

同轴送粉激光熔覆的粉末熔化过程建模与仿真

朱明¹, 严瀚林^{1,2}, 张宗智¹, 杨骞¹, 石玟¹, 樊丁¹

(1. 兰州理工大学, 省共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州, 730050; 2. 兰州职业技术学院, 兰州, 730070)

摘要: 同轴送粉激光熔覆中, 粉末与激光的交互作用会直接影响熔覆成形的精度与质量, 红外摄像无法直接获得激光内粉末的熔化行为, 因此通过分析粉末对热量的吸收情况, 使用高速摄像系统采集粉末熔化的动态行为, 并建立粉末熔化过程的动态解析模型, 通过仿真分析激光功率对不同熔化阶段的影响, 及粉末进入熔池时的温度特征. 结果表明, 高速摄像系统采集粉末在激光中的动态熔化行为中存在“固态→固液两相态→液态”3 个典型熔化特征阶段, 粉末熔化动态行为可以使用数学解析模型解析, 而不同阶段的热物理行为具有粉末与激光热交互作用的动态解析模型, 分析了激光功率、离焦量、载粉气流量对粉末熔化行为的影响, 同时通过仿真分析不同激光功率对各个特征阶段持续时间的影响, 预测粉末颗粒到达基材的温度分布, 发现激光功率从 100 W 增加至 1 500 W 时, 粉末进入熔池的温度呈非线性变化, 温度从 750 °C 增加至 3 250 °C.

创新点: (1) 研究了同轴送粉激光熔覆中, 光粉作用特点, 并归纳为 3 个特征阶段.

(2) 建立了试验与数据采集系统, 在不同特征阶段建立了粉末熔化行为动态热物理解析模型.

(3) 仿真计算不同激光功率下的粉末熔化特征阶段持续时间, 并根据高速摄像系统对模型进行了修正与优化.

关键词: 同轴送粉; 激光熔覆; 热交互行为; 建模

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230109002

Detection and analysis of melting behavior of powder coaxially fed laser

ZHU Ming¹, YAN HanLin^{1,2}, ZHANG Zongzhi¹, YANG Qian¹, SHI Yu¹, FAN Ding¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China; 2. Lanzhou Vocational Technical College, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: During coaxial powder laser coating, the interaction between powder and laser directly affects the forming accuracy and quality of cladding. It is impossible to directly obtain the melting behavior of powder in laser and analyze the heat absorption of powder by infrared camera. Therefore, by analyzing the absorption of heat by powder, the dynamic behavior of powder melting was collected by high-speed camera system and the dynamic analytical model of powder melting process was established. The influence of laser power on different melting stages and the temperature characteristics of powder entering molten pool were simulated and analyzed. The results show that the dynamic melting behavior of the powder in the laser of the high-speed camera acquisition system has three typical melting characteristic stages of 'solid → solid-liquid two-phase → liquid'. The dynamic behavior of powder melting can be analyzed by mathematical analytical model, and the thermal physical behavior of different stages has a dynamic analytical model of the interaction between powder and laser heat. The effects of laser power, off-focus value and the flow rate of the gas carrying the powder on the melting behavior of powder were analyzed. At the same time, the effects of different laser power on the duration of each characteristic stage were simulated and analyzed, and the temperature distribution of powder particles reaching the substrate was predicted. It was found that when the laser power increased from 100 W to 1500 W, the temperature of the powder entering the molten pool changed nonlinearly, and the temperature increased from 750 °C to 3 250 °C.

Highlights: (1) The characteristics of the interaction between laser and powder in coaxial powder feeding laser cladding are studied.

收稿日期: 2023 – 01 – 09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52065041); 甘肃省引导科技创新发展专项 (2019ZX-08); 兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划; 兰州市科技发展指导性计划项目 (2022-5-20).

There are three characteristic stages in the melting of powder in laser.

(2) An experimental and data acquisition system was established, and a dynamic thermophysical analysis model of powder melting behavior was established at different characteristic stages.

(3) The duration of the powder melting characteristic stage under different laser power is simulated and calculated, and the model is modified and optimized according to the high-speed camera system.

Key words: coaxial powder feeding; laser cladding; thermal interaction behavior; modeling

0 序言

激光熔覆过程具有能量聚焦性强、熔覆热影响区小、成形好等优点^[1-3], 熔覆过程易控制, 生产成本低, 对于金属零部件的修复、表面强化效果较好^[4]. 因为同轴送粉激光熔覆模式光粉耦合作用好、成形精度高、空间自由度高、各向同性较强, 所以成为激光增材制造技术的重要选择^[5-7]. 成形精度与质量控制是激光增材制造的关键, 目前在生产实践中大多依靠大量工艺试验、人工经验进行调控, 从成形机制、组织演化的角度建立理论模型, 来实现对精度与质量的预测^[8], 其中, 激光与材料的热交互作用、热量分配机制等, 对激光熔覆的精确成形与高性能成性有重要影响, 因此, 针对激光与粉末热交互作用的复杂模式开展研究, 需要通过试验与建模结合, 分析同轴送粉粉末与激光的热交互作用, 建立动态解析模型, 明确激光热源特性对即将进入熔池的粉末热物性状态影响机理.

目前, 关于同轴送粉激光熔覆的热物理行为研究, 主要集中在粉末对激光吸收与散射方式、光粉热交互作用形式、熔池热物理状态等, 其中, 对其他物理过程起重要影响的是光粉热交互作用, 对此, 国内外众多学者展开了很多研究, 例如 Shrey 等人^[9]针对预先设置激光熔覆过程, 提出一个考虑能量转移和损失机制以熔融材料表面张力的参数集成分析模型, 预测熔池温度熔覆几何形状和基材稀释度; 杨义成等人^[10]借助“背影增效”瞬态影像捕捉方法和图像信息处理技术, 研究了激光辐照下粉末束流及粒子的变化特征, 提取高亮状态粒子数量、亮区总面积和单个粒子亮区面积均值作为特征参量, 结合表征工艺参数对激光同轴送粉增材制造过程的影响规律, 提出可以通过合理匹配主要工艺参数, 实现对光粉相互作用过程的调控; 朱明等人^[11-12]针对预置粉末与激光的作用行为进行了建模与仿真分析. 综上所述, 相关研究主要集中在光粉作用

过程中的能量传递以及光粉作用空间温度场分布等方面, 而对光粉作用动态过程、光粉作用时粉末热物性状态的演变以及粉末颗粒进入熔池的状态等方面研究较少.

在同轴送粉激光熔覆过程中, 由于熔池表面金属蒸气、等离子体的存在, 常规热成像手段准确反映粉末即将进入熔池的温度与状态比较困难, 定量分析激光热源对粉材熔化末阶段的作用机制也有很大的难度, 为了准确研究工艺参数对粉材末阶段温度与状态的影响, 设计了同轴送粉激光熔覆试验平台、红外热成像采集系统及高速摄像采集系统, 根据粉末不同熔化阶段, 建立可以描述粉末熔化行为的动态热物理解析模型, 仿真计算不同激光功率下的粉末熔化特征阶段持续时间, 并根据高速摄像对模型进行修正与优化, 最终定量获得了不同激光功率下粉末到达熔池时的温度与状态, 从而为进一步研究粉末对熔池的传热行为、熔池的热动力学状态等提供理论基础, 为实现粉末熔化行为的控制提供理论依据.

1 试验方法

试验选用 45 号碳素结构钢作为基材, 尺寸为 $120\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, 选用高硬度的 Ni60A 合金粉末作为粉材, 粉末粒径 $80 \sim 160\text{ }\mu\text{m}$, 化学成分见表 1. 试验前, 将粉末放入 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 电阻炉中烘干 1 h 去除粉末中的水分, 同时将 45 号钢用砂纸打磨去除表面铁锈与氧化膜, 再用丙酮酒精擦拭以去除表面油污.

文中使用 FL-Dlight-1500 激光热源, 主要由直接输出型矩形光斑半导体激光器组成, 最小光斑尺寸为 $1\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 波长为 $976\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$, 最大输出功率为 $1\text{ }500\text{ W}$, 送粉设备为 ECPF 2-2 LC 等离子送粉器, 同时配备了高精度同轴环形送粉喷嘴, 采用艾帝斯生产制造的 DIAS 短波高温红外热成像仪, 对光粉热交互作用热过程进行观察, 测量温度

表 1 Ni60A 粉末化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of Ni60A

C	Cr	Si	W	Fe	B	Ni
0.5 ~ 1.0	15 ~ 20	3.0 ~ 5.0	3.0	≤4.5	3.5 ~ 4.5	余量

为 900 ~ 2 500 °C, 误差为 1%, 测量频率为 60 Hz. 激光增材与再制造过程采集系统使用 VEO 410L 型高速摄像机, 拍摄帧率选用 10 000 fps, 曝光时间为 1 μ s, 配备的镜头为尼康 AF60 mm f/2.8D 定焦微距镜头, 辅助光源使用 HSX-F300 型氙灯来提升采集过程的对比度, 试验与采集系统如图 1 所示.

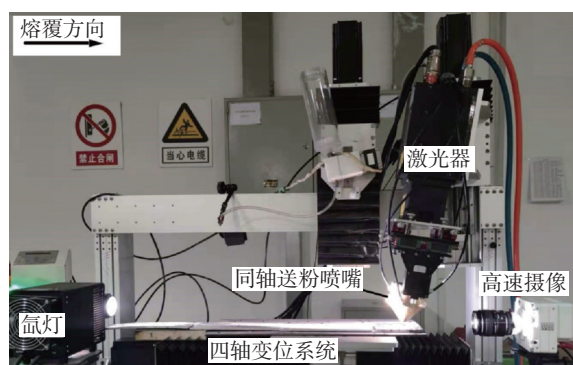


图 1 同轴送粉激光熔覆试验系统

Fig. 1 Coaxial powder feeding laser cladding experimental system

2 粉末熔化行为的检测、建模与仿真

2.1 粉末熔化过程的红外热成像采集与分析

为了探究粉末在光粉热交互作用空间中的温度分布及进入熔池的热物性状态, 在送粉量 0.25

r/min, 载粉气流量 7 L/min, 送粉高度 20 mm, 激光离焦量 0 mm, 扫描速度为 4 mm/s 的试验条件下, 使用红外热成像仪对不同激光功率下激光与粉末热交互作用进行采集, 如图 2 所示, 喷嘴和基体的位置如图 3 所示.

由图 2 所知, 激光功率逐渐升高后, 光粉热交互作用场中的温度逐渐升高, 粉末温度高温区域逐渐增大且逐渐向送粉喷嘴靠近, 粉末温度沿着纵向轴线逐渐分布均匀. 通过分析可知, 激光功率逐渐升高, 光粉热交互作用场中的激光能量密度也逐渐增加, 激光功率增加或者减小不影响粉末运动轨迹, 但是如果增加激光功率, 光粉作用相同时间后, 粉末吸收了更高的激光能量, 粉末温度随即升高, 因此, 出现粉末高温区域向纵向拉伸, 并逐渐靠近送粉喷嘴, 在到达熔池前粉末已熔化比例增加. 在激光功率 700 W 及以上时, 粉末温度迅速上升, 靠近熔池及靠近熔池区域出现金属蒸气笼罩, 并随着激光功率逐渐增多. 金属蒸气对红外热成像测量粉末温度影响很大, 红外热成像最大量程 2 500 °C, 而金属蒸气笼罩区域温度均超出该量程, 且该区域随着激光功率的增加而增加, 所以只有在低激光功率作用下的粉末进入熔池瞬间, 温度可以用红外成像测量.

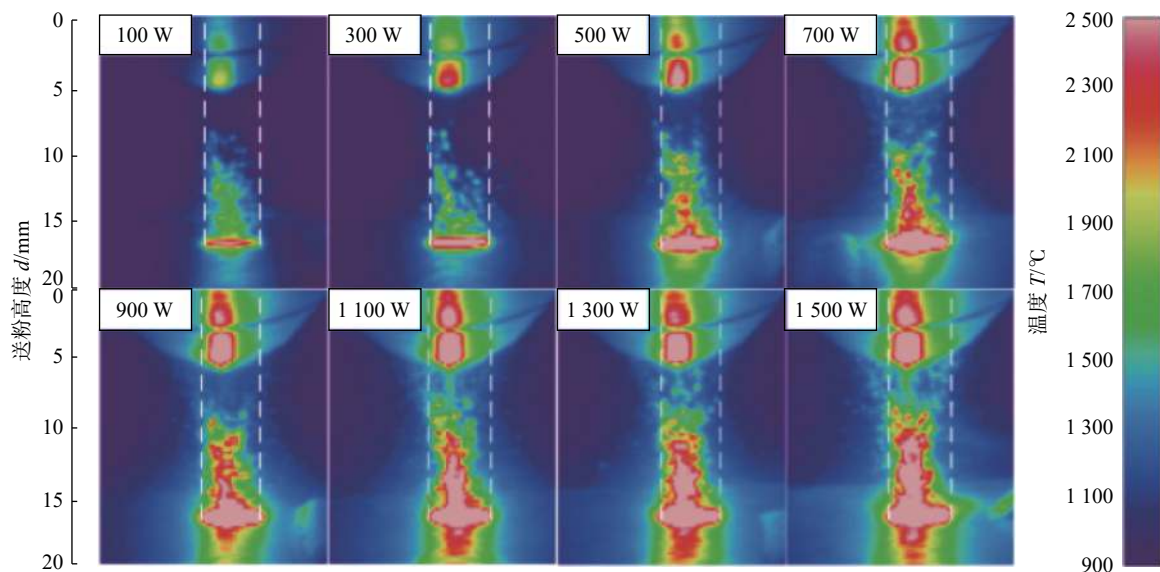


图 2 不同激光功率对光粉热交互作用空间温度分布的影响

Fig. 2 Effect of different laser power levels on the spatial temperature distribution of light-powder action

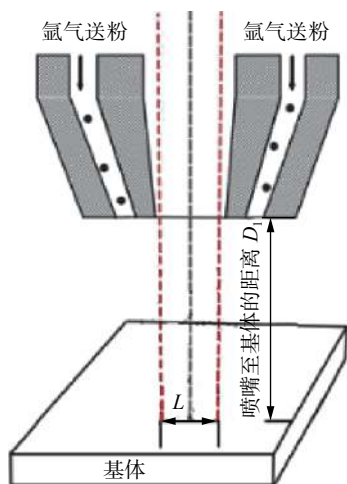


图 3 喷嘴和基体的位置

Fig. 3 Position of nozzle and substrate

2.2 同轴送粉与激光的热交互行为采集与分析

半导体激光同轴送粉制造过程中,粉末进入激光作用场后会发生“固态→固液两相态→液态→体积膨胀→气化→等离子体”的转变.文献[10]中表明,激光辐照程度不同,光粉热交互作用下得到的粉末物理状态不同,粉末之间亮度的差异可以直接体现光粉热交互作用程度差异.通过“背影增效”,固态粉末通过同轴送入激光作用场,粉末受到激光能量辐照并升温,当达到熔点还会持续吸热,同时向外释放熔化潜热,发生固-液转变,这时可以通过高速摄像观察到粉末颜色逐渐由黑色转变为亮白色,当粉末全部由黑色转变为亮白色时,表明完成相变,如果已经熔化的粉末持续吸收热量,体积会发生膨胀,当温度达到气化温度时,熔化粉末周围产生金属蒸气,甚至会有等离子态出现[13].单个粉末的熔化行为与整体粉末束流熔化行为有很大的相似性,虽然同轴送粉激光熔覆时粉末较多,但是可以研究典型单个粉末熔化行为.

采用图1搭建的同轴送粉半导体激光熔覆试验系统,选择粉末典型熔覆过程,分析并采集单个粉末熔化行为,在激光功率设置合理的情况下,进入激光中的粉末就不会由于接受激光作用而全部变为金属蒸气或者等离子态,而且这种光粉作用热过程还呈规律性,因此,可以对进入激光作用场中的粉末熔化过程进行简化.

由于粉末全部转化为气态或等离子体的概率较小且对整个热过程的影响不大,因此对粉末熔化过程进行简化,得到3个特征阶段,如图4所示.在送粉量 0.25 r/min,载粉气流量 7 L/min,送粉高度 20 mm,激光离焦量 0 mm,扫描速度为 4 mm/s 参

数下,使用不同激光功率,通过高速摄像采集到的固体粉末熔化过程后,使用 Matlab 软件处理,将图像中粉末熔化时的亮度、像素面积作为特征信号,分析发现粉末进入激光作用场到落入熔池瞬间存在3个典型的阶段,即3个特征阶段.特征阶段1:开始熔化阶段,粉末从喷嘴喷出,运动时间 0~9.8 ms,进入激光辐照区域后吸收热量,由黑色固态开始向白亮的液态转变,该阶段粉末表现在图像中的特点是灰度值 0~160,像素值 0~2 像素;特征阶段2:全高亮阶段,粉末运动时间 9.9~12 ms,粉末在激光热交互作用下持续吸收热量,由上而下熔化,最后成为全高亮的液体颗粒,该阶段粉末表现在图像中的特点是灰度值 160~255,像素值 2~5 像素;特征阶段3:熔滴进入熔池阶段,粉末运动时间 12.1~18 ms,液态粉末继续通过激光热交互作用吸收热量而体积不断增大,还有可能在此时发

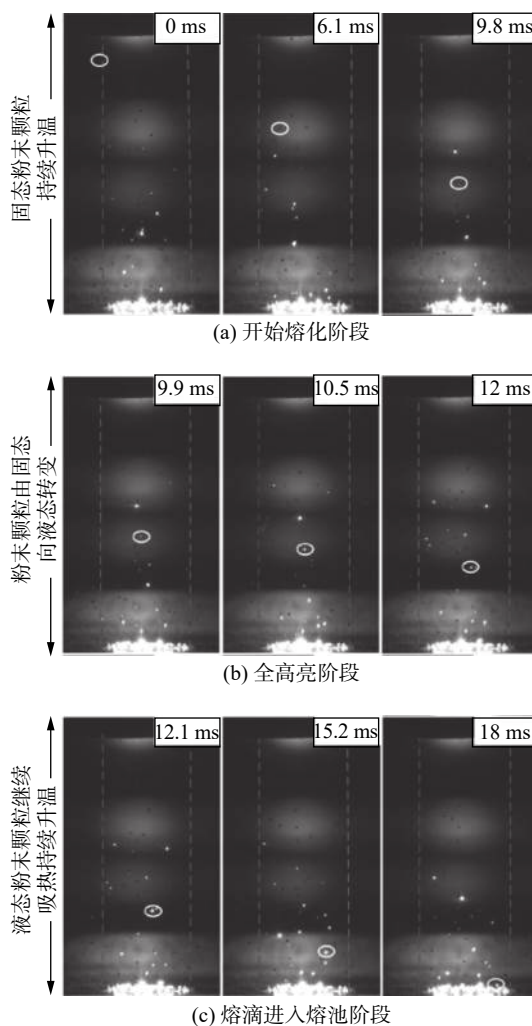


图 4 粉末熔化典型特征阶段

Fig. 4 Typical characteristic stages of the powder melting process. (a) powder is in the initial melting stage; (b) powder is in the full highlight stage; (c) stage of powder into the molten pool

生羽化现象,最后粉末呈高温液态进入熔池,该阶段粉末表现在图像中的特点是灰度值为 255,像素值大于 5 像素,综上,粉末在激光中发生了“固态→固液两相态→液态”的转变。

2.3 粉末送入激光时熔化行为热物理过程解析

图 4 中发现,粉末在激光中熔化形式是动态的,而吸收能量的过程也是动态的,因此描述粉末进入激光后的熔化行为也应该是动态的。但是现有的热物理模型大多使用静态的、单一的热量吸收方程,为此,需要根据不同特征阶段建立动态的热物理模型来描述固态粉末在激光中的熔化行为,通过计算、分析粉末进入熔池的状态与温度。

2.3.1 激光热源模型

为分析热源特性对粉末熔化行为的影响,首先建立激光热源模型,由于光粉热交互作用中能量传输形式以及载体较为复杂,需要针对光粉热交互作用过程提出以下假设:①激光能量的衰减是通过粉末吸收和散射,忽略等离子体的影响;②作用于粉末的激光能量密度解析是按照梯形分布;③研究的粉末经过光粉热交互作用后最终进入熔池;④金属蒸气通过热传导形式作用于粉末,但是影响比较小,所以在研究中忽略金属蒸气对粉末温度的影响。矩形半导体激光热源在 x 方向呈高斯分布,在 y 轴方向呈梯形分布,如图 5 所示。

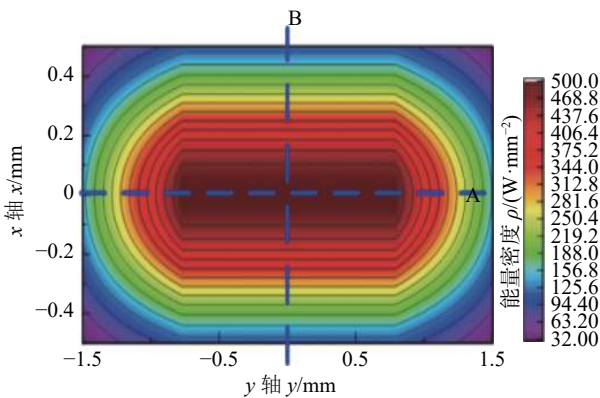


图 5 半导体激光热源能量分布热源投影形态

Fig. 5 Semiconductor laser heat source energy distribution form

半导体激光热源在长度方向是最能反映能量分布均匀性的梯形分布,同时,激光熔覆方向垂直于激光光斑长度方向,因此,为了将激光热源模型简化,需要假设粉末是沿垂直于激光宽度方向能量最大平面运动到熔池,在受到激光热作用后,热物理行为按照激光能量密度为梯形分布解析,简化后得到的激光能量分布公式,即

$$q_{\text{laser}} = \begin{cases} \frac{P}{WL} \left(0.3 + \frac{0.7}{2.4L} y \right), & 0 \leq y \leq 2.4L \\ \frac{P}{WL}, & 0.24L \leq y \leq 0.76L \\ \frac{P}{WL} \left(0.3 + \frac{0.7}{2.4L} (L-y) \right), & 0.76L \leq y \leq L \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_{laser} 为光粉作用空间中任意位置的激光能量密度; P 为激光功率; W 为激光光斑宽度; L 为光斑长度; y 为沿激光束长度方向的距离。

激光熔覆以同轴送粉形式时,粉末受到载粉气流作用,运动形式比较复杂,对于环形送粉,粉末在光粉热交互作用空间中的粉末受到气流阻力和自身重力作用,所以受力形式更加复杂,解析它们的受力和运动形式更加困难。然而,由于环形送粉熔覆头和粉末束流的对称性高,在送粉参数一定的情况下,同截面的粉末均有相同受力和运动形式,因此,文中以粉末在激光光斑宽度中心方向二维截面内的运动模型进行解析,受力方式如图 6 所示。

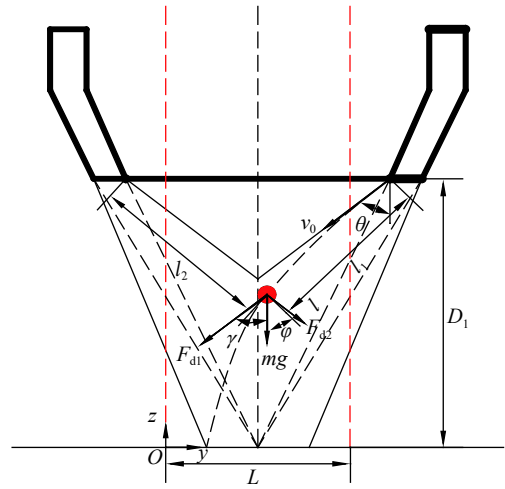


图 6 粉末在激光中受力二维示意图

Fig. 6 Two-dimensional diagram of the force on the powder in the laser

单个粉末从送粉喷嘴到熔池运动可以分解为水平方向和竖直方向,分别在两个方向的运动时间 t_1 和 t_2 可以通过运动学求出,在激光作用场中运动的最大时间可以计为 $t = \min[t_1, t_2]$, 即

$$\begin{cases} t_1 = \frac{-\sqrt{v_0^2 \sin^2 \theta + 2a_y L} - v_0 \sin \theta}{a_y} \\ t_2 = \frac{\sqrt{v_0^2 \cos^2 \theta + 2a_z d} - v_0 \cos \theta}{a_z} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_0 为粉末在送粉喷嘴时的速度; a_z 为粉末在竖直方向运动加速度; a_y 为粉末在水平方向运动加

速度; θ 为粉末入射角.

将激光能量分布式 (1) 与粉末运动模型式 (2)

$$q_{\text{laser}}(t) = \begin{cases} \frac{P}{WL} \left[0.3 + \frac{0.7}{0.24L} \left(v_0 \sin \theta t + \frac{1}{2} a_y t^2 \right) \right], & 0 \leq t \leq \frac{-0.24 \sqrt{v_0^2 \sin^2 \theta + 2a_y L} - v_0 \sin \theta}{a_y} \\ \frac{P}{WL}, & \frac{-0.24 \sqrt{v_0^2 \sin^2 \theta + 2a_y L} - v_0 \sin \theta}{a_y} \leq t \leq \frac{-0.76 \sqrt{v_0^2 \sin^2 \theta + 2a_y L} - v_0 \sin \theta}{a_y} \\ \frac{P}{WL} \left[0.3 + \frac{0.7}{0.24L} \left(L - v_0 \sin \theta t + \frac{1}{2} a_y t^2 \right) \right], & \frac{-0.76 \sqrt{v_0^2 \sin^2 \theta + 2a_y L} - v_0 \sin \theta}{a_y} \leq t \leq L \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 为粉末在激光中运动到任意位置所需要的时间.

2.3.2 特征阶段 1 的热物理过程建模

粉末进入激光作用场初期, 受到激光交互作用

$$\frac{2}{3} \pi r_p \rho_{\text{p-solid}} C_{\text{p-solid}} [T_{\text{p-solid}}(t) - T_0] = \alpha_{\text{solid}} \int_0^{t_1} q_{\text{laser}}(t) dt - 2h_{\text{p-solid}} [T_{\text{p-solid}}(t) - T_0] t_1 - 2\varepsilon \sigma [T_{\text{p-solid}}^4(t) - T_0^4] t_1 \quad (5)$$

式中: 粉末均为固态; $Q_{\text{p-solid}}$ 为粉末吸收的热量; $Q_{\text{p-solidabs}}$ 为粉末在该阶段 t_1 内时间吸收的激光热量; $Q_{\text{p-solidcon}}$ 为粉末由热对流散失的热量; $Q_{\text{p-solidrad}}$ 为粉末热辐射散失的热量; α_{solid} 为粉末吸收激光的比率; $h_{\text{p-solid}}$ 为粉末热对流换热系数; $T_{\text{p-solid}}(t)$ 为第 1 特征阶段粉末最终实时温度; $\rho_{\text{p-solid}}$ 为粉末的密度; $C_{\text{p-solid}}$ 为粉末的比热容; r_p 为单个粉末颗粒的半径; T_0 为环境温度; ε 为粉末对激光的发射率; σ 为玻尔兹曼常数.

由式 (5) 可知, 特征阶段 1 的持续时间 t_1 随着

$$\frac{2}{3} \pi r_p \rho_{\text{p-solid}} C_{\text{p-solid}} [T_{\text{p-solid}}(t) - T_m] = \alpha_{\text{solid}} \int_{t_1}^{t_2} q_{\text{laser}}(t) dt - 2h_{\text{p-solid}} [T_{\text{p-solid}}(t) - T_m] (t_2 - t_1) - \frac{2}{3} r_p \rho_{\text{p-solid}} \Delta H_f - 2\varepsilon \sigma [T_{\text{p-solid}}^4(t) - T_m^4] (t_2 - t_1) \quad (7)$$

式中: ΔH_f 为熔化潜热, T_m 为粉末的熔点. 由于粉末在固-液转变时温度差较小, 该值约等于 T_m , 因此将式 (7) 简化为

$$\alpha_{\text{solid}} \int_{t_1}^{t_2} q_{\text{laser}}(t) dt = \frac{2}{3} r_p \rho_{\text{p-solid}} \Delta H_f \quad (8)$$

通过式 (8) 可以得出, 特征阶段 2 的持续时间 $(t_2 - t_1)$ 因为激光功率 P , 粉末的入射角度 θ 减小而增加, 也会因为粉末平均粒径 r_p , 粉末初速度 v_0 , 激光离焦量 D 的减小持续时间减少.

2.3.4 特征阶段 3 的热物理过程建模

$$\frac{2}{3} r_p \rho_{\text{p-liquid}} C_{\text{p-liquid}} [T_{\text{p-liquid}}(t) - T_m] = \alpha_{\text{liquid}} \int_{t_2}^{t_3} q_{\text{laser}}(t) dt - 2h_{\text{p-liquid}} [T_{\text{p-liquid}}(t) - T_0] (t_3 - t_2) - 2\varepsilon \sigma [T_{\text{p-liquid}}^4 - T_0^4] (t_3 - t_2) \quad (10)$$

耦合, 得到在激光束中运动的任意时间 t 时, 受到的能量密度 q_{laser} 为式 (3), 即

而未熔化, 但由低温固态转变为高温固态, 这时的能量传输平衡方程为

$$Q_{\text{p-solid}} = Q_{\text{p-solidabs}} - Q_{\text{p-solidcon}} - Q_{\text{p-solidrad}} \quad (4)$$

$q_{\text{laser}}(t)$ 的增大而减小, 即当激光功率 P 和粉末入射角度 θ 变小、激光离焦量 D 和粉末入射初速度 v_0 增加, 特征阶段 1 的持续时间 t_1 增加, 粉末实时温度 $T_{\text{p-solid}}(t)$ 的增长率变慢.

2.3.3 特征阶段 2 的热物理过程建模

粉末开始发生固-液相变, 粉末吸收热量的同时, 因为相变释放熔化潜热, 在此阶段激光能量载体热物性状态发生改变, 能量传输平衡方程, 即

$$Q_{\text{p-solid}} + Q_{\text{p-latent}} = Q_{\text{p-solidabs}} - Q_{\text{p-solidcon}} - Q_{\text{p-solidrad}} \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{p-latent}}$ 为粉末发生相变时释放的能量.

粉末已完成固-液转变, 在落入熔池前依然受到持续的激光热作用, 由于粉末的固相和液相热物性参数差异较大, 该阶段的热物理过程都需要按照液态传输热物性参数整定, 热量传递平衡方程为

$$Q_{\text{p-liquid}} = Q_{\text{p-liquidabs}} - Q_{\text{p-liquidcon}} - Q_{\text{p-liquidrad}} \quad (9)$$

式中: 粉末均为液态; $Q_{\text{p-liquid}}$ 为粉末最终吸收的热量; $Q_{\text{p-liquidabs}}$ 激光作用于粉末的热量; $Q_{\text{p-liquidcon}}$ 热对流引起粉末散失的热量; $Q_{\text{p-liquidrad}}$ 热辐射引起粉末散失的热量.

式中:粉末均为液态; α_{liquid} 为对激光的吸收率; $h_{\text{p-liquid}}$ 为对流换热系数; $T_{\text{p-liquid}}(t)$ 为实时温度; $\rho_{\text{p-liquid}}$ 为密度; $C_{\text{p-liquid}}$ 为比热容。

由式 (10) 可知,特征阶段 2 持续时间 (t_3-t_2) 和液态粉末实时温度 $T_{\text{p-liquid}}(t)$, 粉末运动初速度 v_0 , 激光功率 P , 激光正离焦量 D , 粉末入射角度 θ 等参数有关, 如果相同时间让粉末温度升更高, 可以将激光正离焦量 D , 粉末运动初速度 v_0 减小, 将激光功率 P , 粉末入射角度 θ 增大, 此时, 会有更长的时间持续在特征阶段 3。

2.4 粉末熔化行为的仿真分析

2.4.1 激光功率对粉末熔化行为的影响

虽然半导体激光同轴送粉制造过程中, 熔池表面笼罩有金属蒸气, 使得粉末进入熔池瞬间的温度

被测量出来比较困难, 但是通过上述模型可以计算出粉末进入熔池瞬间的温度, 以及预测出进入熔池瞬间的物理状态。利用模型计算不同激光功率下粉末在 3 个特征阶段的持续时间, 在相同激光功率及其他参数一致情况下, 使用高速摄像记录各特征阶段的实际持续时间, 通过前后持续时间对比来验证模型的准确性, 在获得模型的基础上, 分析、判断粉末进入熔池时的温度、状态。

在以下仿真条件下: 送粉量 0.25 r/min, 载粉气流量 7 L/min, 激光离焦量 0 mm, 送粉高度 20 mm, 粉末入射角度 45° , 式 (3), 式 (5), 式 (8) 和式 (10) 中时间 t_1, t_2, t_3 下所对应粉末实时温度 $T(t)$ 进行 Matlab 仿真, 获得不同激光功率 q_{laser} 对各特征阶段持续时间 $t_1, (t_2-t_1)$ 和 (t_3-t_2) 的影响, 仿真参数见表 2。

表 2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

激光功率 P/W	离焦量 D/mm	粉末粒径 $r_p/\mu\text{m}$	粉末初速度 $v_0/(\text{mm}\cdot\text{ms}^{-1})$	粉末入射角度 $\theta/^\circ$	玻尔兹曼常数 $\sigma/(\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-4})$	熔化潜热 $Q_{\text{p-latent}}/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	固态粉末吸收率 α_{solid}	液态粉末对流换热系数 $h_{\text{p-liquid}}/(\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	固态粉末对流换热系数 $h_{\text{p-solid}}/(\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
100 ~ 1500	0 ~ +15	120	0.6 ~ 1.2	20 ~ 45	5.67×10^{-14}	30.375	0.75	1.2×10^{-5}	6×10^{-6}
送粉高度 d/mm	发射系数 ϵ	环境温度 $T_0/^\circ\text{C}$	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$	沸点 $T_b/^\circ\text{C}$	液态粉末吸收率 α_{liquid}	固态粉末比热容 $C_{\text{p-solid}}/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	液态粉末比热容 $C_{\text{p-liquid}}/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	粉末(固态)密度 $\rho_{\text{p-solid}}/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$	粉末(液态)密度 $\rho_{\text{p-liquid}}/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$
10 ~ 25	0.3452	25	1060	2700 ~ 3500	0.4	0.4571	0.535	8.32×10^{-3}	8.212×10^{-3}

仿真值与试验值有一定的偏差, 特征阶段 1 仿真值始终大于试验值, 特征阶段 3 的仿真值始终小于试验值, 低功率的特征阶段 1 持续时间和高功率的特征阶段 3 持续时间仿真结果与试验结果差距较大, 因为低功率的特征阶段 1 和高功率的特征阶段 3 持续时间都相对较长, 这两种过程均受到如熔

池热量反射、金属蒸气的热量较多等因素干扰, 而这些因素在仿真建模中将这几类干扰因素忽略, 如图 7 所示。

2.4.2 离焦量对粉末熔化行为的影响

在送粉量 0.25 r/min, 载粉气流量 7 L/min, 扫描速度 4 mm/s, 送粉高度 20 mm, 激光功率 1100 W

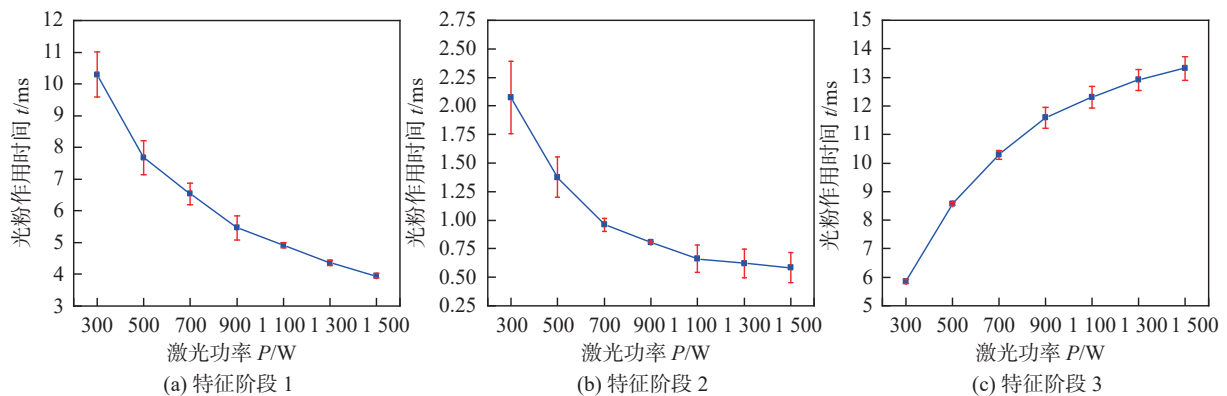


图 7 不同激光功率对各特征阶段持续时间影响试验与仿真对比

Fig. 7 Comparison of the experimental and calculated results of duration in different stage. (a) duration of the first characteristic stage; (b) duration of the second characteristic stage; (c) duration of the third characteristic stage

的参数条件下,调整离焦量大小,研究离焦量在同轴激光熔覆时对光粉交互作用空间中温度分布的影响,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,离焦量增大会使得粉末熔化量沿着激光光斑横向增加,粉末颗粒温度分布均匀性也沿激光光斑横向增强,粉末温度高温区域面积先增加后减小,处于高温状态的粉末颗粒距离喷嘴呈先近后远。原因在于,离焦量从 0 mm 开始增加,意味着激光横向最大能量分布截面由

基板处逐渐向喷嘴处移动,当离焦量为 +10 mm 时,粉末颗粒在光粉作用中可以吸收的平均能量密度最大;离焦量超过 +10 mm 后,激光作用焦点与基板距离过大,且而激光光束呈现发散状态,使得粉末颗粒在光粉作用中可以吸收的平均能量密度随焦距增加而减小,所以,观察到了粉末颗粒沿着激光光斑横向熔化增多,而粉末熔化不均性沿着该方向降低,粉末温度高温区域面积增加后减小。

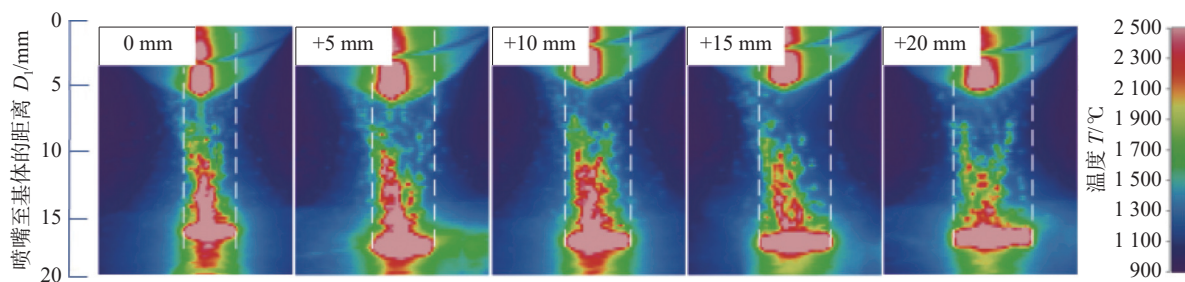


图 8 不同离焦量下光粉作用空间温度分布

Fig. 8 Temperature distribution in the working space under different off-focus value

在送粉量 0.25 r/min, 扫描速度 4 mm/s, 送粉高度 20 mm, 激光功率 1 100 W, 离焦量 0 mm 的参数条件下,通过调整载粉气流量,研究载粉气流量

对同轴激光熔覆时光粉交互作用空间中温度分布的影响,在载粉气流量为 5, 7, 9, 11 L/min 时,如图 9 所示。

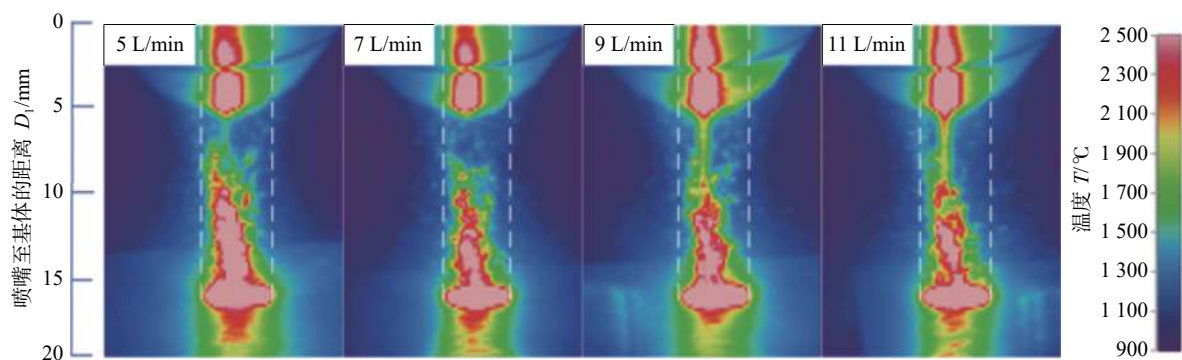


图 9 不同载粉气流量下光粉作用空间温度分布

Fig. 9 Spatial temperature distribution of laser-powder interaction under different powder-carrying gas flow rates

从图 9 可以看出,载粉气流量逐渐增加,粉末颗粒熔化数量略微有所减少,粉末颗粒温度高温区域面积相对减小,同时,粉末颗粒温度分布均匀性减弱。原因在于,载粉气流量影响粉末颗粒在光粉作用空间中的运动速度以及空间分布,载粉气流量增加,粉末颗粒在光粉作用空间的运动速度增加,在光粉作用空间受到的作用时间减少,使得相同位置下粉末颗粒的温度逐渐降低,在落入熔池时温度也会相应的降低,熔覆整个过程所产生的金属蒸气也会相应减少,粉末颗粒在光粉作用空间中的浓度

也在降低。载粉气流量变化对光粉作用空间的温度分布,与激光功率、离焦量变化对光粉作用空间温度分布的影响相比,载粉气流量变化对光粉作用空间的温度分布影响较小。

2.4.3 不同激光功率粉末熔化阶段温度仿真

在粉末粒径 120 μm , 载粉气流量 7 L/min, 粉末入射角度 45°, 粉末初速度 0.8 mm/ms, 激光离焦量为 0 mm, 送粉高度 20 mm 时,基于对热物理模型的修正,使用 Matlab 工具对不同激光功率相对应粉末温度进行仿真,得到不同激光功率下粉末温度随

时间的变化趋势,如图10所示。

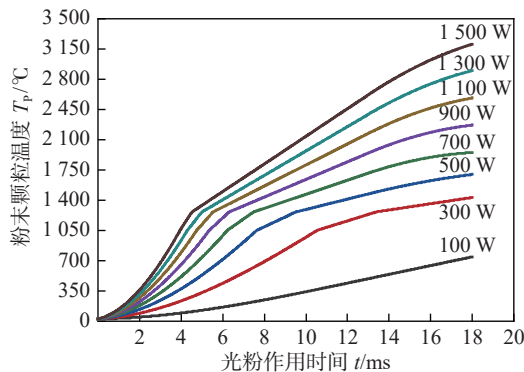


图10 不同激光功率下粉末温度变化仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the powder temperature with time at different laser power levels

由图10可知,粉末在激光作用初期,温度升高的增量要明显大于熔化的中期和末期,解释了粉末固态要比粉末液态吸收更多的激光能量,散失更少能量的现象,其次,除了激光功率在100 W时,温度曲线出现2个拐点分别是1060 °C和1260 °C,可以看出增长率最快的是1060 °C以下的升温曲线,增长率最慢的是1260 °C以上的升温,而在1060 ~ 1260 °C升温区间内的温度增长率在上述两者中间,原因是,粉末开始熔化在1060 °C,在1260 °C时完成相变,又因为粉末在固态和液态对激光的吸收率、散失率都不同,最终造成升温曲线斜率不同,即温度的增长率不同.此外,从升温曲线还可以看出,粉末在进入激光发生光粉热交互作用初期,温度增长率逐步变大;熔化末期,温度增长率逐步变小,原因是,它们分别在梯形的激光热源边缘处运动,所处能量密度发生了变化。

3 结论

(1) 利用高速摄像采集粉末在激光中的动态熔化行为,发现粉末熔化存在“固态→固液两相态→液态”3个典型特征阶段,不同特征阶段的持续时间及熔化的特征方程均有不同,据此建立可以描述粉末熔化动态行为的数学解析模型。

(2) 分析了激光功率、离焦量、载粉气流量对粉末在光粉作用空间温度分布的影响,同时利用模型分析了不同激光功率对各个特征阶段持续时间的影响,仿真预测了粉末颗粒到达基材的温度分布,发现随着激光功率从100 W增加至1500 W时,粉

末进入熔池的温度呈非线性变化,从仿真结果中可以发现,当激光功率从100 W增加至1500 W时,粉末进入熔池的温度从750 °C增加至3250 °C。

参考文献

- [1] Zhu Lida, Xue Pengsheng, Lan Qing, *et al.* Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021(6): 138.
- [2] 巩江涛,舒林森,王家胜,等. 激光熔覆工艺优化方法研究现状及发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(19): 22–35.
Gong Jiangtao, Shu Linsen, Wang Jiasheng, *et al.* Research status and development trend of laser cladding process optimization method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(19): 22–35.
- [3] 韩辉辉,黎文强,王腾飞,等. 激光熔覆再制造技术影响因素的研究[J]. *能源与环保*, 2022, 44(9): 225–228.
Han Huihui, Li Wenqiang, Wang Tengfei, *et al.* Research on the influencing factors of laser cladding and remanufacturing technology[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2022, 44(9): 225–228.
- [4] 刘立君,柳学杨,兰虎,等. 声信号辅助同轴视觉激光模具修复飞溅控制[J]. *焊接学报*, 2015, 36(3): 9–13.
Liu Lijun, Liu Xueyang, Lan Hu, *et al.* Acoustic signal-assisted coaxial visual laser mold repair splash control[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(3): 9–13.
- [5] Li C, Zhang D, Yang Y, *et al.* Research on sputtering behavior of three beams coaxial laser cladding powder based on the interaction of lasers and powder[J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33(4): 42020.1–42020.23.
- [6] 崔雪,张松,张春华,等. 高性能梯度功能材料激光增材制造研究现状及展望[J]. *材料工程*, 2020, 48(9): 13–23.
Cui Xue, Zhang Song, Zhang Chunhua, *et al.* Research status and prospect of laser additive manufacturing technology for high performance gradient functional materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(9): 13–23.
- [7] Shi B, Li T, Guo Z, *et al.* Selecting process parameters of crack-free Ni60A alloy coating prepared by coaxial laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107805.
- [8] Cao Fusheng, Zhang Haitian, Zhou Hang, *et al.* The effect of scanning strategies on FeCrAl nuclear thin-wall cladding manufacturing accuracy by laser powder bed fusion[J]. *Crystals*, 2022, 12(9): 1197.
- [9] Shrey Bhatnagar, Suvradip Mullick, Muvvala Gopinath, *et al.* A lumped parametric analytical model for predicting molten pool temperature and clad geometry in pre-placed powder laser cladding[J]. *Optik*, 2021, 247(12): 168015.

- 2019.
- [11] 吴立舟. Al_2O_3 陶瓷与奥氏体不锈钢真空钎焊接头抗裂性研究[D]. 江西: 南昌航空大学, 2017.
- Wu Lizhou. Research on crack resistance of vacuum brazed joint of Al_2O_3 ceramic and austenitic stainless steel[D]. Jiangxi: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [12] 陶拥, 王睿, 宋奎晶, 等. 基于 Ti 中间层的 B_4C 复合陶瓷扩散连接接头界面微观组织与力学性能 [J]. 焊接学报, 2022, 43(1): 29 – 35.
- Tao Yong, Wang Rui, Song Kuijing, *et al.* Interfacial microstructure and mechanical properties of B_4C matrix composite joints diffusion bonded with Ti interlayer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(1): 29 – 35.
- [13] Lee J G, Lee Min-Ku. Microstructure and mechanical behavior of a titanium-to-stainless steel dissimilar joint brazed with Ag-Cu alloy filler and an Ag interlayer[J]. Materials Characterization, 2017, 129(7): 98 – 103.
- [14] 欧婷, 张德库, 王康, 等. SiC 陶瓷与 316L 不锈钢真空活性钎焊 [J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(10): 846 – 851.
- Ou Ting, Zhang Deku, Wang Kang, *et al.* Vacuum brazing of SiC ceramic and 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38(10): 846 – 851.

第一作者: 杨晶, 硕士, 高级工程师; 主要从事连接工艺研究; Email: 85403075@qq.com.

通信作者: 薛鹏, 副教授; Email: xuepeng@njust.edu.cn.

(编辑: 刘启明)

[上接第 55 页]

- [10] 杨义成, 黄瑞生, 蒋宝, 等. 激光送粉增材制造光粉交互作用机制分析 [J]. 焊接学报, 2019, 40(11): 68 – 74.
- Yang Yicheng, Huang Ruisheng, Jiang Bao, *et al.* Analysis of the interaction mechanism of laser powder for additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(11): 68 – 74.
- [11] 朱明, 王博, 颜步云, 等. 激光熔覆过程预置粉末熔化行为的动态检测与分析 [J]. 中国激光, 2021, 48 (14): 135 – 144.
- Zhu Ming, Wang Bo, Yan Buyun, *et al.* Dynamic detection and analysis of fore put powder melting behavior in diode laser cladding process[J]. Chinese Journal of Lasers 2021, 48 (14): 135 – 144.
- [12] Zhu Ming, Yan Buyun, Li Xubin, *et al.* Process research on diode laser-TIG hybrid overlaying welding process[J]. Transactions on Intelligent Welding Manufacturing, 2019(1): 161 – 168.
- [13] 席明哲, 虞钢, 张永忠, 等. 同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用 [J]. 中国激光, 2005(4): 562 – 566.
- Xi Mingzhe, Yu Gang, Zhang Yongzhong, *et al.* Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005(4): 562 – 566.

第一作者: 朱明, 博士, 副研究员; 主要从事先进焊接方法自动化、激光增材与再制造领域的科研与教学工作; Email: zhumin@yeah.net.

(编辑: 刘启明)