doi: 10.11933/j.issn.1007−9289.20170331003

宽带光束与同轴粉末流耦合规律及熔覆层成形特征

张 健[1,2]，张津超[1]，潘晓铭[1]，曹 宇[1]，冯爱新[1]

(1. 温州大学 浙江省激光加工机器人重点实验室，浙江 温州 325036；2. 温州市质量技术监督检测院，浙江 温州 325027)

摘 要: 利用高功率宽带平顶光束进行熔覆试验，采用高速摄像机和图像处理软件，建立了宽带光束-同轴粉末流耦合模型，研究了不同送粉器粉盘转速和载气流量下激光束与同轴粉末流的耦合特性和规律，并通过金相显微镜和体视显微镜分析不同光粉耦合形态下熔覆涂层的成形特征与规律，构建了光粉耦合特性与熔覆层成形的关系。结果表明：在载气流量不变的条件下，随粉盘转速增加，粉末流与激光束的耦合位置逐渐由宽带光束内变成宽带光束外，粉末流汇聚点焦距增大，汇聚直径先增大后保持不变；在基体处的区域由焦柱粉流区变为环状粉流区，熔覆层宽度略减小，高度和接触角增大，粉末利用率先增大后减小，稀释率减小。在粉盘转速不变的条件下，随载气流量增加，粉末流与激光束的耦合形态不变，粉末流位于宽带光束外，粉末流汇聚点焦距先增大后减小，汇聚直径先增大后保持不变；在基体处的区域由环状粉流区变为焦柱粉流区，熔覆层宽度先增大后减小，高度和接触角先增大后保持不变，粉末利用率先增大后减小，稀释率减小。当粉盘转速为 1.2 r/min，载气流量为 4 L/min 时，能够获得较好的成形质量。

关键词: 激光熔覆；平顶激光束；粉末流；熔覆层

中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007−9289(2017)05–0141–09

Coupling Rules Between Broadband Beam and Coaxial Powder Flow and Forming Characteristics of Cladding

ZHANG Jian[1,2], ZHANG Jin-chao[1], PAN Xiao-ming[1], CAO Yu[1], FENG Ai-xin[1]

(1. Key Laboratory of Zhejiang Province on Laser Processing Robot, Wenzhou University, Wenzhou 325036, Zhejiang; 2. Wenzhou Institute of Technology Testing & Calibration, Wenzhou 325027, Zhejiang)

Abstract: High-power and broadband-flat laser beam was applied for cladding experiments. Using high-speed camera and image processing software, a coupling model of broadband beam and coaxial powder flow was built to investigate coupling rules with different disk revolutions and carrier gas flows. The whole process was characterized by metallographic microscope and stereo microscope. The results show that, when the carrier gas flow is kept the same, with the increase of the disk revolution, the coupling position of the laser beam and powder flow gradually changes from the inside to the outside of the broadband beam.The focal length of the powder confluence point becomes larger at first, and then remain unchanged as well as the diameter. The geometry of the base area changes from the focus-powder spot to the ring-powder spot, and the width of the cladding layer slightly decreases, while the height and contact angle increase. In this condition, the powder using efficiency first increases then decreases, and the dilution rate is reduced. When the disk revolution is kept the same, the coupling position of the laser beam and powder flow was unchanged with the increase of the carrier gas flow. Powder flow is located outside of

收稿日期: 2017-03-31；**修回日期:** 2017-09-08

网络出版日期: 2017-09-11 17:07；**网络出版地址:** http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170911.1707.034.html

通讯作者: 潘晓铭 (1980—)，男 (汉)，实验师，硕士；**研究方向:** 先进制造技术；**E-mail:** 12944698 @qq.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51605338)；浙江省博士后科研择优资助项目 (156184)；浙江省教育厅资助项目 (Y201430593)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51605338), Preferred Research Found for Postdoctoral Program of Zhejiang Province (156184) and Education Fund Project of Zhejiang Province (Y201430593)

引文格式: 张健, 张津超, 潘晓铭, 等. 宽带光束与同轴粉末流耦合规律及熔覆层成形特征[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 141-149.
ZHANG J, ZHANG J C, PAN X M, et al. Coupling rules between broadband beam and coaxial powder flow and forming characteristics of cladding[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 141-149.

the broadband beam. Focal length of aggregation point of powder first increases and then decreases. Diameter increases first and then remains the same. Base area is from the ring-powder spot to the focus-powder spot. Width of cladding layer first increases and then decreases. Height and contact angle increase first and then remain the same. Powder using efficiency first increases then decreases, and the dilution rate is reduced. The best performance can be achieved when the disk revolution is 1.2 r/min, and the carrier gas flow is 4 L/ min.

Keywords: laser cladding; flat-topped laser beam; powder flow; cladding layer

0 引 言

激光熔覆技术能够实现零件的三维直接制造与再制造，在熔覆过程中，粉末流与激光束耦合特性是决定熔覆涂层成形质量的关键因素之一[1-3]。根据熔覆光束模式与形状的不同，主要分为圆形高斯激光束熔覆与宽带平顶激光束熔覆两种加工方式，其中宽带矩形平顶激光束熔覆具有光斑功率密度均匀分布、熔覆效率高和成形质量好[4-6]等优点，成为近年激光熔覆技术的主流加工方式与研究热点。

宽带平顶激光熔覆技术主要包括光束整形、粉束整形和光粉耦合等[7]，其中最为关键的是光粉耦合技术。近年来多位学者已对同轴送粉式激光熔覆工艺中激光束与粉末流的耦合特性和规律展开了研究。杨洗陈[8-9]等对粉末流场进行了模拟，并开发了新型数字粒子图像检测系统，得到了粉末流场浓度分布规律及粉末流参数的变化规律；靳绍巍[10]等研究了粉末浓度分布对激光能量的衰减作用，建立了粉末流下的激光衰减率模型；Hussam[11]采用解析模型获得了高斯分布和均匀分布粉末流下熔覆层轮廓。但这些研究主要基于圆形高斯光束，多侧重于粉末流或激光束的单方面作用，对光粉耦合与熔覆层成形的关系报道较少。

平顶光束与粉末流的耦合是激光熔覆过程中能量及物质导入的起点，熔覆涂层的形成是它们相互作用的结果[12-13]。与圆形高斯光束相比，宽带平顶光束一方面能够增加熔覆带宽度，提高粉末的有效利用率，另一方面光斑内的能量分布较均匀，使熔池内表面温度增量趋于一致，降低温度梯度、减小裂纹敏感性和变形。

因此，深入探究宽带平顶光束与同轴粉末流的耦合特性及规律，以及系统研究这一耦合特性与规律对熔覆涂层的影响与其相关性，不仅具有重要的科学研究价值，而且对于熔覆涂层制备工艺优化具有重要的实际意义。

1 试验材料及方案

1.1 试验设备及材料

激光熔覆基体材料为 45 钢，尺寸 60 mm×20 mm×8 mm；熔覆涂层材料为 Ni60A 合金粉末，粒度为 35~100 μm，其化学成分见表 1。

采用德国 Rofin-FL060 型光纤激光加工成套设备，激光输出波长为 (1 070±10 nm)，最大输出功率 6 kW。设备配有德国 HIGHYAG 公司 HIGHYAG-BIMO 型激光熔覆单元，激光束经其内部整形模块后最小可聚焦成 5 mm×5 mm 方形宽带平顶光斑；同时配置德国 GTV PF2/2 型专用送粉器，该送粉器配备两条独立送粉线，可实现粉盘转速、送粉载气流量的全自动闭环控制，如图 1 所示。

表 1 Ni60A 的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni60A (*w*/%)

Element	Cr	Si	C	B	Fe	Ni
Content	15−20	3.5−5.5	0.5−1.1	3−4.5	≤5	Bal.

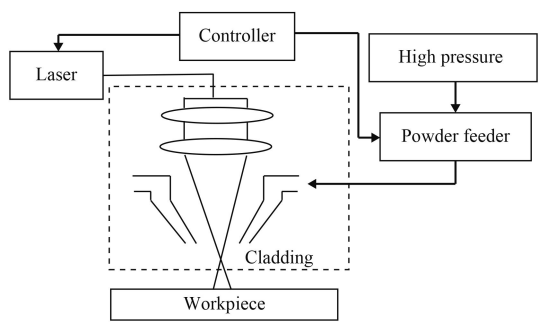


图 1 高功率光纤激光熔覆设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of high-power fiber laser cladding equipment

1.2 试验方案

考虑到试验所用 GTV PF2/2 型送粉器控制粉末流形态和送粉速率的主要参量为粉盘转速和载气流量，因此采用单因素法，分别改变粉盘转速和载气流量，利用 M110 型高速摄像机拍摄不同参数下的粉末流形态，具体参数见表 2。然后运

用 MATLAB 软件中的图像处理功能对粉末流形态图进行图像处理，提取粉末流外部形态、汇聚焦距和汇聚直径等特征信息。

表 2　GTV PF2/2 型送粉器送粉参数

Table 2　Processing parameters of GTV PF2/2 powder feeder

Parameters	No. 1	No. 2
Carrier gas flow / ($L\cdot min^{-1}$)	4.0	1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 4.0
Disk revolution / ($r\cdot min^{-1}$)	0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 3.0	2.0

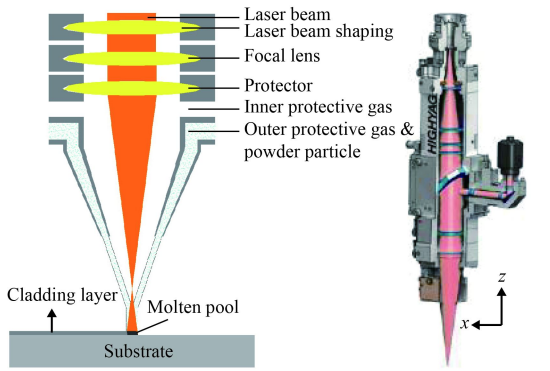
熔覆前，将 Ni60A 合金粉末放置在 DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱中 2 h，温度设置为 120 ℃，基材经砂纸打磨后用乙醇、丙酮清洗以去除油脂和污渍。熔覆过程中采用同轴载气送粉方式进行单道单层熔覆，工艺参数为：激光功率 3 kW，扫描速度 6 mm/s，离焦量为+1 mm，宽带光束大小为 6 mm×6 mm。

采用称重法计算粉末利用率，利用 PL602E 型电子天平测量熔覆前后粉末的重量，测量 3 次取其平均值。熔覆后，线切割熔覆试样并进行研磨抛光，采用王水 (体积比为 3∶1 的浓盐酸和浓硝酸的混合溶液) 腐蚀，在 ZEISSAX10 金相显微镜和 Nikon SMZ800 体视显微镜下观察熔覆层特征 (宽度、高度、接触角和稀释率)。利用体视显微镜对熔覆层形貌进行采样，并用其自带软件进行熔覆层高度 (H)、宽度 (W) 的测量；将采样图片按照 1∶1 比例导入 AutoCAD 2013 软件中，利用样条曲线拟合出熔覆层轮廓，然后按照角度标注命令进行接触角 (θ) 的测量。

2　同轴宽带熔覆原理与光粉耦合模型建立

2.1　同轴送粉式宽带激光熔覆工作原理

试验所采用同轴送粉式宽带激光熔覆设备的工作原理如图 2 所示。其中，高能密度宽带激光束与粉末流同轴从粉嘴喷出，粉末流与基体一同熔化凝固形成熔覆层。激光束的能量一部分被粉末流吸收，其余能量透过粉末流后作用于基体表面。激光同轴熔覆头的几何结构主要由激光束腔、载气粉末腔、内保护气腔组成，激光束从上至下依次经过准直镜、光束整形单元、聚焦镜和保护镜，聚焦于 Z 轴上。同轴送粉喷嘴中有两路气体，外环气体为高纯氩气，既作为载粉气体，又作为保护气体，经送粉器运载粉末分 4 路进入喷嘴；内环气体为干燥空气，防止粉末反弹，达到保护镜片的作用。



(a) Principle of laser cladding　　(b) Laser cladding head

图 2　同轴送粉式激光熔覆原理示意图

Fig.2　Schematic diagram of laser cladding with coaxial powder feeding

2.2　同轴送粉粉末流物理模型的建立

根据试验过程中所采集到的激光同轴粉末流形态，经图像处理后同轴粉末流空间分布如图 3 所示，由上至下可分为 3 个特征区域：环状粉流区 (I)、焦柱粉流区 (II) 和锥形粉流区 (III)。环状

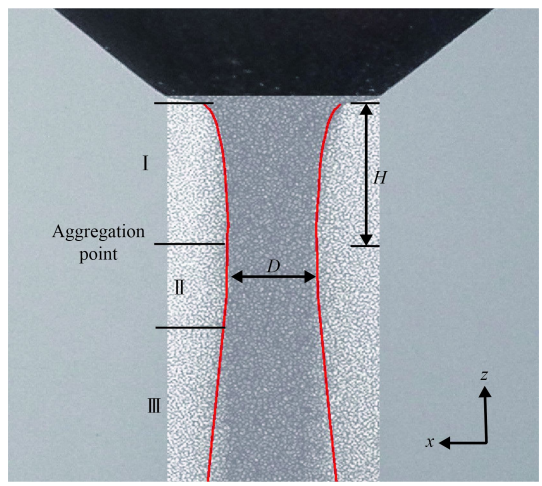


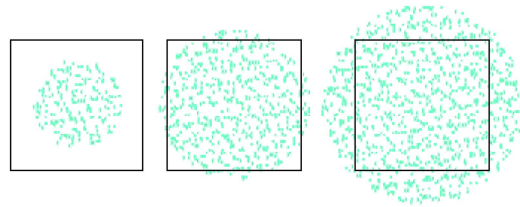
图 3　激光同轴送粉粉末流空间分布

Fig.3　Spatial distribution of coaxial powder flow

粉流区的粉末浓度在横截面上呈环形分布，随 Z 轴向下粉末流浓度增大；进入焦柱粉流区后，粉末浓度在焦点处达到最大值；进入锥形粉流区后，粉末开始发散，粉末浓度随 Z 轴向下而缓慢降低。图中 H 为粉末汇聚焦距，D 为粉末汇聚的直径。试验结果与文献[8]数值模拟结果也取得了一致性。

2.3 宽带光束-同轴粉末流耦合分析模型的建立

粉末流与宽带平顶激光束同轴从喷嘴输出，激光束通过粉末流，一部分能量被粉末吸收，使粉末加热熔化，另一部分能量透过粉末流作用于基体表面，形成熔池。激光束与粉末流耦合的接触面积在光粉能量传递中起主导作用，以汇聚在基体表面上的接触面积为基准，分为 3 种情况：① 粉末流汇聚在宽带光束内 (如图 4(a))；② 粉末流与宽带光束交叉 (如图 4(c))；③ 粉末流包含宽带光束 (如图 4(c))。激光束穿过粉末流，由上至下依次经过环状粉流区、焦柱粉流区和锥形粉流区。在离焦量确定的情况下，随着送粉参数变化，激光束与粉末流在基体表面的耦合点可能位于 3 个区域的任一个，其中，焦柱粉流区粉末较稳定且浓度最高。当粉末位于光斑内，粉末能够吸收足够能量，熔化为液态，熔覆层成形质量好；当粉末位于光斑外，由于吸收能量不足，部分粉末颗粒熔化，部分颗粒仍为固体，粉末利用率低。与圆形高斯激光束相比，粉末流与宽带平顶激光束耦合的接触面积更大，粉末利用率更高[11]。



(a) Powder completely within spot (b) Powder cross spot (c) Powder contains spot

图 4 宽带平顶光束与粉末流的耦合横截面

Fig.4 Mutual cross section between broadband-flat beam and powder flow

3 结果与分析

3.1 粉末流与激光束耦合形态及规律

载气流量为 4 L/min 时，不同粉盘转速下的光粉耦合形态如图 5 所示，粉盘转速为 0.8~3 r/min。从图中可以看出，在载气流量不变的条件下，随粉盘转速增加，粉末流汇聚点 (实线) 焦距增大，汇聚直径先增大后保持不变；粉末汇聚点 (实线) 从汇聚在基材上的光斑点 (虚线) 的上方逐渐变为下方，粉末流在基体处的区域由焦柱粉流区变为环状粉流区；粉末流和激光束汇聚在基体上的耦

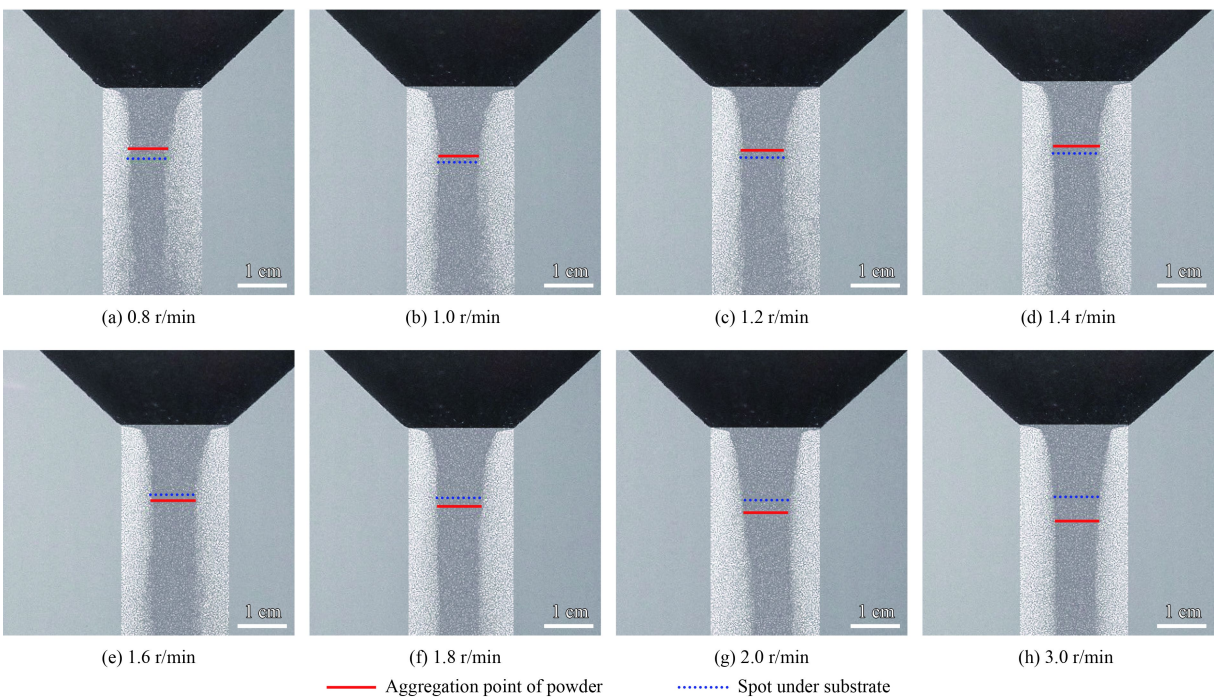


图 5 载气流量 4 L/min 时不同粉盘转速下的光粉耦合形态

Fig.5 Optical coupling form between laser and powder of different disk revolutions in carrier gas flow of 4 L/min

合横截面的相对位置由粉末流汇聚在宽带光束内 (图 3(a)) 逐渐变成粉末流包含宽带光束 (图 3(c))。由此可知，在载气流量不变的情况下，粉盘转速影响粉末流和激光束在基体上的横截面耦合形态。

粉盘转速为 2 r/min 时，不同载气流量下的光粉耦合形态如图 6 所示，载气流量为 1.8~4 L/min。从图中可以看出，在粉盘转速不变的条件下，随载气流量增大，粉末流汇聚点 (实线) 焦距先增大后减小，汇聚直径先增大后保持不变；粉末汇聚点 (实线) 从汇聚在基材上的光斑点 (虚线) 的下方逐渐变为上方，粉末流在基体处的区域由环状粉流区变为焦柱粉流区；粉末流和激光束汇聚在基体上的耦合横截面的相对位置为粉末流包含宽带光束 (图 3(c))。由此可知，在粉盘转速不变条件下，载气流量对粉末流和激光束汇聚在基体上的横截面耦合形态几乎无影响。

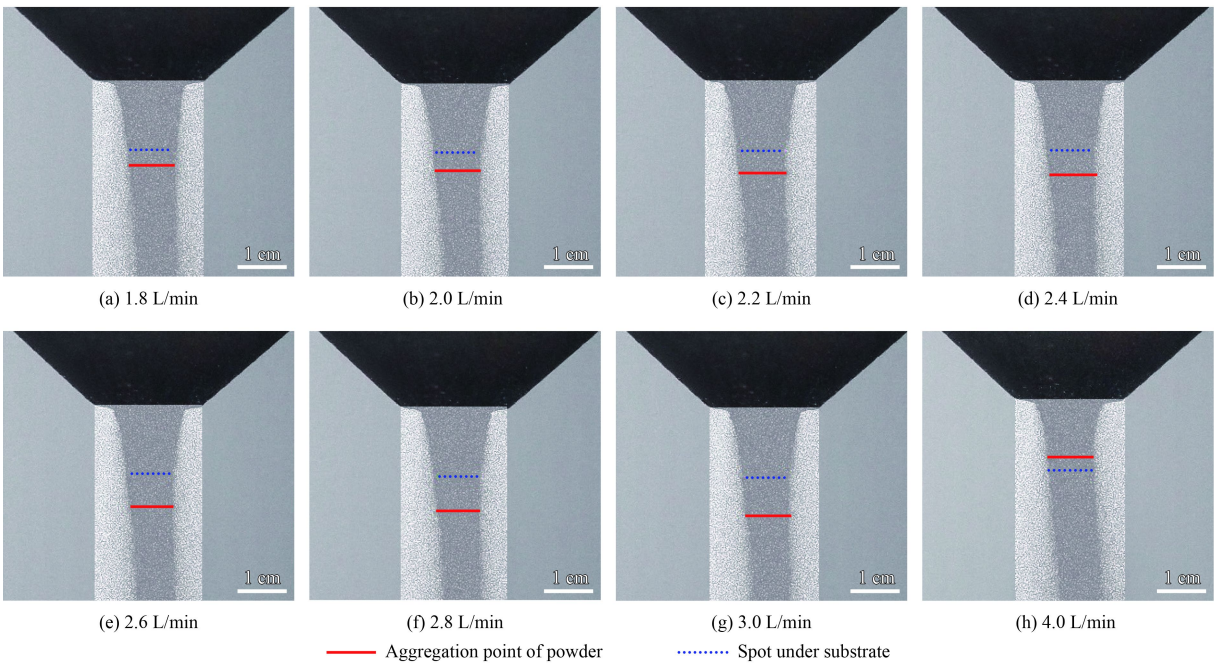


图 6　粉盘转速 2 r/min 时不同载气流量下的光粉耦合形态

Fig.6　Optical coupling form between laser and powder of different carrier gas flows in disk revolutions of 2 r/min

3.2　熔覆层形貌特征分析

3.2.1　熔覆层形貌

宽带平顶激光束与粉末流的耦合特性很大程度上决定了熔覆层的成形特征。典型的熔覆层横断面如图 7 所示。采用金相检测法，分别测量试样熔覆层的高度 (H)、宽度 (W) 和接触角 (θ)，考察激光束—粉末流耦合特性与熔覆层成形特征的相互依赖关系。

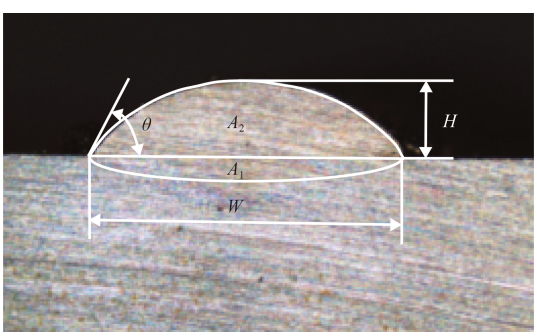


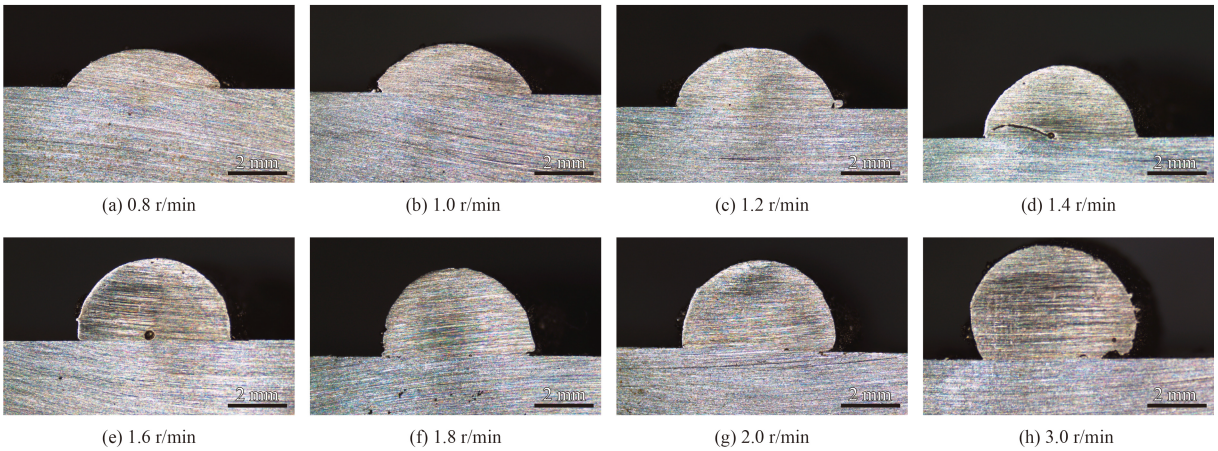
图 7　熔覆层形貌特征参数图

Fig.7　Characteristic parameter of cladding layer

载气流量为 4 L/min 时，不同粉盘转速下的熔覆层形貌和特征参数值如图 8 和图 9 所示，从图中可以看出，随粉盘转速增加，熔覆层宽度减小，但变化不明显；熔覆层高度增大，且增大的幅度减小；熔覆层接触角增大。在载气流不变条件下，增加粉盘转速，单位时间内熔池内沉积的粉末量增加，从而熔覆层高度增大。但粉盘转数增加时，一方面，粉末颗粒吸收的平均能量减少，使得粉末熔化速度减缓；另一方面，根据上述分析结果知，粉末流在基体处的区域由焦柱粉流区变为环状粉流区，粉末浓度有所下降，因此熔覆层高度增大幅度减缓。熔覆层宽度略有减小，主要是由于过多的粉末颗粒会形成屏障面，减小了激光透过率，激光束作用在基体上的能量

减少。熔覆层形貌从凸形变成上凸下凹形，接触角增大，当粉盘转速增至 1.6 r/min 时，接触角已超过 90°，熔体与基体的润湿性变差，熔覆层截面形貌呈现不规则性，如图 9(b) 所示。

粉盘转速为 2 r/min 时，不同载气流量下熔覆层形貌和特征参数值如图 10 和图 11 所示，从图

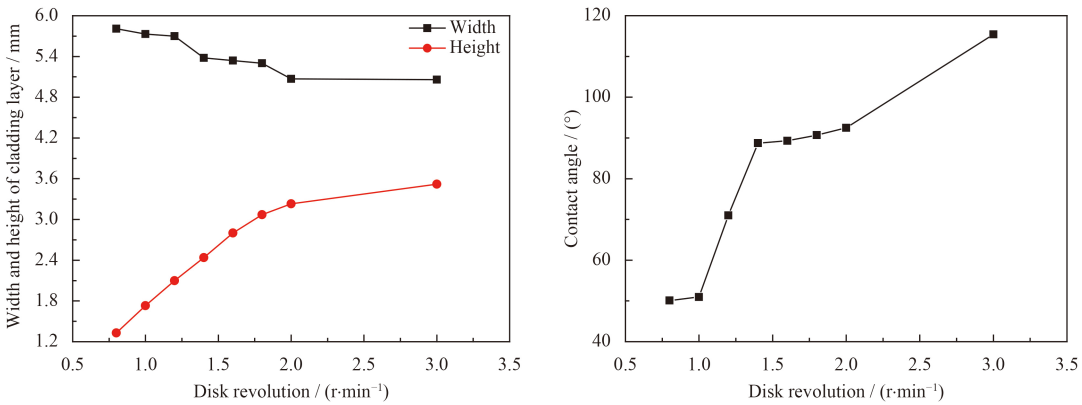


(a) 0.8 r/min (b) 1.0 r/min (c) 1.2 r/min (d) 1.4 r/min

(e) 1.6 r/min (f) 1.8 r/min (g) 2.0 r/min (h) 3.0 r/min

图 8 载气流量 4 L/min 时不同粉盘转速下的熔覆层形貌

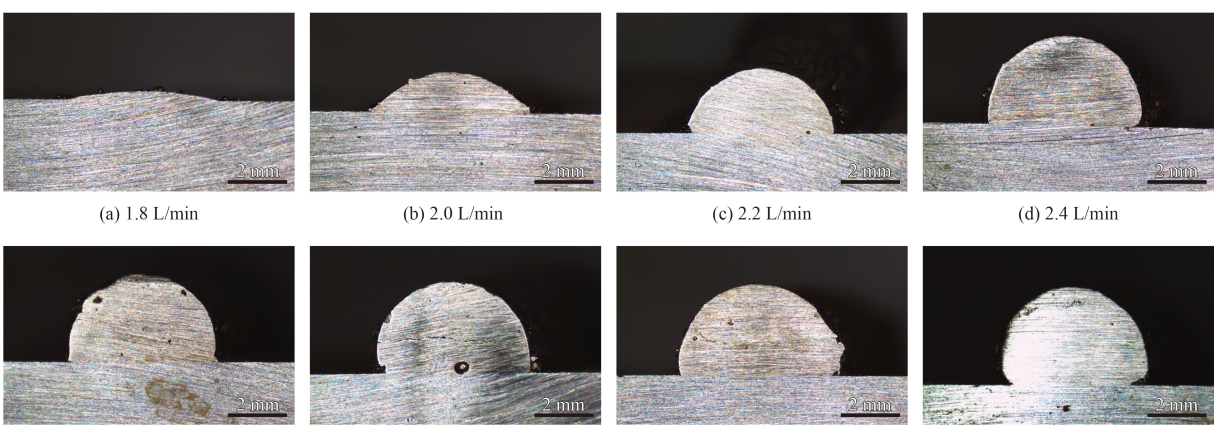
Fig.8 Profile of cladding layer with different disk revolution in carrier gas flow of 4 L/min



(a) Width and height (b) Contact angle

图 9 载气流量 4 L/min 时不同粉盘转数下的熔覆层形貌特征参数

Fig.9 Characteristic parameters of cladding layer profile with different disk revolution in carrier gas flow of 4 L/min



(a) 1.8 L/min (b) 2.0 L/min (c) 2.2 L/min (d) 2.4 L/min

(e) 2.6 L/min (f) 2.8 L/min (g) 3.0 L/min (h) 4.0 L/min

图 10 粉盘转速 2 r/min 时不同载气流量下的熔覆层形貌

Fig.10 Profile of cladding layer with different carrier gas flow in disk revolution of 2 r/min

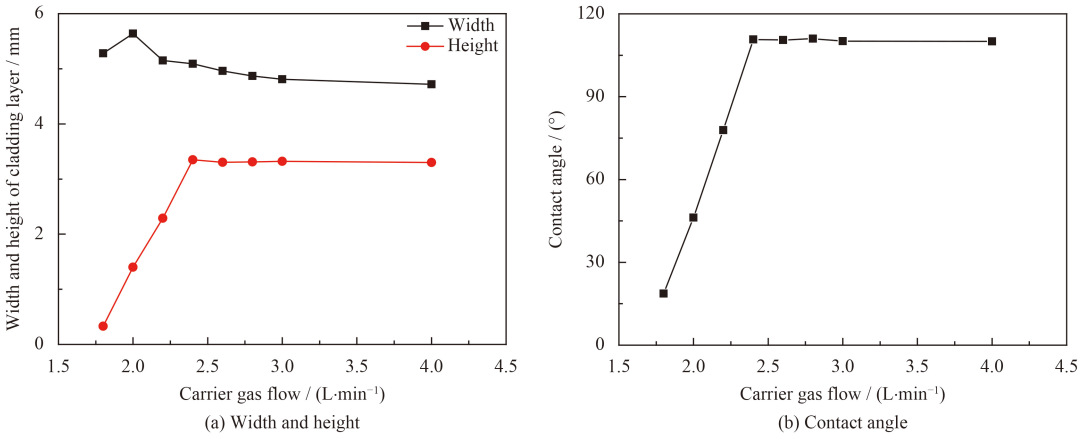


图 11　粉盘转数 2 r/min 时不同载气流量下的熔覆层形貌特征参数

Fig.11　Characteristic parameters of cladding layer with different flow of carrier gas flow in disk revolution of 2 r/min

中可以看出，当载气流量较小时，熔覆层宽度随载气流量增加而增大，载气流量继续增加时，熔覆层宽度减小，但变化不明显；熔覆层高度和接触角随载气流量增加先增大后保持不变。在粉盘转速不变的条件下，载气流量较小时，增加载气流量，粉末速度会上升，熔池会受到自上而下的压力促使熔池铺展，使得熔覆层宽度增大。但随着粉末颗粒继续增加，形成屏障面使得基体吸收的能量减少，熔覆层宽度略减小。熔覆层高度先增大后保持不变，主要是由于粉末流在基体处的区域由环状粉流区变为焦柱粉流区，粉末浓度增加，单位时间熔池内沉积的粉末量增加，熔覆层高度增大，但又由于一定粉盘转速输出的粉末量是一定的，当达到最大值时，不再随载气流量增加而增大，熔覆层高度保持不变。当载气流量增至 2.6 L/min 时，熔覆层高度和接触角保持不变，粉末输出量已达到最大值，接触角超过 90°，继续增大时，熔体与基体的润湿性变差，熔覆层截面形貌呈现不规则性。

3.2.2　熔覆层稀释率

稀释率是衡量激光熔覆制造性能的关键指标之一[12]。稀释率主要取决于激光束对粉末和基体的能量作用。稀释率 μ 通常使用横截面面积的比值来计算，由式 (1) 表示：

$$\mu = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \tag{1}$$

其中 A_1 为基体表面之下熔合区的横截面积，mm²；A_2 为基体表面之上熔覆区的横截面积，mm²。

熔覆层稀释率随送粉参数 (粉盘转速和载气流量) 的变化规律如图 12 所示，由图可知，稀释率随粉盘转速和载气流量的增加而减小。在激光功率和扫描速度不变的情况下，激光束作用于粉末和基体的能量比例影响着稀释率。由上述激光束粉末耦合规律知，随粉盘转速和载气流量增加，

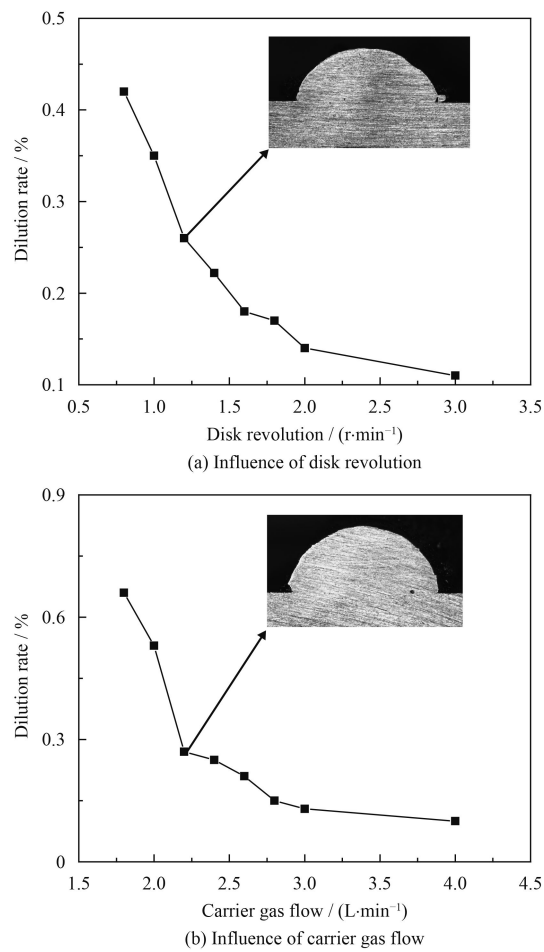


图 12　熔覆层稀释率随送粉参数的变化规律

Fig.12　Dilution rate varied with different injecting parameters

粉末流汇聚直径增大，粉末流与激光束在基体上的耦合横截面相对位置处于粉末流包含宽带光束，致使粉末浓度增大，激光束透光率下降，基体吸收的能量减少，熔合区面积 A_1 减小，熔覆区 A_2 增大，因此稀释率下降。稀释率较大时，会损伤基体材料的性能，稀释率过小时，则熔覆层与基体不能形成良好的冶金结合，结合性能差。当载气流量为 4 L/min 时，粉盘转速为 1.2 r/min，能够获得较好的稀释率，熔覆层成形质量较好，无明显的开裂和剥落，如图 12(a) 所示；当粉盘转速为 2 r/min 时，载气流量为 2.2 L/min，能够获得较好的稀释率，熔覆层成形质量较好，无明显的开裂和剥落，如图 12(b) 所示。

3.2.3 粉末利用率

粉末利用率与激光束粉末流耦合关系密切相关。粉末利用率 η 是指熔化的粉末与总输出的送粉量之比，由式 (2) 表示：

$$\eta = \frac{M - M_1}{M_2 + M - M_1} \tag{2}$$

其中 M 为基材与熔覆层的总质量，kg；M_1 为基材的质量，M_2 为剩余粉末的质量，kg；。

粉末利用率随送粉参数 (粉盘转速和载气流量) 的变化规律如图 13 所示，由图可知，随粉盘转速增加，粉末利用率先增大后减小；随载气流量增加，粉末利用率先增大后减小。当载气流量不变，由上述分析结果知，粉盘转速为 0.8~1.2 r/min 时，粉末流汇聚于基体上的横截面位于宽带光束内 (图 3(a))，且粉末流处于焦柱区，激光束与粉末流接触充分，能够熔化输出的粉末颗粒，粉末利用率高。粉盘转速为 1.4~3 r/min 时，粉末流汇聚横截面积增大，粉末流与宽带光束相对位置逐渐由宽带光束内变成宽带光束外，使得位于宽带光束外的粉末颗粒得不到足够的熔化能量，因此粉末利用率下降。由此可知，载气流量不变的条件下，粉盘转速改变了激光束与粉末流的耦合位置和面积，从而影响了粉末利用率。载气流量为 4 L/min，粉盘转速为 1.2 r/min 时，粉末利用率最高，熔覆层成形质量较好，无明显缺陷，如图 13(a) 所示。

当粉盘转速不变，载气流量为 1.8~3 L/min 时，随载气流量增加，粉末输出量增加，气体对粉末约束力增大，使得粉末流与激光束接触面增加，粉末能够获得足够的熔化能量，而使粉末利用率增大。但载气流量过大，粉末颗粒速度较大，粉粒间碰撞加剧，且进入熔池后会反弹脱离，粉末利用率下降。由此可知，粉盘转速不变的条件下，载气流量通过改变对粉末的约束力影响粉末利用率。粉盘转速为 2 r/min，载气流量为 3 L/min 时，粉末利用率最高，但熔覆层接触角过大，无法形成良好的冶金结合，如图 13(b) 所示。

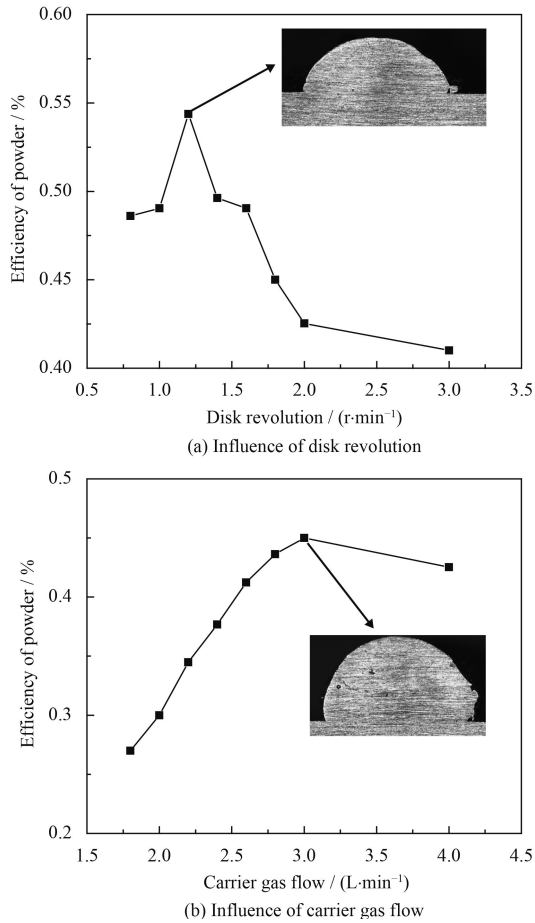


图 13 粉末利用率随粉盘转速和载气流量的变化规律

Fig.13 Efficiency of powder varied with different injecting parameters

4 结 论

文中研究了宽带平顶激光束与同轴粉末流的耦合特性及规律，构建了不同光粉耦合特性与熔覆层成形特征的关系。激光参数一定条件下，粉盘转速与载气流量是影响光粉耦合特性的重要因素。

(1) 载气流量一定时，粉盘转速影响粉末流在基体上方的汇聚形态及粉末流与光束的耦合状态。随粉盘转速增加，粉末流与光束耦合位置由

光束内变为宽带光束外，粉末流在基体处的汇聚形态由焦柱粉流区变为环状粉流区，熔覆层宽度略减小，高度和接触角增大，粉末利用率先增大后减小，稀释率减小。

(2) 粉盘转速一定时，载气流量主要影响粉末流在基体上方的汇聚形态。随载气流量增加，粉末流与激光束的耦合状态不变，粉末流在基体处的汇聚形态由环状粉流区变为焦柱粉流区。熔覆层宽度先增大后减小，高度和接触角先增大后保持不变，粉末利用率先增大后减小，稀释率减小。

参考文献

[1] WEN S Y, SHI Y C, MURTHY J Y, et al. Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(25-26): 5867-5877.

[2] ZHU G, LI D, ZHANG A F, et al. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laserdirect metal deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43: 106-113.

[3] 雷定中, 石世宏, 傅戈雁, 等. 宽带激光内送粉熔覆工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1-8.
LEI D Z, SHI S H, FU G Y, et al. Research of hollow broadband laser cladding method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1-8 (in Chinese).

[4] 韩玉勇, 鲁俊杰, 李剑锋, 等. 基于激光熔覆的车床主轴再制造[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 147-153.
HAN Y Y, LU J J, LI J F, et al. Lathe spindle remanufacturing based on laser cladding technology[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 147-153 (in Chinese).

[5] 罗曦, 陈培锋, 王英, 等. 一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1853-1856.
LUO X, CHEN P F, WANG Y, et al. Novel kind of wideband shaping parabolic mirror for power laser processing[J]. China Surface Engineering, 2008, 35(11): 1853-1856 (in Chinese).

[6] 杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 1-10.
YANG X W, YANG Y Q, LIU Y, et al. Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. China Surface Engineering, 2015, 42(3): 1-10 (in Chinese).

[7] SANTHANAKRISHNAN S, KONG F, KOVACEVIC R. An experimentally based thermo-kinetic hardening model for high power direct diode laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(7): 1247-1259.

[8] 靳晓曙, 杨洗陈, 冯立伟, 等. 激光制造中载气式同轴送粉粉末流场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 161-166.
JIN X S, YANG X C, FENG L W, et al. Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 161-166 (in Chinese).

[9] 杨洗陈, 雷剑波, 刘运武, 等. 激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 993-997.
YANG X C, LEI J B, LIU Y W, et al. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(7): 993-997 (in Chinese).

[10] 靳绍巍, 何秀丽, 武扬, 等. 同轴送粉激光熔覆中粉末流对光束能量的衰减作用[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 1-6.
JIN S W, HE X L, WU Y, et al. Laser power attenuation by powder flow in coaxial laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 1-6 (in Chinese).

[11] HUSSAM E C, BRUNO C, SAMUEL B, et al. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50: 413-422.

[12] KIM J D. Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding[J]. China Surface Engineering, 2000, 104(3): 284-293.

[13] TABEERERO I, LAMILIZ A, UKAR E, et al. Numerical simulation and experimental validation of powder fluxdistribution in coaxial laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 2121-2134.

(责任编辑: 陈茜)