

6061-T4 铝合金激光焊接接头组织与力学性能研究^①

王 森¹, 李天景¹, 曾一达², 李明亮¹, 林兆擎¹

(1.盐城工业职业技术学院 汽车与交通学院,江苏 盐城 224002; 2.南昌航空大学 航空制造工程学院,江西 南昌 330063)

摘要:对汽车用6061-T4铝合金板材进行激光焊接,采用金相显微镜、透射电镜、扫描电镜、维氏硬度测试、拉伸试验等研究了激光焊接接头微观组织、显微硬度、强度和塑性、拉伸试样断口形貌。结果表明,6061-T4铝合金激光焊接接头的母材区组织为粗大条状晶粒;焊缝中心组织为细小的铸态树枝晶,针状 β'' 析出相在晶界偏聚,位错密度降低;激光焊接接头的强度(硬度)和塑性均比母材有一定下降。

关键词:6061 铝合金;激光焊接;焊接接头;微观组织;力学性能;焊缝

中图分类号: TG407

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.031

文章编号: 0253-6099(2023)01-0141-04

Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joint of 6061-T4 Aluminum Alloy

WANG Miao¹, LI Tianjing¹, ZENG Yida², LI Mingliang¹, LIN Zhaoqing¹

(1.School of Automobile and Transportation, Yancheng Vocational and Technical Institute of Industry, Yancheng 224002, Jiangsu, China; 2.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract: After 6061-T4 aluminum alloy sheet for automobile was welded by laser welding, the microstructure, microhardness, strength and plasticity of welded joint, as well as fracture surface morphology of tensile specimen were studied by using metallographic microscope, transmission electron microscope, scanning electron microscope, Vickers hardness test and tensile test. The results show that the laser welded joint of 6061-T4 aluminum alloy has a coarse strip of grain structure in its base metal area, the weld seam has a structure of very fine as-cast dendrite in the center, acicular β'' precipitates segregate at grain boundary, and dislocation density decreases. It is found that both the strength (hardness) and plasticity of laser welded joint are lower than those of base metal.

Key words: 6061 aluminum alloy; laser welding; welded joint; microstructure; mechanical properties; weld seam

近年来,由于环保和能源等方面的问题日益突出,汽车轻量化需求越来越迫切。6061 铝合金是一种非常理想的汽车轻量化材料^[1],它具有良好的强度、成形性、耐蚀性和焊接性。然而铝合金导热性能好,对其采用传统熔化焊接易出现明显的焊接变形以及气孔和裂纹等缺陷,且铝合金焊后接头性能较低。随着激光技术的快速发展,激光焊接成为一种新兴的焊接技术^[2-4]。激光焊接具有能量密度高、热输入小、焊接速度快、焊后热影响区范围小、焊接变形量小等优点,因此铝合金的激光焊接受到广泛关注。

但是,铝合金激光焊接也存在许多问题,如液态铝

的表面张力低,会导致激光深熔焊小孔坍塌而形成气孔;铝合金对激光的反射率高,焊接过程中绝大部分激光能量被反射,母材吸收的激光能量少而难以熔化形成焊缝^[5-6]。有研究表明,铝合金激光焊缝区类似于铸态组织,该区域的晶粒由焊前的条状晶粒变为细小的树枝晶,相比于焊前状态,焊缝区的强度、硬度、塑性均出现下降,但焊缝区晶粒细化却无法解释接头强度和塑性下降的现象,这一现象与细晶强化理论显然是矛盾的。基于此,本文通过对6061-T4铝合金激光焊缝的微观组织、力学性能展开深入研究,探究焊缝组织与力学性能之间的内在关系,为后续从事汽车用铝合金

① 收稿日期: 2022-07-23

基金项目: 2021年江苏省高等学校自然科学研究面上项目(21KJD430003);2021年江苏省现代教育技术研究课题(2021-R-92586)

作者简介: 王 森(1990—),男,江苏盐城人,硕士,讲师,主要研究方向为铝合金焊接及热处理。

构件轻量化设计及激光焊接技术的应用提供理论参考和数据借鉴。

1 实验材料和方法

实验所用焊接材料为 6061-T4 铝合金轧制板材, 尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 其成分见表 1。焊前将铝板表面和端面用砂纸打磨至露出光亮金属为止, 然后将打磨好的铝板放在夹具上对齐夹紧, 两块铝板之间的装配间隙需尽量小, 避免错边、不等厚等不规范装夹方式。因铝合金对激光的反射率较高, 需在铝板接合线上用黑色记号笔涂黑, 以提高激光吸收率。

表 1 6061 铝合金化学成分(质量分数) %

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
1.020	0.590	0.301	0.251	0.076	0.218	0.013	0.014	余量

激光焊机型号为 YLS-4000, 配套 Yaskawa 焊接机器人。焊接采用圆形光斑, 光斑直径 0.6 mm ; 采用氩气为保护气体, 气体流量 20 L/min , 保护气体输送管通向夹具底部, 保证整个焊接试样得到充分保护; 激光束设置 5° 的入射倾角; 激光器距离铝板表面 326 mm , 离焦量 0 mm 。图 1 为激光焊接原理示意图。调整激光焦点在铝合金试板上的位置, 使光斑落在对接位置的中心, 选定焊接起点和终点, 设置好激光功率、焊接速度和离焦量等焊接参数, 将保护气体充满密闭容器, 最后在激光控制室的操作软件中开始焊接。

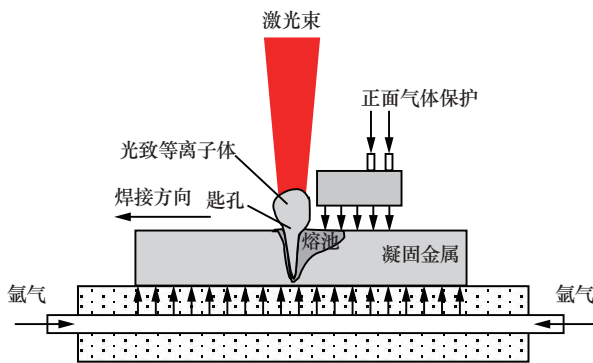


图 1 激光焊接原理示意

利用线切割技术, 沿垂直于激光焊缝方向截取 $20\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的金相试样, 并将焊缝试样平整面放置于金相镶嵌机上做成镶嵌试样, 随后打磨抛光, 经 keller 试剂 ($1\% \text{ HF} + 1.5\% \text{ HCl} + 2.5\% \text{ HNO}_3 + 95\% \text{ H}_2\text{O}$) 腐蚀后, 在 Leica DM 2500M 型金相显微镜上进行观察。TEM 试样经机械减薄至 $50\text{ }\mu\text{m}$, 在 33% 硝酸 + 67% 甲醇的电解液中双喷减薄后, 用 JEM-2100 (HR)

型透射电镜观察。

沿焊缝横截面水平方向, 从焊缝正中心向两边每隔 0.5 mm 取一个维氏硬度测试点, 所用显微硬度计为 HV-1000 型, 载荷 100 g , 加压时间 15 s 。垂直于激光焊接接头方向上切割选取拉伸试样, 对焊接接头拉伸试样的焊缝表面的下凹缺陷进行磨平处理, 拉伸实验在 WDW-10 型万能试验机上进行, 拉伸速率为 0.2 mm/s , 载荷为 10 kN , 拉伸试样尺寸如图 2 所示。

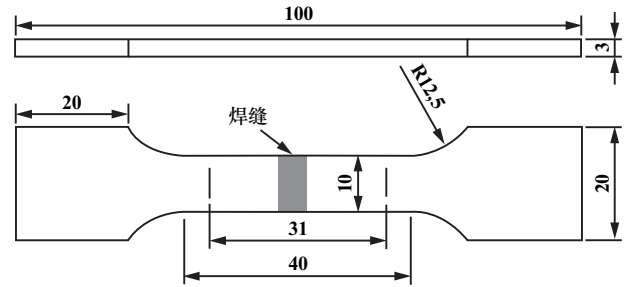


图 2 拉伸试样尺寸(单位:mm)

2 实验结果与讨论

2.1 激光焊接参数优化

在激光焊接 6061 铝合金的实验中, 焊缝成形及其质量很大程度上受到激光功率、焊接速度和离焦量等工艺参数的影响, 不同焊接参数下获得的 6061 铝合金焊缝质量各不相同。保护气体流量固定为 20 L/min , 离焦量固定为 0 mm 时, 各组焊接参数及焊接效果如表 2 所示。第 1 组为某汽车企业已调试完好的参数, 其线能量密度适中, 焊缝质量较高, 现为提高生产效率需将焊接速度提高至 240 cm/min ; 第 2 组在保持第 1 组激光功率基础上, 将焊接速度提高至 240 cm/min , 此时焊缝并未焊透, 线能量密度下降是导致这一结果的原因; 第 3 组在保持第 2 组焊接速度不变的前提下, 将激光功率提高至 3.0 kW , 但焊接线能量密度仍不足, 焊缝未焊透; 第 4 组继续增加激光功率至 3.6 kW , 此时线能量密度达到 9 J/mm , 焊缝被焊透且鱼鳞纹致密均匀, 无裂纹, 焊缝质量较高, 其焊接接头宏观形貌如图 3 所示。通过不断调试激光功率获得了焊缝质量较优的参数为: 激光功率 3.6 kW , 焊接速度 240 cm/min , 并针对 4 组试验参数下的铝合金焊缝进行组织与性能检测。

表 2 6061 铝合金在不同参数下的焊接效果

组别	激光功率/ kW	焊接速度/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	线能量/ ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$)	焊接 效果
1	2.4	180	8	焊透
2	2.4	240	6	未焊透
3	3.0	240	7.5	未焊透
4	3.6	240	9	焊透

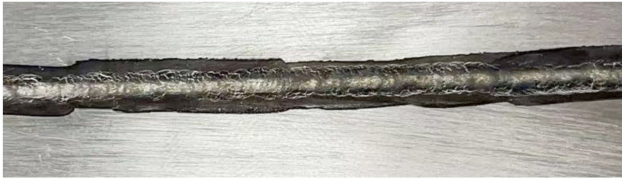
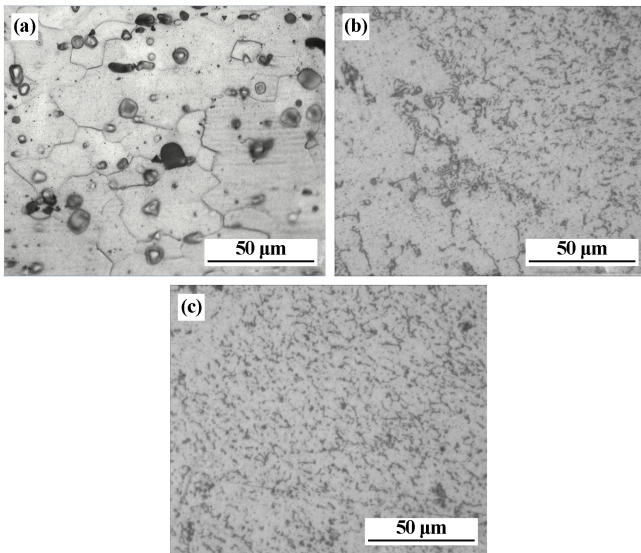


图3 第4组焊接接头宏观形貌

2.2 微观组织

图4为试样不同部位的金相组织。在母材中, α -Al晶粒沿轧制方向呈典型的板条状结构,晶粒尺寸较大;晶内分布着不同尺寸的未溶球状颗粒相,大颗粒相周边有较为明显的腐蚀坑,晶内还有许多因自然时效析出的尺寸较小的粒状颗粒相呈弥散分布。焊缝与母材的交界处可以观察到母材与焊缝之间存在一条较为明显的分界线,即熔合线^[7],熔合线附近发生重结晶形成铸态柱状晶组织,其晶粒生长方向垂直于熔合线,这是因为晶粒会择优选择散热速度最快的方向,即过冷度最大的方向生长。焊缝中心区晶粒为细小均匀的等轴树枝晶,这是激光焊接快速加热且快速冷却的特点,焊缝的液态金属最后凝固,此时由于过冷度大,可以通过自发形核生成大量细小的等轴树枝晶;另外观察发现大部分初晶 α -Al晶界处有大量连续分布的第二相,这些第二相聚集呈片状形态。

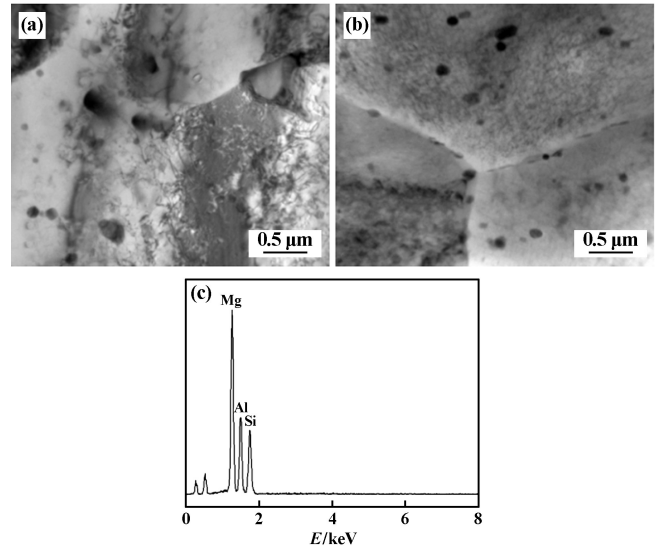


(a) 母材; (b) 焊缝与母材交界处; (c) 焊缝中心区

图4 母材和激光焊接接头金相组织

图5为试样不同部位的TEM照片及相应点位的EDS能谱分析结果。母材经固溶处理后发生自然时效,在图中可见晶内分布着直径约0.5 μm 的较大尺寸的球状颗粒相;母材受轧制变形,其晶内可观察到高密度位错,位错彼此之间存在缠结形成位错网,起到阻碍

位错滑移和强化组织力学性能的作用。能谱分析结果显示晶粒内部的黑色球状第二相所含化学成分主要是Mg和Si元素,可知6061铝合金的主要强化相为 Mg_2Si (β)相。



(a) 母材; (b) 焊缝中心组织; (c) 母材中第二相能谱

图5 TEM照片及EDS能谱分析结果

焊缝中心组织中除了有较大尺寸的未熔球状 β 相和棒状 β' 析出相,还清晰可见高密度的针状 β'' 相分布在 α -Al晶粒内部和晶界处。晶界处的针状 β'' 相尺寸较大且有明显聚集特征, β'' 相在晶界处呈连续分布,这主要是因为激光焊接能量密度高,熔池部位迅速被激光能量加热至熔化状态又迅速发生冷却,焊缝处于急热急冷的温度变化过程而发生快速凝固,在高温下焊缝重结晶 α -Al中Mg和Si元素处于过饱和状态,随后又因快速冷却发生低温时效,由于时效时间短,Mg和Si元素来不及以平衡的球状 β - Mg_2Si 相析出而是主要以非平衡的细针状 β'' 相析出,并且重结晶 α -Al晶界会成为Mg和Si杂质原子快速扩散的通道,并容易引起杂质原子偏聚,因此在晶界处针状 β'' 析出相形成连续聚集的特征。另外焊缝中心组织中还发现重结晶的 α -Al晶粒内部位错密度较轧制态母材明显降低。轧制态母材因经历了大幅度塑性变形,位错密度较高;而焊缝中心区是铸态组织,重结晶晶粒未经历塑性加工,故位错密度较低。

2.3 力学性能

图6为6061-T4铝合金激光焊接接头横截面各测试点的显微硬度值。接头硬度分布大致呈现“U”型特征。母材硬度为75HV;焊缝中心两侧约2.0 mm以外区域是热影响区,其硬度约72HV,与母材硬度接近;

而焊缝中心区域硬度值约 55HV, 明显低于两侧热影响区及母材的硬度值。结果表明激光热输入对焊缝有明显软化作用^[7-9]。

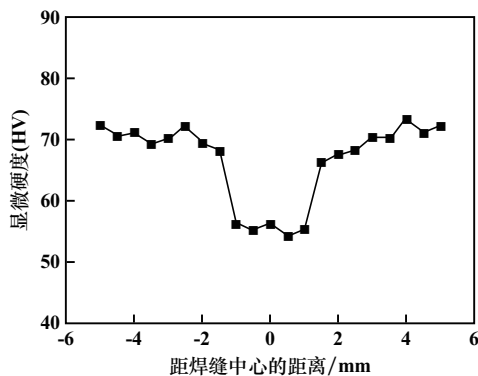


图6 激光焊接接头显微硬度分布

图7为母材和焊接接头的拉伸曲线。母材抗拉强度为 200 MPa, 其总延伸率为 20.5%, 颈缩阶段应变量约 5%; 激光焊接接头抗拉强度为 165 MPa, 延伸率为 16.2%, 颈缩阶段应变量仅 1.5%。

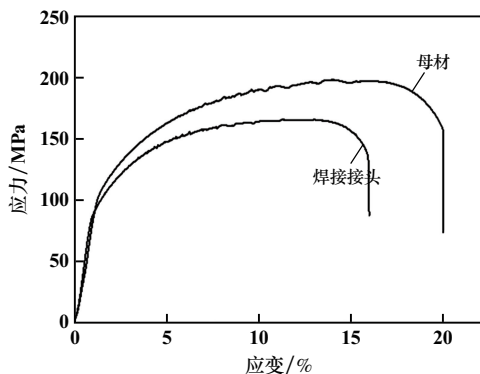


图7 母材和焊接接头拉伸曲线

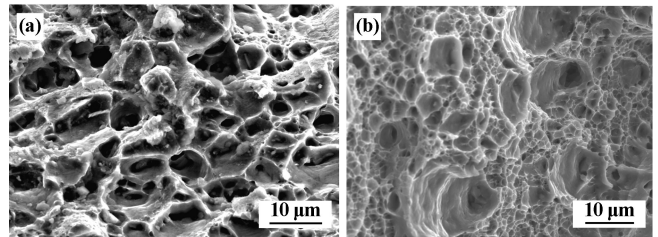
焊后接头拉伸断裂位置位于焊缝处, 激光焊接接头强度和塑性较母材都有明显降低。由金相组织分析结果可知, 焊后焊缝晶粒比母材有明显细化, 而根据霍尔-配奇理论(细晶强化), 晶粒尺寸平均值越小, 晶界越多, 材料的强度和塑性就越高, 显然该理论不能很好地解释焊接接头力学性能降低的现象。

由图5可知, 焊缝组织发生了重结晶, 晶界处的第二相颗粒呈针状连续分布特征, 这对于晶粒之间的结合力有显著弱化作用; 另外成分偏析引起的 α -Al 晶界处针状第二相偏聚也是接头强度和塑性降低的重要原因; 焊缝的 α -Al 晶粒内位错密度较母材有了显著降低, 由位错强化理论可知, 位错密度越高对材料强度和硬度的提升作用越大。因此母材比焊接接头的强度和硬度高。

综合细晶强化、晶界成分偏析、金属位错理论, 本文认为激光焊接接头强度、硬度、塑性比母材下降的原因概括为接头焊缝重结晶组织的细晶强化作用无法抵消晶界第二相偏聚导致的晶界结合力下降作用, 以及晶内位错密度降低引起的接头力学性能弱化作用。

2.4 断口形貌分析

6061-T4 铝合金母材和激光焊接接头拉伸试样断口 SEM 照片见图8。母材拉伸断裂经历了明显的强化塑性变形和颈缩阶段, 断口存在大量韧窝, 韧窝尺寸差异性较小, 韧窝直径 5~10 μm , 较大的韧窝孔残留着强化相颗粒, 另外大尺寸韧窝附近有明显的河流花样和撕裂棱, 韧窝较深, 表现为典型的韧性断裂特征, 母材呈现较为显著的塑性变形强化特征。激光焊接接头拉伸断口有大量细小致密的等轴韧窝, 韧窝直径 2~5 μm , 小尺寸韧窝口没有明显的撕裂棱, 且韧窝很浅, 表明接头处 α -Al 重结晶晶界结合力较弱; 大尺寸韧窝数量较少, 可观察到大尺寸韧窝口附近有河流花样, 但无明显撕裂棱; 另外, 断口局部区域观察到较为明显的解理台阶, 具有解理断裂的特性。接头不仅有韧性断裂方式也呈现出脆性断裂特征^[7]。



(a) 母材; (b) 焊接接头

图8 拉伸试样断口形貌

3 结 论

1) 6061-T4 铝合金经激光焊接后, 接头焊缝组织由粗大板条状晶粒转变为细小的等轴树枝状晶粒; 焊缝的初晶 α -Al 晶界处析出较为连续分布的针状 β'' 强化相; 与母材相比, 焊缝组织的位错密度较低。

2) 虽然激光焊缝重结晶组织具有细晶强化作用, 但不能弥补 α -Al 晶界第二相偏聚引起的晶界结合力弱化作用以及晶内位错密度降低引起的接头力学性能弱化作用, 因此, 与母材相比, 焊接接头硬度、强度、塑性都明显下降。

3) 激光焊接功率 3.6 kW、焊接速度 240 cm/min 时, 在满足焊缝质量要求和力学性能的前提下, 可以提升焊接速度, 提高汽车企业生产效率。

(下转第 149 页)

热温度升高至 300 °C 时,热影响区断口微观形貌出现大量韧窝,断裂方式由未预热处理时的准解理断裂转变为韧性断裂。

参考文献:

- [1] WANG Q, QIAN R, YANG J, et al. Effect of High-Speed Powder Feeding on Microstructure and Tribological Properties of Fe-Based Coatings by Laser Cladding[J]. *Coatings*, 2021, 11(12):1456.
- [2] 杜博睿,王森辉,申博文. 液压支架立柱激光熔覆不锈钢的组织与性能[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(16):71-74.
- [3] OUYANG C Y, BAI Q F, YAN X G, et al. Microstructure and Corrosion Properties of Laser Cladding Fe-Based Alloy Coating on 27SiMn Steel Surface[J]. *Coatings*, 2021, 11(5):552.
- [4] LI L Q, SHEN F M, ZHOU Y D, et al. Comparative study of stainless steel AISI 431 coatings prepared by extreme-high-speed and conventional laser cladding[J]. *Journal of laser applications*, 2019, 31(4):042009.
- [5] LI C Z, NI Y J, WANG M D, et al. Analysis of Microstructure and Performance of Laser Cladding WC-Fe316L Alloy on the Surface of 27SiMn Steel[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2185(1):012083.
- [6] BAI Q F, ZHANG J, LI Q H, et al. Microstructure and corrosion resistance of Fe-based coatings prepared using high-speed laser cladding and powerful spinning treatment[J]. *Materials Letters*, 2022, 310:131429.
- [7] 韩晨阳,孙耀宁,徐一飞,等. 激光熔覆镍基合金磨损及电化学腐蚀性能研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(11):103-110.
- [8] 李聪玮,刘 泽,王 明,等. 铁基激光熔覆层的微观结构和摩擦磨损性能研究[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(5):149-152.
- [9] 庞小通,姚成武,龚群甫,等. 多层激光熔覆对 30CrMnSiNi2A 高强度钢组织与性能的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6):69-79.
- [10] 郭 洋,张建功,熊建坤,等. 电站设备转子轴颈等离子弧增材修复的组织与性能[J]. *焊接学报*, 2020, 41(10):47-53.
- [11] PAN C L, LI X Q, ZHANG R H, et al. Research on microstructural and property evolution in laser clad HAZ[J]. *Surface Engineering*, 2021, 37(12):1514-1522.

- [12] 谭米雪,王 臻,赵凤君,等. 激光熔覆工艺参数对高速钢涂层性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(6):202-206.
- [13] Kwok C T, Man H C, Cheng F T, et al. Developments in laser-based surface engineering processes; with particular reference to protection against cavitation erosion[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 291:189-204.
- [14] 王义猛. 液压油缸活柱表面激光熔覆技术研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(18):137-140.
- [15] XIN D Q, CAI Y, HUA X M. Effect of preheating on microstructure and low-temperature toughness for coarse-grained heat-affected zone of 5% Ni steel joint made by laser welding[J]. *Welding in the World*, 2019, 63(5):1229-1241.
- [16] Quan L, Ralph A, Yan W, et al. Influences of depositing materials, processing parameters and heating conditions on material characteristics of laser-clad hypereutectoid rails[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 263:1-20.
- [17] 冯大鹏. 基于 45 钢基体焊前预热对熔合区组织及硬度梯度的影响[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(9):221-223.
- [18] 王海生,王晓南,张 敏,等. 激光焊接热输入对微合金 C-Mn 钢全熔透焊接头组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(1):61-67.
- [19] 李聪玮. 27SiMn 钢表面激光熔覆铁基合金组织和性能研究[D]. 西安:西安科技大学材料科学与工程学院, 2021.
- [20] 韩 浩. 双金属机械复合管端部激光熔覆工艺及焊接接头性能研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东)机电工程学院, 2018.
- [21] 耿吴宾,崔青玲,梁佳伟等. 无钛热冲压成形钢的连续冷却与等温转变规律[J]. *金属热处理*, 2021, 46(12):149-155.
- [22] 唐明华,汪新衡,赵建明. 26CrMoNbTiB 钻杆用钢亚温淬火强化工艺[J]. *金属热处理*, 2018, 43(5):184-189.
- [23] 王 晓,王作成,王协彬,等. 亚温淬火对硼镍添加含铌低合金高强度 H 型钢组织性能的影响[J]. *材料工程*, 2012, 36(3):22-27.
- [24] 胡庚祥,蔡 珣,戎咏华,等. *材料科学基础*[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2006.
- [25] 侯锁霞,任呈祥,吴 超,等. 激光熔覆层裂纹的产生和抑制方法[J]. *材料导报*, 2021, 35(S1):352-356.

引用本文: 郭长辉,李聪玮,杨 辉,等. 预热对 27SiMn 钢激光熔覆热影响区显微组织和力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(1):145-149.

(上接第 144 页)

参考文献:

- [1] 刘 岷,朱 成. 铝合金用于新能源乘用车车身轻量化及经济性分析[J]. *科技与创新*, 2018(3):20-23.
- [2] 李 坤,王 威,单际国,等. 6061 铝合金激光深熔焊等离子体光谱特征与气孔的相关性[J]. *焊接学报*, 2015, 36(7):72-76.
- [3] 伍 杰,毛祖莉,任芝兰. 汽车轻量化用铝合金拼焊板的研究进展[J]. *锻压技术*, 2016, 41(9):1-6.
- [4] 赵耀邦,张小龙,李中权,等. 铝合金激光焊接技术研究进展[J]. *电焊机*, 2017, 47(2):8-12.
- [5] Kate. Difference Characteristics of the Welding Zone between Laser and TIG Welding[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014(9):36-39.

- [6] 喻 嵘,钟叶清,郑 英. Zn-Cu-Ti 合金搅拌摩擦焊与激光焊接接头组织与性能对比研究[J]. *矿冶工程*, 2019, 39(3):128-131.
- [7] 杨得帅. 6061 铝合金激光焊接接头组织及力学性能研究[D]. 济南:山东大学材料科学与工程学院, 2014.
- [8] 徐育焱. 6061-T6 铝合金激光焊接接头组织性能及热力耦合研究[D]. 镇江:江苏科技大学材料科学与工程学院, 2019.
- [9] 石康柠,曹 益,梁志敏,等. 6N01 铝合金焊接接头软化现象分析[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(21):185-188.

引用本文: 王 森,李天景,曾一达,等. 6061-T4 铝合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(1):141-144.