

Q345E 钢激光-电弧复合焊 T 形接头疲劳性能

姜来合格¹, 邓玉春¹, 赵娇玉², 黄凤龙², 任刚³, 黄映杰³, 高明¹

(1. 华中科技大学, 武汉光电国家研究中心, 武汉, 430074; 2. 中车齐齐哈尔车辆有限公司, 齐齐哈尔, 161000;
3. 九江中科激光技术研究院, 九江, 332005)

摘要: 为探究激光-电弧复合焊接技术在转向架结构中应用的可能性, 以 20 mm 厚的 Q345E 钢 T 形接头为研究对象, 开展了激光-电弧复合焊接试验, 并采用单点法和升降法进行疲劳性能测试. 结果表明, 当指定循环次数为 5×10^6 时, 复合焊接头的中值疲劳强度为 148.3 MPa, 循环 2×10^6 时的条件疲劳强度为 181.5 MPa, 比相应的电弧焊接头提高 39.6%, 且焊接组织更细小, 提高了裂纹萌生过程中所需的疲劳循环次数. 疲劳裂纹形貌特征表明, T 形接头的疲劳裂纹起源于封底焊缝焊趾处, 瞬断区为韧性断裂模式, 复合焊接头疲劳性能提高的原因在于其封底焊缝焊趾处具有较小的应力集中系数, 且焊缝微观组织由更为细小的晶内铁素体组成, 能够有效避免疲劳裂纹过早萌生, 并阻碍疲劳裂纹扩展.

创新点: (1) 激光-电弧复合焊 T 形接头的疲劳强度比相应的电弧焊接头提高了 39.6%.
(2) 疲劳性能提升的关键在于焊缝组织的细化和焊趾应力集中系数的降低.

关键词: 激光-电弧复合焊; T 形接头; 疲劳性能

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230613001

Fatigue properties of laser-arc hybrid welded Q345E steel T-joints

JIANG Laihege¹, DENG Yuchun¹, ZHAO Jiaoyu², HUANG Fenglong², REN Gang³,
HUANG Yingjie³, GAO Ming¹

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (WNLO), Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China; 2. CRRC Qiqihar Rolling Stock Co., Ltd, Qiqihar, 161000, China; 3. Jiujiang Institute of Advanced Laser Technology, Jiujiang, 332005, China)

Abstract: To investigate the feasibility of laser-arc hybrid welding in bogie structures, the hybrid welding of 20mm-thick Q345E steel T-joints was carried out. The fatigue properties were assessed using both the single-point method and the staircase method. The findings reveal that, at the specified 5 million cycles, the median fatigue strength of the hybrid-welded T-joint stands at 148.3 MPa. Furthermore, the conditional fatigue strength at 2 million cycles is 181.5 MPa, representing a remarkable 39.6% increase compared to the corresponding arc-welded T-joint. Analysis of the fatigue crack morphology indicates that the fatigue crack originates at the root weld toe, with the instantaneous fracture region displaying a ductile fracture mode. The enhanced fatigue properties of the hybrid-welded T-joint can be attributed to the reduced stress concentration factor at the root weld toe and the finer weld microstructure composed of the intragranular ferrite. This prevents premature fatigue crack initiation and hinders fatigue crack propagation.

Highlights: (1) The fatigue strength of the laser-arc hybrid welded T-joint marked a substantial 39.6% increase compared to the corresponding arc-welded T-joint.

(2) The pivotal factor contributing to enhanced fatigue properties was the reduction in the stress concentration factor at the root weld toe, coupled with the refinement of the weld microstructure.

Key words: laser-arc hybrid welding; T-joint; fatigue properties

0 序言

Q345E 低合金钢是铁路货车转向架的主要材料之一, 在生产中常采用熔化极非惰性气体保护电弧焊 (metal active gas, MAG) 进行焊接^[1], 针对厚板 T 形接头焊缝需要进行多层多道焊接, 但 MAG 焊存在热输入大、焊接熔深小等缺点, 焊接的过程中容易出现未熔合、焊接变形大和焊接效率低等问题^[2].

转向架结构在实际运行中长期承受循环载荷, 失效形式主要为疲劳断裂^[3-4], 研究表明, T 形接头的疲劳裂纹主要起源于焊趾位置, 要提高 MAG 焊接头的疲劳性能通常需要对焊趾进行打磨、喷丸或热矫正等处理. 马清波等人^[5]通过焊趾打磨加喷丸处理, 将 MAG 焊接头的中值疲劳极限提高了 28.2%; 陈增有等人^[6]通过 1 000 °C 热矫正将 MAG 焊接头 2×10^6 周次的中值疲劳极限从 130 MPa 提升至 177.5 MPa, 但上述处理方式增加了焊接工序的复杂性, 也相应地提高了生产成本.

激光-电弧复合焊 (laser arc hybrid welding, LAHW) 相对而言兼有激光和电弧两种热源的优势, 具有熔深大、焊接效率高等特点, 在抑制气孔、裂纹、咬边等缺陷上具有显著优势^[7-8], 在转向架焊接中具有非常广阔的应用前景, 目前已有大量研究证实 LAHW 有利于提高接头的静态力学性能^[9-11], 但相关的循环载荷数据较少, 尤其是面向大厚度材料、角焊缝形式的疲劳性能研究亟待补充.

文中以 20 mm 厚 Q345E 钢为研究对象开展 LAHW 工艺试验, 对 T 形接头的疲劳性能进行测试并分析其性能提升机理, 为促进该技术在铁路货车中的应用提供了一定的研究基础.

1 试验方法

1.1 试验设备及材料

激光-电弧复合焊接系统由额定功率 6 kW 的

IPG 光纤激光器、Fronius TPS4000-CMT 电弧焊机、Fanuc 公司的 M-710iC 型六轴机器人以及自主研发的复合焊接头组成^[12], 如图 1 所示. 激光和电弧采用旁轴复合的方式, 焊接方向分为激光引导电弧 (laser-arc, LA) 和电弧引导激光 (arc-laser, AL) 两种方式.



图 1 激光-电弧复合焊接系统

Fig. 1 Laser-arc hybrid welding system. (a) M-710iC robot; (b) YLS-6000 laser; (c) TPS4000-CMT welder; (d) laser-arc hybrid welding head

试验基板为 Q345E 低合金结构钢, 焊丝选用直径 1.2 mm 的 ER50-6 实芯焊丝, 母材及焊丝的化学成分见表 1. 如图 2 所示, T 形接头的底板厚度为 25 mm, 肋板厚度为 20 mm, 肋板开单边半 V 形坡口, 坡口角度 30°, 无钝边, 通过 5 道坡口内的填充焊和 1 道根部封底焊, 完成整个 T 形接头的焊接.

焊接时, 激光束离焦量为 0 mm, 聚焦光斑直径约 0.4 mm, 焊枪偏转角度 55°, 焊丝伸出长度 14 mm, 光丝间距 4 mm, 采用气流量 25 L/min 的 80% Ar + 20% CO₂ 混合气体保护正面熔池, 背面保护气体为纯氩气, 气流量 15 L/min.

除上述固定参数外, 其他焊接工艺参数见表 2, 由于半 V 形坡口由下至上所需填充量逐渐增大,

表 1 母材及焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of base metal and filler metal

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	Fe
Q345E	≤0.18	≤0.50	≤1.70	0.025	0.025	0.50	0.12	余量
ER50-6	0.08	1.40	0.80	0.025	0.025	0.15	—	余量

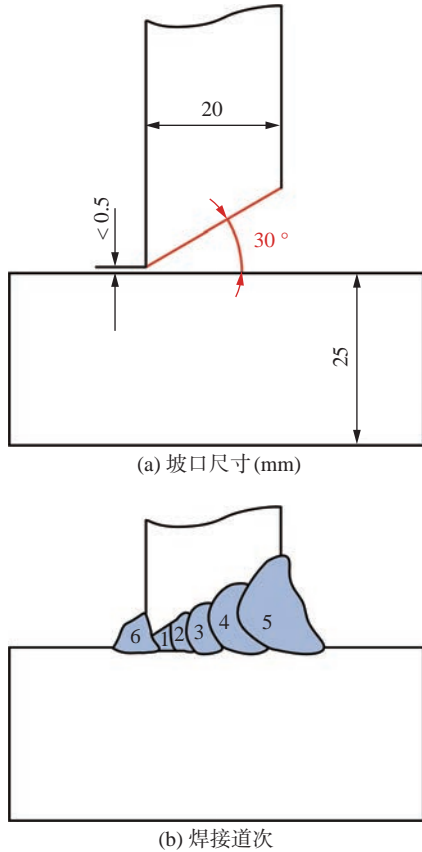


图 2 坡口尺寸及焊接道次示意图
Fig. 2 Schematic of groove size and weld pass. (a) groove dimensions; (b) welding passes

表 2 T 形接头焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters for T-joint

焊接道次	焊接方向	激光功率 P/kW	焊接速度 $v_w/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
1	LA	5.5	1.0	8.3
2	AL	2	0.4	8.3
3	LA	1.2~1.5	0.3~0.4	8.3
4	AL	1.2~1.5	0.3~0.4	8.3
5	LA	1.2	0.25	10
6	LA	1.5	0.6	8.3

在 1~5 焊接道次中逐层降低焊接速度与激光功率以逐渐增大填充量,第 6 道焊接为根部封底焊,目的在于增大根部焊脚尺寸,焊接完毕后截取焊缝截面在金相显微镜下进行显微组织观察。

1.2 疲劳试验

选取 T 形接头中段加工成疲劳试样,如图 3 所示,依据 JB/T 7716—1995《焊接接头四点弯曲疲劳试验方法》对疲劳试样进行三点弯曲疲劳试验。

循环载荷由 PLG-100 型微机控制高频疲劳试

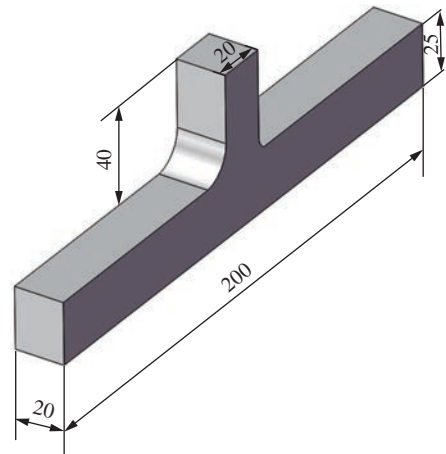


图 3 疲劳试样尺寸 (mm)
Fig. 3 Size of fatigue sample

验机施加,载荷误差为 $\pm 1\%$,设定循环应力比为 0.1,循环次数为 5×10^6 周次.疲劳测试在不同应力水平下进行,从而获得中值 S-N 曲线,其中曲线的高应力水平区由单点法拟合绘制,低应力水平区则采用升降法确定中值疲劳极限^[13],疲劳试验结束后利用扫描电子显微镜对疲劳断口形貌进行观察。

2 试验结果及分析

2.1 截面形貌及微观组织

图 4 为 T 形接头的截面形貌,可以看到 LAHW 各道焊缝之间结合良好,无气孔、未熔合等焊接缺陷.封底焊缝焊趾处的圆弧半径 R 为 2.28 mm,比正面焊缝焊趾处的圆弧半径减小了 41.7%,这表明封底焊缝焊趾处的过渡更尖锐,容易产生应力集中。

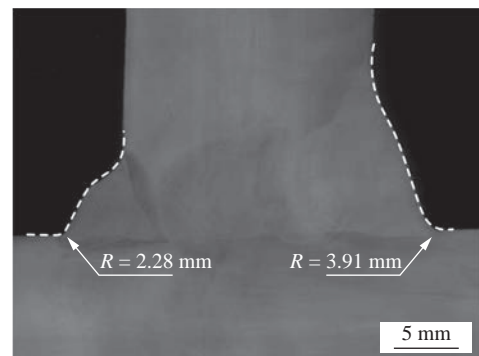


图 4 T 形接头的截面形貌
Fig. 4 Cross-section morphology of T-joint

封底焊缝焊趾附近熔合区的显微组织如图 5 所示,LAHW 熔合区显微组织为大量细小的晶内铁素体和少量先共析铁素体见图 5(a),相较于采用相

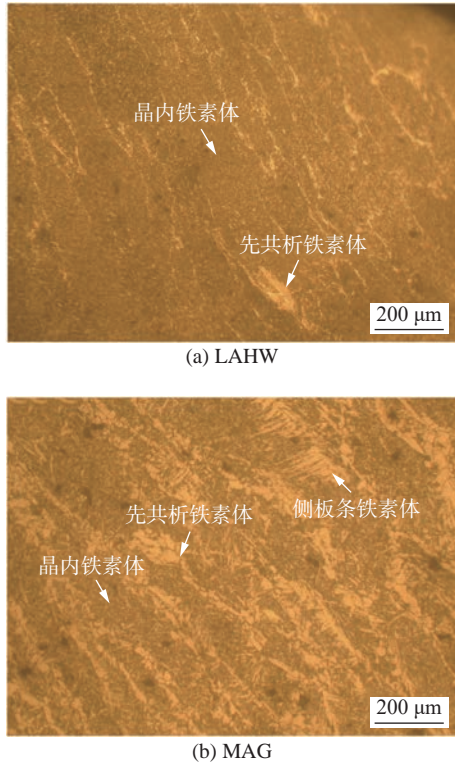


图 5 熔合区微观组织

Fig. 5 Microstructure of fusion zone. (a) LAHW; (b) MAG

同材料与试样形式的 MAG(焊接电流 300 A, 焊接速度 0.2 m/min), 接头封底焊缝焊趾附近熔合区中大量粗大的块状先共析铁素体组织见图 5(b), LAHW 焊缝显微组织明显细化.

2.2 疲劳试验结果

T 形接头的疲劳试验结果见表 3, 疲劳试件共 16 个: 9 个试件的循环次数不足 5×10^6 周次, 发生疲劳断裂; 7 个试件达到指定循环次数. 典型疲劳断裂位置如图 6 所示, 9 处疲劳裂纹全部产生于封底焊缝的焊趾边缘过渡区域的几何轮廓不连续性, 产生了较大的应力集中, 导致接头在承受疲劳载荷时更易产生疲劳裂纹.

2.3 S-N 曲线

通过升降法确定指定寿命为 5×10^6 周次时, 接头的中值疲劳强度如下

$$\sigma_{0.1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i \sigma_{ri} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{0.1}$ 为中值疲劳强度; n 为子样对个数; k 为应力水平级数减 1; σ_{ri} 为相邻两级应力水平的中值, 即 $\sigma_{ri} = (\sigma_i + \sigma_{i+1})/2$; n_i 指应力水平配对的子样对数.

图 7 为 T 形接头的疲劳极限升降图, 结果表

表 3 T 形接头疲劳试验结果
Table 3 Fatigue test results for T-joint

试件编号	最大应力 σ_m /MPa	断裂情况	循环次数 $N_f(10^6$ 周次)	断裂位置
T1	300	断裂	0.152 371	封底焊缝焊趾
T2	250	断裂	0.217 403	封底焊缝焊趾
T3	180	断裂	0.627 989	封底焊缝焊趾
T4	150	未断	5	—
T5	160	断裂	1.018 063	封底焊缝焊趾
T6	150	未断	5	—
T7	160	断裂	0.944 682	封底焊缝焊趾
T8	150	断裂	1.596 477	封底焊缝焊趾
T9	140	未断	5	—
T10	150	断裂	2.223 783	封底焊缝焊趾
T11	140	未断	5	—
T12	150	断裂	0.929 728	封底焊缝焊趾
T13	140	未断	5	—
T14	150	断裂	1.985 120	封底焊缝焊趾
T15	140	未断	5	—
T16	130	未断	5	—

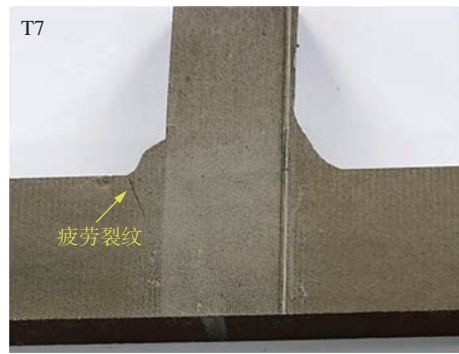


图 6 典型疲劳断裂位置

Fig. 6 Typical fatigue fracture location

明, T 形接头共有 3 级应力水平, 包括 140, 150, 160 MPa. 有效试件数为 12 个, 共有 6 个子样对, 因此, 根据式 (1) 计算得 T 形接头在指定循环次数

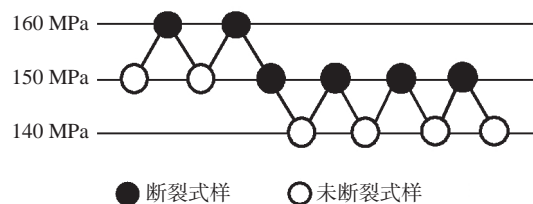


图 7 T 形接头疲劳极限升降图

Fig. 7 Fatigue limit lifting diagram of T-joint

下的中值疲劳强度为

$$\sigma_{0.1} = \frac{1}{6} \times (2 \times 155 + 4 \times 145) = 148.3 \text{ MPa} \quad (2)$$

对表 3 中的疲劳试验数据进行拟合并结合中值疲劳强度 148.3 MPa, 获得 T 形接头的中值 S-N 曲线, 其中名义应力 S 用最大应力 σ_m 来表示, 横纵坐标均以 10 为底的对数形式。

图 8 为 LAHW 接头的中值 S-N 曲线, 并与文献 [6,14] 中转向架用钢的 T 形接头疲劳性能进行比较, 其中, b 为基材厚度, 在 Q345E 复合接头 S-N 曲线的低寿命区, 最大应力与疲劳循环次数在双对数坐标下呈线性关系, 线性拟合度 0.91, 具体拟合结果如下

$$\lg \sigma_m = 3.33 - 0.17 \lg N_f \quad (3)$$

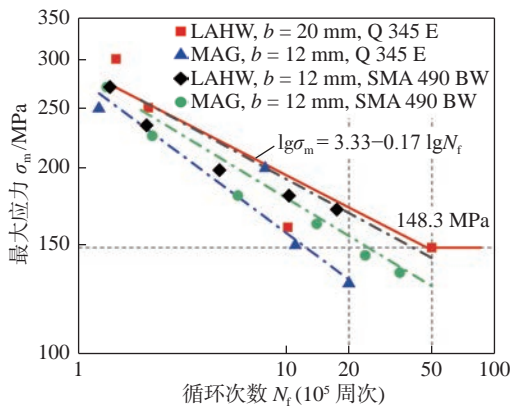


图 8 T 形接头的中值 S-N 曲线

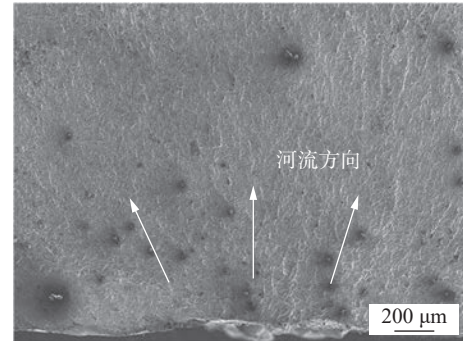
Fig. 8 Fatigue S-N curve for 50% survival rate of T-joint

对比 Q345E 钢和 SMA490BW 耐候钢两种转向架用材料可以发现, LAHW 获得的 T 形接头的疲劳强度均高于 MAG 焊接头, 当循环次数为 2×10^6 周次, Q345E 的 LAHW 接头的条件疲劳强度为 181.5 MPa, 相较于 MAG 焊接头增加 51.5 MPa, 疲劳强度提高了 39.6%, 并且略高于 SMA490BW 耐候钢的 LAHW 接头^[14]。

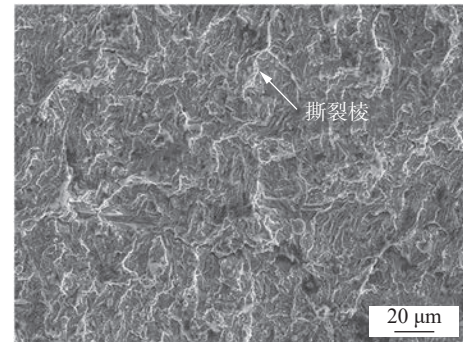
2.4 疲劳断口形貌

图 9 为 LAHW 获得的 T 形接头疲劳试样封底焊缝焊趾处的断口形貌, 图 9(a) 中疲劳裂纹萌生于材料表面, 在封底焊缝焊趾的熔合区边缘处启裂, 裂纹以疲劳源为中心向周围区域径向扩展形成撕裂棱; 随着载荷继续循环加载, 扩展区呈现出明显

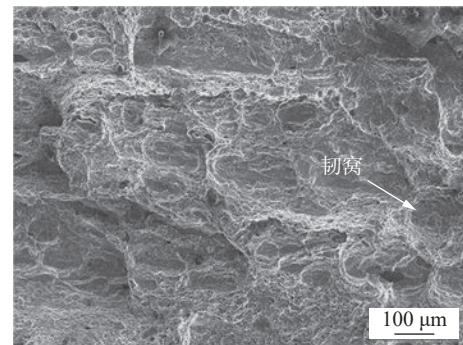
的疲劳辉纹特征^[15] 见图 9(b), 高低不平的撕裂棱附近分布密集细长的疲劳辉纹, 这意味着疲劳裂纹在 LAHW 焊缝中扩展时受到的阻碍较大, 需要较多的动能; 图 9(c) 为疲劳断裂的瞬态破坏区, 大量的韧窝表明该区域的断裂模式为韧性断裂。



(a) 启裂区



(b) 扩展区



(c) 瞬断区

图 9 T 形接头疲劳断口形貌

Fig. 9 Fatigue fracture morphology of T-joint. (a) crack initiation region; (b) crack propagation region; (c) instantaneous fracture region

2.5 疲劳性能的提升机理

T 形接头的疲劳裂纹主要萌生于应力集中的封底焊缝处, 应力集中系数反映了应力集中程度, 即

$$K_t = 1 + \frac{1 - \exp\left[-0.9 \sqrt{\frac{h+b}{h}} (\pi - \theta)\right]}{1 - \exp\left[-0.9 \sqrt{\frac{h+b}{h}} \cdot \frac{\pi}{2}\right]} \cdot \left[\frac{1}{2.8 \cdot \frac{h+b}{b-2}} \cdot \frac{h}{R} \right]^{0.65} \quad (4)$$

式中: K_t 为应力集中系数; h 为焊脚尺寸; b 为基材厚度; θ 为焊趾角度; R 为焊趾曲率半径。

焊趾的应力集中系数见表4, 可得 LAHW 接头封底焊缝焊趾处的应力集中系数 $K_t=1.69$, 该值与 SMA490BW 耐候钢的 LAHW 接头焊趾处的应力集

中系数大致相同, 比 MAG 焊接头小 21.8%, LAHW 应力集中系数减小的主要原因在于, 激光与电弧的相互作用促进了液态金属向激光作用区铺展, 改善了焊趾处的润湿性, 因此冷却凝固后焊趾曲率半径变大, 应力集中系数减小, 从而提高了疲劳性能。

表4 焊趾的应力集中系数
Table 4 Stress concentration factor of weld toe

焊接方法	材料	焊脚尺寸 h/mm	基材厚度 b/mm	焊趾角度 θ	焊趾曲率半径 R/mm	应力集中系数 K_t
LAHW	Q345E	5.08	20	0.74π	2.28	1.69
LAHW	SMA490BW	10	6	0.74π	0.91	1.72
MAG	SMA490BW	15	6	0.72π	0.52	2.16

裂纹萌生阶段占据了疲劳寿命的大部分时间, 而位错塞积是裂纹萌生的先决条件, 焊缝的微观组织将对疲劳裂纹萌生过程中的加载循环次数产生一定影响, 疲劳裂纹萌生与循环加载次数之间满足以下关系式^[16]

$$N_f = \frac{\sigma_y}{2(\Delta\tau - 2k)} \sqrt{H/d} \quad (5)$$

式中: σ_y 为屈服强度; k 为位错移动阻力; $\Delta\tau$ 为滑移带的应力幅值; H 为滑移带宽度; d 为晶粒尺寸, 裂纹萌生过程中的疲劳循环加载次数与材料的屈服强度和位错的移动阻力成正比, 与晶粒尺寸成反比。

结合 Hall-Petch 关系可以发现, 晶粒尺寸越小, 屈服强度越高, 位错移动阻力越大, 裂纹萌生所需要的循环加载次数越多。与 MAG 焊缝相比, LAHW 焊缝具备更细小的晶粒尺寸, 有利于阻碍位错移动, 从而提高裂纹萌生过程中的疲劳循环次数。并且, 不同于 MAG 焊缝组织中大量先共析铁素体和侧板条铁素体, LAHW 焊缝组织由大量针状铁素体组成, 能够更好地阻碍疲劳裂纹扩展, 进而提高接头的疲劳性能。

3 结论

(1) T 形接头的 S-N 曲线为 $\lg\sigma_m=3.33-0.17\lg N_f$, 循环次数 5×10^6 周次时的中值疲劳强度为 148.3 MPa。

(2) LAHW 接头在 2×10^6 次时的条件疲劳强度为 181.5 MPa, 比同种材料的 MAG 焊接头提高了 39.6%。疲劳性能显著提升的原因在于 LAHW

接头的应力集中系数降低了 21.8%, 且焊缝组织更细小, 提高了裂纹萌生过程中所需的疲劳循环次数。

(3) 疲劳裂纹形貌特征表明, T 形接头的疲劳裂纹主要起源于材料表面应力集中较大的封底焊缝焊趾熔合区, 疲劳瞬断区为韧性断裂模式。

参考文献

- [1] 魏世同, 姜海昌, 陆善平. 快捷货车转向架用 Q345E 钢板焊接接头疲劳性能研究 [J]. 电焊机, 2020, 50(1): 105 - 108.
Wei Shitong, Jiang Haichang, Lu Shanping. Study on fatigue property of Q345E steel welded joint for express freight car bogie[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(1): 105 - 108.
- [2] Fan D, Wang Y Z, Li D Q, *et al.* Numerical analysis of arc-droplet behavior in thin wire high current MAG welding with magnetic control[J]. China Welding, 2023, 32(4): 29 - 37.
- [3] 张瑞琦, 刘志伟, 孙傲, 等. 国内高速列车转向架用钢的发展 [J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 1 - 5.
Zhang Ruiqi, Liu Zhiwei, Sun Ao, *et al.* Development of domestic high speed train bogie steel[J]. Special Steel, 2022, 43(2): 1 - 5.
- [4] Chen J Z, Zhang B, Song Z M, *et al.* Biaxial tension-torsion fatigue properties of A588 steel weld joint for high-speed train bogie[J]. Materials Science and Engineering:A, 2023, 865: 144634.
- [5] 马清波, 黄显峰, 黄凤龙, 等. 铁路快捷货车焊接转向架典型接头疲劳性能研究与应用 [J]. 电焊机, 2019, 49(2): 72 - 75.
Ma Qingbo, Huang Xianfeng, Huang Fenglong, *et al.* Research and application of fatigue performance of typical joints of bogies welding for railway express truck[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(2): 72 - 75.
- [6] 陈增有, 于岩, 尹丽香, 等. 热矫正对 Q345E 低合金钢角板接头疲劳性能的影响 [J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(3): 73 - 76.
Chen Zengyou, Yu Yan, Yin Lixiang, *et al.* Effect of thermal cor-

- rection on fatigue performance of Q345E low alloy steel fillet joint[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(3): 73 – 76.
- [7] Unni A K, Vasudevan M. Computational fluid dynamics simulation of hybrid laser-MIG welding of 316 LN stainless steel using hybrid heat source[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108042 – 108059.
- [8] Liu Q Y, Wu D, Wang Q Z, *et al.* Progress and perspectives of joints defects of laser-arc hybrid welding: A review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130(1): 111 – 146.
- [9] Pavan A R, Arivazhagan B, Vasudevan M, *et al.* Study on the microstructure and mechanical properties of hybrid laser + MIG welded joints of 316LN stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 163: 109410.
- [10] 严春妍, 姜心怡, 周倩雯, 等. X80/X100 异种钢激光-MIG 复合焊接头显微组织和性能 [J]. 焊接学报, 2023, 44(1): 20 – 26.
Yan Chunyan, Jiang Xinyi, Zhou Qianwen, *et al.* Microstructure and properties of laser-MIG hybrid welded X80 and X100 steel dissimilar joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(1): 20 – 26.
- [11] Meng Y, Fu J, Zhang S, *et al.* Laser-arc hybrid welding of AZ31B magnesium alloy by newly-designed beam oscillating pattern[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 93: 208 – 218.
- [12] Shi L, Jiang L, Gao M. Numerical research on melt pool dynamics of oscillating laser-arc hybrid welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 185: 122421 – 122432.
- [13] 王润, 侯振国, 钮旭晶, 等. 焊缝余高对 6082 铝合金焊接接头疲劳性能的影响 [J]. 焊接技术, 2013, 42(10): 35 – 37.
Wang Run, Hou Zhenguo, Niu Xujing, *et al.* Effect of weld reinforcement on fatigue properties of 6082 aluminum alloy welded joints[J]. Welding Technology, 2013, 42(10): 35 – 37.
- [14] 饶清鹏, 吴向阳, 陶传琦, 等. SMA490BW 钢激光-MAG 复合焊 T 型接头疲劳性能 [J]. 电焊机, 2014, 44(10): 158 – 163.
Rao Qingpeng, Wu Xiangyang, Tao Chuanqi, *et al.* Fatigue performance of laser-MAG hybrid welding T joint on SMA490BW steel[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(10): 158 – 163.
- [15] Li L, Zheng J M, Wang C M. Fatigue behavior improvements of laser-induction hybrid welded S690QL steel plates[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126(6): 106101 – 106110.
- [16] Zhang C, Gao M, Zeng X. Effect of microstructural characteristics on high cycle fatigue properties of laser-arc hybrid welded AA6082 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 479 – 487.

第一作者:姜来合格,博士研究生;主要研究方向为激光-电弧复合焊接工艺;Email:jianglai@hust.edu.cn.

通信作者:高明,博士,教授;Email:mgao@mail.hust.edu.cn.

(编辑: 刘启明)