

引文格式: 李荣昊, 路永新, 王大锋, 等. 高强铝合金激光-电弧复合焊温度场与流场研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(13): 77-83.
LI Ronghao, LU Yongxin, WANG Dafeng, et al. Study on temperature field and flow field of laser-arc hybrid welding of high strength aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(13): 77-83.

高强铝合金激光-电弧复合焊温度场与流场研究*

李荣昊¹, 路永新^{1,2}, 王大锋³, 王世清^{1,2}, 申志康⁴, 强 伟^{1,2}

(1. 西安石油大学材料科学与工程学院, 西安 710065;

2. 西安石油大学油气田腐蚀防护与新材料陕西省高等学校重点实验室, 西安 710065;

3. 中国兵器科学研究院宁波分院, 宁波 315103;

4. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

[摘要] 本文以 4 mm 厚 A7N01 铝合金板材为研究对象, 基于 A7N01 铝合金激光-电弧复合焊接参数进行模拟仿真。采用 Fluent 软件进行了数值模拟, 并针对不同焊接参数下的熔池温度场分布与流动性进行分析, 研究了激光功率和焊接速度对激光-电弧复合焊的影响规律。结果表明, 随着激光功率的增加, 熔池的深度显著增加。同时, 由于熔池内部的流体流动速度加快, 进而导致熔池的不稳定性增大。较大的焊接速度虽然可以在较短时间内使熔池达到稳定状态, 但也伴随着更快的温度变化速率, 容易产生冷却不均和裂纹的风险。相反, 较低的焊接速度增加了热输入, 使得熔池的温度梯度更大, 有助于形成更大的熔池和更深的熔深, 但过多的热输入也可能引发一系列焊接缺陷问题。

关键词: 激光-电弧复合焊; A7N01 铝合金; 数值模拟; 温度场; 流场

中图分类号: V26; TG44

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.13.077

Study on Temperature Field and Flow Field of Laser-Arc Hybrid Welding of High Strength Aluminum Alloy

LI Ronghao¹, LU Yongxin^{1,2}, WANG Dafeng³, WANG Shiqing^{1,2}, SHEN Zhikang⁴, QIANG Wei^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Key Laboratory of Corrosion Protection and New Materials for Oil and Gas Fields of Shannxi Higher Education Institutes, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

3. Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China;

4. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

[ABSTRACT] This paper takes a 4 mm-thick A7N01 aluminum alloy sheet as the research object and conducts simulations based on the laser-arc hybrid welding parameters of A7N01 aluminum alloy. Numerical simulations were performed using Fluent software to analyze the temperature field distribution and fluidity of the molten pool under different welding parameters, and to investigate how laser power and welding speed affect laser-arc hybrid welding. The results show that with the increase of laser power, the depth of the molten pool increases significantly. Meanwhile, the accelerated fluid flow speed inside the molten pool may enhance its instability. Although a higher welding speed can stabilize the molten pool in a shorter time, it is accompanied by a faster temperature change rate, which may lead to uneven cooling and the risk of cracking. On the contrary, a lower welding speed increases the heat input, resulting in a larger temperature gradient of the molten pool, which is conducive to forming a larger molten pool and deeper penetration. However, excessive heat input may also cause a series of welding defect problems.

Keywords: Laser-arc hybrid welding; A7N01 aluminum alloy; Numerical simulation; Temperature field; Flow field

* 基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2025JC-YBMS-567)。

A7N01 铝合金是一种高强度铝合金,具有密度小、强度高、耐腐蚀、挤压成形性能好等优点,在高速列车车体的制造中得到了广泛应用^[1]。A7N01 铝合金常用的焊接方法为熔化极惰性气体保护焊(Metal inert gas, MIG),该焊接方法存在焊接效率低、残余应力大、结构易变形等缺点^[2-3]。为克服这些问题,有学者提出采用激光-电弧复合焊方法进行焊接。激光-电弧复合焊是一种新型的焊接方法,其中激光作为主热源,电弧作为副热源,两种热源结合在一起,可以实现“1+1>2”的复合效应,该方法不仅可以提高焊缝质量,还能抑制焊接缺陷^[4]。

近年来,众多国内外学者对激光-电弧复合焊进行了广泛研究。张林^[5]采用“激光-MIG 复合穿孔焊+MIG 盖面”的方法,实现了 20 mm 厚 7A52 铝合金的高效率焊接;同时,采用激光-MIG 复合焊实现了 14 mm 的穿透性熔深,研究人员通过 MIG 摆动焊接进行单道盖面,实现了更加高效、高质的焊接。戴鹏飞等^[6]采用低功率脉冲激光诱导熔化极活性气体保护电弧复合焊焊接工艺对 X70 管线钢仰焊工艺进行了研究,结果表明,低功率脉冲激光热源可以拓展电弧电流的工艺参数区间(从 180 A 提升到 230 A),提高对错边等复杂工况的适应性,显著优化了焊缝背面的成形效果。刘博等^[7]通过采用激光-电弧复合多层多道焊焊接工艺,分析了不同焊接线能量对焊接接头微观组织和显微硬度的影响,研究发现, X120 管线钢经激光-电弧复合焊后,焊接接头的硬度峰值会随着焊接线能量的增大而减小。滕彬等^[8]通过对 30CrMnSi 钢接头形貌分析、射线探伤检测及力学性能检验,进行激光-电弧复合焊接工艺研究,结果表明,当激光置于前方、电弧置于后方时,采用激光-电弧复合焊焊接能够实现该材料的单面焊接双面成形,并且焊缝成形均匀、外形美观。王鲁君等^[9]通过研究长输管道全位置激光-电弧复合焊接技术,提出了一种基于激光-电弧复合焊根焊的单面焊双面成形方法,并开展了 X70/X80 钢管的焊接设备与工艺试验,结果表明,该技术在管线钢焊接中具备良好的可靠性和适用性,并展现出极佳的工业化应用前景。

然而,激光-电弧复合焊工艺参数较多且复杂,不合理的工艺参数会导致焊缝产生严重缺陷。所以,有必要借助数值模拟手段预测不同焊接工艺条件下的焊缝形状与尺寸^[10]。数值模拟方法在研究激光-电弧复合焊接过程中,具有速度快、效率高、成本低等诸多优势^[11],

因此通过数值模拟的方法定量分析焊接过程中熔池特征的演化行为,对于优化工艺参数,以及深入理解复合热源焊接的工艺机理有着重要的理论意义和工程实用价值^[12]。本文针对 4 mm 厚的 A7N01 铝合金板,使用 Fluent 软件进行激光-电弧复合焊接模拟,分析不同工艺参数下焊接流场和温度场的特性,为优化焊接工艺参数提供理论指导。

1 试验及方法

1.1 试验材料

采用 A7N01 铝合金板进行焊接试验,板材尺寸为 300 mm × 200 mm × 4 mm,化学成分如表 1 所示,板材样貌如图 1 所示。

1.2 工艺参数

本文采用控制变量法进行试验设计,主要影响因素为焊接速度和激光功率,对试验结果进行温度场与流场特性分析后得到最优焊接参数。固定参数为摆动频率 300 Hz、摆动幅度 0.5 mm、超声频率 20000 Hz、超声振幅 31 μm,其余试验参数见表 2。

1.3 热源模型

在激光-电弧复合焊接数值模拟中,热源模型需准确表征激光与电弧的能量输入特性及其空间分布规律。根据实际焊接工艺特点,热源模型由激光热源模型和电弧热源模型两部分组成。

激光能量输入采用旋转高斯体热源模型,其热流密度分布满足:

$$q(x, y, z) = \frac{9Q}{\pi h_s R^2 \left(1 - \frac{1}{e^3}\right)} \exp\left[-\frac{9}{R^2 \ln\left(\frac{h_s}{z}\right)}(x^2 + y^2)\right] \quad (1)$$

式中, h_s 为热源高度; Q 为热输入率; R 为热源半径; e 为自然对数的底数,取 2.718。

电弧能量输入采用双椭球体热源模型,前、后半椭球热流密度分布函数为

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f q_0}{ab\pi\sqrt{\pi c_f}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (2)$$

$$q_b(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_b q_0}{ab\pi\sqrt{\pi c_b}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_b^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (3)$$

式中, a 、 b 为椭球横向尺寸; c_f 、 c_b 为前、后半椭球纵向尺寸; q_0 为热输入率; f_f 、 f_b 为前、后半椭球的能量分配系数。

表 1 A7N01 铝合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of A7N01 aluminum alloy (mass fraction)

Al	Mg	Cu	Mn	Cr	Si	Fe	Zn	Ti
余量	0.8~1.8	0.10	0.2~0.7	0.06~0.2	0.35	0.40	4.0~5.0	0.01~0.06

1.4 模型建立及网格划分

建立 $28\text{ mm} \times 24\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的几何模型(模拟板厚 4 mm 的 A7N01 铝合金板),几何模型和网格划分如图 2 所示。图 2 (a) 中红色区域为材料上方的空气部分,蓝色区域为 A7N01 材料部分。为节省计算时间并保证计算精度,在划分网格时将其分为近缝区和远缝区。近缝区网格较为细密,网格尺寸为 $0.125\text{ mm} \times 0.125\text{ mm} \times 0.125\text{ mm}$;远缝区网格较为稀疏,网格尺寸为 $0.5\text{ mm} \times 0.125\text{ mm} \times 0.125\text{ mm}$ 。

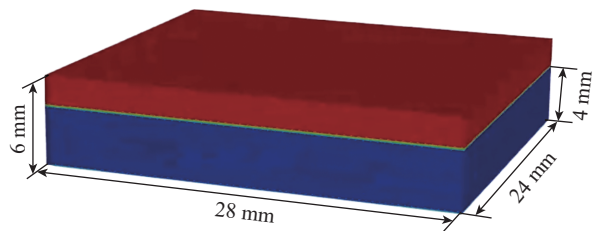
为了保证与实际焊接工况相吻合,边界条件的配置需要考虑空气间的对流和辐射热交换,如式(4)所示。



图 1 A7N01 铝合金板
Fig.1 A7N01 aluminum alloy plate

表 2 试验参数
Table 2 Test parameters

试验号	功率/kW	电流/A	焊接速度/(m/min)
1#	2.0	140	0.5
2#	3.5	140	0.5
3#	2.0	140	1.0



(a) 几何模型



(b) 网格划分

图 2 几何模型与网格划分

Fig.2 Geometric model and mesh generation

$$K \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T_{\text{sur}} - T_0) - \sigma \varepsilon (T_{\text{sur}}^4 - T_0^4) \quad (4)$$

式中, K 表示热传导系数; T 表示内部温度场; n 表示热流的传递方向; T_{sur} 表示物体表面温度; T_0 表示环境温度; h 表示对流热交换系数; ε 表示物质的辐射率; σ 表示 Stefan-Boltzmann 常量。

除了激光-电弧辐射造成的热输入外,同时存在对流换热、辐射换热和金属气化散热^[13]:

$$K_q \frac{\partial T}{\partial n} = q(x, y, z) - h(T_{\text{sur}} - T_0) - \sigma \varepsilon (T_{\text{sur}}^4 - T_0^4) - q_{\text{vap}} \quad (5)$$

式中, K_q 为在考虑气化散热因素影响下的热传导系数; q_{vap} 为气化热量。

1.5 材料属性

常温下 A7N01 铝合金热物理性能如表 3 所示^[14]。

1.6 控制方程

在激光-电弧复合焊接过程中,熔池的流动和金属蒸气的行为是复杂的物理现象。这些现象受到质量、能量和动量守恒定律的严格约束,3 个定律共同决定了熔池在热力学和动力学上的行为。在这一过程中,激光和电弧的协同作用不仅影响熔池的温度分布,还影响金属蒸气的生成和流动模式,从而对焊缝的形成和质量产生重要影响。

表 3 A7N01 铝合金的热物理参数^[14]

Table 3 Thermal physical parameters of A7N01 aluminum alloy^[14]

物理属性	数值
固相导热系数 $k_s / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	130
液相导热系数 $k_l / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	90
对流换热传递系数 $h_c / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	20
固相线温度 T_s / K	805
液相线温度 T_l / K	908
固相比热 $C_s / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1050
液相比热 $C_l / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1197.21
动力黏度 $\mu / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0013
表面张力 $\gamma_0 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.871
表面张力的温度系数 $K_{\text{sur}} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	-1.55×10^{-4}
固体密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2700
液体密度 $\rho_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2380
熔化潜热 $H_f / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.87×10^5
沸点 T_b / K	2720
环境温度 T_0 / K	300
辐射换热系数	0.12

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

式中, ρ 为流体密度; t 为时间; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的分量。尤其是对于不可压缩的流体, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ 。

能量方程:

$$\rho \left[\frac{\partial H}{\partial t} + (u-u_0) \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + w \frac{\partial H}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{\text{net}} \quad (7)$$

式中, H 是混合焓; u_0 是热源的移动速度; k 是导热系数; q_{net} 是激光-电弧复合焊接过程中的热输入。

热平衡方程:

$$q_{\text{net}} = q_A + q_L + q_D - q_E - q_R - q_C \quad (8)$$

式中, q_A 是来自电弧的热输入; q_L 是来自激光的热输入; q_D 是来自液滴的热输入; q_E 是来自熔融金属的蒸发热损失; q_R 是通过辐射的热损失; q_C 是通过与环境的对流热交换的热损失。上述参数的单位均为 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \eta \nabla^2 \left[(\nabla u + \nabla u^T) - \frac{2}{3} \nabla u \mathbf{I} \right] + S_m \quad (9)$$

式中, $u=(u, v, w)$; η 为流体的动力黏度; \mathbf{I} 为单位矩阵; S_m 为动量守恒的源项。

2 结果分析

2.1 数值模型验证

试验采用熔合线对比法验证模型的正确性。使用数值模拟熔池截面, 随后与试验所获得焊缝截面进行对比, 如图 3 所示。设置工艺参数: 激光功率 2 kW、电流 140 A、焊接速度 0.5 m/min、摆动频率 300 Hz、摆动振幅 0.5 mm、超声频率 20 kHz、超声振幅 31 μm 。

可以看出, 试验所获得的焊缝与数值模拟结果在整体上基本吻合。然而, 在焊缝轮廓的某些细节部分仍然存在轻微的差异。造成这一现象的原因可能在于构建数值模拟模型的过程中进行了条件假设, 并对复杂的焊接过程进行了必要的简化, 从而造成与实际焊接结果之间的偏差^[15]。

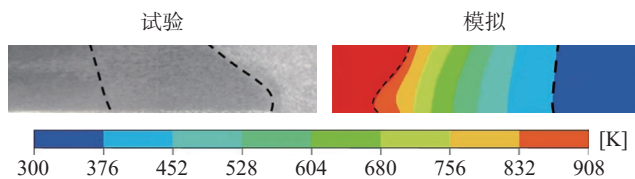


图 3 激光-电弧复合焊熔合线对比图

Fig.3 Comparison diagram of fusion lines in laser-arc hybrid welding

2.2 激光功率对熔池的影响

图 4 和 5 分别为不同功率、不同时刻下激光-电弧复合焊熔池俯视形貌图。可以看出, 随着功率的增加, 熔池的深度增加, 高温区域的面积增大, 且温度梯度的分布更加均匀。在 $P=2 \text{ kW}$ 时, 虽然熔池中心区域仍然具有较高的温度, 但由于热输入有限, 熔池内的热量不足以有效传递至更深的材料内部, 导致熔深较浅, 热量主要集中在材料表面附近; $P=3.5 \text{ kW}$ 时, 热输入显著增加, 高温区域深入材料内部, 从而显著提高了熔深, 这说明较高的激光功率能够提供更多的能量输入, 使得材料的熔化和热传导效应更加充分。

图 6 和 7 分别为不同功率、不同时刻下激光-电弧复合焊熔池纵截面形貌图。可以看出, $P=3.5 \text{ kW}$ 时,

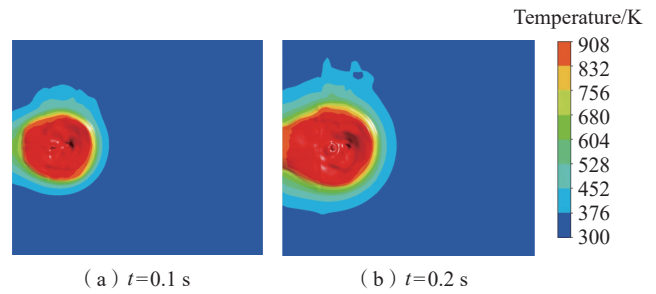


图 4 $P=2 \text{ kW}$ 时, 激光-电弧复合焊熔池俯视形貌图

Fig.4 Top view morphology of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $P=2 \text{ kW}$

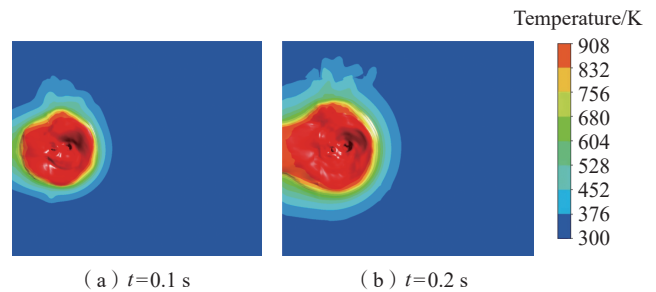


图 5 $P=3.5 \text{ kW}$ 时, 激光-电弧复合焊熔池俯视形貌图

Fig.5 Top view morphology of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $P=3.5 \text{ kW}$

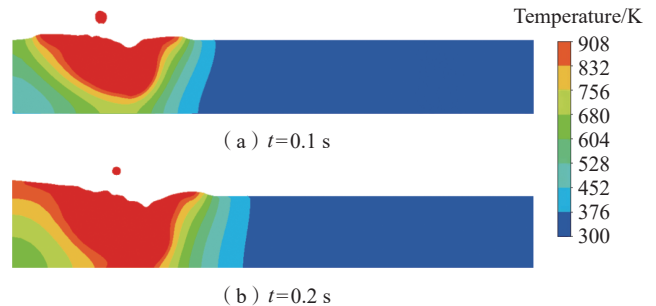


图 6 $P=2 \text{ kW}$ 时, 激光-电弧复合焊熔池纵截面形貌图

Fig.6 Morphology of the longitudinal section of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $P=2 \text{ kW}$

温度场变化幅度更大,且分布更加均匀,说明高功率不仅加快了熔池的加热速率,同时也增强了熔池内部的对流和热传递效应; $P=2\text{ kW}$ 时,熔池温度场变化较小,温度梯度较为集中,说明能量输入不足时熔池的热量积累较慢,且高温区域的扩展有限。

图 8 和 9 分别为不同功率、不同时刻下激光-电弧复合焊熔池流场变化图。对比发现,激光功率对流场的影响主要体现在熔池内的流速和流动特征的变化上。在 $P=2\text{ kW}$, $t=0.1\text{ s}$ 时,流场的整体流速较低,速度矢量较为分散,熔池内部的对流较弱,且高速度区域主要集中在熔池上层,范围较小;随着时间推移, $t=0.2\text{ s}$ 时,流场变化较小,流速提升不明显,整体呈现出平稳的对流模式。这种稳定的流场特性有利于提高焊缝的均匀性,但同时可能限制熔池内部的物质混合效率。当 $P=3.5\text{ kW}$

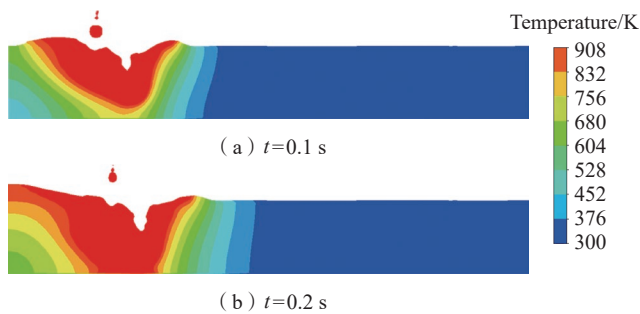


图 7 $P=3.5\text{ kW}$ 时,激光-电弧复合焊熔池纵截面形貌图

Fig.7 Morphology of the longitudinal section of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $P=3.5\text{ kW}$

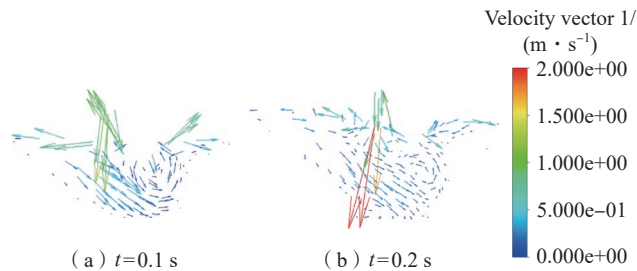


图 8 $P=2\text{ kW}$ 时,激光-电弧复合焊熔池纵截面流场分布图

Fig.8 Longitudinal section flow field distribution of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $P=2\text{ kW}$

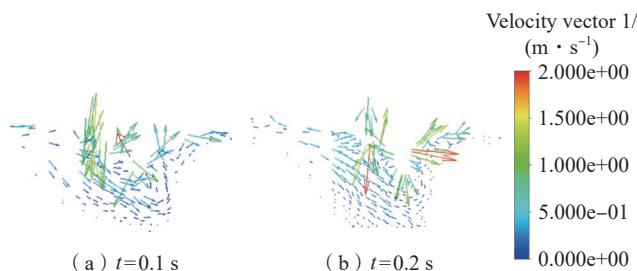


图 9 $P=3.5\text{ kW}$ 时,激光-电弧复合焊熔池纵截面流场分布图

Fig.9 Longitudinal section flow field distribution of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $P=3.5\text{ kW}$

时,流场出现变化, $t=0.1\text{ s}$ 时,熔池内流速显著提高,流场的整体流速明显增大,尤其是在熔池的中下部区域形成了更大范围的高速流动,速度矢量更加密集,方向性更强,表现出更显著的熔池内部对流和湍流现象。说明在高功率作用下,激光产生的热量导致更强烈的熔池对流,热量传递加速,促进熔融金属剧烈流动,但熔池流动的不稳定性也增加,可能引发匙孔崩塌或焊接缺陷。到 $t=0.2\text{ s}$ 时,流场的变化更加显著,速度进一步增加。

2.3 焊接速度对熔池的影响

焊接速度在激光-电弧复合焊接过程中是一个极为重要的参数。焊接速度与热输入之间存在密切联系。从图 10 可以看出,当焊接速度较低 ($v=0.5\text{ m/min}$) 时,由于热源在焊接区域停留时间较长,熔池的热输入较大,熔池形状呈现宽大且较为对称的分布,高温区域范围更广,温度梯度的分布较均匀。如图 11 所示,在较高焊接速度 ($v=1.0\text{ m/min}$) 下,由于热源作用时间缩短,单位时间内热输入显著减少,熔池的高温区域范围缩小,温度梯度增大。尤其在熔池后部区域,由于高温液态金属的快速冷却和凝固,导致温度梯度的分布更加不均匀。

此外,从图 12 和 13 的纵截面形貌可以看出,焊接速度的变化显著影响了熔池的深度、宽度。图 12 显示,在较低焊接速度 ($v=0.5\text{ m/min}$) 条件下,焊接热源在熔池内的作用时间更长,因此熔池内的热量输入更充分,熔池的深度和宽度较大,整体呈现较为对称和均匀的特

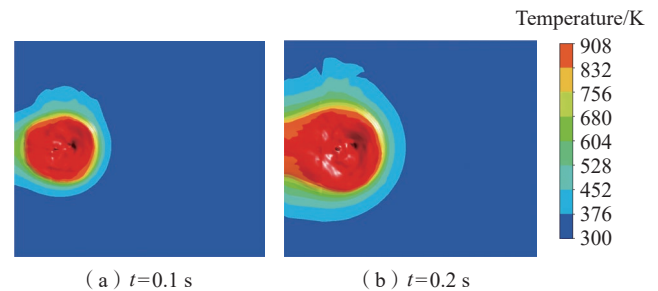


图 10 $v=0.5\text{ m/min}$ 时,激光-电弧复合焊熔池俯视形貌图

Fig.10 Top view morphology of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $v=0.5\text{ m/min}$

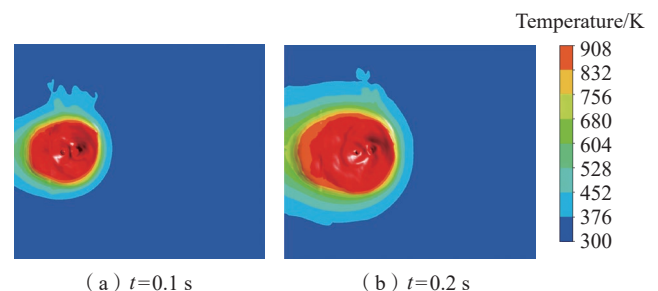


图 11 $v=1.0\text{ m/min}$ 时,激光-电弧复合焊熔池俯视形貌图

Fig.11 Top view morphology of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $v=1.0\text{ m/min}$

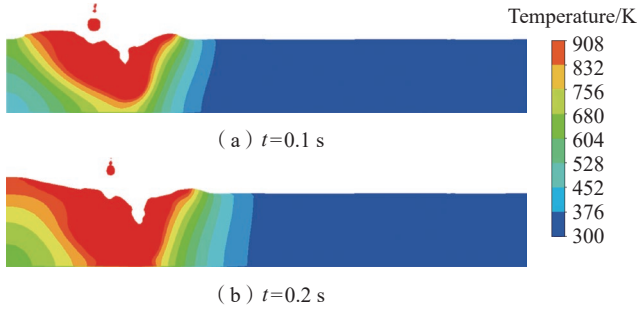


图 12 $v=0.5 \text{ m/min}$ 时,激光-电弧复合焊熔池纵截面形貌图
Fig.12 Longitudinal section morphology of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $v=0.5 \text{ m/min}$

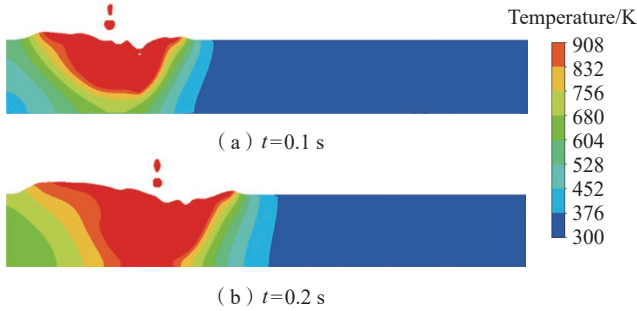


图 13 $v=1.0 \text{ m/min}$ 时,激光-电弧复合焊熔池纵截面形貌图
Fig.13 Longitudinal section morphology of the molten pool in laser-arc hybrid welding at $v=1.0 \text{ m/min}$

征,熔池内部的高温区域分布较为集中且延伸较深,说明热量得到了较好的传递和扩散。同时,虽然较低的焊接速度使熔池内流体的流动速率相对较慢,但由于停留时间较长,熔池内部的对流循环更加充分,这种稳定的流场有助于热量向下传递,使熔深增加,从而提升焊缝的强度和可靠性。从图 13 可以看出,在较高的焊接速度 ($v=1.0 \text{ m/min}$) 下,由于热源在焊接区域的停留时间缩短,单位时间内的热输入减少,熔池的深度和宽度减小,纵截面形貌呈现更浅的熔池特征。同时,熔池内的高温区域明显集中在靠近热源附近的上部区域,热量传递的深度受到限制,进一步说明了焊接速度的增加降低了热量在熔池中的扩散效率。

图 14 和 15 为试验 1# 参数条件下,不同时刻的激光-电弧复合焊流场俯视和纵截面变化图。可以发现,在焊接速度为 0.5 m/min 的情况下,熔池内的流场展现出较强的对流运动,高速流动区域范围较大,尤其是靠近熔池中央的位置,流速达到峰值(约 2.0 m/s),且速度矢量分布较为密集,流动方向呈现明显的循环趋势。说明较低的焊接速度使激光和电弧的热输入时间更长,熔化金属的流动性得以充分激发,进而驱动金属液体形成明显的对流循环。图 16 和 17 为试验 3# 参数条件下,不同时刻的激光-电弧复合焊流场俯视和纵截面变化图。可以看出,当焊接速度提高到 1.0 m/min 时,熔池内的流场强度明显

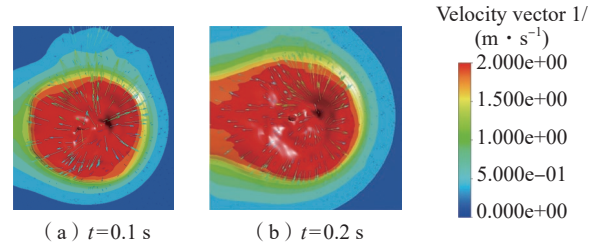


图 14 $v=0.5 \text{ m/min}$ 时,激光-电弧复合焊流场俯视变化图
Fig.14 Top view evolution of the molten pool flow field in laser-arc hybrid welding at $v=0.5 \text{ m/min}$

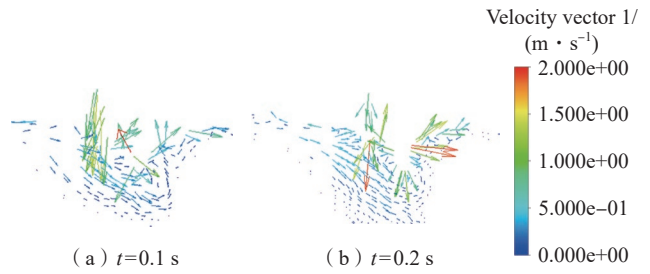


图 15 $v=0.5 \text{ m/min}$ 时,激光-电弧复合焊流场纵截面变化图
Fig.15 Longitudinal section evolution of the flow field in laser-arc hybrid welding at $v=0.5 \text{ m/min}$

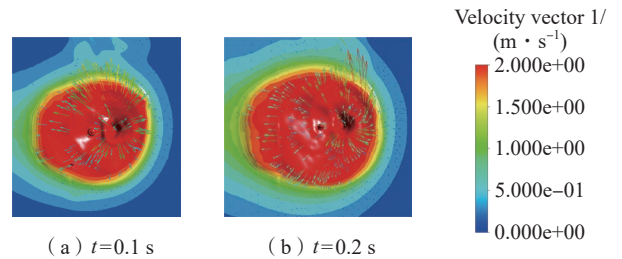


图 16 $v=1.0 \text{ m/min}$ 时,激光-电弧复合焊流场俯视变化图
Fig.16 Top view evolution of the molten pool flow field in laser-arc hybrid welding at $v=1.0 \text{ m/min}$

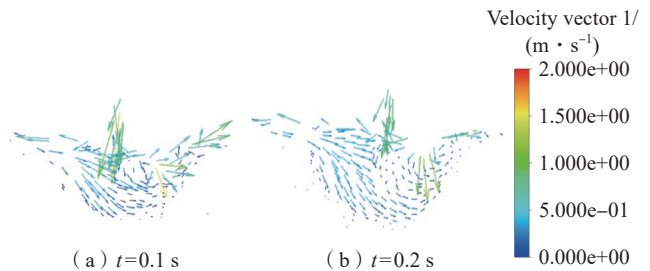


图 17 $v=1.0 \text{ m/min}$ 时,激光-电弧复合焊流场纵截面变化图
Fig.17 Longitudinal section evolution of the flow field in laser-arc hybrid welding at $v=1.0 \text{ m/min}$

减弱,高速流动区域范围减小,且流速峰值较低(约 1.5 m/s)。高速流动集中在熔池尾部区域,而熔池中心的流速分布相对分散,且熔池下部的流速进一步降低,流动方向的循环趋势不如低速焊接条件下显著。说明较高的焊接速度缩短了热输入时间,熔化金属的流动性减弱,导致

熔池内部的对流循环能力不足。总体来看,焊接速度的提高使得熔池的流场在更短的时间内达到稳定状态,但也伴随着更高的流动速度和更快的温度变化。这种快速流动在一定程度上提升了焊缝的致密性,但也可能导致金属混合不充分,从而影响焊缝的均匀性和稳定性。

3 结论

本文基于 Fluent 软件构建了复合热源模型,实现了熔池温度场与流场的高精度耦合计算。结果发现,模拟结果与试验熔合线高度吻合,验证了模型的可靠性,从而避免了传统试错法的高成本和低效率,为工艺窗口的快速筛选提供了高效工具。同时对比了不同参数下熔池温度场和流场的变化,并分析了激光功率和焊接速度等因素对熔池及熔池内部流体流动方式的影响。

(1) 铝合金激光-电弧复合焊的温度场模拟结果表明,激光功率增大显著增强了熔池内部的热量积累效应,进而增加熔池的深度和宽度。同时,流场模拟结果表明,激光功率增大显著提高了对流速度和流动强度,导致焊接过程中熔池不稳定性增加。

(2) 铝合金激光-电弧复合焊的温度场模拟结果表明,较低的焊接速度有助于形成更大的熔池和更深的熔深,但同时可能带来更多的热输入和更大的温度梯度;较高的焊接速度虽然减小了熔池的深度和宽度,但可能导致熔池稳定性下降,增加缺陷风险。此外,流场模拟结果表明,焊接速度的提高使熔池流场在更短的时间内达到稳定状态,但也伴随着更高的流动速度和更快的温度变化。较低焊接速度下,熔池对流更强,而且稳定时间也较长。

参考文献

- [1] 单清群,刘贤军,单玫.激光热源偏移对6 mm A7N01 铝合金激光-MIG复合焊接接头的质量影响[J].电焊机,2016,46(5):97-100.
SHAN Qingqun, LIU Xianjun, SHAN Mei. Influence of heat source central deviation on the quality of welded joint of 6 mm thickness A7N01 aluminum alloy by laser-MIG hybrid welding[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(5): 97-100.
- [2] 秦斌,王宝森.焊接速度对奥氏体不锈钢接头性能的影响[J].钢铁钒钛,2008,29(2):23-26.
QIN Bin, WANG Baosen. Effect of welding velocity on properties of welding joint of austenitic stainless steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2008, 29(2): 23-26.
- [3] 王旭友,王威,林尚扬.焊接参数对铝合金激光-MIG电弧复合焊缝熔深的影响[J].焊接学报,2008,29(6):13-16,113-114.
WANG Xuyou, WANG Wei, LIN Shangyang. Effect of welding parameter on weld penetration in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 13-16, 113-114.
- [4] 蔡创,陈梓琳,栗振鑫,等.能场辅助激光焊接焊缝成形及缺陷控制综述[J].航空制造技术,2023,66(13):60-72.
CAI Chuang, CHEN Zilin, LI Zhenxin, et al. Review on weld formation and defect control of energy field assisted laser welding[J]. Aeronautical

Manufacturing Technology, 2023, 66(13): 60-72.

- [5] 张林.7A52铝合金厚板激光-MIG复合焊接工艺研究[D].南京:南京理工大学,2018.
ZHANG Lin. Study on laser-MIG hybrid welding technology of 7A52 aluminum alloy thick plate[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [6] 戴鹏飞,张先龙,宋刚,等.低功率脉冲激光诱导电弧复合仰焊工艺适应性研究[J].焊管,2022,45(5):1-9.
DAI Pengfei, ZHANG Xianlong, SONG Gang, et al. Study on process adaptability of low-power pulsed laser induced arc hybrid welding in overhead position[J]. Welded Pipe and Tube, 2022, 45(5): 1-9.
- [7] 刘博,王媛媛,李彬.X120管线钢激光-电弧复合焊接接头组织及硬度分析[J].焊管,2021,44(10):19-23.
LIU Bo, WANG Yuanyuan, LI Bin. Microstructure and hardness analysis of laser-arc hybrid welding joint of X120 pipeline steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2021, 44(10): 19-23.
- [8] 滕彬,范东辉,蒋宝,等.30CrMnSi钢激光-电弧复合焊接工艺研究[J].电焊机,2022,52(3):59-64.
TENG Bin, FAN Donghui, JIANG Bao, et al. Study on the laser-arc hybrid welding technology of 30CrMnSi alloy[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 59-64.
- [9] 王鲁君,皮亚东,闫臣,等.长输管道全位置激光-电弧复合焊应用技术研究[J].焊管,2019,42(9):20-25.
WANG Lujun, PI Yadong, YAN Chen, et al. Application technology research of all position laser-arc hybrid welding for long distance pipeline[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(9): 20-25.
- [10] 张皓庭,武传松.激光-GMAW复合热源焊接熔池-小孔行为分析[J].航空制造技术,2016,59(19):45-51.
ZHANG Haoting, WU Chuansong. Analysis of weld pool and keyhole behaviors in laser-GMAW hybrid welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(19): 45-51.
- [11] 温鹏军,杨明晓,张骁勇,等.304不锈钢激光-电弧复合焊流场数值模拟研究[J].焊管,2024,47(11):46-52.
WEN Pengjun, YANG Mingxiao, ZHANG Xiaoyong, et al. Numerical simulation of laser-arc hybrid welding flow field in 304 stainless steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2024, 47(11): 46-52.
- [12] TANG Z J, WEI Q L, GAO Z Y, et al. 2000 W blue laser directed energy deposition of AlSi₇Mg: Process parameters, molten pool characteristics, and appearance defects[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2023, 18(1): 34-45.
- [13] GUO L P, WANG H Z, LIU H J, et al. Understanding keyhole induced-porosities in laser powder bed fusion of aluminum and elimination strategy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 184: 103977.
- [14] HUANG S, XU L D, LOU M, et al. Keyhole-induced pore formation mechanism in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy based on experiment and multiphase numerical model[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 314: 117903.
- [15] 吴圣川,刘建华.铝合金激光-电弧复合焊的有限元数值模拟[J].航空制造技术,2005,48(12):74-76.
WU Shengchuan, LIU Jianhua. Finite element numerical simulation of laser-arc hybrid welding of Al alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(12): 74-76.

通信作者:路永新,副教授,研究方向为焊接应力与变形模拟计算,以及增材制造技术等。

(责编 七七)