

文章编号: 1003-1480 (2025) 02-0068-07

激光熔覆焊接参数对极细桥丝焊接质量的影响研究

田佳铭, 张 荣, 孔 梅

(长春理工大学 物理学院光波导实验室, 吉林 长春, 130013)

摘 要: 为探究极细桥丝激光熔覆焊接过程中桥丝与熔池边沿的温度及热力学特性, 优化极细桥丝激光熔覆焊接工艺参数, 采用 Ansys Fluent 有限元仿真软件对直径为 13 μm 的 Ni-Cr 桥丝在 120, 150, 180, 200 W 激光功率及 -3 ~ 3 mm 离焦量下的焊接过程进行仿真, 分析了激光功率及离焦量对桥丝与熔池边沿的温度及热应力的影响, 并对不同激光功率及离焦量下的桥丝焊接效果进行了实验研究。结果表明: 120 W 激光功率下, 焊点连接不牢固; 150 W 激光功率下, 焊点牢固且表面光滑, 桥丝保持完整无断裂; 180 W 激光功率下, 过高的熔池边沿温度与热应力增加了桥丝断裂风险, 焊点表面出现氧化变色; 200 W 激光功率下, 桥丝与熔池边沿的温度及热应力超过了桥丝的性能极限, 桥丝断裂, 并损伤基底, 引起金属飞溅, 严重影响焊点质量。当激光功率为 150 W、脉宽为 2 ms、离焦量为 -2 mm 时, 焊接效果最佳。

关键词: 激光熔覆焊接; 极细桥丝; 仿真; 熔池; 焊接质量

中图分类号: TJ450.5 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.02.010

Study on the Influence of Laser Cladding Welding Parameters on the Welding Quality of Ultra-Fine Bridge Wire

TIAN Jia-ming, ZHANG Rong, KONG Mei

(Optical Waveguide Laboratory, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130013)

Abstract: In order to investigate the temperature and thermodynamic characteristics of the bridge wire and the edge of the molten pool during the laser cladding welding process of ultra-fine bridge wire, and optimize the laser cladding welding process parameters of ultra-fine bridge wire, Ansys Fluent finite element simulation software was used to simulate the welding process of Ni-Cr bridge wire with a diameter of 13 μm at a laser power of 120, 150, 180, 200 W and a defocus amount of -3 ~ 3 mm. The influence of laser power and defocus amount on the temperature and thermal stress at the bridge wire and the edge of the molten pool was analyzed, and the welding effect of bridge wire under different laser power and defocus amount was experimental studied. The results show that under a laser power of 120 W, the solder joint is not firmly connected; At a laser power of 150 W, the solder joint is firm and the surface is smooth, and the bridge wire remains intact without breakage; At a laser power of 180 W, the excessively high temperature and thermal stress at the edge of the molten pool increase the risk of bridge wire fracture, and cause oxidation discoloration on the surface of the solder joint; At a laser power of 200 W, the temperature and thermal stress at the bridge wire and the edge of the molten pool exceed the performance limit of the bridge wire, causing the bridge wire to break and damage the substrate, resulting in metal splashing and seriously affecting the quality of the solder joint. When the laser power is 150 W, the pulse width is 2 ms, and the defocus amount is -2 mm, the welding effect is optimal.

Key words: Laser cladding welding; Ultra-fine bridge wire; Simulation; Molten pool; Welding quality

作为军事弹药引爆装置中的关键组件, 桥丝式电 火工品的起爆元件通常采用镍铬、铂钨、铂铱等多种

收稿日期: 2024-12-23

作者简介: 田佳铭 (2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事极细桥丝激光熔覆焊接技术研究。

通讯作者: 张荣 (1983-), 男, 副研究员, 主要从事光学传感技术和精细激光加工技术研究。

引用本文: 田佳铭, 张荣, 孔梅. 激光熔覆焊接参数对极细桥丝焊接质量的影响研究[J]. 火工品, 2025(2): 68-74.

合金桥丝作为发热组件,通过对这些桥丝通电产生热量,点燃装药,从而达到预期效果。桥丝式电火工品的桥丝直径通常在几微米至几百微米之间,其中,直径小于 40 μm 的极细桥丝通常应用于高精度桥丝式火工品中^[1-4]。为满足高精度桥丝式火工品的成品集成度、一致性、成品率等要求,开展极细桥丝激光熔覆焊接工艺的研究具有重要意义。极细桥丝由于丝径极小,在焊接过程中极易受到熔池温度、表面张力以及桥丝与熔池边沿应力的影响,而出现桥丝断裂、桥丝与熔池边沿的丝径不均匀以及根部发黑发蓝等问题。近年来,有限元分析技术已成为研究激光熔覆焊接工艺的重要工具之一。许多学者通过该技术对激光熔覆焊接的熔池温度场进行了数值模拟,为极细桥丝激光熔覆焊接工艺研究提供了理论分析依据^[5-7]。

为探究桥丝激光熔覆焊接过程中桥丝与熔池边沿的温度及热力学特性,优化极细桥丝激光熔覆焊接工艺参数,提高桥丝焊接质量和焊接成品率,本文利用 Ansys Fluent 有限元模拟分析软件,基于流体力学及传热基本方程,构建了 13 μm Ni-Cr 桥丝激光熔覆焊接瞬态模型,对不同激光功率、离焦量下桥丝与熔池边沿温度场及热应力的变化进行了仿真研究;并搭建了准连续光纤激光桥丝熔覆焊接系统,对不同激光功率及离焦量下的桥丝焊接效果进行了实验研究,以期 40 μm 以下极细桥丝激光熔覆焊接工艺参数设计提供技术支撑。

1 基本原理

1.1 熔池产生过程中存在的力

极细桥丝激光熔覆焊接过程为:将熔覆粉末预置在桥丝和待焊基底上,通过激光照射产生加热-冷却循环,在桥丝与基底处形成熔覆层。此过程涉及复杂的物理现象,包括固液相变、对流传热和热传导等,这些作用共同影响熔池的微观结构与尺寸^[8]。熔池产生过程中存在的力如图 1 所示。

1.2 激光熔覆焊接热控制方程及热流边界条件

在焊接过程中,热传递主要影响温度在焊接材料中的分布。其三维热传递方程为^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中: c 为材料比热容; ρ 为材料密度; T 为熔池表面温度; t 为激光辐照时间; Q 为单位体积内的热源; x, y, z 分别为坐标轴。

在熔覆焊接中,热流边界条件描述了熔池边沿与周围环境之间的热交换机制,包括对流、辐射和热传递到基底材料^[10]。热流边界条件可以表示为:

$$Q_{\text{loss}} = h_c(T - T_0) + \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) \quad (2)$$

式(2)中: ε 为材料表面辐射发射系数; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; h_c 为对流换热系数; T 为熔池表面温度; T_0 为环境温度。

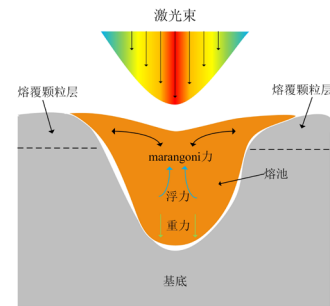


图1 熔池产生过程中存在的力

Fig.1 The forces present during the formation of the molten pool

1.3 激光热源

激光热源选择高斯体热源^[11],可以准确体现出激光熔覆焊接形成的熔池特性:

$$Q = \frac{P}{\pi \times r^2} \exp\left(-\frac{2 \times (x+y)^2}{r^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2d^2}\right) \quad (3)$$

式(3)中: P 为激光功率; r 为激光光斑半径; d 为热源深度。

1.4 热应力随温度变化

在焊接过程中,温度变化会导致材料发生热膨胀或收缩,从而产生应力^[12]。桥丝与熔池边沿的应力可以通过热应力方程计算:

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (4)$$

式(4)中: σ 为应力; E 为弹性模量; α 为热膨胀系数; ΔT 为温度变化。

2 建模与仿真

在实际焊接过程中,熔池内部存在复杂的传热传

质行为。为了保证整体模型计算过程的准确、稳定、高效，需要结合经典熔池流动模型对其进行适当简化。具体简化条件如下：（1）所有焊接材料均被视为均匀且连续的介质；（2）焊接材料的热物理属性（如导热系数、比热容、热膨胀系数等）均视为随温度变化的函数；（3）熔池中液态金属被视为不可压缩的牛顿流体；（4）熔池中的液态金属流动被认为是层流，即流体流动遵循层流模型，不发生湍流。

基于熔池温度场和流场的特性，利用 Ansys Fluent 有限元仿真软件构建了极细桥丝激光熔覆焊接的三维瞬态数值模型。考虑到桥丝在焊接过程中是否断裂会直接影响火工品的性能，在桥丝与熔池边沿设置了监控器 A，如图 2 所示，以精确记录熔池边沿的温度及热应力变化。

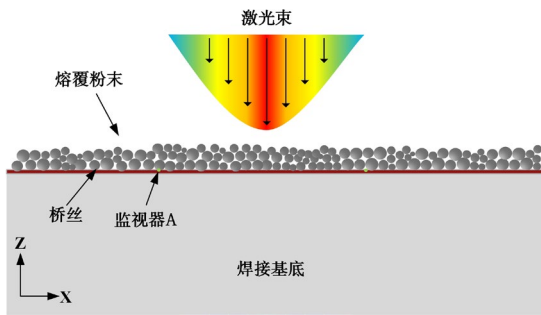


图 2 桥丝焊接模型计算区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of the computational domain for bridge wire welding model

在此模型中，Ni-Cr 桥丝直径设置为 13 μm ，基底材料选用 316L 不锈钢，选用直径为 25 μm 的 Ni60A 合金粉末作为熔覆材料，材料参数如表 1 所示。

表 1 不同金属的热物理常数^[13-14]

Tab.1 Thermophysical constants of different metals

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热扩散率 $D/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	熔化温度 T_m/K	气化温度 T_v/K	比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
316L	8 260	1.620	0.277	1 723	3 273	657
Ni60A	8 902	0.900	0.350	1 726	3 110	239
Ni-Cr	8 200	0.460	0.330	1 673	2 732	122

对 120, 150, 180, 200 W 激光功率及-3 ~ 3 mm 离焦量下的桥丝焊接过程进行仿真，研究激光功率及离焦量对桥丝与熔池边沿温度及热应力的影响，进而分析其对焊接质量的影响。仿真中，环境温度 T_0 设定为 300 K；激光脉冲宽度选择 2 ms，以确保熔覆粉末充分熔化，同时避免桥丝过热，研究表明该脉宽有助于形成平滑的熔池形貌及稳定的焊点质量^[15]。为提高

模拟精度并优化计算效率，在熔池和热影响区温度梯度较大的区域进行网格细化处理。最终，构建了尺寸为 1 000×400×300 μm^3 的三维有限元模型，并通过随机算法生成粉床模型，确保颗粒分布合理，避免颗粒重叠或间隙过大。

3 结果与讨论

3.1 仿真结果分析与讨论

3.1.1 激光功率对焊接的影响

监控器 A 记录的桥丝与熔池边沿温度随时间的变化如图 3 所示。不同功率下熔池及其流场图如图 4 所示。由图 3 可见，当激光功率为 120 W 时，桥丝与熔池边沿的峰值温度约为 1 451 K。在此温度下，温度梯度的增加提升了表面张力，削弱了 Marangoni 效应，从而影响了热传递，导致大部分熔覆颗粒未能充分熔化（图 4（a）），未达到焊接要求。当激光功率增至 150 W 时，桥丝与熔池边沿的温度升至 1 678 K，较 120 W 下的桥丝与熔池边沿温度增加了约 15.6%。温度的提升显著增强了熔池的流动性和温度梯度，从而促进了更多熔覆粉末的熔化（图 4（b）），形成了更牢固的焊点。当激光功率进一步提高至 180 W 和 200 W 时，桥丝与熔池边沿的温度分别上升至 1 873 K 和 2 074 K，超过了桥丝的熔化温度，最终导致桥丝熔断。并且，高温使熔池内分子热运动加剧，分子间吸引力减小，温度梯度增大，表面张力降低，Marangoni 效应增强，从而降低了熔池内熔体的稳定性，加剧了飞溅现象（图 4（c）~（d）），对焊接质量造成了严重影响。

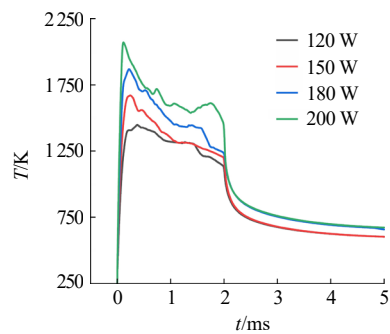


图 3 不同激光功率下桥丝与熔池边沿温度随时间的变化

Fig.3 The variation of temperature at the bridge wire and the edge of the molten pool with time under different laser powers

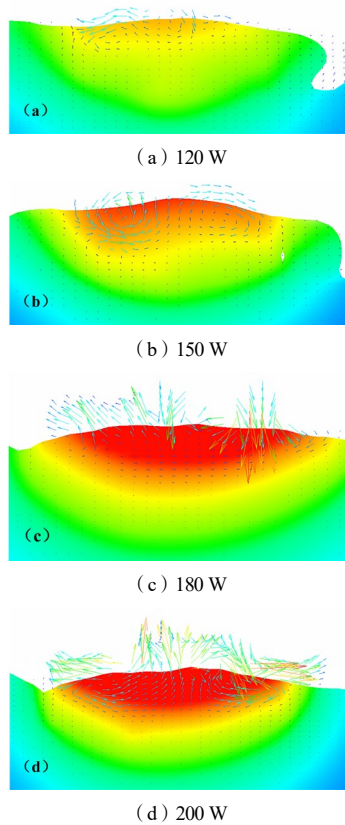


图 4 不同激光功率下的熔池及其流场

Fig.4 Molten pool and its flow field under different laser powers

在激光熔覆焊接过程中,较大的热应力可能导致材料变形、裂纹形成及其他结构性能的劣化。因此,研究不同激光功率对焊接过程中熔池边沿桥丝热应力的影响,对于预测焊接过程中的桥丝断裂具有重要意义。120, 150, 180, 200 W 激光功率下桥丝与熔池边沿热应力随时间的变化如图 5 所示。

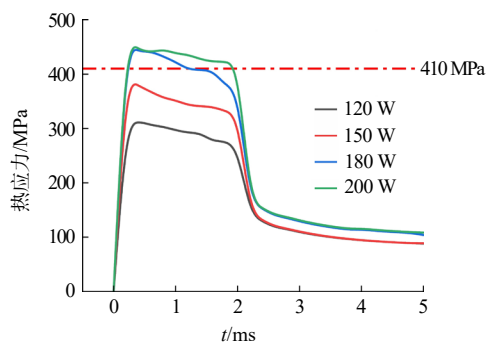


图 5 不同激光功率下桥丝与熔池边沿热应力随时间的变化

Fig.5 The variation of thermal stress at the bridge wire and the edge of the molten pool with time under different laser powers

由图 5 可见,当激光功率为 120 W 时,熔池边沿的桥丝产生的最大热应力为 308 MPa。随着激光照射时间延长,热应力先增加至峰值,随后趋于稳定,最

终缓慢下降。这主要是由于在较低的激光功率下,熔池加热较慢,产生的温度梯度较小,热应力增长缓慢。随着热输入与热传达到平衡,热应力逐渐稳定,一段时间后开始缓慢下降。当激光功率上升至 150 W 时,熔池边沿的最大热应力增至 388 MPa,较 120 W 时增长了 25.97%。该功率下,尽管热应力显著提高,但桥丝并未断裂。同时,熔池温度的提升有助于更多熔覆粉末的熔化,形成更为牢固的焊点。使用 316L 不锈钢作为基底材料,其高导热率和高吸收率对热应力有显著影响。316L 不锈钢的高导热率使热量迅速传导,防止局部过热,但也导致热应力集中分布。此外,高吸收率提升了熔池温度和焊接效率,但也可能增加温度梯度和热应力。当激光功率增至 200 W 时,熔池边沿的最大热应力达到 467 MPa,比 150 W 增长了 20.36%。此时,由于热应力超过 13 μm 桥丝的承载能力 (410 MPa),且温度超过桥丝熔点,可能会导致桥丝熔断。综上所述,选择 150 W 激光功率可在不损伤桥丝的前提下获得符合工艺标准的焊点。不同激光功率下桥丝与熔池热应力随时间变化的研究,揭示了控制温度和热传递对提高焊接质量的重要性。通过精确调控激光功率,可以优化熔覆焊接工艺,确保熔覆颗粒的充分熔化和焊点的牢固性。

3.1.2 离焦量对焊接的影响

在激光熔覆焊接过程中,应用离焦技术可以有效控制激光的功率密度,防止桥丝与熔池边沿产生断裂。基于上述模拟结果,选择 150 W 激光功率进行焊接。 $-3 \sim 3$ mm 离焦量下,桥丝与熔池边沿温度和热应力随时间的变化分别如图 6~7 所示。

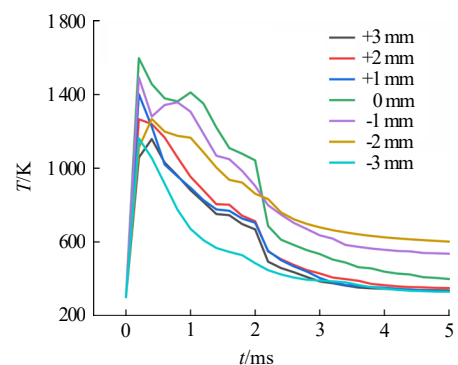


图 6 不同离焦量下桥丝与熔池边沿温度随时间的变化

Fig.6 The variation of temperature at the bridge wire and the edge of the molten pool with time under different defocus amounts

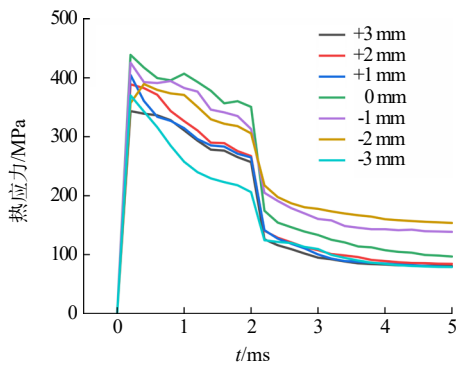


图7 不同离焦量下桥丝与熔池边沿热应力随时间的变化
Fig.7 The variation of thermal stress at the bridge wire and the edge of the molten pool with time under different defocus amounts

-3 ~ 3 mm 离焦量下, 熔深与熔宽的变化如图 8 所示。

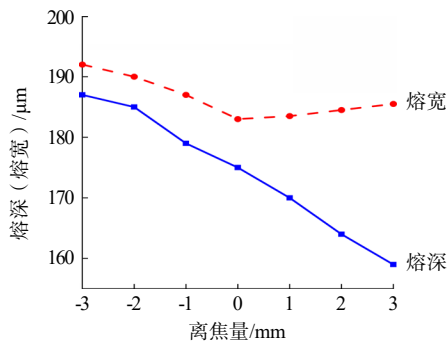


图8 不同离焦量条件下熔深与熔宽的变化
Fig.8 The variation of penetration depth and molten width under different defocus amounts

在正离焦条件下, 激光焦点位于基底表面上方, 由图 6 可见, 桥丝与熔池边沿的温度范围为 1 158 ~ 1 401 K。此时, 激光能量分布较广, 熔池温度较低, 温度梯度较小。随着离焦量的增加, 其熔池宽度增加而熔池深度减小(图 8), 这可能导致部分熔覆颗粒未能完全熔化, 进而形成不均匀的焊点和较大的凸起。由于熔融金属的表面张力较大, Marangoni 效应减弱, 热传递效率降低, 熔池内金属的流动性较差, 桥丝与基底的结合不牢固, 增加了虚焊的风险。由图 7 可见, 随着离焦量增加, 集中在桥丝与熔池边沿的热应力持续减小。当离焦量为 0 mm 时, 桥丝与熔池边沿的热应力最大值为 438 MPa, 已超过桥丝最大应力 (410 MPa), 可能会导致桥丝断裂。当离焦量为 +3 mm 时, 桥丝与熔池边沿的热应力最大值减小至 343 MPa。

在负离焦条件下, 激光焦点位于基底表面下方, 由图 6 ~ 7 可见, 桥丝与熔池边沿的温度最高可达 1

450 K。此时, 熔池宽度增加, 深度也相应增加(图 8), 熔融金属的表面张力减小, Marangoni 效应增强, 促进熔覆粉末迅速熔化, 进而形成光滑且牢固的焊点。随着负离焦量的增加, 桥丝与熔池边沿的温度和热应力均呈下降趋势。当离焦量为 -1 mm 时, 温度为 1 450 K; 当离焦量为 -2 mm 时, 温度降至 1 313 K; 当离焦量为 -3 mm 时, 温度进一步降至 1 221 K。这种温度变化受 Marangoni 效应影响, 促使液态金属向熔池边沿流动, 增强激光在基底中的渗透, 热应力从 -1 mm 离焦量时的 425 MPa 减小至 -3 mm 离焦量时的 369 MPa。然而, 在负离焦条件下容易产生过大的温度梯度, 且过高的温度可能导致桥丝过热, 从而增加断裂风险。

综上所述, 正离焦量下, 熔池温度较低, 焊点质量较差; 而负离焦量下, 熔池温度高, 焊点质量较好但热应力大。对比可知, 在 -2 mm 离焦量时获得了最佳的熔池深度和焊点质量。

3.2 实验结果验证

基于数值模拟结果, 使用 YLM-1500-QCW 型激光器, 搭建准连续光纤激光桥丝熔覆焊接系统, 如图 9 所示。在不同参数下进行极细桥丝激光熔覆焊接实验, 并记录焊点形貌。

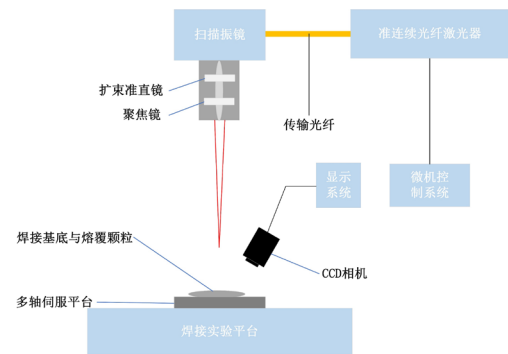


图9 桥丝激光熔覆焊接实验系统

Fig.9 Bridge wire laser cladding welding experimental system

3.2.1 不同激光功率下的焊接实验

120, 150, 180, 200 W 激光功率下, 桥丝激光熔覆焊接的焊点形貌如图 10 所示。由图 10 可见, 在 120 W 激光功率下, 熔池温度较低, 导致熔覆粉末仅部分熔化, 并仅粘附在焊点表面, 增加孔隙风险, 进而降低了焊接质量(图 10 (a))。当激光功率提升至 150 W 时, 熔池温度显著增加, 熔覆粉末与基底充分

熔融,形成光滑且无缺陷的焊接表面,同时桥丝未出现断裂现象(图 10 (b))。激光功率增至 180 W 时,熔池温度超过桥丝的熔点,热应力接近极限,焊点表面出现氧化变色,建议在此条件下增加保护气体(图 10 (c))。在 200 W 下,过高的温度与热应力导致桥丝断裂,并损伤基底,引起金属飞溅(图 10 (d))。综合实验结果表明,150 W 激光功率下,桥丝的焊接效果最佳,能够有效保证焊接质量和整体稳定性。

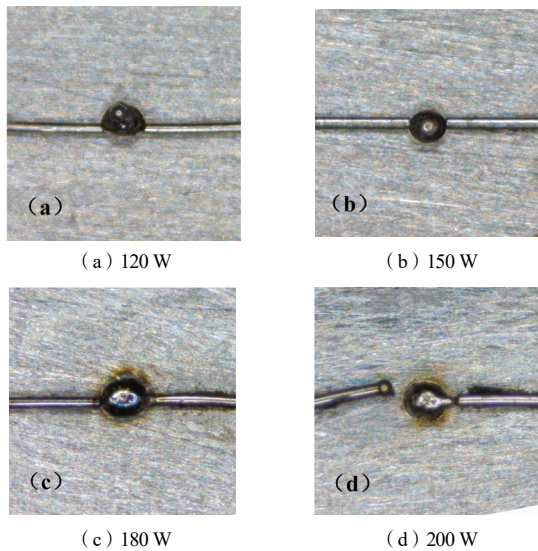


图 10 不同激光功率下桥丝焊接焊点图

Fig.10 Weld spot images of bridge wires under different laser powers

3.2.2 不同离焦量下的焊接实验

在激光功率为 150 W、脉宽为 2 ms、离焦量为 -3 ~ 3 mm 的条件下进行桥丝激光熔覆焊接实验。不同离焦量下的焊点形貌如图 11 所示。由图 11 可见,尽管在正离焦和负离焦量相等时,激光功率密度接近,但焊接过程中形成的焊点形态有所不同。在正离焦量条件下(图 11 (a) ~ (c)),激光焦点位于基底表面之上,导致熔池宽度增加而深度减少,未能完全熔化熔覆粉末,形成较大的凸起,进而增加了虚焊的风险。相比之下,在负离焦量条件下(图 11 (e) ~ (g)),激光焦点位于基底下方,促使熔覆粉末快速熔化,桥丝与基底结合更加牢固。特别是在离焦量为 -2 mm 的条件下,焊点表面光滑,熔池边沿的桥丝未出现断裂,与基底的连接紧密,这与仿真结果高度一致。因此,实验结果表明,在 -2 mm 离焦量条件下进行的桥丝熔覆焊接达到了理想的效果,验证了仿真模拟的准确

性,并为实际焊接工艺提供了重要的参考依据。

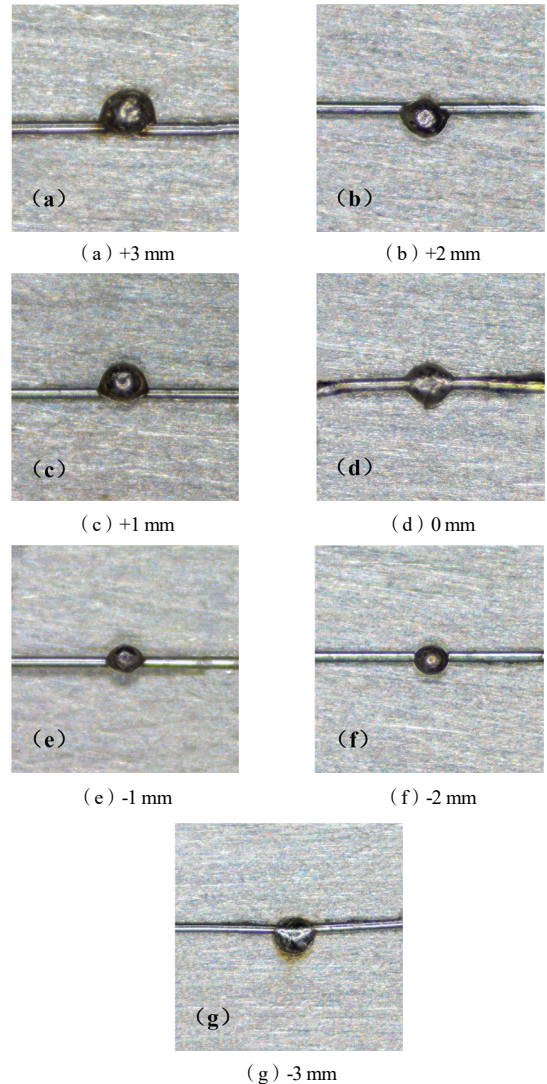


图 11 不同离焦量下桥丝熔覆焊接焊点图

Fig.11 Weld spot images of bridge wire cladding welding under different defocus amounts

4 结论

本研究通过数值模拟与实验相结合的方法,探究了 Ni60A 熔覆粉末与 316L 基底在激光熔覆焊接过程中的相互作用,重点分析了激光功率、离焦量及热应力对极细桥丝焊接效果的影响。模拟与实验结果均表明:在 120 W 激光功率下,焊点连接不牢固;提升至 150 W 时,焊点牢固且表面光滑,桥丝保持完整无断裂;在 180 W 激光功率时,过高的熔池边沿温度与热应力增加了桥丝颈缩断裂的风险,且焊点表面出现氧化变色;当激光功率增至 200 W 时,桥丝与熔池边沿

的温度及热应力超过了桥丝的性能极限,导致桥丝断裂,严重影响了焊点的质量及最终产品的性能。根据综合模拟与实验数据,当激光功率设置为 150 W、脉宽为 2 ms、离焦量为-2 mm 时,可实现最佳的焊接效果,确保焊点的强度与稳定性。

参考文献:

- [1] 李富良,曹敏忠,王宪武. 国内外工业电雷管结构及引火药头部件的对比[J]. 爆破器材, 2007(04): 13-16.
- [2] 邓体侠,朱小永. 浅谈我国工业雷管的现状及发展方向[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2010(02): 185-186.
- [3] 张海斌,李振锋,任钢,等. 一种微细桥丝焊接方法: CN, 106925880A[P]. 2017-07-07.
- [4] 吴涛. 桥丝式电火工品锡焊工艺分析与研究[J]. 科技尚品, 2015(10): 1-3.
- [5] 董二凤. 激光熔覆过程中熔池温度场的数值模拟及参数优化[D]. 上海: 上海电机学院, 2023.
- [6] Xu H, Guo X, Lei Y, et al. Welding deformation of ultra-thin 316 stainless steel plate using pulsed laser welding process[J]. Optics and Laser Technology, 2019(119): 105 583.
- [7] 宋博学,于天彪,姜兴宇,等. 激光熔覆产生的熔池温度与对流分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(10): 1 427-1 431.
- [8] 付艳恕,卢聪,叶小军,等. 激光材料加工熔池流动行为实验研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(05): 291-306.
- [9] 赵庆宇,秦坤,万焱. 激光焊接 1Cr17 铁素体不锈钢温度场数值模拟[J]. 宽厚板, 2021, 27(03): 37-40.
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [11] 吴向阳,宿浩,孙岩,等. 激光+GMAW 复合热源焊接过程热-力耦合数值分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(01): 91-96, 103-104.
- [12] Yao F, Fang L. Thermal stress cycle simulation in laser cladding process of Ni-based coating on H13 steel[J]. Coatings, 2021, 11(2): 203.
- [13] 汤晓刚,陈伟,刘俊悦,等. 选择性激光熔化 316L 的熔池热力学行为及其局域力学性能[J]. 热加工工艺, 2023, 52(21): 38-43.
- [14] Simonds B J, Sowards J, Hadler J, et al. Time-resolved absorptance and melt pool dynamics during intense laser irradiation of a metal[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(4): 044 061.
- [15] 李亚博. 准连续光纤激光桥丝熔覆焊接特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2023.