

压力容器表面裂纹疲劳扩展的数值计算

常 磊 ,邓春锋 ,任方杰 ,邵 飞 ,武春学 ,梅鹏程

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所 ,河南 洛阳 471023)

摘 要: 本文通过 Franc3D 软件 ,计算了压力容器表面裂纹失稳扩展的临界尺寸及不同尺寸的初始裂纹的扩展 ,发现当容器表面的初始椭圆形裂纹尺寸小于 $3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 及 $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 时 ,在裂纹穿透壁厚之前 ,裂纹尖端的应力强度因子都小于压力容器用钢的断裂韧性 K_{IC} ,故该裂纹不会发生失稳扩展 ,且上述两个初始裂纹穿透容器壁厚时的循环载荷次数分别为 40 688、45 560 次。

关键词: 数值计算; 疲劳裂纹扩展; FRANC3D

中图分类号: TE 88 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth on the Pressure Vessel's Surface

CHANG Lei ,DENG Chun-feng ,REN Fang-jie ,
SHAO Fei ,WU Chun-xue ,MEI Peng-cheng

(Luoyang Ship Material Research Institute ,Luoyang 471023 , China)

Abstract: The critical dimension of crack instability and propagation of initial elliptical crack of different sizes on the surface of pressure vessel was calculated by FRANC3D. It is found that stress intensity factor of the crack tip before penetrating the wall is less than the fracture toughness K_{IC} of pressure vessel steel ,when the size of initial crack on the pressure vessel surface is less than $3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ and $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,so the unstable propagation of the cracks does not occur. The cyclic loading numbers of the two initial cracks ,that are $3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ and $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ to penetrate the container wall ,are 40688 ,45560 and respectively.

Keywords: numerical simulation; fatigue crack growth; FRANC3D

压力容器上的原始缺陷(缩孔、缩松、夹杂等)及在使用过程中新产生的缺陷(点蚀坑等) ,在充放气循环载荷作用下 ,会发生疲劳扩展。在裂纹扩张过程中 ,当裂纹尖端的应力强度因子 K_I 大于压力容器材料的断裂韧性 K_{IC} 时 ,裂纹就会发生失稳扩展 ,造成容器的爆炸 ,严重时造成人员伤亡 ,带来很大的安全隐患和经济损失 ,因此研究压力容器上裂纹尖端的应力强度因子和裂纹的疲劳扩展对压力容器的安全运行有至关重要的意义。

针对压力容器上裂纹的扩展的研究 ,目前主要有试验和数值计算两种方法。由于试验研究的成本大 ,因此数值计算成为研究压力容器裂纹

扩展的主要手段之一。FRANC3D 是康奈尔大学断裂力学组开发用于计算裂纹尖端应力强度因子和裂纹扩展软件。沈士明^[1-2]等已经通过实验验证了该软件计算的裂纹扩展路径及构件寿命预测的准确性 ,因此本文运用该软件计算了压力容器表面上不同尺寸的椭圆形裂纹尖端的应力强度因子和疲劳裂纹的扩展过程 ,为压力容器的剩余强度及剩余寿命的计算打下基础。

1 计算的基础数据获得

1.1 压力容器用钢 QP9100 的断裂韧性

依据 GB/T 2038—1991 ,通过测量压力容器

收稿日期: 2013-06-08

基金项目: 基础科研项目(JK110102)

作者简介: 常磊 ,男 ,1986 年生 ,助理工程师 ,主要从事压力容器的失效分析及安全性评价。E-mail: changlei369@126.com。

用钢 QP9100 延性断裂韧性 J_{IC} 根据 J_{IC} 与 K_{IC} 的转换关系, 推导出材料的断裂韧性 K_{IC} , 得出材料的断裂韧性 $K_{IC} = 124.45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

1.2 压力容器用钢 QP9100 的疲劳裂纹扩展速率

依据 GB/T6398 “金属材料材料疲劳扩展速率试验方法”中的三点弯曲法, 通过拟合得出压力容器用钢中的裂纹扩展速率 $da/dN = 3.0356 \times 10^{-10} \times \Delta K^{1.9711} \text{ m/cycle}$ 。

2 计算与讨论

2.1 几何建模

由于容器的轴对称性, 选取整个容器的 1/4 作为分析对象, 如图 1(a)。考虑到计算机处理能力, 在 1/4 容器中截取其中一部分, 作为子模型, 如图 1(b), 裂纹引入在子模型上。剩余部分作为全局模型。

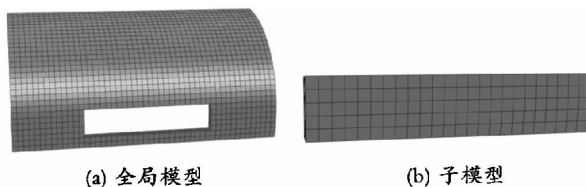


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model: (a) global model; (b) local model

2.2 数值计算和理论计算的比较

理论计算是根据已有的数学公式计算裂纹尖端的应力强度因子, 而数值计算是通过软件计算裂纹尖端的应力强度因子, 通过比较验证数值计算的准确性。对于内部工作压力 $P = 40 \text{ MPa}$, 外半径 $R = 235 \text{ mm}$, 壁厚 $t = 17 \text{ mm}$ 的压力容器, 假设外表面有一个长 $2c = 10 \text{ mm}$, 深 $a = 3 \text{ mm}$ 的纵向椭圆形裂纹, 计算其裂纹尖端的应力强度因子 K_I 。

2.2.1 理论计算

由于 $D/t > 10$, 故该容器的薄膜应力可按照薄壁容器计算^[3]。

$$\text{轴向应力: } \sigma_x = \frac{PD_i}{4t} = 246.5 \text{ MPa};$$

$$\text{环向应力: } \sigma_\theta = \frac{PD_i}{2t} = 493 \text{ MPa}。$$

σ_x 为容器的轴向应力, 单位 MPa;

σ_θ 为容器的环向应力, 单位 MPa;

P 为压力容器的内压, 单位 MPa;

D_i 为压力容器的平均直径, 单位 mm;

t 为压力容器的壁厚, 单位 mm。

对含裂纹压力容器, 工程上通常将实际裂纹近似表征为半椭圆状裂纹^[4] (其中裂纹的深度为 a , 裂纹的长度为 $2c$), 在考虑裂纹尖端塑性区修正的情况下, 有限体半椭圆状裂纹的应力强度因子近似表达式为:

$$K_I = M_1 \cdot M_2 \cdot \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{[\phi^2 - 0.212(\frac{\sigma}{\sigma_s})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$M_1 = 1 + 0.12(1 - \frac{a}{2c})^2 \quad (2)$$

$$M_2 = \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2t}} \quad (3)$$

式中 M_1 、 M_2 分别为裂纹前后自由面的修正系数;

σ 为垂直于裂纹所在平面的环向应力 σ_θ , 单位 MPa;

a 为裂纹的深度, 单位 m;

Φ 为第二类椭圆积分。

由公式 1 可以计算出初始裂纹尖端的应力强度因子 $K_I = 40.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

2.2.2 数值计算

在子模型上引入半椭圆裂纹, 建立的几何模型如图 2, 经计算得到半椭圆裂纹尖端的应力强度因子如图 3 所示。椭圆短半轴处的裂纹尖端的应力强度因子 $K_I = 39.9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 略小于理论计算值 $40.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 理论计算和数值计算结果较吻合, 稍有差别, 主要是因为数值计算时把材料当成脆性材料, 未考虑裂纹尖端的塑性变形。

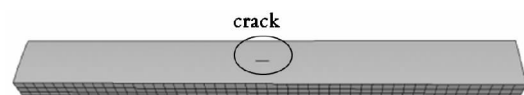


图 2 引入裂纹的模型

Fig. 2 The model introduced crack

2.3 数值计算的临界裂纹尺寸

当裂纹的深度不变时, 令 $a = 15 \text{ mm}$, 计算不同裂纹长度下, 短半轴裂纹尖端的应力强度因子 K_I 其变化如图 4 所示。由图可见, 当裂纹半长度 c 由 15 mm 增大到 45 mm 时, 短半轴裂纹尖端的应力集中因子由 $83.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 增加到 174.6

$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。当 $c > 27.5 \text{ mm}$,短半轴裂纹尖端的应力强度因子超过材料的断裂韧性 $K_{\text{IC}} = 124.45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,此时裂纹将会发生失稳扩展 ,穿透壁厚 ,形成穿透裂纹。

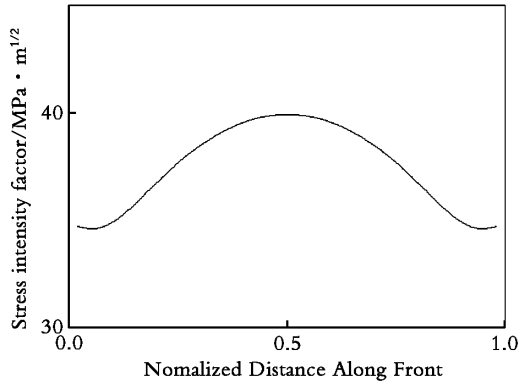


图 3 裂纹尖端的应力强度因子

Fig. 3 Stress intensity factor of crack front

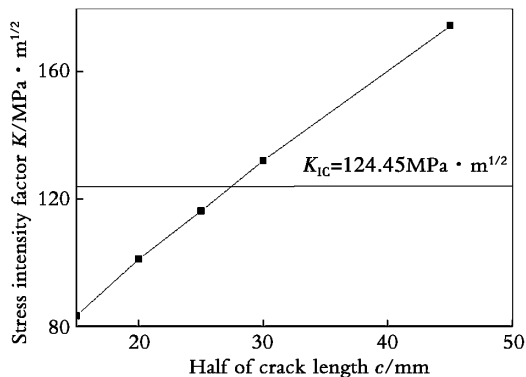


图 4 椭圆型裂纹短半轴尖端应力强度因子随长度的变化
Fig. 4 The change of stress intensity factor of semi-minor axis of the elliptical cracks with the length of cracks

当裂纹尖端的应力强度因子 $K_I > K_{\text{IC}}$ 时 ,裂纹将会发生失稳扩展 ,因此裂纹的应力强度因子是裂纹失稳扩展的直接判据。根据公式(1) 计算了不同尺寸下的裂纹尖端的应力强度因子 ,如图 5 所示。根据图 5 可以得到的临界裂纹尺寸 ,如表 1 所示 ,随着裂纹形状因子的增加 ,裂纹的临界深度也逐渐增加。本文以断裂韧性 K_{IC} 为判据 ,通过数值计算的方法计算了压力容器外表面椭圆形裂纹的临界尺寸 ,如图 6 所示。

比较数值计算和理论计算所得的临界裂纹尺寸 ,发现二者并不能完全重合 ,如图 6 ,这是由于公式(1) 是针对有限宽板的表面裂纹尖端应力强度因子的计算 ,当裂纹深度超过壁厚一定尺寸

后 ,该公式的计算误差逐渐增大。考虑到实际使用的容器的安全性 ,可以取二者的交集 ,只要裂纹的尺寸小于图中阴影线部分 ,完全可以认为该裂纹是可以接受的 ,不会产生失稳扩展导致爆炸的危险。

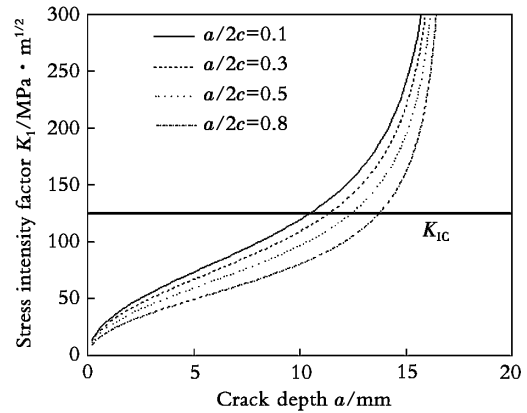


图 5 K_I 随裂纹深度的变化

Fig. 5 The change of K_I with crack depth

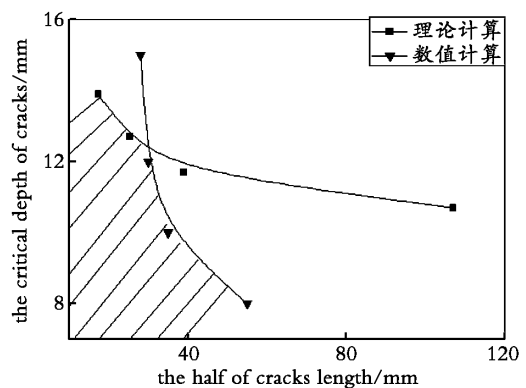


图 6 临界裂纹尺寸

Fig. 6 The critical crack size

表 1 不同形状因子下裂纹的临界尺寸

Table 1 The critical crack size of different shape

The shape factor a/c	0.1	0.3	0.5	0.8
a	10.4	11.4	12.5	13.7
c	104.0	38.0	25.0	17.1

2.4 裂纹扩展过程的数值模拟

由于压力容器在制造、运输及使用等过程中不可避免会出现各种缺陷 ,这些原始缺陷在压力容器的充放气过程中 ,在循环载荷的交互作用下 ,会发生扩展。裂纹尖端的应力强度因子 ,与裂纹的深度和裂纹的形状有很大的关系 ,而正常

的手段很难检测出扩展过程中裂纹的形状,因此通过数值计算的方法可以研究裂纹的扩展过程。

2.4.1 裂纹扩展过程尖端应力强度因子的计算

以深 $a = 3 \text{ mm}$, 长 $2c = 10 \text{ mm}$ 的半椭圆裂纹为例, 计算裂纹的扩展。裂纹扩展过程中所用的裂纹扩展速率 $da/dN = 3.0356 \times 10^{-10} \times \Delta K^{1.9711} \text{ m/cycle}$, 裂纹扩展轨迹如图7所示。从图7椭圆框中可以看到, 在裂纹开始扩展过程中, 椭圆裂纹长半轴的轨迹先向裂纹中心靠拢, 而后沿着背向中心和靠向中心交替扩展, 这是由于初始裂纹的尺寸 $a/c = 0.6 < 1$, 长半轴裂纹尖端的应力强度因子的变化 ΔK 小于短半轴裂纹尖端应力强度因子的变化, 因此长半轴裂纹尖端的裂纹扩展速度小于短半轴裂纹扩展速度, 故长半轴裂纹尖端的轨迹向椭圆中心靠拢, 使裂纹的形状由椭圆形向圆形转变, 其中短半轴裂纹尖端的应力强度因子如图8所示。当裂纹穿透壁厚时, 形成两个裂纹尖端, 此时图8中的裂纹尖端的应力强度因子是图7中第8步轨迹线和红线交点处的应力强度因子。从图8还可以得到, 当裂纹尚未贯穿整个容器壁厚时, 椭圆形裂纹短半轴处的应力强度因子 K_I 小于材料的断裂韧性 K_{IC} , 因此裂纹不会发生失稳扩展, 容器也不会发生爆炸。文献[5—6]中也研究了裂纹的这种变化趋势。

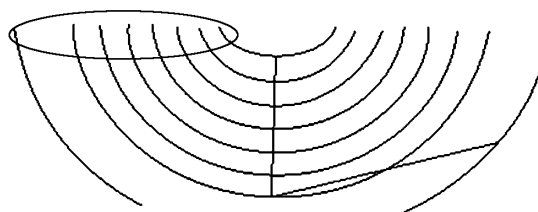


图7 裂纹扩展过程示意图

Fig. 7 Crack propagation process diagram

整个裂纹尖端在扩展过程中应力强度因子的变化历程如图9(b)所示。在整个裂纹的扩展过程中, 在形成贯穿裂纹之前, 整个裂纹尖端的应力强度因子 K_I 都小于材料的断裂韧性 K_{IC} , 这说明对于 $a = 3 \text{ mm}$, $2c = 10 \text{ mm}$ 的初始裂纹, 在形成贯穿裂纹之前, 该裂纹不会发生失稳扩展。由于在最后一步穿透壁厚后, 裂纹尖端发生较大的扰动, 产生不连续现象, 导致裂纹分开部位出现一定的波动, 从而导致穿透裂纹两个尖端应力强度因子的不连续性。

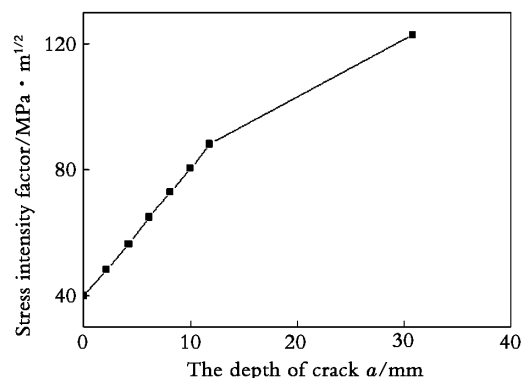


图8 裂纹扩展过程中短半轴裂纹尖端的应力强度因子的变化

Fig. 8 The change of stress intensity factor of semi-minor axis of the elliptical cracks in cracks propagation

2.4.2 不同初始裂纹尺寸疲劳扩展过程的计算

本文计算了不同初始尺寸 $a \times 2c$ ($3 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, $3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, $3 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, $5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) 的裂纹扩展过程中, 其裂纹扩展过程的应力强度因子历程如图9所示。图中几种情况在裂纹穿透之前, 裂纹尖端的应力强度因子都未超过材料的断裂韧性 K_{IC} 。当裂纹穿透壁厚, 达到一定尺寸后, 裂纹尖端的应力强度因子就有可能超过材料的断裂韧性 K_{IC} , 发生失稳扩展。也就是说上述几种尺寸的原始缺陷在疲劳载荷的作用下, 可能产生未爆先漏(LBB)的情况。

根据裂纹的尖端应力强度因子的变化(应力比 $R = 0$)及Paris公式, 可以得到不同尺寸的初始裂纹扩展过程中循环次数, 如图10所示。通过图10可以得到这些不同尺寸的初始裂纹穿透整个容器壁厚的循环次数, 并可预测容器使用年限, 如表2所示。当初始裂纹的深度不变时, 裂纹的长度增加, 裂纹穿透壁厚的循环次数降低; 当裂纹长度不变时, 初始裂纹深度增加, 裂纹穿透壁厚的循环次数降低。

上述计算时, 把压力容器用钢当作线弹性材料来处理, 当裂纹深度较浅时, 裂纹尖端的应力强度因子小, 塑性区的尺寸也较小, 因此可以忽略塑性区的大小; 当裂纹即将穿透容器壁厚时, 由于裂纹尖端的塑性变形区接近或者大于剩余韧带的尺寸, 在该种情况下, 可认为裂纹已经穿透壁厚, 因此造成上述数值计算的结果远远小于实际值。所以裂纹尖端的弹塑性情况有待进一步研究。

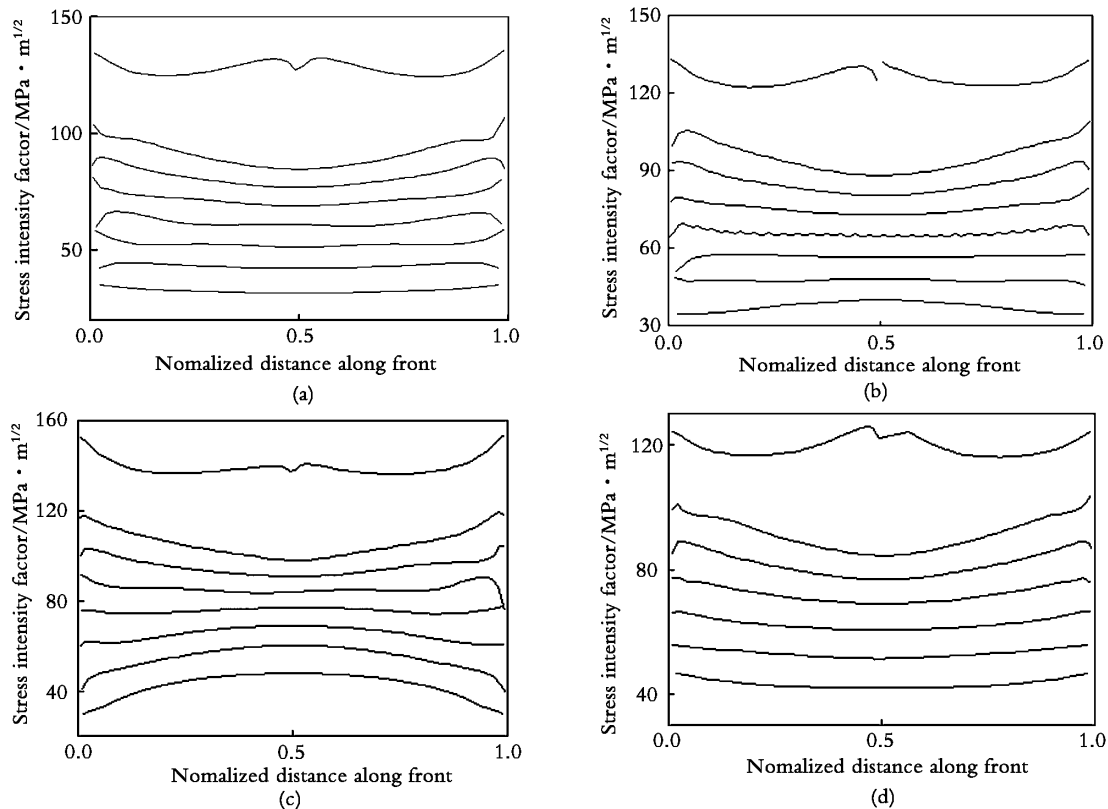


图 9 不同尺寸的初始裂纹扩展过程中裂纹尖端的应力强度因子变化历程

Fig. 9 The change course of stress intensity factor of the initial different sizes crack in propagation: (a) 3 mm × 6 mm; (b) 3 mm × 10 mm; (c) 3 mm × 20 mm; (d) 5 mm × 10 mm

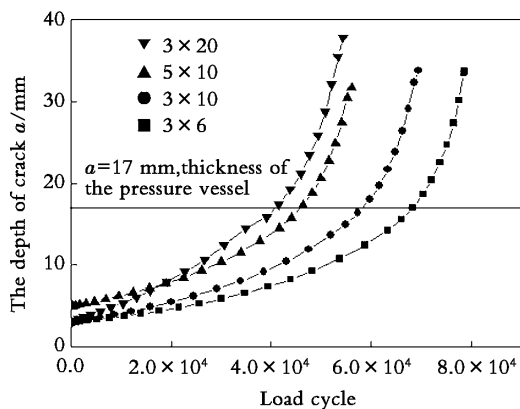


图 10 裂纹扩展深度与循环次数的关系

ig. 10 The change of numbers of cycle with the depth of crack propagation

表 2 不同初始裂纹尺寸穿透壁厚的循环次数及寿命
Table 2 Cycle numbers and lifetime of the initial different sizes crack penetrating the wall thickness

The size of initial crack $a \times 2c/\text{mm}$	3 × 6	3 × 10	3 × 20	5 × 10
Load cycle /N	68 476	58 285	40 688	45 560
Lifetime ¹⁾ /Y	685	583	407	456

注 1): 寿命为假设压力容器每年充放气 100 次条件下, 压力容器预测使用年限。

3 结论

(1) 当初始裂纹尺寸小于 3 mm × 20 mm 和 5 mm × 10 mm 时, 裂纹在穿透容器壁厚之前的应力强度因子都小于容器用钢的断裂韧性, 小于该初始裂纹尺寸的裂纹在扩展过程中都不会发生失稳扩展及爆炸;

(2) 初始尺寸为 3 mm × 20 mm 和 5 mm × 10 mm 的椭圆形裂纹, 穿透容器壁厚的循环载荷次数分别为 40 688、45 560 次。

(3) 由于本文中在数值计算时, 把压力容器用钢当成弹性材料处理, 未考虑裂纹尖端的塑性变形, 使数值计算结果小于裂纹尖端应力强度因子的真实值。

参考文献:

- [1] 刘斌, 沈士明. 基于 FRANC3D 的三维疲劳裂纹扩展的数值模拟[J]. 煤矿机械 2007(12): 52.
Liu B, Shen S M. Numerical simulation of three-dimension fatigue crack growth based on FRANC3D

- [J]. Coal Mine Machinery 2007(12) : 52.
- [2] 刘斌, 沈士明. 基于 FRANC2D 的疲劳裂纹扩展的数值模拟 [J]. 中国制造业信息化 2007 ,15: 32.
Liu B ,Shen S M. The numerical simulation of fatigue crack growth based on FRANC2D [J]. Manufacture Information Engineering of China 2007 ,15: 32.
- [3] 罗先登, 杜厚益. 高强度制轻型高压气瓶 [J]. 钢管 2000 29: 49—50.
Luo X D ,Du H Y. High strength steel light pressure cylinders [J]. Steel Pipe 2000 29: 49—50.
- [4] 肖纪美. 金属的韧性及韧化 [M]. 上海: 上海科学技术出版社 ,1980: 117.
Xiao J M . The Toughness of Metal and Toughening [M]. Shanghai : Shanghai Science and Technology Press. 1982: 117.
- [5] 褚武扬, 肖纪美, 林实. 关于表面裂纹的研究 [J]. 力学学报 ,1979(3) : 294 .
Chu W Y ,Xiao J M ,Lin S. On research of surface crack [J] . Journal of Mechanics ,1979(3) : 294.
- [6] 邓彩艳. 焊接压力管道“先漏后爆”评定理论及应用研究 [D]. 天津: 天津大学 2006.
Deng C Y. Study of the Theory and Application of Leak-before-break Assessment Procedure for the Welded pressure pipeline [D]. Tianjin : Tianjin University 2006.

(编辑: 张迎元)