

# 激光送粉增材制造光粉交互作用机制分析

杨义成<sup>1,2</sup>, 黄瑞生<sup>1</sup>, 孙 谦<sup>1</sup>, 蒋 宝<sup>1</sup>, 王子然<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028; 2. 机械科学研究院, 北京 100044)

**摘要:** 激光同轴送粉增材制造过程中, 粉末粒子和激光束发生能量交互作用的剧烈程度决定了粉末粒子进入熔池前存在的状态。借助背影增效瞬态影像捕捉方法及图像信息处理技术, 从宏观和微观角度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, 综合表征工艺参数对该过程的影响规律。结果表明, 通过主要工艺参数的合理匹配可以很好的实现对光粉相互作用过程的调控。激光能量密度越高, 光粉作用时间越长, 粉末粒子接受激光辐照的程度就越激烈, 以熔融态进入熔池的可能性就越大。

**关键词:** 增材制造; 光粉作用; 图像处理

中图分类号: TG 406

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400290

## 0 序 言

激光同轴送粉增材制造技术作为一种变革性的制造方法已经在一些关键、复杂零部件的自由制造成形中体现其独特优势, 是一种集设计、制造和材料制备于一体的制造方法<sup>[1-3]</sup>。在该方法实施过程中, 辐射在粉末颗粒上的激光能量一部分被粉末颗粒吸收用于加热粉末, 一部分能量被粉末颗粒散射掉, 其余激光能量用于加热熔化基体<sup>[4]</sup>。Qi 等人<sup>[5]</sup>建立了同轴送粉激光熔覆三维瞬态物理模型分析光粉作用过程, 研究表明距激光中心位置 0.2 mm 范围内的粉末已经达到熔点状态; 其它参数均不变的情况下, 只改变粉末飞行速度, 发现当粉末颗粒飞行速度小于 1.5 m/s, 距离光斑中心 0.13 mm 的位置处粉末在达到熔池前已经开始汽化。Wen 等人<sup>[6]</sup>建立了粉末在激光中飞行的动态热过程模型, 汇聚区域粉末束流横截面中心区域最高, 汇聚区域以下不同截面处, 粉末的温度分布成中间低、两侧高的双峰形状, 并且随着距离的增加, 趋势越来越明显。Huang 等人<sup>[7]</sup>研究侧向送粉激光熔覆条件下的送粉情况, 计算了粉末流对激光能量的衰减情况以及在飞行过程中粉末颗粒的升温情况, 分析了不同送粉率、送粉角度对粉末颗粒温度以及到达基材的激光能量分布的影响。Yang 等人<sup>[8]</sup>建立了 S, P 偏振菲涅

耳吸收和多重反射的三维粉末床分析模型, 研究分析了选择性激光熔化过程中激光和粉末颗粒的能量耦合机制, 其研究结果表明粉末床对激光的吸收效率要明显高于致密平板材料。从中心区到边缘位置, 粉末激光的辐照强度逐渐减弱。目前, 对于激光和粉末颗粒交互作用的分析主要以理论分析为主, 虽然对实际情况的解释具有一定的指导意义, 但光粉交互作用过程极为复杂, 理论分析模型的建立容易忽视很多实际情况, 导致计算结果和实际情况不符。此外, 不同工况环境对激光同轴送粉熔覆或增材制造技术工艺要求各不相同, 针对实际需求, 设计不同工艺, 解决制造过程中成形过程不稳定, 制造精度低, 变形开裂或内部质量不易控制等关键技术问题, 提出有依据的改进措施具有重要的工程意义<sup>[9]</sup>。激光和粉末颗粒交互影响作为激光同轴送粉增材制造过程中的关键中间环节, 决定了粉末颗粒进入熔池前的物化状态, 影响到增材制造过程的稳定性和制备零件的质量。因此, 有必要系统分析不同工艺参数对该过程的影响规律。同时, 也可以进一步为理论模型的建立, 工艺参数的优化和改进提供参考, 具有重要的理论价值和指导意义。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料及设备

试验材料采用气雾法制备的 316L 不锈钢粉末, 粒度介于 75~100  $\mu\text{m}$  之间。送粉装置为德国

GTV 公司生产的双料斗载气式送粉器, 型号为 MF-PF2/2, 送粉熔覆头为德国 Fraunhofer 公司生产的同轴环形喷嘴, 型号为 COAX-40-S/F. 为了在激光辐照下获得清晰的光粉作用效果, 采用背影增效的方法进行拍摄, 即背景光源和高速摄像系统分别置于激光粉末作用区两侧, 通过背景光源的逆光投射作用, 可有效增强受激光辐照颗粒与未辐照颗粒的视觉对比效果. 同时, 利用高速摄像机获取光粉作用过程的瞬态图像, 拍摄帧数设定为 10 000 fps, 曝光时间为 100 ns, 拍摄过程如图 1 所示.

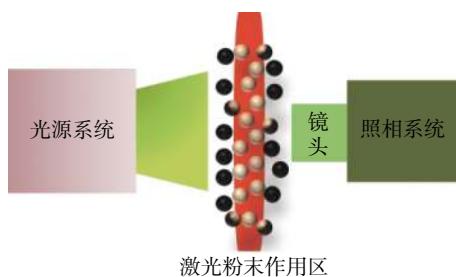


图 1 背影增效瞬态图像获取示意图

Fig. 1 Schematic of the transient state image captured by shadowgraphy enhancement

## 1.2 试验分析方法

试验初步分析发现激光辐照程度不同, 粉末颗粒存在的状态可以分为三种, 如图 2 区域 A 所示. 无激光辐照粉末粒子 ( $P_A$ ) 呈现原始状态 (黑色固体); 受到较弱激光辐照的粉末粒子 ( $P_C$ ) 上表面呈现出高亮状态; 受到强烈激光辐照的粉末粒子 ( $P_B$ ) 整个粉末粒子均被高亮状态覆盖, 并且在粉末粒子的前端出现一个高亮状态的“尾巴”.

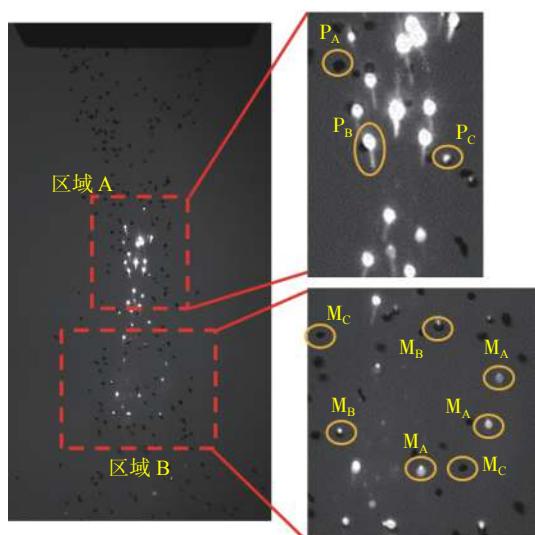


图 2 激光辐照下粉末粒子形态

Fig. 2 Different status of powder particles irradiated by laser

对激光辐照程度不同的粉末粒子进行追踪分析发现, 粒子接受激光辐照的程度不同, 存在的状态也各不相同, 如图 2 的区域 B 所示. 强烈激光辐照下的部分粒子, 由不规则的黑色固体转变成规则的发亮球体, 说明粉末粒子在此强烈的光粉交互作用过程中至少表面发生了部分熔化, 如标记为  $M_A$  的粒子所示; 较弱激光辐照下的粉末粒子经过激光作用区后表面存在的状态变化不大, 说明粉末粒子以高温固态形式存在的可能性较大, 如标记为  $M_B$  的粒子所示; 未受到激光辐照的粒子则保持原有状态, 如标记为  $M_C$  的粒子所示.

通过以上的分析可知, 对单个粉末颗粒而言, 其存在的状态和激光辐照程度密切相关, 而激光辐照程度和粉末粒子发亮区的面积有直接关系, 亮区越大说明粉末粒子接受激光辐照的程度越强, 该粒子以熔融态存在的机率就越大. 鉴于此, 为了有效的评价分析不同工况环境对粉末束流内光粉交互作用区粒子存在状态的影响规律, 用粉末颗粒亮区面积均值的大小  $f(s, m)$  表征该工况条件下激光辐照粒子的程度, 其计算过程为

$$\phi(s) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m(i)} s(i, j)}{n} \quad (1)$$

$$\psi(m) = \frac{\sum_{i=1}^n m(i)}{n} \quad (2)$$

$$f(s, m) = \frac{\phi(s)}{\psi(m)} \quad (3)$$

式中:  $n$  表示进行统计的照片总数;  $m(i)$  表示第  $i$  张照片处于高亮状态的粒子个数;  $s(i, j)$  表示的是第  $i$  张照片内第  $j$  个粒子亮区面积;  $\phi(s)$  表示  $n$  张照片统计分析处理后每张照片亮区总面积的均值;  $\psi(m)$  表示  $n$  张照片每张照片内处理高亮状态粉末颗粒的数量;  $f(s, m)$  为加和平均处理后每张照片内单个高亮状态粉末颗粒亮区的面积, 该值越大则说明该工艺参数下粉末束流和激光发生作用的程度越激烈, 粉末束流内部的粒子处于熔融状态的可能性就越大. 反之, 则说明光粉交互作用程度越弱.

图 3 为光粉相互作用过程拍摄的原始图像以及图像处理后的效果. 其中, 图 3a 为高速摄像拍摄激光和粉末粒子相互作用过程, 然后利用 MATLAB 软件对图像进行预处理, 如图 3b 所示. 通过反复试验确定合适的阈值, 依次逐张提取处于高亮状态粉

末粒子的数量和该区域粉末束流处于高亮状态的面积,进而分析不同工艺参数对光粉交互过程的影响规律,图像最终处理效果如图 3c 所示。值得说明的一点是,在数据提取过程中极个别被激光辐照的

粉末颗粒会由于空间遮挡造成重叠在一起的假象,图像处理后,在二维平面上形成一个连接在一起的亮区,此时该亮区记为一个高亮状态的粉末颗粒进行处理。

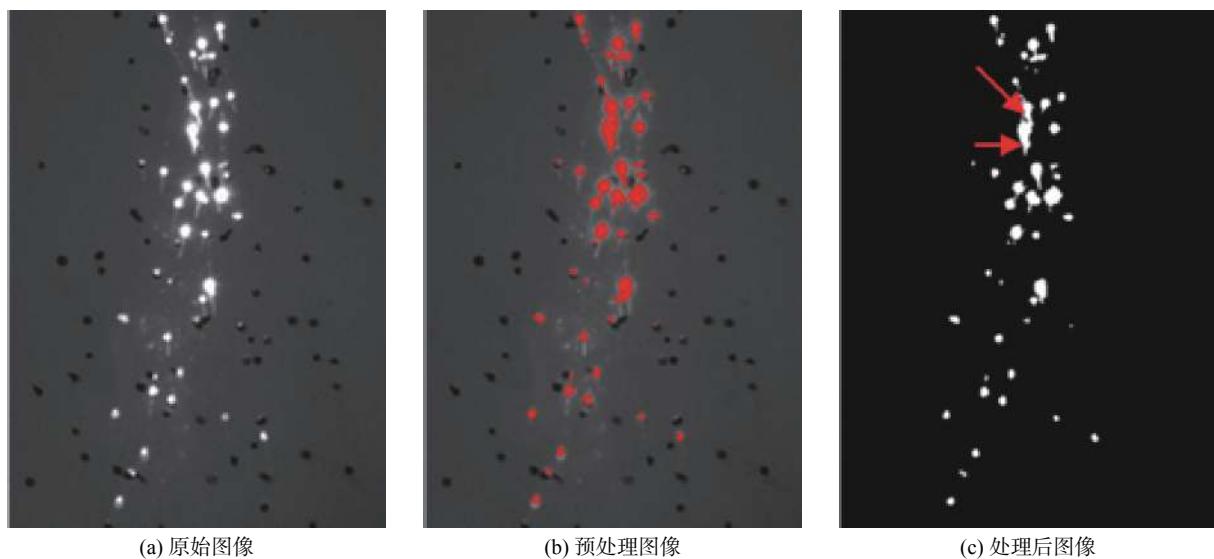


图 3 光粉作用图像处理

Fig. 3 Image processing of the interaction between laser beam and powder particles

## 2 试验结果与分析

### 2.1 功率对光粉作用过程的影响

激光功率从 0.5 kW 增加到 2.0 kW 时,粉末束流亮区面积和处于高亮状态粉末颗粒数量的变化规律如图 4 和图 5 所示。随着激光功率增加,粉末束流高亮区面积和处于高亮状态粉末颗粒的数量均呈增加趋势。

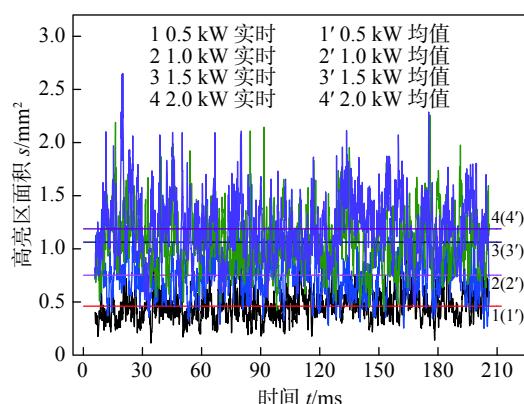


图 4 激光功率对粉末颗粒亮区面积的影响

Fig. 4 Effect of laser power on the bright area of powder particles

激光束能量分布呈典型高斯分布特征,随着激光功率增加,光束传播方向任意横截面所有区域的

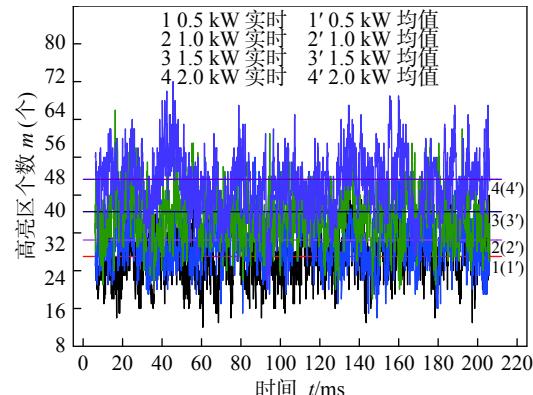


图 5 激光功率对发亮粉末颗粒数量的影响

Fig. 5 Effect of laser power on the number of light powder particles

能量密度均随之提高,会对光粉作用过程产生如下影响。首先,能量密度增加会增强激光对粉末颗粒的辐照程度,进而提高单个粉末颗粒处于高亮状态的面积;其次,激光束传播方向边缘位置处能量密度的增加可以使更多的粉末颗粒物化状态发生改变,呈现出高亮状态。激光功率增加光粉作用后粉末颗粒亮区均值也随之不断提高,其变化规律如图 6 所示。这说明激光功率的增加会显著提高激光辐照粉末颗粒的程度,使更多的粉末颗粒以熔化状态进入熔池。

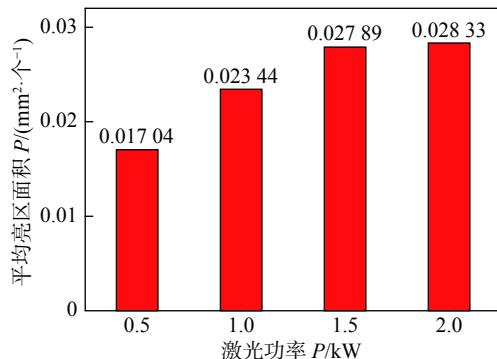


图 6 激光功率对亮区单个粒子平均面积的影响

Fig. 6 Effect of the laser power on the average light area of single particle

## 2.2 载气流量对光粉作用过程的影响

输送粉末颗粒的气体称之为载气, 该气流是输送粉末颗粒到达激光作用区的动力源。载气流量从 2 L/min 提高到 10 L/min 时, 粉末束流内光粉作用区处于高亮状态的面积和粉末颗粒数量均呈下降趋势, 其实时变化规律和均值分别如图 7, 图 8 所示。

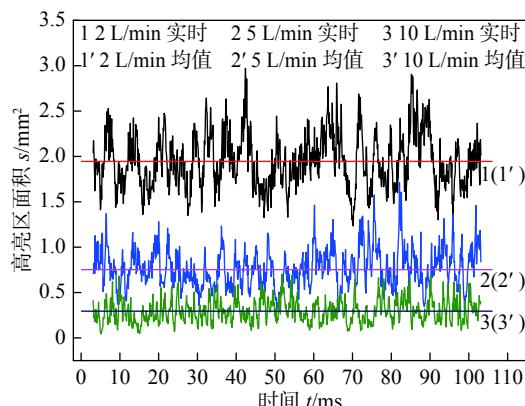


图 7 载气流量对粉末颗粒亮区面积的影响

Fig. 7 Effect of carrier gas flow rate on the bright area of powder particles

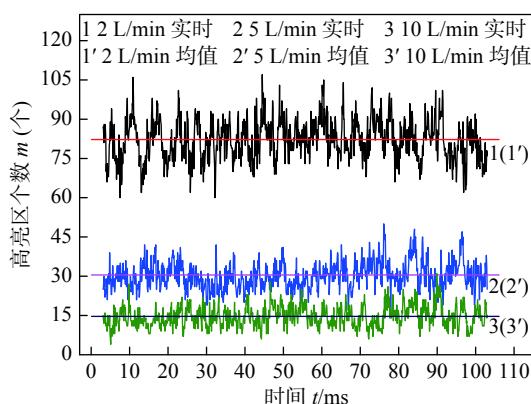


图 8 载气流量对发亮粉末颗粒数量的影响

Fig. 8 Effect of carrier gas flow rate on the number of light powder particles

载气流量增加会使粉末颗粒飞行速度提高, 送

粉速率不变时, 任意时刻粉末束流空间浓度会逐渐降, 光粉作用区处于高亮状态粉末颗粒的数量会随之下降。此外, 粉末颗粒飞行速度加快, 会导致激光和粉末颗粒相互作用时间降低, 使粉末颗粒接受激光辐照的程度减弱。但是, 激光焦点位置位于粉末束流焦点位置的正上方, 载气流量增加会使粉末束流焦点位置逐渐上移, 进而提升了光粉作用区的高度, 而该区域激光能量密度相对较大, 会在不同程度上补偿由于光粉作用时间变短造成的光粉作用强度减弱的趋势。

载气流量 2 L/min 提高到 5 L/min 时该补偿作用十分明显, 单个粉末颗粒亮区均值呈增加趋势, 但是随着载气流量从 5 L/min 提高到 10 L/min 时, 粉末颗粒速度带来的影响会更加显著, 即使激光功率密度显著提高, 也不足以弥补由于粉末颗粒飞行速度加快造成的光粉作用强度的降低, 这时会使单个粉末颗粒亮区均值显著降低, 如图 9 所示。

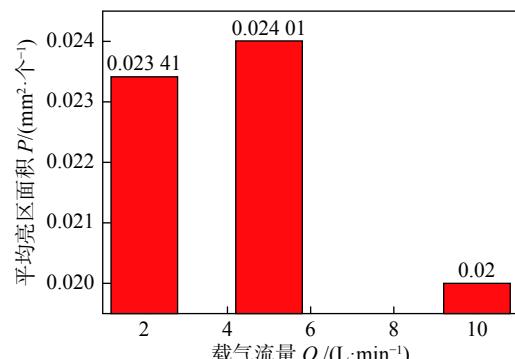


图 9 载气流量对亮区单个粒子平均面积的影响

Fig. 9 Effect of the carrier gas flow rate on the average light area of single particle

## 2.3 保护气流量对光粉作用过程的影响

同轴保护气体的主要作用是保护被激光辐照的粉末颗粒和液态熔池不被活性气体污染。同轴保护气流量增大, 粉末束流高亮区面积和处于高亮状态粉末颗粒的数量均呈逐渐增加趋势, 其实时变化规律和均值分别如图 10, 图 11 所示。

同轴保护气流量变化对粉末颗粒平均亮区面积的影响如图 12 所示。随着气体流量增加, 粉末颗粒亮区均值先增加后减小, 说明从统计意义上讲, 气流量增加到一定程度后会使更多的粉末颗粒处于激光辐照下, 但是接受激光辐照的程度开始减弱。

同轴保护气流量大小和载气流量大小对光粉作用过程的影响规律恰好相反。这主要是因为随同

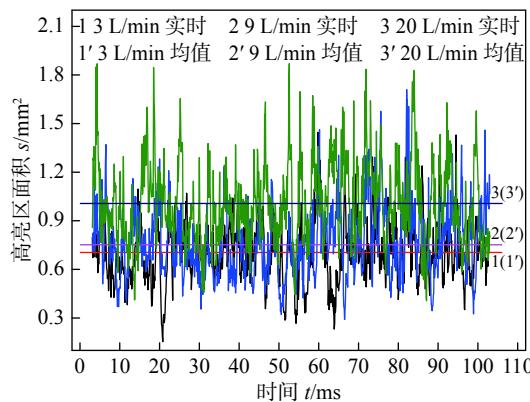


图 10 保护气流量对粉末颗粒亮区面积的影响

Fig. 10 Effect of coaxial protect gas flow rate on the bright area of powder particles

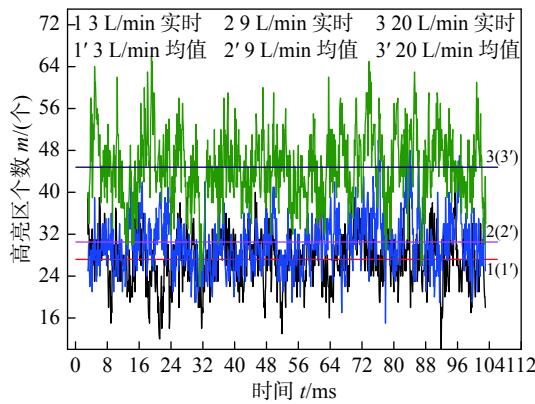


图 11 保护气流量对发亮粉末颗粒数量的影响

Fig. 11 Effect of coaxial protect gas flow rate on the number of light powder particles

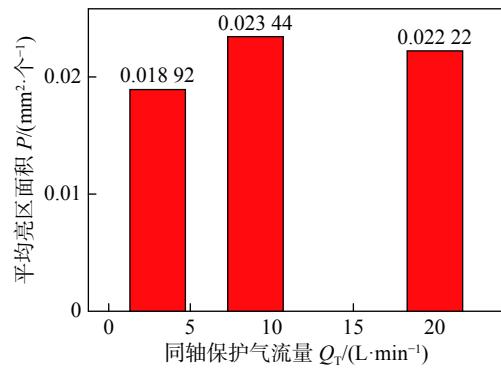


图 12 同轴保护气对亮区单个粒子平均面积的影响

Fig. 12 Effect of coaxial protect gas flow rate on the average light area of single particle

轴保护气流量增加,一方面粉末颗粒飞行方向和激光束轴线的夹角减小,逐渐趋于平行,有效的增加了激光和粉末相互作用时间;同时同轴保护气流量增加粉末束流汇聚焦点位置逐渐远离喷嘴末端<sup>[10-11]</sup>,更多的粉末颗粒在较大的光斑位置处和激光发生相互作用。因此,同轴保护气流量增加,不仅会增加

粉末束流高亮区的面积,同时也会使处于高亮状态的粉末颗粒数量增加。

#### 2.4 送粉速率对光粉作用过程的影响

其它工艺参数保持不变,送粉速率提高粉末粒子空间浓度会随之增大。送粉速率从 8.2 g/min 提高到 26.4 g/min 时,粉末束流高亮区面积和处于高亮状态粉末颗粒数量均呈逐渐增加趋势,其实时和均值的变化规律如图 13,图 14 所示。随着送粉速率的不断增加,粉末束流内处于高亮状态的粉末粒子数量和被激光辐照的高亮区面积均呈不断增加趋势。

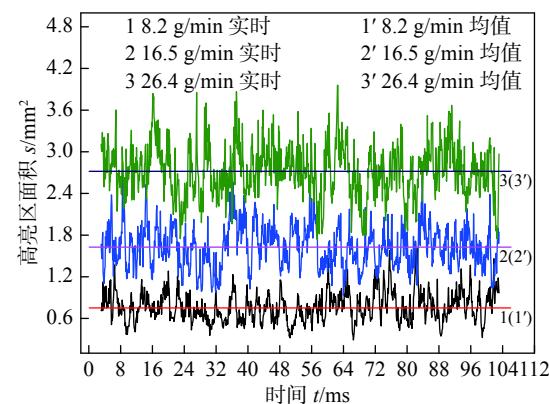


图 13 送粉率对粉末颗粒亮区面积的影响

Fig. 13 Effect of powder feed rate on the bright area of powder particles

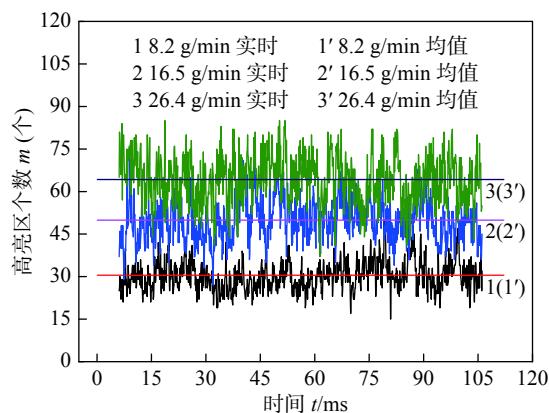


图 14 送粉率对发亮粉末颗粒数量的影响

Fig. 14 Effect of powder feed rate on the number of light powder particles

通过以往的分析可知,粉末束流在焦点附近区域的浓度分布呈典型的高斯分布特征。这意味着随着送粉速率的提高,光粉作用区中轴线附近的粉末空间浓度提高的程度会更加显著,增加的粉末颗粒大多进入到该区域。而该区域也是激光束能量密度最高的区域,因此随着送粉速率逐渐提升,光粉交

互作用后粉末粒子亮区均值的变化规律也会呈逐渐增加趋势, 不同送粉率对应的粉末颗粒亮区均值的变化规律如图 15 所示。

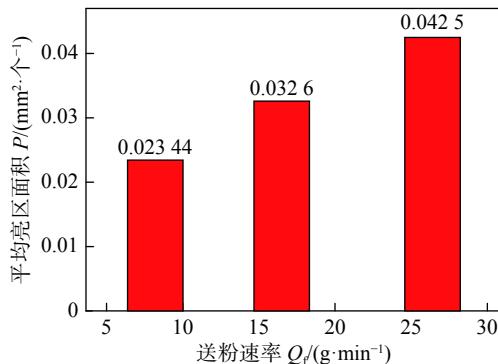


图 15 送粉率对亮区单个粒子平均面积的影响  
Fig. 15 Effect of the powder feed rate on the average light area of single particle

## 2.5 离焦量对光粉作用过程的影响

经光学系统汇聚的激光束和经锥形喷嘴约束的粉末束流在空间上均可以简单抽象成一个先汇聚再发散的锥形柱状结构。随着激光焦点位置(离焦量)由粉末束流焦点位置上方 5 mm 提高到 20 mm, 激光束焦点越来越靠近喷嘴, 直至进入喷嘴内部, 此时粉末束流内高亮区的面积和处于高亮状态粉末颗粒数量的变化规律分别如图 16, 图 17 所示。

离焦量增加会使光粉作用区任意横截面的面积逐渐增大, 因此处于高亮状态的粉末颗粒的数量也会随之增多。但是激光功率不变, 激光辐照区域的增大会使任意截面处粉末颗粒接受激光辐照的能量密度显著降低, 进而导致光粉相互作用程度的减弱, 致使处于高亮状态粉末颗粒的数量虽然在显著增加, 但是粉末束流内处于高亮状态的面积却逐

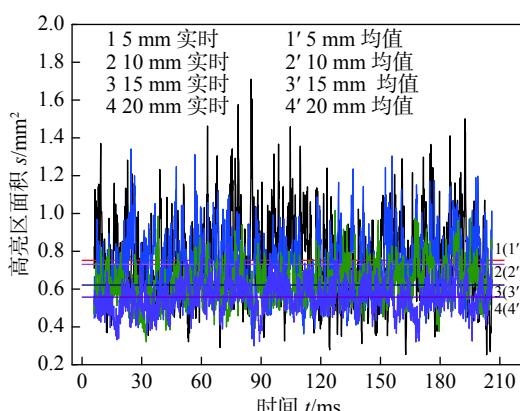


图 16 离焦量对粉末颗粒亮区面积的影响  
Fig. 16 Effect of defocus on the bright area of powder particles

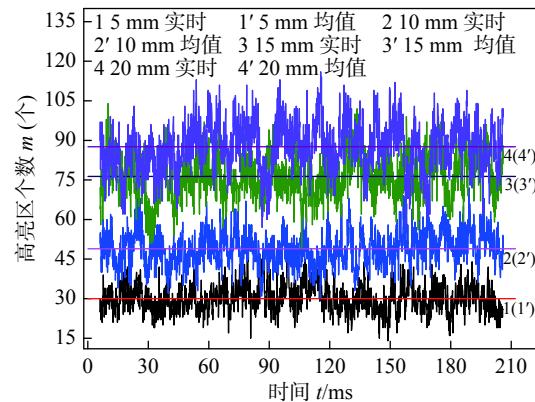


图 17 离焦量对亮区颗粒数量的影响  
Fig. 17 Effect of defocus on the number of light powder particles

渐减少。随着离焦量增加, 光粉作用后粉末颗粒亮区均值逐渐下降, 其变化规律如图 18 所示, 说明离焦量的增加会显著降低光粉作用程度, 使更多的粉末颗粒呈高温状态进入熔池。

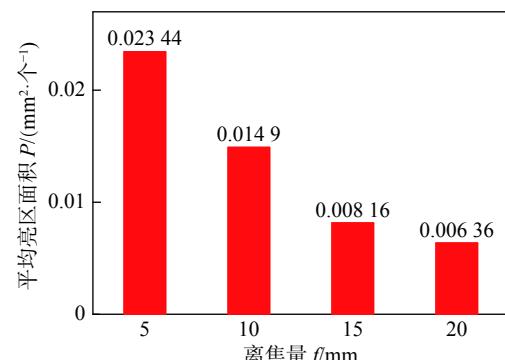


图 18 离焦量对亮区单个粒子平均面积的影响  
Fig. 18 Effect of defocus on the average light area of single particle

## 3 结 论

(1) 粉末颗粒在激光辐照下处于高亮状态粉末颗粒的数量及其亮区面积可以一定程度上反映激光和粉末相互作用的剧烈程度, 激光能量密度和光粉交互作用时间是导致粒子受到激光辐照程度不同的根本原因。

(2) 激光功率从 0.5 kW 提高到 2.0 kW, 送粉速率从 8.2 g/min 提高到 26.4 g/min, 对应粉末束流内单个粒子接受激光辐照的程度提高了 1 倍左右。

(3) 离焦量从 +5 mm 提高到 +20 mm 时, 被激光辐照粉末粒子的数量会显著增加, 但是亮区总面积却呈逐渐下降趋势, 使单个粉末粒子接受激光辐

照的程度降低。

(4) 载气和同轴保护气流量的变化会影响粉末束流焦点相对激光束焦点的位置, 以及粉末束流的飞行速度, 两者综合作用会造成粉末束流内的粒子接受激光辐照程度发生复杂的变化。

### 参考文献:

- [1] Arcella F G, Froes F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. *JOM*, 2000, 52(5): 28 – 30.
- [2] Liu Jiaqi, Yu Huijun, Chen Chuanzhong. Research progress of laser cladding self-fluxing alloy coatings on titanium alloys[J]. *China Welding*, 2017, 27(2): 45 – 51.
- [3] Tan H, Hu G, Zhang F, et al. Formation mechanism of adhering powder and improvement of the surface quality during laser solid forming[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 105(105): 1 – 10.
- [4] Devesse W, Baere D D, Guillaume P. Modeling of laser beam and powder flow interaction in laser cladding using ray-tracing[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2): S29208.
- [5] 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 – 024903-11.
- [6] Wen S Y, Shin Y C, Murthy J Y, et al. Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, 52(25–26): 5867 – 5877.
- [7] 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.
- [8] Yang Y, Gu D, Dai D, et al. Laser energy absorption behavior of powder particles using ray tracing method during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2018, 143: 12 – 19.
- [9] 任维彬, 董世运, 徐滨士, 等. 压缩机叶片激光再制造成形闭环控制设计与实现 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(3): 11 – 15. Ren Weibin, Dong Shiyun, Xu Binshi, et al. Design and implementation of laser refabrication forming closed-loop controlling for compressor blade[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(3): 11 – 15.
- [10] 杨义成, 王威, 王旭友, 等. 工艺参数对同轴送出粉末流动状态的影响 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(5): 13 – 17. Yang Yicheng, Wang Wei, Wang Xuyou, et al. The effect of process parameter on powder flow status in coaxial powder feeding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(5): 13 – 17.
- [11] 杨义成. 燃气轮机叶片激光增材修复基础研究 [D]. 北京: 机械科学研究院, 2017.

**第一作者简介:** 杨义成, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要从事激光焊接和激光增材制造相关研究工作。发表论文 5 篇。Email: [hwiyc@163.com](mailto:hwiyc@163.com)

**通信作者简介:** 黄瑞生, 男, 博士, 高级工程师。Email: [huangrs8@163.com](mailto:huangrs8@163.com)