

DOI: 10.3969/j.issn.1671-6795.2024.06.008

# 6005A-T6 铝合金搭接接头激光焊工艺研究

田春雨, 李洪林, 周金旭, 叶树茂, 金鑫, 邓鑫

(辽宁忠旺集团有限公司, 辽宁 辽阳 111003)

**摘要:**文章以 6005A-T6 铝合金为研究对象,进行搭接接头激光焊工艺研究。研究内容包括送丝速度不变,提高激光功率;激光功率不变,提升送丝速度。结果显示,2 mm 厚 6005A-T6 铝合金搭接接头激光焊后接头表面成型良好,但当激光功率达到 5 000 W 时背部出现焊疤;当送丝速度不变提高激光功率时,焊缝金属更易铺展,熔合性能增加,焊缝表面纹路变得深而清晰;同时随着激光功率的增加,力学性能与力学性能增加幅度都在增加。当激光功率不变,增加送丝速度时,其表面成型质量下降,接头熔深、力学性能呈现先提高再下降。观察力学断裂试样,断裂位置在上板熔合线时的力学性能要高于断裂在下板熔合线位置时的力学性能。显微组织检测结果显示,搭接接头激光焊焊缝,熔合线附近出现明显的柱状晶组织,焊缝中心为等轴晶粒。

**关键词:**搭接接头;激光填丝焊;表面成型;显微组织;力学性能

中图分类号: TG457.14

文献标识码: B

文章编号: 1671-6795(2024)06-0031-05

6005A 作为一种可热处理强化铝合金,具有良好的焊接性、耐腐蚀性和较高的抗疲劳强度<sup>[1,2]</sup>,已广泛应用于汽车及轨道交通领域。其连接方式多采用 MIG 焊和 TIG 焊,但过高的热输入往往会导致接头变形和软化<sup>[3-5]</sup>,且 TIG 焊焊接速度较低,降低生产效率, MIG 焊在焊接合金时容易产生气孔等缺陷,会降低焊接接头强度,以上铝合金的焊接难题制约了其进一步发展<sup>[6,7]</sup>。因此,为保证焊接结构的安全性与可靠性,亟需提出新的焊接方法来提高焊接接头质量。激光焊技术作为一种先进的焊接技术,具有能量密度高、热输入小、焊缝深宽比大、焊接变形小等优点,十分适合铝合金材料的焊接<sup>[8-11]</sup>。本文将采用激光填丝焊对 6005A-T6 铝合金进行搭接接头激光焊研究,分析了

不同激光功率及送丝速度下焊缝成型情况,并对焊接接头进行了力学性能及金相分析。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 材料及设备

试验用材料为 2 mm 厚的 6005A-T6 铝合金,其材料成分见表 1;其力学性能为,屈服强度 232 MPa (标准值  $\geq 225$  MPa),抗拉强度 283 MPa (标准值  $\geq 270$  MPa),断后伸长率 12% (标准值  $\geq 6\%$ )。试验设备采用德国通快 Trudisk 8002 碟片式激光器, HIGHYAG BIMO 激光头,通快直径 400  $\mu\text{m}$  光纤的激光加工系统,系统最大输出功率 8 000 W,波长 1 060 nm,工作距离 310 mm,最小光斑直径 0.6 mm。

表 1 6005A-T6 铝合金化学成分(质量分数,%)

合金	类别	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Zn	Cr	Al
6005A-	标准	0.5~0.9	1.0~1.4	0.35	0.30	0.50	0.30	0.10	0.20	0.30	余量
T6	实测	0.65	1.2	0.19	0.06	0.11	0.19	0.03	0.08	0.11	余量

### 1.2 实验方法

接头为搭接接头,采用机械方法清理表面氧化膜及油污,激光束与下板夹角为 45°,如图 1 所示。激光

头采用并列双焦点模式,能量配比为 1:1,离焦量为 0 mm,焊接速度 2.4 m/min,氩气流量为 25 L/min,焊丝牌号为 ER5087,激光功率和送丝速度采用两种方

收稿日期: 2024-01-26

作者简介: 田春雨(1986-),男,工程师,主要从事铝合金焊接技术开发工作。

式:送丝速度保持 3.5 m/min 不变,改变激光功率,分别选择 4 000 W、4 500 W、5 000 W;激光功率保持 4 500 W 不变,改变送丝速度,分别选择 3.0 m/min、3.5 m/min、4.0 m/min。焊接完成后垂直于焊接方向截取金相试样,经砂纸打磨和机械抛光后,用 10% NaOH 水溶液试剂腐蚀,使用蔡司光学显微镜观察接头组织形貌。使用 AG-X100KNH 型电子万能试验机对母材和焊接试样进行拉伸试验,每组测试 2 个试样,取其平均值作为试验结果。

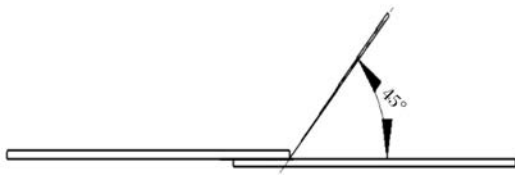


图 1 焊接结构简图

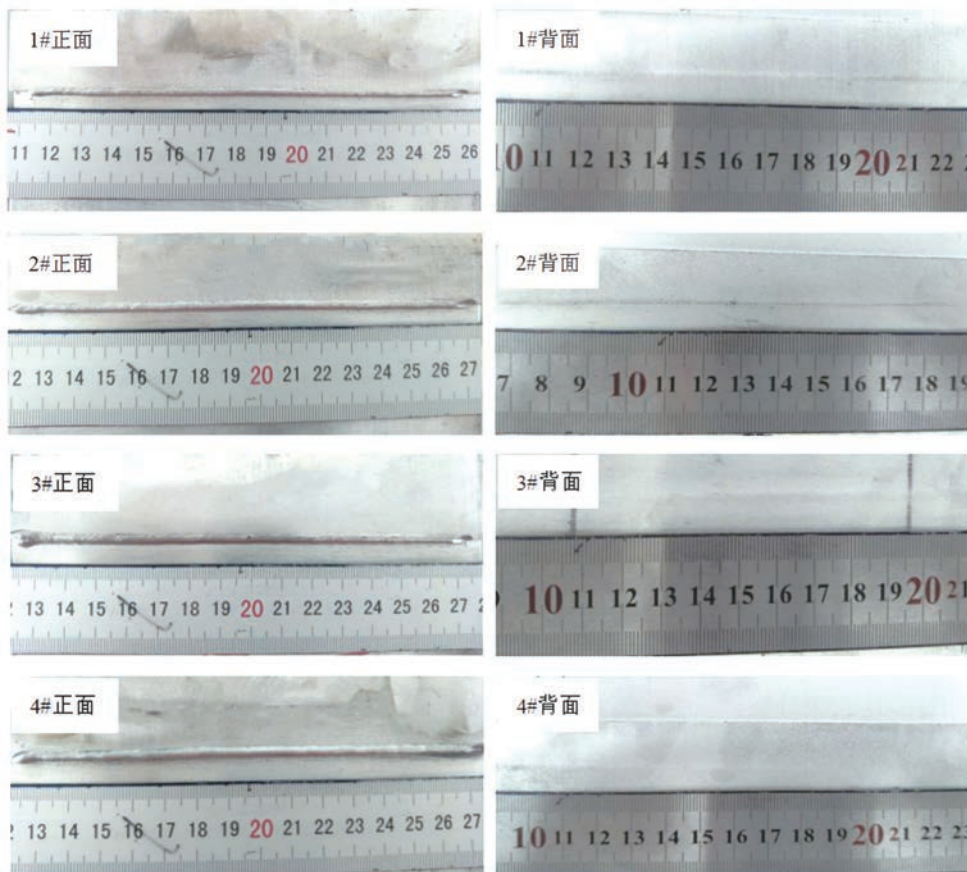
## 2 结果与分析

### 2.1 焊缝表面成型

焊缝表面及背面成型如图 2 所示。结果显示,送丝速度不变,随着激光功率由 4 000 W 增加到 5 000 W (1#、3#、5#),焊缝金属更易铺展,熔合性增加,但焊缝

波动也随之增加,致使焊缝纹路变得深而清晰。激光功率不变,随着送丝速度的增加(2#、3#、4#),当送丝速度由 3.0 m/min 增加到 3.5 m/min 时焊缝铺展和熔合性能均得到提高,增加到 4.0 m/min 时,焊缝铺展变差,甚至出现未熔(图 3);当激光功率增加到 5 000 W 时,下板焊涸。

结果分析,其他工艺参数保持不变,随着激光功率的增加,热输入加大,金属熔化和熔合的更加充分,当激光能量较小时,熔化的焊丝以液桥的形式存在,从匙孔边缘流入熔池,对熔池的冲击较小。随着激光能量的增加,激光在熔化焊丝后仍有较高能量密度,这部分能量会在母材表面形成一个尺寸较大的匙孔,匙孔及熔池的后方存在一定波动,对焊丝熔化过渡的稳定性产生较大的影响<sup>[12]</sup>,进而出现焊接纹路的波动。仅改变送丝速度,随着送丝速度的增加,需熔化焊丝的激光能量也随之增加,当送丝量超过一定数值后,能量不足以熔化焊丝,其铺展性变差,严重时会出现未熔合缺陷。当送丝速度和焊接速度都一定时,激光功率存在一个阈值,超过该数值时,能量过大,造成金属的塌陷。



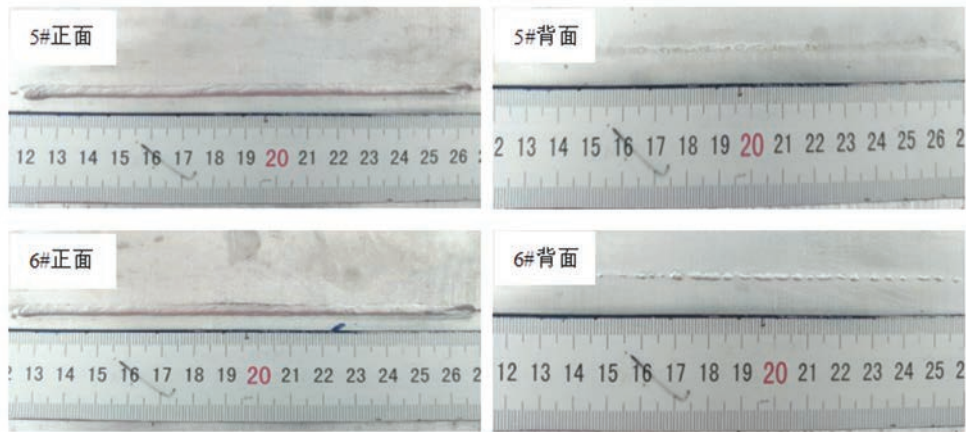


图2 表面及背部成型照片



图3 4#未熔合示意图

### 2.2 宏观形貌及显微组织

焊缝宏观形貌如图4所示。结果显示,送丝速度一定时,随着激光功率的增加(1#、3#、5#),焊缝熔深呈递增趋势;激光功率一定时,随着送丝速度的增加

(2#、3#、4#),熔深呈先增加后下降的趋势。结果分析,激光功率增加,热输入增加,故此焊缝熔深增加;当送丝量增加的范围满足当前激光功率所能承受的最大范围之内时,更多的热量通过焊丝熔入到焊缝中,故此一开始随着送丝速度的增加,其熔深增加。但送丝速度增大到一定数值时,使得同样条件下熔化焊丝所需要的激光能量增加,而母材所吸收的激光能量则变少,从而导致了母材的熔深变小,故此,焊缝熔深先增加后下降。

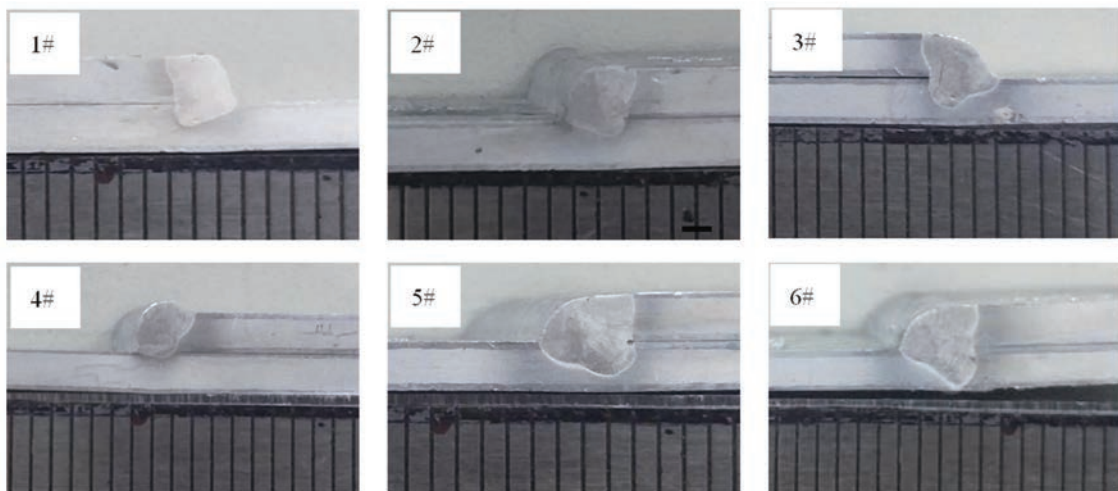


图4 焊缝宏观形貌

焊接接头焊缝区、熔合区金相照片拍摄位置及结果如图5所示。熔池的结晶是由液态向固态转变的过程,其会在熔合线附近产生形核质点,然后逐渐长大。从微观组织形态可以看出,熔合线附近出现明显的柱状晶组织(图5(a)),熔合线附近的晶粒具有明显的方向性,晶粒通常向温度梯度最大的反方向生

长,由于垂直于熔合线方向的散热效率最高,因此在焊接过程中熔合线附近的组织生长方式表现为垂直于熔合线并向熔池内部推进<sup>[13]</sup>。而在焊缝中心位置,存在很大的成分过冷度,溶质浓度最高,同时由于温度梯度小,可以自发形核长大,形成等轴晶粒<sup>[14]</sup>,如图5(b)所示。

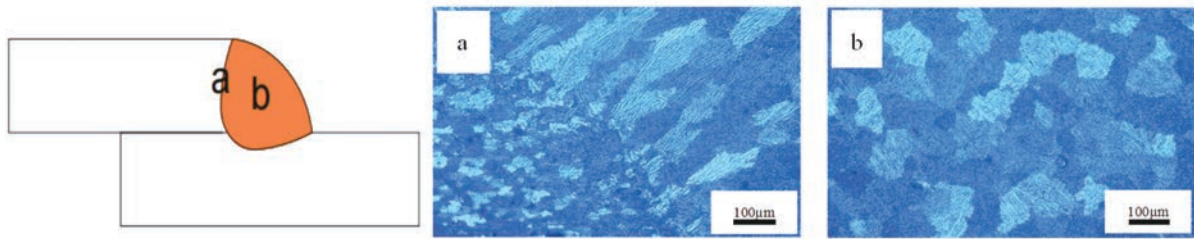


图 5 焊缝金相组织

2.3 力学性能

由于接头形式为搭接接头,无法加工成标准力学试样,因此将试样加工成宽度为 30 mm、长度为

180 mm 的非标准力学试样,检验最大力值,其力值及断裂位置见表 3。力学性能变化曲线如图 6 所示,试样断裂试样如图 7 所示。

表 3 力学性能

编号	实测力值/N	断裂位置	焊接参数
1	8 359	上板熔合线	功率 4 000W,送丝速度 3.5 m/min,焊速 2.4 m/min
2	8 424	上板熔合线	功率 4 500W,送丝速度 3.0 m/min,焊速 2.4 m/min
3	8 430	上板熔合线	功率 4 500W,送丝速度 3.5 m/min,焊速 2.4 m/min
4	7 068	下板熔合线	功率 4 500W,送丝速度 4.0 m/min,焊速 2.4 m/min
5	9 539	上板熔合线	功率 5 000W,送丝速度 3.5 m/min,焊速 2.4 m/min
6	10 707	上板熔合线	功率 5 000W,送丝速度 4.0 m/min,焊速 2.4 m/min

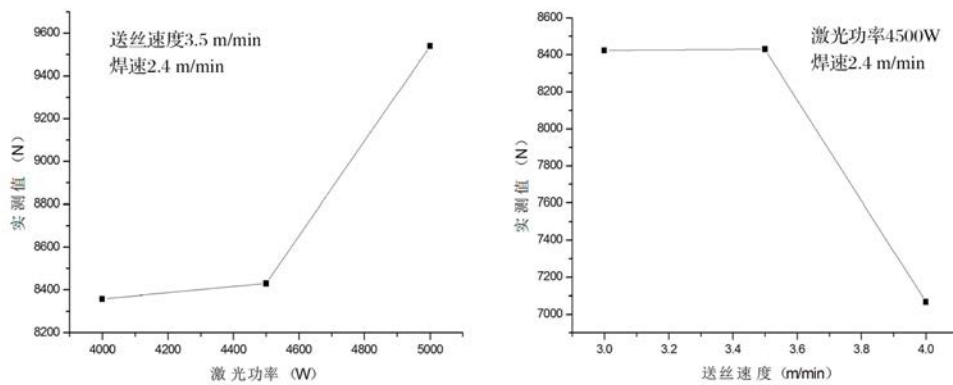


图 6 力值变化曲线



图 7 试样断裂位置

结果显示,力学性能随着激光功率的增加逐渐增加,且随着功率的逐渐加大,增加的幅度也随之增大;力学性能随着送丝速度的增加,刚开始时略有增加,但随着送丝速度的进一步提高,性能开始降低;当激光功率足够大时,力学性能随着送丝速度的增加而增

加,且增加效果较为明显。从检测结果可以看出,搭接接头性能最佳时的断裂位置在上板熔合线处,断裂位置也是选择焊接参数是否合理的一个重要考量指标。结果分析,激光功率增加,焊缝的输入热也逐渐增加,相应地熔宽、熔深也增加,此时焊缝的有效受力

面积增大,抗剪切力增大<sup>[15]</sup>;随着送丝速度的增加,熔深呈先增加后减小趋势,故此力学性能呈现先增加后减小趋势;当激光功率足够时,随着送丝量的增加,焊缝金属增加,其熔深、熔宽增加,故此焊缝的抗剪强度增加。断裂位置在上板熔合线处,此时说明两板间的熔合宽度以满足要求,力学性能较好。

### 3 结论

(1)送丝速度不变,随着激光功率的增加,焊缝金属更易铺展,熔合性能增加,但焊缝波动也随之增加,致使焊缝纹路变得深而清晰;同时随着激光功率的增加,热输入增加,焊缝熔深呈递增趋势,其力学性能与力学性能增加幅度都在增加,但当功率增加到一定数值时,下板会存在焊涌现象。因此选择最优激光功率要考虑性能的同时也要考虑下板焊涌问题。

(2)激光功率不变,送丝速度增加,当送丝速度由3.0 m/min 增加到3.5 m/min 时焊缝铺展和熔合均得到提高,当增加到4.0 m/min 时,焊缝铺展变差,甚至出现未熔;力学性能随着送丝速度的增加呈现先增加后减小趋势。因此选择最优的送丝速度主要考虑的是焊缝金属要充分熔合、铺展并无缺陷。

(3)搭接接头激光焊焊缝,熔合线附近出现明显的柱状晶组织,焊缝中心为等轴晶粒。

#### 参考文献

[1] 张欣盟,高士康,等.6005A-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头

疲劳性能分析[J].焊接学报,2023(9):30-36+130-131.

- [2] 黎家行,潘德聪,等.含 Se 的 6005A 铝合金的微观组织与拉伸性能.材料研究与应用[J].2022,16(6):985-992.
- [3] 杨子涵,刘德博,等.2219 铝合金 TIG 和 FSW 接头力学及疲劳性能[J].精密成形工程,2023,15(1):17-24.
- [4] 牛虎山,林化强,等.6005A 铝合金摆动激光焊接组织及力学性能研究[J].精密成形工程,2023,15(4):33-39.
- [5] 曾涛,晁耀杰,等.5A06 铝合金活性 TIG 焊接头组织与性能研究[J].兵器材料科学与工程,2018,41(4):82-86.
- [6] 康昊杰.铝合金薄板结构 MIG 焊接缺陷的产生机理及控制措施[D].镇江:江苏科技大学,2018.
- [7] 陈国庆,柳峻鹏,等.铝合金焊接工艺的研究进展[J].焊接,2017(9):7-12.
- [8] 吕志超,洪洋,等.6063 铝合金单模光纤激光焊接工艺研究[J].精密成形工程,2022,14(1):159-164.
- [9] 吴雁,肖礼军,等.激光在铝合金焊接中的应用研究进展[J].热加工工艺,2021(15):1-5+11.
- [10] 牛虎山,林化强,等.6005A 铝合金摆动激光焊接组织及力学性能研究[J].精密成形工程,2023(4):33-39.
- [11] 陈亚斌,王韬,等.6005A-T6 铝合金激光焊接头性能的研究[J].中国新技术新产品,2022(18):75-77.
- [12] 孟圣昊,宫建锋,等.铝合金双光束激光填丝焊接熔丝特征分析[J].上海航天(中英文),2020(3):51-60.
- [13] 张振宇,陆郡,等.激光功率对 6061-T6 铝合金激光填丝焊接头组织及性能的影响[J].有色金属材料工程,2023(3):1-8.
- [14] 周金旭,沈其明,等.铝合金薄板激光搭接焊接头组织及力学性能[J].有色金属加工,2023(3):18-20+28.
- [15] 吴雁,李朝阳,等.焊接工艺参数对铝/铝激光焊焊缝形貌及力学性能的影响[J].焊接,2021(11):27-30+47+62-63.

## Research on Laser Welding Technology of 6005A-T6 Aluminum Alloy Lap Joint

Tian Chunyu, Li Honglin, Zhou Jinxu, Ye Shumao, Jin Xin, Deng Xin

(Liaoning Zhongwang Group Co., Ltd., Liaoyang 111003, China)

**Abstract:** Taking 6005A-T6 aluminum alloy as the research object, the laser welding technology of lap joint is studied in this paper. The research contents include increasing the laser power with constant wire feed speed, laser power unchanged and improve wire feed speed. The results show that the surface of the 2 mm 6005A-T6 aluminum alloy lap joint is well formed after laser welding, but the welding blots appear on the back when the laser power reaches 5 000w. When the wire feeding speed is unchanged and the laser power is increased, the weld metal is easier to spread, the fusion performance is increased, and the weld surface texture becomes deep and clear. At the same time, with the increase of laser power, mechanical properties and mechanical properties increase. When the laser power is unchanged and the wire feeding speed is increased, the surface forming quality decreases, the joint penetration depth and mechanical properties increase first and then decrease. The mechanical properties of the fracture specimens at the fusion line of the upper plate are higher than those at the fusion line of the lower plate. The results of microstructure testing show that the laser welding seam of the lap joint has obvious columnar crystal structure near the fusion line, and the center of the weld is equiaxed grain.

**Keywords:** lap joint; laser wire filling welding; surface forming; microstructure; mechanical property