

文章编号:1673-2049(2007)03-0087-04

存在裂纹的压力容器疲劳断裂分析

郭东, 翟振东, 刘东坡

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为了分析工程中常见的破坏性极大的压力容器疲劳问题,基于断裂力学理论将存在初始裂纹的压力容器等效为无穷远处作用均匀拉应力的含中心裂纹无限大板问题,解出表面半椭圆裂纹和穿透裂纹的应力强度因子;利用断裂判据得到裂纹的临界断裂尺寸;采用 Paris 表达式对裂纹扩展速率进行描述,推导出初始裂纹在不同裂纹尺寸和形式下的裂纹疲劳扩展寿命。结果表明,对于存在不同尺寸和形式裂纹的压力容器,其疲劳寿命可以由裂纹疲劳扩展寿命明确表示,并且为现役压力容器的安全评定提供一定的理论依据。

关键词:压力容器;裂纹扩展;临界裂纹尺寸;疲劳寿命

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Fatigue Fracture Analysis of Pressure Vessel with Cracks

GUO Dong, ZHAI Zhen-dong, LIU Dong-po

(School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the fatigue of pressure vessel commonly encountered problem in engineering with large destructibility, based on the theory of fracture mechanics, the pressure vessel existing original crack was equivalent to the problem of infinite flat with center crack. The stress intensity factors of infinite flat forced uniform tensile stress at infinite place with surface half ellipse crack and through crack were deduced. The critical crack size can be ascertained by the criterion. Using the Paris expression to analyze the crack extends speed, the crack fatigue extension life of different original crack sizes and forms was deduced. The results show that the fatigue life of pressure vessel with different original crack sizes and forms can be clearly expressed by crack fatigue extension life. These analyzed conclusions provide theoretical reference for the active security assess of using pressure vessel.

Key words: pressure vessel; crack extension; critical crack size; fatigue life

0 引言

压力容器这一广泛应用于工程中的结构形式,在来自压力波动、开停工时的压力交变等荷载作用下,通常会发生疲劳破坏。目前,在对压力容器进行工程设计时,通常采用疲劳设计曲线进行设计,如美国的 ASME III、ASME VIII-2 与中国的《钢制压力容

量——分析设计标准》(JB 4732—95)等,其设计方法是根据试验得到材料疲劳失效的平均寿命曲线,再按虚拟应力幅和循环次数分别取安全系数为 2 和 20,取二者中平均寿命较短的作为分析材料的疲劳设计曲线^[1-3]。这种疲劳分析方法是以无缺陷光滑试样的疲劳试验为基础制定的,其寿命包括裂纹萌生和扩展直至断裂的各个阶段;然而实际构件很可

能已存在初始缺陷裂纹或宏观裂纹,其寿命仅指疲劳裂纹扩展部分。断裂力学理论是用于研究裂纹的产生及扩展规律的科学,其假设材料内有初始缺陷裂纹,并根据材料在使用荷载下裂纹扩展性质估算疲劳寿命。利用断裂力学理论的分析方法更能准确地确定压力容器在不同裂纹尺寸和形式下的疲劳寿命。因此,笔者基于断裂力学理论,利用裂纹断裂判据和裂纹扩展的 Paris 表达式,推导出存在初始缺陷裂纹的压力容器在交变荷载作用下的临界裂纹尺寸 a_c 和裂纹疲劳扩展寿命 N_c 。

1 断裂判据及应力强度因子

由断裂力学理论可知:对于脆性材料,当裂纹尖端的应力强度因子 K 达到该种材料的断裂韧性 K_{cr} 时,裂纹就会出现失稳扩展而导致结构的破坏。其相应的断裂判据为^[4]

$$K \leq K_{cr} \tag{1}$$

对于如图 1 所示的压力容器,在内压力 p 的作用下,将产生轴向正应力 σ_x 和环向正应力 σ_y 。由材料力学方法可知^[5]: $\sigma_x = \frac{pD}{4t}, \sigma_y = \frac{pD}{2t}$ 。

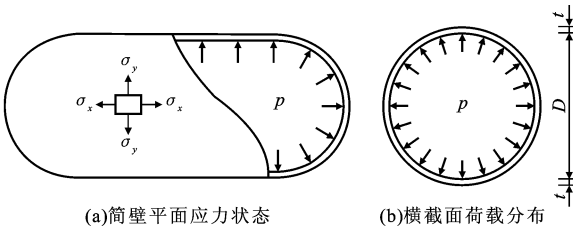


图 1 薄壁圆筒压力容器

Fig. 1 Thin-walled Cylinder Pressure Vessel

由于裂纹的尺寸远小于结构的曲率半径,可以将上述问题等效为无穷远处作用均匀拉应力 σ_x 和 σ_y 的含中心裂纹无限大板问题。

1.1 半椭圆表面裂纹

如图 2 所示,对于无限大板上的表面裂纹,裂纹边缘任意点处的应力强度因子为^[6]

$$K_I = m_1 m_2 m_p \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\varphi} \cdot (\sin^2 \beta + \frac{a^2}{b^2} \cos^2 \beta)^{\frac{1}{4}} \tag{2}$$

式中: m_1 为前自由表面增大因子, $m_1 = 1 + 0.12(1 - \frac{a^2}{2b})$; m_2

为后自由表面增大因子, $m_2 = (\frac{2W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2W})^{\frac{1}{2}}$; m_p 为塑性区

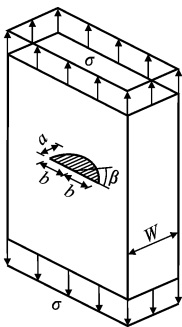


图 2 半椭圆表面裂纹
Fig. 2 Half Ellipse Surface Crack

增大因子, $m_p = \varphi / \sqrt{\varphi^2 - 0.212(\sigma/\sigma_s)^2}$, φ 为第 2 类椭圆积分, $\varphi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - \frac{b^2 - a^2}{b^2} \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} d\theta$, 见表 1。

表 1 第 2 类椭圆积分

Tab. 1 The Second Ellipse Integral

序号	1	2	3	4	5
a/b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
φ	1.014 8	1.050 5	1.069 5	1.150 7	1.211 1

序号	6	7	8	9	10
a/b	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
φ	1.276 4	1.345 6	1.418 1	1.493 5	1.570 8

在 $\beta = \frac{\pi}{2}$ 处,裂纹最深,且在该点处 K_I 也最大,是裂纹发展的根源。将 $\beta = \frac{\pi}{2}$ 代入式(2)得

$$K_I = m_1 m_2 m_p \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\varphi} \tag{3}$$

对于浅裂纹问题,当 $a = W$ 时,可取 $m_2 = 1$,此时椭圆裂纹短轴端点的最大应力强度因子可依式(4)、(5)计算

$$K_I = 1.1 m_p \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\varphi} = \frac{1.1 \sigma \sqrt{\pi a}}{[\varphi^2 - 0.212(\sigma/\sigma_s)^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{4}$$

当 $K_I = K_{Ic}$ 时,对应的临界裂纹尺寸为

$$a_c = \frac{K_{Ic}^2 [\varphi^2 - 0.212(\sigma/\sigma_s)^2]}{1.21 \pi \sigma^2} \tag{5}$$

1.2 穿透裂纹

对于存在穿透裂纹的压力容器,将其等效为受均布荷载含中心穿透裂纹无限大板,其应力强度因子为

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \tag{6}$$

当 $K_I = K_{Ic}$ 时,对应的临界裂纹尺寸为

$$a_c' = \frac{K_{Ic}^2}{\pi \sigma^2} \tag{7}$$

式(6)是针对无限大板的计算公式,实际压力容器结构是筒体,因此引入鼓胀效应修正因子 m 。在裂纹尺寸相同的情况下,压力容器筒体上的轴向裂纹最危险。对于圆筒体上的轴向裂纹, m 表达式为^[7] $m = (1 + 1.61 \frac{2a^2}{DW})^{\frac{1}{2}}$ 。

压力容器的临界裂纹尺寸为

$$a_c = \frac{K_{Ic}}{\pi [1 + 2a_c' \times 1.61 / (DW)]^{\frac{1}{2}} \sigma^2} \tag{8}$$

2 存在裂纹的压力容器疲劳寿命

当压力容器受周期性变化的内压力作用时,尽

管其工作压力远小于按照式(1)确定的临界压力,裂纹也会发生疲劳扩展;当裂纹尺寸达到失稳扩展的临界值 a_c 时,出现低应力脆断现象。

采用 Paris 公式对裂纹扩展速率进行描述

$$\frac{da}{dN}=C(\Delta K)^n \tag{9}$$

式中: $\frac{da}{dN}$ 为疲劳裂纹扩展速率; ΔK 为每一次循环中的应力强度因子变化幅值, $\Delta K=K_{\max}-K_{\min}$; C 、 n 为取决于材料、环境、荷载频率、温度变化和应力变化率的参数。

根据式(4)、(9),可以将应力强度因子的变化幅值写成

$$\Delta K=\Delta\sigma Y(a) \tag{10}$$

于是

$$\frac{da}{dN}=C(\Delta\sigma)^n Y^n(a) \tag{11}$$

当裂纹从初始尺寸 a_0 扩展到 a_c 时,对式(11)积分可以得到裂纹扩展寿命 N_c

$$N_c=\frac{1}{C(\Delta\sigma)^n}\int_{a_0}^{a_c}Y^{-n}(a)da \tag{12}$$

对于半椭圆裂纹

$$Y(a)=\frac{1.1\sqrt{\pi a}}{[\varphi^2-0.212(\sigma/\sigma_s)^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{13}$$

将式(13)代入式(12)得

$$N_c=\begin{cases} \frac{1}{C\pi(\Delta\sigma)^2[\varphi^2-0.212(\sigma/\sigma_s)^2]}\ln\frac{a_c}{a_0} & n=2 \\ \frac{2}{(n-2)C(\Delta\sigma)^n\pi^{n/2}[\varphi^2-0.212(\sigma/\sigma_s)^2]^{n/2}}\cdot\frac{(a_0^{\frac{2-n}{2}}-a_c^{\frac{2-n}{2}})}{(a_0^{\frac{2-n}{2}}-a_c^{\frac{2-n}{2}})} & n\neq2 \end{cases} \tag{14}$$

对于穿透裂纹

$$Y(a)=\sqrt{\pi a} \tag{15}$$

将式(15)代入式(12)得

$$N_c=\begin{cases} \frac{1}{C\pi(\Delta\sigma)^2}\ln\frac{a_c}{a_0} & n=2 \\ \frac{2}{(n-2)C(\Delta\sigma)^n\pi^{n/2}}(a_0^{\frac{2-n}{2}}-a_c^{\frac{2-n}{2}}) & n\neq2 \end{cases} \tag{16}$$

3 算 例

有一材质为 16MnR 的径向反应器,其直径 $D=6100\text{ mm}$,壁厚 $t=14\text{ mm}$,反应器工作压力为 3.5 MPa ,工作循环压力为 $0\sim3.5\text{ MPa}$ 。由文献[8]可知,16MnR 钢在 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时断裂韧度指标 $J_{Ic}=51.3\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$;由文献[9]可知,16MnR 钢的屈服强

度 $\sigma_s=345\text{ MPa}$,弹性模量 $E=2.08\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}=7.97\times10^{-10}(\Delta K)^{3.52}$ 。

在小范围屈服条件下,16MnR 钢的断裂韧度指标

$$K_{Ic}=\sqrt{\frac{EJ_{Ic}}{1-\nu^2}}=342\times10\text{ N}\cdot\text{mm}^{-\frac{3}{2}}。$$

利用式(8)可以得到压力容器存在不同缺陷尺寸时的临界裂纹尺寸,如表 2 所示。

表 2 不同初始裂纹的临界裂纹尺寸
Tab. 2 Critical Fracture Sizes of Different Original Cracks

序号	1	2	3	4	5
a/b	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
φ	1.014 8	1.050 5	1.069 5	1.150 7	1.211 1
a_c/mm	34.7	37.6	39.1	46.2	51.7
序号	6	7	8	9	10
a/b	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
φ	1.276 4	1.345 6	1.418 1	1.493 5	1.570 8
a_c/mm	52.6	65.2	73.0	81.5	90.8

由表 2 中可以看出,对于较深的表面裂纹,其临界裂纹尺寸大于压力容器壁厚,即 $a_c\geq t$,此时裂纹会扩展成为穿透裂纹,压力容器会出现渗漏,但裂纹扩展成穿透裂纹后不会立即发生失稳断裂,即工程中的断裂前渗漏现象。不同形状裂纹从初始尺寸 a_0 扩展到穿透裂纹时的工作压力循环次数 N_c ,如图 3(a)所示。对于存在穿透裂纹的压力容器,利用式(12)可以得到裂纹从不同的初始尺寸 a_0 扩展到临界断裂尺寸 a_c 时的工作压力循环次数 N_c ,如图 3(b)所示。从图 3 中可以看出,随着裂纹初始尺寸 a_0 的增大,压力容器的疲劳寿命 N_c 逐渐减小,当裂纹尺寸扩展到临界断裂尺寸 a_c 时,压力容器在内压力作用下会立即发生失稳断裂。对于表面裂纹,当裂纹尺寸较小,即 $a_0<10\text{ mm}$ 时, N_c 随着 a_0 的增大而急剧减小,随着裂纹的继续扩展,此变化趋势逐渐变缓,且对于不同形状的表面裂纹,随着 φ 的增大,表面椭圆裂纹逐渐趋于半圆,压力容器的疲劳寿命 N_c 逐渐减小;对于穿透裂纹,随着裂纹初始尺寸 a_0 的增大,压力容器的疲劳寿命 N_c 急剧下降。

4 结 语

(1)笔者基于断裂力学理论,应用裂纹失稳断裂准则分析了压力容器在交变荷载作用下,压力容器的疲劳破坏由初始表面裂纹扩展成为穿透裂纹,最终导致结构发生失稳断裂破坏。

(2)压力容器的疲劳失效常发生在初始缺陷的疲劳裂纹上,美国的 ASME III、ASME VIII-2 和中国

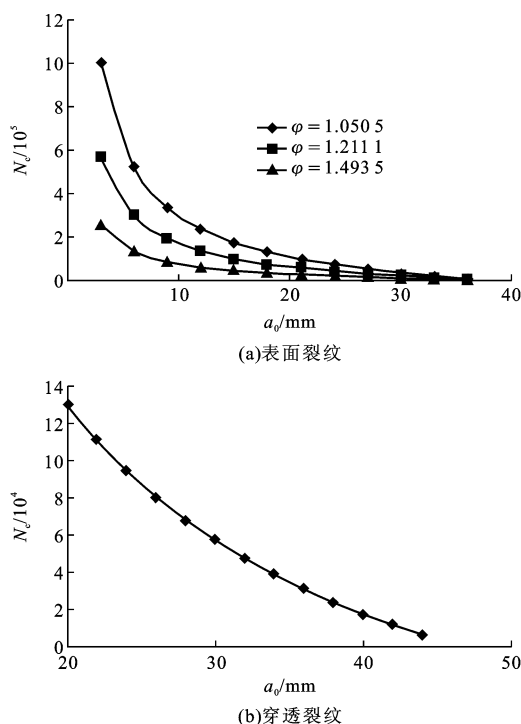


图3 压力容器疲劳寿命

Fig. 3 Fatigue Life of Pressure Vessel

的 JB 4732—95 规范中的疲劳设计曲线是通过对光滑小试件进行疲劳试验得出的,光滑小试件的疲劳寿命主要是受疲劳裂纹萌生寿命所控制,而压力容器的疲劳寿命是受疲劳裂纹扩展寿命所决定。由分析结果可以看出,利用断裂力学对存在不同尺寸和形式裂纹的压力容器进行疲劳断裂分析更加准确、方便。笔者推导出的压力容器疲劳寿命计算表达式考虑了裂纹的影响,并针对不同裂纹尺寸对压力容器进行寿命估算,为压力容器的安全评定提供了理论依据。

参考文献:

References:

- [1] 压力容器实用技术丛书编写委员会. 压力容器设计知识[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
Editorial Committee of Pressure Vessel Practical Technique Series. Pressure Vessel Design Technology[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2005.
- [2] 李小伟,赵均海,乔海军. 薄壁圆筒在阶形变形路径下的统一增量解[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4): 50-53.
LI Xiao-wei, ZHAO Jun-hai, QIAO Hai-jun. Unified

Incremental Solution of Thin Cylinder Under Step Deformation Path[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(4):50-53.

- [3] 马玉平,马 昕,崔建涛. 高强度混凝土试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(3):67-69.
MA Yu-ping, MA Xin, CUI Jian-tao. Experimental Research on High-strength Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(3):67-69.
- [4] 庄 茁,蒋持平. 工程断裂与损伤[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
ZHUANG Zhuo, JIANG Chi-ping. Engineering Fracture and Damage Mechanics[M]. Beijing:China Machine Press,2004.
- [5] 葛清蕴,翟振东,刘东坡,等. 带有裂纹的薄壁圆筒压力容器临界荷载研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):54-56.
GE Qing-yun, ZHAI Zhen-dong, LIU Dong-po, et al. Study of Critical Loads of the Thin-walled Cylinder Pressure Vessel with Crack[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(4):54-56.
- [6] 于晓中. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1991.
YU Xiao-zhong. Fracture Mechanics of Rock and Concrete[M]. Beijing:Beihang University Press,1991.
- [7] 尹双增. 断裂·损伤理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
YIN Shuang-zeng. Fracture and Damage Theories and Their Application[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1992.
- [8] 秦江阳,王印培,柳曾典. 16MnR 钢弹塑性断裂韧性 J_i 的韧脆转变温度特性[J]. 理化检验:物理分册,2000,36(12):531-534.
QIN Jiang-yang, WANG Yin-pei, LIU Ceng-dian. Ductile-brittle Transition Temperature Characteristic on Elasto-plastic Fracture Toughness J_i of 16MnR Steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis:Physical Testing,2000,36(12):531-534.
- [9] 陶伟华,孙伟明,杨金来. 16MnR 钢和 TTStE36 钢疲劳裂纹扩展速率对比试验研究[J]. 机械强度,2000,22(3):243-244.
TAO Wei-hua, SUN Wei-ming, YANG Jin-lai. Contrasting Test Research of Fatigue Crack Growth Rate Between 16MnR and TTStE36[J]. Journal of Mechanical Strength,2000,22(3):243-244.