Integrity & Reliability

文章编号:1000-8241(2019)02-0130-07

## 压力容器内外壁轴向双裂纹相互作用

#### 谢芳' 刘德俊' 杨正伟'

1. 火箭军工程大学基础部; 2. 火箭军工程大学导弹学院

摘要:压力容器在制造过程、疲劳与复杂应力状态下会产生裂纹,这些裂纹的存在将影响到容器的 安全使用,有必要对容器内外壁同时存在轴向双内外裂纹相互作用对应力强度因子的影响进行深 入研究。利用 ANSYS、FRANC 3D 有限元软件建立含内外壁轴向裂纹的柱形压力容器模型,分析 不同裂纹深长比的内外裂纹在静、动态下的相互作用对应力强度因子的影响,拟合得到不同裂纹深 长比下名义应力强度因子的变化曲线,发现裂纹相互作用对深长比小的初始裂纹的扩展有促进作 用,而对深长比大的初始裂纹的扩展则有抑制作用。研究结果对于不同深长比多裂纹相互作用下 的裂纹扩展机理及多裂纹断裂失效评定问题的研究具有借鉴作用。(图 7,参 22) 关键词:内外裂纹;应力强度因子;ANSYS,FRANC 3D;相互作用 **中图分类号:TE832 文献标识码:**A DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.02.002

# The interaction between axial double cracks in the inner and outer walls of pressure vessels

#### XIE Fang<sup>1</sup>, LIU Dejun<sup>1</sup>, YANG Zhengwei<sup>2</sup>

1. Department of Basic, Rocket Force University of Engineering; 2. Missile Institute, Rocket Force University of Engineering

Abstract: Cracks are usually generated when a pressure vessel is being manufactured or in the states of fatigue and complex stress, and the existence of these cracks impacts the safe operation of these vessels. In this paper, the influence of the interaction between the axial double inner and outer cracks in the inner and outer walls of the pressure vessel on the stress intensity factor were studied deeply. Firstly, the cylindrical pressure vessel model with axial cracks in the inner and outer walls was established by finite element software FRANC 3D and ANSYS. Then, the influence of the interaction between the inner and outer cracks with different depth-to-length ratios under static and dynamic conditions on the stress intensity factors was analyzed. Finally, the variation curve of the nominal stress intensity factor for different crack depth-to-length ratios was obtained by means of fitting. It is indicated that the interaction between cracks promotes the propagation of the cracks with low depth-to-length ratio, but inhibits that of initial cracks with high depth-to-length ratio. The research results can be used as the reference for studying the propagation mechanisms under the interaction of multiple cracks with different depth-to-length ratios and evaluating multi-crack fracture failure. (7 Figures, 22 Reference)

Key words: inner and outer cracks, stress intensity factor, ANSYS, FRANC 3D, interaction

在含缺陷的压力容器和管道检测中,应力强度因 子是评判裂纹扩展和预测裂纹失效的一项重要断裂参 数<sup>[1-5]</sup>。应力强度因子是线弹性阶段对含缺陷机构完 整性评估的主要参照指标,其与裂纹面应力和裂纹尺 寸的方根呈比例关系<sup>[6-8]</sup>。同时,裂纹面周边的几何形 貌也会对强度因子造成影响。如当裂纹临近另一条裂 纹时,两者之间的相互作用会影响裂尖强度因子,而相 互作用的影响程度(名义强度因子)则通过应力强度因 子比值加以定义<sup>(9-11]</sup>。Awang<sup>[12]</sup>研究了在拉伸载荷时 共线椭圆裂纹相互作用下应力强度因子的分布规律, 计算结果表明:名义强度因子与裂纹形状和相对位置 有关:Chai 等<sup>[13]</sup>利用边界元法对压力容器内壁共面裂 纹的相互作用进行探究,发现裂纹间距对名义因子起 主导作用:Berer 等<sup>[14]</sup>利用有限元法分析压缩载荷下强 度因子随裂纹形貌的变化规律,结果表明:名义强度因 子是裂纹长度、深度及裂纹间距的函数。根据适用性

130 网络出版时间: 2018-07-06T14:07:54

网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20180705.1845.006.html

准则,多裂纹的应力强度因子通常将裂纹合并以单裂 纹形式进行计算。这些裂纹合并准则在特定工程领域 中通过简化的方式得以应用,GB/T 19624-2004《在 用含缺陷压力容器安全评定》要求:当两条共面椭圆裂 纹间距在规定的临界值范围内时,综合各条裂纹长度 与深度,可以简化为单椭圆裂纹处理。而裂纹尖端应 力强度因子分布会随着多裂纹的相互影响而改变,可 能单裂纹强度因子最小的点在多裂纹的作用下对材料 的断裂行为产生重要影响。为此,精确评估多裂纹尖 端应力强度因子对工程应用非常重要<sup>[15-18]</sup>。

以下在验证有限元计算可靠性的基础上,建立柱 形压力容器有限元模型,探究内外壁双裂纹在相互作 用影响下裂纹深长比和裂纹扩展两个方面名义应力强 度因子的变化规律,从而为压力容器缺陷完整性评价 提供理论指导。

## 1 应力强度因子理论推导

根据线弹性断裂力学相关知识,结构中裂纹尖端 应力场、应变场与应力强度因子存在以下关系<sup>[19]</sup>:

$$u = \frac{K_1}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2m-1)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_1}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2m+3)\sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2} \right] + o(r) \quad (1)$$

$$v = \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2m+1)\sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2m+3)\cos\frac{\theta}{2} + \cos\frac{3\theta}{2} \right] + o(r) \quad (2)$$

$$\omega = \frac{2K_{\rm III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} + o(r) \tag{3}$$

式中: u、v、o 分别为裂纹尖端局部坐标的位移, mm; r、o 分别为裂纹尖端的极坐标, mm; K<sub>1</sub>、K<sub>11</sub>、K<sub>11</sub>分 别为张开型、滑移型、撕裂型裂纹的应力强度因子, MPa·mm<sup>1/2</sup>; G 为材料的切向模量, MPa; m 为与泊松 比相关的常系数; o 为计算式高阶项。

当 θ=±180° 时,同时忽略高阶项,可以得到裂纹 面位移与应力强度因子的关系式:

$$u = \frac{K_{\rm I}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \,(1+m) \tag{4}$$

$$v = \frac{K_{\rm II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left(1 + m\right) \tag{5}$$

完整性与可靠

$$\omega = \frac{2K_{\rm III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \tag{6}$$

由于工程中由裂纹引起的结构失效形式以脆性断裂居多,且张开型裂纹占主导,因此,主断裂参量应力强度因子*K*<sub>1</sub>的计算式<sup>[20-21]</sup>为:

$$K_{\rm I} = \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{t}{R}, \phi\right) \tag{7}$$

式中: $\sigma$ 为结构内应力, MPa; F为无量纲修正系数 函数;c为半椭圆裂纹长径, mm;a为裂纹短径, 同时 表征裂纹沿径向方向的深度, mm;t为容器厚度, mm; R为容器内径, mm; $\phi$ 为裂纹角, (°);Q为常数。

对于柱形压力容器,其外径与内径之比小于 1.2,则压力容器应力可根据壳体无力矩理论<sup>[22]</sup>得到环向应力  $\sigma_{\rm p}$  与径向应力  $\sigma_{\rm d}$  为:

$$\sigma_{\rm p} = \sigma_{\rm d} = \frac{pR}{t} \tag{8}$$

式中:p为容器内压, MPa。

将式(8)代入式(7),则得柱形压力容器轴向内外 裂纹应力强度因子 K<sub>1</sub>的表达式为:

$$K_{\rm I} = \frac{pR}{2t} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{t}{R}, \phi\right) \tag{9}$$

### 2 有限元法可靠性验证

为了验证有限元计算结果的准确性,以式(9)为 依据,在满足 Newman<sup>[20-21]</sup>模型中 *alc、alt、cl* 条件的 基础上,分别对单内、单外裂纹应力强度因子求解,进 而与 Newman 模型中深长比为 0.2、0.4、1 的半椭圆内 外裂纹最深点(即裂纹角为 90° 的尖端)*K*<sub>1</sub>的数值进行 对比。按照工程中常见柱形压力容器实际尺寸建模 (图 1),其最大工作压力 30 MPa,内径 600 mm,壁厚



## 完整性与可靠性

Integrity & Reliability

60~75 mm,材质 15MnMoVN,弹性模量 200 GPa,泊 松比 0.3。

将柱形压力容器沿中心对称分割为4部分,其中 含裂纹部分的容器网格采用10节点Solid187四面体 单元,其余部分采用20节点Solid186六面体单元,裂 纹网格类型采用20节点Solid186六面体单元,同时采 用Contact174接触单元保证裂纹网格与整体网格连 接,进而通过有限元软件ANSYS对其进行网格划分。

在 10 MPa 内压载荷下,以 3 种不同深长比 a/c 的 半椭圆裂纹为研究对象,通过固定深度为 12 mm, 长径分别为 60 mm、30 mm、12 mm,求得应力强度因 子有限元数值,并与 Newman 模型计算结果进行对比 (图 2)。有限元计算结果与 Newman 模型计算结果相 近,最大误差为 4.883%,在可接受范围内。由此可见, 有限元计算对内、外裂纹断裂参量结果求解是可靠的。 以该模型及边界条件为基础,深入分析压力容器中相 同的内外半椭圆裂纹在共同作用下对尖端最深点应力 强度因子及裂纹扩展产生的影响。



图 2 压力容器内、外裂纹应力强度因子随深长比变化有限元 方法与 Nerman 模型计算结果对比图

132 yqcy.paperopen.com

## 3 内外裂纹相互作用

#### 3.1 有限元模型

建立压力容器内外双裂纹模型(图 3),在容器内、 外壁同时添加相同大小的半椭圆裂纹,使两个裂纹面与 轴向平行,裂纹尖端正向相对。压力容器中含裂纹部分 网格采用 Solid186 退化的四面体单元,其余部分采用六 面体单元,整体网格划分类型与有限元验证模型网格类 似,内外裂纹采用三维实体单元 Solid187 单元划分网 格,在裂纹部分与容器之间添加接触单元 Contact174, 保证两者之间相互连接。在裂纹尖端附近设置 6 条积 分围道数,以保证应力强度因子计算的准确性。



#### (b)网格划分图



#### 3.2 内外裂纹相互作用对应力强度因子的影响

在裂纹深长比 *alc* 为 0.2~1.8 的范围内,分别对容器中含单条内(外)裂纹以及双裂纹的尖端断裂参量分别求解,并进行对比。为了便于表征结果,定义名义应力强度因子 *K*<sub>In</sub> 为:

$$K_{\rm In} = K_{\rm Id} / K_{\rm Is} \tag{10}$$

式中: $K_{Id}$ 为容器中含有内外双裂纹时所对应的尖端最深点应力强度因子, MPa·mm<sup>1/2</sup>; $K_{Is}$ 为单裂纹所对应的尖端最深点应力强度因子, MPa·mm<sup>1/2</sup>。

通过对单裂纹和双裂纹断裂参数的有限元结果 进行归纳处理,分别得到内外裂纹在相互作用影响 下的名义应力强度因子变化曲线(图4、图5)。

Integrity & Reliability

完整性与可靠性





内裂纹在裂纹间相互作用影响下,裂纹尖端最深点 名义应力强度因子 K<sub>ln</sub> 在深长比小于 1、大于 1 两种情 况下的变化趋势相似,呈先上升后下降的变化规律。但 是,当深长比小于 1 时, K<sub>ln</sub> 的上升过程明显比深长比 大于 1 的情形持久,而且当深长比逼近 1 时, K<sub>ln</sub> 下降得 更为剧烈;对于 K<sub>ln</sub> 在深长比大于 1 的整体变化过程, 无论上升过程还是下降过程,曲线变化相比深长比小 于 1 的情形均略显平缓,表明内裂纹在深长比大于 1 的 扩展过程中,沿深度方向的变化趋于稳定(图 4)。利用 MATLAB 得到内裂纹在相互作用下名义应力强度因子 与深长比的拟合曲线表达式。

(1) 当深长比小于1时:

$$K_{\text{In}} = 1.026\ 2 - 0.148\ \frac{a}{c} + 0.677\ 6\left(\frac{a}{c}\right)^2 - 0.736\ 23\left(\frac{a}{c}\right)^3$$
(11)
(2) 当深长比大于1 时:

$$K_{\rm In} = 1.257\ 7 - 0.703\ 68\ \frac{a}{c} + 0.651\ 95\left(\frac{a}{c}\right)^2 - 0.200\ 5\left(\frac{a}{c}\right)^3$$
(12)

外裂纹在裂纹间相互作用影响下,尖端最深点名 义应力强度因子 K<sub>ln</sub> 在深长比小于1时总体变化形态 与内裂纹相似,先上升后下降,而且在深长比为0.5 时 是上升与下降的临界点;在深长比大于1时, K<sub>ln</sub> 持续 下降,而且深长比越大, K<sub>ln</sub> 下降越剧烈(图5)。利用 MATLAB 得到外裂纹在相互作用下名义应力强度因 子与深长比的拟合曲线表达式。

(1) 当深长比小于1 时:

$$K_{\rm in} = 1.0106 - 0.0769\frac{a}{c} + 0.46889\left(\frac{a}{c}\right)^2 - 0.62475\left(\frac{a}{c}\right)^3$$
(13)

$$K_{\rm in} = 1.409\ 18 - 1.021\ 7\ \frac{a}{c} + 0.876\ 01\left(\frac{a}{c}\right)^2 - 0.253\ 19\left(\frac{a}{c}\right)^3$$
(14)

综上,相互作用对内外裂纹的影响趋势相近,且当 深长比小于1时, K<sub>In</sub> 相比深长比大于1时略高,表明 深长比小于1时受到相互作用影响较大,且当深长比 为 0.5 时 K<sub>In</sub> 最高。但是内外裂纹无论是在深长比小

## 完整性与可靠性

Integrity & Reliability

于1或大于1的工况, K<sub>in</sub>都是由略大于1逐渐向小于 1的数值变化, 表明在裂纹初期, 相互作用对裂纹扩展 具有促进作用, 但随着裂纹深长比增大, 相互作用对裂 纹扩展具有抑制作用。

#### 3.3 内外裂纹扩展结果

进一步探讨压力载荷对含内外双裂纹压力容器的 动态裂纹扩展的影响,在压力容器最大工作压力为 30 MPa条件下,研究内外半椭圆裂纹深长比小于1、 等于1、大于1的3种扩展工况。

根据裂纹尖端扩展过程中应力强度因子的变化曲 线(图 6,横坐标是裂纹尖端各节点位置所占裂纹长度 与裂纹总长的比值,定义为裂纹尖端相对位置)可知: 不同深长比条件下,内外裂纹尖端在扩展过程中应力 强度因子*K*的数值变化过程相近。当深长比小于1时, 尖端最深处附近*K*值最高,并沿着长度方向逐步降 低;当深长比等于1时,裂纹面为圆形,沿深度方向*K* 



134 yqcy.paperopen.com

在某一定值附近上下波动,总体较为稳定,但在尖端 两侧 K 却很突出;当深长比大于 1 时,尖端 K 变化与 深长比明显相反,即裂纹越靠近表面, K 越高。由于 压力容器内壁承受压力载荷,因此,内裂纹尖端 K 明 显高于外裂纹尖端 K。相互作用对内外裂纹的总体 扩展方向趋势和尖端 K 变化的影响相近,且深长比为 1 均为裂纹应力强度因子沿裂纹方向变化的临界点。 为此,针对压力容器中不同形状的裂纹,应具体分析 扩展方向的变化,并对断裂参量求解,以便预先对容 器断裂问题作出判断。

为了分析深度方向内外裂纹间的相互作用导致 的尖端最深点应力强度因子在扩展过程中的变化规 律(图 7),定义各扩展步无量纲应力强度因子 K<sub>n</sub>,即: 每一扩展步中的尖端最深点应力强度因子与扩展步 1 的尖端最深点应力强度因子之比。



图 7 裂纹最深点扩展路径示意图

根据裂纹深长比小于 1、等于 1、大于 1 的 3 种情 形下的内外裂纹尖端最深点扩展步名义应力强度因 子K,的变化规律可知:在壁面受压力载荷条件下,内 裂纹 K, 的变化相比外裂纹波动起伏较大。当深长比 小于1时,内外裂纹K<sub>n</sub>呈上升趋势,但是内裂纹K<sub>n</sub>在 各个扩展步之间增长时快时缓,而且在个别扩展步有 所下降,而外裂纹K<sub>n</sub>则近似线性增长;当深长比等 于1时,内外裂纹K<sub>n</sub>变化规律相近,即在初始扩展时 降低至最低点随后上升,上升阶段在开始增长时变化 剧烈,之后有所减缓直至呈线性增长;当深长比大于1 时, K<sub>n</sub>曲线变化过程类似深长比等于1的情形, 先减 小后增长。当深长比小于1时, K<sub>n</sub>可达 1.16 以上, 而 在深长比不小于1时,K,约为1.04,表明无论内外裂 纹均在深长比小于1时更倾向于沿深度方向扩展。因 此,在实际容器裂纹检测中,应该对裂纹深长比小于1 的轴向裂纹沿深度方向上的扩展采取额外措施,以防 安全事故的发生。

## 4 结论

(1)通过对内压作用下压力容器的轴向内外双裂 纹相互作用影响进行分析,分别得到内外裂纹尖端最 深点在裂纹深长比小于1和大于1的名义应力强度因 子经验公式。

(2)在双裂纹相互作用下,内外裂纹在深长比大于 1时的扩展能力相比深长比小于1的情形有所减弱。

(3)随着裂纹扩展,裂纹尖端应力强度因子最大值 由最深点逐渐向器壁表面位置移动,而且在深长比大 于等于1的扩展情形中,裂纹最深点应力强度因子几 乎与初始扩展时相同。

参考文献:

- [1] 喻健良,闻拓,闫兴清,等. 直管外表面轴向半椭圆裂纹应力强 度因子 K<sub>1</sub>的有限元分析[J]. 化工装备技术,2012,33(1):10-13.
  YU J L, WEN T, YAN X Q, et al. Finite element analysis of stress intensity factor for straight pipes' axial semi-elliptical external surface cracks[J]. Chemical Equipment Technology, 2012,33(1):10-13.
- [2]梁光川,李抗抗.裂纹倾角对管道表面裂纹断裂参数的影响[J]. 油气储运,2017,36(6):689-693.

LIANG G C, LI K K. Effect of crack angle on the fracture parameter of pipeline surface crack[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(6): 689–693.

[3] 白杨. 带有环向内裂纹的薄壁钢管结构断裂力学计算分析[J].兰州理工大学学报,2014,40(5):169-172.

BAI Y. Fracture mechanics-based evaluation and analysis of thin-walled steel tubular structure with interior circumferential cracks[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40(5): 169–172.

- [4] 王爱勤,秦太验.带轴向表面裂纹海洋管道的断裂计算与可靠 性评估[J].机械强度,2009,31(1):144-149.
  WANG A Q,QIN T Y. Fracture and reliability assessment on submarine pipelines with axial surface cracks[J]. Journal of Mechanical Strength,2009,31(1):144-149.
- [5] 张士超,张昕,葛伟凤,等. 基于 XFEM 的水下防喷器裂纹扩展 分析[J]. 石油机械,2017,45(12):43-47.
  ZHANG S C, ZHANG X, GE W F, et al. Analysis on crack

propagation in subsea blowout preventer based on XFEM[J].

China Petroleum Machinery, 2017, 45(12): 43-47.

yqcy.paperopen.com 135

## 完整性与可靠性

Integrity & Reliability

[6] 郦正能,关志东.应用断裂力学[M].北京:北京航空航天大学 出版社,2012:111-112.

LI Z N, GUAN Z D. Applied fracture mechanics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 111-112.

[7] 署恒木. 薄壁管道表面裂纹的应力强度因子计算[J]. 油气储运, 2001,20(3):25-28.

SHU H M. Stress intensity factors for surface cracks in thin pipes[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(3): 25–28.

- [8] 张伟,徐成,李明飞,等. 射孔段管柱瞬态响应及应力强度分析[J]. 石油机械,2017,45(11):90-94,110.
   ZHANG W, XU C, LI M F, et al. Transient response and strength analysis of perforating string[J]. China Petroleum Machinery,2017,45(11):90-94,110.
- [9] KISABURO A, YIN L. Interaction factors for two elliptical embedded cracks with a wide range of aspect ratios[J]. The International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2017, 4(2): 328-339.
- [10] 姚安林,胡益平,曾祥国,等.高压输气管道内裂纹相互作用的 有限元数值分析[J].压力容器,2011,28(3):28-32.
  YAOAL,HUYP,ZENGXG,et al. Finite element numerical analysis of multiple interacting cracks in high pressure gas pipeline[J]. Pressure Vessel Technology,2011,28(3):28-32.
- [11] 白鑫,谢里阳. 两裂纹在核管道中应力强度因子的相互影响研究[J]. 核科学与工程,2015,35(1):174-180.
  BAI X, XIE L Y. The stress intensity factor variation of two cracks interaction in nuclear piping[J]. Nuclear Science and Engineering, 2015, 35(1):174-180.
- [12] AWANG M K, ISMAIL A E, TOBI A L M, et al. Stress intensity factors and interaction of two parallel surface cracks on cylinder under tension[J]. Materials Science and Engineering, 2017, 165(1): 9–12.
- [13] CHAI G Z, ZHANG K D, WUD L. Analyses on interactions of two identical semi-elliptical surface cracks in the internal surface of a cylindrical pressure vessel[J]. The International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1996, 67 (2): 203-210.
- [14] BERER M, MITEV I, PINTER G. Finite element study of mode I crack opening effects in compression-loaded cracked cylinders[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 175: 1–14.
- [15] 艾书民, 于明, 成晓鸣. 基于 Franc3D 软件的三维裂纹扩展分

析与应用[J]. 机械强度, 2018(1): 251-254.

AI S M, YU M, CHENG X M. Analysis and application of three-dimensional crack growth based on Franc3D[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018(1): 251-254.

- [16] ZAREEI A, NABAVI S M. Calculation of stress intensity factors for circumferential semi-elliptical cracks with high aspect ratio in pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 146 (2): 32-38.
- [17] YIN L, KUNIO H, MAKOTO U. Development of stress intensity factors for cracks with large aspect ratios in pipes and plates[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2016, 139(2): 202-210.
- [18] NABAVI S M, SHAHANI A R. Calculation of stress intensity factors for a longitudinal semi-elliptical crack in a finite-length thick-walled cylinder[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2008, 31(1): 85-94.
- [19] 岳应娟,李宁,陈飞,等. 埋藏裂纹应力强度因子的有限元分析[J]. 武汉科技大学学报,2015,38(2):125-128.
  YUE Y J,LI N,CHEN F, et al. Finite element analysis of stress intensity factor of embedding cracks[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015, 38(2):125-128.
- [20] NEWMAN J C, RAJU I S. Stress-intensity factors for internal surface cracks in cylindrical pressure vessels[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1980, 102(4): 342-346.
- [21] NEWMAN J C, RAJU I S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 15 (1/2): 185-192.
- [22] 王心明. 工程压力容器设计与计算[M]. 北京: 国防工业出版 社,2011:150-158.

WANG X M. Engineering pressure vessel design and calculation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 150-158.

(收稿日期:2018-01-23;修回日期:2018-09-29;编辑:刘朝阳)

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目"超声激励复合材料贴合型损伤界面生热机理及热成像表征方法研究",51605481。

**作者简介:**谢芳,女,1976年生,副教授,2015年博士毕业于西北 工业大学流体机械专业,现主要从事机械检测技术的研究工作。地 址:陕西省西安市灞桥区同心路2号,710025。电话:15667080973。 Email:15667080973@163.com