

• 机械工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201700867

基于缺陷安全衰减路径仿真的含埋藏裂纹 压力容器剩余寿命研究

龙 伟, 严佳兵, 李炎炎*, 刘华国, 黄吉民

(四川大学 制造科学与工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 裂纹的扩展行为研究是压力容器剩余寿命预测的关键与基础, 针对压力容器含埋藏裂纹的安全程度评价问题, 在埋藏裂纹的安全衰减路径仿真基础上, 提出了一种预测埋藏裂纹剩余寿命的计算方法。首先通过对Paris疲劳裂纹扩展公式进行迭代运算, 建立裂纹长度和深度的几何关联变化模型, 利用该关联模型在R6评价图上仿真模拟埋藏裂纹缺陷的安全衰减路径轨迹, 其路径轨迹表征的裂纹变化过程可分为埋藏裂纹阶段和表面裂纹阶段。采用数字积分方法求解不同阶段的安全衰减路径的剩余轨迹线段, 并以此为度量建立埋藏裂纹安全裕度的计算模型, 该计算模型能够给出裂纹缺陷在任何尺寸时对应的动态安全裕度, 并以此来反应压力容器的安全程度。通过建立压力容器裂纹缺陷的受力模型, 利用有限元方法分别计算出裂纹特殊点的应力强度因子, 并运用权函数法, 求出裂纹缺陷应力强度因子幅 K 的函数表达式; 采用对Paris公式进行积分的方法求出疲劳循环次数 N 的函数表达式, 根据裂纹长度和深度的几何关联变化模型, 采用分布积分的方法计算出埋藏裂纹的疲劳循环次数, 从而能够有效的对压力容器含埋藏裂纹的剩余寿命进行预测。

关键词: 压力容器; 埋藏裂纹; 剩余寿命; 安全裕度; 权函数

中图分类号: TH49

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2018)05-0239-05

Study on Residual Life of Pressure Vessels with Immersed Cracks Based on Defect Security Attenuation Path Simulation

LONG Wei, YAN Jiabing, LI Yanyan*, LIU Huoguo, HUANG Jimin

(School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: The study of crack propagation is the key and foundation of pressure vessels' residual life prediction. In view of security assessment for pressure vessels with immersed cracks, based on the security attenuation path simulation, another calculation method is put forward to predict the residual life. First of all, the iterative calculation based on Paris fatigue crack growth formula is conducted to build the model of geometric correlation change in crack length and depth. Next, this correlation model is used to simulate the security attenuation path track of immersed crack defects in R6 evaluation diagram. The immersed crack change represented by path track can be divided into immersed crack phase and surface crack phase. Then the numerical integration method is adopted to get the residual track segment of security attenuation path in different phases, and the calculation model of immersed crack safety margin is built. This calculation model can show related dynamic safety margins for different sizes of crack defect, and reflect the safety degree of pressure vessels. After building the mechanical model of pressure vessels' crack defect, the stress intensity factor of special crack point in finite element method is calculated. And weight function method is adopted to get the function formula of the stress intensity factor range K of crack defect. The function formula of fatigue circulation time N is calculate by Paris formula integral. Lastly, according to the model of geometric correlation change in crack length and depth, the fatigue circulation times of immersed cracks is calculated by means of integration.

Key words: pressure vessel; buried crack; residual life; safety margin; weight function

收稿日期: 2017-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075286); 四川大学实验技术立项资助项目(20170135)

作者简介: 龙 伟(1956—), 男, 教授, 博士。研究方向: 工业自动化。E-mail: scdxlongwei@yeah.net

* 通信联系人 E-mail: lyy_scu@163.com

网络出版时间: 2018-08-29 23:49:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180829.2349.008.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

金属压力容器作为广泛应用的承压设备,是工业生产、民生工程、国防军工等领域极为重要的基础设施,也是重大安全事故高发频发的高危特种装置。据统计,20世纪60年代以来中国的压力容器破坏事故中,有62.5%以上是由疲劳裂纹引起^[1]。与其它裂纹相比,埋藏裂纹因其先天性、后发性、隐蔽性、突显性的特点,是压力容器最常见、危害最大的安全隐患。然而,现有压力容器安全评定标准或准则,包括当前的一些主流标准或准则,如API—579、BSI PD6493修订版—BS7910、英国R6《含缺陷结构完整性评定标准》、欧洲SINTAP《欧洲工业结构完整性评定方法》等^[2-3],对缺陷的评定只能给出“安全”或“不安全”的结论,不能回答缺陷的安全程度或剩余寿命问题。

对于压力容器的剩余寿命研究,龙伟、宋恩奎等^[4-6]提出基于安全裕度的剩余寿命预测方法,Chen等^[7]采用在R6评定图中引入切线来评估压力容器的安全性,还有不少学者通过人工神经网络分析、设备检验RBI技术、应力强度分析、有限元分析等方法对此进行了大量深入研究,但均未获得满意效果。

过去的研究普遍采用在R6评定图中引入通过原点至安全临界线的射线,或引入与安全临界的平行等分线来评估缺陷的安全程度^[4]。如图1所示,在役压力容器上的一个埋藏裂纹在模拟国防空气动力试验疲劳条件下,引入射线法和平行线法来评估裂纹缺陷安全程度的示例,其并不能反映裂纹缺陷真实的变化趋势,无法对埋藏裂纹安全程度进行有效的预测。

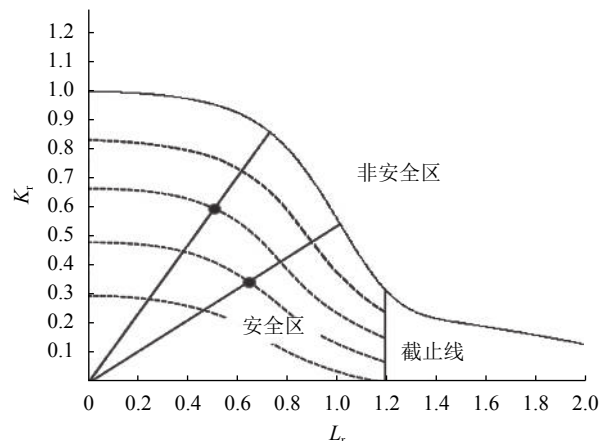


图1 射线法和平行线法评估缺陷安全性的示例

Fig. 1 Example of defect security assessment with radial method and parallel method

为此,作者针对压力容器含埋藏裂纹安全程度评价问题,建立埋藏裂纹缺陷真实的安全衰减路径仿真,提出一种预测埋藏裂纹剩余寿命的新方法。

1 疲劳裂纹扩展理论

裂纹在疲劳交变载荷作用下会发生裂纹形状变化,描述裂纹形状发展路径的裂纹扩展速率模型对于准确预测压力容器剩余寿命十分重要,其中应用最广的是Paris公式^[8]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

式中, $\frac{da}{dN}$ 为裂纹扩展速率, a 为裂纹的深度, N 应力循环次数, C 、 m 为金属结构常数,与材料和工作环境有关, ΔK 为应力强度因子幅。

Newman等^[9]假设表面裂纹在成长过程中一直保持半椭圆形状,且只采用一对Paris疲劳裂纹扩展公式进行计算以确定半椭圆形状。基于这个假设,埋藏裂纹在成长过程中一直保持椭圆形状,其从原点可剖分成两个半椭圆形状,类比于表面裂纹形式,同样只采用一对Paris疲劳裂纹扩展公式进行计算以确定埋藏裂纹的椭圆形状。即表面裂纹和埋藏裂纹可采用同一对Paris疲劳裂纹扩展公式表示其裂纹深度尖端和长度尖端与疲劳应力循环次数的关系,其数学表达式为:

$$\frac{da}{dN} = C_A(\Delta K_A)^m \quad (2)$$

$$\frac{dc}{dN} = C_C(\Delta K_C)^m \quad (3)$$

式中, c 为裂纹的长度。对于同一条裂纹,其材料和工作环境相同,认为 $C_A = C_C$ 。将式(2)和(3)进行迭代:

$$\frac{da}{dc} = \left(\frac{\Delta K_A}{\Delta K_C} \right)^m \quad (4)$$

根据应力强度因子理论分别求取与裂纹深度和长度有关的应力强度因子幅:

$$\begin{cases} \Delta K_A = Y\Delta\sigma_A\sqrt{\pi a} \\ \Delta K_C = Y\Delta\sigma_C\sqrt{\pi c} \end{cases} \quad (5)$$

式中, Y 为裂纹的形状系数, $\Delta\sigma$ 为裂纹处应力幅值。把式(5)带入式(4)中,且当裂纹长度变化量为 Δc 时,对应一个深度变化量 Δa (即当 $\Delta a \rightarrow 0, \Delta c \rightarrow 0$),假设裂纹的长度和深度的 $\Delta\sigma$ 相同,即可得到裂纹长度和深度的几何关联变化关系:

$$\Delta c / \Delta a = (c_i/a_i)^{\frac{m}{2}} \quad (6)$$

式中, a_i 和 c_i 分别表示上一次裂纹的深度和长度。

2 安全衰减路径与安全裕度模型

以国标GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》为依据,对含有埋藏裂纹缺陷的压力

容器,根据其相关参数,在R6评定图上生成一个评定点。运用压力容器仿真平台建立缺陷的安全衰减路径仿真,即随着加载时间增加,裂纹的长度和深度根据其几何关联变化关系,将裂纹变化过程中的每一个裂纹尺寸在R6评定图中表示出来,得到由安全评定点(L_r, K_r)沿着一条曲线由安全区逐渐向非安全区靠近,如图2所示。

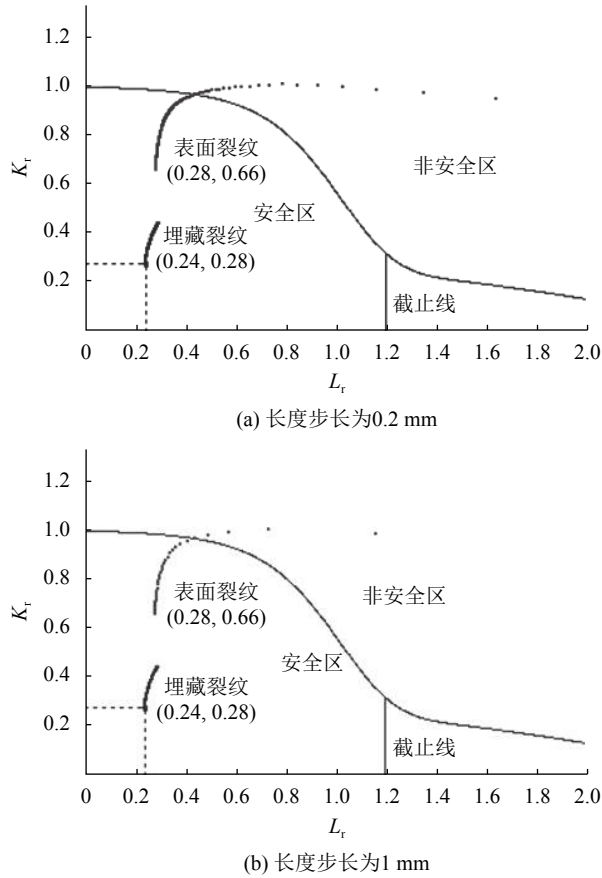


图2 裂纹安全衰减路径仿真图

Fig. 2 Simulation chart of crack safety decay path

从理论上来说,安全衰减路径不仅能估计当前裂纹尺寸的剩余寿命,对于曲线上任意一点的剩余寿命都可以进行估算。由埋藏裂纹安全衰减路径仿真(图2)可知,其中有两条线,一条是埋藏裂纹的安全衰减路径,另一条是表面裂纹的安全衰减路径。对于同一条埋藏裂纹来看,其裂纹表征变化过程可以大致分为两个阶段:第1阶段是以埋藏裂纹进行发展,裂纹规则化后,按埋藏裂纹规则进行安全评价;第2阶段是表面裂纹或穿透裂纹阶段,在不断的加载情况下,埋藏裂纹将会向其他裂纹发展,成为表面裂纹或穿透裂纹,直到裂纹失效为止,这一阶段按表面裂纹规则进行安全评价。

埋藏裂纹第1阶段结束到第2阶段开始在评定图上(图2)是一个阶跃的过程。由于不同裂纹的规则化

和表征裂纹尺寸方法不一样,规则化后埋藏裂纹的深度 $a = h/2$,而规则化后的表面裂纹的深度 $a = h$,其中 h 是裂纹的实际深度;其次是因计算应力引起的裂纹深度和长度的尺寸方向裂纹尖端处应力强度因子所用的裂纹构形因子的计算方式不同。所以在R6评定图上形成了阶跃过程。

由图2所示,缺陷安全衰减路径的点都是离散的、不连续的,不便于数学分析。因此把安全区的所有评定点求出,采用Lagrange插值法,进行曲线拟合,分别求出埋藏裂纹第1阶段和第2阶段的安全衰减路径曲线 S 的函数表达式:

$$S = \begin{cases} S_1, \\ S_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, S_1 表示第1阶段埋藏裂纹的衰减路径的函数关系式, S_2 为第2阶段表面裂纹的衰减路径函数关系式。

缺陷安全衰减路径反映的是裂纹扩展情况在R6图上的表现情况,将安全衰减路径从起始点到失效点之间的距离,即反映的是裂纹的失效尺寸,将其定义为安全裕度 A 。安全裕度的引用是为了更好的描述剩余寿命,反映含裂纹缺陷的金属结构的安全程度,其计算公式为:

$$A = 1 - \frac{f(x)}{f_{\text{总}}} \quad (8)$$

式中, $f_{\text{总}}$ 为衰减路径在安全区域内的总长度, $f(x)$ 为衰减路径起点到评定点间的长度。安全裕度 $A=1$ 时,压力容器安全程度高;当 A 越来越小时,压力容器安全程度越来越低;当安全裕度 A 无限趋向于0或 $A=0$ 时,通常认为压力容器已失效。

3 剩余寿命的计算

3.1 权函数法

目前,求取应力强度因子 K 的方法很多,其中利用权函数来计算应力强度因子(见式(9)),能很好地解决残余应力强度因子的计算问题。权函数法是求解在任意载荷分布下,尤其是裂纹处的应力场分布很复杂的情况下,是最为便捷和准确的一种。

$$K = \int_0^a \sigma(x)m(a,x)dx \quad (9)$$

$$m(a,x) = \frac{H}{K} \frac{\partial U(a,x)}{\partial a} \quad (10)$$

式中: a 为裂纹长度; x 为裂纹面上的位置; $\sigma(x)$ 为裂纹体假设无裂纹时在原裂纹处的应力分布; $m(a,x)$ 为权函数; U 为对称载荷作用下裂纹面张开位移; H 为材料常数,在各向同性材料中, $H = E$ (平面应力)平面或 $H = E/(1-\nu^2)$ (平面应变); E 和 ν 分别弹性体的

弹性模量和泊松比。其中一般分布载荷展开成多项式为:

$$\sigma(x) = \sigma_0 \sum_{n=0}^n S_n x^n \quad (11)$$

式中, σ_0 为工作压力, S_n 为二次项系数。

鉴于权函数法高效灵活、方便实用的特点,许多学者对其进行了研究,提出了不同的权函数确定方法。典型方法主要有两种:一种是基于裂纹面张开位移的权函数法(以WXR权函数法为代表),另一种是通用权函数法^[10-12]。文中采用通用权函数法,通用权函数法直接假设权函数的一般特性,避开2维平面裂纹面上张开位移的复杂性,其表达式^[11]:

$$m(a, x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \sum_{j=1}^3 C_j (1 - \frac{x}{a})^{j/2} \quad (12)$$

式中: C_j 为待定参数, $j=1, 2, 3$ 。

埋藏裂纹中,根据上文提出的缺陷安全衰减路径和裂纹长度、深度几何关系变化模型,可以获得埋藏裂纹初始状态的评定点尺寸,第二阶段表面裂纹的初始评定点尺寸,失效临界尺寸,通过有限元分析,可分别获得三点的应力强度因子 K 及其应力分布状态 $\sigma(x)$, 将其带入式(9)~(12),可联立求解出待定参数 C_j 。即得此裂纹的应力强度因子 K 的函数表达式。

3.2 剩余寿命计算

随着埋藏裂纹的扩展, R6 评定图中评定点逐渐向 FAC 曲线靠近直至重合, 压力容器失效。为了确保压力容器的安全程度, 采用对 Paris 公式进行积分的方法求取剩余寿命, 则有

$$N = \int_{a_0}^N dN = \int_{a_0}^{a_N} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (13)$$

式中, a_0 、 a_N 表示裂纹的初始尺寸和裂纹的失效尺寸, N 表示裂纹从 a_0 尺寸扩展到 a_N 尺寸需要的循环次数, 即裂纹的剩余寿命。根据裂纹的长度和深度几何变化关系, 用分步法计算埋藏裂纹的剩余寿命:

1) 根据式(6), 计算裂纹从初始尺寸 c_0 、 a_0 扩展到下一尺寸 c_1 、 a_1 , 并用权函数方法求取当前时刻应力强度因子, 再求出当前时刻的应力强度因子幅 ΔK_1 ;

2) 利用 Paris 积分公式, 求取裂纹从初始尺寸 c_0 、 a_0 扩展到下一尺寸 c_1 、 a_1 所经历的循环次数 N_1 ;

3) 若裂纹的尺寸没有达到裂纹的失效尺寸, 则重复第 1)、2) 步骤, 依次求取下一尺寸的循环次数 N_2 、 N_3 、 $N_4 \dots$ 、 N_s , 直至裂纹失效;

4) 将前面求取的循环次数相加, 即为裂纹的最终剩余寿命 N ;

$$N = \sum_{i=1}^s N_i \quad (14)$$

式中, s 为重复次数, 由裂纹尺寸的变化量有关。若 s 的值越大, 则表示裂纹的分步越多, 那么求取的裂纹剩余寿命的精度也就越高, 同时计算量也越大; 相反, 若 s 的值较小, 则表示裂纹的分步较少, 误差较大。因此, 合理的尺寸变化量, 才能在保证精度的情况下减少计算量。

4 结 论

给出了关于压力容器含埋藏裂纹的安全裕度和剩余寿命的计算方法, 能够有效的表示压力容器的安全程度, 预测埋藏裂纹的剩余寿命。

1) 利用 Paris 公式的迭代处理, 当长度和深度变化量足够小时, 可得到关于埋藏裂纹的长度和深度几何关联变化模型, 并通过其变化模型在 R6 评定图上建立埋藏裂纹的安全衰减路径仿真图, 能够准确、有效地反应埋藏裂纹的扩展情况。基于裂纹的安全衰减路径轨迹可以在理论上给出裂纹缺陷在任何尺寸时对应的动态安全裕度, 反应压力容器的安全程度。

2) 运用裂纹扩展规律和安全衰减路径轨迹, 通过权函数和 Paris 分步积分的方法, 建立起含埋藏裂纹压力容器的剩余寿命模型。

参考文献:

- [1] Xu Chong, Long Wei, Tian Daqing, et al. The residual life prediction for pressure vessel crack defects[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, (8): 74-77. [徐崇, 龙伟, 田大庆, 等. 压力容器裂纹缺陷剩余寿命预测[J]. 机械设计与制造工程, 2014, (8): 74-77.]
- [2] Xu Lei, Long Wei, Lin Sijian. New method of residual life prediction for pressure vessel surface crack defects based on the crack failure path[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(28): 190-194. [徐磊, 龙伟, 林思建. 基于裂纹失效路径的压力容器剩余寿命预测新方法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(28): 190-194.]
- [3] Xu Zunping, Cheng Nanpu, Lei Binlong, et al. Safety assessment of surface pit in pen stock[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(8): 62-64. [徐尊平, 程南璞, 雷斌隆, 等. 压力钢管表面凹坑缺陷的安全评定[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 62-64.]
- [4] Long Wei, Song Enkui, Lin Sijian. Study on the residual life and the safety margin of pressure vessel based on the defect failure simulation path[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2012, 44(4): 204-208. [龙伟, 宋恩奎, 林思建. 基于缺陷失效仿真路径压力容器的安全裕度与剩余寿命研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(4): 204-208.]

- [5] Song Enkui, Long Wei, Lin Sijian. New method of the residual life prediction of pressure vessel defect[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2012, 49(6): 1275–1279. [宋恩奎, 龙伟, 林思建. 一种压力容器缺陷剩余寿命预测的新方法[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2012, 49(6): 1275–1279.]
- [6] Lin Sijian, Long Wei, Tian Daqing, et al. Non-discrete characterization model of residual strength of metal pressure pipeline with pitting corrosion[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2013, 45(6): 184–187. [林思建, 龙伟, 田大庆, 等. 含点蚀缺陷金属压力管道剩余强度的无缝表征模型[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, 45(6): 184–187.]
- [7] Chen M, Lu F, Wang R. Use of the failure assessment diagram to evaluate the safety of the reactor pressure vessel[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2015, 137(5): 051203.
- [8] Zhao Ruorong, Luo Xiyan, Ren Lulu, et al. Research on fatigue crack propagation behavior of GH4133B super alloy used in turbine disk of aeroengine[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(18): 55–65. [赵荣国, 罗希延, 任璐璐, 等. 航空发动机涡轮盘用GH4133B合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(18): 55–65.]
- [9] Newman Jr J C, Raju I S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1981, 15(1): 185–192.
- [10] Fan Junling, Chen Li, Chang Wenkui, et al. Research on stress intensity factors of cracked blades based on the weight function method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(15): 95–102. [樊俊铃, 陈莉, 常文魁, 等. 基于权函数法的含裂纹叶片的应力强度因子研究[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(15): 95–102.]
- [11] Jia Xu, Hu Xuteng, Song Yingdong. Comparative analysis of two kinds of weight function methods for solving the stress intensity factors[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2014(9): 7–10. [贾旭, 胡绪腾, 宋迎东. 两种求解应力强度因子权函数方法的对比分析[J]. *机械设计与制造*, 2014(9): 7–10.]
- [12] Wang Zhongchang, Luan Maotian, Yang Qing. Comparative analysis to non local theories based on different types of weighted functions[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(11): 1348–1351. [王忠昶, 栾茂田, 杨庆. 基于不同权函数的非局部理论对比分析[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(11): 1348–1351.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Long Wei, Yan Jiabing, Li Yanyan, et al. Study on residual life of pressure vessels with immersed cracks based on defect security attenuation path simulation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 239–243. [龙伟, 严佳兵, 李炎炎, 等. 基于缺陷安全衰减路径仿真的含埋藏裂纹压力容器剩余寿命研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 239–243.]