

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.11.013

链板式连续运输机械中焊趾表面裂纹扩展形态检测

范磊*, 商丽

(沈阳城市建设学院 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110167)

摘要: 针对链板式连续运输机械滚动压力增大引起的裂纹扩展问题, 提出焊趾表面裂纹扩展形态检测方法, 并应用到链板式连续运输机中。我们构建了焊趾表面裂纹图像的尺度空间函数, 并计算特征点的梯度幅值与方向, 完成焊趾表面裂纹区域的 SIFT(Scale Invariant Feature Transform)定位。以裂纹区域定位结果为基础, 明确扩展应力强度因子与能量释放之间关系, 并引入裂纹开张比的概念, 计算裂纹扩展的有效能量。根据裂纹纵、横比与深度比的关系, 结合板厚得到裂纹半轴长度的函数关系, 从而实现裂纹扩展形态的检测。以链板式连续运输机为例, 实验结果表明, 本文针对连续滚动机械设备裂纹区域的定位精度比传统的检测方法更高, 且裂纹深度检测结果与实测结果基本一致, 说明所研究检测方法的裂纹扩展形态检测性能得到了提升, 具有较高的实际应用价值。

关键词: 链板式连续运输机械; SIFT 定位; 焊趾表面裂纹; 裂纹开张比; 扩展形态

中图分类号: TH12

文献标识码: A

Detection of crack growth morphology on the surface of weld toe in chain plate type continuous transportation machinery

Fan Lei*, Shang Li

(College of Mechanical Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang 110167, China)

Abstract: To address the problem of crack propagation caused by increased rolling pressure in chain plate type continuous transportation machinery, a method for detecting the propagation morphology of weld toe surface cracks is proposed and applied to chain plate type continuous transportation machines. A scale space function for the image of weld toe surface cracks was constructed, and the gradient amplitude and direction of feature points was calculated to complete the SIFT (scale invariant feature transform) localization of the weld toe surface crack area. Based on the crack location results, the relationship between the extended stress intensity factor and energy release is clarified, and the concept of crack opening ratio is introduced to calculate the effective energy of crack growth. According to the relationship between the crack aspect ratio and the depth ratio, combined with the plate thickness, a functional relationship of the crack half axis length is obtained, thereby realizing the detection of the crack propagation morphology. Taking a chain plate type continuous transportation machinery as an example, the experimental results show that the positioning accuracy for the crack area of continuous rolling mechanical equipment in this paper is higher than that of traditional detection methods, and the crack

收稿日期: 2023-03-02

修回日期: 2023-04-02

作者简介: 范磊(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机械设计及理论、运动学和动力学等, email: lklk1212990@163.com

基金项目: 2021 年辽宁省教育厅科学研究经费项目-面上项目(LJKXM202109); 2021 年国家级大学生创新创业项目(202113208006); 2021 年沈阳城市建设学院科研发展基金: 基于离散元法的散料物流装备运行稳定性研究

depth detection results are basically consistent with the measured results. Therefore, it indicates that the crack propagation morphology detection performance of the detection method studied has been improved and has high practical application value.

Keywords: Chain plate type continuous transportation machinery; SIFT (scale invariant feature transform) positioning; weld toe surface cracks; crack opening ratio; extended form

链板式运输机由于其稳定性较高,且可实现长时间的连续运输,在多个行业得到了广泛的应用。但是,随着链板式连续运输机工作时间的增加,结构处容易出现疲劳断裂事故,而焊趾裂纹是引发结构断裂的关键因素^[1]。T形焊接头处是较为容易出现焊趾表面裂纹缺陷的,并且在外荷载的作用下焊趾表面裂纹会出现扩展现象最终导致整个焊接结构的断裂^[2]。因此,对链板式连续运输机焊趾表面裂纹扩展形态检测可以有效提高其结构的稳定性与其运行的安全性,相关方法一直是研究的热点。

文献[3]提出基于XFEM (extended finite element method)的焊接裂缝扩展形态检测方法,该方法为了研究焊接结构裂纹形态的萌生扩展,采用ABAQUS软件构建焊趾接头模型,并在不预置裂纹的前提下,运用扩展有限元单元法(XFEM)对焊趾接头的平面应力与平面应变状态进行研究,从而实现裂纹萌生扩展的模拟检测。文献[4]提出基于无网格和水平集耦合的焊接裂缝扩展形态检测方法,该方法首先构建焊接结构的无网格模型,并对网格模型中的节点进行划分;其次根据节点划分结果,采用移动最小二乘法计算近似函数,对焊接结构的位移场与应力场进行计算;最后用相互作用积分法求解应力强度因子,并计算裂纹的开裂角,从而获得焊接结构裂纹扩展路径,完成裂纹扩展检测。但是,针对常规链板式运输机械设备,随着滚动压力不断增加和设备的钢屈服强度的不断提高,设备耐压体的直径和倾斜角度不断加大,导致焊缝焊趾处的裂纹扩展形态检测越来越重要,但目前还没有针对连续滚动设备的可靠设计方法可以遵循。接结构裂纹扩展路径,完成裂纹扩展检测。但是,针对常规链板式运输机械设备,随着滚动压力不断增加和设备的钢屈服强度的不断提高,设备耐压体的直径和倾斜角度不断加大,导致焊缝焊趾处的裂纹扩展形态检测越来越重要,但目前还没有针对连续滚动设备的可靠设计方法可以遵循。

为了进一步提高焊趾表面裂纹检测的精度与有效性,提出一种针对链板式连续运输机的焊趾表面裂纹扩展形态检测。

1 焊趾表面裂纹区域的SIFT定位

为了对焊趾表面裂缝区域进行精准定位,采用SIFT特征检测算法进行定位研究。焊趾表面裂纹区域的SIFT定位的主要步骤是构建尺度空间并检测极值点,以实现焊趾表面裂纹特征点的尺度不变性。在所研究的尺度空间范围内,利用高斯函数对焊趾表面裂纹图像进行修正处理^[5-7],过滤掉对比度不明显的点;最后,采用直方图计算的方式得到特征点的特征向量结果。

为了提高焊趾表面裂纹区域特征点检测的稳定性,首先构建尺度空间函数:

$$D(x, \sigma) = \frac{\partial D'}{\partial x} x + \frac{1}{2} x' \frac{\partial D}{\partial x^2} x \quad (1)$$

$$D(y, \sigma) = \frac{\partial D'}{\partial y} y + y' \frac{\partial D}{\partial y^2} y \quad (2)$$

式中: D 表示空间尺度函数;空间中的方向分别为 x 、 y ; σ 表示尺度参数; t 表示时间参数。以公式(1)与公式(2)为基础,对其进行求导,可以确定特征点的位置。为了得到特征点的位置,要将监测点与周围邻近节点的影像域与尺度域进行对比。尺度空间极值点如图1所示。

为了提高裂纹区域的定位精度,去除图像中对比较低度的特征点,对特征点附近的正交梯度进行计算:

$$G_x(x, y) = I(x+1, y) - I(x, y) \quad (3)$$

$$G_y(x, y) = I(x, y+1) - I(x, y) \quad (4)$$

式中: G_x 与 G_y 分别表示裂纹图像的水平梯度与竖直梯度^[8-10]; I 表示裂纹图像函数。

以公式(3)与公式(4)为基础,引入Heaiaian矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} G_x G_x & G_x G_y \\ G_x G_y & G_y G_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

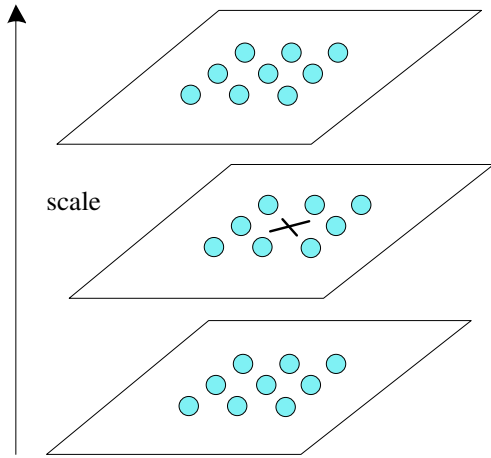


图 1 尺度空间极值点

Fig.1 Extreme points in scale space

式中: H 表示 Hessian 矩阵, 可以提高梯度的计算精度。根据 Hessian 矩阵, 对裂纹图像特征点的幅值 m 与方向 θ 进行计算:

$$m(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{G_x(x, y)}{G_y(x, y)} \quad (7)$$

以幅值与方向的计算结果为基础, 在特征点所在邻域进行采样处理, 并通过关键点描述子对特征点的方向进行描述, 如图 2 所示。

根据特征点描述子结果^[11-14], 对裂纹区域定位目标与特征点之间的欧式距离 L_i 进行计算:

$$L_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (8)$$

式中: x_i 与 y_i 分别表示定位目标的质心坐标。根据欧式距离的计算结果, 对焊趾表面裂纹位置 J_i 进行定位处理:

$$J_i = \beta \times L_i + (1 + \beta) \times \frac{\sum L_i - L_i}{(n - 1) \sum L_i} \quad (9)$$

式中 β 表示遗忘因子。

根据公式(9)的计算结果, 可以实现焊趾表面裂纹区域的精准定位, 为实现裂纹扩展形态检测提供高质量的结果。

2 焊趾表面裂纹扩展形态检测

以上述获得的焊趾表面裂纹区域 SIFT 定位结果为基础^[15-16], 进行焊趾表面裂纹扩展形态检测。

焊趾表面裂纹在向前扩展时会释放一定的能

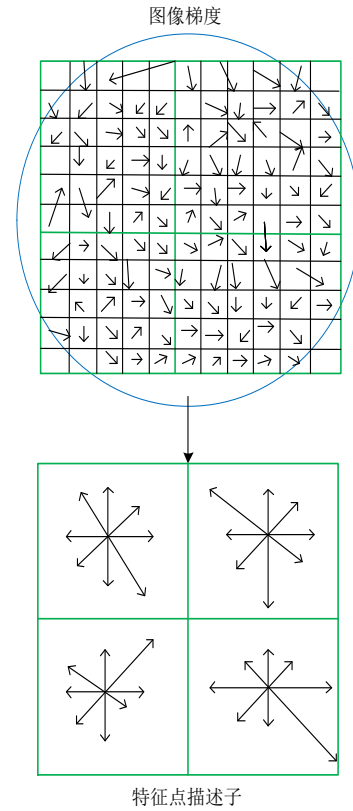


图 2 特征点描述子

Fig.2 Feature point descriptor

量, 通过研究扩展应力强度因子与能量释放之间的关系, 可以获得有效弹性条件下裂纹的扩展形态结果。裂纹扩展过程中所释放的能量与应力强度因子之间的关联关系可以用公式(10)进行描述:

$$P = \frac{K_I^2}{E'} \quad (10)$$

式中: P 表示能量释放的总量; K_I 表示焊趾表面裂纹 I 处的应力强度因子; E' 表示弹性模量。

在进行裂纹扩展形态检测时, 需要考虑裂纹闭合现象对其扩展形态的影响, 裂纹闭合现象产生的等效应力因子同样可以作为焊趾表面裂纹扩展的驱动力^[17-18], 对裂纹扩展形成塑性诱发。引入裂纹开张比的概念, 以研究裂纹闭合效应对裂纹扩展的影响。开张比的计算公式为:

$$U = \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{\Delta K} = \frac{K_{\text{max}} - K_{\text{op}}}{K_{\text{max}} - K_{\text{min}}} \quad (11)$$

式中: U 表示开张比; ΔK_{eff} 表示有效应力强度因子变化量; ΔK 表示应力强度因子变化量; K_{max} 与 K_{min} 分别表示应力强度因子最大值与最小值; K_{op} 表示焊趾裂纹开张的应力强度因子。

引入应力比的概念,可以通过公式(12)对 ΔK_{eff} 的计算公式进行改进:

$$\Delta K_{\text{eff}} = UK_{\text{max}}(1-R) \quad (12)$$

式中 R 表示应力比^[19]。

在以有效应力强度作为焊趾表面裂纹扩展的驱动力进行研究时,可以通过有效的应力强度因子 ΔK_{eff} 对裂纹扩展的有效能量 G_{eff} 进行计算:

$$G_{\text{eff}} = \frac{\Delta K_{\text{eff}}^2}{E'} \quad (13)$$

完成上述计算后,对焊趾表面裂纹扩展形态进行检测计算。焊趾表面半椭圆裂纹结构示意图如图3所示。

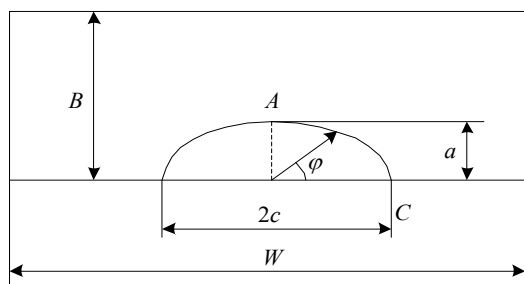


图3 椭圆形焊趾表面裂纹

Fig.3 Surface cracks of elliptical weld toe

图3中: A 为最深的裂纹位置; C 表示焊趾裂纹与运输机结构表面的交点; B 表示运输机板材结构的厚度, W 表示其宽度; a 与 c 分别表示裂纹的半短轴与半长轴; φ 表示裂纹的参数角度。

当焊趾表面裂纹发生扩展时,裂纹的最深位置 A 与表面位置 C 处的有效能量释放量相等,因此存在:

$$G_{A\text{eff}} = G_{C\text{eff}} \quad (14)$$

将公式(12)与公式(13)代入到公式(14),可以得到:

$$U_A^2 K_{A\text{max}}^2 E'_C = U_C^2 K_{C\text{max}}^2 E'_A \quad (15)$$

式中: U_A 与 U_C 分别表示位置 A 处与 C 处的开张比; $K_{A\text{max}}$ 与 $K_{C\text{max}}$ 分别表示位置 A 处与 C 处最大应力强度因子; E'_A 与 E'_C 分别表示位置 A 处与 C 处的等效弹性模量^[20]。

由于运输机需要支持持续的负载运输任务,在外荷载的作用下,裂纹表面位置 C 始终处于平面应力状态,而位置 A 则处于平面应变状态,应力从位置 A 到位置 C 的过渡计算公式为:

$$E'_A = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (16)$$

$$E'_C = E \quad (17)$$

位置 A 到位置 C 的开张比近似值可以表示为:

$$U_C/U_A \approx 0.9 \quad (18)$$

将式(16)、(17)、(18)代入式(15)中,可以得到:

$$(1-\nu^2)K_{A\text{max}}^2 = 0.81K_{C\text{max}}^2 \quad (19)$$

对于运输机结构的焊趾裂纹,前沿处位置应力强度因子 K 是与裂纹纵横比 a/c 与深度比 a/B 相关的函数,将位置 A 与位置 C 处的最大应力强度因子计算公式代入式(18)中,可明确裂纹纵横比 a/c 与深度比 a/B 的关系。因此,已知板厚 B 可以得到裂纹半轴长度 a 与 c 的函数关系,从而对裂纹扩展形态进行检测,完成裂纹扩展形态的检测。

3 实验分析

为了验证链板式连续运输机焊趾表面裂纹扩展形态检测方法的应用效果,对方法的检测性能进行了验证。

3.1 实验准备

此次实验所用的链板式连续运输机铸件以Q345钢材为主结构材料,在焊接过程总会产生冷裂纹与焊接变形,尤其在冬季产生的裂纹更加严重。链板式连续运输机中Q345钢材的化学成分与基本力学参数如表1与表2所示。

表1 Q345的化学组成

Tab.1 Chemical composition of Q345

| 元素 | C | Si | Mn | P | S |
|--------|------|------|------|------|------|
| 质量分数/% | 0.16 | 0.35 | 1.34 | 0.16 | 0.06 |

表2 Q345的基本力学参数

Tab.2 Basic mechanical parameters of Q345

| 参数 | 数值 |
|----------|-------------------|
| 屈服强度/MPa | 345 |
| 抗拉强度/MPa | 416 |
| 弹性模量/MPa | 2.1×10^5 |
| 泊松比 | 0.3 |

采用 CO_2 气体保护焊,焊丝为 $\phi 1.6 \text{ mm}$ 的ER50-6焊丝。焊趾表面裂纹如图4所示。

此次实验在SDS100伺服疲劳试验机上完成,图像定位结果如图5所示。

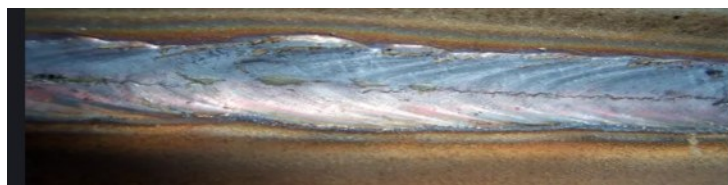


图 4 焊趾表面裂纹

Fig.4 Surface cracks of weld toe



图 5 图像定位结果图

Fig.5 Map of image positioning result

3.2 实验结果分析

3.2.1 裂纹区域定位精度

由于在进行裂纹扩展形态检测之前需要首先对裂纹区域进行定位,因此裂纹区域定位结果会对最终的形态检测结果产生一定的影响,裂纹区域定位精度越高则后续的形态检测效果越好。为了充分验证本文方法的定位效果,将本文方法与文献[3]提出基于 XFEM 的焊接裂缝扩展形态检测方法、文献[4]提出基于无网格和水平集耦合的焊接裂缝扩展形态检测方法进行对比验证,3 种方法的裂纹区域定位精度对比结果如图 6 所示。

从图 6 所示的裂纹区域定位精度对比结果中可以看出,本文方法定位精度曲线结果始终位于 2 种对比方法的上方,并且定位精度曲线波动幅度较小,说明本方法能够在提高裂纹区域定位精度的情况下,保持较高的定位稳定性。本方法的定位精度始终保持在 95 % 以上的水平,而基于 XFEM 方法与基于无网格和水平集耦合方法的定位精度最高仅达到 80 %,说明本方法能够对焊趾表面裂纹区域进行精准的定位。

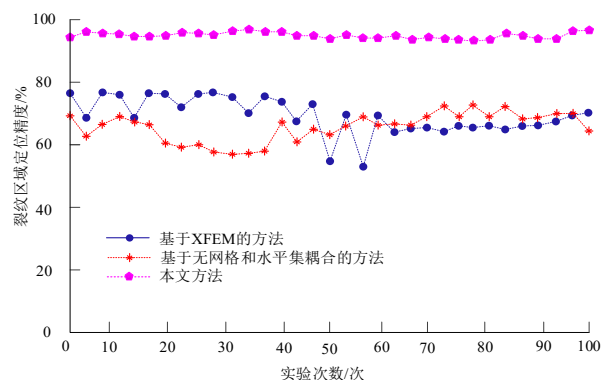


图 6 裂纹区域定位精度

Fig.6 Positioning accuracy of crack area

3.2.2 裂纹扩展形态检测精度

为了进一步验证本方法对焊趾表面裂纹扩展行为的检测效果,以不同疲劳寿命下裂纹扩展深度作为扩展形态发展指标,将 3 种方法的检测结果与实测结果进行对比,裂纹扩展形态检测精度结果如图 7 所示。

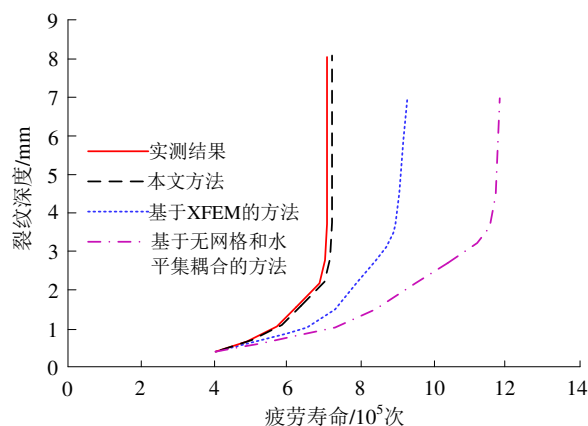


图 7 裂纹扩展形态检测精度

Fig.7 Detection accuracy of crack propagation morphology

观察图 7 所示的检测精度对比结果可以看出,3 种检测方法中,本方法的裂纹深度检测结果与实测结果最为接近;而基于 XFEM 方法与基于无网格和

水平集耦合方法的检测结果与实测结果存在明显的差距,尤其是基于无网格和水平集耦合方法,其与实测结果的差距最大。

4 结语

焊趾裂纹检测作为保障焊接工艺安全的必要手段,是链板式连续运输机出厂时必要的检测流程。为了进一步提高检测的精度,提出链板式连续运输机焊趾表面裂纹扩展形态检测方法,并对方法的检测性能进行了验证,证明该方法在进行焊趾表面裂纹扩展形态检测时具有较高的裂纹区域定位精度与裂纹扩展形态检测精度。与基于XFEM的检测方法相比,本方法的裂纹区域定位精度显著提高,始终保持在95%以上的水平;与基于XFEM和水平集耦合的检测方法相比,本文方法的裂纹扩展形态检测结果与实测结果最为接近;说明本文方法的裂纹扩展形态检测性能得到了有效提升。

参考文献

- [1] 成立夫,魏国前,胡珂,等. 焊趾微观短裂纹成核及其早期扩展的寿命仿真[J]. 机械强度, 2021, 43(6): 1436-1441.
- [2] 于瑾佳,王琳. 磷酸盐-柠檬酸盐体系中Q235钢焊接接头磷化处理及耐蚀性[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(2): 42-48.
- [3] 周东亮,魏国前,胡珂. 基于XFEM的焊接结构裂纹萌生扩展仿真研究[J]. 电焊机, 2019, 49(3): 62-65.
- [4] 刘晖,申韶丁,雷电. 焊接结构裂纹扩展分析的无网格和水平集耦合方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 106-112.
- [5] 杨燕,陈高科,周杰. 基于高斯权重衰减的迭代优化去雾算法[J]. 自动化学报, 2019, 45(4): 819-828.
- [6] 赵莉苹,庄玉册. 高频超声射频图像梯度信息盲提取仿真研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(12): 151-154.
- [7] 张玉杰,杨建华,许玲萍. 激光熔覆技术在表面失效机械件中的应用[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(8): 39-43.
- [8] 唐忠智,闫兵,黄燕,等. 一种基于双预筛选改进的SIFT图像立体匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 190-199.
- [9] Abe T, Arakawa M, Akebono H, et al. Analysis of fatigue crack propagation behavior of structures with one-sided welding in fillet welded joint for load-carrying type[J]. Materials transactions, 2022, 63(7): 1037-1045.
- [10] 闫中广,闫志鸿,谷文涵. 基于同位深度-灰度图像的焊缝成形质量检测[J]. 热加工工艺, 2021, 50(15): 102-105, 111.
- [11] 张栩培,贺占庄,马钟,等. 一种自标签特征点异源图像目标检测算法[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(5): 558-568.
- [12] 王通典,刘洁瑜,吴宗收,等. 基于多尺度光流融合特征点视觉-惯性SLAM方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 977-985.
- [13] 程鹏飞,周修庄,唐玲,等. 一种面向弱纹理图像的特征点描述子[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(6): 13-19.
- [14] 龙涛,苏畅,王建. 面向细节保持的特征描述子提取算法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 220-227.
- [15] 陈青,伍东升. 基于SIFT变换和DWT-SVD的自适应图像水印算法[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 254-259.
- [16] Kong L. SIFT feature-based video camera boundary detection algorithm[J]. Complexity, 2021, 32(5): 1-11.
- [17] 余茜,魏国前,李山山,等. 考虑形状比的焊趾裂纹扩展行为的数值仿真分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 107-112, 125, 166.
- [18] 谭润泽,李晓彬,乐京霞. 基于结构应力法的薄板对接焊缝疲劳性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(10): 81-85.
- [19] 芦丽莉,李婷,朱忠尹. AZ31镁合金搅拌摩擦焊接头腐蚀疲劳裂纹扩展行为[J]. 焊接, 2021(5): 29-35, 64, 65.
- [20] 赵鲁春,张子威,李顶河. 双材料界面裂纹动态扩展的数值模拟[J]. 机械强度, 2021, 43(5): 1213-1220.