

# 基于红外热像法的 SUS301L-Q235B 异种材料 点焊接头疲劳强度快速评定

孙杨<sup>1,2</sup>, 刘亚良<sup>1,2</sup>, 李赫<sup>1,2</sup>, 杨鑫华<sup>1,2</sup>, 许鸿吉<sup>1,2</sup>

(1. 大连交通大学, 大连, 116028; 2. 辽宁省轨道交通装备焊接与可靠性重点实验室, 大连, 116028)

**摘要:** 借助高性能红外热像仪对 SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头的 SUS301L 不锈钢侧熔核及塑性环表面局部热点进行监测, 建立了异种材料点焊接头温升斜率与疲劳极限间的定量关系, 提出了一种基于温升斜率转折点预测异种材料点焊接头疲劳极限的方法. 结果表明, SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头向 Q235B 侧发生了较严重的熔核偏移, 导致不锈钢侧承载能力降低; 点焊接头在高频循环剪切拉伸作用下, SUS301L 不锈钢侧熔核及塑性环表面热点表现出“4 个阶段”的温度演化特征; 利用红外热像法预测的疲劳极限为 5.569 kN, 采用传统阶梯法试验获得的疲劳极限为 5.875 kN, 预测值与试验值之间的误差为 5.21%, 具有较高的一致性. 所提出的疲劳极限快速预测方法能够克服传统疲劳试验方法的局限性, 实现异种材料点焊接头疲劳极限的非接触、非破坏快速预测, 具有重要的工程意义和科研价值.

**关键词:** 红外热像法; 异种材料; 条件疲劳强度; 快速评定; 点焊

**中图分类号:** TG 409      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190304001

## 0 序言

高速、重载、节能、安全、舒适是现代铁道交通运输的主要特点, 而结构轻量化是实现上述目标的有效途径. SUS301L 奥氏体不锈钢凭借其自重轻、防腐蚀性好、抗拉强度高、美观安全等优点在列车上获得广泛应用<sup>[1]</sup>; Q235 低碳钢可焊性好, 且具有淬硬性, 其绝大多数焊接接头和热影响区硬度都高于母材<sup>[2]</sup>. 部分车体部件采用不锈钢与碳钢异种材料点焊的连接方法, 既能综合利用二者优势, 又能克服传统薄板电弧焊因焊接变形大而导致接头强度降低的问题. 但是两种材料的过载力学性能和疲劳性能, 以及断裂机制完全不同, 故二者点焊接头疲劳强度的可靠评定是其结构设计过程中极其重要的一个环节, 然而传统的疲劳试验方法试验周期长、所需试件多、数据离散度大, 诸多因素使得疲劳强度的准确评定成为一个棘手的实际问题<sup>[3-4]</sup>.

温度变化, 作为疲劳过程中的伴生现象, 对疲劳行为热耗散效应研究和热力学分析至关重要<sup>[5]</sup>.

可以通过分析材料疲劳过程中的温度变化规律, 来研究材料疲劳破坏过程中的物理状态变化, 进而预测特定循环次数下材料或者结构所能承受的极限载荷, 即疲劳极限. 近年来, 红外热像法凭借其全场、实时、非接触和非破坏等优点逐步受到国内外学者的青睐, 并将其应用到疲劳极限的研究当中. Rosa 等人<sup>[6]</sup>发现材料的疲劳极限可以通过绘制不同载荷水平下温度稳定阶段的温升值与载荷之间的直线关系来确定. Luong 等人<sup>[7]</sup>研究发现, 非塑性效应(如粘性效应)同样会引起温度变化, 通过将疲劳极限之上和之下的两组温度数据进行线性拟合, 得到两条直线的交点就是材料的疲劳极限. Crupi 等人<sup>[8]</sup>利用红外热成像技术研究了 AH36 钢对焊接头的疲劳行为并预测其疲劳极限. Zhang 等人<sup>[9]</sup>借助红外热成像技术研究了 AZ31B 镁合金焊接接头高周疲劳行为.

点焊接头, 尤其是异种材料点焊接头, 一方面容易产生熔核偏移; 另一方面由于循环载荷的作用点位于熔核中心内部, 熔核表面在疲劳过程中的温度演化现象难以监测, 利用疲劳温度演化规律对异种材料点焊接头疲劳极限及强度的研究尚未见报道. 因此, 以红外热像法为出发点, 并结合热力学、

金属学、焊接结构学,以及统计学等交叉学科的基本理论,对 SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头的不锈钢侧熔核及塑性环表面局部热点进行监测,建立了异种材料点焊接头温升斜率与疲劳强度间的定量关系,提出了一种基于温升斜率转折点评定异种材料点焊接头疲劳强度的方法。对于异种材料点焊结构的服役行为研究具有重要工程意义和科研价值。

## 1 基本原理

Peyroux 等人<sup>[10]</sup>最早提出了完整的热-力耦合理论,成为支撑红外热成像技术的理论基础,以及约束热物理量与应力间映射关系的核心依据,其在参考构型中的描述性方程如公式 (1),即

$$\rho_0 C_T \dot{\theta} - k \nabla_0^2 \theta = \rho_0 h + w'_{\text{ctm}} + w'_c \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$  为参考构型中的密度;  $k$  为热传导系数;  $C_T$  为定压比热;  $\theta$  为绝对温度;  $\rho_0 h$  为初始构型上的外部热源,包括像焦耳效应、红外辐射、超声等;  $w'_{\text{ctm}}$  为热弹性热-力耦合效应;  $w'_c$  为能量耗散密度,其物理意义是表征非等熵的不可逆过程和现象,包括微尺度上的破坏、应变硬化、塑性变形等。

一般认为,没有外部热源作用时,材料在疲劳破坏过程中的温度变化主要受热弹性响应、塑性响应和热传导三方面的影响。其中热弹性响应表现为在弹性范围内,当应力(或应变)增大时温度降低,当应力(或应变)减小时温度升高。即据 Biot 公式描述,在绝热条件下,即

$$\Delta T_e = T - T_0 = -KT \frac{E}{1-2\nu} \Delta \varepsilon_i^e = -KT \Delta \sigma_i^e \quad (2)$$

式中:  $K$  为材料常数;  $\Delta T_e$  为温度  $T$  时的热弹性温度变化;  $T$  为  $t$  时刻温度;  $T_0$  为初始时温度;  $\Delta \varepsilon_i^e$  和

$\Delta \sigma_i^e$  分别为主应变和主应力的增量;  $\nu$  为泊松比,  $E$  为弹性模量。在循环载荷作用下,材料温度在每个循环内都会出现这种波动现象,但这种周期性温度波动并不会影响材料的平均温度。

热弹性响应将材料的温度变化与材料弹性范围内的应力—应变状态联系起来,而材料疲劳过程中的塑性响应,则将温度变化与材料塑性变形(塑性功)联系起来,它和热传导作用共同主导疲劳破坏过程中材料表现的平均温度的变化。只有疲劳损伤机制(如塑性累计)会使温升机制出现转折,而非损伤机制(如弹性效应)不会导致温升机制的转折。

立足于上述红外热像技术的基本原理,对 SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头的 SUS301L 不锈钢侧熔核及塑性环表面局部热点进行监测,并研究其疲劳过程温度演化规律,将温升斜率出现转折所对应的载荷大小作为疲劳损伤机制发生改变的临界点,并以此评定异种材料点焊接头的疲劳强度。

## 2 试验材料与设备

试验选用厚度均为 4 mm 的 SUS301L 不锈钢和 Q235B 低碳钢,进行异种材料的搭接双面单点焊,其名义化学成分及主要力学性能如表 1、表 2 所示。为了保证焊接接头质量,施焊前需对焊件表面进行清理,以除掉表面脏物与氧化膜,获得小而均匀一致的接触电阻,这是避免电极粘结、喷溅,保证点焊质量和试验稳定性的主要前提。点焊试验在悬挂式点焊机上进行,电极材料为 CrZrCu,电极直径 22 mm,电极端头球面半径为 100 mm,电极行程为 30 mm。点焊后按照 JIS Z3140—2000, JIS Z3139—2000 标准进行外观检验、平滑度检验及断面检验。

表 1 试验材料名义化学成分(质量分数,%)

Table 1 Nominal chemical compositions of the test materials

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Fe
SUS301L-DLT	≤ 0.12	≤ 0.08	≤ 2.00	≤ 0.035	≤ 0.03	17~19	8~11	0.5~0.8	余量
Q235B	0.12~0.20	≤ 0.30	0.30~0.67	≤ 0.045	≤ 0.045	—	—	—	—

SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头疲劳温度演化试验在 PLG-200D 高频疲劳试验机上进行,依据 ISO 14234-2003 标准,疲劳试样尺寸如图 1 所示,试样纵向为板材轧制方向,板状试验片边缘需

适当修整,试件要求对称并具有足够的精度。

为了提高金属表面的辐射率,在疲劳试样表面喷上一层均匀的黑色哑光漆,其辐射率为 0.9。疲劳试验时应力比  $R = 0.1$ ,以正弦波方式加载,指定寿

表 2 试验材料主要力学性能

Table 2 Major mechanical properties of the test materials

材料	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{Pa}$	断后伸长率 $A(\%)$
SUS301L-DLT	$\geq 345$	$\geq 689$	$1.8 \times 10^{11}$	$\geq 40$
Q235B	$\geq 235$	375 ~ 500	$2.1 \times 10^{11}$	$\geq 26$

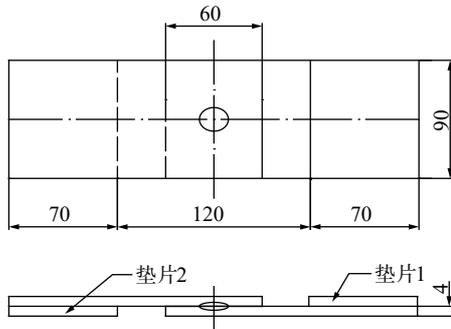


图 1 点焊接头疲劳试样尺寸 (mm)

Fig. 1 Fatigue specimen size of spot welded joint

命为 IIW 规范中通用的是 200 万次的条件疲劳强度 (FAT 值). 进行疲劳试验的同时, 采用美国 Fluke 公司生产的 Ti450 红外热像仪记录点焊接头不锈钢侧熔核及塑性环局部热点的温度变化, 热像仪灵敏度不大于  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 温度范围  $-20 \sim 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 图像捕获频率为  $9\text{ Hz}$ , 红外热像仪放置在距离试样  $30\text{ cm}$  处, 垂直试样表面拍摄, 试验系统如图 2 所示.



图 2 疲劳试验测温系统

Fig. 2 Temperature measurement system of the fatigue test

### 3 结果与讨论

#### 3.1 力学性能测试

为了得到 SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头的拉伸性能参数以确定疲劳试验所加初始载荷的水平, 分别取三组试样进行静载拉伸试验, 测得其

抗拉强度如表 3 所示. 可以看出, 在试验所选取的工艺参数下, 点焊接头因偏心载荷作用发生剪切拉伸断裂, 其抗剪负荷均值为  $31.641\ 7\text{ kN}$ .

表 3 SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头静载拉伸性能

Table 3 Static load stretch performance of the SUS301L-Q235B dissimilar materials spot welded joint

接头类型	抗剪负荷 $P_t/\text{kN}$	抗剪负荷均值 $\overline{P}_t/\text{kN}$
搭接点焊	32.815 6	31.641 7
	32.000 0	
	30.109 4	

拉伸试验时, 由于板厚较厚, 母材及热影响区强度较高, 点焊接头试样均直接发生熔核的剪切撕裂, 且断面凸向 SUS301L 不锈钢一侧.

#### 3.2 基于红外热像法的条件疲劳强度快速评定

根据 3.1 小节中得到的静载拉伸抗拉强度大小及经验, 对 SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头疲劳试样在不同载荷水平下进行高频拉-拉载荷疲劳试验, 分别选取  $5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0\text{ kN}$  共 7 个载荷水平. 试验同时, 借助高性能红外热像仪对点焊接头 SUS301L 不锈钢侧熔核及塑性环表面的局部热点进行监测, 记录下点焊接头在整个疲劳试验过程中的温度演化数据. 为了统一分析比较, 将每一时刻点焊接头试样 SUS301L 不锈钢侧熔核及塑性环表面局部热点的最高温度与环境最高温度的差值作为疲劳温升  $\Delta T$ , 以循环周次  $n$  为横坐标, 以疲劳温升  $\Delta T$  为纵坐标, 建立各个点焊接头试样疲劳过程的原始温度演化曲线. 由于弹性效应的存在, 点焊接头疲劳过程的原始温度是一个不断震荡的过程, 需借助 Matlab 软件对其进行滤波处理, 以消除弹性效应获得点焊接头疲劳过程温度演化的整体趋势. 以载荷水平为  $7.0\text{ kN}$  的试样为例, 经 Matlab 滤波后得到的整体温度演化趋势如图 3 所示, 其中 (a) 为点焊接头试样在可见光下拍摄的照片, (b) ~ (f) 为关键点所对应的红外热像图. 可以看出, SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头在循环载荷作用下熔核及塑性环表面局部热点的温度变化分 4 个阶段, 即由 (b) ~ (c) 的快速上升阶段、由 (c) ~ (d) 的下降阶段、由 (d) ~ (f) 稳定上升阶段以及随后的自然冷却阶段, 这与报道中有关纯金属材料“3 个阶段”<sup>[5-6, 10]</sup> 及对接接头“5 个阶段”<sup>[8, 11]</sup> 的典型特征存在较明

显的差异. 首先, 整个疲劳过程的疲劳温升值不大, 这是由于点焊接头本身的结构特点及试样的几何尺寸所决定的, 点焊接头承受循环剪切拉伸的作用点即热源点位于熔核中心, 经过 4 mm 板厚传热到试样表面, 散热较多, 只能监测到几度甚至零点几度温升值, 但这不影响疲劳温度演化整体趋势及由此而展开的深入研究; 再次, 经过第

一阶段温度快速升高所形成的 (c) 处峰值远低于最终断裂对应的 (f) 处峰值, 这是由于点焊接头与纯金属或对接接头试样相比, 承载能力低, 施加荷载小, 外界输入的机械能少; 另外, 未出现温度稳定的平台阶段, 对于占据整个疲劳过程绝大部分周次的第三阶段, 温度是一个稳定升高的过程, 且整个第三阶段的疲劳温升斜率是一个稳定值.

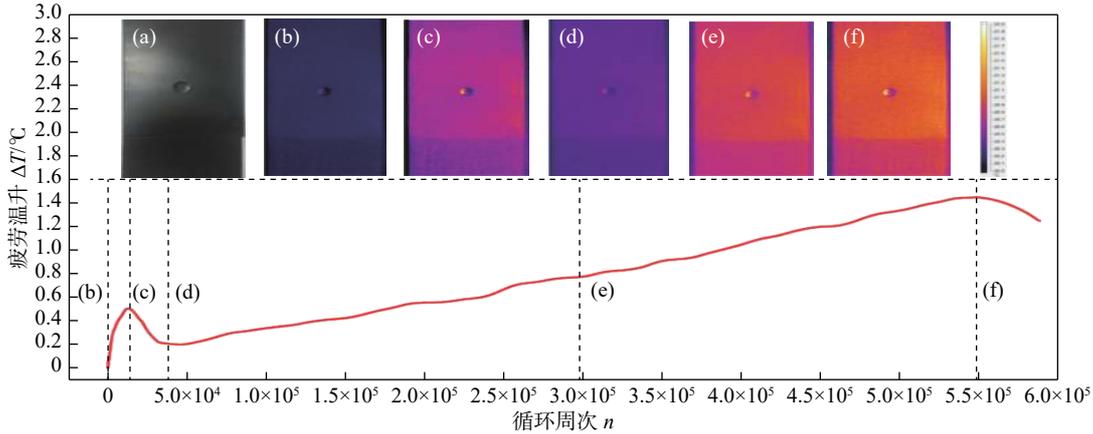


图 3 载荷水平为 7.0 kN 的试样疲劳温升与循环周次关系曲线图

Fig. 3 Relationship curve of fatigue temperature revolution versus cycles under the load level of 7.0 kN

为了深入研究疲劳温升与疲劳强度的内在关系, 将 7 个点焊接头试样的疲劳温升与循环周次的关系曲线建立在同一坐标系下, 如图 4 所示. 可以看出, 随着载荷水平的升高, 疲劳温升的峰值逐渐升高, 且温度变化率即单位周次升高的温度越大. 其中, 载荷水平为 5.0, 6.5 kN 的试样在循环周次

达到 200 万的预设次数时未发生断裂, 其疲劳温升是一个震荡平台, 温度改变量较小; 而发生疲劳断裂的试样均出现了显著温度变化. 因此, 尝试将温升斜率出现转折所对应的载荷大小作为疲劳损伤机制发生改变的临界点, 并以此评定异种材料点焊接头的疲劳强度.

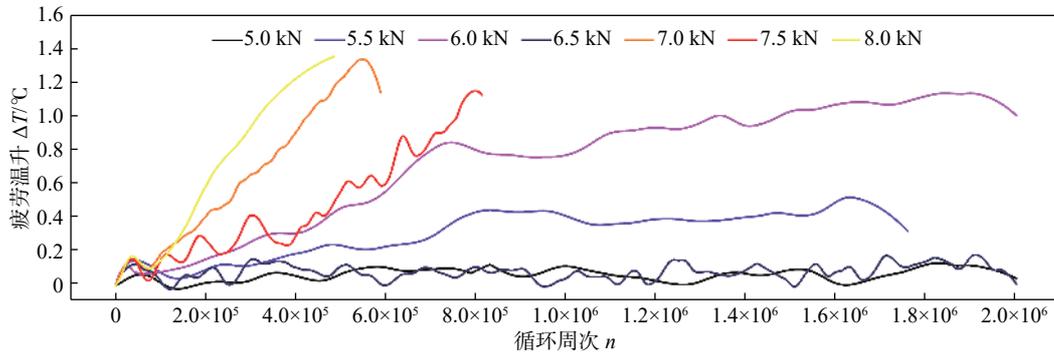


图 4 七组载荷水平下疲劳温升与循环周次关系曲线图

Fig. 4 Relationship curve of fatigue temperature revolution versus cycles of the seven load levels

根据图 4 所得到疲劳温升与循环周次关系曲线图, 对温升曲线的第三阶段进行线性拟合, 并计算每个点焊接头试样所对应温度稳定升高的第三阶段每百万次的温度改变量, 即第三阶段的温升斜率, 并建立第三阶段温升斜率与载荷水平间的关系

图, 如图 5 所示.

不难看出, 载荷水平为 5.0, 5.5, 6.5 kN 所对应的温升斜率很微小, 处于同一数量级, 其余 4 个载荷水平的试样温升斜率发生了显著变化. 为了确定这种温升斜率出现转折所对应的载荷大小, 并以

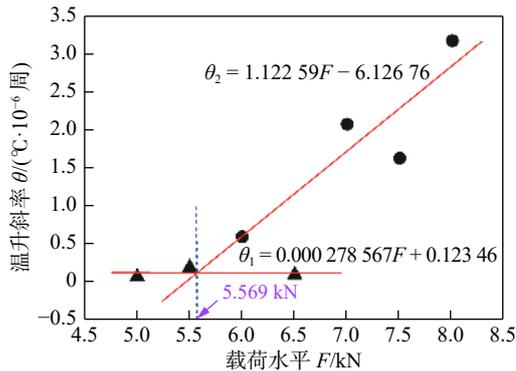


图 5 基于红外热像法的异种材料点焊接头疲劳强度评定  
Fig. 5 Fatigue strength assessment of dissimilar materials spot welded joint based on infrared thermography

此作为疲劳强度评定值,分别对两类数据进行线性拟合,即

$$\theta_1 = 0.000\ 278\ 567F + 0.123\ 46 \quad (3)$$

$$\theta_2 = 1.122\ 59F - 6.126\ 76 \quad (4)$$

两式联立,两直线交点所对应的横坐标为 5.569 kN.至此,建立了一种基于温升斜率转折点评定异种材料点焊接头疲劳强度的方法.

### 3.3 升降法疲劳验证试验

为了验证上述疲劳强度评定方法的真实性与可靠性,根据 GB/T 15111—94《点焊接头剪切拉伸疲劳试验方法》标准,采用  $2 \times 10^6$  循环周次作为判别标准开展疲劳试验.当试样超过该循环周次而未产生明显的宏观裂纹,视为“通过”,否则视为“不通过”.根据经验及点焊接头静载拉伸试验所得抗拉强度的大小确定疲劳试验初始载荷大小,疲劳试验中施加的疲劳载荷幅度从 7.0 kN 开始,若在前一次试验中试件没有通过,则在下一次试验中将载荷降低 0.5 kN;反之,则增加 0.5 kN.按照此规则在相同的加载频率与应力比下重复进行疲劳试验,根据 GB/T 24176—2009《金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法》,最少选取 8 根试样用于解释试验,在 4 个等间距的载荷水平下,每个载荷水平测试两个试样,试验结果如图 6 所示.

对试验数据进行统计分析,可以得到该异种材料点焊接头在  $2 \times 10^6$  循环周次下所对应的疲劳强度,即

$$\frac{7.0+6.5}{2} + \frac{6.5+6.0}{2} + \frac{5.5+5.0}{2} + \frac{5.5+5.0}{2} = 5.875\text{ kN} \quad (5)$$

将利用所提出方法评定的疲劳强度值与试验

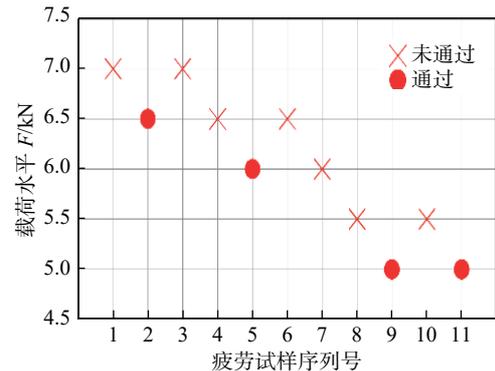


图 6 升降法试验结果

Fig. 6 Results of the stair test

值相比较,并计算其误差,即

$$\delta = \frac{5.875 - 5.569}{5.875} \times 100\% = 5.21\% \quad (6)$$

预测值与试验值之前的误差为 5.21%,具有较高的一致性,能够实现异种材料点焊接头疲劳强度的快速评定,同时,所提出方法有望为不等厚异种材料等非均质焊接结构服役行为的研究提供理论指导和技术支持.

## 4 结论

(1) 借助红外热像法对 SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头的疲劳行为进行研究,提出了一种基于温升斜率转折点评定异种材料点焊接头疲劳强度的方法.

(2) SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头在循环载荷作用下熔核及塑性环表面局部热点的温度变化分 4 个阶段,随着载荷水平的升高,疲劳温升的峰值逐渐升高,且温度变化率即单位周次升高的温度越大.

(3) 利用所提出的方法获得的点焊接头疲劳强度预测值为 5.569 kN.随后进行了升降法疲劳验证试验,得到该异种材料点焊接头在  $2 \times 10^6$  循环周次下所对应的条件疲劳强度为 5.875 kN,预测值与试验值之间的误差为 5.21%,具有较高的一致性.

## 参考文献

- [1] 朱国仁,陈松,李蒙蒙. SUS301L 不锈钢非熔透型激光搭接焊缝的疲劳特性分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 14-19.  
Zhu Guoren, Chen Song, Li Mengmeng. Study on fatigue performance of stainless steel non-penetration laser lap welding of

- SUS301L stainless body[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(4): 14 – 19.
- [2] 王希靖, 邓向槟, 王磊. Q235 钢板与 6082 铝合金搅拌摩擦焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2016, 37(1): 99 – 103.  
Wang Xijing, Deng Xiangbin, Wang Lei. Parametric study on friction stir welding of Q235 steel with 6082 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(1): 99 – 103.
- [3] Liu Y L, Zou L, Sun Y B, *et al.* Evaluation model of aluminum alloy welded joint low-cycle fatigue data based on information entropy[J]. Entropy, 2017, 19(1): 1 – 14.
- [4] 刘亚良, 孙屹博, 邹丽, 等. 基于信息熵的铝合金焊接接头疲劳寿命分析方法 [J]. 焊接学报, 2018, 39(4): 67 – 72.  
Liu Yaliang, Sun Yibo, Zou Li, *et al.* Fatigue life analysis method of aluminum alloy welded joints based on information entropy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(4): 67 – 72.
- [5] 封硕. 基于热力学分析的疲劳损伤与寿命预测研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [6] Rosa G L, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components[J]. International journal of Fatigue, 2000, 22(1): 65 – 73.
- [7] Luong M P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique[J]. Mechanics of Materials, 1998, 28(1-4): 155 – 163.
- [8] Crupi V, Guglielmino E, Maestro M, *et al.* Fatigue analysis of butt welded AH36 steel joints: thermographic method and design S-N curve[J]. Marine Structures, 2009, 22(3): 373 – 386.
- [9] Zhang H X, Wu G H, Yan Z F, *et al.* An experimental analysis of fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy welded joint based on infrared thermography[J]. Materials and Design, 2014, 55: 785 – 791.
- [10] Peyroux R, Chrysochoos A, Licht C, *et al.* Thermomechanical couplings and pseudoelasticity of shape memory alloys[J]. International Journal of Engineering Science, 1998, 36(4): 489 – 509.
- [11] Wagner D, Ranc N, Bathias C, *et al.* Fatigue crack initiation detection by an infrared thermography method[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33(1): 12 – 21.
- [12] Yang H W, Cui Z Q, Wang W X, *et al.* Fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy electron beam welded joint based on infrared thermography[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(10): 2595 – 2602.

第一作者简介: 孙杨, 1993 年出生, 硕士; 主要从事焊接结构疲劳可靠性等方向的研究; Email: [sunyangdl@126.com](mailto:sunyangdl@126.com).

通信作者简介: 杨鑫华, 1969 年出生, 博士, 教授; Email: [yangxh@djtu.edu.cn](mailto:yangxh@djtu.edu.cn).

(编辑: 杨柳青)

### [ 上接第 38 页 ]

- [16] 崔少朋, 朱浩, 郭柱, 等. 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头变形及失效行为 [J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 27 – 30.  
Cui Shaopeng, Zhu Hao, Guo Zhu, *et al.* Deformation and failure behavior of friction stir weld joint of 7075 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 27 – 30.
- [17] 赵熠朋, 朱浩, 姜月, 等. 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头断裂机理 [J]. 焊接学报, 2017, 38(11): 77 – 81.  
Zhao Yipeng, Zhu Hao, Jiang Yue, *et al.* Fracture mechanism on friction stir welding joint of 7075 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(11): 77 – 81.
- [18] Tan Ming, Quan Gaofeng, Liu Zhaoming, *et al.* Extrusion process and property of AZ31 magnesium alloy[J]. China Welding, 2019, 28(2): 10 – 14.

第一作者简介: 朱浩, 1975 年出生, 博士, 教授; 主要从事金属材料搅拌摩擦焊方面的科研和教学工作; 发表论文 40 余篇; Email: [zhuhao@stdu.edu.cn](mailto:zhuhao@stdu.edu.cn).

(编辑: 王廷)