

# 团 体 标 准

T/CASEI ×××-××××

---

## 立式圆筒形钢制焊接储罐结构安全评价导则

Guidelines for Safety Evaluation of Atmospheric Storage Tank Structures

(征求意见稿)

×××× - ×× - ××发布

×××× - ×× - ××实施

---

中国特种设备检验协会发布

## 目 次

前 言 .....	III
引 言 .....	IV
立式圆筒形钢制焊接储罐结构安全评价导则 .....	1
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 符号和缩略语 .....	2
4 总则 .....	3
4 腐蚀减薄评价 .....	4
5 罐体变形评价 .....	7
6 焊缝缺陷评价 .....	9
7 沉降评价 .....	12
8 罐体过火评价 .....	18
附录 A（规范性） 常压储罐应力分析和计算 .....	23
附录 B（规范性） 平面型缺陷参考应力计算 .....	29
附录 C（规范性） 平面型缺陷应力强度因子计算 .....	35

## 前 言

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

本文件由中国特种设备检验协会提出并归口。

本文件负责起草单位：略

本文件参与起草单位：略

本文件主要起草人：略

本文件为首次发布。

# 引 言

本文件按 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定近年来，随着石油储备基地、成品油库区、炼化企业罐区等常压储罐的大规模建设和长周期服役，其结构安全日益受到各方重视。建造期间的原始缺陷、运行期间的腐蚀减薄、结构变形等损伤对储罐安全运行造成了不同程度影响，如不能加以科学评价和处置，势必发生严重后果。但对于储罐缺陷处理的处理方式，又涉及到企业生产运行的安全性、经济性以及可操作性等问题，因此，开展科学合理的缺陷合于使用评价和工况适用性评价工作，既可以使“小毛病”合理存在，又能让“大问题”得到有效治理。但目前国内外对于储罐结构的安全评价方法并不系统，设计规范、检验规范、合于使用评价等标准中均有简要涉及，并未形成系统文件，同时，国内外相关标准规范也主要针对压力容器等承压设备，立式圆筒形钢制储罐检验人员、设备管理人员缺少系统性的技术文件和方法支撑。

本项目针对立式圆筒形钢制焊接储罐，系统梳理并给出罐体腐蚀、变形和焊缝缺陷以及沉降、火灾工况条件下结构安全评价方法，用于储罐检验、管理人员参考执行，对于科学准确开展储罐结构安全评价工作，提高储罐风险分级管控能力以及隐患排查治理水平具有重要意义。

# 立式圆筒形钢制焊接储罐结构安全评价导则

## 1 范围

本文件规定了立式圆筒形钢制焊接储罐腐蚀减薄、结构变形、等安全评定的指标、程序、方法和要求基本原则和流程。

本文件适用于相关安全技术人员开展储罐结构安全评价工作。

## 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。凡是注明日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注明日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- NB/T 11662 -在役常压储罐检验与适用性评价
- GB/T 35013 承压设备合于使用评价
- GB/T 50341 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范
- GB/T 4732.4 压力容器分析设计 第4部分：应力分类方法
- GB/T 50128 立式圆筒形钢制焊接储罐施工规范
- NB/T 47013 承压设备无损检测
- GB/T 228 金属材料 拉伸试验
- GB/T 4161 金属材料 平面应变断裂韧度  $K_{IC}$  试验方法
- GB/T 21143 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法
- GB/T 19624 在用含缺陷压力容器安全评定
- SH/T 3123 石油化工钢制储罐地基充水预压监测规程
- JB/T 10764 无损检测 常压金属储罐声发射检测及评价方法

## 3 术语和定义

### 3.1

#### 常压储罐 **non-pressure vessel**

储存危险化学品的正压力低于 0.1MPa、真空度高于 0.02MPa 的立式圆筒型储罐、地上卧罐、高台架上储罐以及地下、半地下储罐等（例如加油站地下钢制及钢制复合储罐）。冷冻式低温储罐、移动式储罐、缓冲罐、中间罐等除外。

### 3.2

#### 焊缝 **weld**

焊件经焊接后所形成的结合部分。

### 3.3

#### 焊缝缺陷检测 **weld defect detection**

在不损坏检测焊缝的前提下，以物理或化学方法为手段，借助相应的设备器材，按照规定的技术要求，对检测焊缝的内部及表面的结构、性质或状态进行检查和测试。

3.4

**裂纹 crack**

金属原子的结合遭到破坏而形成的新界面所产生的缝隙。

3.5

**气孔 porosity**

熔化的金属在凝固时，其中的气体未能逸出而残留下来所形成的空穴。

3.6

**夹渣 inclusion**

焊缝中混入非金属夹杂或耐火材料所形成的缺陷。

3.7

**一次应力 primary stress**

为满足外载荷及内压与结构整体平衡而产生的应力，其大小主要由外部载荷水平决定，超过一定限值时可能导致整体塑性失稳。

3.8

**二次应力 secondary stress**

由于结构约束、温度变化、焊接收缩等原因，为满足变形协调条件而产生的应力，其大小主要由约束条件决定，一般不直接导致整体塑性失稳。

3.9

**焊接残余应力 welding residual stress**

焊接过程中由于非均匀加热与冷却以及焊接收缩而在焊缝及其附近区域形成的、在外载荷解除后仍然存在的自平衡应力。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

$B$  —— 罐底板变形最大凸起高度或局部凹陷深度，mm；

$D$  —— 储罐直径，m；

$D_0$  —— 罐底板变形凸起区域或局部凹陷内切圆的直径，m；

$G$  —— 介质的最大相对密度；

$H$  —— 高度，当评价某层罐壁时，指该层罐壁的底部边缘到最高允许液位高度，当评价某层壁板腐蚀区域时指罐壁腐蚀区  $L$  的底部边缘到最高允许液位高度，m；

$K$  —— 载荷组合系数；

$L$  —— 临界长度，在局部不连续处环向应力假定为“平均值”的最大铅垂长度，mm；

$P$  —— 规定的设计压力，MPa；

$P_b$  —— 一次弯曲应力，MPa；

$P_L$  —— 一次局部薄膜应力，MPa；

$P_m$  —— 一次总体薄膜应力，MPa；

$Q$  —— 二次应力，MPa；

$R_{eL}$  —— 材料的屈服强度，MPa；

- $R_{el}^t$  —— 材料在指定温度下的屈服强度，MPa；  
 $R_m$  —— 材料的标准抗拉强度下限值，MPa；  
 $S_I$  —— 一次总体薄膜当量应力，MPa；  
 $S_{II}$  —— 一次局部薄膜当量应力，MPa；  
 $S_{III}$  —— 一次薄膜（总体或局部）加一次弯曲当量应力，MPa；  
 $S_{IV}$  —— 一次加二次应力范围的当量应力，MPa；  
 $S_{alt,k}$  —— 第  $k$  种等幅循环的交变当量应力幅，MPa；  
 $\Delta S_{c,k}$  —— 第  $k$  种等幅循环中总应力范围的当量应力，MPa；  
 $S_m^t$  —— 材料在指定温度下的许用应力，MPa；  
 $S_{PL}$  —— 一次局部薄膜当量应力  $S_{II}$ 、一次薄膜（总体或局部）加一次弯曲当量应力  $S_{III}$  的许用极限，MPa；  
 $S_{PS}$  —— 一次加二次应力范围的当量应力  $S_{IV}$  的许用极限，MPa；  
 $S_{Qm}$  —— 二次薄膜热应力范围当量应力的许用极限，MPa；  
 $S_{Qmb}$  —— 二次薄膜加弯曲热应力范围当量应力的许用极限，MPa；  
 $T$  —— 储罐运行时间间隔（到下一次检验的时间），年；  
TOFD —— 衍射时差法超声检测（Ultrasonic time of flight diffraction technique）；  
 $t$  —— 第一层罐壁原始厚度，单位为毫米（mm）；  
 $t_c$  —— 经检验维修后罐底板当前最小剩余厚度，mm；  
 $t_f$  —— 罐底板未来（T 结束时）的最小剩余厚度，mm；  
 $t_{min}$  —— 按强度要求计算出的罐壁最小允许厚度，mm；  
 $t_1$  —— 腐蚀区域内的最小平均厚度，mm；  
 $t_2$  —— 腐蚀区域内的最小剩余厚度（点蚀/凹坑部位除外），mm；  
 $t_{avg}$  —— 平均厚度，mm；  
 $U$  —— 所有载荷循环的累积使用系数；  
 $V_c$  —— 罐底板最大计算腐蚀速率，mm/a；  
 $\Delta Q_m$  —— 二次薄膜应力范围的当量应力，MPa；  
 $\Delta Q_{mb}$  —— 二次薄膜加弯曲热应力范围的当量应力，MPa；  
 $\sigma_1$  —— 在方向 1 的主应力，MPa；  
 $\sigma_2$  —— 在方向 2 的主应力，MPa；  
 $\sigma_3$  —— 在方向 3 的主应力，MPa；  
 $[\sigma]$  —— 最大许用应力，MPa；  
 $\varphi$  —— 焊接接头系数。

## 5 总则

5.1 采用本文件进行储罐安全评价除应遵循本文件的规定外，还应遵守国家有关部门颁布的相关法律、法规和规章。

5.2 应根据安全评价的要求，对被评价对象可能存在的各种缺陷、材料和结构等合理选择有效的检验检测方法和仪器设备进行全面的检测并确保检测数据的准确、真实、可靠。

5.3 进行储罐安全评价的人员，应对评价结论的正确性负责。

## 6 腐蚀减薄评价

### 6.1 罐顶腐蚀评价

#### 6.1.1 一般规定

罐顶评价应符合以下要求：

- a) 当罐顶腐蚀严重时，应对罐顶进行整体强度和稳定性校核；
- b) 对有开裂、穿孔或到下次检验之前腐蚀程度可能达到任意 600cm<sup>2</sup> 面积上平均剩余厚度小于 2.3mm 的区域，应进行修补或更换相应板块。
- c) 任意 200mm 长度上分散的蚀坑总长度小于 50mm，蚀坑深度不小于 1.3mm 可忽略不计（有可靠措施确保腐蚀不再继续发生的）。

#### 6.1.2 固定顶

对于损坏或腐蚀、变形明显的支撑件(如支柱)应单独进行评价，必要时进行修补或更换。支撑件评价可根据 GB/T 350136 中均匀腐蚀或局部腐蚀，以及 GB/T 503416 等效截面尺寸等相关内容进行评价。

#### 6.1.3 浮顶

浮顶评价应符合以下要求：

- a) 对于点蚀/坑蚀部位应单独评价，点蚀评价应依据 GB/T 35013-2018 中点腐蚀进行 1 级评价或 2 级评价，对于在下一检验之前可能导致穿孔的点蚀/坑蚀部位应予维修或更换；
- b) 对浮顶支撑系统、边缘密封系统、附件(如转动浮梯及轨道)、导向及限位装置、排水系统和自动通气阀等进行评价，以确定是否需要维修或更换。

## 6.2 罐壁评价

### 6.2.1 一般规定

罐壁评价应符合以下要求：

- a) 对可能影响罐壁功能或结构完整性的腐蚀、劣化或损伤均应进行评价；
- b) 罐壁均匀腐蚀、局部腐蚀和点蚀/坑蚀应分别进行评价；
- c) 到运行期末，如果罐壁腐蚀可能超出腐蚀裕量，应评价剩余厚度是否适于继续服役；
- d) 当罐壁剩余厚度不能满足最小厚度要求时，可以修补腐蚀或损坏的区域、降低储罐的运行高度等方法进行处置或进行合于使用评价；
- e) 罐壁适于继续运行的最小厚度的计算方法见 4.2.2。

### 6.2.2 罐壁最小厚度的计算

罐壁最小厚度的计算应符合以下要求。

a) 当罐体直径小于或等于 60m 时，罐壁最小允许厚度按公式（1）和公式（2）计算：

1) 某层罐壁整个壁板的最小允许厚度  $t_{min}$ ：

$$t_{min} = \frac{4.9D(H-0.3)G}{[\sigma]\phi} \dots\dots\dots (1)$$

2) 某层罐壁任意其他位置的最小允许厚度：

$$t_{min} = \frac{4.9DHG}{[\sigma]\phi} \dots\dots\dots (2)$$

公式(2)中当罐壁任意位置距焊缝距离超过 25.4mm 或 2 倍公称壁厚时,  $\phi=1$ 。

按公式(1)或公式(2)计算出来的罐壁厚度仅考虑了在介质载荷下的强度要求, 条件适用时, 还应考虑风力载荷(稳定性)、地震载荷等附加载荷; 任何情况下,  $t_{\min}$  取值不小于 2.6mm。

b) 当罐壁实际厚度不满足最小允许厚度要求时, 应按公式(1)或公式(2)反算出最高允许使用液位。

注: 实际厚度包含到下次检验前的腐蚀裕量。

c) 当罐体直径大于 60m 时, 应采用变设计点法或分析设计法进行计算。罐壁厚度的变设计点法计算按 GB 50341 的规定执行。

### 6.2.3 剩余厚度的确定

应按以下三种情况进行剩余厚度确定。

a) 在存在大面积腐蚀区域时(均匀腐蚀或局部腐蚀), 按下述步骤确定每层罐壁的剩余厚度, 求平均值(见图 1)。

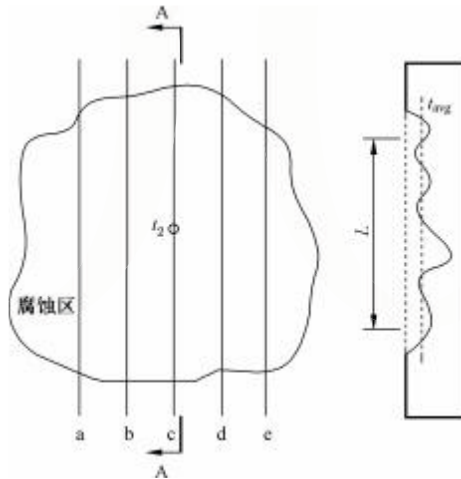
1) 确定每个腐蚀区域内的最小厚度  $t_2$ (分散的点蚀/凹坑除外)。

2) 按公式(3)计算临界长度  $L$ 。

$$L = 33.8\sqrt{Dt_2} \dots\dots\dots (3)$$

$L$  最大值取 1000mm, 腐蚀区的实际铅垂长度可能超过  $L$ 。

将腐蚀区域至少分成 5 个等间距的铅垂平面, 用目视检测或其他方法判定该区域中哪些铅垂平面受腐蚀影响最大。在每个铅垂平面长度  $L$  的范围内测定其平均厚度  $t_{\text{avg}}$ , 各个铅垂面平均厚度的最小值即最小平均厚度  $t_1$ 。



标引序号说明:

a~e —— 检验员选定的检验铅垂平面。

$t_2$  为不包括点蚀/坑蚀的整个区域的最小厚度。

图 1 腐蚀区域的检验

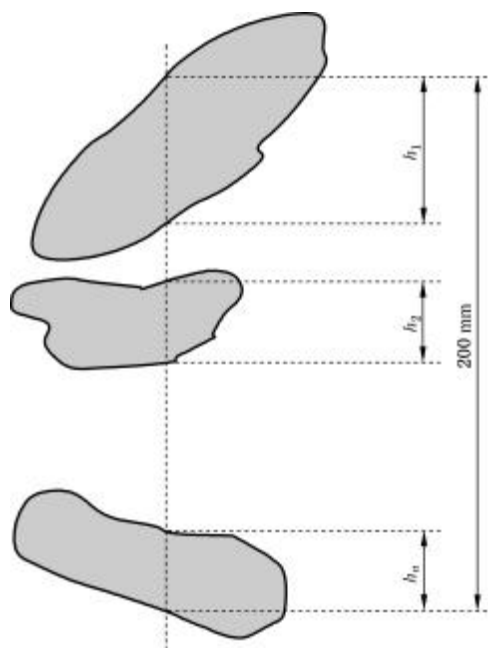
3) 当  $t_1 \geq t_{\min}$  且  $t_2 \geq 0.6t_{\min}$  时储罐可以继续运行。

b) 在满足下述条件时, 分散的点蚀/坑蚀可忽略不计:

1) 点蚀/坑蚀形成的剩余壁厚不小于罐壁最小可接受厚度的 1/2(不含腐蚀裕量);

2) 在任意 200mm 长度的铅垂线上腐蚀的总长度  $\Sigma h_i \leq 50\text{mm}$ (见图 2)。

c) 点蚀超过 b) 规定的程度时, 按 GB/T35013 中点蚀进行 1 级评价或 2 级评价。



标引序号说明：

$h_1, h_2, \dots, h_n$  —— 腐蚀区高度。

图 2 腐蚀凹坑的测量

#### 6.2.4 罐壁焊缝腐蚀

罐壁焊缝上存在点腐蚀时可按照凹坑理论进行评价或 GB/T 35013 中点腐蚀进行 1 级评价或 2 级评价（不考虑焊接接头系数），罐体大范围存在局部腐蚀或均匀腐蚀，评定部位刚好位于焊缝的按 6.2.2 公式（2）进行评价。

### 6.3 罐底评价

#### 6.3.1 一般规定

中幅底板、边缘底板应分别进行评价。到运行期末，底板各部分的实际剩余厚度均不应小于最小允许厚度。如果剩余厚度小于最小允许厚度，则应在罐底板增加衬里、修补、更换相应的罐底板或缩短储罐的运行周期(检验间隔时间)；实施声发射检测的，执行 JB/T 10764 的规定。

#### 6.3.2 罐底板的剩余厚度计算

一般可按公式(4)计算到下次检验前整个或部分罐底板最小剩余厚度：

$$t_f = t_c - T \times v_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

注：罐底板的腐蚀包括均匀腐蚀、局部腐蚀和点蚀。

#### 6.3.3 罐底板的最小允许厚度

6.3.3.1 任意情况下罐底板最小厚度不应小于表 1 规定。

表 1 罐底板最小允许厚度

下次检验前罐底板最小厚度/mm	储罐罐底/基础设计
2.6	储罐罐底/基础设计没有探测和抑制罐底渗漏的设施
1.3	储罐罐底/基础设计有探测和抑制罐底渗漏的设施
1.3	储罐罐底设置有加强衬里，厚度大于 1.3mm

6.3.3.2 边缘板均匀减薄或局部减薄的最小允许厚度如下：

- a) 边缘板最小厚度不应小于 2.6mm；
- b) 当储液相对密度小于 1.0 时，到运行周期末边缘板最小厚度不应小于表 2 的规定。

表 2 环形边缘板最小允许厚度(一)

第一层罐壁原始厚度 $t^a$ /mm	第一层罐壁的应力 $\delta^b$			
	$\leq 168$	$\leq 186$	$\leq 205$	$\leq 223$
$t \leq 19$	4.3	5.1	5.8	D.2
$19 < t \leq 25$	4.3	5.6	7.9	9.7
$25 < t \leq 32$	4.3	6.6	9.7	12.2
$32 < t \leq 38$	5.6	8.6	12.0	15.0
$t > 38$	6.9	10.2	13.5	17.3

<sup>a</sup> 指储罐建造时的厚度。  
<sup>b</sup> 壁板内的应力值按  $\delta=4.41D(H-0.3)/t$  计算。

- c) 当储液相对密度大于或等于 1.0 时，到运行周期末边缘底板最小厚度不应小于表 3 规定。

表 3 环形边缘板最小允许厚度(二)

第一层罐壁原始厚度 $t^a$ /mm	第一层罐壁的应力 $\delta^b$			
	$\leq 190$	$\leq 210$	$\leq 220$	$\leq 250$
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 40$	8	11	14	17
$40 < t \leq 45$	9	13	16	19

<sup>a</sup> 第一层罐壁厚度指产品设计工况下的公称厚度减去腐蚀余量或水压试验工况下的公称厚度中的较大者。  
<sup>b</sup> 采用的应力是第一层壁板最大应力(产品设计或水压试验工况下应力较大者)。应力通过所需厚度除以第一层罐壁厚度  $t$ ，再乘以适用的许用应力来确定。

6.3.3.3 关键区域均匀减薄或局部减薄的最小厚度应为罐底板原始厚度（不含腐蚀裕量）的 1/2 或者按公式（1）计算得到的最下层罐壁  $t_{\min}$  的 1/2 中的较小者。

6.3.3.4 关键区域之外底板点蚀除满足 6.3.3.1 要求之外，可按 GB/T 35013 中点蚀进行 1 级评价或 2 级评价，关键区域点蚀导致厚度不足 6.3.3.3 规定的可按 GB/T 35013 采用应力分类进行 3 级评价。

## 7 罐体变形评价

### 7.1 一般规定

7.1.1 本章规定了常压储罐罐体变形的评价方法，包括垂直度、圆度和局部变形的评价。

7.1.2 罐体变形采用两级评价方式，一级评价应按本章 7.2、7.3 和 7.4 规定进行。当一级评价未通过时，应采用 7.5 规定的方法进行二级评价。

### 7.2 垂直度评价

7.2.1 采用经纬仪、全站仪或其他等效测量仪器，测量储罐罐壁顶部和底部的周向坐标。计算罐壁顶部外表面中心线对罐底外表面中心线的最大水平偏移量，并减去由于壁板厚度变化导致的偏差，得到实际垂直度偏差。

7.2.2 垂直度测量应在罐体周向均匀选取至少 4 个测点，计算每个测点的垂直度偏差，取其中的最大值作为该储罐的垂直度。

7.2.3 垂直度应满足以下要求：

- a) 罐壁垂直度的偏差不应大于罐壁高度的 1%，且不应大于 127 mm；
- b) 对于内浮顶油罐，垂直度偏差不应大于罐壁高度的 0.5%，且不应影响浮盘正常运行。

7.2.4 垂直度测量结果应记录在检测报告中，包括测量位置、测量值和偏差值。

### 7.3 圆度评价

7.3.1 使用激光测距仪、全站仪或其他等效测量仪器，在罐体底部周向均匀测量多个点的半径，计算实际半径与理论半径的偏差。

7.3.2 在罐壁与罐底之间焊缝向上 0.3 m 处测量的半径偏差应符合表 1 的规定。0.3 m 以上处测量的半径偏差不得超过表 4 规定值的 3 倍。

表 4 底圈壁板内表面半径允许偏差

储罐直径 m	半径公差 mm
$D \leq 12.5$	$\pm 13$
$12.5 < D \leq 45$	$\pm 19$
$45 < D \leq 76$	$\pm 25$
$D > 76$	$\pm 32$

7.3.3 圆度测量结果应记录在检测报告中，包括测量位置、测量值和偏差值。

### 7.4 局部变形评价

7.4.1 采用三维激光扫描仪、形状测量仪或其他等效测量设备，对罐壁和罐底进行扫描或特征点测量，获取表面形貌数据。

7.4.2 局部变形应满足以下要求：

- a) 罐壁的局部凹凸变形应平缓，不应有突然起伏，并应符合表 5 的要求。

表 5 罐壁局部凹凸变形允许值

壁板厚度 mm	罐壁局部凹凸变形 mm
$t \leq 12$	$\leq 15$
$12 < t \leq 25$	$\leq 13$
$t > 25$	$\leq 10$

b) 罐底局部变形量  $B$  不应大于  $15.4D_0$ （其中  $B$  为局部变形量，单位为 mm； $D_0$  为变形部位内切圆直径，单位为 m）；

7.4.3 局部变形测量结果应记录在检测报告中，包括测量位置、变形量和变形状况描述。

### 7.5 二级评价

7.5.1 当变形参数超过本章 7.2、7.3 和 7.4 规定的限值时，应采用下列方法之一进行二级评价：

- a) 应力分析法;
- b) 其他经验证的评价方法。

7.5.2 采用数值仿真方法开展应力分析时,应包括以下步骤:

- a) 建立储罐评价数值仿真模型,并根据实际情况合理施加约束条件和荷载;
- b) 将检测得到的边界数据,如基础沉降量等导入评价模型,模拟实际变形状态;
- c) 分析模型在变形状态下的应力、应变分布情况,参照 GB/T 4732.4-2024 判断变形是否满足安全要求;
- d) 评估变形对储罐整体结构安全的影响,并提出相应的处理建议。

## 8 焊缝缺陷评价

### 8.1 一般原则

8.1.1 本文件规定的评价对象主要为常压储罐罐壁的纵向、环向焊缝和罐壁与罐底板的大角焊缝。

8.1.2 常压储罐焊缝缺陷安全评价应包含对评价对象的状况调查、焊缝缺陷检测、缺陷成因分析、失效模式判断、材料检验、应力分析、必要的实验与计算,最后根据标准规定内容对焊缝缺陷的安全性或适用性进行综合分析和评价。

### 8.2 基础资料及数据

#### 8.2.1 常压储罐原始设计数据

用于计算应力强度因子和基于焊缝缺陷位置几何形状参考应力解。

#### 8.2.2 常压储罐验收资料

用于焊缝缺陷安全评价的参考资料,包括材料数据、焊接记录、返修记录、检验记录和相关试验报告等。

#### 8.2.3 常压储罐运行和维修资料

用于确定焊缝缺陷处最有可能的失效模式和可能的补救措施,包括储罐压力、运行温度、载荷特点、无损检测记录、故障记录和维修报告等。

#### 8.2.4 焊缝缺陷处由载荷引起的应力

包括一次应力、二次应力和残余应力(按二次应力考虑)。

#### 8.2.5 材料的化学成分和力学性能

包括储罐母材和焊缝的化学成分、弹性模量、泊松比、屈服强度、抗拉强度和断裂韧性等。

#### 8.2.6 焊缝缺陷信息

包括焊缝缺陷的位置、类型、几何形状、方向和相互作用等。

### 8.3 焊缝缺陷安全评价中的必要工作

#### 8.3.1 焊缝缺陷检测

首先,应根据安全评价的要求,对常压储罐结构中可能存在的焊缝缺陷进行合理、全面、有效的检测,并确保焊缝缺陷检测结果准确、真实、可靠。

对于常压储罐罐底、罐壁、罐顶和其他部位焊缝无损检测方法、要求和合格标准,可参照 GB/T 50128《立式圆筒形钢制焊接储罐施工规范》和 NB/T 47013《承压设备无损检测》等相关规定执行。

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

### 8.3.2 焊缝缺陷的表征

#### 8.3.2.1 平面型缺陷的表征

在进行常压储罐焊缝缺陷安全评价时，一般应对实测的平面型缺陷进行规则化表征处理，根据具体情况将平面型缺陷表征为规则的裂纹状表面缺陷、埋藏缺陷或穿透缺陷，表征后的裂纹形状为椭圆形、圆形、半椭圆形或矩形。裂纹状焊缝缺陷尺寸的表征一般包括裂纹长度  $2c$  和裂纹深度  $a$  两个关键几何参量，各种情形下平面缺陷的表征方法详见 GB/T 19624《在用含缺陷压力容器安全评定》5.3.1 节。

#### 8.3.2.2 体积型缺陷的表征

同样，单个凹坑缺陷、多个凹坑缺陷、气孔和夹渣缺陷的表征方法详见 GB/T 19624《在用含缺陷压力容器安全评定》5.3.2 节。

### 8.3.3 应力分析

在对常压储罐焊缝缺陷进行安全评价时，应力分析是必不可少的一步。应力分析应考虑各种可能的载荷（如储罐静载荷、设计压力、地震载荷、风载荷、雪载荷等）和其组合情况，并根据具体失效模式的安全评价需要和评价方法，采用成熟、可靠的方法（包括但不限于经验公式法、有限元等数值分析方法）确定评价中所需的应力。一般情况下，常压储罐结构和裂纹缺陷处的应力分析可参照本标准附录 A、B 和 C 进行。

### 8.3.4 材料力学性能数据的获取

在对常压储罐焊缝缺陷进行安全评价时，应按照相关标准规范（如 GB/T 228《金属材料 拉伸试验》、GB/T 4161《金属材料 平面应变断裂韧度 K<sub>IC</sub> 试验方法》、GB/T 21143《金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法》等）对储罐结构的母材和焊缝材料性能进行测试。并应充分考虑材料性能数据的分散性并按偏于保守的原则确定所需的材料性能数值。评价计算时，应保证缺陷尺寸、应力和材料性能等数据单位的一致性。

### 8.3.5 安全评价方法选取

应根据常压储罐焊缝缺陷检测结果、缺陷处应力分析结果和材料力学性能数据，针对不同的焊缝缺陷类型和材料状态选取相对应的安全评价方法，如平面缺陷 1 级、2 级和 3 级评价方法、体积型缺陷（凹坑、气孔和夹渣）评价方法。

### 8.3.6 安全评价数据计算

应根据不同安全评价方法中所需的评定点数据计算安全评价数据，安全评价数据一般包含所评估焊缝缺陷部位的载荷比和断裂比，一般通过焊缝缺陷部位的应力分析结果和材料力学性能数据计算获取，详细的计算方法随焊缝类型、缺陷类型和材料类型等因素而改变。

### 8.3.7 焊缝缺陷安全性评价

将计算得到的焊缝缺陷安全评价数据点与评价准则（失效评定曲线或安全阈值点）对比，若安全评价数据点满足评价准则，则认为该焊缝缺陷经评价是安全的或可接受的；否则，认为该焊缝缺陷不能保证安全或认为其不可接受。

### 8.3.8 评价报告撰写

评价完成后，用户应依据相关规章制度及时出具完整的评价报告，并给出具体、明确的评价结论。其中，评价报告应至少包含以下内容：

- a) 评价对象的原始设计、制造、安装、验收、运行和维修等基本情况和数据；
- b) 焊缝缺陷检测方法和数据；

- c) 储罐母材和焊缝材料性能数据;
- d) 储罐结构和焊缝缺陷处的载荷、应力及应力分布状况;
- e) 所选用的评价方法和评价过程记录表;
- f) 评价结论和建议。

#### 8.4 焊缝缺陷安全评价方法

根据常压储罐焊缝缺陷类型和评价准则的不同,评价方法可分为两大类、五小类:

##### 8.4.1 平面型缺陷评价方法:

###### 8.4.1.1 一级评价方法

在同时满足下列条件时,焊缝裂纹状缺陷可采用评估曲线简化方法进行一级评价:

- a) 储罐壁板或底板厚度不超过 38 mm;
- b) 评估对象的最大裂纹长度不超过 200 mm;
- c) 评价工况下缺陷部位以薄膜应力为主,对承受显著弯曲应力或其他附加载荷的部件,不宜采用一级评价方法,应采用平面缺陷二级或三级评价方法进行评定。

在满足上述条件时,可按照 API 579 第 9.4.2 条的有关规定对常压储罐焊缝裂纹状缺陷进行一级评价,判定其安全性或适用性。

###### 8.4.1.2 二级评价方法

二级评价方法适用于下列情况之一的裂纹状缺陷:

- a) 缺陷处一次应力和二次应力作用较为复杂,弯曲应力占有较大比例;
- b) 不满足一级评价方法的适用条件,但可获得较完整的载荷和材料性能数据。

二级评价方法应在掌握储罐母材和焊缝材料性能以及载荷条件详细信息的基础上,通过应力分析确定焊缝缺陷位置的应力状态。缺陷处应力可依据本文件附录 A 给出的经验公式或数值分析方法获得。

二级评价可按照 API 579 第 9.4.3 条的有关规定执行,并结合本文件附录 A 中规定的方法,对常压储罐焊缝裂纹状缺陷的安全性或适用性进行评价。与一级评价相比,二级评价可对焊缝裂纹缺陷的安全性作出更为合理的评估。

###### 8.4.1.3 三级评价方法

平面型缺陷三级评价方法为精细评价方法,适用于下列情况:

裂纹状缺陷不符合一级或二级评价方法的适用条件;

二级评价结果接近失效评定曲线边界,需要进一步提高评价精度;

可获得较完备的材料真实应力-应变数据和结构应力分析结果。

三级评价方法可采用改进失效评定图方法、基于断裂力学的评价方法或基于有限元分析的评价方法等。评价时宜结合具体工程情况和评价人员专业能力合理选取。具体评价流程可按照 API 579 第 9.4.4 条的有关规定执行。

##### 8.4.2 体积型缺陷评价方法

###### 8.4.2.1 凹坑缺陷评价方法

在对凹坑缺陷进行安全性评价前,应将被评定缺陷处局部打磨成表面光滑、过渡平缓的凹坑,并确认凹坑区域及其周围不存在其他表面缺陷或埋藏缺陷。凹坑缺陷评价宜按下列步骤进行:

步骤 1——凹坑缺陷表征;

- 步骤 2——凹坑缺陷部位结构尺寸参数确定；
- 步骤 3——储罐焊缝及附近材料性能数据确定；
- 步骤 4——是否免于评定判别；
- 步骤 5——塑性极限载荷和最高容许工作压力的确定；
- 步骤 6——焊缝凹坑缺陷安全性评价。

各种情形下参数的具体计算方法可按照 GB/T 19624《在用含缺陷压力容器安全评定》第 5.8 条执行。

#### 8.4.2.2 气孔和夹渣缺陷评价方法

对于暴露于储罐焊缝表面的气孔和夹渣，可通过打磨或割除重焊等方式予以消除。打磨形成的凹坑应按 8.4.2.1 的规定作为凹坑缺陷进行安全评价。

对于在服役期间可能产生裂纹并扩展的气孔和夹渣，应按 8.4.1 的平面型缺陷评价方法进行评价。

其他情形下，气孔和夹渣缺陷的评价可按照 GB/T 19624《在用含缺陷压力容器安全评定》有关规定执行。

### 9 沉降评价

储罐沉降分为基础沉降、罐壁沉降（平面沉降和非平面沉降）、底板沉降（整体凹陷和局部凹陷）、罐底边缘沉降。

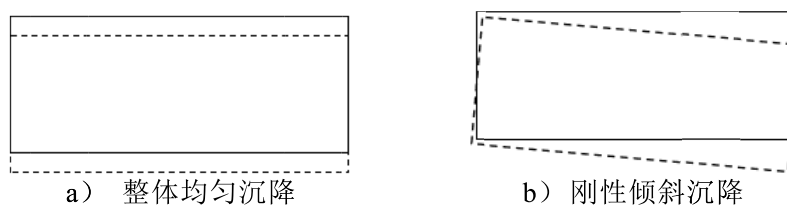


图 3 罐壁沉降

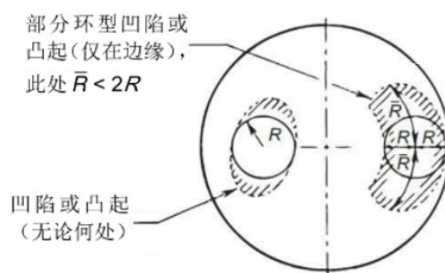


图 4 底板局部凹陷

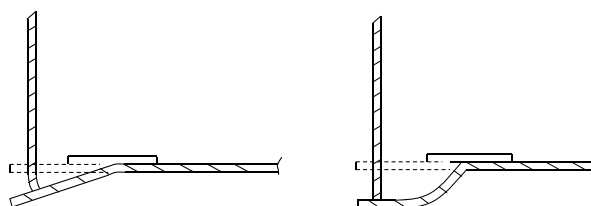


图 5 罐底边缘沉降示意图

#### 9.1 基础沉降评价

9.1.1 储罐基础边缘沉降观测点宜在储罐环墙基础外侧布置，观测点数量不宜低于表6的规定，且沿储罐周边对称均匀布置；监测点自建北方向起始、顺时针顺序编号。（SH/T 3123-2017）

表6 储罐基础边缘沉降观测点布置数量

储罐公称容积 $V$ ( $m^3$ )	观测点数量 (个)
2000 及以下	4
$3,000 \leq V < 10,000$	8
$10,000 \leq V < 20,000$	12
$20,000 \leq V < 30,000$	16
$30,000 \leq V < 50,000$	20
$50,000 \leq V < 100,000$	24
$100,000 \leq V < 150,000$	28
150,000	32

9.1.2 基础沉降应符合下列规定：

- a) 储罐基础直径方向上的沉降差，不应超过表7的许可值；
- b) 支撑罐壁的基础部分不应发生沉降突变；
- c) 基础沉降稳定后，基础边缘上表面应高出设计地坪300mm以上；
- d) 沿罐壁圆周方向任意10m弧长内的沉降差不应大于25mm；
- e) 基础沉降基本稳定后，正锥面坡向的基础锥面坡度不应小于8‰。
- f) 基础的整体均匀下沉量不应大于进出油管线或柔性接头的允许下沉量。

表7 储罐任意直径方向沉降差允许值

浮顶油罐与内浮顶油罐		固定顶油罐	
油罐内径 $D$ (m)	沉降差许可值 (m)	油罐内径 $D$ (m)	沉降差许可值 (m)
$D \leq 22$	$0.007D$	$D \leq 22$	$0.015D$
$22 < D \leq 30$	$0.006D$	$22 < D \leq 30$	$0.010D$
$30 < D \leq 40$	$0.005D$	$30 < D \leq 40$	$0.009D$
$40 < D \leq 60$	$0.004D$	$40 < D \leq 60$	$0.008D$
$60 < D \leq 80$	$0.003D$	$60 < D \leq 80$	$0.007D$
$D > 80$	$< 0.0025D$	$D > 80$	$< 0.007D$

## 9.2 罐壁沉降评价

9.2.1 储罐基础沉降评价为一级评价，当基础沉降超标时，应进行二级评价，即罐壁沉降评价。

9.2.2 罐壁沉降最小测量点数为  $N$ ， $N$  需要同时满足以下两点要求：

- a)  $N = D/3.048$ ， $N$  的计算结果向上取整，且  $N$  的最小值为8。

b) 相邻测点之间的弧长不大于 9750mm。

9.2.3 罐壁沉降评价流程图如下图所示。

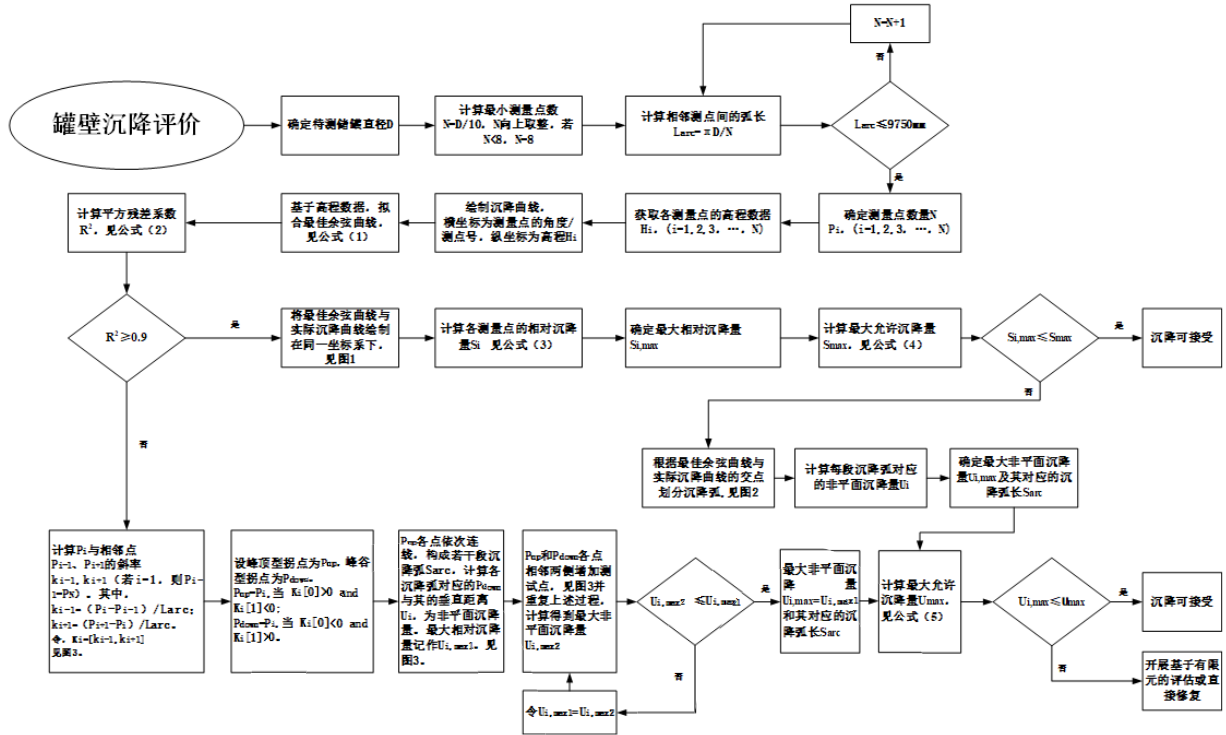
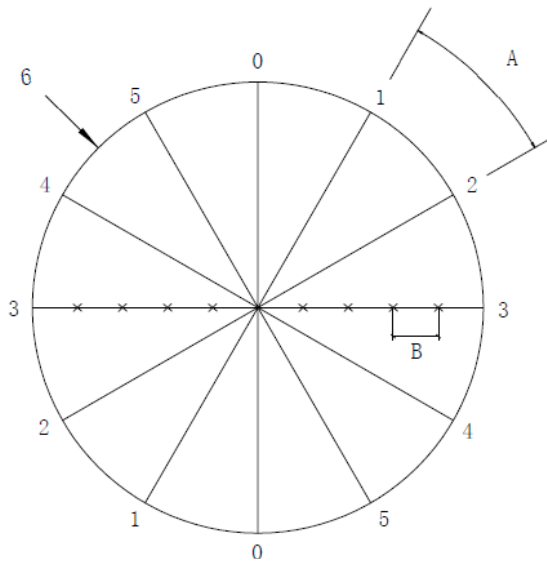


图 6 罐壁沉降评价流程

9.3 底板沉降评价

9.3.1 开罐储罐宜进行罐底沉降测量，罐底沉降观测点（图 7），应符合下列规定：

- a) 在罐底应选取不少于 4 条平均分布的直径测量线；
- b) 罐底直径方向的测点均匀布置，测点间距 B 不大于 3m。



标引序号说明：

0~5 —— 罐底沉降的测点；

6 —— 罐壁；

- A—— 圆周上间距，最大间距为 10m，直径数量不少于 4 条；
- B—— 直径上测点间距，不大于 3m

图 7 罐底沉降观测点

9.3.2 罐底板局部下沉或凸起应满足下列公式的要求：

$$H \leq 15.4D_L \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- H—— 底板局部沉降深度或凸起高度 (mm)；
- $D_L$ —— 局部变形区域内切圆直径 (m)。

9.3.3 罐底板局部下沉或凸起测量和评价流程图。

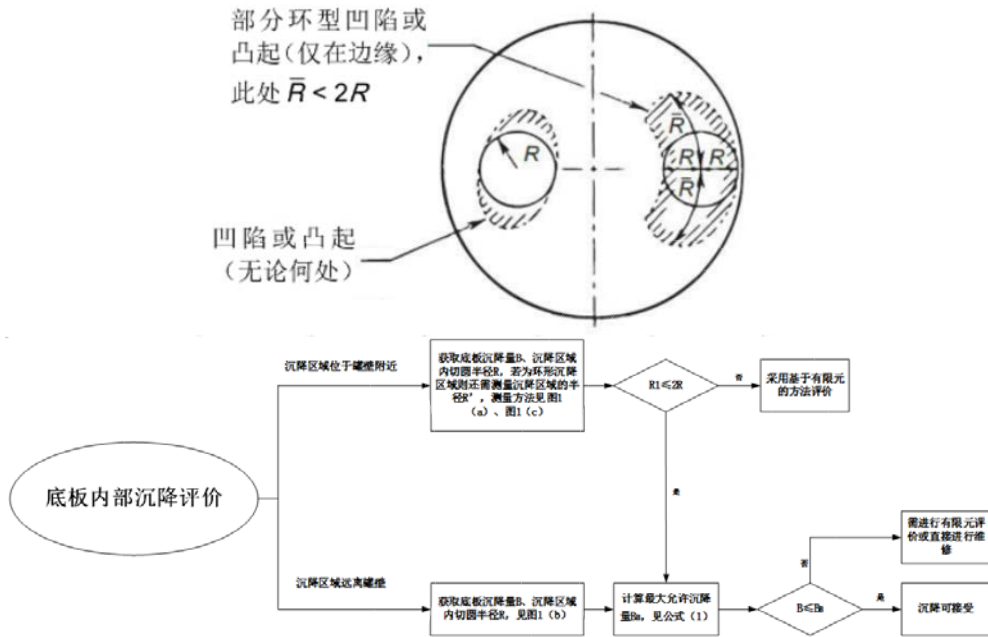
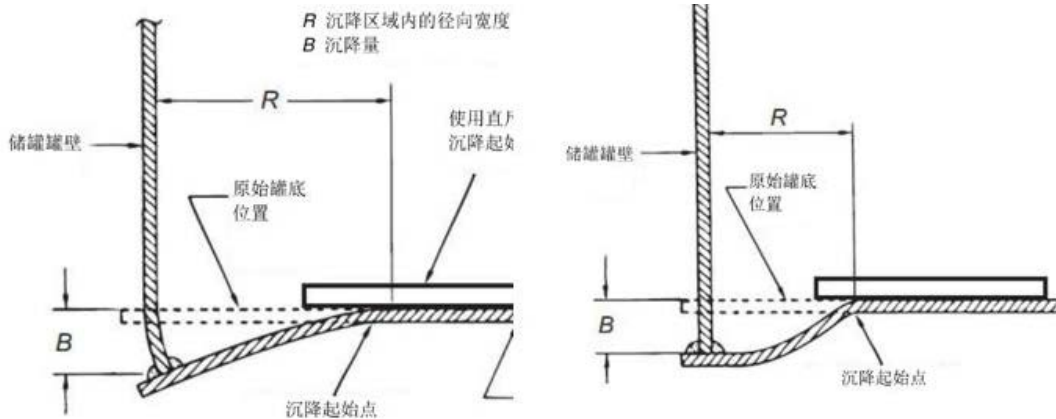


图 8 罐底板局部下沉或凸起测量和评价流程图

9.3.4 罐底板的整体均匀凹陷量（底板中心与边缘沉降差），不应大于锥形基顶的设计矢高与罐排污所需的底板中心的最小矢高之差。

9.4 罐底边缘沉降评价

9.4.1 罐底边缘沉降测量和评价流程如下图所示。



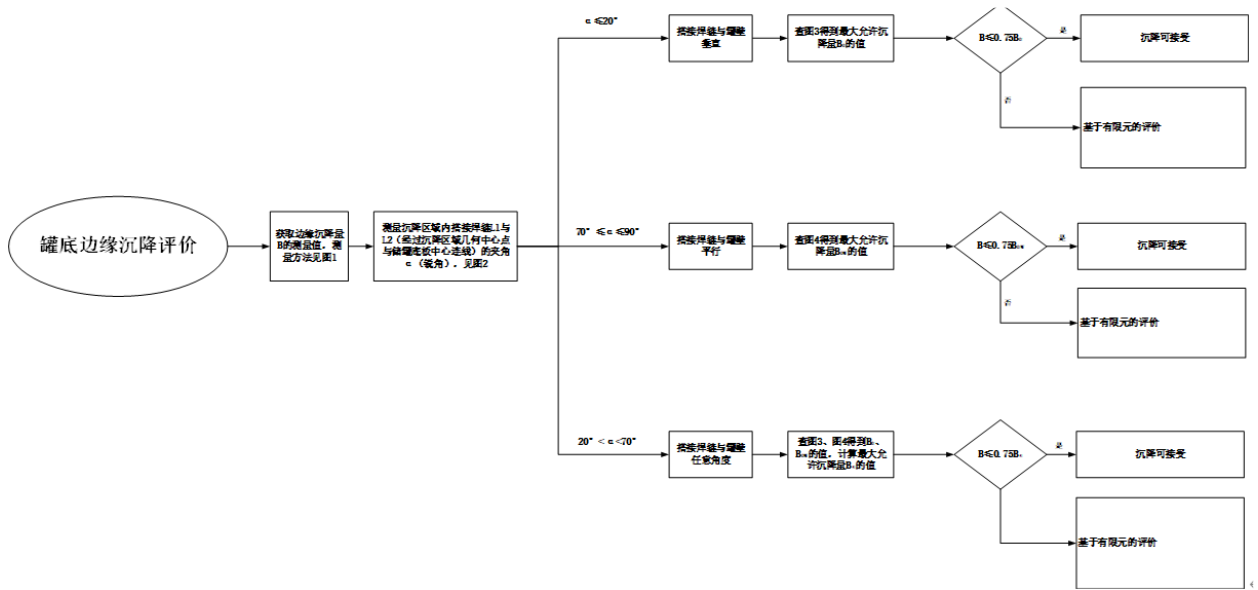
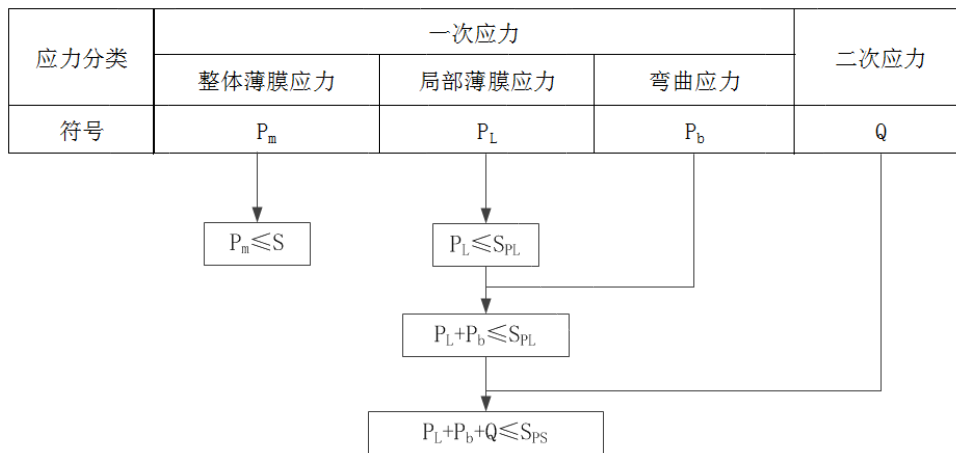


图9 罐底边缘沉降测量和评价流程图

### 9.5 基于有限元的评价准则

#### 9.5.1 应力分类

储罐的基础沉降和罐壁沉降超过 9.1 和 9.2 的限值时，若采用有限元方法开展基于应力的评价，应力分类及评价准则参照，应力评价流程见图 10。



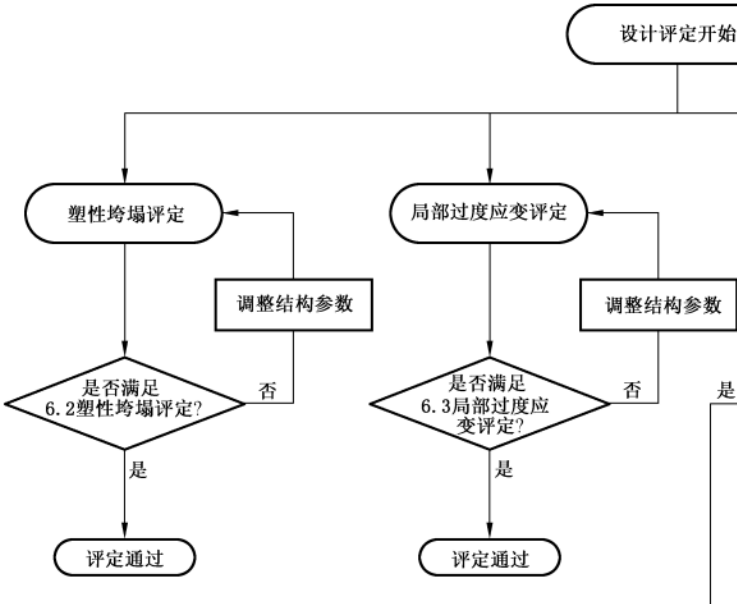


图 10 应力评价流程图

9.5.2 沉降数据处理

将储罐基础沉降的测量值进行组合谐波形式的傅里叶拟合，即为储罐基础绝对（相对）高程，其拟合公式为：

$$u = u_0 + \sum_{n=1}^6 u_n \cos(n\theta + \varphi_n) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- $n$  —— 谐波数；
- $u_0$  —— 储罐的整体均匀沉降量；
- $u_n$  —— 第阶谐波沉降的幅值，单位为毫米（mm）；
- $\varphi_n$  —— 第阶谐波在叠加时的初始相位角  $0 \leq \varphi_n \leq 2\pi$ 。

注： $u_0$  代表储罐的整体均匀沉降， $u_1$  代表储罐的整体倾斜。谐波沉降的阶数越高，表示局部不均匀沉降越显著。工程实践表明，只要将整体均匀沉降和平面倾斜的沉降量控制在一定的允许范围内，不会影响结构的安全。不均匀沉降的幅值虽然较小，却很复杂，可能对储罐结构产生很大的危害。在采用有限元方法分析沉降对储罐的影响时，可剔除  $u_0$  和  $u_1$  两项。由于 6 次以内的组合谐波可以较好地反映地基实际沉降的真实性和规律性，建议取谐波数为 2~6 的组合谐波沉降进行应力计算。

9.5.3 应力强度评价准则

根据 GB/T 4732.4 中塑形垮塌评定、局部过度应变评定、棘轮评定、疲劳评定和疲劳评定免除准则的有关内容实施，各当量应力的评定准则如表 8 所示。

表 8 各类应力的强度限制标准

评定方法	评定的当量应力或系数	符号	许用极限
塑性垮塌评定	一次总体薄膜当量应力	$S_I$	$KS'_m$

评定方法	评定的当量应力或系数	符号	许用极限
	一次局部薄膜当量应力	$S_{II}$	$KS_{PL}$
	一次薄膜（总体或局部）+一次弯曲当量应力	$S_{III}$	$KS_{PL}$
局部过度应变评定	$p+p_s+D$ ，计算一次应力的 3 个主应力代数和	$\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$	$4S'_m$
棘轮评定	总体结构不连续处由工作载荷和热效应引起的应力分量 ( $P_L+P_b+Q$ )，计算一次+二次应力范围的当量应力	$S_{IV}$	$S_{PS}$
热应力棘轮评定	二次薄膜应力范围的当量应力	$\Delta Q_m$	$S_{Qm}$
	二次薄膜+弯曲热应力范围的当量应力	$\Delta Q_{mb}$	$S_{Qmb}$
疲劳评定	一次+二次+峰值应力载荷组合 ( $P_L+P_b+Q+F$ )，计算各循环中总应力范围的当量应力 ( $\Delta S_{e,k}$ ) 和交变当量应力幅 ( $S_{alt,k}$ )，并计算所有载荷循环的累积使用系数	$U$	1.0
注： $S'_m$ —设计温度下材料的许用应力； $S_{PL}$ — a. 以下情况下取设计温度下材料许用应力 ( $S'_m$ ) 的 1.5 倍：材料的屈服强度 ( $R_{eL}$ ) 与标准抗拉强度下限 ( $R_m$ ) 的比值大于 0.7；奥氏体高合金钢提高了许用应力；材料的许用应力 ( $S'_m$ ) 与时间相关。 b. 其他情况下取设计温度下材料的屈服强度 ( $R'_{eL}$ )。 $S_{PS}$ — a. 以下情况下取循环中最高温度和最低温度下材料许用应力 ( $S'_m$ ) 平均值的 3 倍：材料的屈服强度 ( $R_{eL}$ ) 与标准抗拉强度下限 ( $R_m$ ) 的比值大于 0.7；奥氏体高合金钢提高了许用应力；材料的许用应力 ( $S'_m$ ) 与时间相关。 b. 其他情况下取循环中最高温度和最低温度下材料屈服强度 ( $R'_{eL}$ ) 平均值的 2 倍。 $S_{IV}$ —大于 $S_{PS}$ 时，可调整结构参数使其满足要求，否则应符合以下规定： a. 不计入热应力的一次加二次应力范围的当量应力 ( $S_{IV}$ ) 小于 $S_{PS}$ ； b. 材料的屈服强度 ( $R_{eL}$ ) 与标准抗拉强度下限 ( $R_m$ ) 的比值小于或等于 0.8； c. 疲劳评定不能免除； d. 满足热应力棘轮评定的要求，即不出现热应力棘轮。			

疲劳评定免除规则根据 GB/T 4732.4 中 6.5 的相关要求确定，评定的当量应力或系数的具体计算过程和步骤，参考 GB/T 4732.4 中 6.2 至 6.6 的相关内容。

## 10 罐体过火评价

本章适用于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储罐外部或 / 和内部发生的火灾。本章不适用于储罐浮顶及底板的火灾损伤合于使用评价。

### 10.1 评价方法分类、选择原则和限制条件

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，当储罐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 级评价是通过对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。

罐体过火评价的一般流程如下图所示。

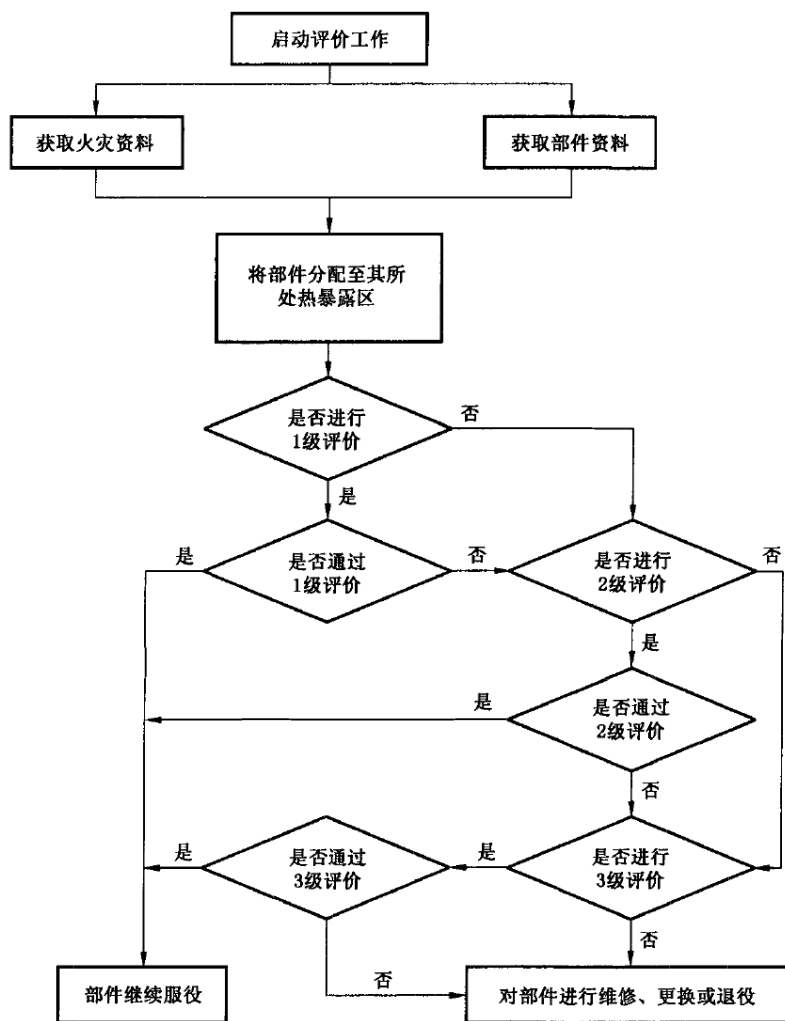


图 11 评价流程图

## 10.2 火灾资料

### 10.2.1 火灾基本信息

火源位置，火灾发生时的风向；火灾时间；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）；火灾发生前或发生时设备的温度、压力和安全阀泄放数据；消防水炮和胶皮管用水的位置流向以及类型；灭火方式；灭火时间。

### 10.2.2 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 9。

表 9 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 <math>T \leq 65^{\circ}\text{C}</math>	暴露于烟雾和水
III	$65^{\circ}\text{C} < T \leq 205^{\circ}\text{C}</math>$	轻度热暴露
IV	$205^{\circ}\text{C} < T \leq 425^{\circ}\text{C}</math>$	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

10.3.3 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 GB/T 35013-2018 的表 8 至表 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公式 (1)
- c) 确定:

$$T = T_0 + \frac{345lg(8t + 1)}{t} \dots\dots\dots (1)$$

- d) 对于非密闭部件内部发生火灾的情况,当 GB/T 35013-2018 的表 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;
- e) 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。

10.4 评价方法

10.4.1 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 10 确定储罐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 10 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, 022C17Ni12Mo2, 06Cr17Ni12Mo2Ti, 06Cr19Ni13Mo3, 022Cr19Ni13Mo3, 06Cr18Ni11Ti, 0Cr18Ni011Nb	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, (UNS1803,UNS J92205) (2507-UNSS39275)	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°C~175°C 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°C 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°C~925°C 时, 也会发生严重的塑性损伤 (形成 $\sigma$ 相)。 <sup>c</sup> 暴露温度超过 260 °C 缓冷后, 沉淀硬化合金可能会发生塑性损伤。			

#### 10.4.2 2 级评价

按照以下步骤进行 2 级评价:

- 对储罐进行宏观检验和必要的无损检测;
- 对储罐进行硬度和金相检验及评价;
- 确定火灾后材料的许用应力;
- 进行强度校核;
- 如果发现火灾后储罐还存在其他类破损, 应根据本标准其他章节规定的方法进行评价。

##### 10.4.2.1 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:

- 立式容器的垂直度;
- 储罐筒节垂直度;
- 局部变形;
- 周向及轴向膨胀量;
- 表面缺陷检测。

##### 10.4.2.2 硬度检测

选取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 GB/T 35013-2018 附录 D, 材料国内外牌号对照参见 GB/T 35013-2018 附录 E。

##### 10.4.2.3 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)。

碳钢和低合金钢: 游离渗碳体, 珠光体组织, 铁素体组织, 魏氏体组织, 马氏体组织, 索氏体组织。

高合金钢: 奥氏体组织, 铁素体组织, 马氏体组织,  $\sigma$  相组织。

##### 10.4.2.4 硬度及金相评价

常见材料硬度值范围参见 GB/T 35013-2018 附录 D。评价过程中应以材料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:

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

10.4.2.5 许用应力的确定

许用应力的确定方法如下：

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。

由公式（2）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。

$$[\sigma]_{afd} = \min \left\{ \left( \frac{\sigma^k t}{n_h n_{ism}} \cdot \frac{[\sigma]^t}{[\sigma]^a} \right), [\sigma]^t \right\} \dots\dots\dots (2)$$

10.4.2.6 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。

10.4.3 三级评价

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。

10.4.3.1 根据式（3）式（4）确定承受火灾损伤材料的许用应力：

$$[\sigma]_{afd} = \min \left\{ \left( \frac{\sigma_{uts}}{n_b}, \frac{\sigma_{ys}}{n_s}, [\sigma]^t \right) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$[\sigma]_{afd} = \min \left\{ \left( \frac{\sigma_{uth}}{n_b}, \frac{\sigma_{yh}}{n_s}, [\sigma]^t \right) \right\} \dots\dots\dots (4)$$

10.4.3.2 3 级评价准则如下：

- a) 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 GB/T 35013-2018 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。

附录 A  
(规范性)  
常压储罐应力分析和计算

### A.1 储罐罐壁与罐底总体应力

一般情况下，罐壁由逐级增厚的阶梯状变截面壁板组焊而成，罐壁环向焊缝和纵向焊缝均采用全焊透结构（见图A.1、图A.2）。罐壁主要承受储存介质静液柱压力作用，产生环向应力，使罐壁周向伸长并沿罐体半径方向向外扩张。由于罐壁下端通过大角焊缝与罐底连接（见图A.3），罐底对罐壁径向变形起约束作用，导致罐壁与罐底均存在附加应力。

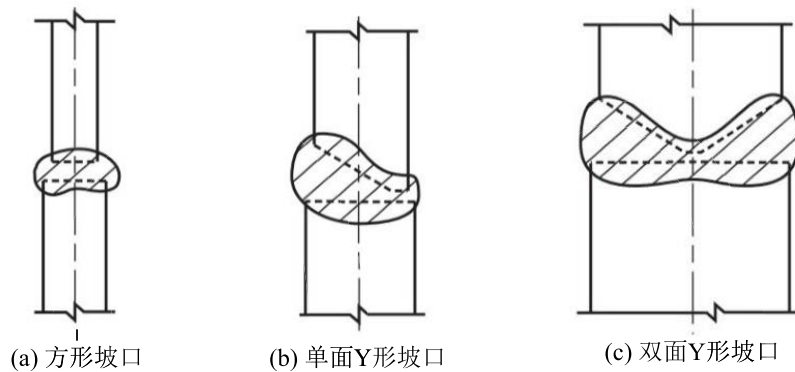


图 A.1 典型的罐壁环向焊缝坡口形貌

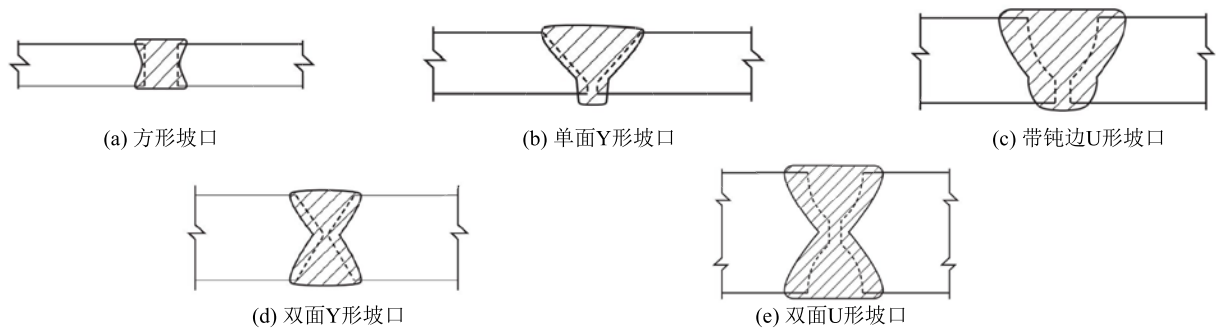


图 A.2 典型的罐壁纵向焊缝坡口形貌

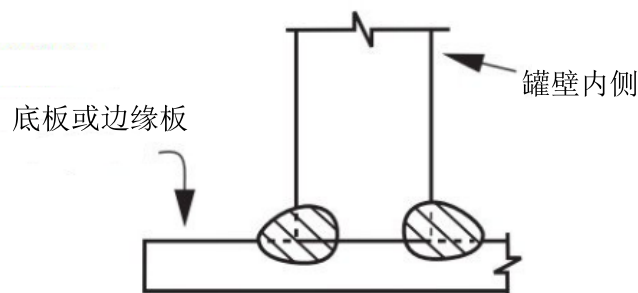


图 A.3 典型的罐壁与底板接头形貌

常压储罐应力分析可分为罐壁应力分析和罐底应力分析。本附录在材料力学基本假设基础上，给出常压储罐壁板和底板的简化应力计算方法，仅适用于结构及载荷较为简单的工况。在实际应用中，应根据评定对象的具体情况选用合适的应力分析方法；当结构形式和载荷较为复杂或对精度要求较高时，宜采用有限元等数值分析方法进行应力分析。

**A. 1. 1 罐壁的环向应力**

在小变形假设条件下，考虑罐壁承受静水压力以及罐底约束产生的弯矩 $M_0$ 和剪力 $Q_0$ 作用（罐壁与底板连接处受力简图见图A.4），罐壁径向位移 $y$ 可表示为二者叠加：

$$y = \frac{\rho_L g (H-x) R^2}{E \delta} - \frac{e^{-\beta x}}{E} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 \delta^2}} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

则，储罐罐壁的环向应力为：

$$\sigma_h = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{y}{R} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

将罐壁的位移方程式（A.1）代入上式，整理可得：

$$\sigma_h = \frac{\rho_L g (H-x) R}{\delta} - \frac{e^{-\beta x}}{R} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中， $y$ 为罐壁的径向位移； $\rho_L$ 为液体的密度； $g$ 为重力加速度； $H$ 为液面的高度； $x$ 为距离罐壁下端的距离； $R$ 为储罐半径； $E$ 为罐壁材料弹性模量； $\delta$ 为罐壁厚度； $A$ 、 $B$ 为待定常数，可根据边界条件及材料力学理论求解； $\beta$ 为罐壁的特征系数； $\nu$ 为材料的泊松比； $\sigma_h$ 为罐壁环向应力。

**A. 1. 2 罐壁的弯曲应力**

根据材料力学理论，罐壁上任意一点的弯曲应力为：

$$\sigma_w = \frac{M(x)}{W} = \frac{6M(x)}{\delta^2} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

根据材料力学弯曲理论，有  $M(x) = EI \frac{d^2 y}{dx^2}$ ，对式（A.1）二次微分代入上式，整理可得：

$$\sigma_w = -\frac{12I \beta^2 e^{-\beta x}}{\delta^2} (A \sin \beta x - B \cos \beta x) \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中， $\sigma_w$ 为罐壁上任意一点的弯曲应力； $M(x)$ 为罐壁上任意一点的弯矩； $W$ 为罐壁单位周长的断面系数，且  $W = \delta^2 / 6$ 。

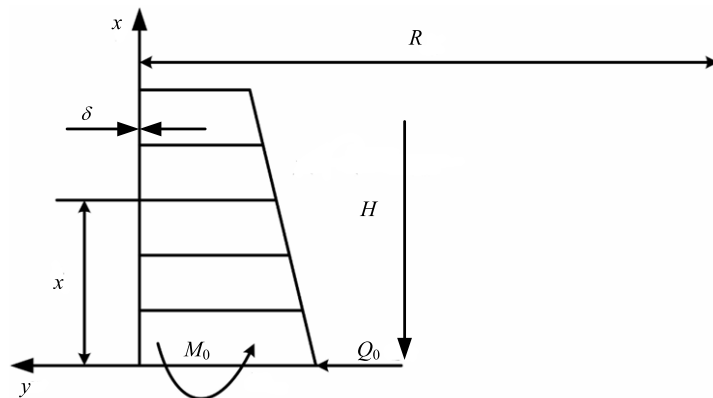


图 A. 4 罐壁与底板连接处受力简图

### A.1.3 罐底弯曲应力

罐底受力分析的力学模型如图A.5所示，其弯曲应力为：

$$\sigma_{wb} = \frac{M(z)}{W_b} = \frac{6M(z)}{\delta_b^2} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

当  $z \geq b$ （即在罐壁内的一段罐底）时，罐底弯曲应力：

$$\sigma_{wb} = \frac{6}{\delta_b^2} \left[ F(L-z) - \frac{w}{2}(L-z)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

当  $z \leq b$ （即在罐壁外的一段罐底）时，罐底弯曲应力：

$$\sigma_{wb} = \frac{6}{\delta_b^2} \left[ F(L-z) - \frac{w}{2}(L-z)^2 + \frac{w}{2}(b-z)^2 - T(b-z) + M_0 \right] \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

式中， $\sigma_{wb}$ 为罐底弯曲应力； $z$ 为罐底处最外端一点到罐底任一点的水平距离； $M(z)$ 为罐底任一点的弯矩； $\delta_b$ 为罐底厚度； $F$ 为罐底一端集中反力； $L$ 为罐底水平长度； $w$ 为静液压； $b$ 为罐底处最外端一点到罐壁的距离； $M_0$ 为罐底与罐壁连接处的弯矩载荷，可根据边界条件及材料力学方法求解。

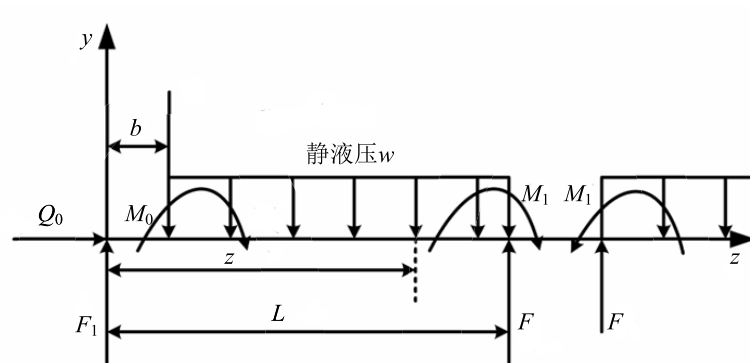


图 A.5 储罐底板受力简图

### A.1.4 残余应力的计算

A.1.4.1 储罐壁板纵向焊缝和环向焊缝的残余应力分布可按下述步骤估算。

a) 垂直于焊缝的残余应力（适用于平行于焊缝的缺陷）

① 壁板厚度方向上（ $x$ 方向）残余应力分布——对于远离所有几何不连续处的储罐壁板纵向和环向焊缝，其残余应力分布可以使用公式(A.10)进行估算。沿壁厚方向的应力分布所采用的局部坐标  $x$ ，是从焊缝坡口最宽处或最后一道焊道的相对侧（通常是内表面）开始测量的。公式(A.10)给出的分布适用于焊缝中心线两侧各  $1.0w$  的范围。

$$\sigma^r(x) = \sigma_{ys}^r \left[ 1.230 - 9.269 \left( \frac{x}{t} \right) + 17.641 \left( \frac{x}{t} \right)^2 - 8.660 \left( \frac{x}{t} \right)^3 \right] \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中， $x$ 为沿壁厚方向的应力分布所采用的局部坐标，以储罐壁板内壁表面为起始点； $\sigma^r(x)$ 为壁板厚度方向上残余应力沿壁板厚度方向位置的函数； $t$ 为储罐壁板焊缝的公称厚度； $w$ 为储罐壁板纵向焊缝或环向焊缝的焊缝宽度； $\sigma_{ys}^r$ 为用于估算焊接接头处残余应力的有效屈服强度，若无法获取焊缝处实际数据，可按  $\sigma_{ys}^r = \sigma_{ys} + 69 \text{ MPa}$  确定， $\sigma_{ys}$ 为焊缝处规定的最小屈服强度。

② 垂直于壁板厚度方向和焊缝方向的残余应力衰减——如图A.6所示，沿壁厚方向的残余应力分布可能会随着与焊缝中心线距离（ $y$ 方向）的增加而减小，具体如下：

在距离焊缝中心线  $0.0$  到  $1.0w$  的范围内，残余应力  $\sigma^r(x)$  遵循公式(A.10)；

在距离焊缝中心线 $1.0w$ 到 $2.0w$ 的范围内，残余应力 $\sigma^r(x)$ 呈线性递减至0。

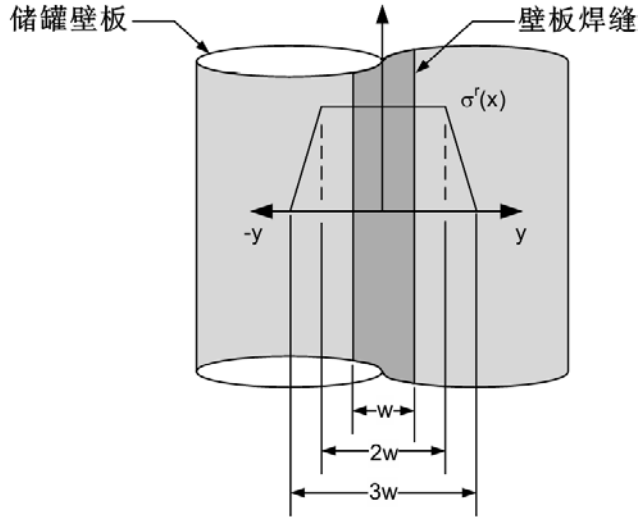


图 A.6 储罐壁板焊缝残余应力分布和递减示意图（以纵向焊缝为例）

b) 平行于焊缝的残余应力（适用于垂直于焊缝的缺陷）

① 壁板厚度方向上（ $x$ 方向）残余应力分布——对于远离所有几何不连续处的储罐壁板纵向和环向焊缝，其残余应力分布可以使用公式(A.11)进行估算。沿壁厚方向的应力分布所采用的局部坐标 $x$ ，是从焊缝坡口最宽处或最后一道焊道的相对侧（通常是内表面）开始测量的。公式(A.11)给出的分布适用于焊缝中心线两侧各 $1.0w$ 的范围。

$$\sigma^r(x) = \sigma_{ys}^r \dots\dots\dots (A.11)$$

② 垂直于壁板厚度方向和焊缝方向的残余应力衰减——沿壁厚方向的残余应力分布可能会随着与焊缝中心线距离（ $y$ 方向）的增加而减小，具体如下：

在距离焊缝中心线 $0.0$ 到 $1.0w$ 的范围内，残余应力 $\sigma^r(x)$ 遵循公式(A.11)；

在距离焊缝中心线 $1.0w$ 到 $1.5w$ 的范围内，残余应力 $\sigma^r(x)$ 呈线性递减至0。

A.1.4.2 储罐壁板与底板连接处大角焊缝的残余应力分布可按下述方法估算。

a) 储罐底板（所用示意图包括图A.7和A.8）

沿底板厚度方向的残余应力分布——对于远离所有其他几何不连续处的此类焊缝，其残余应力分布可以使用公式(A.12)和(A.13)进行估算。沿壁厚方向应力分布的局部坐标 $x$ 是从角焊缝的焊趾（外表面）开始测量的（如图A.7所示）。这种分布适用于从底板底部向壁板两侧各延伸 $1.5t_1$ 的范围。

$$\sigma^r(x) = \sigma_i^r - 3.636(\sigma_i^r - \sigma_m^r) \left( \frac{x}{t_1} \right) \quad 0 \leq \frac{x}{t_1} \leq 0.275 \dots\dots\dots (A.11)$$

$$\sigma^r(x) = \sigma_m^r + (\sigma_o^r - \sigma_m^r) \left( 1.379 \frac{x}{t_1} - 0.379 \right) \quad 0.275 < \frac{x}{t_1} \leq 1.0 \dots\dots\dots (A.12)$$

式中， $t_1$ 为底板公称厚度； $\sigma_i^r$ 为内表面的残余应力，且满足 $\sigma_i^r = \sigma_{ys}^r$ ； $\sigma_m^r$ 为内部残余应力，当 $t_1 \leq 6.35 \text{ mm}$ 时， $\sigma_m^r = \sigma_{ys}^r$ ；当 $6.35 \text{ mm} < t_1 \leq 25 \text{ mm}$ 时， $\sigma_m^r = \sigma_{ys}^r (1.340 - 0.0536t_1)$ ；当 $t_1 > 25 \text{ mm}$ 时， $\sigma_m^r = 0$ ； $\sigma_o^r$ 为外表面残余应力，当 $t_1 \leq 6.35 \text{ mm}$ 时， $\sigma_o^r = \sigma_{ys}^r$ ；当 $6.35 \text{ mm} < t_1 \leq 25 \text{ mm}$ 时， $\sigma_o^r = \sigma_{ys}^r (1.170 - 0.0268t_1)$ ；当 $t_1 > 25 \text{ mm}$ 时， $\sigma_o^r = 0.5\sigma_{ys}^r$ 。

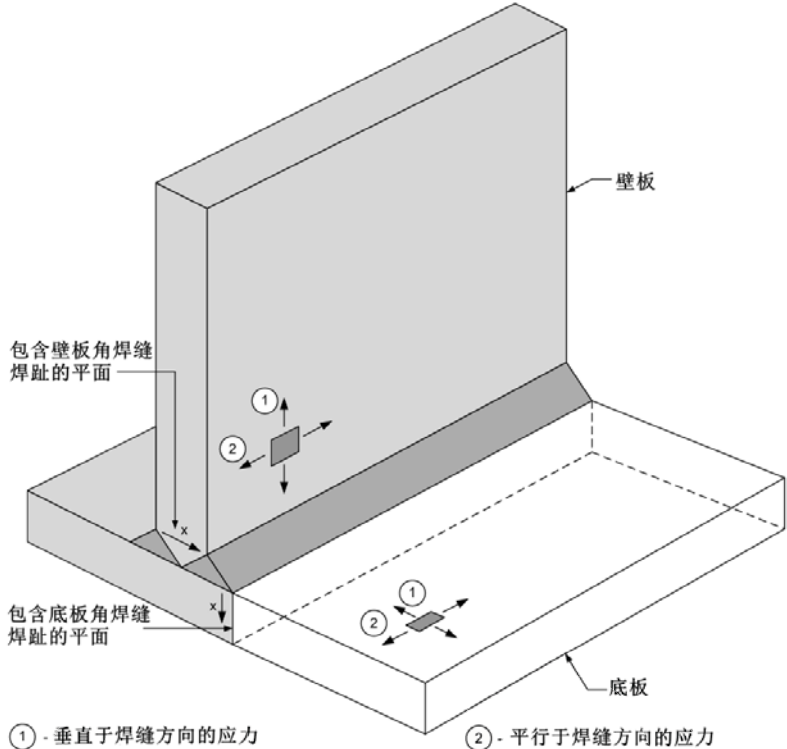


图 A.7 储罐壁板与底板连接处的大角焊缝位置与应力方向示意图

残余应力衰减——沿壁厚方向的残余应力分布可能会随着与板表面的距离  $y$  增加而减小，具体如下（见图A.8）：

在距离板表面  $0.0$  到  $1.5t_1$  的范围内，残余应力  $\sigma^r(x)$  遵循公式（A.11）或（A.12）；  
 在距离板表面  $1.5t_1$  到  $2.0t_1$  的范围内，残余应力  $\sigma^r(x)$  呈线性递减至  $0$ 。

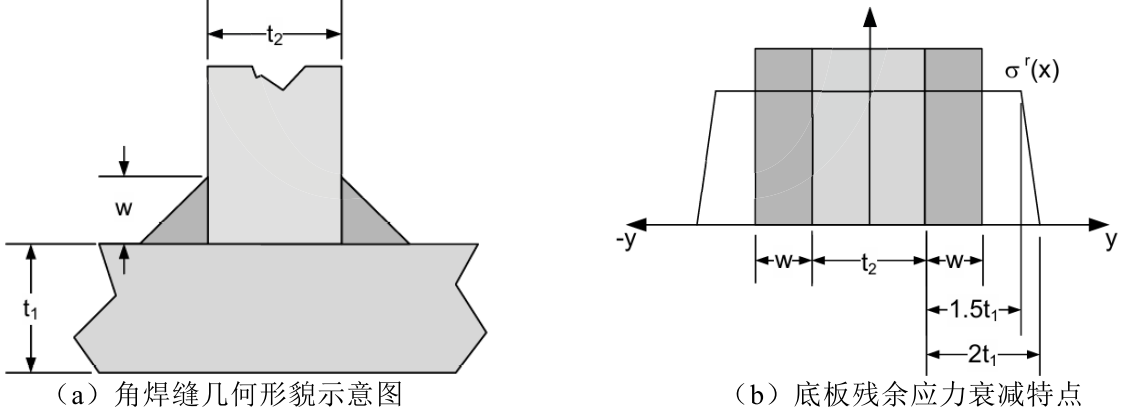


图 A.8 角焊缝的残余应力随距焊缝中心线距离的变化情况（底板）

b) 储罐壁板（所用示意图包括图 A.7 和 A.9）

沿壁板厚度方向的残余应力分布——对于远离所有其他几何不连续处的此类焊缝，其残余应力分布可以用公式（A.13）来估算。沿壁厚方向应力分布的局部坐标  $x$  是从角焊缝的焊趾（外表面）开始测量的（如图A.7所示）。这种分布适用于从撑板底部向上在板中延伸  $1.5t_2$  的范围。

$$\sigma^r(x) = \sigma_{ys}^r \left[ 1.00 - \beta \left( 16.0 \left( \frac{x}{t_2} \right)^2 - 32.0 \left( \frac{x}{t_2} \right)^3 + 16.0 \left( \frac{x}{t_2} \right)^4 \right) \right] \dots \dots \dots \text{(A.13)}$$

式中,  $\beta$  为与厚度相关的残余应力缩放因子, 当  $t_2 \leq 6.35 \text{ mm}$  时,  $\beta = 0.0$ ; 当  $6.35 \text{ mm} < t_2 \leq 25 \text{ mm}$  时,  $\beta = 0.0536t_2 - 0.340$ ; 当  $t_2 > 25 \text{ mm}$  时,  $\beta = 1.0$ 。

残余应力衰减——沿壁厚方向的残余应力分布可能会随着与板表面的距离  $y$  增加而减小, 具体如下 (见图A.9) :

在距离板表面  $0.0$  到  $1.5t_2$  的范围内, 残余应力  $\sigma^r(x)$  遵循公式 (A.13) ;

在距离板表面  $1.5t_2$  到  $2.0t_2$  的范围内, 残余应力  $\sigma^r(x)$  呈线性递减至  $0$ 。

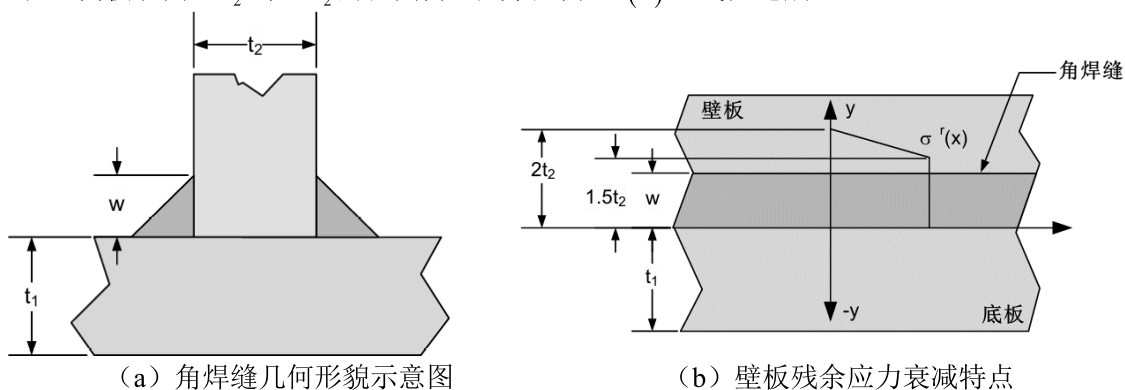


图 A.9 角焊缝的残余应力随距焊缝中心线距离的变化情况 (壁板)

## A.2 储罐焊缝裂纹缺陷应力计算原则和流程

A.2.1 在评定中所取用的应力是缺陷部位的主应力。计算该主应力时采用线弹性计算方法, 并假设结构中不存在缺陷。

A.2.2 在执行平面型焊缝缺陷评价时, 应在本附录给出的常压储罐应力分析基础上, 并按6.3 (b) 的有关要求, 综合考虑各种载荷作用, 根据载荷特征和焊缝裂纹缺陷位置, 计算缺陷部位沿厚度截面的总一次应力和总二次应力分布。对获得的非线性应力分布, 应按GB/T 19624《在用含缺陷压力容器安全评定》第5.4.2.2条的规定, 在缺陷区域内进行应力线性化处理。

A.2.3 与GB/T 19624《在用含缺陷压力容器安全评定》一致, 应将储罐焊缝裂纹缺陷位置沿厚度截面的应力分解为薄膜应力分量  $\sigma_m$  和弯曲应力分量  $\sigma_b$ , 由一次应力分解而得到的  $\sigma_m$  和  $\sigma_b$  分别命名为  $P_m$  和  $P_b$ , 由二次应力分解而得到的  $\sigma_m$  和  $\sigma_b$  分别命名为  $Q_m$  和  $Q_b$ 。

A.2.4 焊接残余应力应视为二次应力处理。储罐壁板纵向焊缝、环向焊缝以及壁板与底板连接处大角焊缝的焊接残余应力分布, 可按本附录A.1.4中残余应力估算方法确定, 并用于焊缝裂纹缺陷的安全评定计算。

附录 B  
(规范性)  
平面型缺陷参考应力计算

B.1 总则

B.1.1 本附录提供了基于极限分析方法和净截面屈服准则局部解的含焊缝裂纹缺陷常压储罐结构的参考应力解,适用于常压储罐焊缝平面缺陷2级和3级评价方法。

B.1.2 在参考应力的计算中只考虑一次应力,不考虑二次应力。在计算时需要用到的一次应力( $P_m$ 和 $P_b$ )和缺陷尺寸( $2c$ 和 $a$ )分别按附录A和8.3.2的相关要求确定。

B.2 常压储罐焊缝典型平面型缺陷参考应力解

B.2.1 含长 $2c$ 纵向焊缝穿透裂纹储罐壁板参考应力解(壁板厚度 $t$ ,内径 $R_i$ ,见图B.1)

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + [P_b^2 + 9(M_t \cdot P_m)^2]^{0.5}}{3} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

其中:

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

$$\lambda = \frac{1.818c}{\sqrt{R_i t}} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

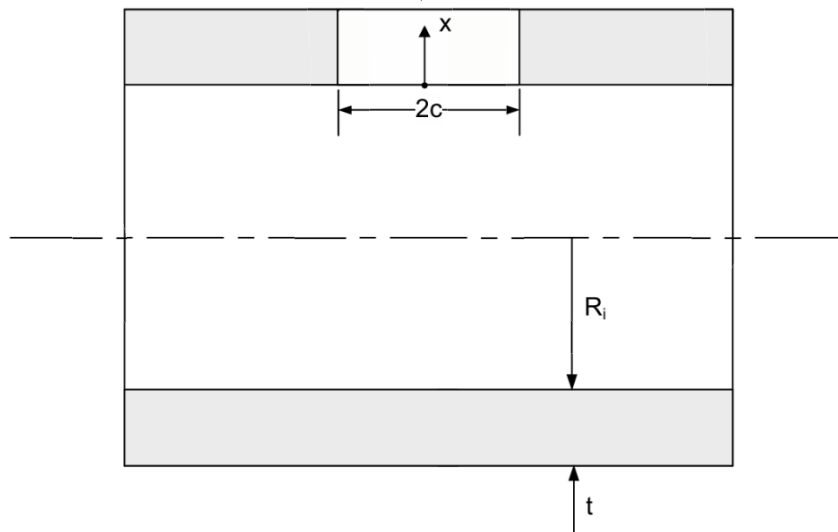


图 B.1 含长  $2c$  纵向焊缝穿透裂纹储罐壁板尺寸示意图

B.2.2 含长 $2c$ 环向焊缝穿透裂纹储罐壁板参考应力解(壁板厚度 $t$ ,内径 $R_i$ ,见图B.2)

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + [P_b^2 + 9(Z \cdot P_m \cdot (1-\alpha)^2)^2]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

其中:

$$Z = \frac{\pi(R_o^2 - R_i^2)}{(2-\tau) R_o t (2\psi - \theta)} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

$$\tau = \frac{t}{R_o} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

$$\psi = \arccos \left[ \frac{\sin(\theta)}{2} \right] \dots\dots\dots (B.7)$$

$$\theta = \frac{c}{R_m} \dots\dots\dots (B.8)$$

$$\alpha = \frac{c}{\pi R_m} \dots\dots\dots (B.9)$$

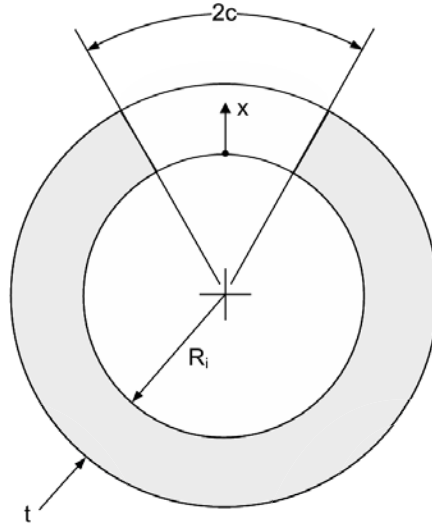


图 B.2 含长  $2c$  环向焊缝穿透裂纹储罐壁板尺寸示意图

B.2.3 含长 $2c$ 、深 $a$ 纵向焊缝半椭圆表面裂纹储罐壁板参考应力解（壁板厚度 $t$ ，内径 $R_i$ ，见图B.3）

$$\sigma_{ref} = \frac{gP_b + [(gP_b)^2 + 9(M_s \cdot P_m \cdot (1-\alpha)^2)^2]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \dots\dots\dots (B.10)$$

其中：

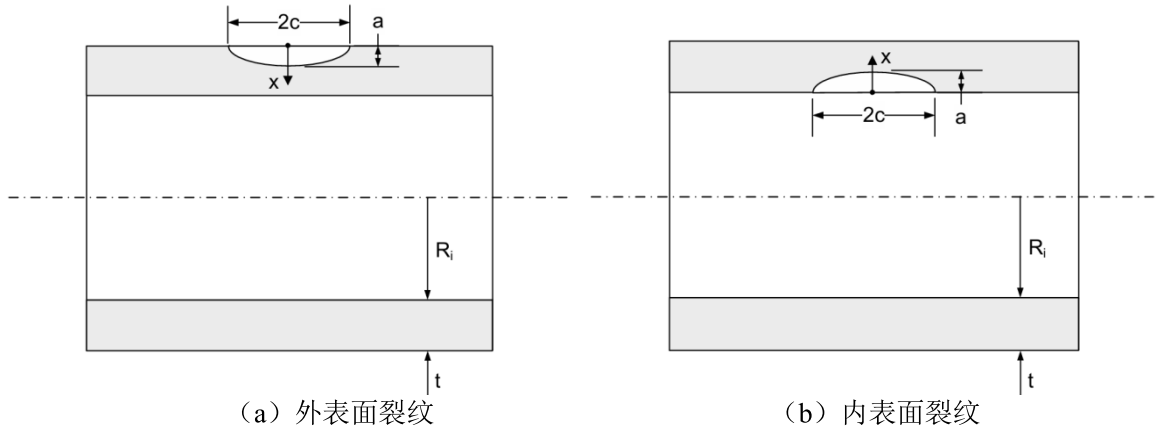
$$M_s = \frac{1}{1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \left( \frac{1}{M_t(\lambda_a)} \right)} \dots\dots\dots (B.11)$$

$$M_t(\lambda_a) = \left[ \frac{1.02 + 0.4411\lambda_a^2 + 0.006124\lambda_a^4}{1.0 + 0.02642\lambda_a^2 + 1.533(10^{-6})\lambda_a^4} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (B.12)$$

$$\lambda_a = \frac{1.818c}{\sqrt{R_i a}} \dots\dots\dots (B.13)$$

$$g = 1 - 20 \left( \frac{a}{2c} \right)^{0.75} \alpha^3 \dots\dots\dots (B.14)$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} \dots\dots\dots (B.15)$$

图 B.3 含长  $2c$ 、深  $a$  纵向焊缝半椭圆表面裂纹储罐壁板尺寸示意图

B.2.4 含长  $2c$ 、深  $a$  环向焊缝半椭圆表面裂纹储罐壁板参考应力解（壁板厚度  $t$ ，内径  $R_i$ ，见图 B.4）

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + [P_b^2 + 9(U \cdot Z \cdot P_{m,eq} \cdot (1-\alpha)^2)^2]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \quad \text{..... (B.16)}$$

其中：

$$\sigma_{ml} = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} + P_m \quad \text{..... (B.17)}$$

$$\sigma_{mc} = \frac{pR_i}{t} \quad \text{..... (B.18)}$$

$$P_{m,eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_{mc} - \sigma_{ml})^2 + \sigma_{mc}^2 + \sigma_{ml}^2}{2}} \quad \text{..... (B.19)}$$

$$Z = \left[ \frac{2\psi}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left( \frac{2-2\tau+x\tau}{2-\tau} \right) \right]^{-1} \quad \text{..... (B.20)}$$

$$\psi = \arccos[A \sin(\theta)] \quad \text{..... (B.21)}$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} \quad \text{..... (B.22)}$$

$$A = x \left[ \frac{(1-\tau)(2-2\tau+x\tau) + (1-\tau+x\tau)^2}{2[1+(2-\tau)(1-\tau)]} \right] \quad \text{..... (B.23)}$$

$$\tau = \frac{t}{R_o} \quad \text{..... (B.24)}$$

$$x = \frac{a}{t} \quad \text{..... (B.25)}$$

$$\theta = \frac{\pi c}{4R_o} \quad \text{外表面裂纹} \quad \text{..... (B.26)}$$

$$\theta = \frac{\pi c}{4R_i} \quad \text{内表面裂纹} \quad \text{..... (B.27)}$$

$$U = 1.3068 - 0.495 \left( \frac{a}{t} \right) + \left[ 0.055 \left( \frac{a}{t} \right) - 0.026 \right] \left( \frac{R_i}{t} \right) \quad \text{..... (B.28)}$$

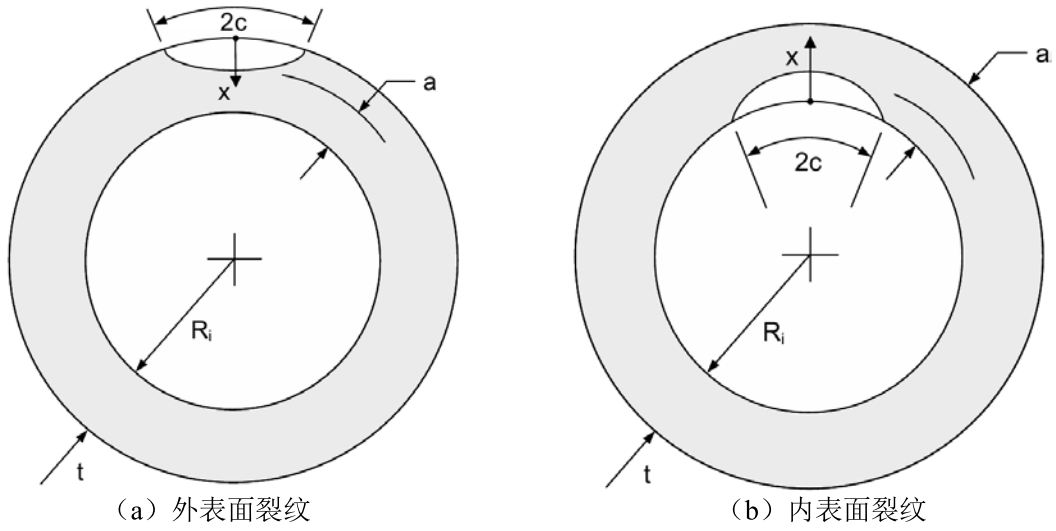


图 B.4 含长 2c、深 a 环向焊缝半椭圆表面裂纹储罐壁板尺寸示意图

B.2.5 含长 2c、深 2a 纵向焊缝椭圆埋藏裂纹储罐壁板参考应力解（壁板厚度 t，内径 R<sub>i</sub>，见图 B.5）

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + 3P_m\alpha + [(P_b + 3P_m\alpha)^2 + 9P_m^2((1-\alpha)^2 + \frac{4d\alpha}{t})]^{0.5}}{3 \left[ (1-\alpha)^2 + \frac{4d\alpha}{t} \right]} \quad \text{..... (B.29)}$$

其中：

$$d = d_1 - a \quad \text{..... (B.30)}$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} \quad \text{..... (B.31)}$$

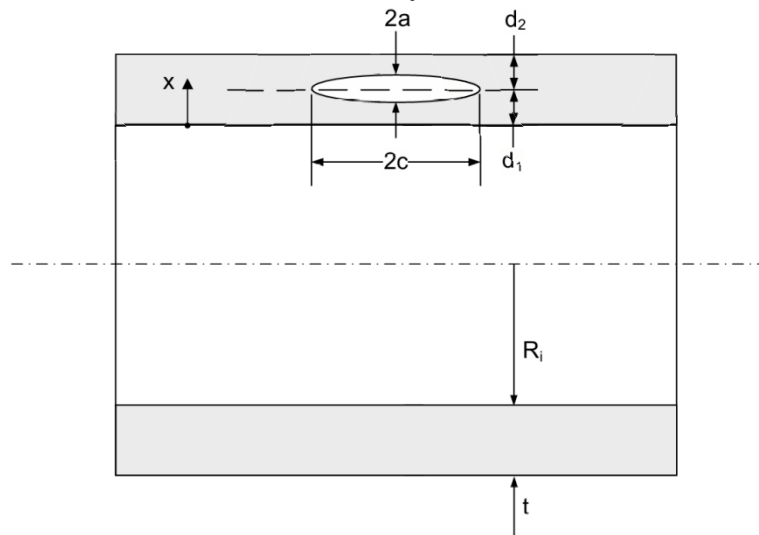


图 B.5 含长 2c、深 2a 纵向焊缝椭圆埋藏裂纹储罐壁板尺寸示意图

B.2.6 含长 2c、深 2a 环向焊缝椭圆埋藏裂纹储罐壁板参考应力解（壁板厚度 t，内径 R<sub>i</sub>，见图 B.6），该类型裂纹缺陷的参考应力可按 B.2.5 进行计算。

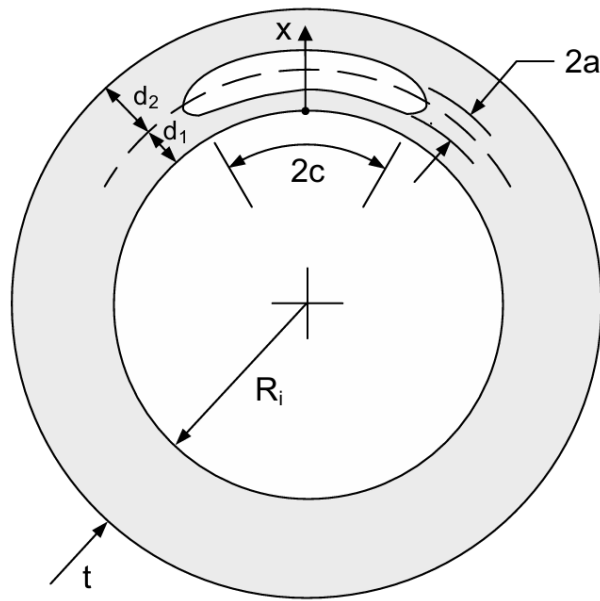


图 B.6 含长 2c、深 2a 环向焊缝椭圆埋藏裂纹储罐壁板尺寸示意图

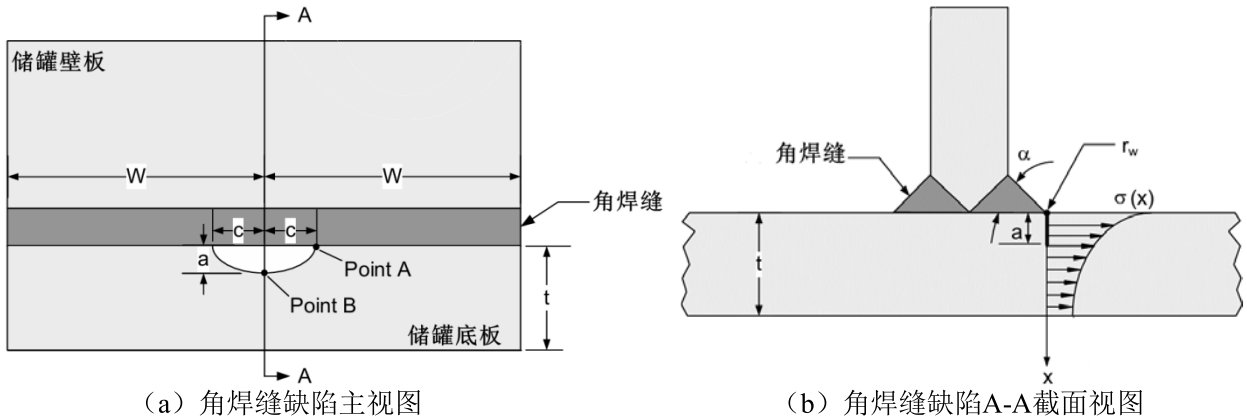
B.2.7 含长 2c、深 a 罐壁与罐底角焊缝处的半椭圆裂纹参考应力解 (见图 B.7)

$$\sigma_{ref} = \frac{gP_b + [(gP_b)^2 + 9P_m^2(1-\alpha)^2]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \quad \dots\dots\dots (B.32)$$

其中:

$$g = 1 - 20 \left( \frac{a}{2c} \right)^{0.75} \alpha^3 \quad \dots\dots\dots (B.33)$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} \quad \dots\dots\dots (B.34)$$



(a) 角焊缝缺陷主视图

(b) 角焊缝缺陷A-A截面视图

图 B.7 含长 2c、深 a 罐壁与罐底角焊缝处的半椭圆裂纹尺寸示意图

B.2.8 公式中符号含义

- a——裂纹深度参数;
- $\alpha$ ——参考应力解的中间参数;
- c——裂纹长度参数;
- $d_1$ ——结构表面到嵌入椭圆裂纹中心的距离;

T/CASE1 ×××—××××

- $g$ ——参考应力解的弯曲参数。；
- $\lambda$ ——用于确定表面校正系数的壳体参数；
- $\lambda_a$ ——用于确定表面校正系数的另一壳体参数；
- $M_s$ ——表面裂纹的表面修正系数；
- $M_t$ ——穿透裂纹的修正系数；
- $P$ ——一次应力；
- $P_b$ ——一次弯曲应力分量；
- $P_m$ ——一次薄膜应力分量；
- $P_{m,eq}$ ——基于等效应力的一次薄膜应力分量；
- $p$ ——压力；
- $\psi$ ——参考应力解的中间参数；
- $R_i$ ——储罐壁板内径；
- $R_m$ ——储罐壁板平均半径；
- $R_o$ ——储罐壁板外径；
- $\sigma$ ——应力；
- $\sigma_{mc}$ ——环向薄膜应力；
- $\sigma_{mi}$ ——轴向薄膜应力；
- $\sigma_{ref}$ ——参考应力；
- $t$ ——储罐壁板或底板的厚度；
- $\tau$ ——参考应力解的中间参数；
- $\theta$ ——裂纹半角；
- $U$ ——考虑压力载荷的环向裂纹参考应力解的中间参数；
- $x$ ——源自储罐内表面的径向局部坐标或参考应力解参数；
- $Z$ ——参考应力解的中间参数。

## 附录 C

(规范性)

## 平面型缺陷应力强度因子计算

## C.1 总则

C.1.1 本附录提供了常压储罐结构中可能出现的多种焊缝裂纹情形的应力强度因子计算式，适用于常压储罐焊缝平面缺陷2级和3级评价方法。

C.1.2 在应力强度因子计算中，应按附录A相关要求，确定一次应力和二次应力（包括残余应力）加载条件下垂直于所评估焊缝裂纹面的应力分布状态，用于确定应力强度因子计算过程中的应力分布情况。

## C.2 常压储罐焊缝典型平面型缺陷应力强度因子解

C.2.1 含长 $2c$ 纵向焊缝穿透裂纹储罐壁板应力强度因子解（壁板厚度 $t$ ，内径 $R_i$ ，见图B.1）

a) 若将所评估焊缝裂纹面的应力划分为薄膜应力和弯曲应力分量，则

$$K_I = \sqrt{\pi c} [(\sigma_m + p_c)G_0 + \sigma_b(G_0 - 2G_1)] \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

b) 若所评估储罐结构仅考虑内压载荷，则

$$K_I = \frac{pR_o}{t} G_p \sqrt{\pi c} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

其中，

$$G_i = \frac{A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3}{1 + A_4\lambda + A_5\lambda^2 + A_6\lambda^3} \quad (i = 0, 1, p) \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

$$\lambda = \frac{1.818c}{\sqrt{R_i t}} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

对于在储罐内表面的穿透裂纹尖端位置， $G_i$ 计算式中的 $A_0 \sim A_6$ 值可由表C.1查得。

表 C.1 纵向焊缝穿透裂纹内表面裂纹构形因子计算系数取值表

$t/R_i$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
0.01 (1/100)	$G_0$	1.00762	-0.178500	0.161440	0.000000	-0.152520	0.058880	-0.003090
	$G_1$	0.0003	2.728940	0.424320	1.698480	13.87692	3.712580	0.073810
	$G_p$	1.01406	2.570610	1.040380	1.308630	2.148980	2.354210	-0.032420
0.01667 (1/60)	$G_0$	1.00764	0.013520	0.179410	0.000000	0.064370	0.024070	-0.001050
	$G_1$	0.00155	1.965340	0.176480	1.467290	9.452660	3.829850	0.018860
	$G_p$	1.0148	0.774270	0.451220	0.470680	0.635190	0.878590	-0.010450
0.05 (1/20)	$G_0$	1.00848	0.011360	0.194630	0.000000	0.073580	0.027420	-0.001140
	$G_1$	0.00382	0.784820	-0.285200	0.747730	1.890590	2.274800	-0.004600
	$G_p$	1.02776	0.014070	0.202280	0.000000	0.111820	0.023890	-0.000930
0.1 (1/10)	$G_0$	1.00856	0.149340	0.243300	0.000000	0.268710	0.009360	-0.000250
	$G_1$	0.00353	0.542290	-0.148882	0.419400	1.263990	1.193950	0.005930
	$G_p$	1.05546	0.166380	0.274280	0.000000	0.353440	0.007500	-0.000160
0.2 (1/5)	$G_0$	1.00475	0.107380	0.229090	0.000000	0.223980	0.012480	-0.000260
	$G_1$	0.00012	0.506470	0.246340	0.343420	3.059800	0.794490	0.018660
	$G_p$	1.096636	0.226909	0.315056	0.000000	0.473274	0.002693	0.000150

对于在储罐外表面的穿透裂纹尖端位置， $G_i$  计算式中的  $A_0 \sim A_6$  值可由表C.2查得。

表 C. 2 纵向焊缝穿透裂纹外表面裂纹构形因子计算系数取值表

$t/R_i$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
0.01 (1/100)	$G_0$	1.004540	0.392250	0.086470	0.000000	-0.020700	0.030610	-0.000990
	$G_I$	0.999510	7.930100	4.196810	1.911150	9.117120	3.412640	0.503310
	$G_p$	0.999190	0.439200	-0.010021	0.000000	0.221300	-0.028073	0.000880
0.01667 (1/60)	$G_0$	1.004660	0.481660	0.168680	0.000000	0.124010	0.029580	-0.000250
	$G_I$	0.995030	2.659410	1.233980	0.250070	3.250500	0.526340	0.070820
	$G_p$	0.993200	0.767840	0.589870	0.000000	0.697560	0.074080	0.001593
0.05 (1/20)	$G_0$	0.996830	0.338140	0.091330	0.000000	-0.017405	0.027980	-0.000490
	$G_I$	0.992850	0.786010	0.490220	0.000000	1.020270	0.108660	0.001550
	$G_p$	0.980700	0.382500	0.206540	0.000000	0.148410	0.038930	0.000405
0.1 (1/10)	$G_0$	0.994730	0.510250	0.185410	0.000000	0.168770	0.030030	0.000233
	$G_I$	0.999220	1.713680	0.612070	0.075550	1.973850	0.142370	0.031160
	$G_p$	0.959540	0.494400	0.213340	0.000000	0.233840	0.032670	0.001154
0.2 (1/5)	$G_0$	0.995330	0.585820	0.211280	0.000000	0.230790	0.037440	-0.000130
	$G_I$	0.998190	0.665590	0.343860	0.000000	0.737420	0.097600	0.000330
	$G_p$	0.947910	0.478700	0.184790	0.000000	0.187160	0.043710	0.000000

C. 2. 2 含长 $2c$ 环向焊缝穿透裂纹储罐壁板应力强度因子解（壁板厚度 $t$ ，内径 $R_i$ ，见图B.2）

a) 若将所评估焊缝裂纹面的应力划分为薄膜应力和弯曲应力分量，则

$$K_I = \sqrt{\pi c} [(\sigma_m + p_c)G_0 + \sigma_b(G_0 - 2G_I)] \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

b) 若所评估储罐结构仅考虑内压载荷，则

$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} G_0 \sqrt{\pi c} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

其中，

$$G_i = \frac{A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3}{1 + A_4\lambda + A_5\lambda^2 + A_6\lambda^3} \quad (i = 0,1) \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

$$\lambda = \frac{1.818c}{\sqrt{R_i t}} \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

对于在储罐内表面的穿透裂纹尖端位置， $G_i$  计算式中的  $A_0 \sim A_6$  值可由表C.3查得。

表 C.3 环向焊缝穿透裂纹内表面裂纹构形因子计算系数取值表

$t/R_i$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
0.01 (1/100)	$G_0$	0.993480	-0.047161	0.054090	0.000000	0.000380	-0.000680	0.000000
	$G_1$	0.029980	0.124380	0.000000	0.000000	-0.075550	0.001750	0.000000
	$G_5$	0.985590	-0.045610	0.051610	0.000000	-0.002030	-0.000410	0.000000
0.01667 (1/60)	$G_0$	0.983490	-0.020450	0.044819	0.000000	0.005920	-0.001050	0.000000
	$G_1$	0.031820	0.123290	0.000000	0.000000	-0.064940	0.001230	0.000000
	$G_5$	0.971070	-0.013090	0.046740	0.000000	0.020930	-0.001310	0.000000
0.05 (1/20)	$G_0$	0.973550	0.003040	0.084271	0.000000	0.113040	-0.014110	0.000399
	$G_1$	0.026150	0.140480	0.000000	0.000000	-0.066830	0.000870	0.000000
	$G_5$	0.933380	0.043860	0.055860	0.000000	0.106990	-0.013120	0.000417
0.1 (1/10)	$G_0$	0.943450	-0.023300	0.069755	0.000000	0.032420	0.007170	-0.000740
	$G_1$	0.025510	0.138400	-0.002950	0.000000	-0.065840	0.000400	0.000000
	$G_5$	0.867590	-0.171700	0.045540	0.000000	-0.207460	0.035710	-0.001580
0.2 (1/5)	$G_0$	0.892870	0.042440	0.048300	0.000000	0.062390	-0.010370	0.000000
	$G_1$	0.009880	0.154550	-0.085610	0.017910	-0.658110	0.177100	-0.010080
	$G_5$	0.766430	-0.113580	0.037070	0.000000	-0.181100	0.032760	-0.001890

对于在储罐外表面的穿透裂纹尖端位置， $G_i$  计算式中的  $A_0 \sim A_6$  值可由表C.4查得。

表 C.4 环向焊缝穿透裂纹外表面裂纹构形因子计算系数取值表

$t/R_i$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
0.01 (1/100)	$G_0$	0.999190	0.439200	-0.010020	0.000000	0.221300	-0.028070	0.000880
	$G_1$	0.993970	1.590210	-0.060740	0.000000	2.031720	-0.212760	0.006006
	$G_5$	1.000000	0.276970	-0.022358	0.002353	0.063820	-0.011510	0.000697
0.01667 (1/60)	$G_0$	1.016350	0.098680	0.000000	0.000000	-0.045340	0.000760	0.000000
	$G_1$	0.990970	0.107330	0.023480	0.000000	0.216380	-0.006700	0.000077
	$G_5$	1.003060	-0.025740	0.004704	0.013164	-0.239280	0.070140	-0.000730
0.05 (1/20)	$G_0$	0.996070	0.069010	-0.005580	0.000000	-0.109370	0.004740	-0.000081
	$G_1$	0.987530	-0.008000	0.022790	0.000000	0.062310	-0.000900	0.000115
	$G_5$	1.004290	0.136840	-0.021254	0.000900	-0.041250	-0.005740	0.000393
0.1 (1/10)	$G_0$	1.009490	0.163660	-0.004640	0.000000	0.009750	-0.004170	0.000000
	$G_1$	0.986430	0.116390	0.002660	0.000000	0.167370	-0.012940	0.000000
	$G_5$	1.004690	0.074190	-0.000500	0.000000	-0.068590	0.013030	-0.000750
0.2 (1/5)	$G_0$	0.988400	0.047990	0.000000	0.000000	-0.068610	-0.000140	0.000000
	$G_1$	0.989020	-0.032660	0.009220	0.000000	0.014110	-0.005480	0.000000
	$G_5$	0.997760	-0.277760	0.030970	0.000000	-0.366350	0.056330	-0.002420

C.2.3 含长 $2c$ 、深 $a$ 纵向焊缝半椭圆表面裂纹储罐壁板应力强度因子解（壁板厚度 $t$ ，内径 $R_i$ ，见图B.3）

a) 外表面裂纹

$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[ 2G_0 + 2G_1 \left( \frac{a}{R_o} \right) + 3G_2 \left( \frac{a}{R_o} \right)^2 + 4G_3 \left( \frac{a}{R_o} \right)^3 + 5G_4 \left( \frac{a}{R_o} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \dots\dots\dots (C.9)$$

b) 内表面裂纹

$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[ 2G_0 - 2G_1 \left( \frac{a}{R_i} \right) + 3G_2 \left( \frac{a}{R_i} \right)^2 - 4G_3 \left( \frac{a}{R_i} \right)^3 + 5G_4 \left( \frac{a}{R_i} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \dots\dots\dots (C.10)$$

其中，内、外表面裂纹的影响系数  $G_i (i=0 \sim 4)$  可由式 (C.11) ~ (C.12) 确定：

$$G_0 = A_{0,0} + A_{0,1}\beta + A_{0,2}\beta^2 + A_{0,3}\beta^3 + A_{0,4}\beta^4 + A_{0,5}\beta^5 + A_{0,6}\beta^6 \dots\dots\dots (C.11)$$

$$G_1 = A_{1,0} + A_{1,1}\beta + A_{1,2}\beta^2 + A_{1,3}\beta^3 + A_{1,4}\beta^4 + A_{1,5}\beta^5 + A_{1,6}\beta^6 \dots\dots\dots (C.12)$$

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right) \dots\dots\dots (C.13)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right) \dots\dots\dots (C.14)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right) \dots\dots\dots (C.15)$$

其中，

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi} \dots\dots\dots (C.16)$$

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \dots\dots\dots (C.17)$$

$$M_2 = 3 \dots\dots\dots (C.13)$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5} \dots\dots\dots (C.18)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad a/c \leq 1.0 \dots\dots\dots (C.19)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1.65} \quad a/c > 1.0 \dots\dots\dots (C.20)$$

$G_i (i=0,1)$  计算式中的  $A_{i,j}$  值可分别由表C.5 (外表面裂纹) 和表C.6 (内表面裂纹) 查得。

表 C.5 纵向焊缝半椭圆外表面裂纹构形因子计算系数取值表（部分）

$t/R_i$	$a/c$	$a/t$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
0.0	0.03125	0	$G_0$	0.1965046	2.9373464	-5.2582823	7.4889153	-6.9282667	3.3673349	-0.6677966
			$G_1$	0.0051780	0.1750280	2.7718680	-4.6457154	4.6780502	-3.2768090	0.9840994
		0.2	$G_0$	0.2080760	3.0112422	-5.1048701	7.6348715	-6.8347547	2.7940766	-0.3882688
			$G_1$	0.0084834	0.2406767	2.4574292	-3.6452421	3.6142837	-2.8451814	0.9270638
		0.4	$G_0$	0.2357940	3.0822400	-3.5792100	3.9476890	1.9131590	-6.8872200	3.1896800
			$G_1$	0.0145140	0.4038000	1.6422700	-0.3906100	-0.6480700	-0.2940300	0.2514900
		0.6	$G_0$	0.2902240	3.6892050	-4.5739100	11.709890	-6.3750000	-5.8894100	4.2452400
			$G_1$	0.0208890	0.7016780	0.1631840	5.7072160	-8.2075800	3.4561120	-0.4454700
		0.8	$G_0$	0.5163550	2.5310830	14.712900	-43.621800	101.06570	-116.08100	46.190900
			$G_1$	0.0825460	0.4971770	4.6064810	-7.3326700	21.148620	-29.345100	12.491400
0.0	0.0625	0	$G_0$	0.2695332	2.1626001	-1.6551569	-1.2970208	4.5604304	-4.3163876	1.4010655
			$G_1$	0.0138667	0.1827458	2.5749608	-3.9044679	3.3556301	-2.1772209	0.6420134
		0.2	$G_0$	0.2845892	2.2264055	-1.4546190	-1.5760719	5.1131083	-4.9485443	1.6207574
			$G_1$	0.0199077	0.2210874	2.4642047	-3.5898625	3.1624039	-2.2403780	0.6965751
		0.4	$G_0$	0.3261480	2.5200870	-1.8847000	2.1798740	-1.4597100	-0.1886500	0.2393400
			$G_1$	0.0294120	0.3699370	1.9220850	-1.2071500	-0.4394000	0.2737550	-0.0395200
		0.6	$G_0$	0.4166330	3.1566470	-2.6248900	7.7325910	-9.6927800	3.6428700	-0.0892000
			$G_1$	0.0598460	0.4340740	2.6811560	-3.1936600	4.0753720	-4.6940200	1.8285500
		0.8	$G_0$	0.6540140	3.4231920	3.8158050	-4.1586900	3.4715330	-10.310400	6.6280000
			$G_1$	0.1214780	0.6975490	2.9718330	-1.3036500	-0.0754900	-3.0465100	2.1670000
0.0	0.125	0	$G_0$	0.4065238	0.7772483	3.8861644	-12.573943	16.760207	-11.014593	2.8706957
			$G_1$	0.0320270	0.1825342	2.2670449	-2.7076615	1.2088194	-0.3777430	0.0763155
		0.2	$G_0$	0.4242116	1.0089302	3.2973815	-12.159726	17.873386	-12.868668	3.6281712
			$G_1$	0.0429859	0.2033811	2.2563818	-2.8752160	1.8152558	-1.0512327	0.3181077
		0.4	$G_0$	0.4917770	1.6592320	-0.1080400	0.1793240	-2.7076100	3.3680620	-1.3489700
			$G_1$	0.0634270	0.3722500	1.6231670	-0.5306500	-2.0007400	1.8943780	-0.5880300
		0.6	$G_0$	0.6591820	1.8759140	1.0212600	-1.7698000	-0.5653600	1.2479960	-0.4376600
			$G_1$	0.1116040	0.4714500	1.7940590	-0.7557600	-1.4901700	1.0852180	-0.2113700
		0.8	$G_0$	0.9809330	1.8846320	4.8020780	-8.0580200	0.4447850	3.4772660	-1.0567500
			$G_1$	0.2039950	0.4800150	2.8822430	-2.5890100	-0.9683000	1.5372370	-0.3750200
0.0	0.25	0	$G_0$	0.6152816	-0.3348694	6.2955620	-15.590618	19.299508	-12.488107	3.3010035
			$G_1$	0.0703566	0.2828152	1.4036169	-0.6511596	-1.2076596	1.0318656	-0.2423741
		0.2	$G_0$	0.6385889	-0.3095132	6.5329787	-16.622882	21.056641	-13.850120	3.6988146
			$G_1$	0.0840059	0.1999367	1.8218113	-1.7756899	0.3757186	-0.0785358	0.0643386
		0.4	$G_0$	0.7390420	0.0548160	4.0842620	-7.5883100	5.4047530	-1.0146100	-0.3483400
			$G_1$	0.1164500	0.2479880	1.8282520	-1.7169900	0.1912120	0.1165770	-0.0186100
		0.6	$G_0$	0.9461210	-0.1858800	5.5867460	-9.8634900	5.9596870	0.1296440	-1.0026100
			$G_1$	0.1778050	0.2056680	2.0979210	-1.8039500	-0.5558700	1.1461400	-0.4206600
		0.8	$G_0$	1.2452110	-0.6921900	8.3260620	-14.948000	8.6936910	0.4755790	-1.3926600
			$G_1$	0.2585640	0.1548890	2.1170240	-0.4910000	-4.6146100	5.4550750	-1.9663300
0.0	0.5	0	$G_0$	0.8776607	-0.6729719	3.7721411	-6.5209060	6.3377934	-3.7028038	0.9872447
			$G_1$	0.1277541	0.4368502	0.4904522	1.0427434	-2.9631236	2.0826525	-0.5184313
		0.2	$G_0$	0.9003948	-0.8850488	5.2743239	-11.267523	13.890755	-9.6373584	2.8183906
			$G_1$	0.1404409	0.3215397	1.1010666	-1.0257556	0.6943940	-1.0793186	0.5410929
		0.4	$G_0$	1.0058060	-0.7322600	2.9951940	-1.9459200	-3.2613500	5.1424570	-2.0306200
			$G_1$	0.1740870	0.3051630	1.2070310	-0.6720500	-1.0651300	1.1445590	-0.3644800
		0.6	$G_0$	1.1826010	-1.1072500	3.9623640	-2.7781300	-4.3097300	7.2772750	-2.9648200
			$G_1$	0.2277120	0.1701170	1.5499470	-1.1051200	-0.8333700	1.1717060	-0.4194500
		0.8	$G_0$	1.3833380	-1.3900300	4.3755780	-3.7372600	-2.5403200	5.3036000	-2.0932400
			$G_1$	0.2820110	0.0839230	1.7258580	-1.5358100	-0.0635600	0.5006780	-0.1982200

表 C.6 纵向焊缝半椭圆内表面裂纹构形因子计算系数取值表（部分）

$t/R_i$	$a/c$	$a/t$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$		
0.0	0.03125	0	$G_0$	0.1965046	2.9373464	-5.2582823	7.4889153	-6.9282667	3.3673349	-0.6677966		
			$G_1$	0.0051780	0.1750280	2.7718680	-4.6457154	4.6780502	-3.2768090	0.9840994		
		0.2	$G_0$	0.2080760	3.0112422	-5.1048701	7.6348715	-6.8347547	2.7940766	-0.3882688		
			$G_1$	0.0084834	0.2406767	2.4574292	-3.6452421	3.6142837	-2.8451814	0.9270638		
		0.4	$G_0$	0.2357940	3.0822400	-3.5792100	3.9476890	1.9131590	-6.8872200	3.1896800		
			$G_1$	0.0145140	0.4038000	1.6422700	-0.3906100	-0.6480700	-0.2940300	0.2514900		
		0.6	$G_0$	0.2902240	3.6892050	-4.5739100	11.709890	-6.3750000	-5.8894100	4.2452400		
			$G_1$	0.0208890	0.7016780	0.1631840	5.7072160	-8.2075800	3.4561120	-0.4454700		
		0.8	$G_0$	0.5163550	2.5310830	14.712900	-43.621800	101.065700	-116.081000	46.190900		
			$G_1$	0.0825460	0.4971770	4.6064810	-7.3326700	21.148620	-29.345100	12.491400		
		0.0	0.0625	0	$G_0$	0.2695332	2.1626001	-1.6551569	-1.2970208	4.5604304	-4.3163876	1.4010655
					$G_1$	0.0138667	0.1827458	2.5749608	-3.9044679	3.3556301	-2.1772209	0.6420134
0.2	$G_0$			0.2845892	2.2264055	-1.4546190	-1.5760719	5.1131083	-4.9485443	1.6207574		
	$G_1$			0.0199077	0.2210874	2.4642047	-3.5898625	3.1624039	-2.2403780	0.6965751		
0.4	$G_0$			0.3261480	2.5200870	-1.8847000	2.1798740	-1.4597100	-0.1886500	0.2393400		
	$G_1$			0.0294120	0.3699370	1.9220850	-1.2071500	-0.4394000	0.2737550	-0.0395200		
0.6	$G_0$			0.4166330	3.1566470	-2.6248900	7.7325910	-9.6927800	3.6428700	-0.0892000		
	$G_1$			0.0598460	0.4340740	2.6811560	-3.1936600	4.0753720	-4.6940200	1.8285500		
0.8	$G_0$			0.6540140	3.4231920	3.8158050	-4.1586900	3.4715330	-10.310400	6.6280000		
	$G_1$			0.1214780	0.6975490	2.9718330	-1.3036500	-0.0754900	-3.0465100	2.1670000		
0.0	0.125			0	$G_0$	0.4065238	0.7772483	3.8861644	-12.573943	16.760207	-11.014593	2.8706957
					$G_1$	0.0320270	0.1825342	2.2670449	-2.7076615	1.2088194	-0.3777430	0.0763155
		0.2	$G_0$	0.4242116	1.0089302	3.2973815	-12.159726	17.873386	-12.868668	3.6281712		
			$G_1$	0.0429859	0.2033811	2.2563818	-2.8752160	1.8152558	-1.0512327	0.3181077		
		0.4	$G_0$	0.4917770	1.6592320	-0.1080400	0.1793240	-2.7076100	3.3680620	-1.3489700		
			$G_1$	0.0634270	0.3722500	1.6231670	-0.5306500	-2.0007400	1.8943780	-0.5880300		
		0.6	$G_0$	0.6591820	1.8759140	1.0212600	-1.7698000	-0.5653600	1.2479960	-0.4376600		
			$G_1$	0.1116040	0.4714500	1.7940590	-0.7557600	-1.4901700	1.0852180	-0.2113700		
		0.8	$G_0$	0.9809330	1.8846320	4.8020780	-8.0580200	0.4447850	3.4772660	-1.0567500		
			$G_1$	0.2039950	0.4800150	2.8822430	-2.5890100	-0.9683000	1.5372370	-0.3750200		
		0.0	0.25	0	$G_0$	0.6152816	-0.3348694	6.2955620	-15.590618	19.299508	-12.488107	3.3010035
					$G_1$	0.0703566	0.2828152	1.4036169	-0.6511596	-1.2076596	1.0318656	-0.2423741
0.2	$G_0$			0.6385889	-0.3095132	6.5329787	-16.622882	21.056641	-13.850120	3.6988146		
	$G_1$			0.0840059	0.1999367	1.8218113	-1.7756899	0.3757186	-0.0785358	0.0643386		
0.4	$G_0$			0.7390420	0.0548160	4.0842620	-7.5883100	5.4047530	-1.0146100	-0.3483400		
	$G_1$			0.1164500	0.2479880	1.8282520	-1.7169900	0.1912120	0.1165770	-0.0186100		
0.6	$G_0$			0.9461210	-0.1858800	5.5867460	-9.8634900	5.9596870	0.1296440	-1.0026100		
	$G_1$			0.1778050	0.2056680	2.0979210	-1.8039500	-0.5558700	1.1461400	-0.4206600		
0.8	$G_0$			1.2452110	-0.6921900	8.3260620	-14.948000	8.6936910	0.4755790	-1.3926600		
	$G_1$			0.2585640	0.1548890	2.1170240	-0.4910000	-4.6146100	5.4550750	-1.9663300		
0.0	0.5			0	$G_0$	0.8776607	-0.6729719	3.7721411	-6.5209060	6.3377934	-3.7028038	0.9872447
					$G_1$	0.1277541	0.4368502	0.4904522	1.0427434	-2.9631236	2.0826525	-0.5184313
		0.2	$G_0$	0.9003948	-0.8850488	5.2743239	-11.267523	13.890755	-9.6373584	2.8183906		
			$G_1$	0.1404409	0.3215397	1.1010666	-1.0257556	0.6943940	-1.0793186	0.5410929		
		0.4	$G_0$	1.0058060	-0.7322600	2.9951940	-1.9459200	-3.2613500	5.1424570	-2.0306200		
			$G_1$	0.1740870	0.3051630	1.2070310	-0.6720500	-1.0651300	1.1445590	-0.3644800		
		0.6	$G_0$	1.1826010	-1.1072500	3.9623640	-2.7781300	-4.3097300	7.2772750	-2.9648200		
			$G_1$	0.2277120	0.1701170	1.5499470	-1.1051200	-0.8333700	1.1717060	-0.4194500		
		0.8	$G_0$	1.3833380	-1.3900300	4.3755780	-3.7372600	-2.5403200	5.3036000	-2.0932400		
			$G_1$	0.2820110	0.0839230	1.7258580	-1.5358100	-0.0635600	0.5006780	-0.1982200		

c) 裂纹和储罐几何尺寸限制条件:

$$0.0 \leq a/t \leq 0.8; 0.03125 \leq a/c \leq 2.0; \varphi \leq \pi/2; 0.0 \leq t/R_i \leq 3.0。$$

C.2.4 含长 $2c$ 、深 $a$ 环向焊缝半椭圆表面裂纹储罐壁板应力强度因子解（壁板厚度 $t$ ，内径 $R_i$ ，见图B.4）

a) 外表面裂纹

$$K_I = G_0 \left[ \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \dots\dots\dots (C.21)$$

b) 内表面裂纹

$$K_I = G_0 \left[ \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad \dots\dots\dots (C.22)$$

其中,

$$G_0 = A_{0,0} + A_{0,1}\beta + A_{0,2}\beta^2 + A_{0,3}\beta^3 + A_{0,4}\beta^4 + A_{0,5}\beta^5 + A_{0,6}\beta^6 \quad \dots\dots\dots (C.23)$$

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi} \quad \dots\dots\dots (C.24)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad a/c \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (C.25)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1.65} \quad a/c > 1.0 \quad \dots\dots\dots (C.26)$$

$G_0$  计算式中的  $A_{0,j}$  值可分别由表C.7 (外表面裂纹) 和表C.8 (内表面裂纹) 查得。

表 C.7 环向焊缝半椭圆外表面裂纹构形因子计算系数取值表（部分）

$t/R_i$	$a/c$	$a/t$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
0.0	0.03125	0	$G_0$	0.1965046	2.9373464	-5.2582821	7.4889154	-6.9282665	3.3673348	-0.6677966
			$G_1$	0.0051779	0.1750280	2.7718679	-4.6457152	4.6780500	-3.2768089	0.9840994
			$G_5$	0.1965049	2.9373459	-5.2582821	7.4889149	-6.9282670	3.3673350	-0.6677970
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.2	$G_0$	0.2080760	3.0112421	-5.1048703	7.6348714	-6.8347549	2.7940766	-0.3882687
			$G_1$	0.0084834	0.2406767	2.4574291	-3.6452419	3.6142838	-2.8451814	0.9270638
			$G_5$	0.2080760	3.0112421	-5.1048703	7.6348714	-6.8347549	2.7940766	-0.3882687
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.4	$G_0$	0.2357939	3.0822401	-3.5792100	3.9476890	1.9131590	-6.8872199	3.1896800
			$G_1$	0.0145140	0.4038000	1.6422699	-0.3906100	-0.6480699	-0.2940300	0.2514899
			$G_5$	0.2357939	3.0822401	-3.5792100	3.9476890	1.9131590	-6.8872199	3.1896800
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.6	$G_0$	0.2902239	3.6892049	-4.5739102	11.7098903	-6.3750000	-5.8894100	4.2452402
			$G_1$	0.0208889	0.7016779	0.1631840	5.7072157	-8.2075796	3.4561119	-0.4454700
			$G_5$	0.2902239	3.6892049	-4.5739102	11.7098900	-6.3750000	-5.8894100	4.2452402
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.8	$G_0$	0.5163549	2.5310831	14.7129001	-43.6217994	101.0656967	-116.081001	46.1908988
			$G_1$	0.0825460	0.4971770	4.6064810	-7.3326702	21.1486206	-29.345100	12.4913997
			$G_5$	0.5163549	2.5310831	14.7129000	-43.6217994	101.0656966	-116.081001	46.1908988
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
0.0	0.0625	0	$G_0$	0.2695332	2.1626000	-1.6551568	-1.2970207	4.5604305	-4.3163876	1.4010654
			$G_1$	0.0138667	0.1827458	2.5749607	-3.9044678	3.3556301	-2.1772208	0.6420134
			$G_5$	0.2695330	2.1626000	-1.6551569	-1.2970210	4.5604300	-4.3163881	1.4010659
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.2	$G_0$	0.2845892	2.2264056	-1.4546190	-1.5760718	5.1131081	-4.9485445	1.6207573
			$G_1$	0.0199077	0.2210874	2.4642047	-3.5898623	3.1624038	-2.2403779	0.6965750
			$G_5$	0.2845892	2.2264056	-1.4546190	-1.5760718	5.1131081	-4.9485445	1.6207573
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.4	$G_0$	0.3261480	2.5200870	-1.8846999	2.1798739	-1.4597100	-0.1886499	0.2393400
			$G_1$	0.0294120	0.3699370	1.9220850	-1.2071499	-0.4393999	0.2737550	-0.0395199
			$G_5$	0.3261480	2.5200870	-1.8846999	2.1798739	-1.4597100	-0.1886499	0.2393400
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.6	$G_0$	0.4166330	3.1566469	-2.6248900	7.7325911	-9.6927795	3.6428699	-0.0891999
			$G_1$	0.0598459	0.4340740	2.6811559	-3.1936600	4.0753722	-4.6940197	1.8285499
			$G_5$	0.4166330	3.1566469	-2.6248900	7.7325911	-9.6927795	3.6428699	-0.0891999
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.8	$G_0$	0.6540140	3.4231920	3.8158050	-4.1586900	3.4715330	-10.310400	6.6280000
			$G_1$	0.1214779	0.6975489	2.9718329	-1.3036500	-0.0754899	-3.0465099	2.1670000
			$G_5$	0.6540140	3.4231920	3.8158050	-4.1586900	3.4715330	-10.310400	6.6280000
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000

表 C.8 环向焊缝半椭圆内表面裂纹构形因子计算系数取值表（部分）

$t/R_i$	$a/c$	$a/t$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	
0.0	0.03125	0	$G_0$	0.1965046	2.9373464	-5.2582823	7.4889153	-6.9282667	3.3673349	-0.6677966	
			$G_1$	0.0051780	0.1750280	2.7718680	-4.6457154	4.6780502	-3.2768090	0.9840994	
			$G_5$	0.1965050	2.9373460	-5.2582820	7.4889150	-6.9282670	3.3673350	-0.6677970	
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	
		0.2	$G_0$	0.2080760	3.0112422	-5.1048701	7.6348715	-6.8347547	2.7940766	-0.3882688	
			$G_1$	0.0084834	0.2406767	2.4574292	-3.6452421	3.6142837	-2.8451814	0.9270638	
			$G_5$	0.2080760	3.0112422	-5.1048701	7.6348715	-6.8347547	2.7940766	-0.3882688	
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	
		0.4	$G_0$	0.2357940	3.0822400	-3.5792100	3.9476890	1.9131590	-6.8872200	3.1896800	
			$G_1$	0.0145140	0.4038000	1.6422700	-0.3906100	-0.6480700	-0.2940300	0.2514900	
			$G_5$	0.2357940	3.0822400	-3.5792100	3.9476890	1.9131590	-6.8872200	3.1896800	
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	
	0.6	$G_0$	0.2902240	3.6892050	-4.5739100	11.709890	-6.3750000	-5.8894100	4.2452400		
		$G_1$	0.0208890	0.7016780	0.1631840	5.7072160	-8.2075800	3.4561120	-0.4454700		
		$G_5$	0.2902240	3.6892050	-4.5739100	11.709890	-6.3750000	-5.8894100	4.2452400		
		$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000		
	0.8	$G_0$	0.5163550	2.5310830	14.712900	-43.621800	101.06570	-116.08100	46.190900		
		$G_1$	0.0825460	0.4971770	4.6064810	-7.3326700	21.148620	-29.345100	12.491400		
		$G_5$	0.5163550	2.5310830	14.712900	-43.621800	101.06570	-116.08100	46.190900		
		$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000		
	0.0	0.0625	0	$G_0$	0.2695332	2.1626001	-1.6551569	-1.2970208	4.5604304	-4.3163876	1.4010655
				$G_1$	0.0138667	0.1827458	2.5749608	-3.9044679	3.3556301	-2.1772209	0.6420134
				$G_5$	0.2695330	2.1626000	-1.6551570	-1.2970210	4.5604300	-4.3163880	1.4010660
				$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
0.2			$G_0$	0.2845892	2.2264055	-1.4546190	-1.5760719	5.1131083	-4.9485443	1.6207574	
			$G_1$	0.0199077	0.2210874	2.4642047	-3.5898625	3.1624039	-2.2403780	0.6965751	
			$G_5$	0.2845892	2.2264055	-1.4546190	-1.5760719	5.1131083	-4.9485443	1.6207574	
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	
0.4			$G_0$	0.3261480	2.5200870	-1.8847000	2.1798740	-1.4597100	-0.1886500	0.2393400	
			$G_1$	0.0294120	0.3699370	1.9220850	-1.2071500	-0.4394000	0.2737550	-0.0395200	
			$G_5$	0.3261480	2.5200870	-1.8847000	2.1798740	-1.4597100	-0.1886500	0.2393400	
			$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	
0.6		$G_0$	0.4166330	3.1566470	-2.6248900	7.7325910	-9.6927800	3.6428700	-0.0892000		
		$G_1$	0.0598460	0.4340740	2.6811560	-3.1936600	4.0753720	-4.6940200	1.8285500		
		$G_5$	0.4166330	3.1566470	-2.6248900	7.7325910	-9.6927800	3.6428700	-0.0892000		
		$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000		
0.8		$G_0$	0.6540140	3.4231920	3.8158050	-4.1586900	3.4715330	-10.310400	6.6280000		
		$G_1$	0.1214780	0.6975490	2.9718330	-1.3036500	-0.0754900	-3.0465100	2.1670000		
		$G_5$	0.6540140	3.4231920	3.8158050	-4.1586900	3.4715330	-10.310400	6.6280000		
		$G_6$	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000		

c) 裂纹和储罐几何尺寸限制条件:

$$0.0 \leq a/t \leq 0.8; \quad 0.03125 \leq a/c \leq 2.0; \quad \varphi \leq \pi/2; \quad 0.0 \leq t/R_i \leq 3.0。$$

C.2.5 含长 $2c$ 、深 $2a$ 纵向焊缝椭圆埋藏裂纹储罐壁板应力强度因子解（壁板厚度 $t$ ，内径 $R_i$ ，见图B.5）

$$K_I = \left[ \begin{array}{l} G_0 \left( (\sigma_0 + p_c) + \sigma_1 \left( \frac{d_1}{t} \right) + \sigma_2 \left( \frac{d_1}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left( \frac{d_1}{t} \right)^3 + \sigma_4 \left( \frac{d_1}{t} \right)^4 \right) + \\ G_1 \left( \sigma_1 + 2\sigma_2 \left( \frac{d_1}{t} \right) + 3\sigma_3 \left( \frac{d_1}{t} \right)^2 + 4\sigma_4 \left( \frac{d_1}{t} \right)^3 \right) \left( \frac{a}{t} \right) + \\ G_2 \left( \sigma_2 + 3\sigma_3 \left( \frac{d_1}{t} \right) + 6\sigma_4 \left( \frac{d_1}{t} \right)^2 \right) \left( \frac{a}{t} \right)^2 + \\ G_3 \left( \sigma_3 + 4\sigma_4 \left( \frac{d_1}{t} \right) \right) \left( \frac{a}{t} \right)^3 + G_4 \sigma_4 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \end{array} \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \cdot f_w \sqrt{\quad} \quad \dots \quad (C.27)$$

其中， $\sigma_i (i=0 \sim 4)$  为四阶多项式应力分布的各阶系数，可用于更准确表征高度非线性应力分布下的应力强度，其一般形式为：

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left( \frac{x}{t} \right) + \sigma_2 \left( \frac{x}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left( \frac{x}{t} \right)^3 + \sigma_4 \left( \frac{x}{t} \right)^4 \quad \dots \quad (C.28)$$

在四阶多项式应力分布下的等效薄膜应力和弯曲应力满足下列关系：

$$\sigma_m = \sigma_0 + \frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_2}{3} + \frac{\sigma_3}{4} + \frac{\sigma_4}{5} \quad \dots \quad (C.29)$$

$$\sigma_b = -\frac{\sigma_1}{2} - \frac{\sigma_2}{2} - \frac{9\sigma_3}{20} - \frac{6\sigma_4}{15} \quad \dots \quad (C.30)$$

影响系数  $G_i (i=0 \sim 4)$  可以采用以下方程来确定：

$$G_0 = A_{0,0} + A_{0,1}\beta + A_{0,2}\beta^2 + A_{0,3}\beta^3 + A_{0,4}\beta^4 + A_{0,5}\beta^5 + A_{0,6}\beta^6 \quad \dots \quad (C.31)$$

$$G_1 = A_{1,0} + A_{1,1}\beta + A_{1,2}\beta^2 + A_{1,3}\beta^3 + A_{1,4}\beta^4 + A_{1,5}\beta^5 + A_{1,6}\beta^6 \quad \dots \quad (C.32)$$

$$G_2 = A_{2,0} + A_{2,1}\beta + A_{2,2}\beta^2 + A_{2,3}\beta^3 + A_{2,4}\beta^4 + A_{2,5}\beta^5 + A_{2,6}\beta^6 \quad \dots \quad (C.33)$$

$$G_3 = A_{3,0} + A_{3,1}\beta + A_{3,2}\beta^2 + A_{3,3}\beta^3 + A_{3,4}\beta^4 + A_{3,5}\beta^5 + A_{3,6}\beta^6 \quad \dots \quad (C.34)$$

$$G_4 = A_{4,0} + A_{4,1}\beta + A_{4,2}\beta^2 + A_{4,3}\beta^3 + A_{4,4}\beta^4 + A_{4,5}\beta^5 + A_{4,6}\beta^6 \quad \dots \quad (C.35)$$

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi} \quad \dots \quad (C.36)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad a/c \leq 1.0 \quad \dots \quad (C.37)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1.65} \quad a/c > 1.0 \quad \dots \quad (C.38)$$

$$f_w = 1 \quad \dots \quad (C.39)$$

其中， $G_i (i=0 \sim 4)$  计算式中的  $A_{i,j} (i=0 \sim 4, j=0 \sim 6)$  值可由表C.9查得。

表 C.9 纵向焊缝椭圆埋藏裂纹构形因子计算系数取值表（部分）

$a/c$	$d_1/t$	$a/d_1$	$G_i$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
0.125	0.1	0.2	$G_0$	0.453339	0.002579	2.377363	-0.009845	-3.608162	0.006526	1.809979
			$G_1$	5.857E-05	0.5078001	2.561E-05	0.3974088	-0.00063	-0.414078	0.0004351
			$G_2$	-0.001573	0.000157	0.964481	-0.000598	-0.358261	0.000320	-0.113455
			$G_3$	-5.64E-06	0.0013232	4.094E-05	1.0594535	-9.9E-05	-0.692845	2.883E-05
			$G_4$	-0.003972	0.000000	0.158606	-0.000020	0.975214	-0.000006	-0.768528
		0.4	$G_0$	0.466894	-0.000183	2.318151	-0.022260	-3.382581	0.014255	1.660507
			$G_1$	-7.98E-05	0.524491	-0.001379	0.3457247	-0.00389	-0.377892	0.0032573
			$G_2$	-0.002119	0.000261	0.984744	-0.005198	-0.381285	0.002939	-0.103774
			$G_3$	-4E-05	0.0040861	-0.000194	1.0562663	-0.00272	-0.692305	0.0019455
			$G_4$	-0.005178	0.000188	0.172885	-0.002378	0.963875	0.001210	-0.767266
		0.6	$G_0$	0.477274	-0.000129	2.365713	-0.090046	-3.281894	0.056426	1.567260
			$G_1$	-0.000273	0.5274077	-0.003353	0.3444216	-0.02502	-0.374755	0.0188494
			$G_2$	-0.002130	0.001859	1.000577	-0.023568	-0.366597	0.012765	-0.119386
			$G_3$	-0.000163	0.0041254	0.0009764	1.0602626	-0.0169	-0.694386	0.0112423
			$G_4$	-0.005726	0.001266	0.180947	-0.011073	0.971679	0.005175	-0.775605
		0.8	$G_0$	0.487714	0.010113	2.478118	-0.301636	-3.070704	0.173415	1.379379
			$G_1$	-0.001162	0.5179352	0.003687	0.3990023	-0.12955	-0.397981	0.0871266
			$G_2$	-0.000737	0.008895	1.001326	-0.082830	-0.263901	0.038980	-0.188657
			$G_3$	-0.000793	0.0008877	0.0112907	1.0760818	-0.0799	-0.697195	0.0487794
			$G_4$	-0.005154	0.005495	0.177660	-0.038930	1.021968	0.014325	-0.806620
0.125	0.25	0.2	$G_0$	0.402472	-0.050527	2.904407	0.255471	-4.947331	-0.281718	2.736348
			$G_1$	-0.002654	0.466214	-0.066963	0.459261	0.146976	-0.440574	-0.080979
			$G_2$	-0.002028	-0.011522	0.899724	-0.037831	-0.235939	0.058484	-0.195269
			$G_3$	0.001862	0.008824	-0.096953	0.958686	0.183063	-0.620891	-0.089157
			$G_4$	-0.003131	0.002178	0.153341	-0.082397	0.942617	0.092908	-0.762958
		0.4	$G_0$	0.423287	-0.031730	2.755031	0.106003	-4.356325	-0.113844	2.276538
			$G_1$	-0.004337	0.488376	-0.018798	0.445002	0.042130	-0.442372	-0.023399
			$G_2$	-0.000113	-0.012149	0.951095	-0.003645	-0.308412	0.015653	-0.149110
			$G_3$	0.000486	0.002651	-0.049583	1.025268	0.091154	-0.665949	-0.044010
			$G_4$	-0.002569	-0.001080	0.152314	-0.039286	0.982607	0.044717	-0.778851
		0.6	$G_0$	0.432989	-0.033577	2.872620	0.027125	-4.359993	-0.064021	2.235058
			$G_1$	-0.004351	0.486459	-0.027018	0.466641	0.031078	-0.455126	-0.013517
			$G_2$	0.001550	-0.011965	0.969643	-0.021303	-0.285069	0.024774	-0.171453
			$G_3$	0.000228	0.002766	-0.049174	1.036901	0.077402	-0.671945	-0.035391
			$G_4$	-0.001651	-0.000909	0.156156	-0.047470	1.008257	0.048482	-0.797691
		0.8	$G_0$	0.445542	-0.033047	3.041505	-0.234082	-4.127055	0.097677	2.009092
			$G_1$	-0.005232	0.488237	-0.017605	0.521073	-0.098628	-0.481469	0.071257
			$G_2$	0.003887	-0.004975	0.999241	-0.082000	-0.187212	0.044134	-0.245910
			$G_3$	-0.000904	-0.002210	-0.022680	1.092769	-0.025501	-0.702693	0.022851
			$G_4$	-0.000593	0.002201	0.155600	-0.064479	1.102858	0.042103	-0.860425

d) 裂纹和储罐几何尺寸限制条件:

$$0.1 \leq d_1/t \leq 0.9; \quad 0.125 \leq a/c \leq 1.0; \quad -\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2。$$

C.2.6 含长 $2c$ 、深 $2a$ 环向焊缝椭圆埋藏裂纹储罐壁板应力强度因子解（壁板厚度 $t$ ，内径 $R_i$ ，见图B.6），该类型裂纹缺陷的应力强度因子解可按C.2.5进行计算。

C.2.7 含长 $2c$ 、深 $a$ 罐壁与罐底角焊缝处的半椭圆裂纹应力强度因子解（见图B.7）

a) 应力强度因子解

$$K_I = [M_m(\sigma_m + p_c) + M_b\sigma_b] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad \dots\dots\dots (C.40)$$

其中，薄膜修正系数  $M_m$  由下式计算：

$$M_m = \left[ M_1 + M_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \right] g \cdot f_\varphi \cdot f_w \quad \dots\dots\dots (C.41)$$

其中，

$$f_w = \left[ \sec \left( \frac{\pi c}{2W} \cdot \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{0.5} \quad \dots\dots\dots (C.42)$$

对于  $a/c \leq 1.0$  的情况，

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left( \frac{a}{c} \right) \quad \dots\dots\dots (C.43)$$

$$M_2 = \frac{0.89}{0.2 + a/c} - 0.54 \quad \dots\dots\dots (C.44)$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + a/c} + 14 \left[ 1 - \left( \frac{a}{c} \right) \right]^{24} \quad \dots\dots\dots (C.45)$$

$$g = 1 + \left[ 0.1 + 0.35 \left( \frac{a}{t} \right)^2 \right] (1 - \sin \varphi)^2 \quad \dots\dots\dots (C.46)$$

$$f_\varphi = \left[ \left( \frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right]^{0.25} \quad \dots\dots\dots (C.47)$$

对于  $a/c > 1.0$  的情况，

$$M_1 = \left( \frac{c}{a} \right)^{0.5} \left[ 1 + 0.04 \left( \frac{c}{a} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (C.48)$$

$$M_2 = 0.2 \left( \frac{c}{a} \right)^4 \quad \dots\dots\dots (C.49)$$

$$M_3 = -0.11 \left( \frac{c}{a} \right)^4 \quad \dots\dots\dots (C.50)$$

$$g = 1 + \left[ 0.1 + 0.35 \left( \frac{c}{a} \right) \left( \frac{a}{t} \right)^2 \right] (1 - \sin \varphi)^2 \quad \dots\dots\dots (C.51)$$

$$f_\varphi = \left[ \left( \frac{c}{a} \right)^2 \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi \right]^{0.25} \quad \dots\dots\dots (C.52)$$

弯曲修正系数  $M_b$  由下式计算：

$$M_b = M_m \cdot H \quad \dots\dots\dots (C.53)$$

其中，

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^q \varphi \quad \dots\dots\dots (C.54)$$

$$H_2 = 1 + G_1 \left( \frac{a}{t} \right) + G_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (C.55)$$

对于  $a/c \leq 1.0$  的情况，

$$q = 0.2 + \frac{a}{c} + 0.6 \frac{a}{t} \quad \dots\dots\dots (C.56)$$

$$H_1 = 1 - 0.34 \frac{a}{t} - 0.11 \frac{a}{c} \cdot \frac{a}{t} \quad \dots\dots\dots (C.57)$$

$$G_1 = -1.22 - 0.12 \frac{a}{c} \quad \dots\dots\dots (C.58)$$

$$G_2 = 0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{c}\right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (C.59)$$

对于  $a/c > 1.0$  的情况,

$$q = 0.2 + \frac{c}{a} + 0.6 \frac{a}{t} \quad \dots\dots\dots (C.60)$$

$$H_1 = 1 - \left[ 0.04 + 0.41 \left(\frac{c}{a}\right) \right] \left(\frac{a}{t}\right) + \left[ 0.55 - 1.93 \left(\frac{c}{a}\right)^{0.75} + 1.38 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.5} \right] \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (C.61)$$

$$G_1 = -2.11 + 0.77 \frac{c}{a} \quad \dots\dots\dots (C.62)$$

$$G_2 = 0.55 - 0.72 \left(\frac{c}{a}\right)^{0.75} + 0.14 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (C.63)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \quad a/c \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (C.64)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65} \quad a/c > 1.0 \quad \dots\dots\dots (C.65)$$

b) 裂纹和储罐几何尺寸限制条件:

$$0.0 \leq a/t \leq 1.0; \quad 0.0 \leq a/c \leq 1.0; \quad 0.01 \leq r_w \leq 0.07; \quad \pi/6 \leq \alpha \leq \pi/3。$$

### C.2.8 公式中符号含义

$A_0 \rightarrow A_6$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$A_{0,0} \rightarrow A_{6,6}$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$a$  —— 裂纹深度参数;

$\alpha$  —— 角焊缝角度;

$c$  —— 裂纹长度参数;

$\beta$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$d_1$  —— 结构表面到嵌入椭圆裂纹中心的距离;

$\delta$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$f_w$  —— 有限宽度校正系数。;

$f_\varphi$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$g$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$G_i$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$\gamma$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$H$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$H_1 \rightarrow H_2$  —— 应力强度因子解的中间参数;

$K_I$  —— I 型裂纹应力强度因子;

$M$  —— 作用在储罐壁板上的合成净截面弯矩;

$M_1 \rightarrow M_3$  —— 应力强度因子解的权重函数系数;

$M_b$  —— 应力强度因子解的弯曲应力修正系数;

$M_m$  —— 应力强度因子解的薄膜应力修正系数;

T/CASEI ×××—××××

- $p$ ——压力;
  - $p_c$ ——裂纹面处的压力;
  - $\psi$ ——应力强度因子解的中间参数;
  - $q$ ——应力强度因子解的中间参数;
  - $Q$ ——应力强度因子解的中间参数;
  - $R_i$ ——储罐壁板内径;
  - $R_m$ ——储罐壁板平均半径;
  - $R_o$ ——储罐壁板外径;
  - $r_w$ ——角焊缝根部半径;
  - $\sigma$ ——应力;
  - $\sigma_b$ ——弯曲应力分量;
  - $\sigma_m$ ——薄膜应力分量;
  - $\sigma_0$ ——多项式应力分布的均匀系数;
  - $\sigma_1$ ——多项式应力分布的线性系数;
  - $\sigma_2$ ——多项式应力分布的二阶系数;
  - $\sigma_3$ ——多项式应力分布的三阶系数;
  - $\sigma_4$ ——多项式应力分布的四阶系数;
  - $t$ ——储罐壁板或底板的厚度;
  - $\varphi$ ——椭圆型裂纹的椭圆角;
  - $x$ ——源自储罐内表面的径向局部坐标。
-

# 立式圆筒形钢制焊接储罐结构安全评价导则

## 编制说明

标准编制工作组

2026年4月1日

## 一、工作简况

### (一) 任务来源与协作单位

本标准来源于中国特种设备检验协会常压容器检验工作委员会 2024 年度工作计划（项目编号 2024001），由中国特种设备检验协会标准化工作委员会提出并归口，由中国特种设备检测研究院负责起草，目的是科学指导立式圆筒形钢制焊接储罐结构安全评价导则工作，提高评价工作质量，以保证储罐的安全运营。

### (二) 主要工作过程

本标准的编制是在广泛调研石油储备基地、成品油库区及炼化企业罐区现状，结合“十三五”重点研发计划及国家市场监督管理总局科技计划项目研究成果的基础上开展的。

1、调研阶段（2023 年 12 月底）：编制组完成了对国内主要储罐用户（如中石油、中石化、国家管网等）、设计建造单位及检验机构的调研，重点梳理了储罐运行中的主要损伤形式（如基础沉降、罐壁变形、焊缝缺陷等）及现行评价方法的不足。

2、初稿编制（2024 年 2 月底）：依托中国特种设备检测研究院在《大型储罐基础沉降及其引发的损伤模式量化分析》等课题的成果，结合各参与单位分工，完成了标准初稿的编写，确立了腐蚀减薄、焊缝缺陷、结构变形等核心评价模块。

3、讨论与完善（2024 年 4 月底）：召开起草组讨论会，对初稿进行多轮讨论修正，形成标准讨论稿。

4、报批阶段（2024年6月底）：经过专家内部审议，对评价指标的量化参数进行了验证和优化，最终形成了标准报批稿。

## 二、标准编制原则和确定标准主要技术内容的论据

本标准依据 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》编写，遵循科学性、适用性和协调性的原则：

### （一）注重标准的规范性和协调性

本标准在结构编写和内容编排等方面依据 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》进行编写，遵循科学性、适用性和协调性的原则。。

### （二）注重标准的科学性与工程实用性

常压储罐具有薄壁、大尺寸的结构特点，其受力模式与压力容器有显著区别，现有的 API 579 或 GB/T 35013 主要针对承压设备，直接套用于常压储罐往往过于保守或不适用。本标准基于大量工程示范应用（如海南炼化、九江石化等案例），提出了适用于常压储罐的结构安全评价方法。

### （三）明确了结构安全评价的范围与对象

本标准针对立式圆筒形钢制焊接常压储罐，规定了罐底、罐壁、罐顶及焊缝的评价要求。区别于仅关注最小厚度的传统标准，本标准增加了对结构变形（如凹坑、鼓胀）、基础沉降引发的应力响应以及火灾损伤的量化评价方法，填补了该领域的空白。

### （四）建立了多维度的缺陷评价体系

本标准针对常压储罐薄壁、大直径的结构特点，结合在役储罐常见的损伤模式，确立了以下五个方面的核心评价技术内容：

## 1、腐蚀减薄评价

针对常压储罐罐壁和罐底在介质静压力与环境腐蚀共同作用下的减薄损伤，本标准摒弃了传统的简单点测厚评价方法，建立了更为科学的分区评价体系。罐壁评价引入了临界长度概念，规定了在该长度范围内需测定最小平均厚度。标准区分了均匀腐蚀、局部腐蚀和点蚀/坑蚀三种形态，给出了基于剩余强度的最小允许厚度计算公式，并明确了当实际厚度不满足要求时，需通过降低液位或进行合于使用评价来确保安全。

罐底评价考虑到泄漏后果的严重性，标准对中幅板和边缘板进行了差异化规定。特别是边缘板，根据储液相对密度和第一层罐壁原始厚度，制定了更为严格的最小允许厚度表，并提出了基于腐蚀速率预测未来运行周期内剩余厚度的计算方法。

## 2、焊缝缺陷评价

针对储罐建造遗留或运行中产生的裂纹、未熔合、气孔、夹渣等焊缝缺陷，本标准引入了合于使用评价理念，打破了一刀切的返修模式。分级评价体系标准确立了三级评价流程。对于轻微缺陷，允许采用简化的验收标准；对于复杂应力状态下的缺陷，则强制要求采用基于断裂力学的二级或三级评价。

## 3、结构变形评价

针对罐体在风载、地震或基础不均匀沉降作用下产生的垂直度偏差、圆度偏差及局部凹凸变形，本标准制定了严格的量化指标。几何控制规定了罐壁垂直度偏差不应大于罐壁高度的 1%，以及不同直径范围下的圆度允许偏差。对超过几何限值的变形，标准提出了二级评价机制。即采用有限元数值模拟

或数值分析方法，将实测的变形数据导入模型，计算变形状态下的应力分布。

#### 4、基础沉降评价

本标准解决了传统沉降评价仅关注基础土建指标，忽视对罐体结构影响的痛点，建立了从基础沉降数据到罐体应力响应的映射关系。谐波拟合技术引入了傅里叶级数（谐波）拟合方法，将复杂的实测沉降曲线分解为整体均匀沉降、整体倾斜及局部不均匀沉降分量，剔除对结构影响较小的低阶分量，聚焦于危害最大的高阶局部不均匀沉降。当基础沉降超过常规限值（如任意直径方向沉降差）时，标准要求进行基于有限元分析的详细评价。通过计算由沉降引发的罐壁和底板附加应力，依据棘轮评定和疲劳评定准则，确定沉降是否导致了结构失稳或疲劳寿命的过度消耗。

#### 5、特殊工况与损伤评价

考虑到储罐运行环境的复杂性，本标准特别增加了对突发性损伤和运行条件变化的评价要求。

火灾过火评价建立了基于热暴露区等级的评价流程。通过判定火灾温度和硬度测试，对火灾后的材料许用应力进行折减计算，判定罐体是否发生材料劣化或结构损伤。

工况变更评价规定了当储罐储存介质、操作温度或液位高度发生变更时，必须重新复核罐壁的强度和稳定性，确保结构安全裕度满足新的载荷条件。

#### （五） 兼顾经济性与安全性

本标准通过科学的评价，允许部分不影响安全运行的小缺陷在监控下继续使用，避免了不必要的停产维修，既保障了安全，又降低了企业的全生命周期运营成本。

### 三、与国际、国外有关法律法规和标准水平的对比分析

目前国际上针对承压设备的合于使用评价标准较为成熟，如美国 API 579 *Fitness-For-Service* 和 API 653 *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*。API 579 主要针对压力容器和管道，其应力分析方法不完全适用于常压储罐；API 653 虽然针对储罐，但主要侧重于基于规则的适用性评价，缺乏对复杂结构变形和焊缝缺陷的详细分析方法。本标准在借鉴 API 579 先进理念的基础上，结合国内常压储罐的具体结构参数，开发了专门的评价算法，技术水平处于国内领先，并填补了国际标准在特定常压储罐复杂缺陷评价方面的空白。

### 四、与现行有关法律、法规和标准的关系

本标准与《安全生产法》、《危险化学品安全管理条例》等法规相关，与下列标准存在相互关系，本标准是对相关法规、标准要求的补充和具体体现。

API 579 *Fitness-For-Service*

API 653 *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*

GB/T 35013 《承压设备合于使用评价》

SY/T 6620 《油罐的检验、修理、改建及翻建》

### 五、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

### 六、标准性质的建议

建议本标准为推荐性团体标准。

### 七、标准实施日期的建议

建议标准发布后 6 个月内实施。此期间用于开展标准宣贯、人员培训及企业技术准备，以确保标准的有效落地。

#### 八、标准实施的有关政策措施

建议发布后，由中国特种设备检验协会组织宣贯，联合各起草单位开展专项培训，重点面向检验机构和大型石化企业，推动标准在罐区安全管理中的应用。。

#### 九、废止现行有关标准的建议

无。

#### 十、涉及专利的有关说明

本标准未涉及相关专利。

#### 十一、标准所涉及的产品、过程和服务目录

无。

#### 十二、其他应予以说明的事项

无。

《立式圆筒形钢制焊接储罐结构安全评价导则》

标准编制组

2026 年 4 月 1 日