

激光电弧热源复合模式对 301L 不锈钢焊接接头性能的弱化机制

杨涛¹, 汪远¹, 庄园¹, 杨瑞欣², 曾俊彦¹, 李桓玉¹

(1. 西南交通大学, 成都, 610031; 2. 成都四威高科技产业园有限公司, 成都, 610097)

摘要: 激光电弧复合焊在传统的激光填丝焊基础上加入了电弧形成复合热源, 导致电弧区产生热量积累, 造成焊缝晶粒粗大, 并弱化了焊接接头的强度和断后伸长率, 促使焊接结构的服役安全性能大幅降低。通过建立三维熔池温度模型及力学性能分析阐明了激光与电弧协同热作用对焊接接头强度和断后伸长率的影响规律。结合焊缝的晶粒尺寸、晶界取向差分布、组织强度从微观晶体学角度揭示了焊接接头强度和断后伸长率的弱化机制。结果表明, 电弧介入促使复合热源产生热积累, 降低熔池温度梯度, 强化了晶粒的择优取向生长及组织强度, 导致接头各向异性, 从而使焊接接头的断后伸长率降低 2%。较低的温度梯度会延长熔池冷却时间, 促使晶粒长大和大角度晶界减少, 不利于阻碍位错滑移, 导致焊接接头平均屈服强度降低 35 MPa, 极限抗拉强度降低 66 MPa。并且随着焊接电流的升高, 熔池高温停留时间延长, 接头晶粒及组织强度增大, 接头强度和断后伸长率继续降低。

创新点: (1) 建立 301L 不锈钢激光和激光电弧复合焊接三维熔池温度模型。

(2) 从微观晶体学角度阐明电弧对焊接接头性能的弱化机制。

(3) 证实了电弧介入促使复合热源接头熔池部分区域产生热积累, 导致接头各向异性。

关键词: 301L 不锈钢; 激光-电弧复合焊接; 三维热源模型; 微观晶体学

中图分类号: TG 401 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20211202006

0 序言

奥氏体不锈钢被广泛应用于下一代地铁的轻量化材料设计体系, 其高强度以及高延展性^[1]是保证地铁安全运行的关键。在不锈钢地铁结构制造过程中, 为提高焊接效率并获得成形效果好的焊缝常常采用激光-电弧复合焊接制造工艺^[2]。在激光电弧复合焊接过程中, 激光通过等离子体相互作用对电弧进行稳定和压缩提高了电弧能量的集中, 造成电弧区热量的积累^[3], 热量的积累容易使焊缝晶粒粗大, 导致焊接接头强度及断后伸长率的弱化^[4], 而强度和断后伸长率的降低会显著影响焊接结构的使用寿命, 降低地铁行车的安全性和可靠性。为了明晰焊接接头强度和断后伸长率的弱化机制,

Subashini 等人^[5]对比了马氏体不锈钢激光与激光-熔化极惰性气体保护 (metal-inert gas welding, MIG) 复合焊, 发现激光-MIG 复合热源下焊缝晶粒更粗大且强化相析出物更少, 接头强度更低。Chu 等人^[6]和 Jiang 等人^[7]发现焊缝组织强度随焊接热源的热输入增加而增加, 但过大的组织强度会使材料的断后伸长率降低, 这是由于焊接接头的热输入影响了焊缝晶粒的尺寸及组织强度, 改变了位错滑移的阻碍作用最终造成接头的强度和断后伸长率的变化。另外, 刘颖等人^[8]发现焊缝晶粒的形状、尺寸和取向因素决定了接头的各向异性, 而各向异性对材料的强度和断后伸长率有不利影响。大角度界面由于对解理裂纹的扩展具有抑制作用, 有利于材料断后伸长率的提升^[9]。以上研究表明焊接过程中热源的热作用决定了焊接接头微观组织的尺寸形貌及焊缝的冶金性能, 而材料的微观组织最终决定焊接接头的力学性能^[10]。因此需要从微观晶体学角度来揭示激光电弧复合焊焊接接头力学性能弱化机制与激光-电弧协同热作用之间的关系, 得出激光-

电弧协同热作用下复合焊接接头强度和断后伸长率的弱化机制。

结合三维熔池温度模型与力学性能测试, 阐明了激光与电弧协同热作用对接头强度和断后伸长率的影响规律, 揭示了接头力学性能弱化机制与激光电弧热作用之间的关系。利用电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 来研究接头的微晶特征, 包括晶粒取向分布、施密特因子 (schmidt factor, SF)、晶粒尺寸和晶界取向差分布。该工作对不锈钢激光电弧复合焊焊接工艺与接头性能之间的匹配关系具有指导意义。

1 试验方法

试验母材为 SUS301L-MT 奥氏体不锈钢板材, 试板尺寸为 $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 填充材料采用 ER308LSi 不锈钢焊丝, 焊丝直径为 1.2 mm , 母材及焊丝的化学成分如表 1 所示。图 1 为焊接原理示意图。焊接电流不为 0 A 时, 电弧与激光束在一

个共同的熔池中相互作用, 为激光-电弧复合焊, 焊接电流为 0 A 时, 为常规激光焊。基于焊缝成形进行了一系列试验以优化焊接工艺参数, 选择两种焊接方法的最优工艺参数下的接头进行力学性能和微观组织的对比研究。最优参数下, 即焊接电流为 274 A 的能量密度大, 焊接效率高, 而焊接电流为 0 A 的焊接效率较低。此时焊接电流不为 0 A 时热输入为 420 J/mm , 焊接电流为 0 A 时热输入为 255 J/mm 。在保证激光-电弧复合焊优良焊缝成形的基础上设置了电流梯度 ($274, 283, 296 \text{ A}$), 用于研究电弧的加入对接头强度和断后伸长率的弱化规律。

通过 WDW3100 型万能试验机进行单轴拉伸加载试验, 测定接头的抗拉强度等力学性能; 采用 FEI-QUANTA-FEG-250 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 对试样的断口形貌进行观察。采用 HVS-30 型维氏硬度计对激光-MAG 复合焊接头进行硬度测试。采用 EBSD 分析仪在场发射 SEM 上对焊接接头焊缝区的晶粒取向和晶粒尺寸进行观察分析。

表 1 母材和焊丝的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of base metal and welding wire

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Cu	Mo	Fe
SUS301L	0.02	0.39	1.12	1.12	—	17.24	7.10	0.10	0.046	—	余量
ER308LSi	0.03	0.73	1.73	0.020	0.004	20.30	10.30	—	—	0.08	余量

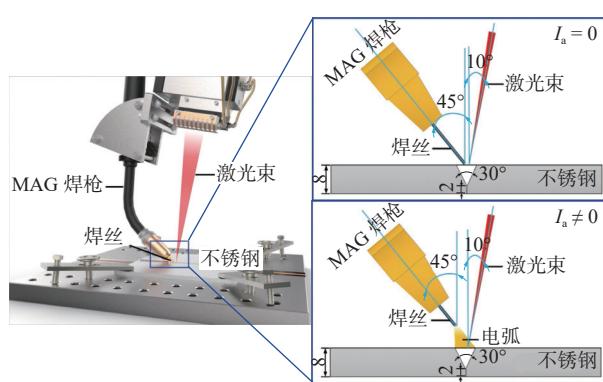


图 1 焊接原理示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic diagram of welding principle

2 试验结果与分析

2.1 电弧热作用对力学性能的影响

激光-电弧复合焊中, 由于引入了电弧, 使得焊接热源的能量分布及其热作用变化, 影响焊缝组织的形成并造成接头强度和断后伸长率的变化^[11]。为

了揭示电弧热作用对接头性能的影响, 建立了三维熔池温度模型解析其温度分布。通过拉伸与硬度试验对接头综合力学性能进行了分析, 并结合温度模型及力学性能分析阐明了激光与电弧协同热作用对接头硬度、强度及断后伸长率的影响。

图 2 为不同焊接电流下的三维熔池温度模型。在焊接电流为 0 A 时, 由于小激光功率和大离焦量导致熔池浅而宽。在焊接电流不为 0 A 时, 整体形态为深而窄的柱状熔池, 激光和电弧的能量直接作用在电弧区, 电弧区使上部熔池变得更宽, 并产生了热积累。电弧具有预热作用, 即电弧对工件进行预热, 使激光束照射在温度较高的工件上, 这种电弧的预热作用导致熔池温度梯度降低^[12]。温度梯度与冷却速率直接相关, 冷却速率影响晶粒的尺寸大小, 其计算式^[13] 为

$$C = GV \cos \theta \quad (1)$$

式中: C 为冷却速率; G 为温度梯度; V 为焊接速

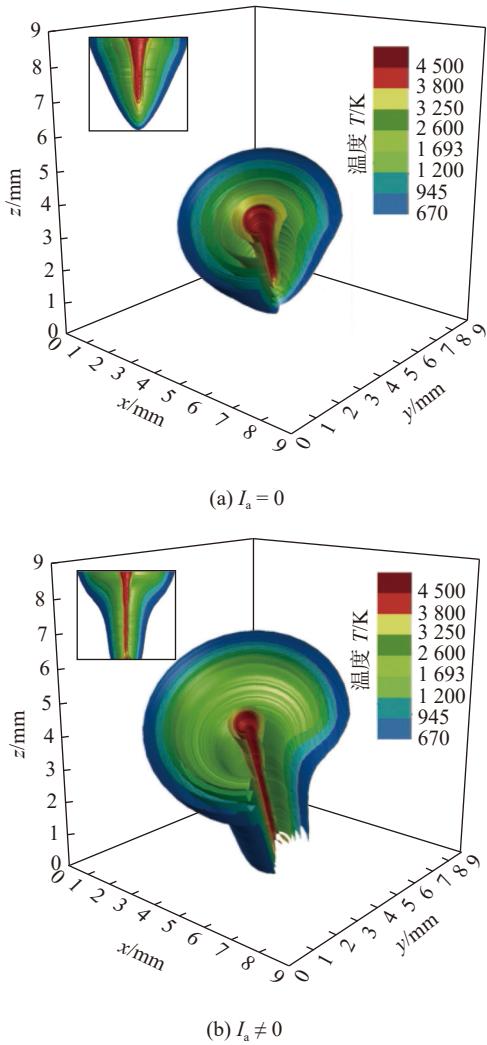


图 2 三维熔池温度模型

Fig. 2 3D molten pool temperature model. (a) $I_a = 0$; (b) $I_a \neq 0$

度; θ 为熔池内固液边界矢量法向与焊接方向的夹角。由式(1)可知, 在相同的焊接速度下, 较低的温度梯度会降低熔池的冷却速度, 延长冷却时间, 从而增大晶粒的生长时间使晶粒粗大。而晶粒越大晶界数量越少, 导致位错移动时的阻力减少, 焊接接头的强度和断后伸长率便随之降低。

激光电弧复合焊过程中, 当焊接电流较小时, 电弧不稳定, 电磁力较小, 熔滴直径大于焊丝直径, 导致熔滴过渡到熔池时间变长, 易产生未焊透、夹渣等缺陷。而焊接电流过大时, 焊接热输入增加, 液态金属“小桥”爆断及熔池的温差会使焊缝形成飞溅、焊瘤等缺陷。在保证焊缝优良成形的工艺区间, 增加了焊接电流, 发现复合焊接头屈服强度、极限抗拉强度和断后伸长率随焊接电流的增加而减小, 如图 3 所示, 这是由于焊接电流越大, 焊接热输入越大, 熔池高温停留时间较长, 晶粒长大及竞争生长

方式明显, 在单向拉伸变形中晶粒的协调性变差, 接头强度和断后伸长率降低^[14], 焊接电流为 274 A 时复合焊接头强度和断后伸长率最优。

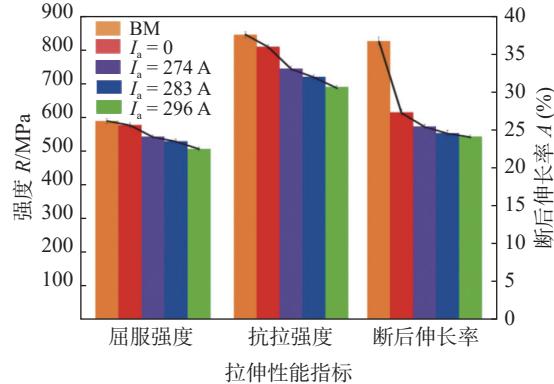


图 3 拉伸试验结果

Fig. 3 Tensile test results

图 4 为最优参数下两种焊接接头的硬度分布曲线, 在焊接接头熔合区 (fusion zone, FZ) 均存在软化现象。而焊接电流不为 0 A 时接头软化现象更为严重。与焊接电流为 0 A 时焊接接头相比, 其平均屈服强度降低了 35 MPa, 极限抗拉强度降低 66 MPa, 断后伸长率降低 2%, 如图 3 所示。

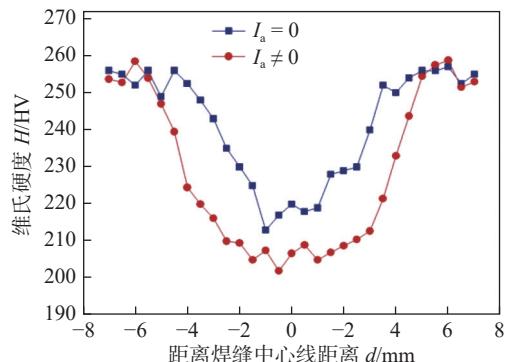


图 4 接头显微硬度

Fig. 4 Microhardness of joints

图 5 为两种焊接接头的断口形貌, 焊接电流为 0 A 时接头的断口充满了大量等轴韧窝以及少量卵形韧窝, 这表明接头具有较好的延展性。而焊接电流不为 0 A 时断口上的“河流花样”等特殊形态意味着接头延展性较差。材料的微观结构特征直接决定了其性能的优劣性, 为了进一步揭示接头力学性能弱化机制与激光电弧热作用之间的关系, 有效表征材料的微观结构具有十分重要的研究意义。

2.2 基于微观晶体学的接头力学性能弱化机制

基于上述两种焊接接头温度模型和综合力学性能分析, 确定了激光与电弧协同热作用降低了接

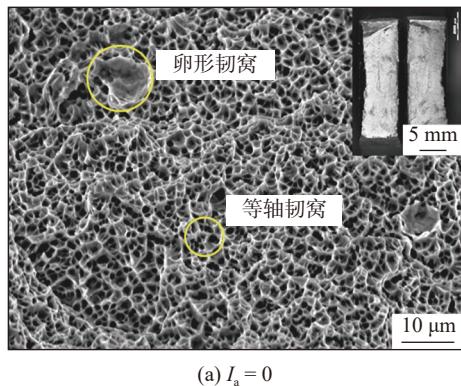
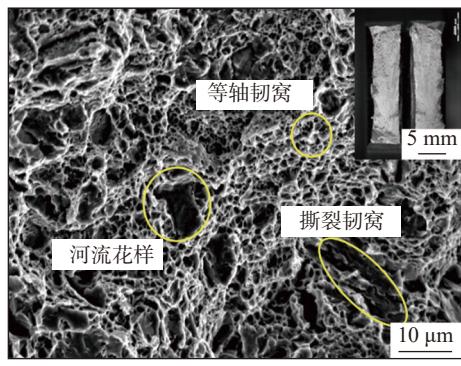
(a) $I_a = 0$ (b) $I_a \neq 0$

图 5 接头的拉伸断口形貌

Fig. 5 Tensile fracture morphology of joint. (a) $I_a = 0$; (b) $I_a \neq 0$

头的强度和断后伸长率, 为了揭示激光与电弧协同热作用弱化接头强度和断后伸长率的内在机理, 利用 EBSD 技术进一步分析了接头的 SF、晶粒尺寸和晶界取向差分布, 从材料微观结构角度解释了焊接电流不为 0 A 条件下的接头强度和断后伸长率的弱化机制。

图 6 为最优工艺参数下焊接电流为 0 和不为 0 A 时 FZ 的晶粒取向分布。边缘柱状晶粒垂直于熔合边界生长, 靠近焊缝中心的柱状晶粒平行于焊接方向生长。当焊接电流不为 0 A 时晶粒更容易沿熔合线形核, 并向焊缝中心生长, 进一步形成择优取向。图 7 中的极图表明, 在焊接电流不为 0 A 时, 其最大织构强度 (I_{\max}) 为 9.72 MUD, 而焊接电流为 0 A 时 I_{\max} 为 7.44 MUD。同时, 图 7 中的反极图也表明, 焊接电流不为 0 时 ($I_{\max} = 4.05$ MUD) 比焊接电流等于 0 A 时 ($I_{\max} = 2.57$ MUD) 的晶体织构强度更强。这是因为最大织构强度与热输入成正比, 热输入越大织构强度越强。而焊接电流不为 0 A 时的较大热输入与热积累加强了接头织构强度和晶粒的择优取向生长, 因此织构强度增加引起的接头各向异性会弱化焊接接头的断后伸长率^[15]。

根据滑移临界分切应力定律可知, 临界分切应

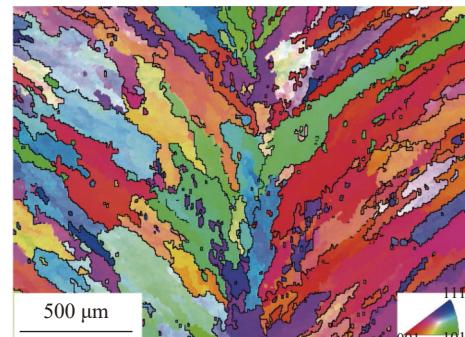
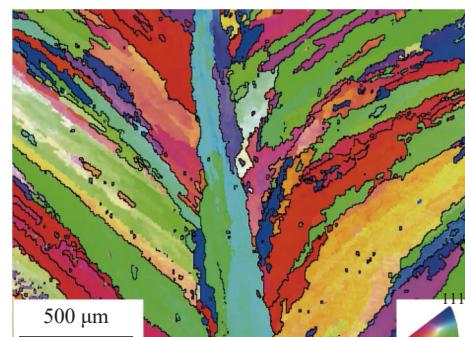
(a) $I_a = 0$ (b) $I_a \neq 0$

图 6 FZ 的晶粒取向分布

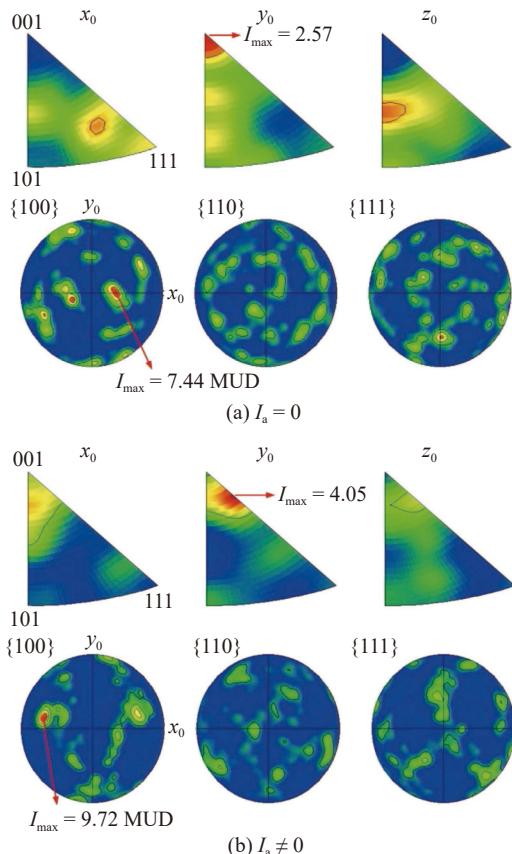
Fig. 6 Grain orientation distribution of FZ. (a) $I_a = 0$; (b) $I_a \neq 0$ 

图 7 FZ 的极图与反极图

Fig. 7 Pole figures and inverse pole figures of FZ. (a) $I_a = 0$; (b) $I_a \neq 0$

力的值越小, 晶粒变形的难度等级越大, 晶粒越难发生滑移变形, 材料断后伸长率越好。图 8 为不同焊接电流下 SF 的映射关系。在图 8 左侧图中易滑移的软取向红色晶粒较多, 没有蓝色晶粒(蓝色晶粒代表 SF 值小的硬取向晶粒); 图 8 右侧图中蓝色晶粒较多, 表示晶粒滑移变形困难。由晶粒的 SF 分布分数可知, 焊接电流为 0 A 的 SF 均值为 0.448, 焊接电流不为 0 A 的 SF 均值为 0.434, 这表明焊接电流不为 0 A 处的接头较难发生滑移变形, 断后伸长率较差。但是激光-电弧复合焊较大的热输入与较低的冷却速度, 促进了铁、碳原子的扩散, 焊缝中碳化物析出增多, 可以强化接头的断后伸长率^[16]。因此, 尽管复合焊接头 SF 值较小, 织构强度较大, 但由于碳化物析出相的存在还不足以大幅度削弱焊接接头的断后伸长率。

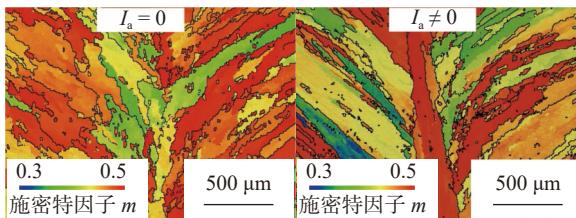


图 8 SF 映射
Fig. 8 Mapping of SF

从图 9~图 11 可以看出, 在焊接电流为 0 A 时, 10 μm 以内的晶粒占 69.89%, 最大晶粒尺寸为 251 μm, 晶界取向差低于 2° 的比例为 37.8%。15°~60° 范围内大角度晶界 (high-angle grain boundary, HAGBs) 较多。而焊接电流不为 0 A 时, HAGBs 较

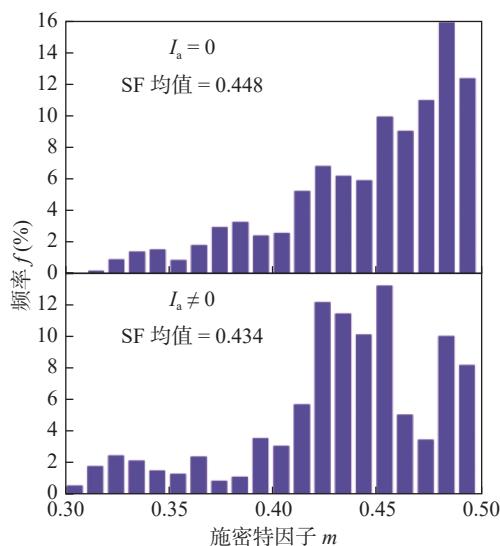


图 9 SF 分布
Fig. 9 SF distribution

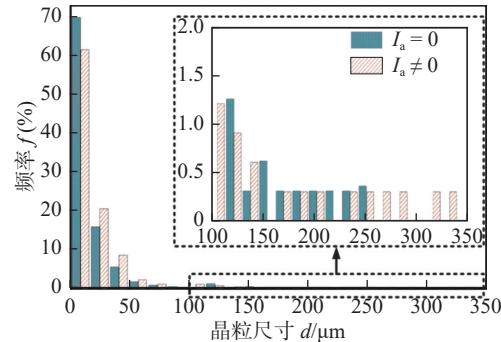


图 10 晶粒尺寸分布
Fig. 10 Grain size distribution

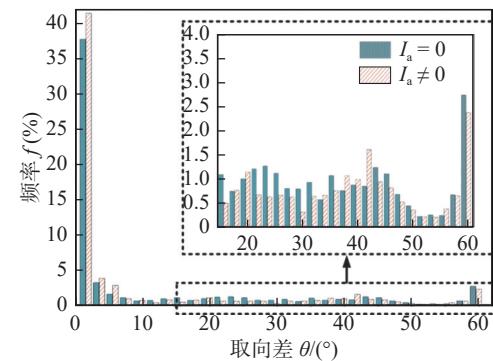


图 11 晶界取向差分布
Fig. 11 Grain boundary misorientation distribution

少, 晶界取向差低于 2° 的比例大于 41%, 10 μm 以内的晶粒占 61.56%, 最大晶粒尺寸为 332 μm。电弧介入时较低的温度梯度与过大的热输入促进了晶粒的长大, 接头细晶粒减少, 晶粒尺寸更大。晶粒的粗化和晶界取向差的减小不利于抑制位错滑移^[17], 这导致了接头强度的弱化。

3 结论

(1) 熔池三维温度模型表明, 在焊接电流为 0 A 时, 熔池较浅但较宽。在焊接电流不为 0 A 时, 整体形态为深而窄的柱状熔池, 电弧热作用使上部熔池变宽, 并产生了热积累, 熔池温度梯度降低, 冷却时间延长。

(2) 电弧介入下接头的晶粒尺寸较大, 细晶粒和大角度晶界较少, SF 值较小, 晶体织构强度较大, 而晶粒的粗化和晶界面积的减小不利于抑制位错滑移, 织构强度增加引起的接头各向异性会弱化焊接接头的断后伸长率。

(3) 由于电弧介入导致热积累升高与温度梯度降低, 会强化择优取向和织构强度, 降低 SF 值和

HAGBs数量, 增大晶粒尺寸, 最终导致焊接接头平均屈服强度降低35 MPa, 极限抗拉强度降低66 MPa, 断后伸长率降低2%, 并且随着焊接电流的升高, 复合焊接头强度及断后伸长率继续降低。

参考文献

- [1] 周媛, 蔡艳, 衡昊坤, 等. 侧吹气体对奥氏体不锈钢激光焊缝组织和耐腐蚀性能的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 113–120.
Zhou Yuan, Cai Yan, Heng Haokun, *et al.* Influence of side assist gas on microstructure and corrosion resistance of weld of austenitic stainless steel in laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 113–120.
- [2] 吴向阳, 宿浩, 孙岩, 等. 激光+GMAW复合热源焊接过程热-力耦合数值分析 [J]. 焊接学报, 2021, 42(1): 91–96.
Wu Xiangyang, Su Hao, Sun Yan, *et al.* Thermal-mechanical coupled numerical analysis of laser + GMAW hybrid heat source welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(1): 91–96.
- [3] Zeng Huilin, Xu Yuanbin, Wang Changjiang, *et al.* Research on laser-arc hybrid welding technology for long-distance pipeline construction[J]. China Welding, 2018, 27(3): 53–58.
- [4] 杨涛, 何双, 陈勇, 等. 304L不锈钢激光-脉冲MAG复合焊电弧特性及焊缝成形分析 [J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 65–69.
Yang Tao, He Shuang, Chen Yong, *et al.* Analysis of arc characteristics and weld formation of 304L stainless steel laser-pulse MAG hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 65–69.
- [5] Subashini L, Prabhakar Phani KV, Ghosh S, *et al.* Comparison of laser-MIG hybrid and autogenous laser welding of M250 maraging steel thick sections—understanding the role of filler wire addition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3): 1581–1594.
- [6] Chu Q, Bai R, Jian H, *et al.* Microstructure, texture and mechanical properties of 6061 aluminum laser beam welded joints[J]. Materials Characterization, 2018, 137: 269–276.
- [7] Jiang Z, Hua X, Huang L, *et al.* Effect of multiple thermal cycles on metallurgical and mechanical properties during multi-pass gas metal arc welding of Al 5083 alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(9-12): 3799–3811.
- [8] 刘颖, 董丽虹, 王海斗. 激光熔覆成型的各向异性表征方法研究现状 [J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3541–3546.
- Liu Ying, Dong Lihong, Wang Haidou. Research progress on anisotropic characterization of laser cladding molding[J]. Materials Reports, 2019, 33(21): 3541–3546.
- [9] 李秀程, 孙明煜, 赵靖霄, 等. 铁素体-贝氏体/马氏体双相钢中界面的定量化晶体学表征 [J]. 金属学报, 2020, 56(4): 653–660.
Li Xiucheng, Sun Mingyu, Zhao Jingxiao, *et al.* quantitative crystallographic characterization of boundaries in ferrite-bainite/martensite dual-phase steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 653–660.
- [10] 赖一楠, 武传松, 李宏伟, 等. 焊接与连接领域科学基金资助浅析与发展趋势 [J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 1–7.
Lai Yinan, Wu Chuansong, Li Hongwei, *et al.* Review on NSFC funding situation and research trend in the field of welding and joining[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(2): 1–7.
- [11] Zhu Z, Ma X, Wang C, *et al.* Altering morphological crystalline and compositional features in 316L laser-MIG weldments with an external magnetic field[J]. Materials & Design, 2020, 196: 109156.
- [12] 王晓涛. P-GMAW+GMAW高速焊焊接工艺研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
Wang Xiaotao. Study on welding technology of high speed P-GMAW + GMAW welding[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [13] Gao Z, Ojo O A. Modeling analysis of hybrid laser-arc welding of single-crystal nickel-base superalloys[J]. Acta Materialia, 2012, 60: 3153–3167.
- [14] Zhang F, Liu S, Liu F, *et al.* Stability evaluation of laser-MAG hybrid welding process[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 284–292.
- [15] Yoon S, Ueji R, Fujii H. Effect of rotation rate on microstructure and texture evolution during friction stir welding of Ti-6Al-4V plates[J]. Materials Characterization, 2015, 106: 352–358.
- [16] Liu F, Tan C, Gong X, *et al.* A comparative study on microstructure and mechanical properties of HG785D steel joint produced by hybrid laser-MAG welding and laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 128: 106247.
- [17] Patra S, Mandal A, Mandal M, *et al.* Ferrite grain refinement, grain size distribution, and texture after thermomechanical processing and continuous cooling of low-C steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 50(2): 947–965.

第一作者: 杨涛, 博士, 副教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为机器人智能化高效焊接; Email: 889268@qq.com.

(编辑: 张芷晴)