

文章编号: 1001-8360(2017)02-0127-07

焊接节点表面裂纹复合型应力强度因子的数值计算研究

揭志羽, 李亚东, 卫 星, 杨 光, 罗平杰

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:以十字形焊接节点为研究对象,比较 ABAQUS、FRANC3D 和规范公式计算表面裂纹应力强度因子的结果,验证 FRANC3D 计算应力强度因子的正确性和高效性。为从数值理论上研究复杂应力场下焊接节点表面裂纹复合型应力强度因子的影响因素,基于 FRANC3D 建立不同裂纹形状比和焊缝倾斜角度的计算模型。结果表明,随着焊缝倾斜角度的增大,I 型和 III 型应力强度因子减小,II 型应力强度因子增大;当焊缝倾斜角度为 0° 和 15° 时,裂纹表面点和最深点同时可以忽略 II 型和 III 型应力强度因子的影响;应考虑 II 型和 III 型应力强度因子绝对值对疲劳裂纹扩展的影响。

关键词: 焊接节点; 复合型应力强度因子; 相互作用积分法; 裂纹形状比; 焊缝倾斜角度

中图分类号: U441.4; TG405 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-8360.2017.02.018

Numerical Study of Mixed-mode Stress Intensity Factor of Surface Crack of Welded Joint

JIE Zhiyu, LI Yadong, WEI Xing, YANG Guang, LUO Pingjie

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With a cruciform welded joint taken as an example, the results of stress intensity factors of surface crack calculated by ABAQUS, FRANC3D and code formula were compared. The accuracy and efficiency of stress intensity factors calculated by FRANC3D were verified. In order to study the influencing factors of mixed-mode stress intensity factor of the surface crack of welded joint under complex stress fields from numerical theory, models with different crack shape ratios and inclination angles of weld joints were built based on FRANC3D. The results showed that the intensity factors of modes I and III decreased and the intensity factors of mode II increased with the increase of weld inclination angles. When the weld inclination angles were 0° and 15° , the effects of mode II and III stress intensity factors of the deepest and surface points of surface crack can be ignored. The effects of the absolute values of modes II and III stress intensity factors on fatigue crack growth were considered.

Key words: welded joint; mixed-mode stress intensity factor; an interaction integral method; crack shape ratio; weld inclination angle

焊接结构中普遍采用基于线弹性断裂力学的疲劳寿命评估方法,该方法中最主要的物理参量是应力强度因子,它决定了疲劳裂纹的扩展速率。确定应力强度因子的方法可以分为解析法、数值法和实验法^[1]。与解析法和实验法相比,数值法不受几何形状和载荷

复杂性的限制,在断裂力学分析中得到了广泛应用^[2]。数值法包括有限元法和边界元法,有限元法主要有位移法、应力法、相互作用积分法、奇异单元法、虚拟裂纹闭合法和扩展有限元法等^[3-5]。对于较复杂的问题,有限元法由于网格划分精细导致求解规模过大,应用范围受到限制;边界元法可以降低维,从而降低网格划分的工作量,而且可以精确模拟应力集中问题,这些特点使得边界元法成为一种用于解决有关裂纹问题的有效

方法^[6]。

国内外学者对复杂应力场下含半椭圆形表面裂纹平板的应力强度因子进行了大量研究^[7-9]。由于焊缝的影响,焊接节点裂纹前缘的应力强度因子分布发生较大的变化,这种复杂几何形状应力强度因子的求解主要依赖数值模拟。文献[10]采用最小二乘法计算未熔透焊根失效十字形焊接节点的复合型应力强度因子,得到计算 I 型和 II 型应力强度因子的一般计算公式。文献[11]采用 FRANC3D 软件计算 T 形焊接节点的应力强度因子。文献[12]建立 T 形焊接接头根部裂纹的半椭圆裂纹模型,分析裂纹尖端的应力强度因子。有研究指出不同焊缝倾斜角度焊接节点的疲劳裂纹在焊趾处沿着焊缝扩展^[13],而目前对于这种焊接节点的复合型应力强度因子的研究较少,表面裂纹又是焊接节点中最常见的裂纹形式之一,因此有必要从数值理论方面对复杂应力场下焊接节点的表面裂纹复合型应力强度因子进行研究。

本文以十字形焊接节点为研究对象,比较 ABAQUS、FRANC3D 和规范公式计算焊接节点表面裂纹应力强度因子的结果,同时基于 FRANC3D 分析不同裂纹形状比和焊缝倾斜角度对裂纹前缘复合型应力强度因子的影响规律,为复杂应力场下焊接节点的疲劳裂纹扩展数值模拟和疲劳寿命评估提供依据。

1 复合型应力强度因子计算理论

根据裂纹体承受荷载的形式和对应的变形情况,可将裂纹分为三种类型:(1) I 型裂纹为张开型裂纹,正应力垂直于裂纹面,正应力与裂纹扩展方向垂直;(2) II 型裂纹为滑开型裂纹,剪切应力与裂纹扩展方向平行;(3) III 型裂纹为撕开型裂纹,剪切应力与裂纹扩展方向垂直。三种裂纹类型如图 1 所示。

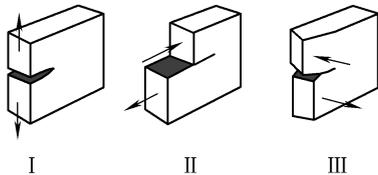


图 1 三种裂纹示意

复合型裂纹前缘的空间应力状态如图 2 所示。

基于柱坐标系,裂纹前缘各应力分量的表达式分别为^[14]

$$\sigma = \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left(5\cos\frac{\varphi}{2} - \cos\frac{3\varphi}{2} \right) - \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left(5\sin\frac{\varphi}{2} - 3\sin\frac{3\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_\varphi = \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left(3\cos\frac{\varphi}{2} + \cos\frac{3\varphi}{2} \right) - \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left(3\sin\frac{\varphi}{2} + 3\sin\frac{3\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

$$\tau_{r\varphi} = \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left(\sin\frac{\varphi}{2} + \sin\frac{3\varphi}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left(\cos\frac{\varphi}{2} - 3\cos\frac{3\varphi}{2} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{rz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\frac{\varphi}{2} \quad (4)$$

$$\tau_{\varphi z} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\varphi}{2} \quad (5)$$

$$\sigma = \begin{cases} \nu(\sigma + \alpha_\varphi) = \frac{8\nu}{4\sqrt{2\pi r}} \left(K_I \cos\frac{\varphi}{2} - K_{II} \sin\frac{\varphi}{2} \right) & \text{平面应变} \\ 0 & \text{平面应力} \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分别为 I 型、II 型、III 型应力强度因子,其表达式分别为

$$\begin{cases} K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0) \\ K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy}(r, 0) \\ K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{zy}(r, 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: φ 、 r 为裂纹尖端附近点的柱坐标; ν 为泊松比; σ 、 α_φ 、 α_z 、 $\tau_{r\varphi}$ 、 τ_{rz} 、 $\tau_{\varphi z}$ 分别为极坐标系下的正应力和剪应力; σ_{yy} 、 τ_{xy} 、 τ_{zy} 分别为直角坐标系下的正应力和剪应力。

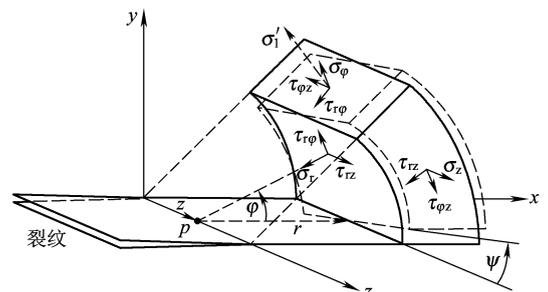


图 2 裂纹前缘空间应力状态

2 十字形焊接节点复合型应力强度因子的数值模拟

本文假定表面裂纹为半椭圆形,深度 $a = 0.5 \text{ mm}$,半长度 $c = 1.0 \text{ mm}$,沿着一侧焊缝且位于焊趾中间部位。拟定的十字形焊接节点尺寸如图 3 和表 1 所示,表 1 中的 b 和 α 如图 3 所示。

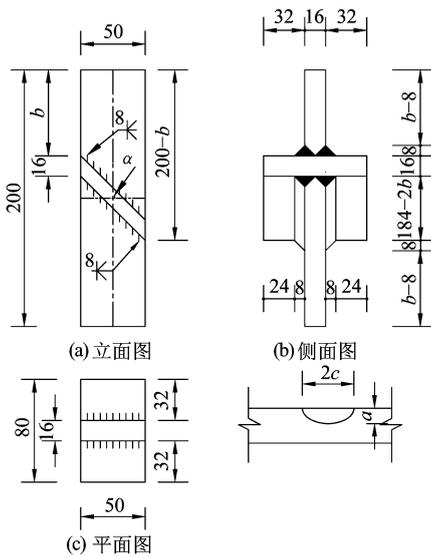


图 3 十字形焊接节点构造图 (mm)

表 1 十字形焊接节点参数值

焊缝倾斜角度 $\alpha / (^{\circ})$	长度 b / mm
0	92.0
15	85.3
30	77.6
45	67.0

长板一端固结,进自由端施加 140 MPa 的轴向拉伸均布荷载,钢材的弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$ 。分别基于 ABAQUS 和 FRANC3D 建立含表面裂纹的倾斜角为 0° 的十字形焊接节点的三维有限元模型和边界元模型。采用 ABAQUS 中的围线积分法,设置方法如下:沿着裂纹前缘设置 6 层围线区域(图 4),最里层采用退化单元模拟裂纹尖端的奇异性,其他围线区域采用普通单元模拟,取不包括最里层围线的平均值作为应力强度因子;通过 seam 命令设置初始裂纹,采用 crack 命令指定裂纹的前缘和扩展方向;在历程输出中输出应力强度因子。这种方法可以模拟裂纹尖端的奇异性,较方便地计算出应力强度因子、 J 积分等断裂参量。采用 C3D8 实体单元建立有限元模型,如图 5 所示。

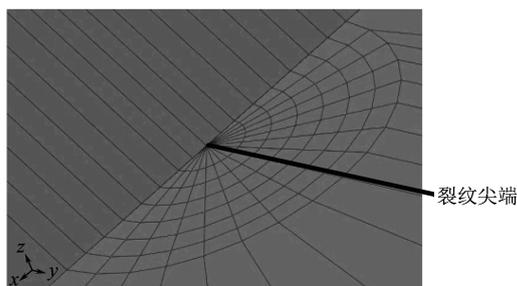


图 4 裂纹前缘的围线区域设置



图 5 ABAQUS 中含裂纹体的有限元模型

FRANC3D 是由美国康奈尔大学断裂工作组基于边界元技术开发的三维断裂分析软件。前处理主要采用通用有限元软件如 ANSYS 和 ABAQUS 等实现,导入有限元模型到 FRANC3D 中设置裂纹,FRANC3D 中提供各种类型的裂纹形状,采用奇异单元设置裂纹尖端,求解同样采用通用有限元软件来实现。FRANC3D 中的边界元模型如图 6 所示。

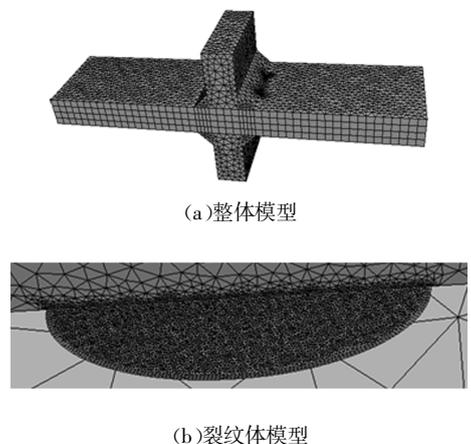


图 6 FRANC3D 中含裂纹体的边界元模型

求解含三维裂纹结构的断裂参量应力强度因子时,应计算出裂纹前缘各不同位置处的应力强度因子。裂纹前缘采用归一化坐标 S 表示,如图 7 中规定; x 坐标较小的裂纹表面点 $S=0$, x 坐标较大的裂纹表面点 $S=1$ 。

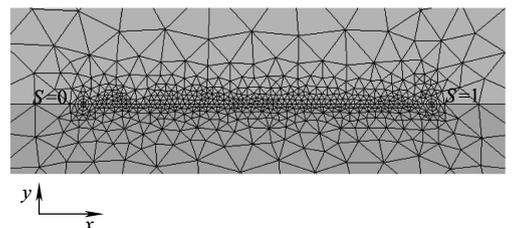
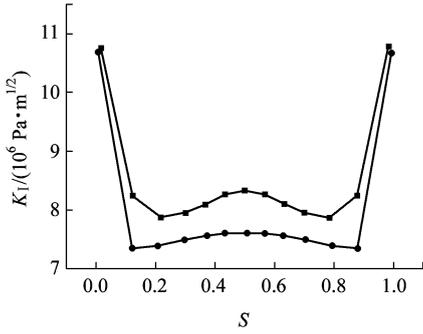
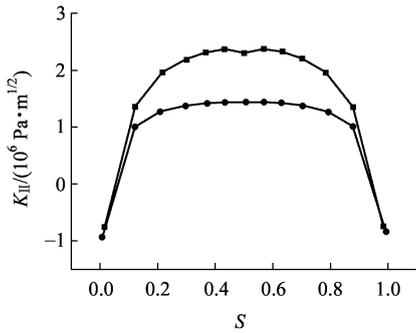


图 7 裂纹前缘归一化坐标

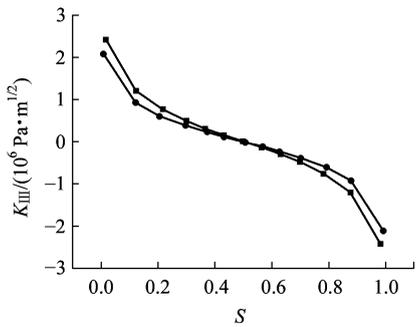
图 8 为焊缝倾斜角度为 0° 时由 ABAQUS 和 FRANC3D 计算出的裂纹前缘不同位置应力强度因子,表 2 给出了表面点和最深点处 I 型应力强度因子数值模拟结果与文献[15]中计算公式结果对比。



(a) I 型应力强度因子



(b) II 型应力强度因子



(c) III 型应力强度因子

—■— ABAQUS; —●— FRANC3D。

图 8 倾斜角度为 0° 时 ABAQUS 和 FRANC3D 应力强度因子计算结果对比

表 2 表面点和最深点 K_I 数值模拟和计算公式结果对比

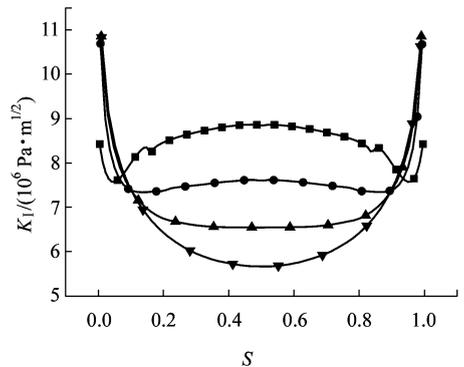
位置	计算结果 / ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$)		
	ABAQUS	FRANC3D	计算公式
表面点	1.076×10^7	1.069×10^7	1.150×10^7
最深点	8.329×10^6	7.606×10^6	7.054×10^6

从图 8 和表 2 可以看出:(1)ABAQUS 和 FRANC3D 计算裂纹前缘的应力强度因子变化趋势一致, K_{II} 的

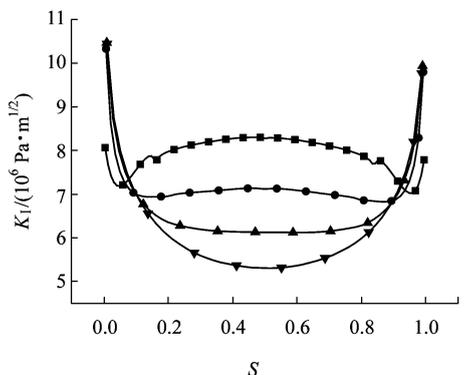
计算结果相差最大, K_I 次之, K_{III} 最小;(2)裂纹表面点 K_I 和 K_{II} 的结果相差较小,而裂纹最深点相差较大,裂纹表面点 K_{III} 相对于最深点的结果相差大一些;(3)数值模拟结果与公式计算结果比较接近。两种数值模拟结果产生差异的主要原因:网格划分的差异使裂纹前缘应力强度因子对于网格划分较敏感;有限元和边界元计算原理的差异。通过对比 ABAQUS、FRANC3D 和规范公式应力强度因子计算结果,验证了 FRANC3D 计算应力强度因子的准确性和可靠性,由于边界元相对于有限元具有计算效率高、计算结果相对准确的特点,因此 FRANC3D 为复杂几何中不规则裂纹应力强度因子计算提供了好的计算方法。

3 十字形焊接节点复合型应力强度因子敏感性分析

为了研究裂纹形状比和焊缝倾斜角度对应力强度因子的影响,基于 FRANC3D 分别建立裂纹形状比 $\frac{a}{c}$ 为 0.25、0.50、0.75、1.00,裂纹深度 $a=0.5 \text{ mm}$,焊缝倾斜角度 α 为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 的边界元模型。图 9 给出了 4 种焊缝倾斜角度和 4 种裂纹形状比下裂纹前缘 I 型应力强度因子的变化规律。



(a) $\theta=0^\circ$



(b) $\theta=15^\circ$

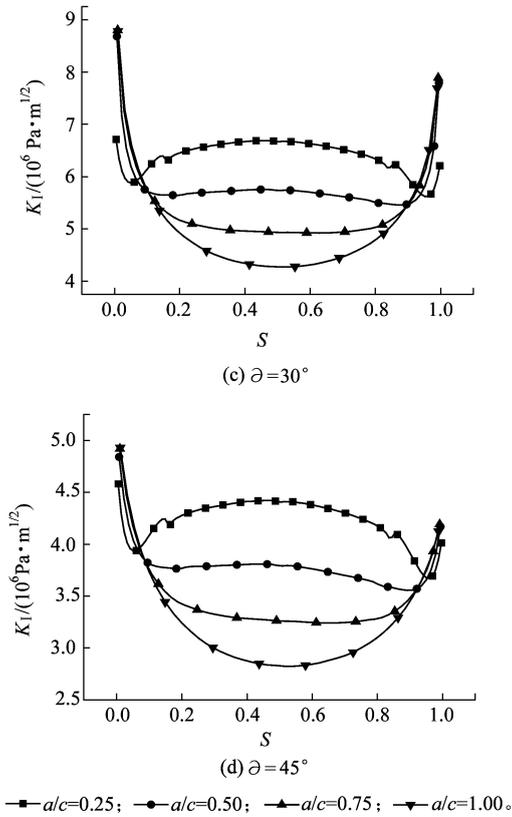


图 9 4 种焊缝倾斜角度和 4 种裂纹形状比下裂纹前缘 I 型应力强度因子对比

从图 9 可以看出:(1)裂纹形状比 $\frac{a}{c} = 0.25$ 时,裂纹前缘的 K_I 随 S 的增大经历了两个减小增大循环,裂纹形状比 $\frac{a}{c}$ 为 0.50、0.75、1.00 时,裂纹前缘的 K_I 随 S 的增大先减小后增大;(2)裂纹前缘 K_I 随焊缝倾斜角度的增大而减小,焊缝倾斜角度 45° 时 K_I 约为倾斜角度 0° 时的 0.5 倍,裂纹前缘的 K_I 均在 $S=0$ 处达到最大值;(3)最深点 K_I 随裂纹形状比的增大而减小,表面点的 K_I 随裂纹形状比的增加而增大,当 $0.5 \leq \frac{a}{c} \leq 1$ 时,表面点的 K_I 几乎不变化。

图 10 给出了 4 种焊缝倾斜角度和 4 种裂纹形状比下裂纹前缘 II 型应力强度因子的变化规律。

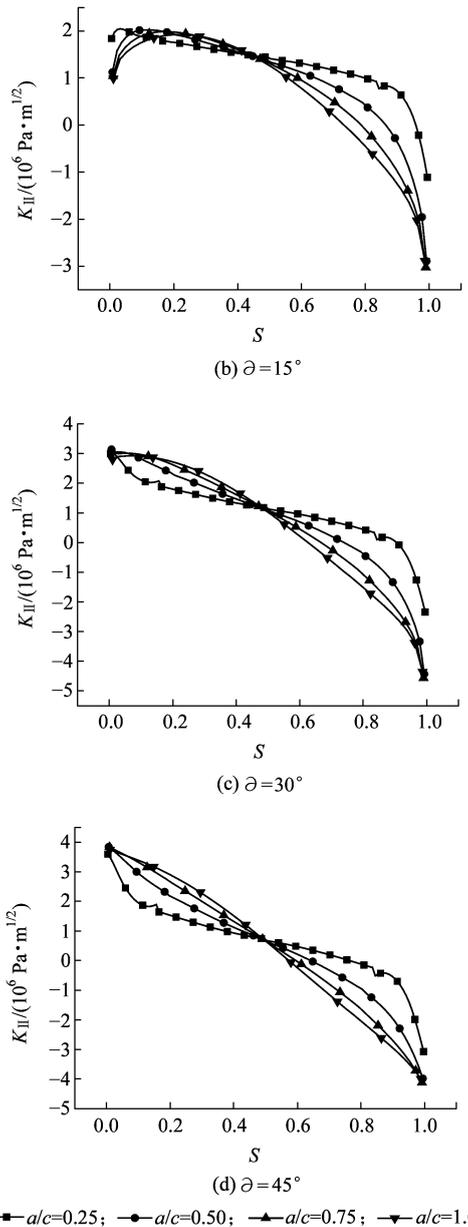
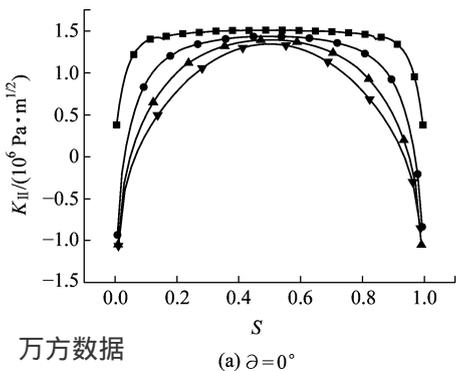


图 10 4 种焊缝倾斜角度和 4 种裂纹形状比下裂纹前缘 II 型应力强度因子对比

从图 10 可以看出:(1)当焊缝倾斜角度为 0° 、 15° 时,裂纹前缘的 K_{II} 随 S 的增加先增大后减小,焊缝倾斜角度为 30° 、 45° 时,裂纹前缘的 K_{II} 随 S 的增大逐渐减小;(2)裂纹前缘的 K_{II} 随着焊缝倾斜角度的增加而增大,除焊缝倾斜角度为 0° 、 15° 外,其他倾斜角度的最大 K_{II} 均在表面点 $S=0$ 处达到,且相差较小,焊缝倾斜角度为 0° 时,最深点 K_{II} 达到最大值;(3)裂纹形状比对裂纹最深点 K_{II} 的影响较小,当倾斜角度为 0° 时, K_{II} 绝对值随裂纹形状比的增加而减小,其余情况下 K_{II} 绝对值随裂纹形状比的增加而增大。

图 11 给出了 4 种焊缝倾斜角度和 4 种裂纹形状比下裂纹前缘 III 型应力强度因子的变化规律。

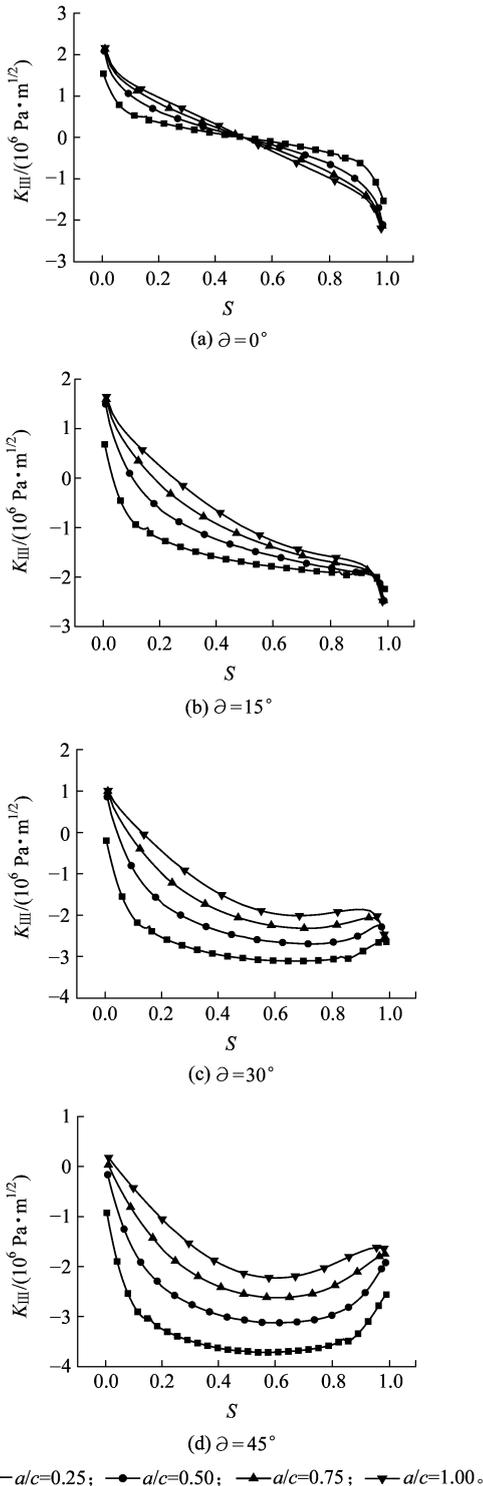


图 11 4 种焊缝倾斜角度和 4 种裂纹形状比下裂纹前缘 III 型应力强度因子对比

从图 11 可以看出:(1)焊缝倾斜角度为 0° 、 15° 时,裂纹前缘的 K_{III} 随 S 的增加逐渐减小,焊缝倾斜角度为 30° 、 45° 时,裂纹前缘的 K_{III} 随 S 的增加先减小后增大;(2)随着焊缝倾斜角度的增大,裂纹前缘的 K_{III} 减小,裂纹前缘 K_{III} 在 $S=0$ 处达到最大值;(3)焊缝倾斜角度为 0° 时, K_{III} 绝对值随裂纹形状比的增加而增大,

其他情况下 K_{III} 随裂纹形状比的增加而增大。

4 结论

(1)裂纹形状比对应力强度因子影响规律较复杂,除焊缝倾斜角度为 0° 、 15° 中的 II、III 型应力强度因子外,其他情况下不同裂纹形状比对应力强度因子的影响趋势一致。

(2)焊缝角度对应力强度因子的影响规律性较强,随着焊缝倾斜角度的增大, K_I 和 K_{III} 减小, K_{II} 增大。

(3)裂纹最深点 K_{III} 最大绝对值仅为 K_I 的 0.24 倍,裂纹表面点 K_{III} 最大绝对值仅为 K_I 的 0.20 倍,因此裂纹最深点和表面点分别可以忽略 K_{II} 和 K_{III} 的影响。当焊缝倾斜角度为 0° 和 15° 时,裂纹表面点和最深点可以同时忽略 K_{II} 和 K_{III} 的影响。

(4) K_{II} 和 K_{III} 出现负值时,并不是裂纹不扩展,而是剪应力方向与规定正方向相反,所以应考虑 K_{II} 和 K_{III} 的绝对值对疲劳裂纹扩展的影响。

参考文献:

- [1] 李灏,陈树坚.断裂理论基础[M].成都:四川人民出版社,1983.
- [2] 马家升.三维复合型裂纹应力强度因子有限元分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [3] 徐建刚,任克亮.拉伸载荷作用下共面表面裂纹间应力强度因子影响系数的有限元分析[J].计算力学学报,2010,27(3):574-576.
- XU Jianguang, REN Keliang. Finite Element Analysis of Stress Intensity Factor Influence Coefficient Between Coplanar Surface Cracks under Tension loading [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 574-576.
- [4] RU Z L, ZHAO H B, YIN S D. Evaluation of Mixed-mode Stress Intensity Factors by Extended Finite Element Method [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(5): 1420-1425.
- [5] 任克亮,吕国志.三维广布裂纹疲劳扩展分析[J].航空学报,2009,30(3):462-467.
- REN Keliang, LÜ Guozhi. Fatigue Propagation Analysis of Three-dimensional Widespread Cracks [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 462-467.
- [6] 李强,王波.T 型焊接接头疲劳裂纹应力强度因子的 3D 边界元计算[J].重庆建筑大学学报,2000,22(6):29-33.
- LI Qiang, WANG Bo. 3D BE Analysis on Stress Intensity Factor of a Fatigue Crack in a Welded T-joint [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 22(6): 29-33.
- [7] 谢伟,黄其青, Masanori Kikuchi. 受剪切应力作用的表面裂纹应力强度因子研究[J].机械科学与技术,2010,29(3):391-394.

- XIE Wei, HUANG Qiqing, MASANORI Kikuchi. A Study of the Stress Intensity Factor of Surface Crack under Remote Shear [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(3):391-394.
- [8] AYHAN A O, YÜCEL U. Stress Intensity Factor Equations for Mixed-mode Surface and Corner Cracks in Finite-thickness Plates Subjected to Tension Loads [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2011, 88(5-7):181-188.
- [9] 高文, 王生楠, 闫晓中. 三维斜置表面裂纹应力强度因子边界元计算及分析[J]. 机械强度, 2013, 35(4):503-508.
GAO Wen, WANG Shengnan, YAN Xiaozhong. Calculation and Analysis of Stress Intensity Factor for Inclined Semi-elliptical Surface Crack Based on Boundary Element Method [J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(4):503-508.
- [10] CHUNG H Y, LIN R S, LIN K J. Evaluations of Mixed-mode Stress Intensity Factors for Load-carrying Fillet Welded Cruciform Joints Using the Least-squares Method [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, 34(2):265-285.
- [11] PASCA N, MARSAVINA L, NEGRU R, et al. Estimation of the Stress Intensity Factor for 3D Cracked T-joint[C]// International Conference. MISKOLC, 2013:273-280.
- [12] 宋占勋, 方少轩, 谢基龙. T形焊接接头根部裂纹应力强度因子研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2):87-94.
SONG Zhanxun, FANG Shaoxuan, XIE Jilong. Research on Stress Intensity Factors for Weld Root Crack of T-butt Joints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2):87-94.
- [13] JEN Y M, CHANG L Y, FANG C F. Assessing the Fatigue Life of Butt-welded Joints under Oblique Loading by Using Local Approaches [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(4):603-613.
- [14] RICHARD H A, FULLAND M, SANDER M. Theoretical Crack Path Prediction [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28(1-2):3-12.
- [15] BS 7910—2013. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures[S]. 2013.

(责任编辑 赵昱萌)

《铁道学报》论文参考文献著录格式要求

作者在撰写论文时,要将自己的成果和他人的成果区别开来,即,只要在文中引用了他人文献,就要在文内的适当位置进行标注,并将所引用文献按引用的先后顺序在文后以一定的著录格式依次列出。文后参考文献要求采用文献本身的文字进行著录,但中文期刊要求采用中英文两种文字进行著录。详细说明如下。

本刊执行国家标准《文后参考文献著录规则》(GB/T 7714—2005)、《科学技术期刊编排格式》(GB/T 3179—92)及《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》,并采用顺序编码标注制。

1. 引用的文献在文内标注格式

(1)对论文所引用的文献,要按它们在文中出现的先后,在文献的著者或成果叙述文字的右上角用方括号标注序号,或者作为语句的组成部分。例如:

- 1981年日本仅给出了扁平车轮冲击钢轨的垂直冲击速度公式^[1],……
- 薛杜普等^[2]指出棉酚从体内排泄缓慢。
- 文献^[2]指出,棉酚从体内排泄缓慢。
- 定理的证明见文献^[3]。

(2)引用多篇文献或同一著者多篇文献时,只需将各篇文献的序号在方括号内全部列出,各序号间用“,”分开;如遇连续序号,可用“-”连接,略去中间序号。例如:

- 早期的研究结果^[2,4,6-9]表明,……

(3)多次引用同一著者的同一篇文献时,在正文中标注首次引用该文献的文后参考文献序号,并在该序号的“[]”外著录引文页码。例如:

- 由于“思想”的内涵是“……的结果”^{[2]194},……。……“……方向和目标”^{[2]354},……

2. 文后参考文献著录格式及示例

2.1 专著及专著中的析出文献

“专著”是以单行本或多卷册形式,在限定期限内出版的非连续性出版物。主要包括图书、学位论文、技术报告、标准、会议文集、汇编、多卷书、丛书等。“专著的析出文献”是指专著中析出的具有独立篇名的文献。为方便读者,建议图书、学位论文、科学技术报告、标准、多卷书、丛书等采用“专著”的著录格式;会议文集、论文集、汇编等采用“专著的析出文献”著录格式。

2.1.1 专著

其著录项目和格式为:

[序号]主要责任者.题名;其他题名信息[文献类型标志].其他责任者.版本(第1版不标注).出版地:出版者,出版年:引文所在的起止页码。

(1) 图书

[1]翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].北京:中国铁道出版社,1997:74-80.

(2) 学位论文