

ZL114A 和 6061 异种铝合金激光焊接工艺及接头显微组织和力学性能研究^①

孟祥超^{1,2}, 孙有平^{1,2,3}, 何江美^{1,2,3}, 周勇^{1,2}, 谢尚恒^{1,2}

(1.广西科技大学机械与汽车工程学院 广西柳州 545006; 2.广西土方机械协同创新中心 广西柳州 545006; 3.广西汽车零部件与整车技术重点实验室 广西柳州 545006)

摘要: 针对厚 5 mm 的 ZL114A 铝合金和 6061 铝合金进行了激光焊接正交试验,研究了激光焊接参数对接头显微组织和力学性能的影响。结果显示,激光焊接参数对焊接接头强度影响程度大小顺序为:激光焊接功率>离焦量>焊接速度;当激光焊接功率 3 kW、焊接速度 16 mm/s、离焦量-3 mm 时可获得较好焊接接头性能,接头平均抗拉强度为 208.03 MPa,分别为 ZL114A 和 6061 铝合金抗拉强度的 64.14% 和 65.60%;接头延伸率为 5.16%,分别为 ZL114A 和 6061 铝合金延伸率的 41.38% 和 33.70%;焊接接头拉伸断裂形式为脆-韧混合型断裂。

关键词: 副车架;激光焊接;焊接接头;ZL114A;6061;铝合金;正交试验;焊接工艺;显微组织;力学性能

中图分类号: TG146

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.036

文章编号: 0253-6099(2023)03-0160-05

Microstructure and Mechanical Properties of ZL114A and 6061 Dissimilar Aluminum Alloy Welded Joints by Laser Welding Process

MENG Xiangchao^{1,2}, SUN Youping^{1,2,3}, HE Jiangmei^{1,2,3}, ZHOU Yong^{1,2}, XIE Shangheng^{1,2}

(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 2. Guangxi Earthmoving Machinery Collaborative Innovation Center, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Automobile Components and Vehicle Technology, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China)

Abstract: An orthogonal experiment was performed for laser welding of 5 mm ZL114A and 6061 aluminum alloys, and the influences of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of welded joint were investigated. It is shown that the influences of three parameters of laser welding power, defocus and welding speed are in a descending order. With laser welding power of 3 kW, welding speed of 16 mm/s and the defocus of -3 mm, the welded joint has an average tensile strength of 208.03 MPa and the elongation of 5.16%. Compared to ZL114A and 6061 aluminum alloy, the tensile strength is reduced to 64.14% and 65.60%, respectively, while the elongation is reduced to 41.38% and 33.70%, respectively. The welded joint presents a mixed mode of brittle and ductile fracture when failing under tensile.

Key words: subframe; laser welding; welded joint; ZL114A; 6061; aluminum alloy; orthogonal test; welding process; microstructure; mechanical property

汽车总能耗的 60% 来自车身质量, 车身自重每减轻 10%, 汽车能耗可降低 10%~15%^[1], 汽车轻量化已成为车企发展方向。越来越多的车企开始使用铝合金制备副车架, 因此, 铸造铝合金和变形铝合金在副车架

方面的应用越来越多。研究人员对铸造铝合金和变形铝合金激光焊接进行了研究, 并取得了一些成果^[2-3], 但对 ZL114A 铝合金和 6061 铝合金激光焊接的研究相对较少。

① 收稿日期: 2022-12-17

基金项目: 柳州市科技计划项目(2021CBA0102); 广西高等学校高水平创新团队项目(桂教师范[2019]52号)

作者简介: 孟祥超(1997—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为铝合金焊接及结构轻量化设计。

通信作者: 孙有平(1979—), 男, 吉林松原人, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料先进成形理论研究。

ZL114A 铝合金属于 Al-Si-Mg 系铸造铝合金,具有塑性好、收缩率小、焊接性好等优点^[4-6];6061 铝合金具有良好的抗腐蚀性、可加工性以及焊接性能^[7-9]。本文通过激光焊接方式对 ZL114A 和 6061 铝合金进行对接焊,研究了不同激光焊接参数下 2 种铝合金焊接接头显微组织及力学性能,可为副车架用 ZL114A 与 6061 异种铝合金激光对接焊提供技术依据。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验材料为 ZL114A-T6 和 6061-T6 铝合金板材,板材尺寸均为 100 mm×50 mm×5 mm。分别对 2 种母材进行拉伸试验,测得母材 ZL114A-T6 铝合金抗拉强度为 324.33 MPa,延伸率为 12.47%,母材 6061-T6 铝合金抗拉强度为 317.11 MPa、延伸率为 15.31%。2 种母材的化学成分见表 1。

表 1 ZL114A 及 6061 铝合金化学成分(质量分数) %

材料名称	Cu	Mg	Zn	Fe	Si	Cr	Mn	Al
ZL114A	0.10	0.55	0.10	0.20	7.10	—	0.10	余量
6061	0.35	1.00	0.10	0.60	0.50	0.03	0.15	余量

1.2 试验方法

采用正交试验法设计了三因素五水平的焊接试验方案。试验因素及水平设计如表 2 所示。

表 2 焊接试验因素水平设计表

水平	因素		
	焊接功率(A)/kW	焊接速度(B)/(mm·s ⁻¹)	离焦量(C)/mm
1	2.6	8	-3
2	2.7	12	-2
3	2.8	16	-1
4	2.9	20	0
5	3.0	24	1

焊接试验开始之前,用砂纸打磨待焊接区域,去除材料表面氧化层,然后用丙酮清洗待焊接区域,去除材料表面油污,并进行干燥处理。采用 IPGWFF3000 光纤激光器进行焊接,最大输出功率 3 kW,通过控制六轴 ABB 机械手来调整焊接参数,接头的焊接形式为对接单面焊,焊缝间隙固定为 0.25 mm,焊接过程中采用 99.99% 氩气作为保护气体,保护气同轴气体流量为 12 L/min。底部气体流量为 22 L/min。图 1 为激光焊接示意图。

采用光学金相显微镜观察焊接接头金相组织;采用 ETM105D 型电子万能试验机测试焊接接头力学性能;采用 HVS-1000Z 型维式显微硬度计测量焊接接头

硬度;采用 SIGMA 场发射扫描电镜分析焊接接头能谱以及断口形貌。

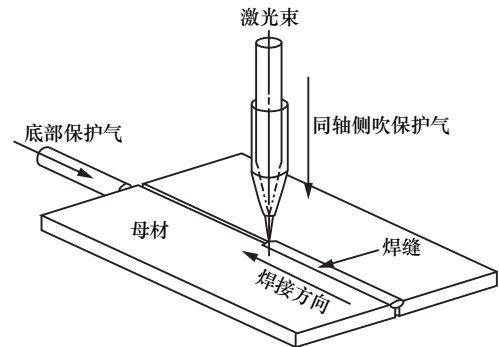


图 1 激光焊接示意图

2 试验结果与讨论

2.1 焊接正交试验极差分析与方差分析

以焊接接头抗拉强度为试验指标,针对焊接功率、焊接速度、离焦量的三因素五水平焊接正交试验极差分析结果见表 3。

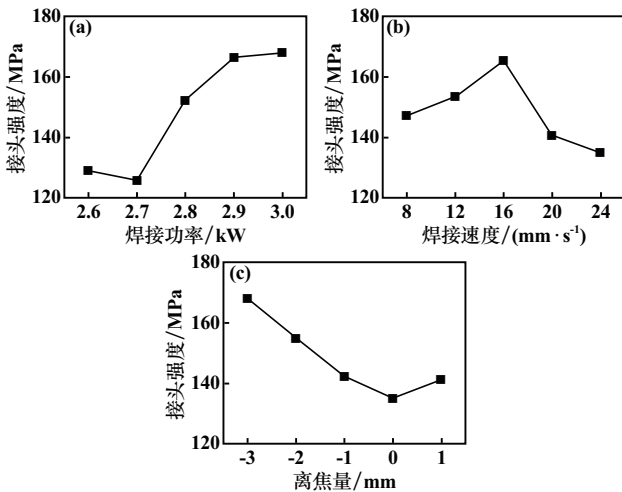
表 3 焊接接头正交试验极差分析结果

试验号	因素			接头强度/MPa
	A	B	C	
1	1	1	1	136.68
2	1	2	2	134.00
3	1	3	3	156.06
4	1	4	4	110.03
5	1	5	5	108.17
6	2	1	2	175.19
7	2	2	3	109.31
8	2	3	4	116.45
9	2	4	5	95.92
10	2	5	1	132.35
11	3	1	3	136.94
12	3	2	4	155.47
13	3	3	5	178.97
14	3	4	1	183.94
15	3	5	2	106.74
16	4	1	4	134.19
17	4	2	5	169.28
18	4	3	1	187.84
19	4	4	2	172.46
20	4	5	3	167.85
21	5	1	5	153.60
22	5	2	1	199.36
23	5	3	2	186.68
24	5	4	3	141.37
25	5	5	4	159.48
K ₁	644.94	736.60	840.17	
K ₂	629.22	767.42	775.07	
K ₃	762.06	826.00	711.53	
K ₄	831.62	703.72	675.62	
K ₅	840.49	674.59	705.94	

续表 3

试验号	因素			接头强度/ MPa
	A	B	C	
k_1	128.99	147.32	168.03	
k_2	125.84	153.48	155.01	
k_3	152.41	165.20	142.31	
k_4	166.32	140.74	135.12	
k_5	168.10	134.92	141.19	
极差 R	40.25	30.28	32.91	

K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 为焊接功率、焊接速度、离焦量在每一水平下的接头强度之和, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 为焊接功率、焊接速度、离焦量在每一水平下的接头强度总和的平均值。通过极差分析可知, 影响焊接接头强度的因素主次顺序为激光焊接功率>离焦量>焊接速度, 根据每一因素的 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 值作出焊接参数对接头强度影响的主效应图如图 2 所示。



(a) 焊接功率; (b) 焊接速度; (c) 离焦量

图 2 焊接参数对接头强度影响主效应图

由图 2 可知, 焊接参数的优选组合为 $A_5B_3C_1$, 将其命名为 26 号试样, 可以发现 26 号试样的焊接参数并不在正交试验列表中, 因此需对 26 号试样进行焊接试验, 测试其力学性能。

由于极差分析不能把试验条件的变化与试验误差区分开来, 为了实现区分, 需对焊接试验进行方差分析。

用 F 检验法对因素的显著性进行检验, 如果 $F_j > F_{\alpha}$, 则认为因素 j 对试验结果影响显著, 反之不显著。取显著性水平 α 为 0.05, $F_{0.05}(4, 12) = 3.26$ 。将实验计算结果进行计算汇总, 如表 4 所示。

由表 4 可以看出, 焊接功率的 F 值大于 $F_{0.05}(4, 12)$, 因此焊接功率相比其他两因素对试验结果有显著影响, 当焊接功率较小时, 板材更不容易焊透, 焊接接头

强度也较差。

表 4 方差分析结果汇总

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	显著水平
焊接功率	7 736.30	4.00	1 934.07	3.441	0.043
焊接速度	3 062.12	4.00	765.53	1.174	0.371
离焦量	5 919.00	4.00	1 479.75	1.484	0.268
误差	9 905.11	12.00	825.43		
总和	26 622.53	24.00			

通过方差分析, 可得焊接激光功率对焊接接头的强度影响最为显著, 其次是离焦量, 再次为焊接速度, 这与极差分析结果一致。

2.2 正交试验参数对焊缝成形的影响

表 5 和图 3 分别为正交试验中不同焊接参数下的部分焊缝宏观形貌以及横截面形貌。可以看到, 随着焊接功率增大, 焊缝熔宽也越来越大; 焊接速度越大, 焊缝熔宽越小; 离焦量越小, 板材更易焊透; 焊接功率对熔宽的影响最为显著, 当焊接功率 3 kW、焊接速度 16 mm/s、离焦量 -3 mm 时焊接接头外观形貌较好。

表 5 不同焊接参数下部分焊缝宏观形貌

试验号	焊接接头宏观形貌	焊接结果
2		未焊透
4		未焊透
6		部分焊透
10		未焊透
14		焊透
18		焊透
19		焊透
23		焊透
26		焊透

2.3 焊接接头微观组织分析

用线切割分别对 ZL114A 母材、6061 母材、26 号试样焊接接头取样, 制取金相试样。图 4 为 2 种母材和 26 号试样焊接接头金相显微组织。图 5 为 6061 母材 SEM 图像, 其中 A 点的 EDS 分析结果见图 6。

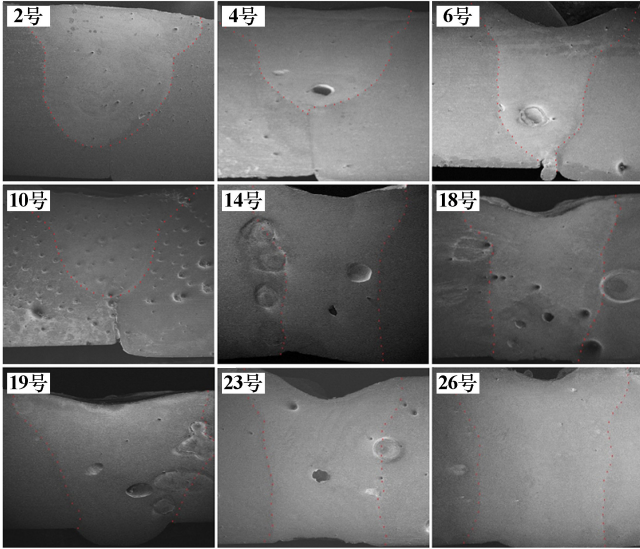


图3 部分试验板材焊接接头横截面形貌

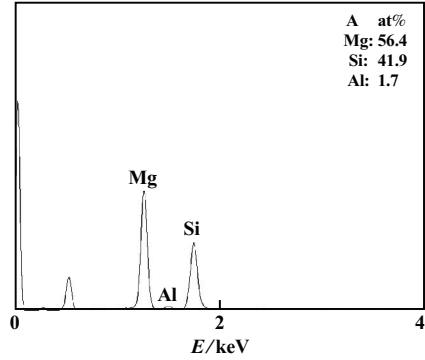
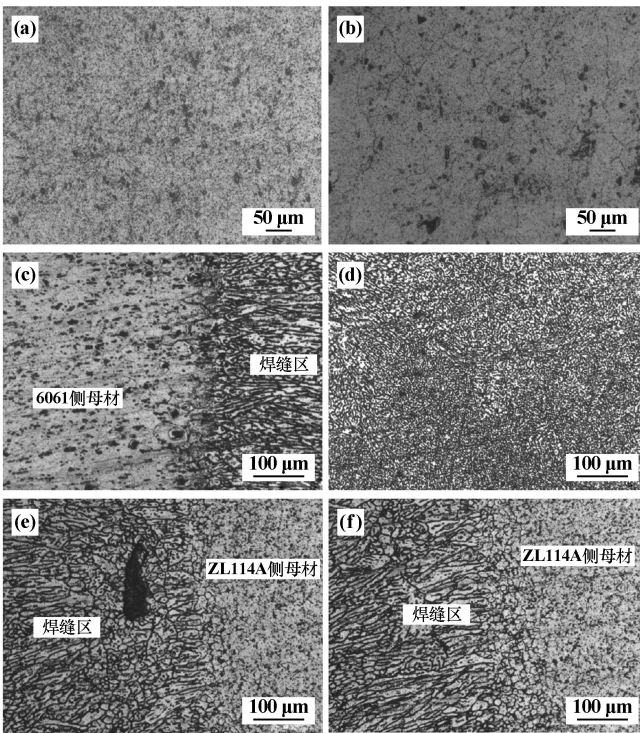


图6 6061母材A点EDS分析结果

从图4(a)、(b)可以看出,2种母材表面都存在细小的颗粒状物质。从图5和图6可以看到,6061母材铝合金表面有一些细小的颗粒状物质,为 Mg_2Si , Mg_2Si 为固溶强化相,在热处理过程中溶入基体,在时效过程中析出,进而提高合金强度^[10]。从图4(c)可以看到,母材侧组织要比焊缝区组织粗大得多,因为焊缝冷却速度比母材快,焊缝形成激冷结晶组织。靠近焊缝侧存在粗大的柱状晶,且向焊缝内部延伸。从图4(d)可以看出焊缝中心区域为细小的树枝晶和等轴晶^[11-13],因为焊缝冷却速度与形核速度较快,晶粒来不及长大^[3]。图4(e)中的黑色孔洞为焊接缺陷,这在焊接中不可避免,这也是导致焊接接头强度减弱的主要原因之一。从图4(f)可以看到,靠近母材侧存在细小的等轴晶,靠近焊缝区存在明显的粗大柱状晶,且向焊缝内部生长^[14-15]。

2.4 接头力学性能

图7为26号焊接接头不同区域维氏硬度值分布图。每隔0.25mm取一个测试点,硬度曲线呈现典型的“W”型;焊缝中心处硬度达到最高值,为92.9HV,因为激光焊接冷却速度较快^[16],焊缝中心处为晶粒细小的等轴晶;从焊缝中心到两侧母材熔合线区域,硬度逐渐降低,2种母材熔合线处硬度都较低。结合金相图可以发现,2种母材熔合线区晶粒尺寸相比焊缝区要



(a) ZL114A母材; (b) 6061母材; (c) 6061侧熔合线区; (d) 焊缝; (e) 焊接接头孔洞缺陷; (f) ZL114A侧熔合线区

图4 母材及26号试样焊接接头显微组织

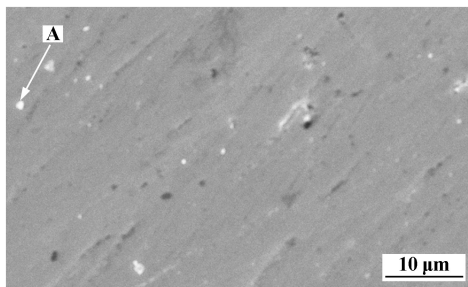


图5 6061母材SEM图像

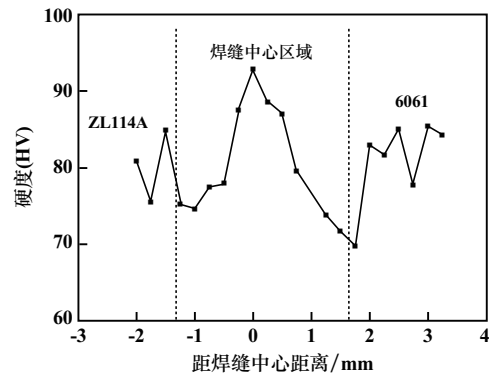
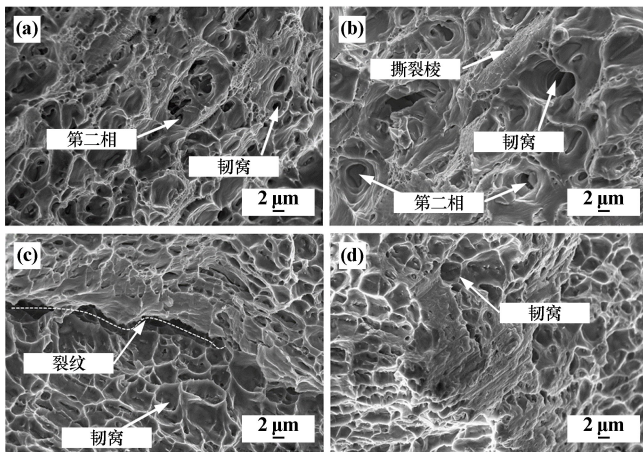


图7 26号焊接接头硬度分布曲线

粗大,这也是导致熔合线区域硬度相对较低的原因,硬度区域最低处也是力学性能最薄弱区域。随着离焊缝中心区域距离增加,硬度值逐渐下降,最终接近母材的硬度值。

根据 ASTM B557M-2007e1 标准^[17]取拉伸试样,采用 ETM105D 型电子万能试验机对 26 号试样进行室温拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/min。26 号试样的焊接接头强度可达到 208.03 MPa,分别为 ZL114A 和 6061 铝合金的 64.14%和 65.60%;延伸率为 5.16%,分别为 ZL114A 和 6061 铝合金的 41.38%和 33.70%。26 号试样断裂位置处于 ZL114A 侧熔合线区域。

图 8 为 ZL114A 母材、6061 母材和 26 号试样的拉伸断口形貌。由图 8 可以看出,2 种母材拉伸断口都存在尺寸大小不一的韧窝,部分韧窝底部存在破碎的第二相粒子^[18-19],2 种母材的断裂形式均为脆-韧混合型断裂^[20]。26 号试样拉伸断口存在大量均匀细小的韧窝,可以看到明显的裂纹、河流状花纹和台阶,河流状花纹是脆性断裂的特征,这也说明焊接接头的塑性较差^[21]。26 号试样的断裂形式也为脆-韧混合型断裂。



(a) ZL114A 母材; (b) 6061 母材; (c), (d) 26 号试样

图 8 母材与 26 号试样拉伸断口形貌

3 结 论

1) 基于正交试验研究了激光焊接功率、焊接速度、离焦量对 ZL114A 和 6061 铝合金焊接接头强度的影响,结果显示,影响焊接接头强度的因素主次顺序为:激光焊接功率>离焦量>焊接速度。

2) 激光焊接功率 3 kW、焊接速度 16 mm/s、离焦量-3 mm 时可获得较好的焊接接头性能,接头平均抗拉强度可达 208.03 MPa,延伸率可达 5.16%。焊缝中心区域为细小的树枝晶和等轴晶,焊缝中心为整个焊接接头硬度最高的区域。焊接接头断裂形式为脆-韧

混合型断裂。

参考文献:

- [1] 陈来,王占坤,邹纯,等. 汽车用铝合金副车架成形工艺及应用现状[J]. 铸造, 2019, 68(4): 390-395.
- [2] 金文福,沈其明,魏鹏尧,等. 6061-T6/A356-T6 铝合金焊接工艺研究[J]. 有色金属加工, 2019, 48(6): 24-26.
- [3] 周金旭,康铭,徐玉君,等. 5052/6005A 异种铝合金激光填丝焊接接头组织与力学性能研究[J]. 有色金属材料与工程, 2021, 42(5): 46-50.
- [4] 董鹏,张益坤,陈靖,等. ZL114A-2219 异种铝合金激光焊接接头组织与性能[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 430-433.
- [5] 杜旭初,罗传彪,李大奎,等. ZL114A 框架铸件铸造工艺研究[J]. 铸造, 2015, 64(6): 568-572.
- [6] 梁艳龙,于玮. ZL114A 铝合金表面激光熔覆层组织及性能研究[J]. 光机电信息, 2011, 28(7): 8-15.
- [7] 丁劲锋,穆绍帅,周注民. 6061-T6 铝合金中厚板激光熔透焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(17): 47-52.
- [8] 舒服华,田会方. 基于 SPA 的 6061 铝合金脉冲激光焊接工艺参数优化[J]. 焊接学报, 2018, 39(4): 109-114.
- [9] 王森,刘强,李天景. 6061 铝合金 FSW 焊缝时效组织与力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 163-165.
- [10] DONG Peng, JUN Shen, QIN Tang, et al. Effects of aging treatment and heat input on the microstructures and mechanical properties of TIG-welded 6061-T6 alloy joints[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2013, 20(3): 259-265.
- [11] 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.
- [12] 王志敏,顾兰,李宏伟,等. 铝合金 ZL114A 的激光焊接工艺[J]. 宇航材料工艺, 2007(4): 55-57.
- [13] XUE Junyu, LI Yuanxing, CHEN Hui, et al. Effects of heat input on wettability, interface microstructure and properties of Al/steel butt joint in laser-metal inert-gas hybrid welding-brazing[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2017, 255: 47-54.
- [14] 洪鹤,张希川,安振之,等. ZL114A 铸造铝合金焊接后的金相组织[J]. 沈阳工业大学学报, 2001(S1): 6-8.
- [15] 周金旭,徐玉君,齐芑芑,等. 6005A 铝合金 MIG 焊接接头组织及性能研究[J]. 热处理技术与装备, 2021, 42(4): 38-42.
- [16] 周思鹏,孙有平,何江美,等. 2524 铝合金光纤激光焊接接头的组织与力学性能[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(3): 60-68.
- [17] ASTM B557M-2007, 锻造和铸造铝合金和镁合金制品的抗拉测试的标准试验方法(米制)[S].
- [18] 王松辉,孙有平,何江美,等. Cu 含量对大应变轧制 Al-Cu-Mg 合金微观组织及力学行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(5): 914-922.
- [19] 杨春洋,孙有平,何江美,等. 轧制温度对大应变轧制 Al-4.5Cu-1.5Mg-0.1Sc 合金组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022, 42(2): 132-135.
- [20] 范聪,杨尚磊,白易山,等. 铝合金中厚板焊接接头显微组织及其疲劳损伤[J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58(2): 30-35.
- [21] Micromechanism of Cleavage Fracture of Metals[M]. Elsevier Inc, 2015.

引用本文: 孟祥超,孙有平,何江美,等. ZL114A 和 6061 异种铝合金激光焊接工艺及接头显微组织和力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3): 160-164.