

大型储罐大角焊缝裂纹的可靠性分析

魏化中,何亚莹,游 锋,张占武

(武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205)

摘 要:以 100 000 立方米浮顶式大型储罐为例,采用基于应力-强度干涉模型的一次二阶矩法和基于 ANSYS 含裂纹平板的可靠性分析方法对大型储罐角焊缝裂纹进行了可靠性分析.首先基于应力-强度干涉模型,根据应力强度因子断裂判据,采用一次二阶矩法计算储罐角焊缝裂纹动态扩展的可靠度,计算得到的应力强度因子为 $354.4 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}$,可靠度为 93.32%.然后运用 ANSYS 软件计算含裂纹平板的可靠度,先是采用 1/4 节点奇异单元法,计算出裂纹尖端应力强度因子为 $376.46 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}$,再通过蒙特卡罗法来计算裂纹扩展的可靠性,得到可靠度为 82.36%.通过比较两种方法得到的结果,采用 ANSYS 有限元分析所得的可靠度低于基于应力-强度干涉理论计算得到的可靠度.从安全性角度出发,应选择可靠度低的分析结果来提供决策支撑.

关键词:大型储罐;可靠性分析;有限元分析;蒙特卡罗法;应力强度因子

中图分类号:TE821

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.02.013

0 引 言

储罐是储备原油、液体化工原料及其它产品的专用设备,具有高风险性,一旦失效,后果非常严重.目前所进行的大量理论分析均表明,储罐大角焊缝处是应力最大的局部区域之一,也是最危险的区域,这在多起事故中也有体现.如 1974 年 12 月日本水岛炼厂 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 油罐在搭脚焊缝处发生脆裂事故,1988 年 9 月湖北荆门炼油厂 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 油罐角焊缝出现破裂造成事故.发生事故的的根本原因在于,大角焊缝处应力高,材料为低合金高强度钢,内部缺陷易于扩展,造成脆性断裂破坏或低周期应力破坏.因此,在对储罐进行安全评定时,大角焊缝裂纹的可靠性分析显得极为重要.笔者分别采用基于应力-强度干涉模型的一次二阶矩法和基于 ANSYS 含裂纹平板的可靠性分析方法对大型储罐角焊缝裂纹的可靠性进行研究.

1 应力-强度干涉理论的可靠性分析

由概率断裂力学可知,构件是否失效取决于裂纹尺寸的大小及其扩展的速率.当构件中的裂纹尺寸达到临界值,将引起材料的失效.角焊缝裂纹尖端应力强度因子 K_I 低于临界应力强度因子

K_{ISCC} 时,裂纹不产生扩展;一旦超过 K_{ISCC} ,裂纹将可能扩展,影响储罐的安全运行^[1].从理论上讲,由于影响裂纹扩展的因素很多且具有随机性,但最终还是体现在应力强度因子 K_I 上.

应力强度因子 K_I 断裂判据为: $K_I \leq K_{IC}$ (材料断裂韧度).根据应力-强度干涉理论,由于 K_I 和 K_{IC} 都是呈分布状态,可以把应力强度因子 K_I 看作应力,把材料断裂韧度 K_{IC} 看作强度.假设 K_I 和 K_{IC} 均服从正态分布,在 $K_I < K_{IC}$ 时计算裂纹扩展的可靠度,可以为风险评估提供可靠性的数值依据^[2].

笔者根据某检测机构提供的数据,以 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 大型储罐为例,计算角焊缝裂纹扩展的可靠度.假设角焊缝处 I 型未穿透裂纹各参数均服从正态分布,见表 1.

表 1 裂纹各参数数字特征

Table 1 Numerical characteristics of the crack parameters

参数	裂纹半长度 a/mm	拉应力 P/MPa	断裂韧度 $K_{IC}/$ $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$
均值 μ	1	200	500
标准差 σ	0.2	20	50

尖端应力强度因子 K_I 的计算公式为:

收稿日期:2013-05-10

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划课题《特种设备结构健康监测与损伤诊断技术》的子专题《大型储罐基于风险的评估技术研究》(NO.2011BAK06B01-13)

作者简介:魏化中(1955-),男,湖南永州人,教授.研究方向:压力容器、压力管道、流体机械和搅拌设备的开发、新型高效过程装备及仿真技术.

$$K_I = YP \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式(1)中: Y 为几何因子,与载荷无关,而与几何变数(裂纹长度或位置、物体形状等)有关^[3]. 笔者所探讨的角焊缝裂纹可视为有限宽的长条板有中心裂纹,受到无穷远的均匀拉伸,记裂纹半长度为 a 、板宽为 h ,由于 $a \ll h$,故 $Y = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{h}\right)} = 1$,因此

$$K_I = P \sqrt{\pi a} = 200 \sqrt{\pi} = 354.4 \text{ (MPa} \cdot \text{mm}^{1/2})$$

由于

$$\beta = \frac{\mu}{\sigma} =$$

$$\frac{\mu_{K_{IC}} - \mu_P \sqrt{\pi \mu_a}}{\left[\sigma_{K_{IC}}^2 + (\sqrt{\pi \mu_a} \sigma_P)^2 + \left(\mu_P \sqrt{\frac{\pi}{\mu_a}} \sigma_a \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = 1.509 \quad (2)$$

式(2)中: μ_a 、 μ_P 、 $\mu_{K_{IC}}$ 分别为裂纹半长度、均匀拉应力、断裂韧度的均值; σ_a 、 σ_P 、 $\sigma_{K_{IC}}$ 分别为裂纹半长度、均匀拉应力、断裂韧度的标准差.

所以,可靠度 $R = \Phi(1.509) = 93.32\%$.

2 ANSYS 概率有限元的可靠性分析

在概率断裂力学中,对裂纹缺陷的评定主要是比较裂纹尖端应力强度因子 K_I 与材料断裂韧度 K_{IC} 的大小. 定义极限状态函数 $g(x) = K_{IC} - K_I$, 求含裂纹平板断裂的可靠性就是求 $g(x) > 0$ 的概率^[2]. ANSYS 可靠性分析常用的方法有响应面法、蒙特卡罗法(Monte - Carlo)等,本文采用的是 Monte - Carlo 法. 进行可靠性分析时,为了简化计算,建立三维含裂纹的平板模型来进行分析计算.

2.1 基本参数

为了与一次二阶矩法的计算结果进行比较,同样假设各参数均服从正态分布,基本参数见表2,平板裂纹试样如图1所示.

表2 平板裂纹试样参数

Table 2 Parameters of the plate crack					
长度	宽度	高度	半裂纹长度	弹性模量	泊松比
L/mm	W/mm	H/mm	a/mm	E/MPa	ν
10	10	0.8	1	2.06×10^5	0.3

2.2 有限元模型建立

由于模型具有对称性,选取 1/4 建立有限元模型^[4]. 先建立裂纹前沿节点,再通过循环命令将这些节点复制到裂纹前沿其它节点的周围,以便建立单元,如图2所示. 在模型底侧(除裂纹外)和左侧施加对称约束条件,设置其它所有节点的 Z

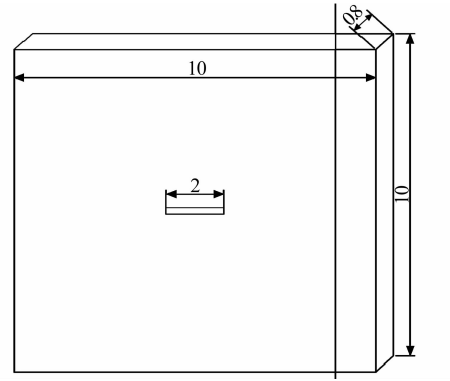


图1 平板裂纹试样图

Fig. 1 Sample of the plate crack

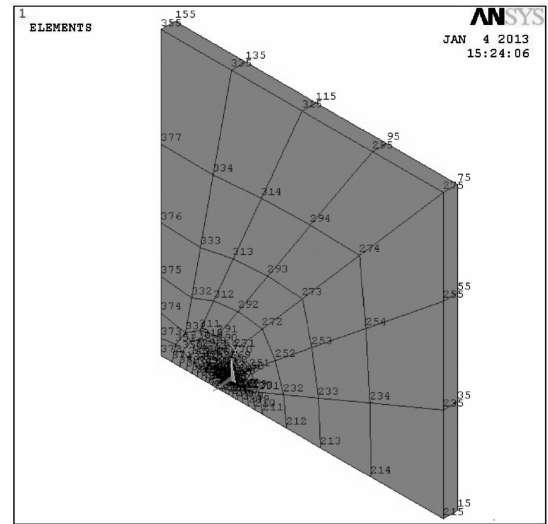


图2 1/4 平板模型单元图

Fig. 2 1/4 plane plate model element

方向自由度 U_Z 被约束来实现平面应变条件,上表面施加均匀拉应力,然后进行计算求解.

2.3 裂纹尖端应力强度因子的计算

从 ANSYS 的计算结果中提取裂纹的应力强度因子前,先要定义一条路径. 对于只有一半裂纹的模型,依次选取节点 I 、节点 J 、节点 K 定义路径,且节点 I 必须在裂纹的尖端^[5],如图3所示(图中 u 、 v 为节点局部坐标系中的位移分量; r 、 θ 分别为局部柱坐标系中的极坐标半径和极角).

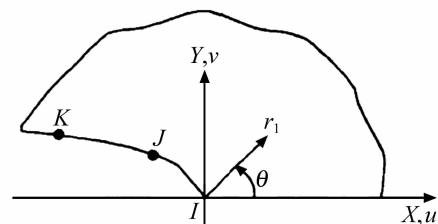


图3 路径的定义

Fig. 3 Definition of the path

进入 ANSYS 后处理阶段,首先在裂纹尖端处定义局部坐标系 X 、 Y ,接着以裂纹尖端 I 为起始点,再选取裂纹其余两点 J 、 K ,设置成一条路

径.通过 ANSYS 节点计算功能进行求解,得到的应力强度因子为 $376.46 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$.

2.4 可靠性分析

将 $g(x)$ 作为目标函数,取材料断裂韧度 K_{IC} 、拉应力 P 、裂纹半长度 a 自变量,运用 ANSYS 中的 Prob Design 模块进行可靠性分析.

2.4.1 模拟次数的确定 利用 Monte-Carlo 法进行可靠性分析,抽样次数直接影响计算精度.因此,合理的抽样次数对确保计算精度至关重要.在对随机变量进行 1 000 次抽样时,输出变量 $W(K_{IC}, P, a)$ 的样本均值收敛带宽越来越窄且趋于稳定,如图 4 所示.这表明模拟的次数足以反映样本空间的特性,所得的计算结果能够满足计算精度要求.

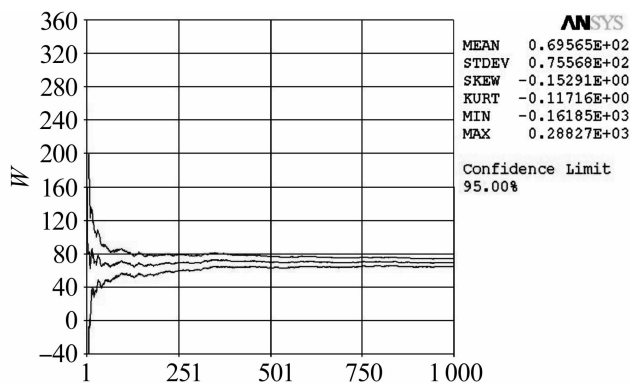


图 4 W 样本均值图

Fig. 4 Mean value of the sample W

图 5、图 6 分别为随机变量 P 和 K_{IC} 的柱状图.由图 5 和图 6 可以看出:所得概率函数曲线与各随机输入变量分布一致,与柱状图吻合较好,不存在较大的间隙和跳跃,且曲线比较光滑.进一步表明,取 1 000 次抽样次数进行可靠性分析满足精度要求.

2.4.2 结果分析 从 ANSYS 概率分析结果中可以看出,在置信度为 95% 的情形下, $g(x) \leq 0$ 的概率为 17.64%,即说明可靠度为 82.36%.图 7 为随机变量 W 的累积分布函数,从图 7 中可

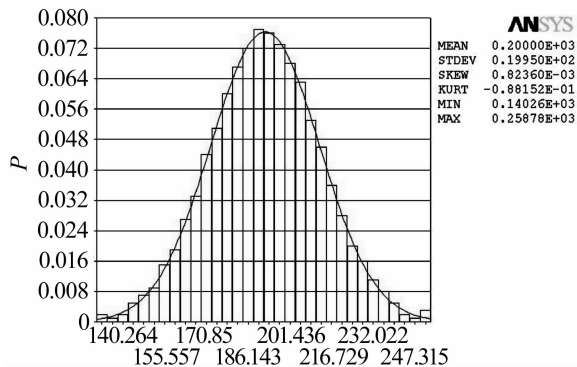


图 5 P 分布的柱状图

Fig. 5 Bar chart of the P distribution

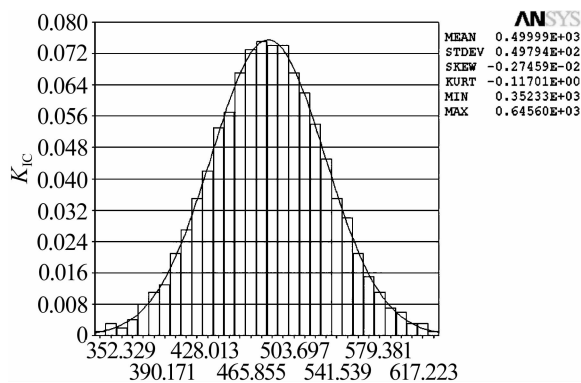


图 6 K_{IC} 分布的柱状图

Fig. 6 Bar chart of the K_{IC} distribution

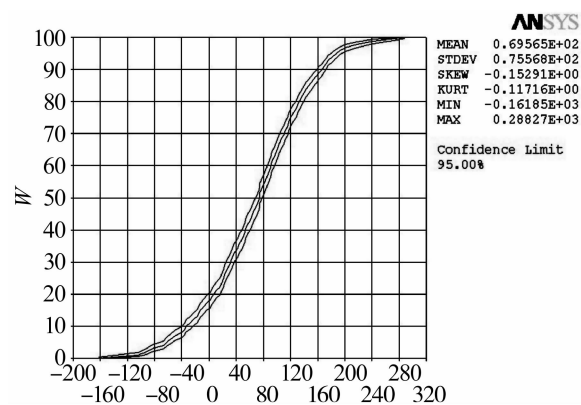


图 7 W 的累积分布函数

Fig. 7 Cumulative distribution function of the random variable W

以看出,大于 0 的分布占主要空间,其概率分布与直接提取的计算结果相符.

敏感性分析结果如图 8 所示,可以看出材料断裂韧度 K_{IC} 和拉应力 P 是影响裂纹扩展断裂的主要因素.从图 8 中可以看出:裂纹扩展的可靠度对 K_{IC} 的灵敏度为正时,表明随着 K_{IC} 增加,可靠性增大;拉应力 P 和裂纹半长度 a 的灵敏度为负时,表明随着拉应力 P 和裂纹半长度 a 增加,可靠度降低,并且 P 比 a 更为灵敏.

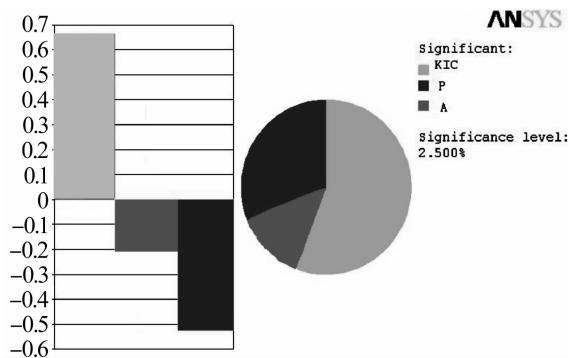


图 8 敏感性分析示意图

Fig. 8 Sensitivity analysis

从公式 $K_I = YP \sqrt{\pi a}$ 中可以看出:拉应力 P 和裂纹长度 a 对 K_I 是单调递增函数,并且拉应力

P 是一次方,而裂纹长度为 $1/2$ 次方,所以裂纹半长度 a 的影响比拉应力 P 的影响小.从极限状态函数 $g(x) = K_{IC} - K_I$ 中可以看出:当 K_I 增大时,极限状态函数 $g(x) > 0$ 概率减小,则可靠度减小;当 K_{IC} 增大时,极限状态函数 $g(x) > 0$ 概率增大,则可靠度增大.

3 结 语

a. 笔者根据应力强度因子 K_I 断裂判据 $K_I \leq K_{IC}$,首先基于应力-强度干涉模型,采用一次二阶矩法计算储罐角焊缝裂纹动态扩展的可靠度,根据公式计算得到的应力强度因子为 $354.4 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$,可靠度为 93.32% .然后探讨运用 ANSYS 软件计算含裂纹平板的可靠度,先是采用 $1/4$ 节点奇异单元法,计算出裂纹尖端应力强度因子为 $376.46 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$,再通过 Monte-Carlo 法来计算裂纹扩展的可靠性,得到可靠度为 82.36% .通过比较两种方法得到的结果,采用 ANSYS 有限元分析所得的可靠度低于基于应力-强度干涉理论计算得到的可靠度.

b. 根据敏感性分析结果得到材料断裂韧性 K_{IC} 、拉应力 P 和裂纹半长度 a 为影响裂纹扩展的主要因素^[5],因此必须严格控制这些参数,以确保大型储罐在运行中的安全.

c. 在对裂纹动态扩展的可靠性研究中,各个参数的标准差有待探讨.由于建立大型储罐含三维曲面裂纹的可靠性分析模型较复杂,单元和节点较多,笔者建立了三维含裂纹平板的简化模型,再用 ANSYS 对裂纹的动态扩展进行可靠性分析.两种方法所得到的分析结果,其精度还需要具体的实验测量数据进行验证.

致 谢

感谢中国特种设备检测研究院对本研究的大力支持.

参考文献:

- [1] SAWYER J P, RAO S S. Strength-based reliability and fracture assessment of fuzzy mechanical and structural system[J]. AIAA Journal, 1999, 37(1): 84-92.
- [2] 林国庆,王茂廷,时黛.基于 ANSYS 中 Monte-Carlo 法对带局部夹套卧式容器的可靠性分析[J]. 轻工机械, 2012, 30(1): 99-102.
LIN Guo-qing, WANG Mao-ting, SHI Dai. Reliability analysis of horizontal container with local jacket based on Monte-Carlo method in ANSYS software [J]. Light Industry Machinery, 2012, 30(1): 99-102. (in Chinese)
- [3] 陆毅中. 工程断裂力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 33-39.
- [4] WANG Yan-xia, LIU Yong-qi, SHI Hai-yan. The reliability analysis for pistons on fracture mechanics [C]//Proceedings of ICCMS 2010 International Conference on Computer Modeling and Simulation, 22-24 January 2010, Sanya, China. Los Alamitos, CA: the IEEE Computer Society, 2010, 4: 173-177.
- [5] 杨益清,董金善,徐新军,等.运用 ANSYS 的含裂纹平板试件的可靠性分析方法研究[J]. 现代制造工程, 2010(12): 54-57.
YANG Yi-qing, DONG Jin-shan, XU Xin-jun, et al. The method research of reliable analysis for the plate specimen containing the crack based on ANSYS[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(12): 54-57. (in Chinese)

Reliability analysis of large fillet-weld crack of large-scale storage tank

WEI Hua-zhong, HE Ya-ying, YOU Feng, ZHANG Zhan-wu

(School of Mechanical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: Taking the large storage tank of 100,000 cubic meters with floating roof as a case, the first order second moment (FOSM) method on the model of stress-strength interference and the reliability analysis method of the crack plate on ANSYS were respectively used to analyze the reliability of the large fillet-weld crack of the large-scale storage tank. First, using the fracture criterion of the stress intensity factor based on the model of stress-strength interference, the reliability degree of dynamic growth of the large fillet-weld crack of the large-scale tank was calculated through the FOSM method. In this way, the values of the stress intensity factor and the reliability degree are $354.4 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}$ and 93.32%. Then, ANSYS software was used to calculate the reliability degree of the crack plate. The value of the stress intensity factor of the crack tip is $376.46 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}$ using 1/4-point displacement method. The Monte-Carlo method is used to calculate the reliability of crack growth, and the value of the reliability degree is 82.36%. By comparing the results from the two methods, the value of the reliability by ANSYS analysis is lower than that by the stress-strength interference theory. As far as safety is concerned, the result of lower reliability degree should be selected as decision support.

Key words: large-scale storage tank; reliability analysis; finite element analysis; Monte-Carlo method; stress intensity factor

本文编辑: 苗 变