

# 2195-T8 铝锂合金激光填丝双面焊熔池行为与接头力学性能研究

杨正伟<sup>1</sup>, 陈金树<sup>1</sup>, 田 干<sup>1</sup>, 张 炜<sup>2\*</sup>, 陈家威<sup>1</sup>, 肖俊玲<sup>1</sup>

(1. 火箭军工程大学 导弹工程学院, 陕西 西安 710025;  
2. 广州理工学院 智能制造与电气工程学院, 广东 广州 510850)

**摘 要:** 铝锂合金以其质轻、高强、耐腐蚀等优势成为新一代航空航天应用材料, 与其他铝锂合金相比, 2195-T8 铝锂合金焊接性能最优。基于液体火箭贮箱连接处的焊接需求, 采用激光填丝双面焊接可以获得质量较好的接头。针对焊接过程中熔池内流体流动与温度的变化, 建立了热-流耦合数学模型, 通过数值模拟的方法对 2195-T8 铝锂合金焊接过程进行了研究, 而后开展了接头轴向拉伸强度测试实验, 阐明了焊接速度与填丝速度对熔池成形、流动与热输入的影响, 并得到了不同焊接工艺参数下的最高接头强度。研究表明: 4 组不同焊接工艺参数下, 第一面焊接与第二面焊接的熔池内流体流动趋势基本一致, 主要为熔池左侧的顺时针涡流与右侧的逆时针涡流; 提高焊接速度或填丝速度可以改善熔池成形质量, 降低熔池热输入, 细化焊缝熔合区中以柱状晶为代表的晶粒, 进而有效提升接头力学性能; 通过对 4 组不同焊接工艺参数的数值模拟与实验结果进行对比分析, 最终得到熔池成形质量最好、热输入最小的焊缝, 其接头轴向拉伸强度高达 426.4 MPa, 为母材强度的 72.6%, 对应的焊接速度与填丝速度分别为 50 cm/min、1.8 m/min。

**关键词:** 2195 铝锂合金; 激光填丝双面焊接; 熔池; 接头强度

**中图分类号:** TG115.6<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220350

## Study on welding pool behavior and joint mechanical properties of 2195-T8 Al-Li alloy by laser wire filling double-sided welding

Yang Zhengwei<sup>1</sup>, Chen Jinshu<sup>1</sup>, Tian Gan<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>2\*</sup>, Chen Jiawei<sup>1</sup>, Xiao Junling<sup>1</sup>

(1. College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi 'an 710025, China;

2. School of Intelligent Manufacturing and Electrical Engineering, Guangzhou Institute of Science and Technology, Guangzhou 510850, China)

**Abstract:** Al-Li alloy has become a new generation of aerospace application materials with its advantages of light weight, high strength and corrosion resistance. Compared with other Al-Li alloys, 2195-T8 Al-Li alloy has the best welding performance. Based on the welding demand of liquid rocket tank joint, better joint quality can be gotten with laser wire filling double-sided welding. For the fluid flow and temperature change in the molten pool in the welding process, heat-flow coupling mathematical model is established. By using the method of numerical simulation, the welding process of 2195-T8 Al-Li alloy is studied, and then the joint axial tensile strength test is carried out. The effect of welding speed and wire filling velocity of the molten pool on the flow and heat input is

收稿日期: 2022-05-23; 修订日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (92060106, 52075541); 陕西省创新能力支撑计划-科技创新团队 (2022TD-62)

作者简介: 杨正伟, 男, 副教授, 博士, 主要从事复杂装备结构成型、多尺度表征及力学性能评估方面的研究。

通讯作者: 张炜, 男, 教授, 博士, 主要从事复杂装备结构成型、多尺度表征及力学性能评估方面的研究。

illustrated. The maximum joint strength under different welding parameters is obtained. The results show that under four different welding parameters, the fluid flow trend in the molten pool is basically the same between the first welding side and the second welding side, which is mainly clockwise eddy current on the left side and counterclockwise eddy current on the right side. Increasing welding speed or wire filling speed can improve the forming quality of the molten pool, reduce the heat input of the molten pool, refine the grain represented by columnar crystal in the welding fusion zone, and effectively improve the mechanical properties of the joint. By comparing and analyzing the numerical simulation and experimental results of 4 groups of different welding process parameters, the weld with the best forming quality and the smallest heat input is finally obtained. The axial tensile strength of the joint is up to 426.4 MPa, which is 72.6% of the base metal strength. The corresponding welding speed and wire filling speed are 50 cm/min and 1.8 m/min respectively.

**Key words:** 2195 Al-Li alloy; laser wire filling double-sided welding; molten pool; joint strength

## 0 引言

铝锂合金在航空航天领域应用越来越广泛。其中, 2195 系列铝锂合金属于焊接性能最优的铝合金, 具有低密度、高比强度和比刚度、耐腐蚀等特点<sup>[1-2]</sup>, 是液体火箭贮箱的主要结构用材料。当前, 铝锂合金制贮箱连接处的制造技术主要以激光焊接为主<sup>[3]</sup>, 但焊接后的接头力学性能有待提高, 为此, 国内外学者进行了大量研究。为分析焊接速度对焊缝力学性能的影响, 余律波<sup>[4]</sup>等针对铝锂合金制机身壁板开展实验研究, 发现焊接结构件抗裂纹扩展能力随焊接速度先增后减, 当焊接速度为 0.1 m/s 时, 其抗裂纹扩展能力最强。但他仅考虑了焊接速度这单一变量对焊缝质量的影响, 为研究多个影响因素产生的效果, 金阳<sup>[5]</sup>对 2 mm 厚新型 Al-Cu-Li 铝锂合金进行单面焊接数值模拟, 分析了焊接过程中温度场的分布对焊缝力学性能的影响, 发现当激光功率过大并且焊接速度过小时, 会导致温度梯度变大, 经实验得知焊缝力学性能也随之降低; 为进一步从微观角度分析晶粒对焊缝质量的影响, 金阳<sup>[6]</sup>等对该铝锂合金单面焊接后进行微观分析, 指出激光功率 3000 W、焊接速度 3 m/min 时, 熔合线附近的等轴晶细化程度最好, 提高了焊缝力学性能。在上述激光焊接的基础上, 陈根余<sup>[7]</sup>等采用扫描填丝焊接工艺研究 2 mm 厚 2060 铝锂合金, 发现焊缝气孔被有效抑制, 焊缝质量明显提高。但都局限于单面焊接, Lei 等<sup>[8]</sup>对铝合金分别进行单、双面焊接, 而后开展力学测试, 发现双面焊接的焊缝抗拉强度与断裂延伸率比单面焊接的焊缝均有所提高; 为进一步改进铝合金双面焊接方法, 提高焊缝力学性能, 赵耀邦<sup>[9]</sup>等对 5A06 铝合金进行激光-电弧双面焊

接, 发现焊缝表面成形得到改善, 内部气孔率降低, 其力学性能相比于激光双面焊更好。基于此, 苗玉刚<sup>[10]</sup>等研究了焊接参数对铝合金激光-电弧双面焊接接头特征的影响, 发现激光功率增加时, 焊缝最小熔宽、熔深增大, 但焊缝两侧的熔宽增大趋势相同。

上述研究对激光填丝焊接技术的应用与发展起到了极大的推动作用, 但目前为止, 对铝合金尤其是铝锂合金激光填丝双面焊接的研究不够深入, 相较于单面焊接, 双面焊接能在热输入更小的条件下保证焊缝熔透, 提高接头质量。因此, 文中针对 2195-T8 铝锂合金激光填丝双面焊接过程建立了热-流耦合数学模型, 系统地分析不同焊接参数下熔池的流场、熔池测量点温度变化趋势。同时, 开展激光填丝双面焊接实验以验证数值模拟的可靠性, 为研究焊接参数对接头力学性能的影响提供参考。

## 1 数学模型

激光填丝双面焊接为包含匙孔较浅的热传导焊, 涉及了气、流、固之间的热量与质量传递, 因此, 需要采用计算流体力学相关理论分析焊接过程。

在数值模拟中, 将激光源描述成一自适应旋转高斯热源, 其热源方程为:

$$Q_{\text{laser}} = \frac{9P_{\text{laser}}\eta}{\pi H(t)R_0^2(1-e^{-3})} \exp\left[\frac{-9(x^2+y^2)}{R_0^2 \ln(H(t)/z)}\right] \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{laser}}$  为激光源能量;  $P_{\text{laser}}$  为激光功率;  $\eta$  为铝锂合金吸收率, 取 0.4;  $H(t)$  为匙孔深度;  $R_0$  为激光有效半径。

将空气相设置为第一相, 焊丝与工件设置为第二相, 通过对两相体积分数的 VOF (Volume of fluid) 序参量计算, 得到两相在空间的分布, 最终得到相界。

表面追踪使用的 VOF 动力学方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla F = 0 \quad (2)$$

式中:  $t$  为时间;  $\vec{u}$  为计算域内流体的速度矢量;  $F$  为计算域内两相的体积分数。

液态金属蒸发后会对熔池产生反冲压力, 计算公式为:

$$P_r = AB_0 T^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{U}{N_a k_b}} \quad (3)$$

式中: 系数  $A$  的值为 0.55;  $B_0$  为蒸发常数, 对于铝为  $2.05 \times 10^{12}$ ;  $T$  为温度;  $M_a$  为物质的原子质量;  $L_v$  为蒸发潜热;  $N_a$  为阿伏伽德罗数;  $k_b$  为玻耳兹曼常数。

数值模型中, 需考虑对流传热, 可通过能量方程计算整个计算域内的能量变化。此外, 表面对流、辐射、熔化、蒸发以及凝固过程均会使能量发生变化, 故引入源项  $S_h$ :

$$S_h = Q_{\text{laser}} - S_c - S_r - S_L - S_V \quad (4)$$

式中:  $S_h$  为能量方程源项;  $S_c$  为表面对流损失;  $S_r$  为表面辐射引起的能量损失;  $S_L$  为工件熔化吸热;  $S_V$  为液态金属蒸发吸热。通过二次开发的方法将这些源项与控制方程进行耦合, 实现对激光填丝焊的三维瞬态变化过程的模拟。

焊接过程所产生的金属蒸汽会形成表面对流并带走一部分激光能量, 该能量损失为:

$$S_c = h_c (T - T_r) \quad (5)$$

式中:  $h_c$  为对流换热系数, 考虑到保护气的影响, 在数值模型中被设为 200。

铝锂合金表面辐射所导致的能量损失为:

$$S_r = \vartheta \delta_0 (T^4 - T_r^4) \quad (6)$$

式中:  $\vartheta$  为表面辐射系数;  $\delta_0$  为玻耳兹曼常数,  $\delta_0 = 5.6697 \times 10^{-8}$ 。

焊接时, 铝锂合金吸收热量熔化, 吸收热量为:

$$S_L = -\nabla \cdot (\rho \vec{u} f_L L_m) \quad (7)$$

式中:  $f_L$  为区域液体的体积分数;  $L_m$  为熔化潜热。

焊接过程中, 铝锂合金熔化后不断吸热而生成金属蒸汽, 蒸汽所引起的热量损失公式为:

$$S_V = Vev\rho_v L_v \quad (8)$$

式中:  $Vev$  为蒸发质量流量引起的表面下沉速度;  $\rho_v$  为蒸汽质量;  $L_v$  为蒸发潜热<sup>[11-12]</sup>。

实际焊接中, 焊丝为固体, 受数值模拟的限制, 焊丝被设为流体, 以流体的状态模拟固体的运动特性。在计算域顶部边界的焊丝填充入口喷射形成液态柱, 喷射速度为填丝速度, 与工件面呈  $30^\circ$ 。焊丝与工件同设为第一相, 空气设为第二相。为模拟实际焊接时焊丝被送丝装置夹持, 使固体部分合力为 0, 利用 VOF 方法追踪焊丝区域, 并引入反重力源项  $S_{\text{anti-grav}}$ , 当焊丝某区域温度高于熔点, 该区域  $S_{\text{anti-grav}}$  关闭, 其受重力作用而以液态流入熔池, 形成液桥过渡, 反重力源项为:

$$S_{\text{anti-grav}} = 9.81 \cdot \rho \quad (9)$$

为将焊丝引入模型中并稳定工作, 利用二次开发接口, 在温度低于熔点时, 将径向力引入焊丝表面, 以抵消焊丝在焊接过程中发生流动形变, 同时, 关闭焊丝表面的表面张力, 当某区域温度高于熔点时, 其径向力关闭、表面张力激活。

在焊接过程中, 热量与物质传输的影响因素较多, 综合考虑计算效率与精度, 简化数值模型, 分析主要影响因素, 基于此进行了以下假设:

- (1) 忽略保护气对熔池的影响;
- (2) 激光束焦点与焊丝具有一定距离, 焊接传热方式为热传导焊, 忽略焊丝对能量的直接吸收与反射。
- (3) 铝锂合金工件与焊丝材料的热物性参数相同;
- (4) 铝锂合金工件的导热率、比热容、粘度均为与温度相关的函数, 其他热物性参数设为常数;
- (5) 液态金属的流动状态为层流。

激光填丝双面焊接过程中熔池内流体流动与热量变化趋势的研究仍不完善, 因此, 该研究建立三维激光填丝双面焊接数值模型, 分析焊接过程中熔池流体流动趋势与热量变化过程, 研究焊接速度与填丝速度对熔池动态变化的影响。

## 2 2195 铝锂合金激光双面填丝焊接数值仿真分析

### 2.1 计算域与材料属性

计算域尺寸设置为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 、整体被划分为 3 个区域, 分别是中间区域的 2195-T8 铝锂合金母材, 厚度为 2 mm (在 2 mm 厚单面填丝焊接基础上

进行双面填丝焊接,以探索该焊接方法对焊缝力学性能的影响<sup>[13]</sup>,上方区域与下方区域为空气相,厚度均为 2.5 mm,如图 1 所示。用户自定义函数定义母材区域的边界为固体壁面边界条件,其余蓝色透明边界设为压力出口,计算域边界温度均设为室温 300 K;计算域的顶部设置一个移动送丝入口,入口速度与送丝速度相同;计算域的上部空气相左侧设置一个移动送丝入口,移动方向与焊接方向一致,移动速度与焊接速

度相同,如图 1 黄色区域;焊丝以液柱的形式进入计算域,并模拟出焊丝熔化过程的热量传导与质量传递。2195-T8 铝锂合金与 ER2319 焊丝材料属性见表 1。设计的焊接参数<sup>[13]</sup>如表 2 所示,进行 4 组正交实验,其中组别 1 与 2、组别 3 与 4 分别为填丝速度对照组,可通过这两对组别得知填丝速度对熔池流场与熔池测量点温度变化趋势的影响;组别 1 与 3、2 与 4 分别为焊接速度对照组,可通过这两对组别得知焊接速

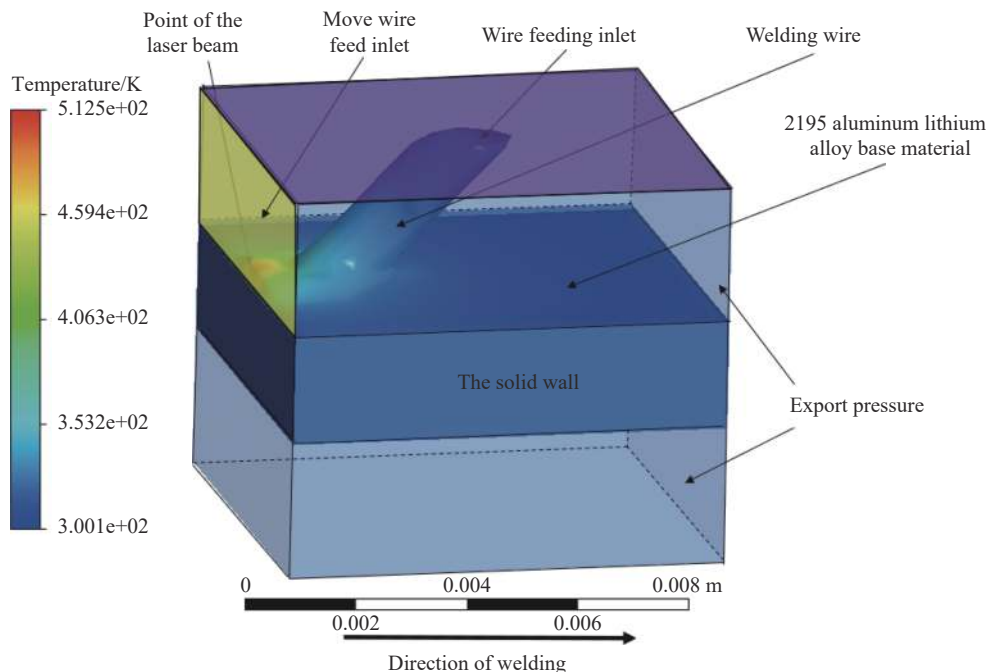


图 1 计算域边界设置

Fig.1 Boundary setting of computing domain

表 1 2195-T8 铝锂合金与 ER2319 焊丝材料属性

Tab.1 Material properties of 2195-T8 Al-Li alloy and ER2319 welding wire

Parameter	Density/ kg·m <sup>-3</sup>	Specific heat capacity/J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Coefficient of thermal conductivity	Viscosity	Latent heat of fusion/J·kg <sup>-1</sup>	Modulus of elasticity/GPa
Numerical	2 710	960	Ref. [14]	Ref. [15]	3.98×10 <sup>5</sup>	72
Parameter	Poisson ratio	Coefficient of thermal expansion/K <sup>-1</sup>	Surface radiation coefficient	Surface tension /N·m <sup>-1</sup>	Temperature coefficient of surface tension	
Numerical	0.33	2.23×10 <sup>-5</sup>	0.4	0.7	-3.5×10 <sup>-4</sup>	

表 2 1500 W 焊接实验的参数设置

Tab.2 Parameter setting of 1500 W welding test

Groups		1	2	3	4
Positive	Welding speed/cm·min <sup>-1</sup>	50	50	45	45
	Wire feeding speed/m·min <sup>-1</sup>	1.6	1.8	1.6	1.8
Back	Welding speed/cm·min <sup>-1</sup>	50	50	45	45
	Wire feeding speed/m·min <sup>-1</sup>	1.6	1.8	1.6	1.8

度对熔池流场与熔池测量点温度变化趋势的影响。

### 2.2 数值模拟分析

图 2 所示为焊接时焊丝熔入熔池的纵截面瞬时图像,箭头方向为流体流动方向。由于不同焊接参数的第一面与第二面焊接时,焊丝熔入熔池的流动状态几乎一致,因此选取其中一个截面进行分析。此外,为使熔池免受温度梯度干扰而难以直接观察其轮廓,经后处理,自定义温度值大于等于合金熔点值的区域为深红色,其他区域温度递减程度随图柱由红递减至深蓝色。由图 2 可见,熔池右侧带有热量的流体持续冲击着焊丝底部与工件表层部位,导致被冲击处不断被熔化。其中,焊丝底部的前端最先熔化而呈液态,在模型中失去反重力支持的同时启动了表面张力,最终受它们共同作用而流入熔池。

图 3 所示为焊接过程中 4 组不同焊接参数的第

一面与第二面熔池流场图,焊缝横截面统一在距焊接起始 2 mm 处取得,该位置为焊接稳定区。由于焊接方式为匙孔较浅的热导焊,故熔池匙孔较浅。对比分析 4 组数值模拟的熔池流场分布,发现第一面焊接和第二面焊接的整体流动趋势基本一致,熔池表面的流体在重力与表面张力梯度引起的 Marangoni 对流作用下,由中心部位向下流动,当流体携带热量流到熔池底部后,对该处金属加热熔化,但是热量由上到下逐层递减,导致熔池下部吸热较小,熔化速度较慢,所以流体到达底部后发生偏转,沿着熔池底部边缘处流向熔池表面,最终在熔池内形成了左侧以顺时针涡流为主、右侧以逆时针涡流为主的流动趋势。此外,由熔池形貌可知,组别 3 熔池宽度与深度最大,表明该组别中有更多的金属被熔化,流体携带到熔池底部的热量最多,激光束输入的热量也最多。组别 2 的熔池宽度、熔池深度与组别 3 形成鲜明对比,其熔池热输入最低。

为进一步分析熔池热输入变化情况,针对熔池内特定点的温度变化进行研究。在熔池的边缘,即焊缝熔合区取第一温度测量点,该区位于熔池边缘,温度变化梯度较大;第二温度测量点在熔池中心,与第一温度测量点处于同一水平线,该处位于激光束下方,温度变化梯度较小。分析两点温度随时间的变化趋势,如图 4 所示。从图 4(a) 与 (b)、图 4(c) 与 (d) 两组对比分析,结合表 2 焊接参数,发现填丝速度越小,各

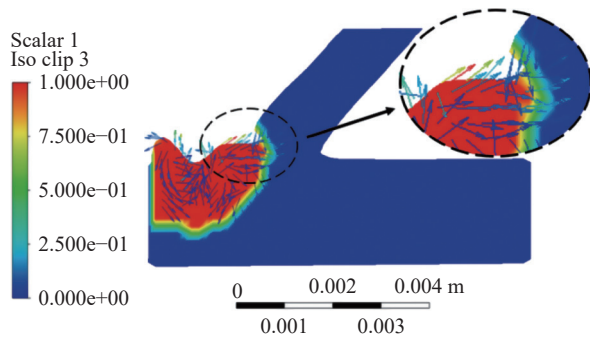
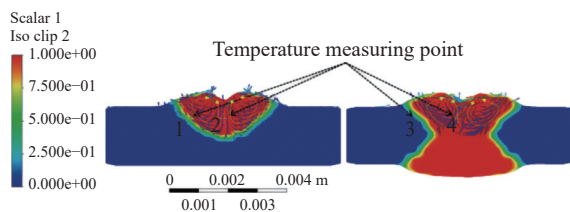


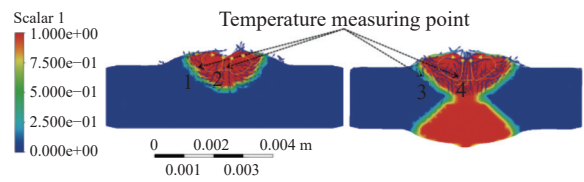
图 2 焊丝熔入熔池图

Fig.2 Diagram of welding wire melting into pool



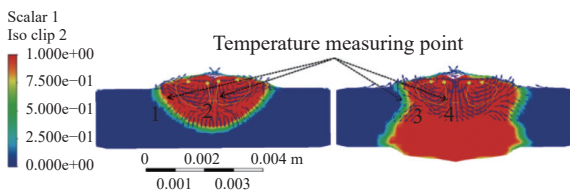
(a) 组别 1 熔池流场图

(a) Group 1 flow field diagram of molten pool



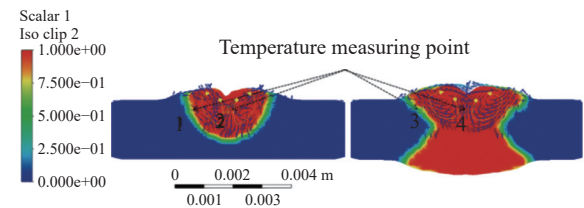
(b) 组别 2 熔池流场图

(b) Group 2 flow field diagram of molten pool



(c) 组别 3 熔池流场图

(c) Group 3 flow field diagram of molten pool



(d) 组别 4 熔池流场图

(d) Group 4 flow field diagram of molten pool

图 3 熔池流场图

Fig.3 Flow field diagram of molten pool

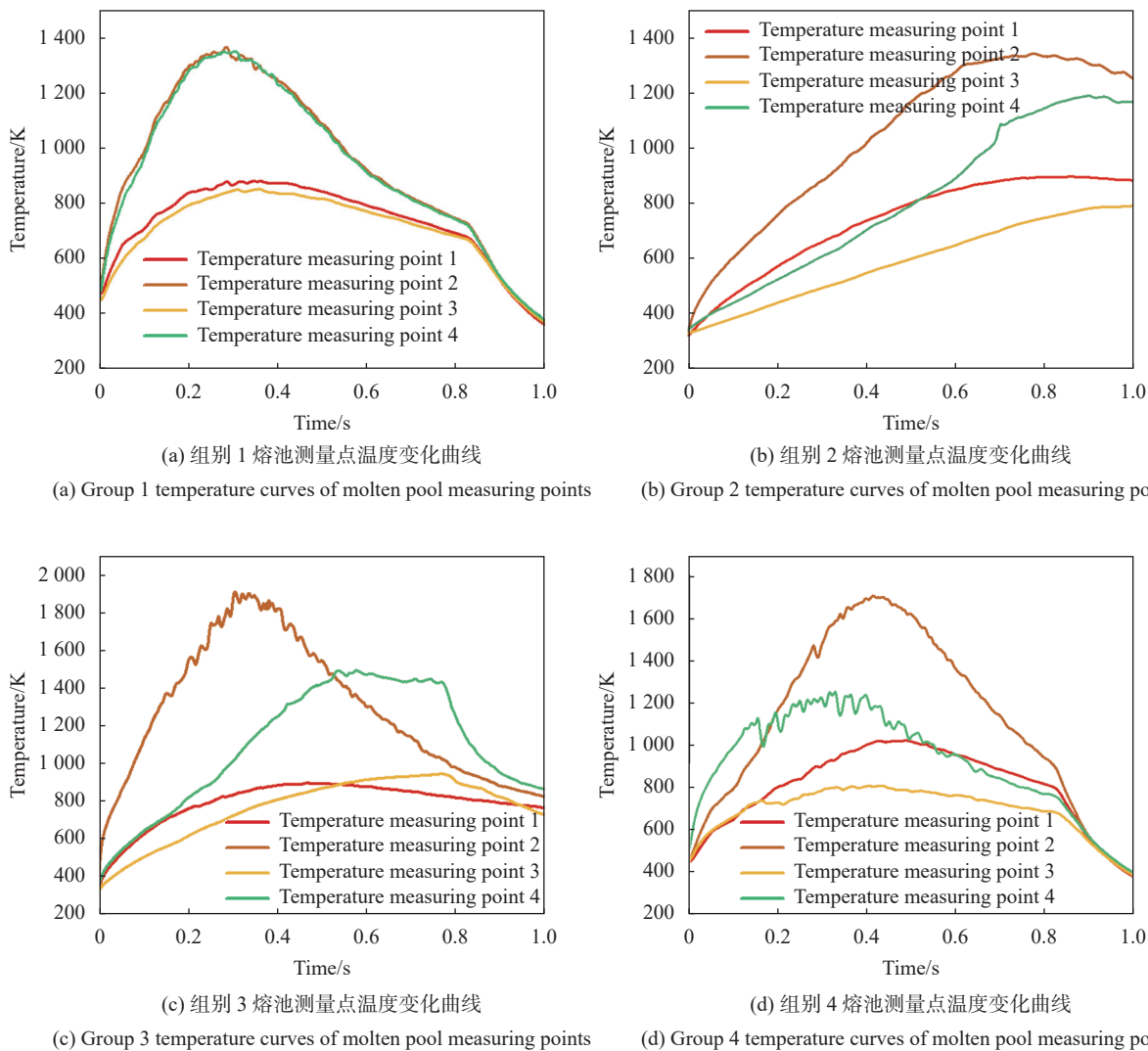


图 4 熔池测量点温度变化曲线

Fig.4 Temperature curves of molten pool measuring points

测量点温度峰值越高;从图 4(a) 与 (c)、图 4(b) 与 (d) 两组对比分析,发现减小焊接速度,可提高各测量点温度峰值。此外,图 4(b) 的第一面焊接与第二面焊接温度峰值均最低,分别为 1331 K 和 1190 K,温差最小,为 141 K;图 4(c) 的第一面焊接与第二面焊接温度峰值均最高,为 1922 K 和 1498 K,温差最大,为 424 K。

根据所取截面位置(距焊接起始 2 mm 处)与表 2 焊接速度,得知组别 1 和 2 的激光束在 0.24 s 时、组别 3 和 4 的激光束在 0.27 s 时位于熔池中心温度测量点正上方,然而图 4 中各温度峰值均比预估时间出现较晚。这种现象是因为熔池中心温度测量点与激光束分离后,它还处在激光束照射加热范围内,直至完全离开该范围时,熔池中心温度测量点才达到温度峰值。

综上,4 组不同参数下的熔池流体流动趋势基本一致;结合图 3、图 4,发现减小焊接速度或填丝速度时,两面的熔池测量点温度峰值都将会提高,温度峰值与温差相应也变大,熔池宽度与深度增大(即熔池热输入增加);其中组别 2 温度峰值与温差最小(即熔池热输入最小),组别 3 温度峰值与温差最大(即熔池热输入最大)。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验材料

实验材料采用由西南铝业提供的 4.5 mm 厚 2195-T8 铝锂合金母材,经铣削与线切割后预制母材尺寸为 110 mm×65 mm×2 mm(如图 5 所示),而后去除母材表面氧化膜并进行机械打磨,用酒精冲洗并吹干,对接

固定于实验台。焊丝直径 1.2 mm, 母材和焊丝化学成分如表 3、表 4 所示。

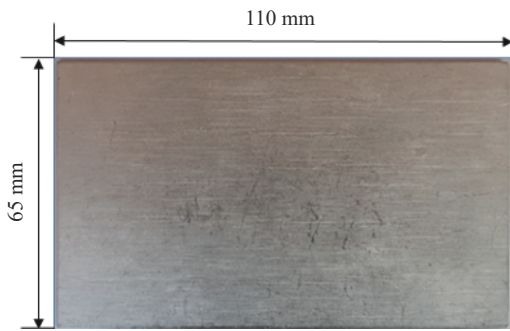


图 5 2195-T8 铝锂合金板

Fig.5 2195-T8 Al-Li alloy plate

表 3 2195-T8 铝锂合金化学成分

Tab.3 Chemical composition of 2195-T8 Al-Li alloy

Alloy material composition	Cu	Li	Ag	Zr	Fe	Mg	Ti	Al
Percentage of ingredients	3.7%	0.8%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.068%	Balance

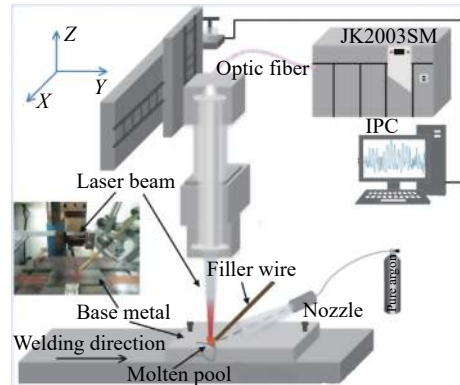
表 4 ER2319 焊丝化学成分

Tab.4 Chemical composition of ER2319 filament filling

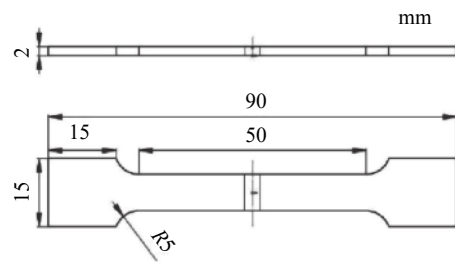
Welding wire material composition	Cu	Fe	Mn	Mg	Si	Zn	Ti	V	Al
Percentage of ingredients	5.6%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%	0.1%	0.15%	0.1%	Balance

### 3.2 实验过程

实验设备采用安川 MOTOMAN MH24 机器人与 YLS-4000-ECO 高电光效率激光器。激光器功率调为 1500 W, 激光束聚焦在母材表面形成直径 1 mm 的光斑。保护气 Ar 以 14 L/min 流速覆盖母材对接部分, 焊丝与母材成 45° 夹角并与光斑保持 1~2 mm 距离, 激光头与填丝装置在机器人带动下同步运动, 结构组成如图 6(a) 所示。第一面焊完后, 待母材静置至室温再进行第二面焊接。然后, 将各焊缝横向切下两小块金相试件, 采用 MR5000 型倒置金相显微镜观察。而后, 将母材切割出拉伸试件, 如图 6(b) 所示。最后, 使用 MTSE40 型拉伸机以 1 mm/min 速率拉伸试件, 测试接头强度。



(a) 激光填丝双面焊接结构组成图  
(a) Structure drawing of laser wire filling double-sided welding



(b) 拉伸试件尺寸  
(b) Tensile specimen size

图 6 实验设计

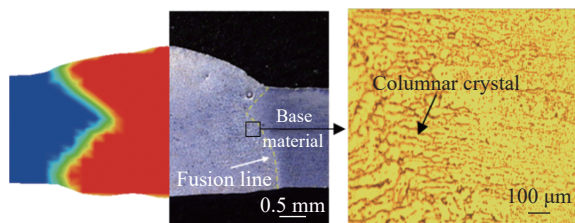
Fig.6 Test design

### 3.3 仿真与实验对比

为验证数值模拟的准确性, 将数值模拟完成后焊缝成形较好区域的横截面与实验所得接头横截面进行对比分析, 此外, 为下文更好地研究熔池与接头力学性能之间的关系, 对熔池边缘即接头熔合区 (一般为接头力学性能薄弱处) 进行金相观察, 如图 7 所示, 左侧上表面为第一面焊接, 下表面为第二面焊接; 右侧为接头熔合区的金相图。

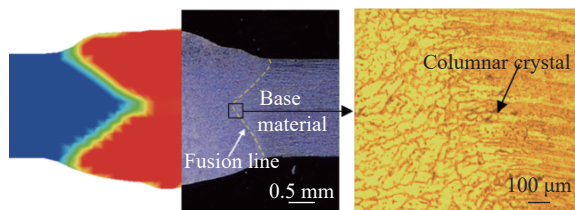
从图 7 实验接头横截面可以发现, 焊接后形成的上、下熔合区部分重叠, 接头被熔透。通过数值模拟与实验结果对比, 发现数值模拟与实验的熔合线一致性较好, 证明数值模拟可较好地模拟出 2195-T8 铝锂合金激光填丝双面焊接过程。

结合图 7 中各组别的接头熔合区金相图与数值模拟分析发现, 柱状晶的生长方向都是从工件基体延伸到熔池内的。组别 3 温度峰值与温差最大 (即熔池热输入最大), 其以柱状晶为代表的晶粒粗化程度最严重; 组别 2 温度峰值与温差最小 (即熔池热输入最小), 其以柱状晶为代表的晶粒细化程度最好。



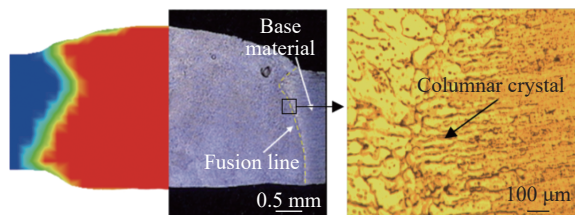
(a) 组别 1 接头横截面对比与焊缝熔合区金相图

(a) Group 1 comparison of joint cross section and metallographic diagram of weld fusion zone



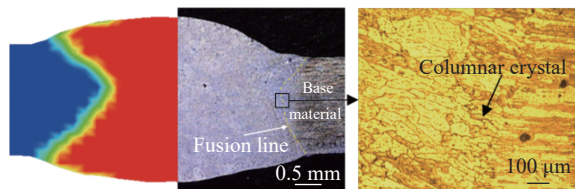
(b) 组别 2 接头横截面对比与焊缝熔合区金相图

(b) Group 2 comparison of joint cross section and metallographic diagram of weld fusion zone



(c) 组别 3 接头横截面对比与焊缝熔合区金相图

(c) Group 3 comparison of joint cross section and metallographic diagram of weld fusion zone



(d) 组别 4 接头横截面对比与焊缝熔合区金相图

(d) Group 4 comparison of joint cross section and metallographic diagram of weld fusion zone

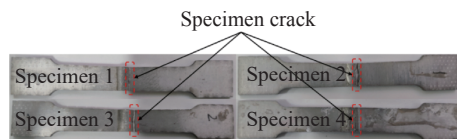
图 7 接头横截面对比与焊缝熔合区金相图

Fig.7 Comparison of joint cross section and metallographic diagram of weld fusion zone

### 3.4 接头力学性能分析

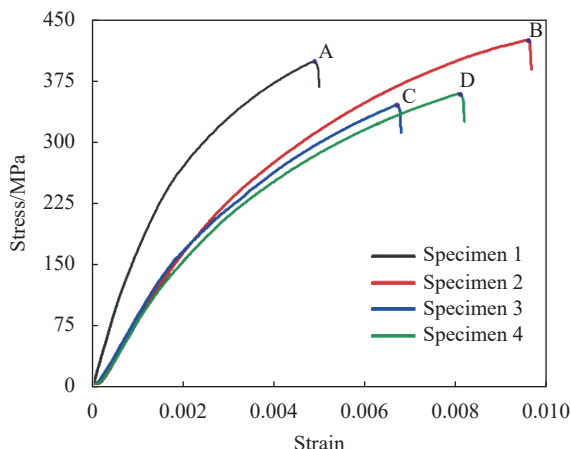
为研究熔池与接头力学性能之间的关系,有必要获取试件的接头力学强度。

试件经轴向拉伸断裂后的形貌如图 8(a) 所示,4 组试件的裂纹均出现在熔合区,从图 3 数值模拟图可见,熔合区温度梯度大,这促使熔合区成为接头力学性能最薄弱的环节。



(a) 试件断裂图

(a) Diagram of specimen fracture



(b) 试件应力应变曲线图

(b) Diagram of stress and strain of specimen

图 8 试件拉伸实验

Fig.8 Specimen tensile test

沿同一焊缝切出 4 个试件,经拉伸后取每一应变对应的应力平均值,得到的应力应变曲线如图 8 (b) 所示,发现 4 条曲线增长趋势基本一致。加载初期,应力呈线性上升,为弹性阶段,其中试件 1 对应的曲线斜率最大,表明试件 1 刚度最大,抵抗变形能力最强;而其他 3 个试件曲线斜率基本一致,表明试件 2、3、4 刚度接近。随着载荷不断加大,曲线增幅变缓,试件发生屈服,由弹性阶段转变为塑性阶段,其中试件 2 对应的曲线应变最大,说明试件 2 塑性最好。然后,曲线达到应力峰值(即最大抗拉强度),其中试件 1 抗拉强度为 401.2 MPa (A 点数值),母材抗拉强度是 587 MPa,即接头强度为母材的 68.3%。试件 2 与试件 1 相比,填丝速度更快,其抗拉强度值更高,为 426.4 MPa (B 点数值),即接头强度为母材的 72.6%;试件 3 与试件 1 相比,焊接速度与焊丝速度均较慢,其抗拉强度值较低,为 348.8 MPa (C 点数值),即接头强度为母材的 59.4%;试件 4 与试件 2 相比,焊接速度较低,抗拉强度值较低,为 363 MPa (D 点数值),即接头强度为母材的 61.8%;试件 4 与试件 3 相比,填丝速度更快,抗拉强度值较高,为 348.8 MPa (C 点数值)。上述表明,当焊接速度或填丝速度变快,接头力学性



能将会提高。曲线最后阶段的应力值在短时间内急剧下降,试件直接完全断裂。

综上,结合图 3、图 4、图 7 与图 8,发现组别 2 焊接速度、填丝速度最大、熔池热输入最小、柱状晶细化程度最好,导致试件 2 的力学性能最好。组别 3 焊接速度、填丝速度最小、熔池热输入最大,使得柱状晶粗化程度最严重,根据 Hall-Petch 理论所述(晶粒粗化越严重处,力学性能越差),最终导致试件 3 的力学性能最差。

## 4 结 论

通过 FLUENT 软件进行二次开发,建立铝锂合金激光填丝双面焊接热-流耦合数学模型,计算分析了 4 组不同焊接参数下的熔池流场与熔池测量点温度变化曲线;而后进行实验验证了模型的可行性,观察了接头熔合区金相,并对焊接后的试件进行强度测试,得到了 4 个试件对应的不同接头强度。对比实验结果与模型结果,得到主要结论如下:

(1) 将影响熔池能量变化以及流体流动的相关因素通过二次开发加入至控制方程的源项中,而后通过使用 VOF 追踪空气、焊丝、工件界面,得到了液桥过渡下熔池内传热与流体流动的变化过程。

(2) 2195-T8 铝锂合金激光填丝双面焊接过程中,不同焊接速度与填丝速度的熔池流动趋势基本一致。2195-T8 铝锂合金在不同焊接速度与填丝速度下的焊接过程中,第一面与第二面的熔池流动主要为左侧顺时针涡流、右侧逆时针涡流。

(3) 焊接速度与填丝速度均对接头力学性能有影响。焊接速度或填丝速度减小时,熔池的温度峰值与温差增大,熔池深度与熔池宽度变大,以柱状晶为代表的晶粒粗化程度变严重,焊缝力学性能下降。

### 参考文献:

- [1] Zhang Tiehao, Liu Siqi, Zhang Yunpeng, et al. Microstructure and properties of double-sided friction-stir welded joint of 42 mm 6082 aluminum alloy profile [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2018, 46(4): 57-63. (in Chinese)
- [2] Wang An, Zhang Linjie, Ning Jie, et al. Effect of welding speed on 2A97 aluminum-lithium alloy laser welded joints [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(2): 98-102. (in Chinese)
- [3] Yuan Linlin, Wang Wei, Chen Xiaoyu. Research progress of welding technologies for 2195 Al-Li alloy [J]. *Welding and Joining*, 2020(9): 38-42, 46, 63. (in Chinese)
- [4] She Lvbo, Li Hao, Zhang Jianbo, et al. Study on crack propagation characteristics of Al-Li alloy welded structure [J]. *Applied Laser*, 2020, 46(3): 454. (in Chinese)
- [5] Jin Yang. Laser beam welding and numerical simulation analysis of new Al-Li alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020: 32-36. (in Chinese)
- [6] Jin Yan, Wang Shaogang, Zhao Li, et al. Laser beam welding of new type Al-Li alloy and microstructure and mechanical properties of welded joint [J]. *Welding Technology*, 2019, 48(1): 19-24. (in Chinese)
- [7] Chen Genyu, Wang Bin, Zhong Peixin, et al. Laser scanning welding of 2060 Al-Li alloy with filler wire [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2020, 41(4): 44-50. (in Chinese)
- [8] Lei Z, Zhang K, Hu X, et al. Improvement of weld characteristics by laser-arc double-sided welding compared to single arc welding [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(11): 4518-4526.
- [9] Zhao Yaobang, Lei Zhenlong, Miao Yugang, et al. Welding characteristics of laser-arc double-sided welding for aluminum alloy [J]. *Journal of Chinese Lasers*, 2011, 38(6): 0603007. (in Chinese)
- [10] 苗玉刚, 李俐群, 陈彦宾, 等. 铝合金激光-电弧双面焊接头特征分析[J]. *焊接学报*, 2007, 28(12): 85-88.
- [11] Pang S, Chen L, Zhou J, et al. A three-dimensional sharp interface model for self-consistent keyhole and weld pool dynamics in deep penetration laser welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 44(2): 025301. (in Chinese)
- [12] Ki H, Mohanty P S, Mazumder J. Modeling of laser keyhole welding: Part II. Simulation of keyhole evolution, velocity, temperature profile, and experimental verification [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33A(6): 1831-1842.
- [13] Xv Q, Tian G, Zhang W, et al. Effect of the weld parameter strategy on mechanical properties of double-sided laser-welded 2195 Al-Li alloy joints with filler wire [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2022, 41(1): 92-110.
- [14] Assael M J, Kakosimos K. Reference data for the density and viscosity of liquid aluminum and liquid iron [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2006, 35(1): 16.
- [15] Leitner M, Leitner T, Schmon A, et al. Thermophysical properties of liquid aluminum [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48(6): 3036-3045. (in Chinese)