

激光与光电子学进展

激光参数对旁轴送粉激光熔覆粉末熔化行为的影响

朱明^{1,2*}, 杨骞¹, 王博¹, 石珩^{1,2}, 樊丁^{1,2}¹兰州理工大学材料科学与工程学院省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050;²兰州理工大学有色金属合金及加工教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050

摘要 旁轴送粉激光熔覆时粉末到达熔池的热物状态对熔覆层成形精度和质量有着重要意义, 针对光粉作用时粉末的不同熔化行为, 搭建了旁轴送粉激光熔覆过程红外热成像采集系统和高速摄像过程采集系统, 研究了不同激光功率和离焦量下的光粉热交互作用, 建立了粉末熔化时出现的三个典型特征阶段并分析了不同激光功率和离焦量对粉末熔化特征阶段持续时间的影响, 最终得出粉末热物状态与特征阶段的关系。结果表明: 激光功率增大, 光粉作用空间中熔化的粉末数量增多, 粉末温度不均匀性减小; 离焦量增大, 液态粉末颗粒数量增大, 粉末温度不均匀性横向减小; 激光功率越小或离焦量越大, 固态粉末升温 and 熔化所需的时间增大, 粉末以固态进入熔池的几率变大。最后, 得到了不同激光参数下粉末到达熔池时的热物状态, 为实现粉末熔化行为的解析提供了试验依据。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 旁轴送粉; 光粉作用过程; 熔化行为

中图分类号 TG40

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212930

Effect of Laser Parameters on Melting Behavior of Powders in Off-Axis Laser Cladding Process

Zhu Ming^{1,2*}, Yang Qian¹, Wang Bo¹, Shi Yu^{1,2}, Fan Ding^{1,2}¹State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;²Lanzhou University of Technology, Key Laboratory of Non-Ferrous Metal Alloys and Processing of State Education Ministry, Lanzhou 730050, Gansu, China

Abstract The thermal state of powder arriving in a molten pool is crucial to the forming precision and quality of the cladding layer for off-axis laser cladding. Aiming at the different melting behavior of powder under the action of light powder, an infrared thermal imaging acquisition system and a high speed camera process acquisition system for the laser cladding process with off-axis powder feeding were built. The light powder thermal interaction under different laser powers and defocus amounts was studied. Three typical characteristic stages of powder melting were established. The influence of laser power and defocus amounts on the duration of the characteristic stage of powder melting was examined. Finally, the relationship between the thermal state of powder and characteristic stage was obtained. The findings depict that with the increase in laser power, the number of melted powder in the interaction space increases and the powder temperature uniformity decreases, and the number of liquid powder particles increases with an increase in defocus and the temperature inhomogeneity of powder decreases. The smaller the laser power or larger the defocusing amount, the time required for the temperature to rise and the solid powder's melting increases. The powder's probability of entering the molten pool in solid state increases. The thermal states of powder arriving at the molten pool under different laser parameters are obtained, providing an experimental basis for the powder melting behavior analysis.

Key words laser technique; laser cladding; off-axis powder feeding; action process of light powder; melting behavior

1 引言

激光熔覆再制造技术作为先进的表面改性、修复与

增材制造的技术手段, 在金属零部件表面强化、修复与直接制造成形领域有着无法替代的优势^[1-3]。旁轴送粉激光熔覆相比于预置和同轴送粉激光熔覆, 具有更高的

收稿日期: 2021-10-11; 修回日期: 2021-11-24; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2021-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51805234, 52065041)、甘肃省教育厅双一流科研重点项目(GSSYLXM-03)、甘肃省重点研发计划项目(20YF3WA017)、兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划

通信作者: *zhumings@yeah.net

粉末利用率和熔覆效率,广泛应用于表面改性及修复领域^[4-6]。由于不同工艺参数下光粉作用空间中的粉末颗粒会呈现出不同的热物状态^[7],而粉末到达熔池时的不同熔化行为对熔覆层最终成形和质量有重要影响,因此分析光粉作用时粉末的熔化行为显得尤为重要。

针对激光与粉末在空间中的热交互作用,国内外学者利用各种先进的手段进行了检测与分析。巴斯克大学 Taberero 等^[8]设计了一套粉末侧吹装置,使用红外热成像检测了激光功率和粉末粒径下粉末束流对激光能量的衰减。美国南卫理公会大学 Liu 等^[9]使用红外热成像和高速摄像采集了同轴送粉激光熔覆的传热传质过程,结果表明,粉末加热发生在粉流焦点和激光焦点的重合位置。俄罗斯激光物理研究所 Gulyaev 等^[10]使用高速摄像和光谱仪研究了粉末在激光束中的运动和热过程,研究表明,温度超过 3500 K 时的粉末颗粒运动轨迹会发生改变并且产生羽化现象。美国西北理工大学 Tan 等^[11]使用高速摄像采集了激光与粉末的交互作用,对图像进行处理后利用灰度值来表征粉末温度,并证明了该方法的可行性。哈尔滨焊接研究所杨义成等^[12]使用高速摄像采集了同轴送粉激光熔覆时的光粉作用区域,提取粉末亮度面积并用功率计测量了送粉速率和载气流量对剩余激光能量的影响。兰州理工大学朱明等^[13]使用高速摄像采集分析了预置粉末与

激光相互作用的熔化行为并建立了可以描述的热物理状态方程。综上所述,目前国内外学者对光粉作用的研究主要集中在对激光的衰减以及光粉作用空间温度场的分布等方面,而对光粉作用空间中粉末的熔化行为和粉末颗粒到达熔池时的热物状态等方面研究较少。

激光功率和离焦量作为激光热源下的典型工艺参数,其大小直接影响到作用在粉末上的激光能量密度及粉末温度的变化。为此,本文设计了旁轴送粉激光熔覆红外热成像采集系统和高速摄像过程采集系统,研究不同激光功率和离焦量下光粉作用空间中粉末颗粒温度的分布规律并根据粉末不同熔化行为划分粉末熔化的不同特征阶段,分析激光功率和离焦量对粉末熔化特征阶段持续时间的影响,得出不同激光参数下粉末颗粒到达熔池时的热物状态与各特征阶段的关系,为实现粉末熔化行为的解析提供试验依据。

2 试验材料及设备

试验选用尺寸为 120 mm×80 mm×6 mm 的 45 钢作为基体材料,熔覆材料选用自熔性和流动性良好的 Ni60A 粉末,粉末粒径为 80~160 μm,其化学成分如表 1 所示。试验前使用砂纸打磨基材表面去除铁锈,再用丙酮乙醇擦拭除去油污,熔覆粉末放入电阻炉中以 120 °C 烘干 1 h 去除水分。

表 1 Ni60A 粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni60A

Element	C	Cr	Si	W	Fe	B	Ni
Mass fraction / %	0.5-1.0	15-20	3.0-5.0	3.0	≤4.5	3.5-4.5	Bal.

试验采用的激光热源为直接输出型 FL-DLight-1500 半导体激光器,工作波长为(960±10) nm,最大输出功率为 1500 W,最小光斑尺寸为 1 mm×3 mm。选择重力送粉器和内径为 0.8 mm 的旁轴送粉喷嘴构成送粉系统。红外热成像采集系统选择德国 DIAS 短波高温红外热成像仪,其测量温度范围为 900~2500 °C,测量

频率为 60 Hz。熔覆过程采集系统使用 VEO 410L 型高速摄像机,拍摄帧率选用 10000 frame/s,曝光时间为 1 μs,配备的镜头为尼康 AF60mm f/2.8D 定焦微距镜头。拍摄时使用 HSX-F300 型氙灯增强受激光辐照和未辐照的粉末颗粒的视觉对比效果。旁轴送粉激光熔覆红外热成像采集系统和高速摄像采集系统如图 1 所示。

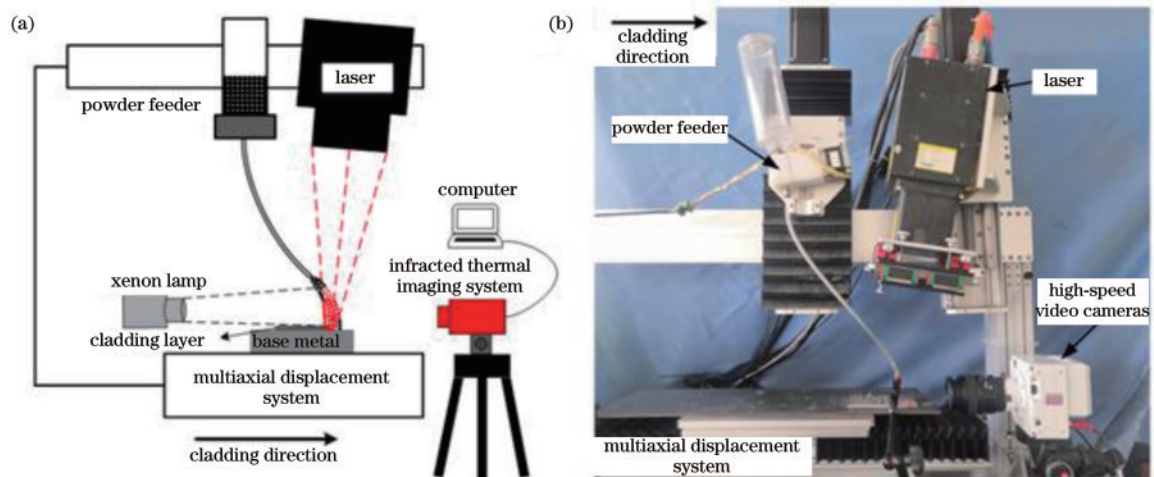


图 1 旁轴送粉激光熔覆试验系统图。(a) 红外热成像系统图;(b) 高速摄像系统图

Fig. 1 Experimental system diagram of off-axis laser cladding. (a) Infrared thermal imaging system; (b) high speed camera system

3 试验结果及分析

3.1 光粉作用的红外热成像采集

不同工艺参数下光粉作用空间中粉末温度分布以及到达熔池时的热物状态不同,为此,本文利用搭建的红外热成像系统研究了不同激光功率和离焦量下激光

与粉末之间的热交互作用。

3.1.1 激光功率

在送粉高度为 10 mm、送粉角度为 60°、激光离焦量为 0 mm、扫描速度为 4 mm/s、送粉量为 0.5 g/min 条件下,对不同激光功率下激光熔覆过程中的光粉作用进行红外热成像采集,结果如图 2 所示。

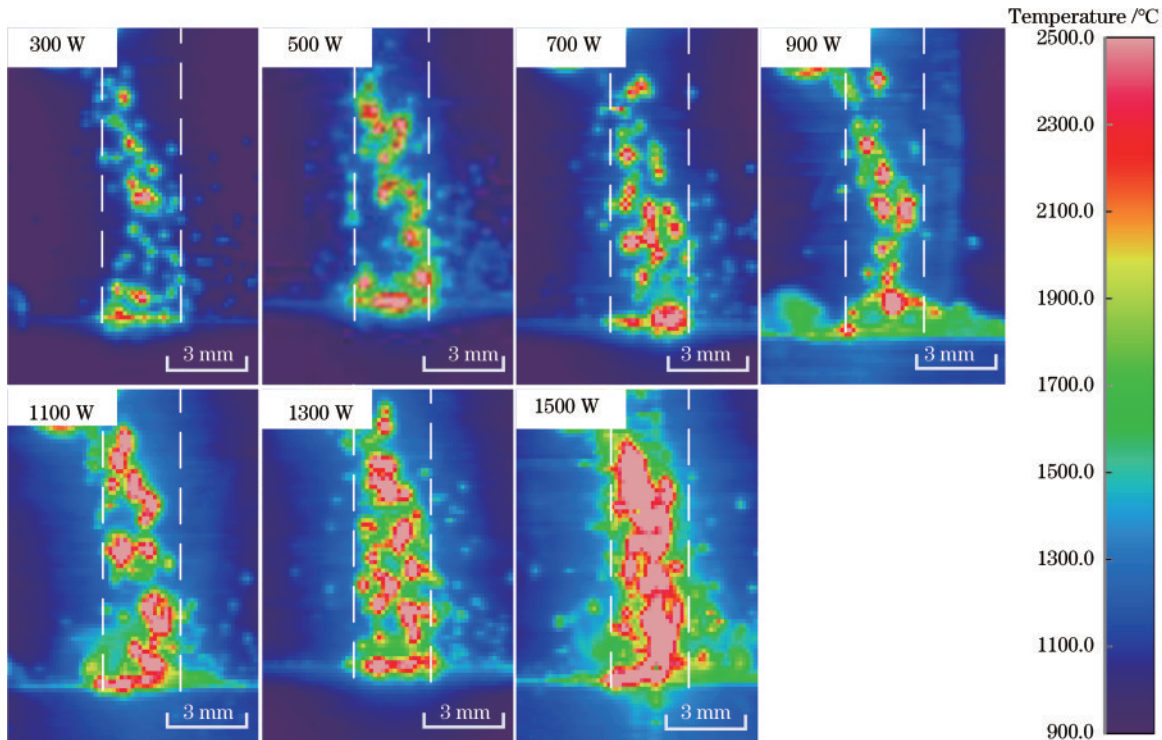


图 2 不同激光功率下红外热成像图

Fig. 2 Infrared thermal imaging images under different laser powers

图 2 白色虚线为光粉作用区域(下同),随着激光功率的增大,光粉作用空间中熔化的粉末颗粒数量增多,出现熔化粉末颗粒的位置越靠近送粉喷嘴,空中粉末温度不均匀性降低。分析原因是随着激光功率的增大,对于同一位置处的激光能量密度增大,在相同时间内粉末吸收的激光能量增大,粉末的温度增长率也就越快,因此粉末吸收激光能量后到达熔点所需的时间也就越少,更多的粉末颗粒在靠近送粉喷嘴的位置熔化,光粉作用空间中粉末颗粒温度不均匀性降低。

3.1.2 离焦量

在送粉高度为 10 mm、送粉角度为 60°、激光功率为 900 W、扫描速度为 4 mm/s、送粉量为 0.5 g/min 条件下,对不同离焦量下的激光熔覆过程中的光粉作用进行红外热成像采集,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,随着离焦量的增大,光粉作用空间中熔化的粉末颗粒数量横向增多,粉末颗粒到达熔点时的竖直位置相对稳定,其温度沿横向不均匀性降低。分析原因是离焦量的增大导致光粉作用区域的增大,更多的粉末颗粒进入激光中吸收热量后熔化落入熔池中,故熔化的粉末颗粒数目增多且温度不均匀性沿横向降低。同时,离焦量的增加使得同一位置的激光能

量密度略有减小,虽然相同时间内粉末颗粒升温速率略有降低,但由于粉末颗粒体积仅有微米级别,其仍可在极短时间内加热熔化,因此粉末到达熔点时的竖直距离相对稳定。

当激光功率较小或者离焦量较大时,由于熔池温度较低,故可以用红外热成像测出进入熔池时的粉末颗粒的温度或状态。但当激光功率较大或者离焦量较小时,由于在熔池表面金属蒸气遮挡的区域显著增大,金属蒸气笼罩在熔池表面,导致很难通过红外测量的方法分析粉末进入熔池的温度,在红外测量的温度区间内(900~2500 °C)已无法直观反映出粉末的温度。

3.2 光粉作用的高速摄像采集

旁轴送粉激光熔覆过程中光粉作用空间的粉末颗粒温度不均匀性和光粉作用过程密切相关。为此,利用高速摄像采集不同激光功率和离焦量下激光和粉末的作用过程并对其进行分析。

3.2.1 激光功率

在送粉高度为 10 mm、送粉角度为 60°、激光离焦量为 0 mm、扫描速度为 4 mm/s、送粉量为 0.5 g/min 条件下,对不同激光功率下的激光熔覆过程中的光粉作用进行高速摄像采集,结果如图 4 所示。

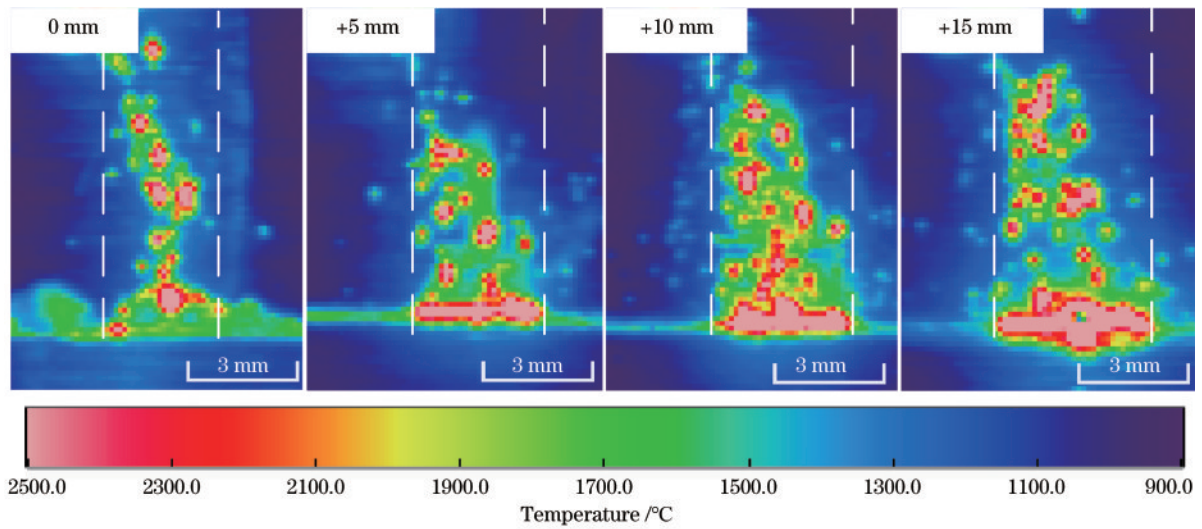


图 3 不同离焦量下红外热成像图

Fig. 3 Infrared thermal imaging images under different defocus amounts

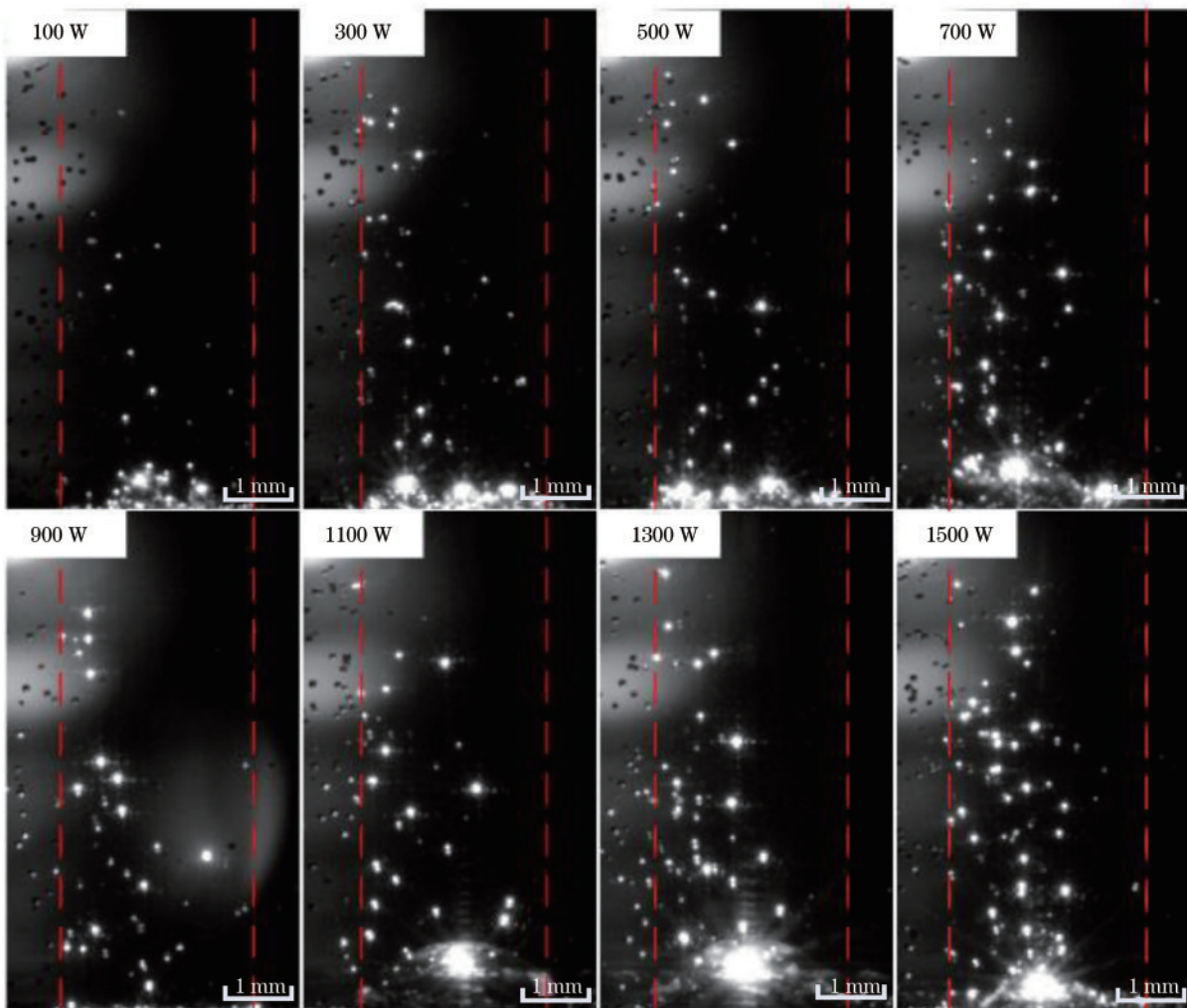


图 4 不同激光功率下光粉作用高速摄像图

Fig. 4 High speed photographs of powder action under different laser powers

图 4 红色虚线为光粉作用区域(下同),随着激光功率的增大,被激光点亮的粉末颗粒和高亮态的粉末颗粒的数量逐渐增多,被激光点亮的粉末颗粒的垂直

距离逐渐靠近送粉喷嘴。这是因为激光功率增大,相同位置的激光能量密度增大,单位时间内粉末颗粒吸收的激光能量增加,粉末颗粒会以更短的时间熔化并

升温,最后呈现出高亮态。因此,激光功率的增加会导致粉末颗粒温度不均匀性沿纵向减小,粉末颗粒以液态进入熔池的几率增加。

3.2.2 离焦量

在送粉高度为 10 mm、送粉角度为 60°、激光功率为 900 W、扫描速度为 4 mm/s、送粉量为 0.5 g/min 条件下,对不同离焦量下的激光熔覆过程中的光粉作用进行高速摄像过程采集,结果如图 5 所示。

如图 5 所示,随着离焦量的增大,被激光点亮的粉

末颗粒的数量增大,被点亮的粉末颗粒数目沿横向增多,而高亮态粉末颗粒的数目相对减少。原因是离焦量的增大使得光粉作用空间变大,更多的粉末颗粒进入光粉作用区域受激光辐照后发亮。但离焦量增大亦会导致同一位置的激光能量密度减小,相同时间内粉末吸收的激光能量减小,故粉末熔化后持续吸热变成高亮态的粉末颗粒数量也相对减少。因此,离焦量的增大导致激光熔覆过程中粉末颗粒以液态进入熔池的几率减少。

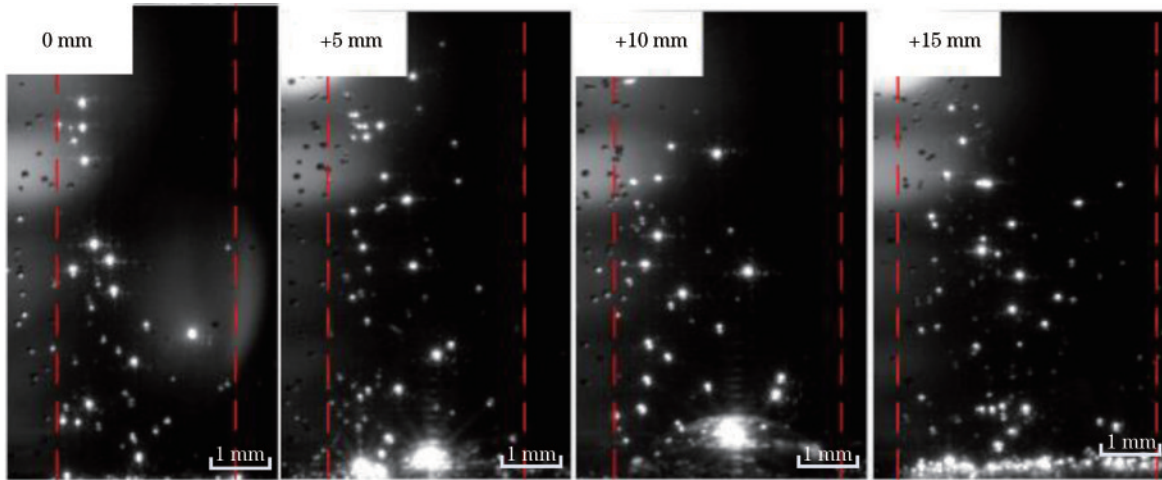


图 5 不同离焦量下光粉作用高速摄像图

Fig. 5 High speed photographs of powder action under different defocus amounts

3.3 粉末熔化行为采集与分析

旁轴送粉激光熔覆过程中粉末受激光辐照后会发生“固态→固液两相态→液态→液气两相态→气态→等离子体”的转变。固态粉末颗粒受激光辐照后温度逐渐升高,达到熔点后,继续吸收激光能量并对外释放熔化潜热,发生固态到液态的相转变,完成后其完全熔化为液态,液态粉末继续吸热温度持续升高,若吸收的热量能达到使其气化及产生等离子体的条件,则其最终会变为金属蒸气甚至等离子体^[14]。

3.3.1 粉末特征行为采集与分析

在旁轴送粉激光熔覆过程中,粉末受激光辐照时间较短,在合理工艺参数下粉末无法达到完全气态甚至转化为等离子体,因此可将上述粉末熔化过程简化为“固态→固液两相态→液态”的形式。利用搭建的旁轴送粉激光熔覆高速摄像采集系统对粉末熔化过程进行采集分析,可以发现,旁轴送粉激光熔覆时粉末熔化过程普遍存在以下三个特征阶段,如图 6 所示。

特征阶段一:固态粉末加热阶段,粉末颗粒进入激光从 0 ms 运动到 6.2 ms,固态粉末颗粒受激光辐照向白亮液态转变。典型特征为出现灰度值 0~160、像素值 0~2 pixel 的粉末颗粒。

特征阶段二:粉末由固态向液态转变阶段,粉末颗粒在光粉作用空间中从 6.3 ms 运动到 8.9 ms,受激光辐照后自上而下发生熔化,由上表面白亮态的粉末颗

粒转变为完全熔化的高亮态的液态颗粒。典型特征为出现灰度值 160~255、像素值 2~5 pixel 的粉末颗粒。

特征阶段三:液态粉末持续升温阶段,粉末颗粒从 9.0 ms 运动到 23.6 ms,完全熔化的粉末颗粒继续受激光辐照,体积持续增大,甚至产生羽化现象,最后以高温液态进入熔池。典型特征为出现灰度值为 255、像素值大于 5 pixel 的粉末颗粒。

不同工艺参数下粉末受激光辐照时各特征阶段的持续时间不同,故粉末颗粒进入熔池时的热物状态也不同。因此,利用粉末熔化过程中的各特征阶段持续时间对粉末熔化过程和热物状态进行表征。

3.3.2 激光功率对粉末熔化行为的影响

在送粉高度为 6 mm、粉末入射角度为 60°、激光离焦量为 0 mm、粉末颗粒初速度为 210 mm/s 条件下,研究不同激光功率对各特征阶段的影响规律,典型激光功率对粉末熔化行为影响的高速摄像如图 7 所示,其结果如图 8 所示。

由图 8 可知,对于任一激光功率,特征阶段二的持续时间始终小于特征阶段一和特征阶段三的持续时间,这表明粉末颗粒从固态向液态转变释放熔化潜热的时间是非常短暂的。随着激光功率的增加,特征阶段一和特征阶段二的持续时间逐渐减小,而特征阶段三的持续时间逐渐增大。这表明随着激光功率的增大,粉末颗粒受激光辐照后由固态转变为高亮液态所

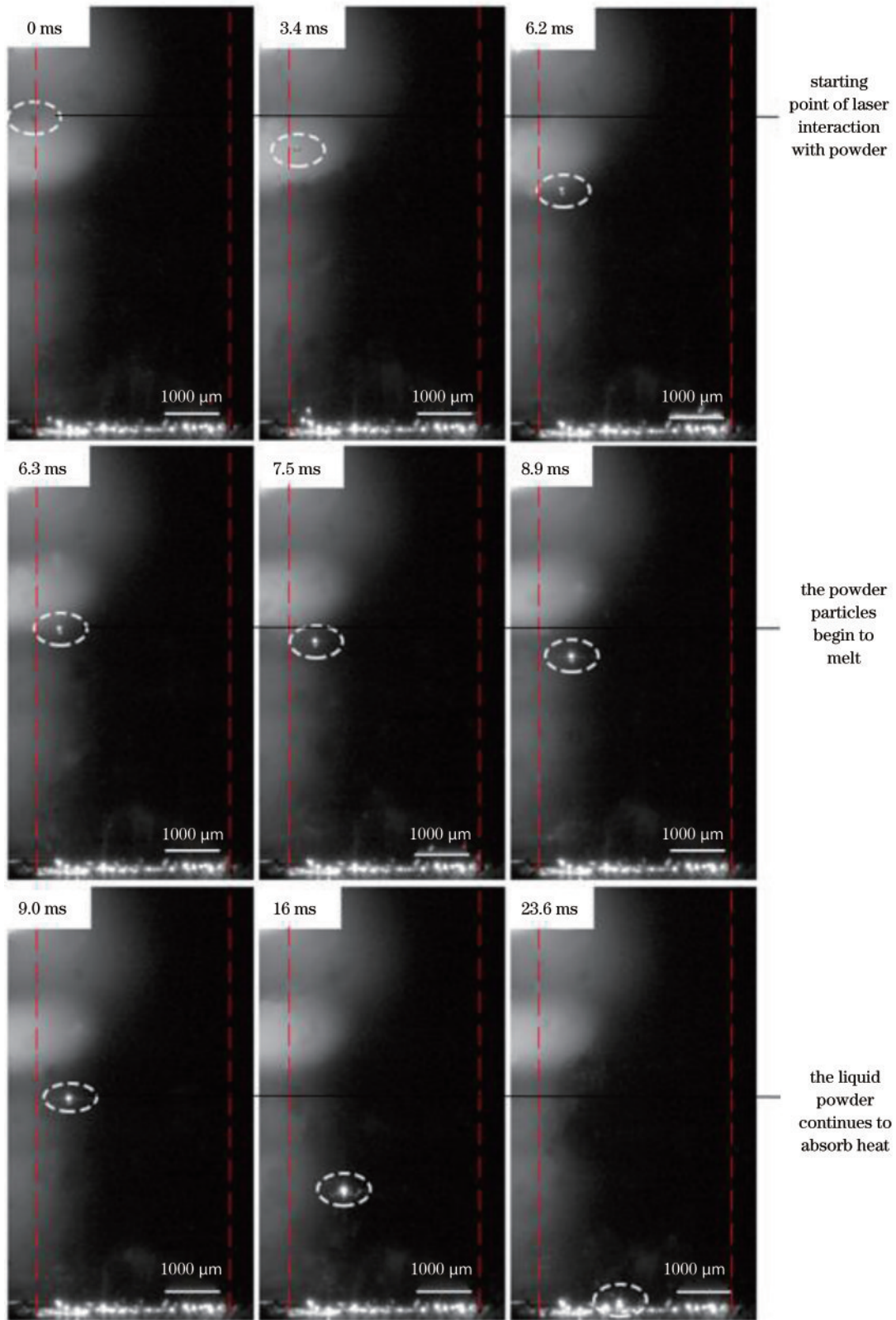


图 6 粉末熔化的特征阶段
Fig. 6 Characteristic stages of powder melting

需时间变短, 熔化后受激光继续辐照升温的时间变长。因此, 对于同一运动路径下的粉末颗粒, 激光功率越大其到达熔池时的温度也就越高, 这也是随着激光功率增大粉末颗粒温度不均匀性降低的原因。

3.3.3 离焦量对粉末熔化行为的影响

在送粉高度为 6 mm、粉末入射角度为 60°、激光功率为 900 W、粉末颗粒初速度为 210 mm/s 条件下, 研究了不同离焦量对各特征阶段的影响规律, 典型离焦

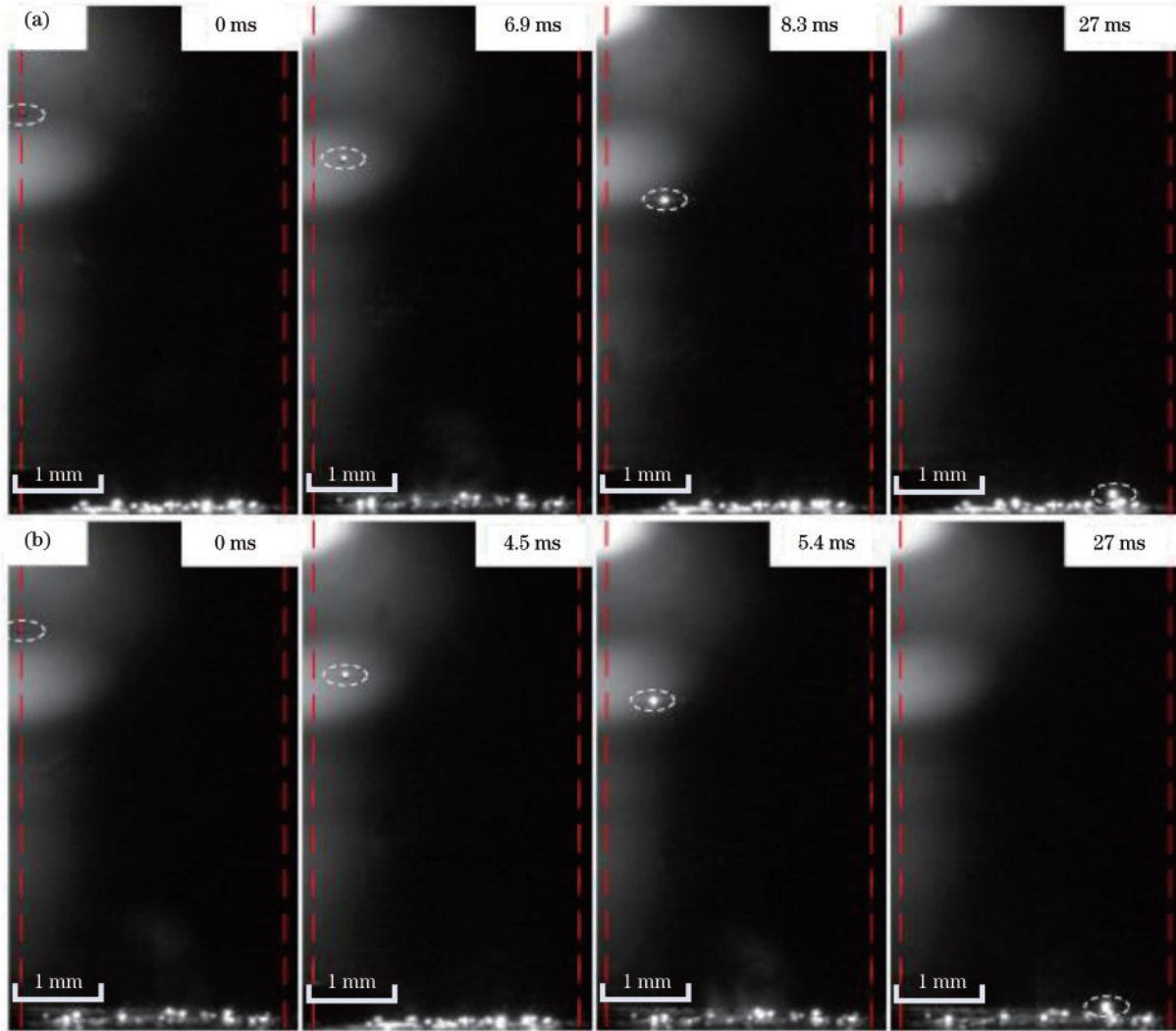


图 7 不同激光功率下的光粉作用过程。(a) 700 W; (b) 1300 W

Fig. 7 Action process of light powder under different laser powers. (a) 700 W; (b) 1300 W

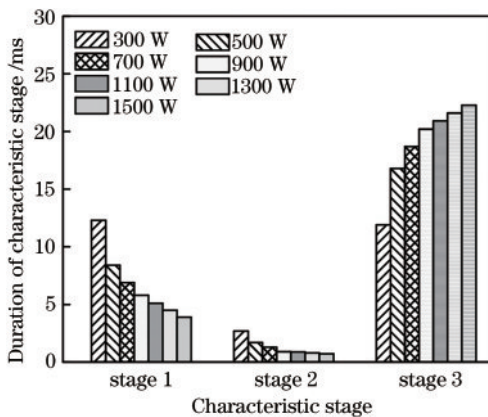


图 8 激光功率对特征阶段持续时间的影响

Fig. 8 Influence of laser power on the duration of characteristic stages

量对粉末熔化行为影响的高速摄像如图 9 所示, 离焦量对各特征阶段持续时间的影响规律如图 10 所示。

由图 10 可知, 不同离焦量下也存在特征阶段二相比特征阶段一和特征阶段三的持续时间最短的规律。

随着离焦量的增加, 特征阶段一和特征阶段二的持续时间增加, 而特征阶段三的持续时间减小。分析原因是离焦量的增加使得激光能量密度的减小, 相同运动轨迹下的粉末由固态转变为液态需要激光辐照的时间变长, 粉末完全熔化后与激光的作用时间变短。因此, 增大离焦量会导致粉末颗粒温度增长变慢, 相同运动轨迹下的粉末颗粒在同一位置的温度降低, 粉末进入熔池时的温度也降低。

对于粉末束流而言, 由于粉末颗粒入射角度的不同, 一部分粉末颗粒会在受激光辐照时间段落在熔池前端, 少部分粉末颗粒由于入射角度过大在进入激光后又穿出激光束形成固态飞溅, 故落入熔池时粉末颗粒的温度会小于上述粉末的温度。因此, 想让大部分粉末颗粒以液态形式进入熔池, 应当缩短特征阶段一和特征阶段二的持续时间并且增加特征阶段三的持续时间, 宏观上表现为在保证粉末合金元素不被烧损的情况下增大激光功率或减小离焦量。

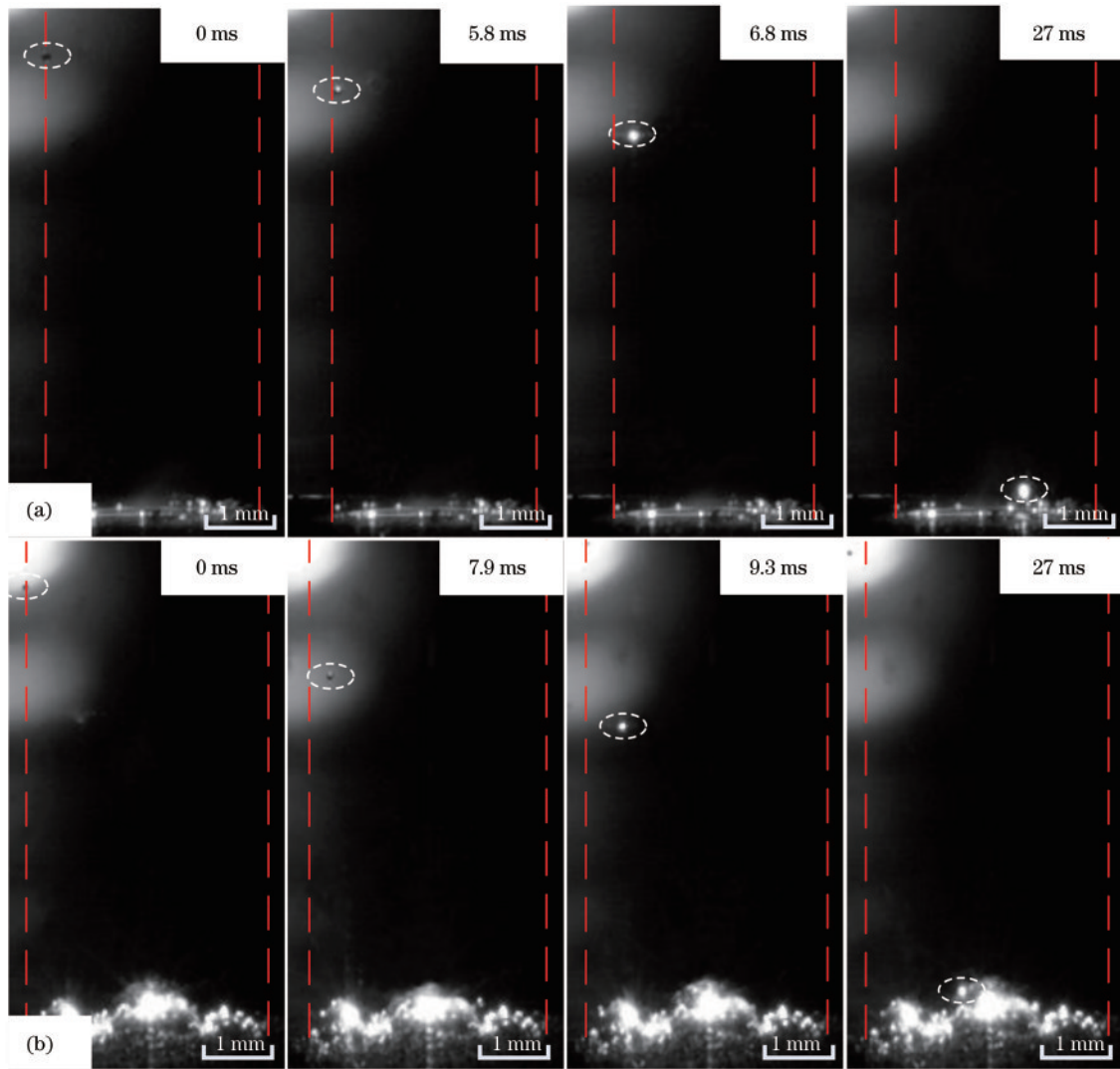


图 9 不同离焦量下的光粉作用过程。(a) 0 mm; (b) +15 mm

Fig. 9 Action process of light powder under different defocus amounts. (a) 0 mm; (b) +15 mm

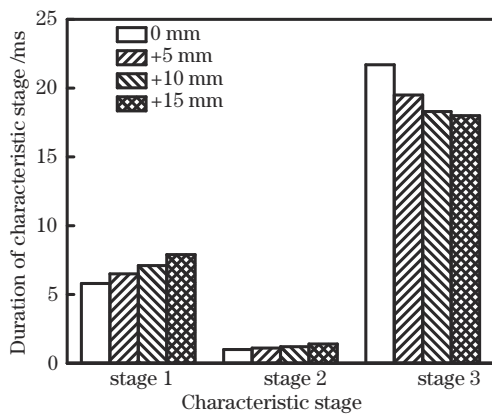


图 10 离焦量对特征阶段持续时间的影响

Fig. 10 Influence of defocus amount on duration of characteristic stages

4 结 论

本文试验结果表明:激光功率越大,光粉作用空间中熔化的粉末数量越多,粉末温度不均匀性减小,粉末

以液态进入熔池的几率增大;离焦量越小,粉末以液态进入熔池的数量越少,高温固态的粉末颗粒数量越多,粉末颗粒温度不均匀性横向增大。

半导体旁轴送粉激光熔覆粉末熔化过程存在三个典型的特征阶段,当激光功率增大或者离焦量减小时,特征阶段一和特征阶段二的持续时间减少,粉末到达熔池时的温度会升高。而特征阶段三的持续时间越长,粉末到达熔池时的温度越高。

参 考 文 献

- [1] 张可召,何超威,林雨杨,等.激光熔覆修复 5A06 铝合金组织及力学性能[J].激光与光电子学进展,2020,57(23):231409.
Zhang K Z, He C W, Lin Y Y, et al. Microstructures and mechanical properties of laser cladding repaired 5A06 alloys[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 231409.
- [2] 张津超,石世宏,龚燕琪,等.激光熔覆技术研究进展[J].表面技术,2020,49(10):1-11.

- Zhang J C, Shi S H, Gong Y Q, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [3] 白杨, 王振华, 左娟娟, 等. 激光熔覆制备铁基复合涂层及其耐热耐蚀性能[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002001.
- Bai Y, Wang Z H, Zuo J J, et al. Fe-based composite coating prepared by laser cladding and its heat and corrosion resistance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002001.
- [4] Liu W, Dong S, Xu B, et al. Review of synchronous powder feeding technology for laser cladding[J]. Surface Technology, 2007, 8(2): 1227-1230.
- [5] 张瑞珠, 李林杰, 唐明奇, 等. 激光熔覆技术的研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2017, 38(3): 7-11.
- Zhang R Z, Li L J, Tang M Q, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2017, 38(3): 7-11.
- [6] Huang Y L, Liu J, Ma N H, et al. Three-dimensional analytical model on laser-powder interaction during laser cladding[J]. Journal of Laser Applications, 2006, 18(1): 42-46.
- [7] Qi H, Mazumder J, Ki H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(2): 024903.
- [8] Taberero I, Lamikiz A, Martínez S, et al. Modelling of energy attenuation due to powder flow-laser beam interaction during laser cladding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(2): 516-522.
- [9] Liu S, Farahmand P, Kovacevic R. Optical monitoring of high power direct diode laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 363-376.
- [10] Gulyaev I P, Kovalev O B, Pinaev P A, et al. Optical diagnostics of radiation interaction with the powder stream laterally transported during laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105877.
- [11] Tan H, Fang Y B, Zhong C L, et al. Investigation of heating behavior of laser beam on powder stream in directed energy deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 397: 126061.
- [12] 杨义成, 黄瑞生, 方乃文, 等. 光粉交互对同轴送粉增材制造能量传输的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(6): 19-23, 98.
- Yang Y C, Huang R S, Fang N W, et al. Effect of the interaction between laser beam and powder particles on energy transmission in coaxial powder feeding additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(6): 19-23, 98.
- [13] 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): 1402013.
- Zhu M, Wang B, Yan B Y, 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): 1402013.
- [14] 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, 32(4): 562-566.
- Xi M Z, Yu G, Zhang Y Z, et al. Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 562-566.