

# 焊接球形贮罐的表面裂纹的断裂力学分析

力学所十二室断裂力学组

## 一、前言

在化工设备中广泛使用各种压力容器，其中焊接球形贮罐占很大比例。球形贮罐在焊接过程中很容易产生表面裂纹。用无损检验的方法可以检查出这些裂纹，然后挖掉重焊。但无损检验的方法不能保证检查出所有的裂纹，而且在打压试验或工作条件下，还可能产生新的裂纹。因此为了保证球罐能安全使用，要求材料，特别焊缝地区的材料有足够的韧性，并用断裂力学分析给出容许的裂纹尺寸。当漏检裂纹或新生裂纹小于容许裂纹尺寸时，则可认为球罐能安全使用。

本文讨论表面裂纹的断裂力学分析方法。由于球罐的焊缝地区应力状态比较复杂，除了设计的工作应力外，还有焊接角变形和错口所产生的应力和焊接残余应力。这些应力叠加起来可能达到甚至超过材料的屈服应力。因此，严格来说，线弹性断裂力学的K准则已不适用。但是弹塑性断裂力学还不成熟，现在提出的弹塑性断裂准则主要有两种，一种是COD准则，一种是J积分准则。它们在塑性区很小时得到与线弹性断裂力学相同的结果。把它们用于塑性区较大的情形，即用小试样来测定材料的断裂韧性（临界的COD值 $\delta_c$ ，或临界的J值 $J_c$ ）。这方面已做了大量的工作。但对于具体的有裂纹的结构，还缺乏成熟的严格的分析方法。虽然如此，从工程实用观点出发，经过一定的修正或近似，我们仍可把K准则，COD准则和J积分准则应用于表面裂纹的断裂力学分析，它们各具特点，可以互为补充。本文把三个准则用于球罐表面裂纹问题的分析，以供分析带表面裂纹的球罐安全性时参考。

我们考虑的焊接球罐中表面裂纹的深度与厚度相比较小，并假定球罐的厚度与直径相比很小，因此可

以不考虑曲率的影响和鼓胀效应。表面裂纹的形状用半椭圆形来近似。这样把球罐的表面裂纹简化为有限厚度板的半椭圆形的表面裂纹（图1），板厚 $t$ 等于球罐的壁厚 $\delta$ 。

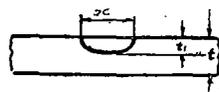


图 1

对于其他形状的压力容器中的表面裂纹，如能简化为平板的半椭圆裂纹，那么也可以使用本文所介绍的方法。

## 二、表面裂纹的 $K_1$ 表达式

考虑受均匀拉伸的焊接板的表面裂纹的 $K_1$ 表达式。要考虑焊接角变形和焊接错口的影响（图2）。

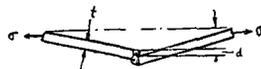


图 2



图 3

1. 受均匀拉伸板的表面半椭圆裂纹的 $K_1$ 表达式。

这个问题迄今为止还没有精确解。在无限体内一深埋椭圆裂纹，远处受垂直于裂纹面的均布应力（图3），这个问题有精确解，在椭圆短轴顶端， $K_I$ 达到最大值，其值为：

$$K_I = \frac{\sigma \sqrt{\pi t_1}}{\Phi} \quad (2-1)$$

$$\text{其中 } \Phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[ \sin^2 \theta + \left( \frac{t_1}{C} \right)^2 \cos^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} d\theta \quad (2-2)$$

是第二类椭圆积分。现有的有限板表面裂纹的解都是基于这精确解的各种经验的或半经验半理论的修正。

有表面半椭圆裂纹的有限厚板可以认为是由无限体内引入了ABCD（前表面）和EFGH（后表面）两个自由表面而形成的。因此对公式（2-1）作前后表面的修正就能得到有限厚板表面裂纹 $K_I$ 的计算公式，即

$$K_I = M_1 \cdot M_2 \frac{\sigma \sqrt{\pi t_1}}{\Phi} = M_1 \frac{\sigma \sqrt{\pi t_1}}{\Phi} \quad (2-3)$$

其中 $M_1$ 为前表面修正系数， $M_2$ 后表面修正系数。而 $M_2 = M_1 \cdot M_2$ 这里分别考虑前后表面的影响，而没有考虑两个表面的相互影响。

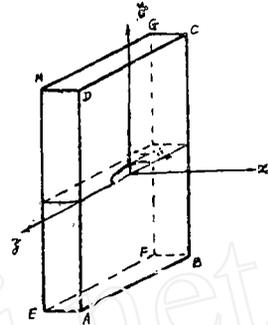
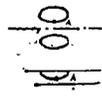


图 4

表一列出了一些作者对修正系数 $M_1$ 和 $M_2$ 给出的公式。

表一 前后表面修正系数

$$K_I = M_1 M_2 \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi}$$

公 式	前表面修正系数 $M_1$	后表面修正系数 $M_2$	
		修正系数	限制
Irwin [1]	$M_1 = 1.1$	不修正	
[2] Paris 薛昌明	$M_1 = 1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{c}\right)$	$M_2 = \left(\frac{2B}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a^2}{2B}\right)^{1/2}$	没有考虑裂纹形状 $a/c$ 的影响
[3] 小林 Moss	$M_1 = 1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{2c}\right)^2$	用无限体中两平行的共面椭圆裂纹，受垂直于裂纹面的均布应力作用的近似解 	自由表面的边界条件不能完全满足
[4] 小林 Shah	$M_1 = 1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{2c}\right)^2$	用交替迭加法求靠近表面的椭圆裂纹受垂直于裂纹面的均布应力作用的近似解 	能满足自由表面的边界条件

对于前表面修正系数 $M_1$ ，当 $t_1/c = 0$ ， $M_1 = 1.12$ ； $t_1/c = 1.0$ ， $M_1 = 1.03$ ，大部分 $M_1$ 的公式采用不同的内插法，求出 $t_1/c$ 取中间值时的 $M_1$ 值。一般说来不同公式算出的 $M_1$ 值差别不大。其中小林的两个公式由于采取了较准确的端值，因而较合理。

对于后表面的修正系数 $M_2$ ，薛昌明—Paris和小林—Moss的公式，均取对称面为自由面，不能完全满足自由表面的边界条件。而小林—Shah的方法能够较全面地满足自由表面的边界条件，可以认为是迄今为止比较令人满意的解。同时，小林—Shah的公式与实验结果和有限元的计算结果比较符合〔4〕。Miyamoto—Miyoshi用三维有限元法计算了有限厚板的表面裂纹问题，结果与小林—Shah的结果符合良好〔8〕：

	$t_1/t$	0.8	0.8	0.3
	$t_1/2c$	0.1	0.3	0.1
$M_k$	用有限元法	1.36	1.27	1.11
	小林—Shah	1.39	1.24	1.12

我们在以后的计算中采用小林—Shah公式。

其 $M_1 \cdot M_2 = M_k$ 值可由图6查出。

### 2. 在弯曲应力下的修正系数

下面简述一下小林—Shah的考虑方法〔4〕。对于一个距自由表面 $t$ 的深埋椭圆裂纹，受线性分布的压力（如图5示）。他们用数值方法求解。得到的结果用于沿P—P面截开的板，这即为有一半椭圆裂纹的板。

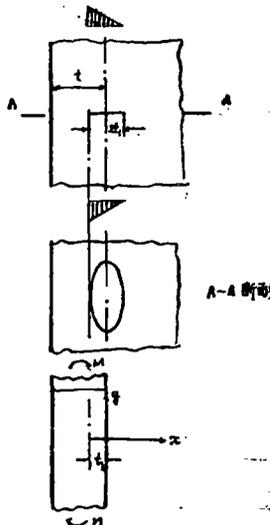


图 5

对于厚度为 $t$ ，表面裂纹深度为 $t_1$ 的板受纯弯时，沿板厚的弯曲应力为

$$\sigma_y = \frac{M}{I} \left( \frac{t}{2} + X \right)$$

其中 $I$ 为截面惯性矩， $M$ 为弯矩。

将这个应力分解为一均匀应力和一线性分布的力：

$$\sigma_y = \frac{M}{I} \left( \frac{t}{2} + t_1 \right) - \frac{M}{I} (t_1 - x)$$

对于前一部分，即用均匀应力下的修正系数 $M_k$ 算出应力强度因子，对于后一部分即用上面算出的应力强度因子，即得在裂纹远处受弯曲应力下的应力强度因子。

命最大弯曲应力为 $\sigma_B$ ，

$$\sigma_B = \frac{Mt}{2I}$$

则

$$K_I = M_B \sigma_B \frac{\sqrt{\pi t_1}}{\Phi} \dots \dots \dots (2-4)$$

$M_B$ 即为弯曲应力下的修正系数。（见图7）

### 3. 角变形和错口引起的弯曲应力〔5〕

对于图2所示的角变形和错口，我们可以分别用图8所示的剖面中心线为折线的宽板来描写。

当角变量 $e$ 和错口量 $d$ 很小时，它们可以看作是有初始挠度的平板受轴向载荷的问题。

#### a) 一般方程式

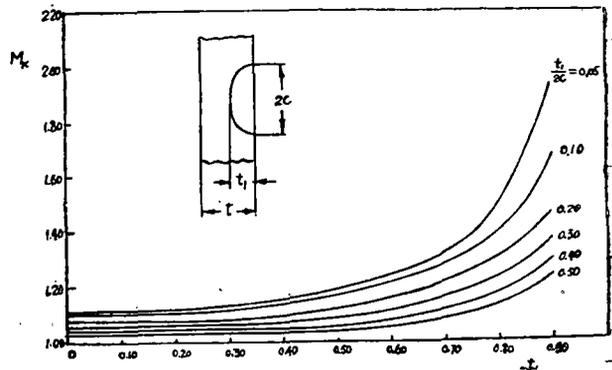


图 6 均匀拉伸下的修正系数

为了方便起见，用 $X$ — $Y$ 坐标系， $X$ 为板的长度方向， $Y$ 为板厚方向，即产生变形的方向。

设初始变形为 $y_0$ ，由于拉伸而引起的变形为 $y$ ，总变形为 $y_m = y + y_0$ ，拉力为 $N = \sigma t$ （假设拉力沿板的长度方向不变）在任意一点 $X$ 处取长为 $dx$ 的单元， $V$

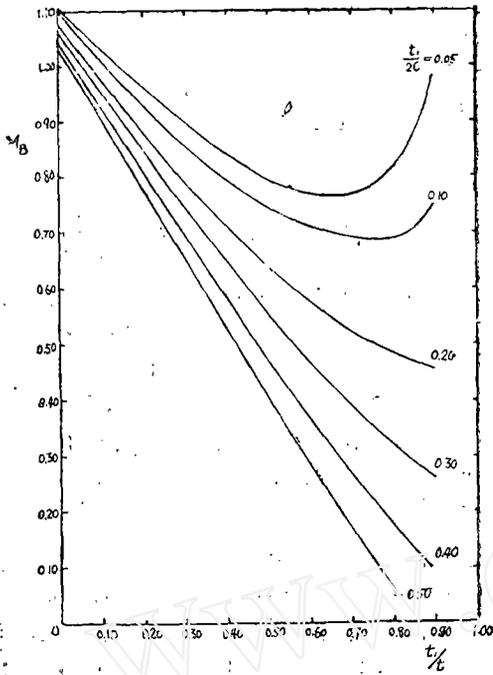


图7 弯曲应力修正系数

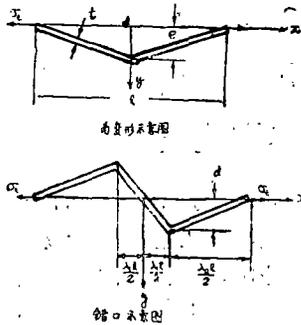


图8

为截面上的剪力， $M$ 为截面上的弯矩，如图9示。由平衡关系，得到

$$\frac{dV}{dx} = 0$$

$$V = \frac{dM}{dx} + N \frac{dy_m}{dx}$$

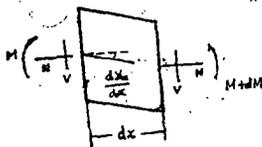


图9

由应力应变关系得到，

$$M = -D \frac{d^2 y}{dx^2}$$

其中  $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$  为抗弯刚度代入上式即得

$$V = -D \frac{d^3 y}{dx^3} + N \frac{dy}{dx} + N \frac{dy_0}{dx}$$

引入无量纲参数

$$\xi = \frac{y}{w_0}, \quad \eta_0 = \frac{y_0}{w_0}, \quad \xi = \frac{2x}{l} \quad (2-5)$$

其中  $w_0$  为角变形量或错口量

令

$$m^2 = 3(1-\nu^2) \frac{\nu}{E} \left(\frac{l}{t}\right)^2 \quad (2-6)$$

则得：

$$\frac{d}{d\xi} \left( \frac{d^3 \xi}{d\xi^3} - m^2 \frac{d\xi}{d\xi} - m^2 \frac{d\eta_0}{d\xi} \right) = 0$$

或

$$\frac{d^3 \xi}{d\xi^3} - m^2 \frac{d\xi}{d\xi} = m^2 \frac{d\eta_0}{d\xi} + m^2 C_0 \quad (2-7)$$

最大弯曲应力为：

$$\sigma_B = \frac{t}{2} \frac{d^2 y}{dx^2} \frac{E}{(1-\nu^2)}$$

引入形状系数  $K$ ，使

$$\sigma_B = 6\sigma \frac{w_0}{t} K \quad (2-8)$$

则

$$K = \frac{1}{m^2} \frac{d^2 \xi}{d\xi^2} \quad (2-9)$$

b) 角变形的情况

如图8示，两端固支

$$y_0(x) = e \left( 1 - \frac{2x}{l} \right) \quad (x \geq 0)$$

即， $\eta_0(\xi) = 1 - \xi (\xi \geq 0)$

由对称条件得到

$$C_0 = 0$$

这时 (2-7) 式为：

$$\frac{d^3 \xi}{d\xi^3} - m^2 \frac{d\xi}{d\xi} = -m^2$$

其通解为

$$\zeta = C_1 + C_2 \operatorname{sh} m \xi + C_3 \operatorname{ch} m \xi + \xi$$

边界条件为

$$\text{在 } \xi = 0 \text{ 处 } \frac{d\zeta}{d\xi} = 0 \quad (\text{对称条件})$$

$$\text{在 } \xi = 1 \text{ 处 } \zeta = -\frac{d\zeta}{d\xi} = 0 \quad (\text{固支条件})$$

由边界条件求出

$$C_2 = -\frac{1}{m}, \quad C_3 = \frac{\operatorname{ch} m - 1}{m \operatorname{ch} m}$$

因此

$$K_c = \frac{1}{m^2} \frac{d^2 \zeta}{d\xi^2} \Big|_{\xi=0} = \frac{\operatorname{th} \frac{m}{2}}{m} \quad (2-10)$$

c) 错口的情况

如图 8 所示, 两端固支

令  $\lambda_1 = \lambda$ ,  $\lambda_2 = 1 - \lambda$

初始变形为

$$0 \leq \xi \leq \lambda_1 \text{ 时 } \eta_0(\xi) = \frac{\xi}{\lambda_1}$$

$$\lambda_1 < \xi \leq 1 \text{ 时 } \eta_0(\xi) = \frac{1}{\lambda_2} (1 - \xi)$$

这时方程 (2-7) 的通解为:

当  $0 \leq \xi \leq \lambda_1$  时

$$\zeta = C_1 - \left( C_0 + \frac{1}{\lambda_1} \right) \xi + C_2 \operatorname{sh} m \xi + C_3 \operatorname{ch} m \xi$$

当  $\lambda_1 < \xi \leq 1$  时

$$\zeta = C_1' - \left( C_0 - \frac{1}{\lambda_2} \right) \xi + C_2' \operatorname{sh} m \xi + C_3' \operatorname{ch} m \xi$$

边界条件

$$\text{在 } \xi = 0 \text{ 处 } \zeta = 0, \quad \frac{d^2 \zeta}{d\xi^2} = 0 \quad (\text{反对称条件})$$

$$\text{在 } \xi = \lambda \text{ 处 } \zeta \Big|_{\xi=\lambda^-} = \zeta \Big|_{\xi=\lambda^+} \quad (\text{连续条件})$$

$$\frac{d\zeta}{d\xi} \Big|_{\xi=\lambda^-} = \frac{d\zeta}{d\xi} \Big|_{\xi=\lambda^+}$$

$$\frac{d^2 \zeta}{d\xi^2} \Big|_{\xi=\lambda^-} = \frac{d^2 \zeta}{d\xi^2} \Big|_{\xi=\lambda^+}$$

$$\text{在 } \xi = 1 \text{ 处 } \zeta = 0, \quad \frac{d\zeta}{d\xi} = 0 \quad (\text{固支条件})$$

由边界条件求出

$$C_1 = C_3 = 0,$$

$$C_2 = \frac{m \operatorname{ch} m \lambda_2 - \operatorname{sh} m \lambda_2 - m \lambda_1}{m \lambda_1 \lambda_2 (m \operatorname{ch} m - \operatorname{sh} m)}$$

由 (2-9) 得到

$$\begin{aligned} K_d &= \frac{1}{m^2} \frac{d^2 \zeta}{d\xi^2} \Big|_{\xi=\lambda_1} = C_2 \operatorname{sh} m \lambda_1 \\ &= \frac{\operatorname{sh} m \lambda [\operatorname{ch} m (1-\lambda) - \operatorname{sh} m (1-\lambda) - m \lambda]}{m \lambda (1-\lambda) (m \operatorname{ch} m - \operatorname{sh} m)} \end{aligned} \quad (2-11)$$

由 (2-8), 可以得到, 当存在焊接角变形  $e$  和错口量  $d$  时, 在焊缝处产生的最大弯曲应力为:

$$\sigma_{\max} = 6 \sigma \frac{e k_c + d k_d}{t} \quad (2-12)$$

其中  $k_c, k_d$  分别由 (2-10), (2-11) 式给出。

由 (2-8), (2-4) 和 (2-12) 可以得到, 对于有焊接角变形  $e$  和错口量  $d$  的平板中的半椭圆表面裂纹, 受均匀拉力  $\sigma$  作用时的  $k_1$  表达式为:

$$K_1 = \frac{\sigma \sqrt{\pi t_1}}{\Phi} \left[ M_K + 6 M_B \frac{e K_c + d K_d}{t} \right] \quad (2-13)$$

### 三、用 COD 方法计算临界裂纹尺寸

在焊接结构中, 由于焊接角变形和错口再加上焊接残余应力的影响, 在焊缝区的最大应力可能达到甚至超过材料的屈服应力, 这时要用弹塑性断裂准则。Burdekin[6]提出了用 COD 方法确定焊接缺陷的验收标准。即根据缺陷所在部位的应变量和材料的临界 COD 值来确定临界裂纹尺寸。根据实验结果, Burdekin[6]采用下述公式

$$\delta_c = 2 \pi a_c \left( \frac{e}{e_s} - 0.25 \right) e_s \quad (8-1)$$

(适用于  $\frac{e}{e_s} \geq 0.5$ )

其中  $\delta_c$  是临界 COD 值,  $e_s$  是屈服应变,  $e_s = \frac{\sigma_s}{E}$ ,

$e$  是缺陷所在部位的应变值,  $a_c$  是允许的临界缺陷尺寸。这公式是从大量的宽板实验结果得到的, 宽板实

验的分散带如图 10 示, 取分散带的上限, 在  $\frac{e}{e_s} \gg$

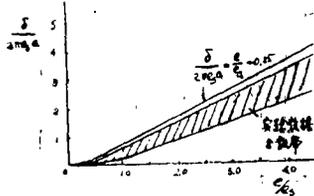


图 10

0.5时, 上限为直线

$$\frac{\delta}{2\pi e_s a} = \frac{e}{e_s} - 0.25 \quad \text{即方程 (3-1)}$$

由方程 (3-1) 得到:

$$\bar{a}_c = \frac{\delta_c E}{2\pi \left( \frac{e}{e_s} - 0.25 \right) \sigma_s} \quad (3-2)$$

已知材料的临界COD值和缺陷部位的应变能, 即可算出 $\bar{a}_c$ , 这 $\bar{a}_c$ 是穿透裂纹的半长。用于表面裂纹时, 还要换算成表面裂纹的尺寸, 换算时假定裂纹形状对COD值的影响和线弹性下裂纹形状对 $K_I$ 值的影响相同。由此可得到穿透裂纹和半椭圆表面裂纹之间的对应关系。

对于半椭圆裂纹由 (2-3)

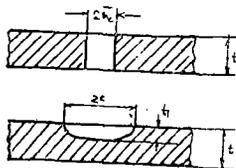


图 11

$$K_I = M_K \frac{\sigma \sqrt{\pi t_1}}{\Phi}$$

对于穿透裂纹

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a_c}$$

由此得到

$$\frac{t_1 c}{t} = \frac{\bar{a}_c}{t} \left( \frac{\Phi^2}{M_K^2} \right) \quad (3-3)$$

图12给出了 $t_1/t$ 与 $a_c/t$ 的关系曲线, 根据 (3-2) 求出 $a_c$ 后, 由图12即可求出不同 $t_1/c$ 值时的 $t_1$ 值, 即求出允许的不同形状的表面裂纹。

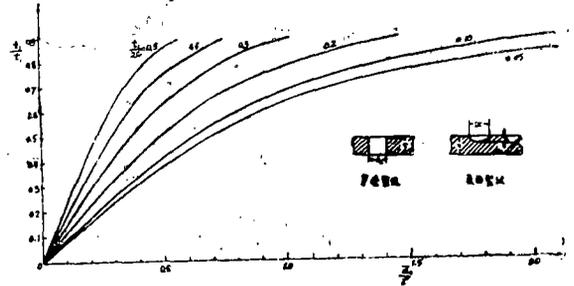


图12 穿透裂纹和表面裂纹的换算曲线

#### 四、用J积分方法计算临界裂纹尺寸

近年来发展了用J积分方法采用小试样测出中、低强度材料的 $J_{1c}$ 值, 已知 $J_{1c}$ 值后可直接用J积分断裂准则来计算焊接结构的临界裂纹尺寸。

钢铁研究院蔡其巩[7]根据J积分的基本性质和切口试样应力应变集中的弹塑性分析, 证明对于处在均匀应变区的小裂纹 (注意: 这是公式 (4-1) 成立的条件) J积分值为

$$J = 2\pi a Y^2 \int_0^e \sigma de \quad (4-1)$$

其中Y为线弹性状态时裂纹试样的几何形状因子, e为裂纹区的均匀应变值, a为裂纹长度对于表面裂纹用公式 (2-3),  $Y = \frac{M_K}{\Phi}$ , 假设材料为理想塑性

材料, (图13) 那么对于 $e > e_s$

$$\begin{aligned} \int_0^e \sigma de &= \int_0^{e_s} e de + \int_{e_s}^e \sigma_s de \\ &= \frac{1}{2} \sigma_s e_s + \sigma_s (e - e_s) \\ &= \sigma_s (e - 0.5e_s) \end{aligned}$$

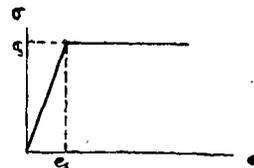


图 13

代入 (4-1), 得到

$$J = 2\pi a y^2 \sigma_s (e - 0.5e_s) \quad (4-2)$$

在临界状态

$$J_c = 2\pi a c y^2 \sigma_s (e - 0.5e_s) \quad (4-3)$$

对于深为 $t_1$ 的表面裂纹(图1)  $r = \frac{M_K}{\Phi}$ , 在上式中  
a和 $t_1$ 代替, 得到

$$t_{1c} = \frac{J_c}{2\pi\sigma_s(c-0.5e_s)} \frac{\Phi^2}{M_K^2} \quad (4-4)$$

其中 $\frac{\Phi^2}{M_K^2}$ 可由图12查出。已知 $J_c$ 和 $e$ , 由(4-4)  
和图12可求出允许的表面裂纹尺寸。

## 五、计算结果

我们用前面叙述的公式, 对某工程球形贮罐的表面裂纹进行了分析, 计算结果如下:

### 1. $K_1$ 值的计算

数据

t (板厚): 40毫米

c (角变形量): 15毫米, 9毫米

l (变形段的长度): 1000毫米

d (错口量) 2毫米

b (错口宽度) 20毫米

$\sigma$  (设计应力) 25公斤/毫米<sup>2</sup>

E  $2.1 \times 10^4$ 公斤/毫米<sup>2</sup>

$\nu$  0.3

由公式(2-6)

$$m = \frac{1}{t} \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma}{E} = 1.425$$

$$\lambda = \frac{b}{l} = 0.02$$

公式(2-10), (2-11)

$$K_0 = \frac{sh \frac{m}{2}}{m} = 0.43$$

$$K_A = \frac{sh \lambda m \{ m ch(1-\lambda)m - m\lambda - sh m(1-\lambda) \}}{\lambda(1-\lambda)(m ch m - sh m)} = 0.98$$

把上述数据代入(2-13)式

$$K_1 = \frac{\sigma \sqrt{\pi t_1}}{\Phi} \left[ M_K + 6 M_B \frac{ek_0 + dk_A}{t} \right]$$

对于不同的 $t_1$ 和C计算结果如表一

根据金属研究所测出的球形贮罐材料焊缝地区韧性最低部位的 $J_{1c}$ 值为3.7公斤/毫米, 按下式换算成 $K_{1c}$

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{E J_{1c}}{1-\nu^2}} = 292 \text{公斤/毫米}^{3/2}$$

表一 不同表面裂纹的 $K_1$ 值

2C 毫米	$t_1$ 毫米	$M_K$	$M_B$	$K_1$ 公斤/毫米 <sup>3/2</sup>	
				e = 15毫米	e = 9毫米
10	1.5	1.09	1.06	120	99
	2	1.08	1.00	127	107
	3	1.06	0.98	138	115
	5	1.03	0.86	133	112
15	1.5	1.1	1.07	126	105
	2	1.1	1.04	140	115
	3	1.08	1.00	156	131
	5	1.05	0.91	164	138
20	1.5	1.1	1.07	129	
	2	1.1	1.05	144	
	5	1.07	0.92	183	

由于我们在 $K_1$ 计算中没有考虑焊接残余应力和塑性区的影响, 作为工程方法, 我们取安全系数为2, 即按 $K_{1c} = 145$ 公斤/毫米<sup>3/2</sup>, 由(2-13)确定允许的临界裂纹尺寸, 从表一的计算结果可以查出, 下述裂纹的 $K_1$ 值为145公斤/毫米<sup>3/2</sup>(图14)

20×2, 15×2.3, 12×3, 11×5 (2C×t毫米)

这是按 $K_1$ 表达式(2-13)取安全系数2, 算出的球罐允许的表面裂纹尺寸。

### 2. COD值计算

根据一机部材料研究所和通用机械研究所对球罐材料直接测定COD的实验得到焊缝地区韧性最差部位的 $\delta_c = 0.06$ 毫米

其他数据同上节。

由(2-12)求出焊接角变形 $e$ 和错口量 $d$ 引起的最大弯曲应力为

$$\sigma_B = 6\sigma \frac{ek_0 + dk_A}{t} = 32 \text{公斤/毫米}^2$$

因此总应力为25+32=57公斤/毫米<sup>2</sup>, 等于屈服应力, 也就是说工作应力和焊接角变形和错口所引起的应力所产生的应变为一个屈服应变, 在没有退火的情况下, 焊接残余应力所引起的应变, 在无应力集中区, 一般也为一个屈服应变。因此总应变值应取两个屈服应变, 即在(3-2)式中取

$$e = 2e_s$$

由(3-2)得到

$$\bar{a}_c = \frac{\delta_c E}{2\pi \left( \frac{e}{e_s} - 0.25 \right) \sigma_s} = 2.0 \text{ 毫米}$$

查图12, 得到不同 $t_1/c$ 时的允许裂纹尺寸, 如图14所示, 典型的允许裂纹尺寸为 ( $t_1 \times 2C$ )

1.5×30, 2×14, 3×10, 5×9 (毫米)

### 3. J积分的计算

根据金属研究所测得的 $J_{1c} = 3.7$ 公斤/毫米, 可用J积分方法算出允许的裂纹尺寸, 同上节, 我们取 $e = 2e_s$ , 代入(4-4)得到

$$t_{1c} = \frac{J_{1c}}{2\pi\sigma_s(e-0.5e_s)} \frac{\Phi^2}{M_K^2} = 2.54 \text{ (毫米)}$$

$$\times \frac{\Phi^2}{M_K^2}$$

查图12, 可以求得不同 $t_1/C$ 时的允许裂纹尺寸为 $t_1 \times 2c = 2 \times 40, 2.5 \times 17, 3 \times 14, 5 \times 12$  (毫米) (图14)

### 4. 讨论

从图14可知, 三种方法给出大致相同的临界裂纹尺寸, 三种方法的结果有一些差别, 其差别的原因是, 在我们的计算中采取的COD值和 $J_{1c}$ 值是两个单位做的, 其中有一定的差别, 按金属研究所在测定 $J_{1c}$ 时, 同时测定的 $\delta_c$ 的平均值为0.075毫米, 如果 $\delta_c = 0.075$ 毫米用(3-2)式求出的 $\bar{a}_c = 2.5$ 毫米, 即与和J积分方法求出的结果一致。用 $K_{Ic}$ 表达式计算的结果与J积分的结果的差别是因为在 $K_{Ic}$ 计算中, 把

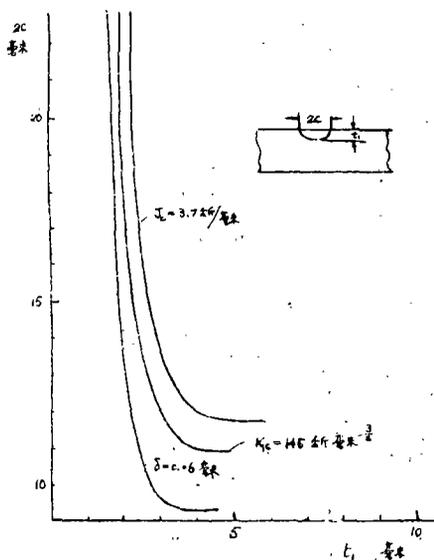


图14 三种方法给出的允许的临界裂纹尺寸

$K_{Ic}$ 值减小一倍以考虑残余应力和塑性区的影响这只是一工程上的近似考虑方法, 能否适用还需经实践的考验。

## 六、小结

1. 计算表明, 本文讨论的三种方法 ( $K_{Ic}$  准则, COD和J积分) 都可以作为估算焊接球罐的容许表面裂纹尺寸的近似方法。当已知材料的 $\delta_c$ 值或 $J_{1c}$ 值, 可相应地用COD方法或J积分方法。避免 $\delta_c$ 和 $J_{1c}$ ,  $K_{Ic}$ 换算所引起的误差。

2. 对于某工程的球罐, 容许的表面裂纹尺寸, 可取为 (按三种结果中最小的一种)

$t_1 \times 2C = 1.5 \times 30, 2 \times 14, 3 \times 10, 5 \times 9$  (毫米)

后记: 本工作是几个单位会战任务中的一部分。本报告包括了参加会战的浙江大学、北京钢铁研究院、一机部机电所、上海材料所、合肥通用所、冶金部沈阳金属所在几次讨论中所发表的许多宝贵的意见。

### 参 考 文 献

- [1] G.R. Irwin, Crack Extension Force for a Part-through Crack in Plate, J. Appl. Mech, 29, 651-654, (Dec. 1962).
- [2] P. C. Paris and G. C. Sih, ASTM STP 381, (1965), 51.
- [3] A.S. Kobayashi and W.L. Moss, Stress Intensity Magnification Factors for Surface-flawed Tension Plate and Notched Round Bar, 2nd Int. Conf. on Fracture, 31-45, (1969).
- [4] R.C. Shah and A. S. Kobayashi On the Surface Flaw Problem in «The Surface Crack: Physical Problems and Computational Solutions», 79-124 (1972).
- [5] 矢田敏夫, 日本造船协会论文集第119号, 134, (1966).
- [6] F.M. Burdekin, 按脆断破坏观点建议的缺陷验收标准 一机部通用所翻译。
- [7] 蔡其巩, 断裂力学在工程中的应用, 北京地区断裂力学交流会文集 1-21, (1974).
- [8] H. Miyamoto and T. Miyoshi, High Speed Computing of Elastic Structure, Proc. of Symposium of IUTAM, Univ de Liege, 137-155 (1971).