

考虑形状比的焊趾裂纹扩展行为的数值仿真分析

余 茜¹, 魏国前^{1,2}, 李山山¹, 陈斯雯¹

(1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 武汉 430081;

2. 武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 武汉 430081)

摘 要: 针对焊趾处初始裂纹的不同形状比, 基于 NASGRO 裂纹扩展速率模型对裂纹扩展过程进行了数值仿真. 以具有不同形状比的半椭圆表征焊趾表面裂纹, 考虑短裂纹扩展阶段, 采用 M 积分计算整个裂纹前沿的应力强度因子, 并将裂纹前沿应力强度因子中值点作为裂纹扩展的主要控制参量, 模拟并分析了不同形状比条件下裂纹前沿的形状演变和应力强度因子的分布及变化特点. 结果表明, 随着裂纹的扩展, 短裂纹阶段的不同形状比变化将趋于一致; 短裂纹的形状比对早期裂纹扩展有较大影响, 并最终导致整体疲劳寿命的显著差异性; 综合初始形状比对裂纹前沿应力强度因子、扩展形状以及疲劳寿命的影响, 可将其作用效果的强弱拐点作为界定短裂纹与长裂纹的有效参考. 开展了十字焊接接头疲劳验证试验, 试验结果与仿真结果具有较好的一致性.

关键词: 形状比; 裂纹前沿扩展; 应力强度因子; NASGRO 模型; 数值仿真

中图分类号: TG 405 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400136

0 序 言

焊接结构广泛存在于工程领域当中, 通常焊接结构焊缝细节部位已包含类裂纹初始缺陷^[1], 在对焊接结构进行疲劳分析时, 认为其裂纹萌生阶段可忽略, 其疲劳寿命主要包含裂纹扩展阶段.

在目前国内外对裂纹扩展行为研究中, 刘刚等人^[2]基于 Newman-Raju 经验公式, 研究了非线性应力分布对裂纹扩展结果的影响, 发现它的存在将改变表面裂纹的扩展形状并将大幅降低疲劳寿命; Khan 等人^[3]以裂纹尖端应力强度因子研究了 I 形静态表面裂纹的扩展行为, 发现裂纹尖端应力场存在明显的奇异性; 徐磊等人^[4]提出了一个适用于 T 形接头焊趾处表面裂纹的权函数, 计算 T 形接头焊趾处半椭圆表面裂纹的残余应力强度因子, 并与有限元计算结果进行对比证明其有效性; Jinescu 等人^[5]建立了裂纹尖端 K 值与远端应力的联系, 采用一种新的裂纹强度准则分析了疲劳裂纹的扩展行为, 理论结果与试验数据具有较好的一致性; 宋占勋等人^[6]采用奇异单元法研究了焊接接头焊根裂纹的扩展过程, 发现了初始裂纹尺寸和形状比对 K 值具有较大的影响; Aygül M 等人^[7]将初始裂纹

简化为半圆形状, 计算了裂纹前沿沿不同方向的扩展速率和扩展路径, 解释了实际裂纹的扩展行为.

上述研究中, 均未考虑裂纹动态扩展过程中裂纹前沿形状变化及其导致的整个前沿应力强度因子的数值分布变化, 其研究成果适用的裂纹尺度也远远大于焊缝区域初始缺陷的表征尺度, 因此无法据此建立准确的焊接结构寿命预测模型. 同时大量试验与数据表明, 很大一部分疲劳断口的疲劳区为半椭圆形. 基于此, 文中在具有复杂应力分布的焊趾区域, 考虑短裂纹扩展阶段, 运用断裂力学, 以裂纹前沿应力强度因子作为裂纹扩展驱动力, 运用数值仿真模拟裂纹动态扩展过程, 研究焊趾处半椭圆裂纹不同初始形状比对裂纹扩展具体行为的影响.

1 裂纹扩展数值仿真原理

1.1 应力强度因子的计算

文中采用与路径无关积分来描述裂纹前沿应力强度因子随裂纹扩展动态变化过程. 断裂力学中, Knowles 和 Sternberg 提出的 M 积分^[8]较之 J 积分, 前者能有效地表征裂纹等缺陷体的演变规律, 且能得到各类应力强度因子, 同时具有忽略了相应边值影响的特点, 故选取 M 积分求解应力强度因子, 其表达式如下

$$M = \oint_C (W n_i x_i - T_k u_{k,i} x_i) ds \quad (1)$$

式中: c 为环绕所有裂纹的封闭曲线; W 为应变能密度; n_i 为曲线 c 的单位外法向量; T_k 为作用于曲线内部的面力; $u_{k,i}$ 为参考位移; x_i 为参考坐标.

1.2 裂纹扩展速率模型

NASGRO 公式^[9] 基于 Forman 模型改进了疲劳裂纹控制方程, 同时比 Paris, Walker 模型更加全面, 不仅考虑了应力强度因子门槛值和断裂韧性, 还体现了应力比以及裂纹张开效应对裂纹扩展速率 $\left(\frac{da}{dN}\right)$ 的影响, 其表达式如下

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \left(\frac{1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}}{1 - \frac{K_{max}}{K_c}} \right)^p \quad (2)$$

式中: R 为应力比; ΔK 为应力强度因子幅值; C, n, p, q 是与材料相关的参数; ΔK_{th} 为应力强度因子幅值门槛值; K_c 为材料断裂韧性; K_{max} 为最大应力强度因子; f 为裂纹张开函数.

1.3 裂纹扩展数值仿真过程

将裂纹前沿离散正交处理, 基于 M 积分以及 NASGRO 求得裂纹前沿离散点的应力强度因子以及扩展速率, 通过指定裂纹前沿应力强度因子中值点的扩展步长确定前沿其余点的扩展步长, 从而得到不同步扩展的裂纹前沿, 如图 1 所示, 其表达式如下^[10], 即

$$\Delta a_i = \Delta a_{median} \left[\frac{\frac{da}{dN_i} (\Delta K_i, R_i \dots)}{\frac{da}{dN_{median}} (\Delta K_{median}, R_{median} \dots)} \right] \quad (3)$$

式中: Δa 为扩展步长; da/dN 是裂纹扩展速率, 其中下标 i 和 $median$ 分别表示裂纹前沿第 i 点以及裂纹前沿应力强度因子中值点.

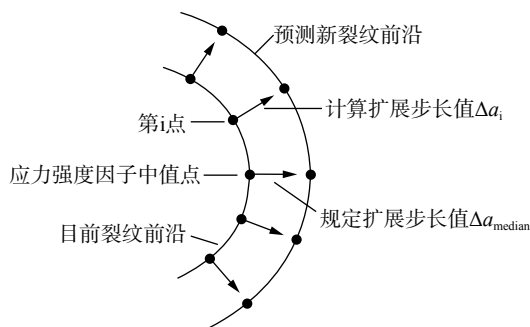


图 1 裂纹前沿扩展示意图

Fig. 1 Propagation of crack front diagram

2 不同形状比裂纹扩展仿真

2.1 裂纹几何模型

两块薄板通过四道焊缝与厚板连接, 建立十字焊接接头, 其中薄板厚度为 8 mm, 厚板厚度为 16 mm, 四道焊缝对称分布, 焊高为 8 mm, 不同形状比初始裂纹插入位置均为焊趾中部, 如图 2 所示, 文中定义裂纹形状比为裂纹扩展深度 a 与裂纹表面长度一半 c 的比值, 共分析了 6 种不同初始裂纹形状, 其中裂纹具体形状比如表 1 所示 (初始裂纹深度 $a_0 = 0.5$ mm).

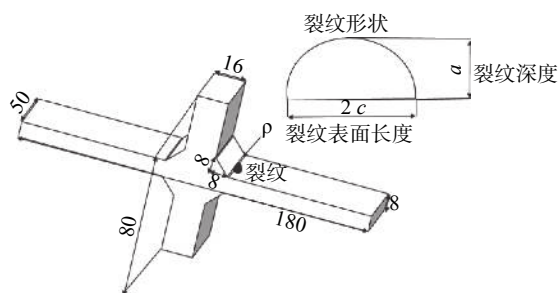


图 2 十字焊接接头及裂纹几何参数 (mm)

Fig. 2 Geometry parameters of welded joint and crack

表 1 不同初始裂纹形状比模型

Table 1 Different initial crack aspect ratio model

形状比1	形状比2	形状比3	形状比4	形状比5	形状比6
0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4

2.2 裂纹网格模型

在实际焊接结构中, 焊趾处并非简单的折线形式, 为了准确模拟焊趾处应力分布情况, 引入有效缺口应力法概念, 在焊趾处建立虚拟半径为 1 mm 倒圆. 为准确模拟短裂纹扩展行为, 同时保证计算精度以及减少计算量, 采用子模型技术, 将模型分为裂纹体模型和非裂纹体模型.

在裂纹体模型中插入裂纹时, 对裂纹前沿划分三层体网格, 其中裂纹前沿内环为四分之一 15 节点奇异楔形单元, 外两层单元为四分之一 20 节点六面体单元环, 用四分之一一节点来适应裂纹尖端节点以适应该处应力奇异性, 其余区域使用 10 节点四面体单元组成, 四面体单元和六面体单元之间采用 13 节点金字塔形单元过渡. 为减少离散误差, 提高计算精度, 裂纹前沿局部网格进行对称划分, 如图 3 所示.

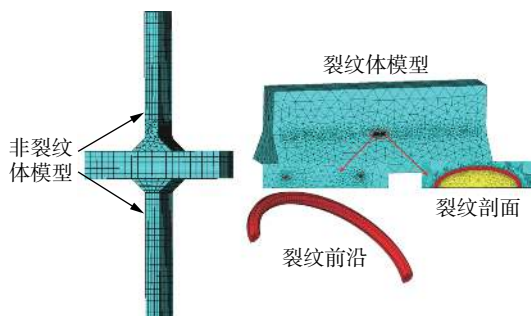


图 3 网格模型
Fig. 3 Grid model

仿真材料为 Q345, 其屈服极限 $R_{eL} = 345 \text{ MPa}$, 强度极限 $R_m = 416 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$. 根据美国材料与试验协会 (ASTM) 标准, Q345 对应的牌号为 ASTM A588, 在 NASGRO 材料库中对应的材料参数 $C = 7.3080 \times 10^{-14}$, $n = 3.3$, $p = 0.5$, $q = 0.5$, $\Delta K_{th} = 295.375 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$, $K_c = 3475 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$.

2.3 裂纹扩展

模型在最大拉应力 $\sigma_{\max} = 200 \text{ MPa}$, 应力比 $R = 0$ 的循环载荷下进行扩展, 如图 4 所示. 裂纹扩展流程如图 5 所示. 应力强度因子中值点扩展步长

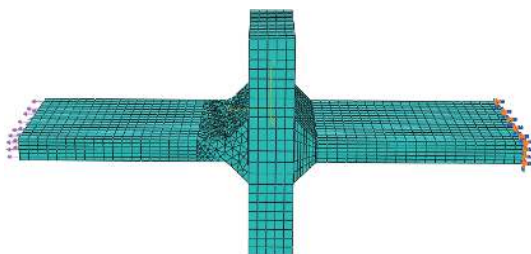


图 4 载荷示意图
Fig. 4 Load diagram

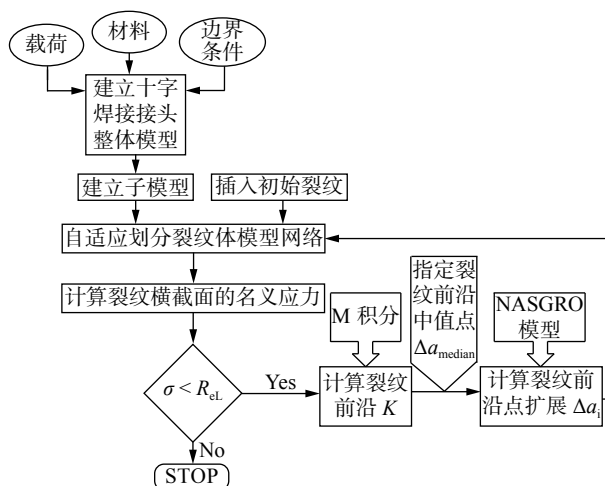


图 5 裂纹扩展流程
Fig. 5 Crack propagation process

Δa_{median} 过大则容易造成裂纹扩展失真, 过小则耗费资源. 规定最初裂纹前沿应力强度因子中值点扩展 30 步, 扩展步长 $\Delta a_{\text{median}} = 0.2 \times \min(a_0, c_0)$, 后续裂纹扩展中, 步长可在考虑裂纹的特征尺寸的基础上适当增加. 裂纹所在横截面的名义应力达到材料屈服极限即停止裂纹扩展.

3 数值仿真结果分析

3.1 形状比对裂纹前沿的影响

针对表 1 中的 6 种模型, 模拟了试件在恒定载荷条件下的裂纹扩展过程, 其中考虑了 4 种典型的裂纹相对扩展深度 ($a/t = 0.07, 0.1, 0.2, 0.3$), 根据计算结果, 绘制了即时状态下裂纹前沿应力强度因子的分布曲线, 如图 6 所示. 由于在裂纹扩展过程中, 不同循环次数下裂纹前沿的形状和长度实时变化, 为便于分析, 采用归一化裂纹前沿作为横坐标, 其中, 横坐标 0 和 1 表征裂纹前沿与焊趾相交的两个端点, 纵坐标为应力强度因子 K .

由图 6a~6d 分析, 随着裂纹不断扩展, 裂纹前沿不断向深度方向推进, 其 K 值不断增大, K 值的分布形态与裂纹深度 a 有关. 在小裂纹阶段, K 值的分布对裂纹前沿的形状比较敏感; 长裂纹阶段, 敏感程度则急剧下降, 不同模型裂纹前沿的 K 值曲线趋于一致.

由图 6a 容易看出, 在小裂纹阶段, 扁长型表面裂纹 (形状比 1) 的 K 值曲线较为平缓, 裂纹前沿中点的 K 值较大; 尖锐型表面裂纹 (形状比 6) 的 K 值曲线变化剧烈, 裂纹前沿中点的 K 值较小. 两者差值接近 $98 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$, 表明在相同初始裂纹尺度的情况下, 扁长型表面裂纹在深度方向的扩展速度高于尖锐型表面裂纹. 且在该阶段裂纹 6 中模型裂纹前沿应力强度因子分布分别呈现“下凹型”: 裂纹前沿中点应力强度因子小于裂纹前沿两侧应力强度因子, “上凸型”: 裂纹前沿中点应力强度因子大于裂纹前沿两侧应力强度因子, “水平型”: 裂纹前沿中点应力强度因子和裂纹前沿两侧应力强度因子大体相等.

在图 6d 中, 随着裂纹进一步扩展, 6 种模型裂纹前沿应力强度因子分布均为“下凹型”, 说明当裂纹扩展至一定尺度后, 裂纹前沿端点应力强度因子大于裂纹深度方向应力强度因子, 使得裂纹沿焊趾方向扩展速率大于深度方向扩展速率, 裂纹扩展最

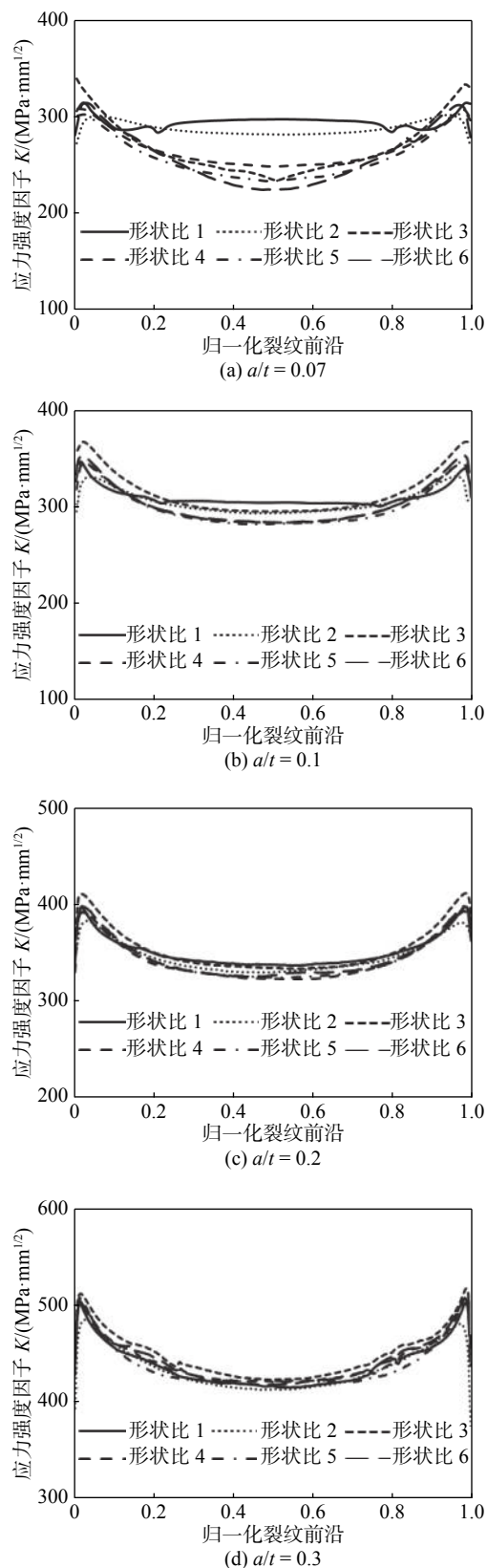


图6 裂纹前沿应力强度因子分布

Fig. 6 SIF of crack front distribution

终会趋于扁平化, 呈现半椭圆状, 如图7所示。

针对每个模型, 提取出其裂纹扩展过程中的裂纹扩展深度尺寸 a 及裂纹表面尺寸 c , 拟合出裂纹

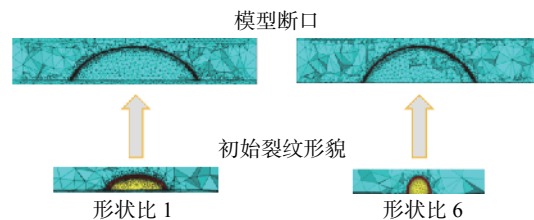


图7 裂纹扩展形貌

Fig. 7 Crack propagation morphology

扩展过程中形状比 (a/c) 与相对扩展深度 (a/t) 关系曲线。在裂纹扩展初期, 裂纹前沿应力强度因子受裂纹形状影响较大, 6种模型的形状比变化有所差异, 其中形状比1形状比呈现先增大后减小, 形状比2形状比变化幅度较小, 而形状比3~形状比6形状比则是明显减小。随着裂纹扩展深度的增加, 裂纹前沿应力强度因子分布受裂纹初始形状比影响较小, 且前沿应力强度因子分布基本呈现“下凹型”, 使得具有不同初始形状比的裂纹逐渐相似, 故而当 $a/t \geq 0.2$, 其形状比变化趋于一致, 稳定在0.58附近, 结果如图8所示。

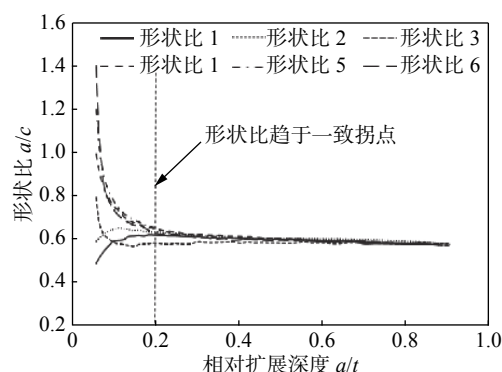


图8 裂纹形状比变化

Fig. 8 Crack shape ratio change diagram

3.2 形状比对疲劳寿命的影响

基于 NASGRO 裂纹扩展速率模型, 用 Runge-Kutta 算法, 得出6种模型的疲劳寿命, 对其进行回归分析, 拟合寿命变化曲线。发现随着形状比的增大, 寿命也随之增加, 其中形状比1寿命最小, 为522 995次, 形状比6寿命最大, 为680 017次, 当形状比由形状比1的0.5增加至形状比6的1.4时, 其寿命较形状比1增加了157 022次, 提高了30%。表明焊接结构疲劳寿命与其初始裂纹狭长程度呈正相关, 结果如图9所示。

分别提取6种模型裂纹前沿应力强度因子中值, 以该点表征裂纹的扩展速率, 得出该点应力强度因子与相对扩展深度的变化关系曲线。在裂纹扩

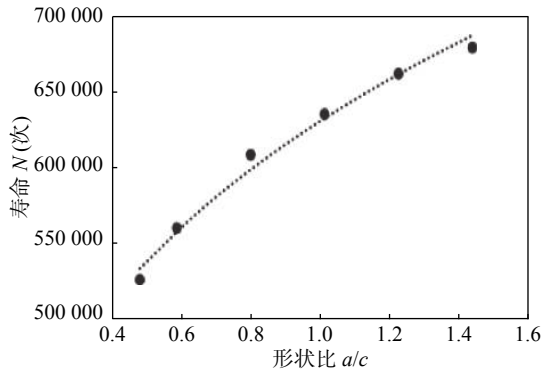


图 9 模型疲劳寿命分布

Fig. 9 Distribution of model fatigue life

展的整体阶段中, 6 种模型的裂纹前沿中点应力强度因子变化趋于一致。在裂纹扩展初期, 由于初始形状比的影响, 形状比越小, 裂纹前沿中点应力强度因子越大, 其中形状比 1 与形状比 6 应力强度因子最大差值为 $121 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$, 且在扩展初期中, 形状比 1 至形状比 6 的裂纹前沿中点应力强度因子整体变化上体现为递减趋势, 结果如图 10 所示。

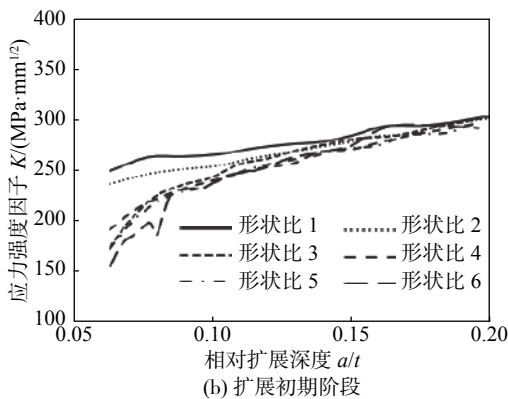
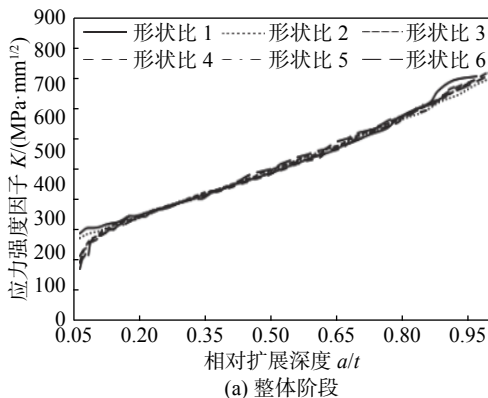


图 10 裂纹前沿中点应力强度因子

Fig. 10 SIF of crack front median

以 $0 < a/t \leq 0.2$ 表示裂纹扩展初期, $0.2 < a/t < 1$ 表示大尺度裂纹扩展期, 分别得出 6 种模型在该两种阶段的疲劳寿命。如图 11 所示, 随着初始

裂纹形状比的增加, 6 种模型扩展初期寿命呈递增趋势, 其中形状比 6 较形状比 1 增加 147 660 次 (该次数与整体疲劳寿命相差次数大体相当), 而大尺度裂纹扩展期寿命基本保持不变。由此分析, 裂纹在扩展初期, 由于形状比对裂纹前沿中点应力强度因子影响较大, 导致在该阶段不同初始形状裂纹扩展速率不同, 使得 6 种模型在该阶段寿命差异较大, 当裂纹扩展至一定尺度后, 裂纹初始形状的影响逐渐弱化, 不同模型裂纹前沿中点应力强度因子变化趋势较为一致, 因而在第二阶段中, 6 种模型的寿命差别不明显, 所以最终疲劳寿命的差异主要体现在第一阶段由于扩展速率不同导致寿命明显的差异。

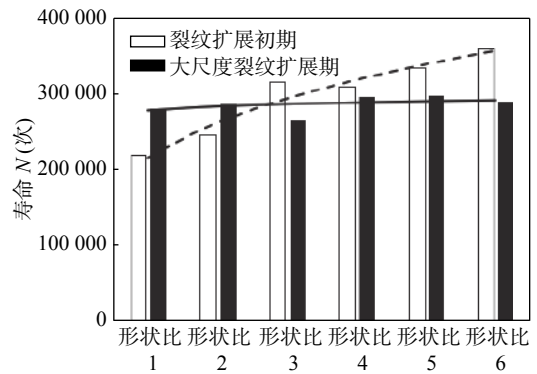


图 11 模型各阶段寿命

Fig. 11 Model life of each stage

4 试验验证

4.1 试验过程

为验证数值仿真结果的正确性, 开展十字焊接接头疲劳拉伸试验。试验所用十字焊接接头试件, 母材材料选用 Q345B, 其尺寸与模型尺寸一致。采用手工电弧焊焊接方式, 焊丝为 CHW-50C6。选取 6 个疲劳试件, 对其施加最大拉应力 $\sigma_{\max} = 200 \text{ MPa}$, 应力比 $R = 0$ 循环载荷。试验中, 一旦发现裂纹, 做好记录和拍照工作, 完成之后继续加载, 直至试件完全断裂。

4.2 试验结果与分析

试验结束后, 选取其中具有典型性的试件断口, 试件 a, b 均以半椭圆形表面裂纹断裂, 试件 c 以 1/4 椭圆形角裂纹断裂。其中试件 c 断口可明显看出两个裂纹源, 以海滩条带为边界得到裂纹源扩展尺度较大的裂纹形状, 亦为半椭圆形, 如图 12

所示。

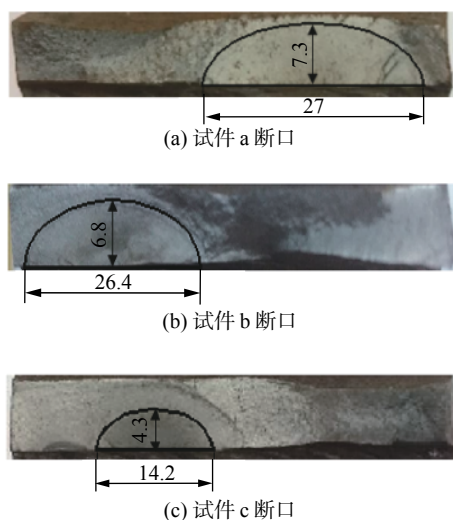


图 12 试件断口形貌尺寸 (mm)
Fig. 12 Specimen fracture size

3 个断口的裂纹形状比的平均值为 0.55, 且其均在一定范围内波动, 结果如图 13 所示, 该范围与仿真结果大体相符, 说明了文中数值仿真结果的正确性。

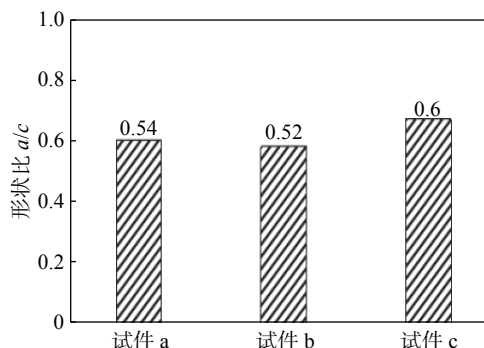


图 13 试件断口裂纹形状比
Fig. 13 Crack aspect ratio of specimen fracture

5 结 论

(1) 不同的初始裂纹形状会导致裂纹扩展初期裂纹前沿应力强度因子分布形式 (上凸型、下凹型、水平型) 有所不同, 当裂纹扩展进入大尺度范围时, 其裂纹前沿应力强度因子分布均呈现为下凹型。

(2) 初始裂纹形状的差异仅在裂纹小尺度范围内扩展时会对裂纹形状有明显影响, 随着裂纹进一步扩展, 不同初始形状的裂纹形状会逐渐变为扁平化半椭圆状, 且裂纹在某一形状比范围内进行扩展, 且变化将趋于一致。

(3) 焊接结构疲劳寿命受焊趾处初始裂纹形状影响较大, 且该影响主要作用于裂纹扩展初期阶段, 对大尺度裂纹扩展期寿命影响不明显。

(4) 初始裂纹形状对裂纹前沿应力强度因子的分布、裂纹扩展形状以及焊接结构疲劳寿命的影响的强弱拐点 ($a/t = 0.2$) 均大体相同, 可将该拐点作为后续工程研究中界定短裂纹与长裂纹的有效参考。

参考文献:

- [1] 张晓光, 孙 正, 胡晓磊, 等. 射线检测图像中焊缝和缺陷的提取方法 [J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 77 – 80.
Zhang Xiaoguang, Sun Zheng, Hu Xiaolei, *et al.* Extraction method of welding seam and defect in ray testing image[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 77 – 80.
- [2] 刘 刚, 高 明, 黄 一, 等. 非线性分布应力对焊接接头表面裂纹扩展的影响 [J]. 船舶力学, 2014(3): 291 – 302.
Liu Gang, Gao Ming, Huang Yi, *et al.* Effect of nonlinear distribution stress on surface crack growth at welded joints[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014(3): 291 – 302.
- [3] Khan I A, Bhasin V, Chattopadhyay J, *et al.* Characterisation of crack tip stresses in elastic-perfectly plastic material under mode-I loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53(3): 207 – 216.
- [4] 徐 磊, 黄小平. 焊趾处椭圆表面裂纹的权函数与残余应力强度因子的权函数法 [J]. 船舶力学, 2017, 21(4): 443 – 454.
Xu Lei, Huang Xiaoping. Weight function for weld toe semi-elliptical surface crack and calculating residual stress intensity factors by weight function method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(4): 443 – 454.
- [5] Jinescu V V, Nicolof V I. Strength criteria at the tip of the crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 142(4): 108 – 115.
- [6] 宋占勋, 方少轩, 谢基龙, 等. 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 Shaoxun, Xie Jilong, *et al.* Research on stress intensity factors for weld root crack of T-butt joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 87 – 94.
- [7] Aygöl M, Al-Emrani M, Barsoum Z, *et al.* Investigation of distortion-induced fatigue cracked welded details using 3D crack propagation analysis[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 64(7): 54 – 66.
- [8] Knowles J K, Eli Sternberg. On a class of conservation laws in linearized and finite elastostatics[J]. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1972, 44(3): 187 – 211.

也增大了热对流损失. 根据最小电压原理, 当电弧受到热损失时会通过增大总热输入来维持其初始状态, 因此电压增大 (图 5b), 所以焊接热输入增大, 但由于存在大量的热对流损失使其焊接热效率仍然很低, 且低于自由电弧.

3 结 论

(1) 外加纵向磁场使电弧扩张, 因离心力的作用产生负压形成反重力流将阳极的热量汇聚于阴极附近, 使电弧温度升高, 阳极附近出现低温区.

(2) 当磁感应强度为 0.06 T 时, 电弧内部出现涡流, 阳极表面的电流密度、热流密度以及电弧压力等由近似高斯分布向双峰分布转变.

(3) 施加纵向磁场后电弧因旋转扩张向周围介质损失热量, 是造成热效率降低的本质原因.

参考文献:

- [1] 罗 键, 贾昌申, 王雅生, 等. 外加纵向磁场 GTAW 焊接机理 I. 电弧特性 [J]. 金属学报, 2001, 37(2): 212 – 216.
Luo Jian, Jia Changshen, Wang Yasheng, *et al.* Mechanism of the gas tungsten-arc welding in longitudinal magnetic field controlling-I. Property of the arc[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(2): 212 – 216.
- [2] Tanaka M, Terasaki H, Ushio M, *et al.* A unified numerical modeling of stationary tungsten-inert-gas welding process[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 33(7): 2043 – 2052.
- [3] Luo Jian, Yao Zongxiang, Xue Keliang. Anti-gravity gradient unique arc behavior in the longitudinal electric magnetic field hybrid tungsten inert gas arc welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(1-4): 647 – 661.
- [4] Yin Xianqing, Gou Jianjun, Zhang Jianxun, *et al.* Numerical study of arc plasmas and weld pools for GTAW with applied axial magnetic[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(28): 5203 – 5300.
- [5] Chen Tang, Zhang Xiaoming, Bing Bai, *et al.* Numerical study of DC argon arc with axial magnetic fields[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2015, 35(1): 61 – 74.
- [6] Lu Shanping, Dong Wenchao, Li Dianzhong, *et al.* Numerical study and comparisons of gas tungsten arc properties between argon and nitrogen[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(2): 327 – 335.
- [7] Pan Jiajing, Yang Lijun, Hu Shengsun. Simulation and analysis of heat transfer and fluid flow characteristics of variable GTAW process based on a tungsten-arc-specimen couples model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 96: 346 – 352.
- [8] 安藤宏平. 焊接电弧现象 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [9] Boulos M I, Fauchais P, Pfender E. Thermal plasmas-fundamentals and applications[M]. New York: Springer, 1994.
- [10] Savas A, Ceyhun V. Finite element analysis of GTAW arc under different shielding gases[J]. Computational Materials Science, 2011, 51(1): 53 – 71.
- [11] Zhou X, Heberlein J. An experimental investigation of factors affecting arc-cathode erosion[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(19): 2577 – 2590.
- [12] Tanaka M, Lowke J J. Predictions of weld pool profiles using plasma physics[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(1): R1 – R23.

第一作者简介: 刘政军, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要从事焊接冶金、特种焊接材料及表面强化方面的研究. 发表论文 90 余篇. Email: liuzhengjun1962@163.com

[上接第 112 页]

- [9] Moreno B, Martin A, Lopez-Crespo P, *et al.* Estimations of fatigue life and variability under random loading in aluminum Al-2024T351 using strip yield models from NASGRO[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 91: 414 – 422.
- [10] Aygül M, Al-Emrani M, Barsoum Z, *et al.* An investigation of distortion-induced fatigue cracking under variable amplitude loading using 3D crack propagation analysis[J]. Engineering Failure

Analysis, 2014, 45(45): 151 – 163.

第一作者简介: 余茜, 男, 1994 年出生, 硕士研究生, 研究方向为焊接结构疲劳分析. 发表论文 3 篇. Email: 13657118562@163.com

通信作者简介: 魏国前, 男, 教授. Email: weiguqian@wust.edu.cn