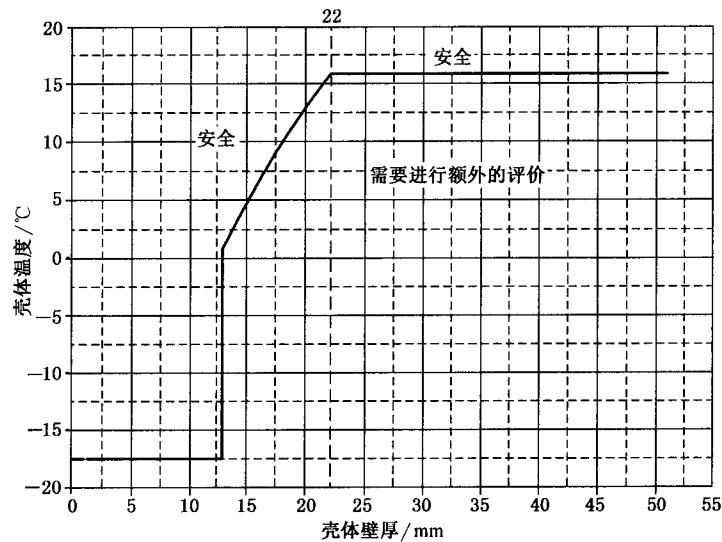


图 B.4 碳钢储罐脆性断裂倾向评价

表 B.4 图 B.4 中曲线方程

图号	公 式
B.4	$T_s = -17.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $0 \text{ mm} < t_{\text{nom}} \leq 13 \text{ mm}$
	$T_s = \left[ \left( 191.03 - 0.000749t_{\text{nom}}^2 - \frac{674.0788}{t_{\text{nom}}^{0.5}} + \frac{1379.329}{t_{\text{nom}}^{1.5}} \right) - 32 \right] \times \frac{5}{9} \text{ (} ^\circ\text{C)}$ $13 \text{ mm} < t_{\text{nom}} < 22 \text{ mm}$
	$T_s = 16 \text{ } ^\circ\text{C}$ $22 \text{ mm} \leq t_{\text{nom}} \leq 51 \text{ mm}$

**B.5 评价结论**

通过评价的承压设备, 只要未来的操作条件不会变得更加苛刻, 且没有导致材料韧性降低或裂纹类缺陷扩展的损伤模式, 则可以继续使用。

## 附录 C

(资料性附录)

## 腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子的确定方法

## C.1 范围

本附录给出了腐蚀疲劳裂纹扩展速率模型中加速因子的确定方法。

## C.2 符号

- $A$  ——疲劳或腐蚀疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  与应力强度因子变化范围  $\Delta K$  关系式中的系数,单位为  $N^{-m} \cdot mm^{(1+3m/2)}$ /次;
- $a$  ——平面缺陷规则化后的表征裂纹尺寸(穿透裂纹的半长、表面裂纹的深度、埋藏裂纹的半高、角裂纹沿接管壁的深度),单位为 mm;
- $b_1 \sim b_5$  ——腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子的拟合常数;
- $C_{env}$  ——腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子;
- $da/dN$  ——疲劳或腐蚀疲劳裂纹扩展速率,单位为 mm/次;
- $f$  ——加载频率,单位为 Hz;
- $m$  ——疲劳或腐蚀疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  与应力强度因子变化范围  $\Delta K$  关系式中的指数;
- $N$  ——载荷循环次数;
- $R_{ts}$  ——应力比;
- $\Delta K$  ——裂纹尖端应力强度因子变化范围,单位为  $N \cdot mm^{-3/2}$ ;
- $\Delta K_{th,corr}$  ——腐蚀疲劳裂纹扩展的应力强度因子变化范围门槛值,单位为  $N \cdot mm^{-3/2}$ 。

## C.3 腐蚀疲劳裂纹扩展速率模型

腐蚀疲劳裂纹扩展速率模型之一是基于材料在大气环境下的普通疲劳裂纹扩展速率模型,引入加速因子对腐蚀性介质的作用进行修正:

$$\frac{da}{dN} = C_{env} \cdot A \cdot (\Delta K)^m \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

- $A, m$  ——材料在大气环境下的普通疲劳裂纹扩展速率模型参数;
- $C_{env}$  ——腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子,由本附录 C.4 的方法确定。

## C.4 腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子的确定方法

## C.4.1 影响腐蚀疲劳裂纹扩展速率的主要因素包括:

- 化学成分、热处理状态、不同金属间的连接等材料因素;
- 介质种类、浓度、pH 值、温度、流量、电化学极化等介质因素;
- 应力比、加载频率、波形等载荷因素。

C.4.2 按照以下步骤确定材料的腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子：

- a) 采用与 GB/T 6398 中大气环境下材料普通疲劳裂纹扩展速率试验相似的预制裂纹试样尺寸和测试方法,测定腐蚀性介质环境下材料的腐蚀疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  和腐蚀疲劳裂纹扩展的应力强度因子变化范围门槛值  $\Delta K_{th, corr}$ 。
- b) 获取相同材料、相同载荷作用、相同温度、大气环境下的普通疲劳裂纹扩展速率模型参数  $A$ 、 $m$ ,由腐蚀疲劳裂纹扩展速率试验数据,采用最小二乘法回归得到腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子  $C_{env}$ 。

C.4.3 腐蚀疲劳裂纹扩展试验测定过程中,应准确地重现或模拟实际服役条件下的材料-介质-载荷体系状况,其中：

- a) 材料方面,应从服役部件上取样,若不是服役部件上的直接取样,试验中应重现或模拟材料的化学成分、热处理状态、不同金属间的连接等情况；
- b) 介质方面,应重现或模拟服役条件下的介质种类、浓度、pH 值、温度、流量、电化学极化等情况；
- c) 载荷方面,应重现或模拟服役条件下载荷的应力比、加载频率、波形等情况。试验中应准确地施加载荷保持时间。

C.4.4 材料在大气环境下的普通疲劳裂纹扩展速率模型参数  $A$  和  $m$ ,可根据 GB/T 6398 由试验测得,或参照 GB/T 19624 取值。按 GB/T 19624 由疲劳裂纹扩展试验数据回归得到的系数  $A$  应乘以一个不小于 4.0 的安全系数。

C.4.5 在材料、介质等其他服役环境相同或相近的情况下,可试验测定不同应力比  $R$  和/或加载频率  $f$  下的腐蚀疲劳裂纹扩展加速因子  $C_{env}$ ,按式(C.2)~式(C.4)进行最小二乘法回归,并在试验参数范围内进行内插法计算,以获得所需应力比和/或加载频率下的加速因子  $C_{env}$ 。

$$C_{env}(R) = \frac{b_1}{(1-R_{1s})^{b_2}} \dots\dots\dots (C.2)$$

$$C_{env}(f) = b_3 \cdot e^{-b_4/f^{b_5}} + 1, \text{其中 } b_3 > 1 \dots\dots\dots (C.3)$$

$$C_{env}(R_{1s}, f) = \frac{b_1}{(1-R_{1s})^{b_2}} \cdot (b_3 \cdot e^{-b_4/f^{b_5}} + 1) \dots\dots\dots (C.4)$$



**附录 D**  
(资料性附录)  
常见材料硬度值范围

常见材料硬度值范围见表 D.1~表 D.2。

**表 D.1 常见碳钢和低合金钢硬度值范围**

序号	国内牌号	国内标准	布氏硬度
1	10	GB/T 9948	95~130
2	20	GB/T 9948	110~158
		NB/T 47008	106~159
3	35	NB/T 47008	136~200
4	07MnMoVR	GB/T 19189	174~212
5	07MnNiVDR	GB/T 19189	174~212
6	07MnNiMoDR	GB/T 19189	174~212
7	08MnNiMoVD	NB/T 47009	171~227
8	08Ni3D	NB/T 47009	123~174
9	09MnNiD	NB/T 47009	118~168
10	09MnNiDR	GB/T 3531	118~163
11	10Ni3MoVD	NB/T 47009	171~227
12	12Cr1MoVR	GB/T 713	118~168
13	12Cr2Mo1R	GB/T 713	139~196
14	12Cr2Mo1	NB/T 47008	136~201
15	12Cr2Mo1V	NB/T 47008	174~229
16	12Cr3Mo1V	NB/T 47008	174~229
17	12Cr1MoV	NB/T 47008	118~180
18	12CrMo	GB/T 9948	110~156
19	12MnNiVR	GB/T 19189	174~212
20	13MnNiMoR	GB/T 713	163~209
21	14Cr1MoR	GB/T 713	138~195
22	14Cr1Mo	NB/T 47008	130~196
23	15CrMo	NB/T 47008	118~180
24	15CrMoR	GB/T 713	120~168
25	15MnNiDR	GB/T 3531	130~180
26	16Mn	NB/T 47008	121~178
27	16MnD	NB/T 47009	128~180
28	16MnDR	GB/T 3531	130~177

表 D.1 (续)

序号	国内牌号	国内标准	布氏硬度
29	18MnMoNbR	GB/T 713	163~209
30	1Cr5Mo	NB/T 47008	174~229
31	20MnMo	NB/T 47008	156~208
32	20MnMoD	NB/T 47009	152~210
33	20MnMoNb	NB/T 47008	185~235
34	20MnNiMo	NB/T 47008	185~235
35	35CrMo	NB/T 47008	185~235
36	1Cr5Mo	GB/T 9948	106~187
37	Q245R	GB/T 713	108~140
38	Q345R	GB/T 713	128~178
39	Q370R	GB/T 713	136~180
40	15CrMo	GB/T 9948	118~170

表 D.2 高合金钢硬度范围

序号	国内统一数字代号	国内牌号	国内标准号	布氏硬度	备注
1	S11306	06Cr13	GB/T 24511	≤205	铁素体不锈钢板
2	S11348	06Cr13A1	GB/T 24511	≤170	铁素体不锈钢板
3	S11972	019Cr19Mo2NbTi	GB/T 24511	≤275	铁素体不锈钢板
4	S21953	022Cr19Ni5Mo3Si2N	GB/T 24511	≤290	双相不锈钢板
5	S22053	022Cr23Ni5Mo3N	GB/T 24511	≤293	双相不锈钢板
6	S22253	022Cr22Ni5Mo3N	GB/T 24511	≤293	双相不锈钢板
7	S30403	022Cr19Ni10	GB/T 24511	≤201	奥氏体不锈钢板
8	S30408	06Cr19Ni10	GB/T 24511	≤201	奥氏体不锈钢板
9	S30409	07Cr19Ni10	GB/T 24511	≤201	奥氏体不锈钢板
10	S31008	06Cr25Ni20	GB/T 24511	≤217	奥氏体不锈钢板
11	S31603	022Cr17Ni12Mo2	GB/T 24511	≤217	奥氏体不锈钢板
12	S31608	06Cr17Ni12Mo2	GB/T 24511	≤217	奥氏体不锈钢板
13	S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti	GB/T 24511	≤217	奥氏体不锈钢板
14	S31703	022Cr19Ni13Mo3	GB/T 24511	≤217	奥氏体不锈钢板
15	S31708	06Cr19Ni13Mo3	GB/T 24511	≤217	奥氏体不锈钢板
16	S32168	06Cr18Ni11Ti	GB/T 24511	≤217	奥氏体不锈钢板
17	S31603	022Cr17Ni14Mo2	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
18	S30403	022Cr19Ni10	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管

表 D.2 (续)

序号	国内统一数字代号	国内牌号	国内标准号	布氏硬度	备 注
19	S30403	022Cr19Ni10	GB/T 14976	≤187	奥氏体不锈钢管
20	S31703	00Cr19Ni13Mo3	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
21	S31608	06Cr17Ni12Mo2	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
22	S31608	06Cr17Ni12Mo2	GB/T 14976	≤187	奥氏体不锈钢管
23	S32168	06Cr18Ni10Ti	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
24	S32168	06Cr18Ni11Ti	GB/T 14976	≤187	奥氏体不锈钢管
25	S31668	06Cr18Ni12Mo2Ti	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
26	S30408	06Cr19Ni10	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
27	S30408	06Cr19Ni10	GB/T 14976	≤187	奥氏体不锈钢管
28	S31708	06Cr19Ni13Mo3	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
29	S31008	06Cr25Ni20	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
30	S30409	07Cr19Ni9	GB/T 13296	≤187	奥氏体不锈钢管
31	S25073	022Cr25Ni7Mo4N	GB/T 21833	≤300	双相不锈钢管

附录 E

(资料性附录)

常见材料国内外牌号对照

E.1 高合金钢钢板国内外牌号对照见表 E.1。

表 E.1 高合金钢钢板国内外牌号对照

序号	中国标准			美国标准(ASME)		欧盟标准(EN)	
	统一数字代号	GB/T 24511—2009 新牌号	GB/T 4237—1992 旧牌号	UNS 代号	型号	数字代号	牌号
1	S11306	06Cr13	0Cr13	S41008	410S	—	—
2	S11348	06Cr13Al	0Cr13Al	S40500	405	—	—
3	S11972	019Cr19Mo2NbTi	00Cr18Mo2	S44400	444	1.453 1	X2CrMoTi18-2
4	S30408	06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	S30400	304	1.430 1	X5CrNi18-10
5	S30403	022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	S30403	304L	1.430 6	X2CrNi19-11
6	S30409	07Cr19Ni10	—	S30409	304H	1.494 8	X6CrNi18-10
7	S31008	06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	S31008	310S	1.495 1	X6CrNi25-20
8	S31608	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	S31600	316	1.440 1	X5CrNiMo17-12-2
9	S31603	022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	S31603	316L	1.440 4	X2CrNiMo17-12-2
10	S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo2Ti	S31635	316Ti	1.457 1	X6CrNiMoTi17-12-2
11	S31708	06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	S31700	317	—	—
12	S31703	022Cr19Ni13Mo3	00Cr19Ni13Mo3	S31703	317L	1.443 8	X2CrNiMo18-15-4
13	S32168	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	S32100	321	1.454 1	X6CrNiTi18-10
14	S39042	015Cr21Ni26Mo5Cu2	—	N08904	904L	1.453 9	X1NiCrMoCu25-20-5
15	S21953	022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	—	—	—	—
16	S22253	022Cr22Ni5Mo3N	—	S31803	—	1.446 2	X2CrNiMoN22-5-3
17	S22053	022Cr23Ni5Mo3N	—	S32205	2205	—	—

E.2 高合金钢钢管国内外牌号对照见表 E.2 和表 E.3。

表 E.2 高合金钢焊接管国内外牌号对照

序号	中国标准			美国标准(ASME)	
	统一数字代号	GB/T 12771—2008 新牌号	GB/T 12771—2000 旧牌号	UNS 代号	型号
1	S30408	06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	S30400	TP304
2	S30403	022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	S30403	TP304L
3	S31608	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	S31600	TP316
4	S31603	022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	S31603	TP316L
5	S32168	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	S32100	TP321

表 E.3 高合金钢无缝管国内外牌号对照

序号	中国标准			美国标准(ASME)	
	统一数字代号	GB/T 21833—2008 新牌号	GB/T 14976—2002 旧牌号	UNS代号	型号
1	S21953	022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	S31500	—
2	S22253	022Cr22Ni5Mo3N	—	S31803	—
3	S22053	022Cr23Ni5Mo3N	—	S32205	—
4	S25073	022Cr25Ni7Mo4N	—	S32750	—

E.3 高合金钢锻件国内外牌号对照见表 E.4。

表 E.4 高合金钢锻件国内外牌号对照

序号	NB/T 47010—2010	JB 4728-2000	美国标准(ASME)	
1	S11306	0Cr13	—	—
2	S30408	0Cr18Ni9	S30400(F304)	F304
3	S30403	00Cr19Ni10	S30403(F304L)	F304L
4	S30409	—	S30109(F304H)	F304H
5	S31008	—	S31009(F310H)	F310H
6	S31608	0Cr17Ni12Mo2	S31600(F316)	F316
7	S31603	00Cr17Ni14Mo2	S31603(F316L)	F316L
8	S31668	0Cr18Ni12Mo2Ti	—	—
9	S31703	—	S31703(F317L)	—
10	S32168	0Cr18Ni10Ti	S32100(F321)	F321
11	S39042	—	N08904(F904L)	—
12	S21953	00Cr18Ni5Mo3Si2	—	—
13	S22253	—	S31803(F51)	—
14	S22053	—	S32205(F60)	—

E.4 工业炉炉管材料国内外牌号对照见表 E.5 和表 E.6。

表 E.5 炉管材料与美国标准(ASTM)对照

国产炉管	美国标准(ASTM)	
	材料	名称、型号或级别
10、20	低碳钢	A161、A192
—	中碳钢	A53 B、A106 B、A210 A-1
12CrMo	C-½Mo	A161 T1、A209 T1、A335 P1
15CrMo	1¼Cr-½Mo	A200 T11、A213 T11、A335 P11
1Cr2Mo	2¼Cr-1Mo	A200 T22、A213 T22、A335 P22

表 E.5 (续)

国产炉管	美国标准(ASTM)	
	材料	名称、型号或级别
1Cr3Mo	2Cr-1Mo	A213 T21、A335 P21、A200 T21
1Cr5Mo	5Cr-½Mo	A200 T5、A213 T5、A335 P5
1Cr5MoSi	5Cr-½Mo-Si	A213 T5b、A335 P5b
1Cr7Mo	7Cr-½Mo	A200 T7、A213 T7、A335 P7
1Cr9Mo	9Cr-1Mo	A200 T9、A213 T9、A335 P9
1Cr9MoV	9Cr-1Mo-V	A200 T91、A213 T91、A335 P91
1Cr19Ni9	18Cr-8Ni	A213、A271、A312、A376 TP304、TP304H
1Cr16Ni12Mo2	16Cr-12Ni-2Mo	A213、A271、A312、A376 TP316、TP316L、TP316H
1Cr18Ni10Ti	18Cr-10Ni-Ti	A213、A271、A312、A376 TP321、TP321H
1Cr19Ni11Nb	18Cr-10Ni-Nb	A213、A271、A312、A376 TP347、TP347H
Cr20Ni32	Ni-Fe-Cr	B407 alloy 800H、alloy 800HT
Cr25Ni20	25Cr-20Ni	A608 HK40

表 E.6 炉管材料国内外牌号对照

序号	HG/T 2601—2011	国外相近的材料牌号			
		美国标准	日本标准	法国标准	英国标准
1	ZG40Ni35Cr25Nb	HP-Nb	—	Manaurite 36X	H39W
2	ZG50Ni36Cr26Co15W5	Supertherm	—	—	—
3	ZG45Ni35Cr27NbW	—	KHR35CW	—	—
4	ZG50Ni45Cr28W5	—	NA22	—	—
5	ZG10Ni32Cr20Nb	—	—	Manaurite 900	Cr32W
6	ZG45Ni35Cr25NbM	HP-NbM	—	Manaurite 36XM	H39WM
7	ZG40Ni35Cr25W4	—	—	—	H34CT
8	ZG30Cr28Ni4	HC30	SCH2	—	—
9	ZG50Cr28Ni6	HD50	SCH11	—	—
10	ZG35Cr28Ni10	HE35	SCH17	—	—
11	ZG30Cr26Ni12	HH30	SCH13	—	—
12	ZG33Cr25Ni14	HH30	SCH13A	—	—
13	ZG35Cr28Ni16	HJ35	SCH18	—	—
14	ZG30Cr25Ni20	HK30	SCH21	—	—
15	ZG40Cr25Ni20	HK40	SCH22	—	—
16	ZG30Ni35Cr21	HN40	SCH19	—	—
17	ZG40Ni35Cr20	—	SCH15	—	—

表 E.6 (续)

序号	HG/T 2601—2011	国外相近的材料牌号			
		美国标准	日本标准	法国标准	英国标准
18	ZG50Ni35Cr17	HT50	SCH15	—	—
19	ZG50Ni39Cr19	HU50	SCH20	—	—
20	ZG10Ni35Cr25Nb	—	—	—	CR39W

E.5 高压锅炉用无缝钢管材料国内外牌号对照见表 E.7。

表 E.7 高压锅炉用无缝钢管材料国内外牌号对照

序号	GB/T 5310—2008	国外相近的材料牌号			
		国际标准(ISO)	欧盟标准(EN)	美国标准 (ASME/ASTM)	日本标准 (JIS)
1	20G	PH26	P235GH	A-1、B	STB 410
2	20MnG	PH26	P235GH	A-1、B	STB 410
3	25MnG	PH29	P265GH	C	STB 510
4	15MoG	16Mo3	16Mo3	—	STBA 12
5	20MoG	—	—	T1a	STBA 13
6	12CrMoG	—	—	T2/P2	STBA 20
7	15CrMoG	13CrMo4-5	10CrMo5-5、13CrMo4-5	T12/P12	STBA 22
8	12Cr2MoG	10CrMo9-10	10CrMo9-10	T22/P22	STBA 24
9	12Cr1MoVG	—	—	—	—
10	12Cr2MoWVTiB	—	—	—	—
11	07Cr2MoW2VNbB	—	—	T23/P23	—
12	12Cr3MoVSiTIB	—	—	—	—
13	15Ni1MnMoNbCu	9NiMnMoNb5-4-4	15NiCuMoNb5-6-4	T36/P36	—
14	10Cr9Mo1VNbN	X10CrMoVNb9-1	X10CrMoVNb9-1	T91/P91	STBA 26
15	10Cr9MoW2VNbBN	—	—	T92/P92	—
16	10Cr11MoW2VNbCu1BN	—	—	T122/P122	—
17	11Cr9Mo1W1VNbBN	—	E911	T911/P911	—
18	07Cr19Ni10	X7CrNi18-9	X6CrNi18-10	TP304H	SUS 304H TB
19	10Cr18Ni9NbCu3BN	—	—	(S30432)	—
20	07Cr25Ni21NbN	—	—	TP310HNB	—
21	07Cr19Ni11Ti	X7CrNiTi18-10	X6CrNiTi18-10	TP321H	SUS 321H TB
22	07Cr18Ni11Nb	X7CrNiNb18-10	X7CrNiNb18-10	TP347H	SUS 347H TB
23	08Cr18Ni11NbFG	—	—	TP347HFG	—