DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.02.020

厚壁筒内表面平行双轴向裂纹间影响规律研究*

秦媛媛1,秦晓峰1*,陈占春1,2

(1.太原理工大学 机械与运载工程学院,山西 太原 030024;

2. 山西省虚拟仿真实验教学中心,山西太原 030024)

摘要:厚壁筒类结构在服役过程中,内壁产生的裂纹对强度和安全使用具有重要影响,针对这一问题,对厚壁筒内表面平行双轴向 裂纹间相互作用影响规律进行了研究。首先,在基于理论公式分析轴向单裂纹应力强度因子影响因素的基础上,定义了表征双轴 向裂纹间相互影响和作用的相互作用影响因子λ;然后,采用有限元方法,对不同裂纹间夹角、不同裂纹深度比以及不同厚壁筒外 径情况下,双轴向裂纹尖端应力强度因子进行了计算;最后,通过计算结果,分析了不同因素改变时,对厚壁筒内表面平行双轴向裂 纹之间相互作用及其裂纹尖端应力强度因子的影响。研究结果表明:双轴向裂纹之间相互影响的闭合效应和张开效应受裂纹间夹 角的影响,且存在一个临界值;当双轴向裂纹夹角大于临界值时,随着夹角值、裂纹长度与壁厚比和直径与壁厚比的增加,张开效应 增强;反之则相反。

文章编号:1001-4551(2022)02-0276-05

Factors influence on the interference of parallel biaxial cracks in inner surface of thick-walled pipe

QIN Yuan-yuan¹, QIN Xiao-feng¹, CHEN Zhan-chun^{1,2}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;2. Shanxi Province Virtual Simulation Experimental Teaching Center, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the cracks on the inner wall of the thick-walled tube structure have an important influence on the strength and safe use during the service process, the mutual influence law of the parallel biaxial cracks on the inner surface of the thick-walled tube was studied. An interaction impact factor λ was defined based on analysis of theoretical formula of stress intensity factor of thick wall pipe single axial crack. According to finite element method, stress intensity factors of double axial surface cracks in thick-walled cylinders were calculated in different situation of angles, ratio of crack length to wall thickness and ratio of our diameter to wall thickness. The variations of different influencing factors on the interaction between parallel biaxial cracks on the inner surface of thick-walled cylinder and the stress intensity factor at the crack tip were analyzed through the calculation results. The results indicate that there is a critical angle determining the closure and opening effect between the biaxial cracks. When the angles between biaxial cracks are larger than the critical value, the opening effect can be strengthened with the increase of angles value, ratio of crack length to wall thickness and ratio of our diameter to wall thickness, and vice versa.

Key words: thick-walled pipe; stress intensity factor; biaxial cracks; interaction impact factor

收稿日期:2021-07-21

基金项目:山西省自然科学基金青年基金资助项目(201901D211012);山西省回国留学人员科研教研资助项目(HGKY2019020;2021048)

作者简介:秦媛媛(1993-),女,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事断裂力学、高分子材料模拟及力学性能仿真方面的研究。E-mail:yuan816521 @126.com

通信联系人:秦晓峰,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:qinxiaofeng@tyut.edu.cn

0 引 言

厚壁筒类结构广泛应用于石油或天然气行业的压 缩气体储存瓶、高压输送管道及枪炮管中^[14]。

含有裂纹缺陷的厚壁筒在服役情况下受内压作用 会产生扩展进而引发泄漏和破裂,轻则影响设备正常运 行,重则引发重大安全事故。因此,厚壁筒结构零部件的 安全使用成为保障含此类零部件设备正常运行的关键。

合理评估管道内裂纹的扩展风险,是含此类零部件设备运行安全评估和维护的关键^[5,6]。

应力强度因子是表征裂纹尖端特性的关键力学参数之一。通常在裂纹萌生后,研究人员通过对比尖端 应力强度因子与材料裂纹扩展门槛值,判断裂纹扩展 风险^[7,8]。目前,主要基于裂纹尖端J积分或应力强度 因子大小,结合断裂力学准则评估含裂纹构件的安全 性和寿命^[9-11]。

已有大量的文献表明,研究人员对厚壁筒内表面 裂纹相关问题进行了研究。ESKANDARI H^[12]利用有 限元法对受内部压力和转速的包含纵向半椭圆形内表 面缺陷的厚壁功能梯度材料圆柱体进行了三维分析。 MERIEM-BENZIANE M 等人^[13]利用三维有限元方法, 研究了内压作用下沿裂纹前沿的应力强度因子对临界 区圆柱体裂纹的影响。GIRASE K G 等人^[14]利用改进 的虚拟裂纹闭合技术来求解多裂纹厚壁圆柱体的应力 强度因子,采用 ANSYS 有限元分析软件计算了裂纹尖 端节点力和节点位移。

同时,大量的方法(如边界元法、应变能释放率 法、无网格法和有限元法等)被用于裂纹相关问题的 研究,并取得了不少成果^[15]。但此类研究大都集中于 内壁单裂纹方面且主要针对裂纹尖端应力强度因子的 计算,对于多裂纹及其间相互作用和影响的研究较少。

针对目前裂纹相关研究对厚壁筒安全使用的重要 性,笔者以厚壁筒内表面双轴向裂纹为研究对象,在建 立含双轴向裂纹厚壁筒二维模型的基础上,结合定义 的裂纹间相互作用影响因子,分析影响双轴向裂纹之 间相互作用的因素及其对裂纹尖端应力强度因子的影 响规律。

1 厚壁筒内表面双轴向裂纹尖端应 力强度因子 K₁

1.1 验证和分析

当厚壁筒内的轴向裂纹沿轴向方向贯穿,径向深 入时,可将其简化为平面应变状态。 根据平面应变状态下厚壁筒内表面轴向裂纹模型,笔者对内径 *R*₁、外径 *R*₀、壁厚 *t* 的含裂纹厚壁筒进行了分析,得到平面应变状态下厚壁筒内表面轴向裂纹二维简化模型。

平面应变状态下厚壁筒内表面轴向裂纹模型,如 图1所示。



图 1 平面应变状态下厚壁筒内表面轴向裂纹模型

基于 ANSYS 软件, 笔者根据图 1 简化几何模型, 建 立了平面应变情况下含单轴向裂纹厚壁筒的有限元模型。 空心圆柱内表面轴向裂纹有限元模型如图 2 所示。



图 2 空心圆柱内表面轴向裂纹有限元模型

为了模拟裂纹尖端的应力奇异性,笔者通过将裂 纹前沿区域的中节点移动到距离尖端 1/4 点位置,准 确反映裂纹尖端的奇异应力场,为确保结果准确性,单 元尺寸应足够小。

通常情况下,裂纹尖端周围的第一圈线性单元半径应小于裂纹长度 a 的 1/8,裂纹尖端周围的单元数 应大于 12。

裂纹尖端奇异单元如图 2(c)所示。笔者在裂纹 尖端周围设置了 12 个单元,单元径向长度为裂纹深度 的 1/20。

厚壁筒内表面单轴向裂纹的参数如表1所示。

表1 厚壁筒内表面单轴向裂纹的参数

材料参数	几何尺寸	外载荷
$E = 2.06 \times 10^5$ MPa	$R_0 = 15 \text{ mm} 20 \text{ mm}; R_1 = 10 \text{ mm}$	$D = 1 MD_{2}$
$\mu = 0.3$	$a/(R_0 - R_1) = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$	r = 1 Mra

为了验证通过有限元法得到的应力强度因子结果的可靠性,参照表1所示参数,笔者将采用有限元法和 文献^{[16]413414}中通过计算轴向内表面裂纹应力强度因 子,得到的平面应变内压载荷下厚壁筒内表面轴向裂 纹的理论模型,计算尖端应力强度因子 K₁,进行对比:

$$K_{\rm I} = \frac{2.24 W^2}{W^2 - 1} P \ \sqrt{\pi a} f(a/t, W) \tag{1}$$

式中:W—壁厚比,mm;f(a/t,W)—几何函数;a—裂纹 深度,mm;t—壁厚,mm; R_0 —厚壁筒外径,mm; R_1 —内 径,mm。

其中:

$$W = R_0 / R_1 \tag{2}$$

$$t = R_0 - R_1 \tag{3}$$

参照文献[16]414,笔者得到了平面应变状态下厚壁 筒内表面轴向裂纹的几何函数 f(a/t,W)值,如表2 所示。

a/t	$W = R_0 / R_1$		
	1.5	2.0	
0.2	1.03	0.93	
0.3	1.14	0.96	
0.4	1.27	1.00	
0.5	1.42	1.05	
0.6	1.56	1.11	

表 2 平面应变状态下厚壁筒内表面轴向裂纹的几何函数

采用有限元法和理论模型计算得到的平面应变载 荷下厚壁筒内表面轴向裂纹,在不同 a/t, $W = R_0/R_1$ 的 K_1 值如表 3 所示。

表 3 理论模型计算的 K_{I} 与 FEM 计算的 3 次加载 K_{I} 的比较

a/t	<i>W</i> = 1.5		W = 2		<i>W</i> = 2.5	
	K _{I-Theory}	$K_{\text{I-FEM}}$	$K_{ m I-Theory}$	$K_{\text{I-FEM}}$	$K_{ m I-Theory}$	$K_{\text{I-FEM}}$
0.2	7.36	7.45	6.96	6.95	6.88	6.90
0.3	9.98	10.03	8.80	8.75	8.32	8.35
0.4	12.84	12.87	10.59	10.52	9.73	9.74
0.5	16.05	16.04	12.43	12.37	11.13	11.19
0.6	19.31	19.67	14.39	14.40	12.76	12.83

由表3可知,有限元法计算的应力强度因子与理 论计算结果的误差小于2%。

1.2 双轴向裂纹间的相互作用分析

根据厚壁筒单轴向裂纹理论模型的分析和现有文 献[16]415-416的研究可知,裂纹的相对位置对裂纹 尖端应力强度因子会产生影响。

厚壁筒内表面双轴向裂纹模型如图3所示。



通过分析厚壁筒双轴向裂纹的特征可知,厚壁筒内 表面双轴向裂纹间相对位置会影响其应力强度因子。

此外,厚壁筒内表面双轴向裂纹之间的相互作用 和影响对平面应变内压作用下厚壁筒的失效起作用。

为了分析裂纹存在时裂纹间相互作用和影响,笔 者提出了相互作用影响因子参数λ,并且定义相互作 用影响因子表达式:

$$\lambda = \frac{K_{\rm I}}{K_{\rm 10}} - 1 \tag{4}$$

式中:K₁—厚壁筒内表面双轴向裂纹应力强度因子; K₁₀—同等尺寸厚壁筒含同等尺寸单裂纹时单轴向裂 纹应力强度因子。

当 λ >0 时,由于相邻裂纹之间相互作用的干扰, 裂纹扩展效应会加速传播;

当 λ <0 时,裂纹间具有闭合效应,能够有效减缓 裂纹扩展。

2 双轴向裂纹相互作用影响因素分析

分析轴向裂纹应力强度因子可知,裂纹间的相对 位置对裂纹应力强度因子产生作用。

因此,笔者通过有限元法分析内表面双轴向裂纹 夹角 $\theta = [30^{\circ},60^{\circ},90^{\circ},120^{\circ},150^{\circ},180^{\circ}]$ 、裂纹深度比 a/t = [0.2,0.3,0.4,0.5,0.6]和管道外径 $R_0 = [15$ mm,20 mm]等因素,对相互作用影响因子 λ 的影响。

厚壁筒内表面双轴向裂纹夹角 θ 对相互作用影响 因子 λ 的影响,如图 4 所示。

由图 4(a,b)可以看出:裂纹间相互作用影响因子 λ 随着裂纹间夹角的增加而增加;

当裂纹间夹角 $\theta < 110°$ 左右时, $\lambda < 0$,会对应力强 度因子值产生闭合作用效应,在一定程度上会减缓双 轴向裂纹的扩展;

当夹角 θ>110°左右时,λ>0,应力强度因子值会 产生张开作用效应,在一定程度上会加速双轴向裂纹





的传播。

此外,夹角 θ 对双轴向裂纹应力强度因子的闭合 作用效应会随着厚壁筒壁厚的增加而减弱。

在不同管径下,厚壁筒内表面双轴向裂纹深度比 *a/t* 对相互作用影响因子 λ 的影响,如图 5 所示。



由图 5(a,b)可以看出:当双轴向裂纹间夹角 θ < 110°左右时,相互作用影响因子 λ 随着 a/t 的增加而 减小:

当双轴向裂纹间夹角 $\theta > 110°$ 左右时,相互作用 影响因子 λ 随着a/t的增加而增加;

当双轴向裂纹间夹角 $\theta < 110°$ 左右时,相互作用 影响因子 λ 随着 a/t的增加而减小。

此外,厚壁筒壁厚的增加可以加强双轴向裂纹间 的相互作用,包括当夹角 θ 小于或大于临界值时的正 负效应。

厚壁筒不同管道外径 R_0 对相互作用影响因子 λ 的影响, 如图 6 所示。



图 6 不同 a/t 值下 λ 随 R_0/R_1 的变化曲线

图 6 结果显示: 当 $\theta < 110^{\circ}$ 且是定值、 $R_1 = 10 \text{ mm}$ 时, $\lambda < 0$,且随着厚壁筒外径的增加而逐渐减小;

如果 $\theta > 110°$ 且是定值, $\lambda > 0$ 且随着厚壁筒外径的增加而逐渐增加。

通过比较图 6(a,b)发现:θ 差的绝对值减去轴向 双裂纹^[17]夹角的临界值和厚壁筒外径的差越大,厚壁 筒外径对裂纹间相互作用影响因子 λ 的影响更为 明显。

3 结束语

笔者给出了在内压作用下厚壁筒内表面双轴向裂 纹应力强度因子(断裂力学参数之一)的计算结果。 笔者在单轴向裂纹应力强度因子公式的基础上, 定义了双轴向裂纹相互作用影响因子,确定了影响两 个平行双轴向裂纹应力强度因子的因素,采用有限元 法,分析了不同相对位置参数影响双轴向裂纹之间相 互作用的因素;根据有限元结果,分析了不同位置参数 对相互作用影响因子的变化规律。

研究结果表明:

(1)厚壁筒双轴向裂纹相互作用影响因子 λ 的变化存在一个临界值,约 110°。在临界值以下,由于双轴向裂纹间相互作用影响因子小于零,从而产生闭合效应;如果双轴向裂纹间的裂纹夹角大于临界值,相互作用影响因子大于零,两裂纹之间的相互作用会产生张开效应;

(2)当平行双轴向裂纹内径确定且裂纹间夹角大 于临界值时,随着平行双轴向裂纹之间的夹角减小, *a/t*和 *R*₀/*R*₁ 增大,闭合效应增强;随着双轴向裂纹间 夹角的增大,张开效应逐渐增强,而随着双轴向裂纹间 夹角小于临界值时,*a/t* 和 *R*₀/*R*₁ 均小于临界值。

在下一阶段,笔者将采用有限元软件 ANSYS,进 一步研究含径向多裂纹管道裂纹尖端应力强度因子的 理论求解问题,以及分析不同影响因素对径向多裂纹 相互作用影响的重要度。

参考文献(References):

- LEI X, NIU J, ZHANG J, et al. Failure analysis of weld cracking in a thick-walled 2. 25 Cr-1Mo steel pressure vessel
 [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23 (4):1231-1239.
- [2] NAGLER J. Parametric examination including brief survey of composite and homogenous closed ended cylindrical pressure vessels[J]. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2014, 9:136-160.
- [3] WANG X, LAMBERT S B. Stress intensity factors and weight functions for longitudinal semielliptical surface cracks in thin pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1996, 65(1):75-87.
- [4] KAPP J A. Strength-Toughness Requirements for Thick-Walled High Pressure Vessels [R]. Army Armament Research Development and Engineering Center Watervliet NY Benet Labs, 1992.
- [5] LI C, WENG G J. Dynamic stress intensity factor of a cylindrical interface crack with a functionally graded interlayer
 [J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(6): 325-333.

- [6] HUHN S, KIM J M, CHANG Y S, et al. Elastic-plastic fracture mechanics assessment for steam generator tubes with through-wall cracks[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2007, 30(2):131-142.
- [7] CLARK G, DE MORTON M E. Multiple cracking in thickwalled pressure vessels[J]. International Journal of Fracture, 1979, 15(1): R17-R20.
- [8] ALTENBACH H, LVOV G I, NAUMENKO K, et al. Consideration of damage in the analysis of autofrettage of thickwalled pressure vessels [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(20): 3585-3593.
- [9] KIM Y J, KIM J S, LEE Y Z, et al. Non-linear fracture mechanics analyses of part circumferential surface cracked pipes [J]. International Journal of Fracture, 2002, 116 (4):347-375.
- [10] LABBE F. Three-term asymptotic stress field expansion for analysis of surface cracked elbows in nuclear pressure vessels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16(2):220-223.
- [11] JONES I S, ROTHWELL G. Reference stress intensity factors with application to weight functions for internal circumferential cracks in cylinders [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(4):435-454.
- [12] ESKANDARIH. Three-dimensional investigations of stress intensity factors in a rotating thick-walled FGM cylinder
 [J]. Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering, 2016, 10(2):105-113.
- [13] MERIEM-BENZIANE M, IBRAHIM G, HAMOU Z, et al. Stress intensity factor investigation of critical surface crack in a cylinder[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2015, 1(1-2):36-42.
- [14] GIRASE K G, PATIL N K, SHINDE D, et al. Stress intensity factors for multiple cracks in thick-walled cylinder
 [J]. International Journal of Scientific World, 2015, 3
 (2):207-215.
- [15] ZHAO W, NEWMAN JR J C, SUTTON M A, et al. Stress intensity factors for surface cracks at a hole by a three-dimensional weight function method with s-tresses from the finite element method [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1998, 21(2):229-239.
- [16] 中国航空研究院. 应力强度因子手册-增订版[M]. 北 京:科学出版社,1993.
- [17] 韩 冰,朱 宁.加氢反应器横向裂纹的现场修复[J]. 压力容器,2020,37(11):65-69.

本文引用格式:

QIN Yuan-yuan, QIN Xiao-feng, CHEN Zhan-chun. Factors influence on the interference of parallel biaxial cracks in inner surface of thick-walled pipe[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022,39(2):276-280. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

[[]编辑:李 辉]

秦媛媛,秦晓峰,陈占春.厚壁筒内表面平行双轴向裂纹间影响规律研究[J].机电工程,2022,39(2):276-280.