

# 基板受辐照比值对激光同轴熔丝沉积稳定性的影响

金磊<sup>1</sup>, 石世宏<sup>1\*</sup>, 魏超<sup>1</sup>, 曹浩<sup>1</sup>, 石拓<sup>2</sup>

<sup>1</sup>苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021;

<sup>2</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006

**摘要** 激光熔丝沉积技术是一种输送丝材并以激光为热源的定向能量沉积技术。为了探讨同轴熔丝过程的机理与效应,采用自主研发的激光内同轴送丝熔化沉积技术来分析研究基板受辐照比值对于熔丝过程稳定性的影响;借助高速相机拍摄并分析熔丝沉积过渡阶段机理;通过数学模型计算与实验验证的方式研究了熔丝沉积动态过程与工艺参数之间的关系。结果表明:较小的基板受辐照比值会引起“液滴”过渡熔丝行为,即处于稳定与不稳定的临界状态;而基板受辐照比值较大时会引起“液桥”过渡熔丝行为,即处于一个相对稳定的状态。本研究对激光熔丝沉积的动力学稳态性分析具有一定的指导意义。

**关键词** 激光光学;激光熔化沉积;光内同轴送丝;基板受辐照比值;过程稳定性;高速摄像

**中图分类号** TN249

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221580

## 1 引言

定向能量沉积(DED)是一种表面熔覆以及增材制造的技术<sup>[1]</sup>,能够加工处理粉末和焊丝填充材料,用于高性能零件的制造及修复、局部磨损保护和自由成形<sup>[2-3]</sup>。在以激光为光源的能量沉积过程中,激光束在基体材料表面扫掠,并在其表面形成随激光移动的熔池;粉材或者丝材随即被激光完全或者部分融化,并被送入熔池,添加的材料经冷却固结沉积成具有一定高度的熔道<sup>[4]</sup>,该过程可称激光熔化沉积。

在激光送丝熔化沉积过程中,通过旁轴或者同轴的方式将丝材送入激光束中<sup>[1]</sup>。2000年Harwell等<sup>[5]</sup>发现搭载有同轴激光束引导的加工头可很好地适用于具有旁轴送丝的系统。Syed等<sup>[6-7]</sup>提出了将同轴送粉与旁轴送丝相结合的替代方法,通过将多个旁轴送丝喷嘴对称分布达到与激光束呈同轴布置的效果。旁轴送料对加工方向的变化有着敏感的反应,使得该工艺的空间三维加工能力有限,难以很好地进行三维表面的沉积。为了实现不依赖于熔化方向的定向能量沉积技术,研究人员开始尝试将激光束与丝材同轴布置的解决方案。

果春焕等<sup>[8-9]</sup>详细阐述了近年来国内外在金属激光熔丝增材制造工艺方面的研究进展,以及工艺参数、

基础设备对成形效率、成形稳定性、成形质量和成形精度的影响等。吉绍山等<sup>[10-12]</sup>提出一种三光束光内同轴送丝增材制造新方法,该装置可以实现光丝的精确耦合,分析了其三光束光斑能量分布,并进行了304不锈钢丝的沉积实验,得到了表面均匀平滑,熔化充分的单道、多道沉积层,其与基体结合良好,组织细密均匀。Bambach等<sup>[13]</sup>提出了一种新型六光束激光内定向能量沉积喷头,在送丝方面,其团队分别研究了在冷丝以及热丝情况下IN718合金在稀释率(冷丝稀释率达29.4%,热丝稀释率达14%)、基板渗透度(冷丝渗透度达480 μm,热丝渗透度达70 μm)以及微观组织结构方面的特点。

Kelbassa等<sup>[14]</sup>通过多级镜组呈90°折向传输方式整形得到环形光束,并通过在镜组中设置送料孔来实现光料同轴的方式;Nowotny等<sup>[15]</sup>通过单光源多级镜组光斑整形得到环形光束的同轴送丝系统,丝材通道更为顺畅,但结构复杂。同轴送丝熔化沉积是一种材料利用率高、成本低、熔层质量好的技术,但由于技术开发不足和产品极少并昂贵,其市场应用还很少。目前同轴送丝系统存在的问题主要是结构复杂、工艺不稳定、精度低、三维成形功能差等。本文采用的装置仅通过一组同轴布置的“环/锥镜”镜组来获得环形光束,丝材先被侧向送入,再与光束汇合形成同轴分布,这种

收稿日期: 2022-08-09; 修回日期: 2022-09-09; 录用日期: 2022-09-21; 网络首发日期: 2022-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(62173239, 61903268)

通信作者: jinshusihan4231@163.com

光内送丝结构简单、体积小、成本低,激光能量在镜组间的损耗减小,同时光丝同轴度理想。针对送丝熔化沉积中环形激光束会被中心丝材遮挡分光<sup>[10,12,16]</sup>又同时照射基板的特性,分析研究二者受到激光照射吸收能量的比例对于熔丝过程稳定性的影响;通过上述丝材与基板受激光照射的关系来对两种不同熔丝过程的机理与效应进行分析与解释,即进行“液滴”与“液桥”二种方式过渡成形阶段的机理分析。

## 2 实验设备与原理

### 2.1 设 备

本实验采用自主研制的激光内同轴送丝沉积头,设备实物如图 1(a)所示,借助环形激光束的技术实现同轴熔丝沉积,原理如图 1(b)所示。环形镜与锥形镜组成的光束整形单元将经由光纤传导的实心圆形激光束转换成为中空环形激光束;出丝嘴处于激光头的中轴线上,实现光内同轴送丝熔化沉积<sup>[15-20]</sup>。

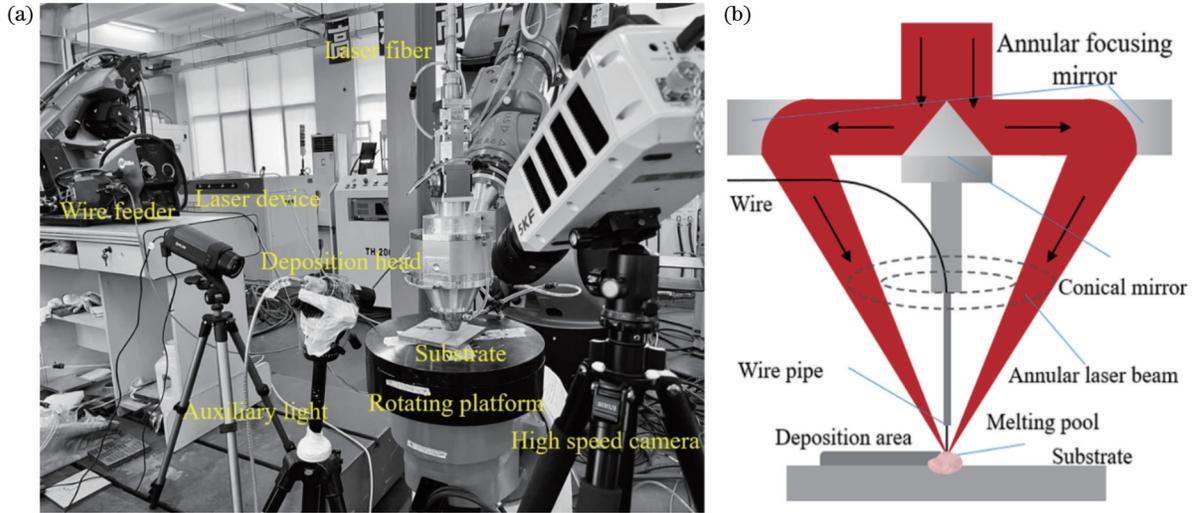


图 1 激光熔丝沉积头。(a)设备;(b)原理图

Fig. 1 Laser wire melting deposition head. (a) Device; (b) principle diagram

激光熔丝沉积实验中选用尺寸为 150 mm × 150 mm × 20 mm 的 304 不锈钢基板,实验前先用 800 目砂纸对基板表面进行打磨除锈,再分别用棉球先后浸润适量无水乙醇和丙酮并对基板表面的油渍进行非反复式的擦拭,并将其干燥。沉积材料选用直径为 1.0 mm 的 304 不锈钢丝材,其主要化学元素成分如表 1 所示。

### 2.2 中空环形激光束能量分布

将环形激光束近似视为中空圆锥体,同时将整个

表 1 304 不锈钢基板与丝材元素成分表(质量分数)

Table 1 Chemical element component of 304 stainless steel substrate and wire (mass fraction) unit: %

| Element   | C    | Si   | Mn   | Cr    | P     | Ni   | S     | Fe      |
|-----------|------|------|------|-------|-------|------|-------|---------|
| Substrate | 0.05 | 0.40 | 1.12 | 18.13 | 0.026 | 8.20 | 0.030 | Balance |
| Wire      | 0.01 | 0.52 | 1.90 | 18.46 | 0.015 | 8.57 | 0.007 | Balance |

中空圆锥体看作线性光束会聚到一点后的集合状态,建立环形激光束的三维数学模型,如图 2(a)所示。

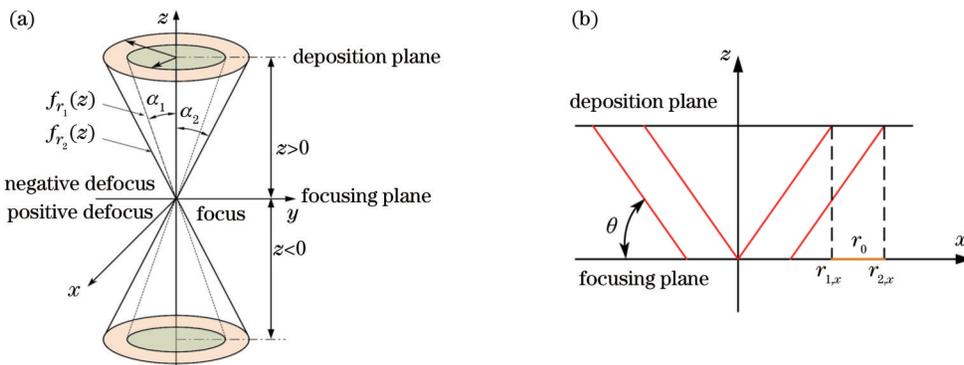


图 2 中空环形激光束。(a)三维模型示意图;(b)负离焦光路示意图

Fig. 2 Hollow annular laser beam. (a) Three-dimensional model diagram; (b) diagram of negative defocus light path

定义激光束环形区域光斑尺寸的函数表达式为  $f(x, y, z)$ , 边界尺寸函数分别为  $f(r_1)$  和  $f(r_2)$ , 其中  $r_1$ 、 $r_2$  分别为内边界圆半径、外边界圆半径,  $f(x, y, z)$  与  $z$  之间的关系如下:

$$f(x, y, z) = f(r_2) - f(r_1), \quad (1)$$

$$f(r_1) = \begin{cases} x^2 + y^2 = f_{r_1}^2(z) \\ f_{r_1}(z) = \tan \alpha_1 \cdot z \end{cases}, \quad (2)$$

$$f(r_2) = \begin{cases} x^2 + y^2 = f_{r_2}^2(z) \\ f_{r_2}(z) = \tan \alpha_2 \cdot z \end{cases}, \quad (3)$$

上述函数表达式是在图 2(a) 中均成立的, 故省略了范围条件。

李春生<sup>[21]</sup>依据激光束几何形状变换的原理, 得到中空环形激光束的能量分布数学模型, 其与光束转换的实际情况基本一致; Shi 等<sup>[22]</sup>在此基础上提出了一种中空环形激光束在负离焦工作区域的能量分布模型。处于负离焦量区域时, 假设中空环形激光束的内外边界为平行光路, 如图 2(b) 所示。根据上述假设, 在负

离焦量工作区域内的激光能量强度数学模型为

$$I_z(x, y) = \frac{2\eta AP}{\pi(r_0^2 + 2r_0 z_d \cot \theta)} \times \exp \left\{ - \frac{2 \left[ \sqrt{x^2 + y^2} - (z_d \cdot \cot \theta + \xi r_0) \right]^2}{r_0^2} \right\}, \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为激光束有效利用率;  $A$  为激光束与材料作用的吸收率;  $P$  为激光束实际功率, 单位为 W;  $r_0$  为激光束在焦点平面处的半径, 单位为 mm;  $z_d$  为中空环形激光束能量峰值位置距离  $z$  轴的距离, 单位为 mm;  $\theta$  为激光束与焦点平面的夹角, 单位为  $^\circ$ ;  $\xi$  为能量峰值位置系数,  $\xi \in [0, 1]$ ;  $z_d$  为沉积平面离焦量, 单位为 mm。

依据上述推算, 得到中空环形激光束在不同位置的的能量分布数学模型, 图 3 所示为某一平面的激光束能量分布情况。由图 3(a) 可知, 在负离焦沉积平面中, 中空环形激光束在环形光斑实际照射区域的能量分布模型关于中心轴呈现“双高斯”状。

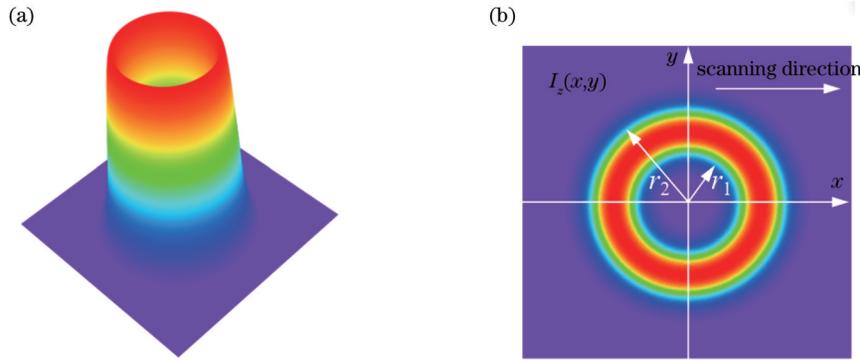


图 3 能量分布模型示意图。(a) 三维模型; (b) 等高线横截面图及其扫描示意图

Fig. 3 Diagram of energy distribution model. (a) Three-dimensional model; (b) contour cross section and scanning diagram

在基板平面上研究激光熔丝沉积过程中沿激光束扫描速度方向上激光束能量分布的情况与特点, 图 3(b) 所示为某个离焦量平面下的中空环形光斑的示意图,  $I_z(x, y)$  是在该平面内有光区域的能量强度函数, 沿  $x$  轴方向扫描, 则在扫描方向上光斑区域的能量分布函数  $D(x)$  可以表示为

$$D(x) = \begin{cases} 2 \int_{\sqrt{r_1^2 - y^2}}^{\sqrt{r_2^2 - y^2}} I_z(x, y) dx & 0 \leq |x| \leq r_1 \\ 2 \int_0^{\sqrt{r_2^2 - y^2}} I_z(x, y) dx & r_1 \leq |x| \leq r_2 \end{cases}. \quad (5)$$

### 3 实验设计与方法

#### 3.1 基板受激光辐照比值

中空环形激光束的应用可以使得丝材末端和沉积表面同时受激光束辐照加热。为了能够恰当描述这种同时辐照加热基板和丝材的激光增材加工过程, 通过设置一个可计算的参数来为后续研究这种过程的稳定性进行一定程度上的标定。以某沉积平面上基板受激

光辐照的能量占该沉积平面总能量的比值为研究对象, 将这种可量化参数定义为基板受辐照比值(SIP), 其中沉积工作平面总能量是指在无丝材送入时, 基板吸收的激光束能量。为叙述方便, 以下称基板受激光辐照比值为辐照比( $P_{SI}$ ), 具体示意图如图 4(a) 所示。将丝材末端分为受辐照区域[图 4(a)中②部分]以及未受辐照区域[图 4(a)中①部分], 两者的边界即为环形激光束内边界与丝材的交汇点集合; 基板受到激光辐照部分[图 4(a)中③部分]的内圆直径大小即为丝材直径尺寸, 外圆直径大小即为激光束外边界与基板的相交处圆直径尺寸。

为了进行辐照比  $P_{SI}$  的标定, 通过如图 4 的方法进行相应的计算。在无金属丝材送入的情况下, 计算出此时基板平面受到激光辐照后获得的总能量, 如图 4(b) 所示环形区域部分的能量; 当有金属丝材送入的情况下, 计算出此时基板平面受到激光辐照后获得的能量, 如图 4(c) 中②部分的能量, 其中①部分即为丝材遮挡的部分。

将图 4(a)中的激光辐照区域简化为如图 5 中所示的辐照区域,计算平面模型示意图。图 5(a)中丝材可

分为两部分,区域 I 为未受到激光照射的区域,区域 II 为丝材末端受到激光照射的区域。

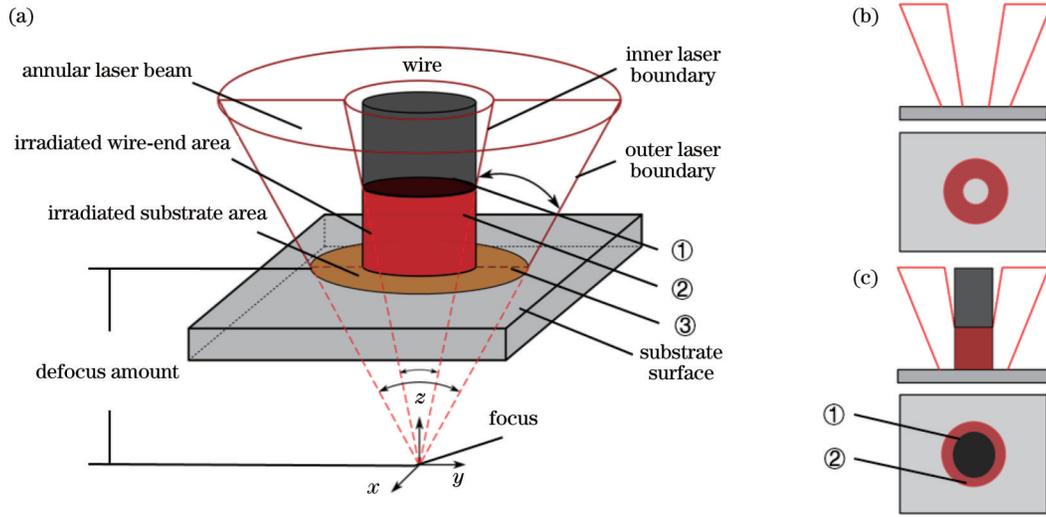


图 4 激光辐照示意图。(a)三维模型图;(b)无丝时辐照情况;(c)有丝时辐照情况

Fig. 4 Diagrams of laser irradiation. (a) Three-dimensional model; (b) irradiation without wire; (c) irradiation with wire

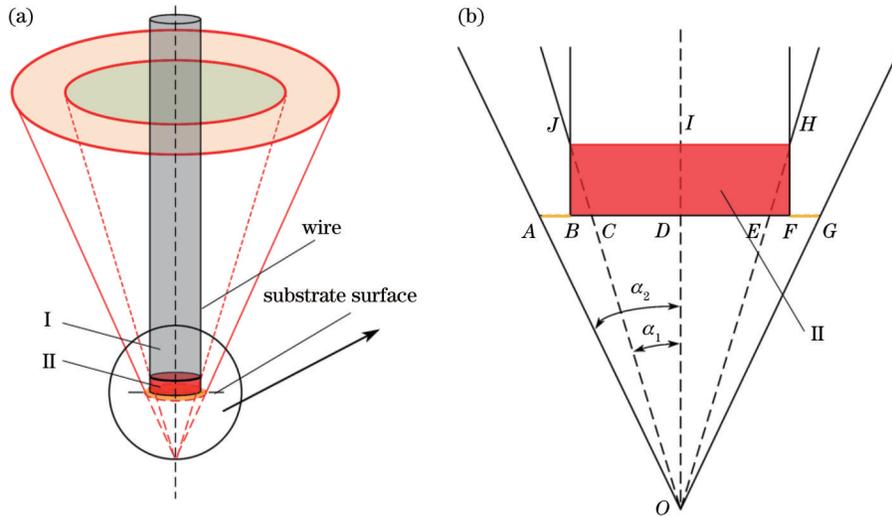


图 5 辐照情况数学模型。(a)辐照情况三维模型;(b)辐照模型简化示意图

Fig. 5 Mathematical model of irradiation situation. (a) Three-dimensional model of irradiation situation; (b) simplified diagram of irradiation model

根据式(5)中得出的类高斯能量分布数学模型的函数曲线和图 5(b)中的辐照系数示意图,得到图 6(a)所示的基板受辐照区域的能量密度分布示意图。激光束的有效辐照区域为图中虚线环形区域,其能量分布为双高斯对称分布模型,并且根据受辐照对象的不同,激光束的有效辐照区域分为两个部分,即基板表面受辐照区域与丝材遮挡部分。根据图 5(b)、图 6(a)、图 6(b)中能量分布函数曲线中画竖向虚线部分即为基板受到激光束照射的能量。通过面积积分的形式求出其整个区域的能量,其值则为当前沉积工作平面下有丝材情况下基板受到激光辐照所获得的能量,如图 6(b)中所示环形区域上方能量,这部分能量  $E_s(x)$  可表示为

$$E_s(x) = \int_{r_w}^{r_b} D(x) \cdot 2\pi x dx, \quad (6)$$

式中:  $r_w$  为丝材半径;  $r_b$  为环形光斑外圆半径。同理可求得在当前沉积工作平面下无丝材送入情况下基板受到激光辐照后所获得的能量 [图 4(b)], 其值  $E(x)$  可通过积分求出:

$$E(x) = \int_0^{r_b} D(x) \cdot 2\pi x dx. \quad (7)$$

根据基板受辐照系数比值  $P_{st}$  即沉积工作平面上基板受激光辐照的能量占总能量的比值,可以求得当前情况下  $P_{st}$  的具体值为

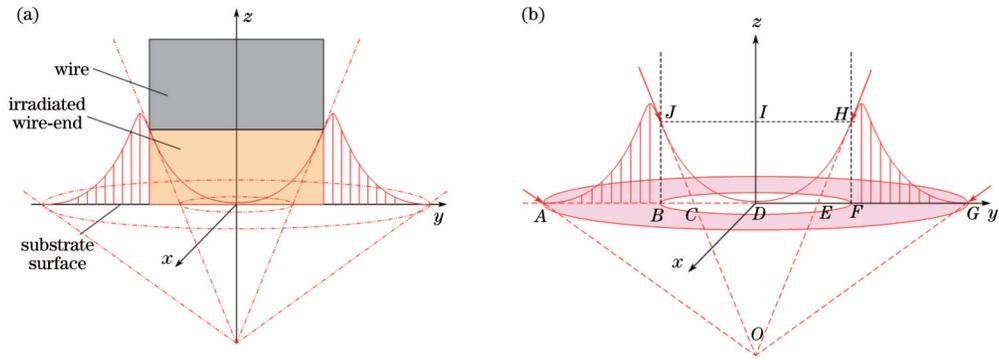


图 6 基板受辐照区域能量密度分布示意图。(a)受辐照示意图;(b)受辐照简化图

Fig. 6 Energy density distribution diagrams of irradiated substrate area. (a) Diagram of irradiated situation; (b) simplified diagram of irradiated situation

$$P_{Si} = \frac{E_s(x)}{E(x)} \times 100\% = \frac{\int_{r_w}^{r_b} D(x) \cdot 2\pi x dx}{\int_0^{r_b} D(x) \cdot 2\pi x dx} \times 100\% \quad (8)$$

### 3.2 工艺参数对基板受辐照比值的影响

根据上述定义的激光受辐照比值  $P_{Si}$ , 在不同的工作平面会获得不同的  $P_{Si}$  的值。通过改变激光沉积头与基板表面的距离, 即改变工艺参数中的离焦量可获得不同工作平面。为了避免其他工艺参数如激光功率  $P$ 、送丝速度  $V_w$ 、扫描速度  $V_s$  对于测算  $P_{Si}$  的影响, 将上述三者保持不变, 仅改变离焦量  $F$  的值, 参数设置如表 2 所示。激光器的主要参数如表 3 所示, 激光模式为多模激光, 激光器工作模式为连续模式, 光纤接口类型为 Quartz Block Head。不同离焦量下的光斑有不同的直径尺寸, 可以通过式(1)与式(2)来求得具体的内外边界尺寸, 具体光斑情况如图 7 所示。不选择正离焦量值的工作平面的原因在于: 在正离焦的情况下, 丝材

表 2 沉积工艺参数

| Table 2 Deposition process parameters          |                       |
|--|-----------------------|
| Parameter                                      | Value                 |
| Power $P$ / W                                  | 3800                  |
| Feeding speed $V_w$ / (mm · s <sup>-1</sup> )  | 26                    |
| Scanning speed $V_s$ / (mm · s <sup>-1</sup> ) | 2                     |
| Defocus amount $F$ / mm                        | 0, -1, -2, -3, -4, -5 |

表 3 激光器主要参数

| Table 3 Main parameters of laser        |          |
|---|----------|
| Parameter                               | Value    |
| Rated output power / W                  | 6000     |
| Center wavelength / nm                  | 1080 ± 5 |
| Photoelectric conversion efficiency / % | ≥ 35     |
| Output fiber diameter / μm              | 100      |

在激光产生的一瞬间就在基板上表面处熔化, 会引发熔丝初始阶段的不稳定性问题。

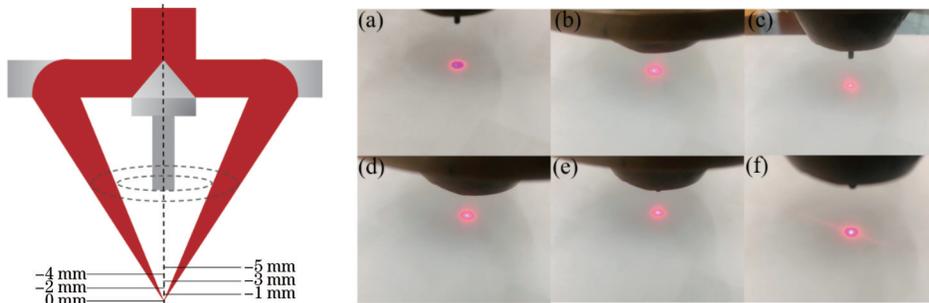


图 7 实际光斑图。(a)  $F=0$ ; (b)  $F=-1$  mm; (c)  $F=-2$  mm; (d)  $F=-3$  mm; (e)  $F=-4$  mm; (f)  $F=-5$  mm

Fig. 7 Diagrams of actual light spots. (a)  $F=0$ ; (b)  $F=-1$  mm; (c)  $F=-2$  mm; (d)  $F=-3$  mm; (e)  $F=-4$  mm; (f)  $F=-5$  mm

根据式(5), 激光束在任意离焦量平面(沉积工作平面)的能量分布呈现“双高斯”分布, 在涉及具体离焦量平面时, 需要已知环形激光束的具体外径尺寸以便求得能量分布的具体数值。当离焦量为 0 时, 激光束的焦点位置为实心光斑, 此处能量分布呈现高斯分布

形式。根据基板受辐照比值的表达式计算并绘制出如图 8 所示的能量分布图, 阴影部分面积即为丝材所遮挡的激光束强度。

当离焦量为 0 时: 无丝材送入时, 实心光斑处能量分布呈高斯分布, 中心能量高而四周能量较低; 有丝材

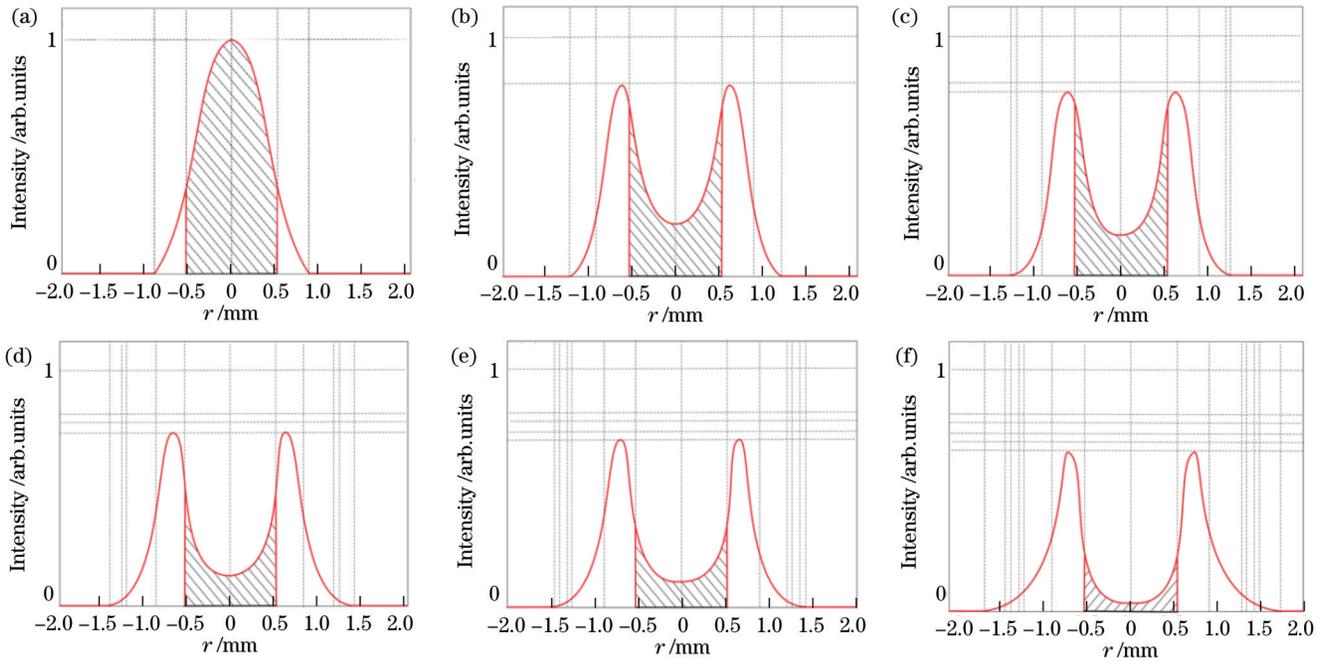


图 8 不同  $r$  下的能量强度变化趋势。(a)  $F=0, P_{si}=36\%$ ; (b)  $F=-1 \text{ mm}, P_{si}=50\%$ ; (c)  $F=-2 \text{ mm}, P_{si}=58\%$ ; (d)  $F=-3 \text{ mm}, P_{si}=65\%$ ; (e)  $F=-4 \text{ mm}, P_{si}=70\%$ ; (f)  $F=-5 \text{ mm}, P_{si}=73\%$

Fig. 8 Energy intensity curves for different  $r$ . (a)  $F=0, P_{si}=36\%$ ; (b)  $F=-1 \text{ mm}, P_{si}=50\%$ ; (c)  $F=-2 \text{ mm}, P_{si}=58\%$ ; (d)  $F=-3 \text{ mm}, P_{si}=65\%$ ; (e)  $F=-4 \text{ mm}, P_{si}=70\%$ ; (f)  $F=-5 \text{ mm}, P_{si}=73\%$

送入时,丝材由于处于中心轴位置,遮挡了大部分激光能量,此时的基板受辐照比值最小,丝材遮光率最高,如图 8(a)所示。随着离焦量绝对值的增加,最大光斑外径逐渐增加,即具有能量处的光斑直径随着离焦量的增大而增大;激光束整体能量呈现下降趋势,即峰值能量呈现降低趋势;能量分布越呈现“双高斯”分布状;光斑能量分布函数曲线的中心“凹”型区域的高度减小,宽度增大,即从“V”型缓慢过渡至“U”型,那么从中心送入的丝材所遮挡的激光束能量占比就会相应地减小,但这并不意味着基板受到激光束辐照的能量变大,因为根据光束聚焦处的能量强度最大,随着与焦点的距离增大,相应的激光束总体能量强度就会减小。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 熔丝过程过渡方式

激光熔丝沉积技术中的过渡方式可分为“液滴过渡”与“液桥过渡”,其划分的标准为宏观形貌下熔道的连续程度。根据熔道表面的波纹度进行划分:表面明显呈滴状与“骨”状的归类为激光熔丝沉积的“液滴”过渡熔丝方式;表面呈现连续性光滑状态的归类为“液桥”过渡熔丝方式。将过渡方式与基板受辐照比值  $P_{si}$  建立联系,研究并分析不同  $P_{si}$  值对熔丝方式的影响程度。通过上述沉积工艺参数成形后的熔道形貌如图 9 所示,各熔道几何参数如表 4 所示。

在涉及评估熔道质量的宽高比  $K$  与稀释率方面,宽高比  $K$  值即熔宽与熔高的比值,用来评估是否适合

于多道搭接与多层堆积的指标。稀释率定义为以基板水平面为分割线,下方丝材渗透入基板的截面面积与总截面面积(丝材渗透入基板的截面面积与丝材基板上沉积熔道的横截面积之和)的比值。

在实际激光熔丝沉积实验阶段,离焦量  $F$  的取值为 0、-1、-2 mm 时会出现“液滴”过渡的情况,如图 9(a)~(c)所示。随着辐照比  $P_{si}$  的增大,熔道宽度减小,熔道高度增加,熔道深度减小,稀释率降低。随着辐照比的增加,宽高比逐渐减小,过小的宽高比将会导致多层堆积成形的不稳定。从以往的实验结果来看:较大熔高的熔道适用于搭接成形,较大熔宽的熔道适用于堆积成形;稀释率不断降低,丝材对于基板的渗透率降低,同时丝材对于基板本身的影响也在减小。

离焦量  $F$  的取值为 -3、-4、-5 mm 时会出现“液桥”过渡的情况,如图 9(d)~(f)所示。图 9(e)为三组实验中最适合于搭接的熔道形貌,宽高比  $K$  处于 3.5 附近,宽度为 8.24 mm,高度为 2.32 mm。在此基础上,无论  $P_{si}$  增加或者减小,稀释率都提高。随着  $P_{si}$  增大,离焦量绝对值增大,激光束作用于基板的范围变大,从而导致沉积后熔道宽度增大;熔道表面形貌变得更为光滑,粗糙度降低。

由上述情况可知:随着辐照比的增大,“液滴”过渡方式的加工过程中,熔道形貌趋于紧密,熔道稀释率在一定范围内降低,熔道宽高比在一定范围内减小;熔深随  $P_{si}$  的增大而减小的趋势源于基板直接受到激光照射的比值过小,导致大部分能量传递给了丝材,少部分



图 9 沉积熔道形貌及横截面示意图。(a)  $P_{\text{Si}}=36\%$ ; (b)  $P_{\text{Si}}=50\%$ ; (c)  $P_{\text{Si}}=58\%$ ; (d)  $P_{\text{Si}}=65\%$ ; (e)  $P_{\text{Si}}=70\%$ ; (f)  $P_{\text{Si}}=73\%$   
 Fig. 9 Diagrams of deposited tracks and their cross sections. (a)  $P_{\text{Si}}=36\%$ ; (b)  $P_{\text{Si}}=50\%$ ; (c)  $P_{\text{Si}}=58\%$ ; (d)  $P_{\text{Si}}=65\%$ ; (e)  $P_{\text{Si}}=70\%$ ; (f)  $P_{\text{Si}}=73\%$

表 4 沉积熔道及其截面几何参数

Table 4 Geometric parameters of deposited tracks and their cross sections

| Image<br>( $P_{\text{Si}}$ ) | Width<br>$W /$<br>mm | Height<br>$H /$<br>mm | $K$  | Depth /<br>mm | Dilution<br>rate /<br>% |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|------|---------------|-------------------------|
| Fig. 9(a) (36%)              | 8.20                 | 1.82                  | 4.50 | 1.00          | 34.2                    |
| Fig. 9(b) (50%)              | 7.84                 | 2.02                  | 3.88 | 0.94          | 31.4                    |
| Fig. 9(c) (58%)              | 7.02                 | 2.16                  | 3.25 | 0.82          | 24.2                    |
| Fig. 9(d) (65%)              | 8.00                 | 1.64                  | 4.87 | 1.52          | 38.2                    |
| Fig. 9(e) (70%)              | 8.24                 | 2.32                  | 3.55 | 1.60          | 30.4                    |
| Fig. 9(f) (73%)              | 8.42                 | 2.48                  | 3.39 | 1.84          | 40.9                    |

能量用来熔化基板,形成熔池,这可以理解为此时的熔池是处于一个稳定与不稳定的临近状态。“液桥”过渡方式出现在辐照比较强的情形,同时随着辐照比的增大,熔道形貌展现紧凑与窄高的特点,熔道稀释率变化不定,熔道宽高比在一定范围内减小;熔深呈现增大的趋势源于基板直接受到激光照射的比值过大,导致大部分能量传递给了基板,少部分能量用来熔化丝材,这可以理解熔池将丝材进一步熔化沉积在基板表面。

#### 4.2 熔丝过程稳定性分析

通过高速摄像机抓拍熔丝过程,其帧速为  $500 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$ ,进行逐帧解析后可以发现“液滴”过渡过程与“液桥”过渡过程的变化,如图 10 所示,图中:  $W$  代表照片宽度,  $H$  代表照片高度;图 10(a) 中 258/2880 代表第 258 帧,总共 2880 帧,其他分图中比值含义类似。

在“液滴”过渡方式下熔丝过程的开始阶段,丝材

瞬间被熔化成金属液滴并悬垂于丝材末端,并且在后续的熔丝过程中,丝材不断重复熔化、断开的过程。这是由于激光束直接照射丝材的能量过高,使得整个熔丝阶段,丝材一直处于过度熔化的状态。在“液桥”过渡方式下熔丝过程的开始阶段,丝材逐渐被熔化,随着丝材被匀速送入,丝材与基板在基板表面熔融处稳定汇合,并且随着激光束的移动,丝材熔化末端始终与基板表面熔池稳定相连,后续丝材并未出现如“液滴”过渡中的悬垂金属球现象,仅会在整个熔丝阶段的初始时刻出现短暂的金属液滴状。将上述两种过渡方式进行简要的分解,如图 11 所示。

图 11(a)~(c) 为“液滴”过渡方式,其过程为:丝材与基板表面接触,激光束开始加热受辐照区域处的丝材,丝材受热开始熔化,基板表面被激光束加热后温度上升;丝材受热立刻熔化成金属液滴悬挂在未熔化的丝材上,逐步将热量传递给上段丝材;随着丝材不断送入,悬挂于丝材末端的金属球接触基板表面并与基板进行结合;激光束照射丝材的能量过大,导致金属液滴与基板结合后马上被激光熔断,形成颜色较深的已沉积“滴状”球,而在丝材末端继续形成新的悬垂金属液滴;新形成的金属液滴与已沉积的“滴状”球接触并结合,同时金属液滴一部分与基板熔化部分结合;后续不断重复上述丝材“熔、断、熔、断”的过程。图 11(d)~(f) 为“液桥”过渡方式。“液桥”过渡方式与“液滴”过渡方式的显著区别在于整个起始阶段,“液桥”过渡方式中丝材并未马上被熔化成金属球滴而是随着丝材的送入逐渐接触基板,然后沿着扫描方向平稳连续地形成熔道,并不会出现“熔、断、熔、断”的现象。

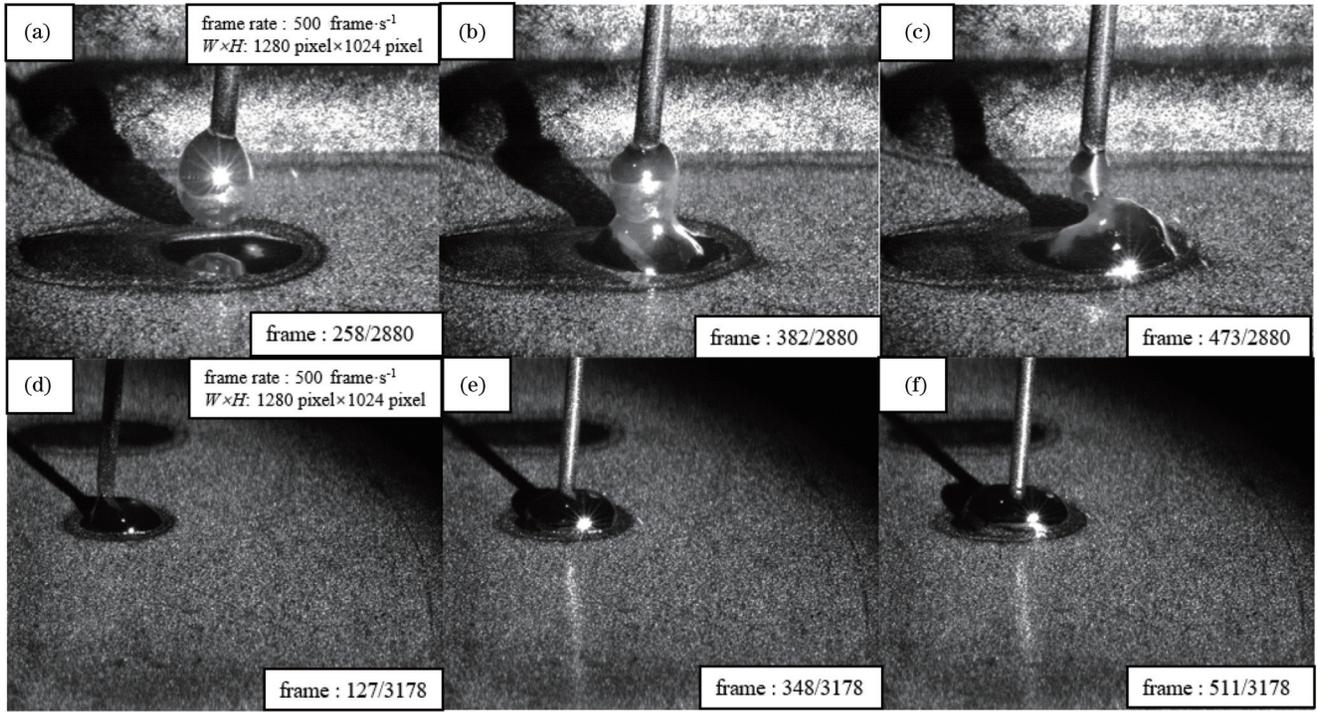


图 10 高速相机拍摄熔丝过程的示意图。“液滴”过渡方式(共 2880 帧)的(a)第 258 帧、(b)第 382 帧和(c)第 473 帧;“液桥”过渡方式(共 3178 帧)的(d)第 127 帧、(e)第 348 帧和(f)第 511 帧

Fig. 10 Diagrams of wire melting process obtained by high-speed camera. (a) 258th frame, (b) 382nd frame, and (c) 473rd frame for "droplet" transition method (2880 frames); (d) 127th frame, (e) 348th frame, and (f) 511st frame for "bead" transition method (3178 frames)

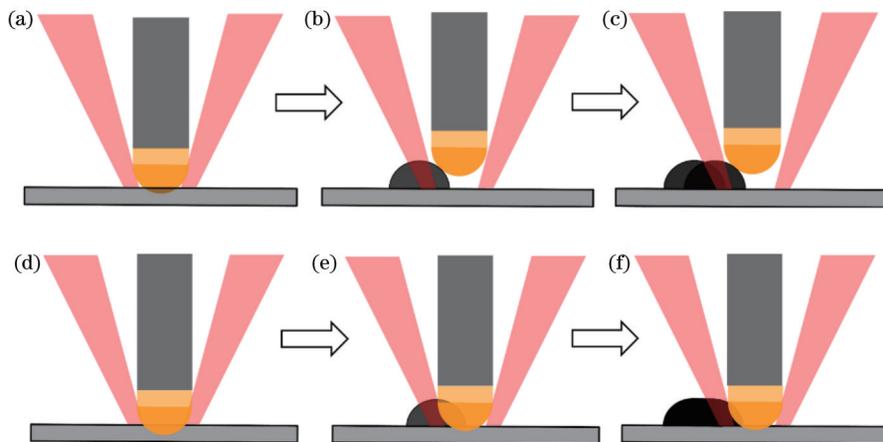


图 11 熔丝过程阶段分解示意图。(a)~(c)“液滴”过渡方式;(d)~(f)“液桥”过渡方式

Fig. 11 Divided pictures of wire melting process. (a)~(c) "Droplet" transition method; (d)~(f) "bead" transition method

## 5 结 论

基于光丝同轴技术进行激光熔化沉积实验,从实验结果可以看出:随着离焦量绝对值的增大,基板受辐照比增大,其值在 36%~73% 之间,辐照比与熔丝过程的稳定性有着密切联系。较小的基板受辐照比值会引起“液滴”过渡熔丝行为,该方式处于稳定与不稳定的临界状态,熔道形貌不连续呈“滴状”,表面“滴状”间隔会随着辐照比的增大而减小,熔道稀释率较低。较大的基板受辐照比值会引起“液桥”过渡熔丝行为,该方式在

整个熔丝过程都处于一个相对稳定的状态;宽高比的范围在 3.39~4.87 之间,该范围适合多熔道搭接,但熔道的稀释率较高,介于 30.4%~40.9% 之间,不适合多层堆积。在后续的激光熔丝沉积实验中,当功率为 3700 W、送丝速度为 25 mm/s、扫描速度为 3 mm/s、离焦量为 4.5 mm 时能获得更为稳定的熔丝过程,此时的基板受辐照比值为 71.8%,是目前的优化窗口值。

## 参 考 文 献

[1] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Wire-feed additive

- manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 465-481.
- [2] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [3] Khairallah S A, Anderson A T, Rubenchik A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones[J]. Acta Materialia, 2016, 108: 36-45.
- [4] Huang W H, Chen S J, Xiao J, et al. Laser wire-feed metal additive manufacturing of the Al alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106627.
- [5] Harwell L D, Griffith M L, Greene D L, et al. Energetic additive manufacturing process with feed wire: US6143378[P]. 2000-11-07.
- [6] Syed W U H, Pinkerton A J, Li L. A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping[J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1/2/3/4): 268-276.
- [7] Wang F, Mei J, Wu X H. Compositionally graded Ti6Al4V + TiC made by direct laser fabrication using powder and wire[J]. Materials & Design, 2007, 28(7): 2040-2046.
- [8] 果春焕, 严家印, 王泽昌, 等. 金属激光熔丝增材制造工艺的研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 5-10.  
Guo C H, Yan J Y, Wang Z C, et al. Research progress on metal laser fuse additive manufacturing process[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(16): 5-10.
- [9] 果春焕, 王泽昌, 严家印, 等. 增减材混合制造的研究进展[J]. 工程科学学报, 2020, 42(5): 540-548.  
Guo C H, Wang Z C, Yan J Y, et al. Research progress in additive-subtractive hybrid manufacturing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(5): 540-548.
- [10] 吉绍山, 刘凡, 傅戈雁, 等. 三光束光内同轴送丝激光熔覆成形新方法研究[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 285-293.  
Ji S S, Liu F, Fu G Y, et al. New forming method of coaxial wire feeding inside three beams laser cladding[J]. Surface Technology, 2019, 48(4): 285-293.
- [11] Ji S S, Liu F, Shi T, et al. Effects of defocus distance on three-beam laser internal coaxial wire cladding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34: 45.
- [12] 刘凡, 吉绍山, 傅戈雁, 等. 三光束激光熔覆工艺参数对熔覆层几何特征影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(15): 227-237.  
Liu F, Ji S S, Fu G Y, et al. The influence of process parameters on geometry characteristics by three beams laser cladding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(15): 227-237.
- [13] Bambach M, Sizova I, Kies F, et al. Directed energy deposition of Inconel 718 powder, cold and hot wire using a six-beam direct diode laser set-up[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47: 102269.
- [14] Kelbassa J, Biber A, Wissenbach K, et al. Influence of focal length on the laser metal deposition process with coaxial wire feeding[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10911: 109110D.
- [15] Nowotny S, Brueckner F, Thieme S, et al. High-performance laser cladding with combined energy sources[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(S1): S17001.
- [16] 蒋伟伟, 傅戈雁, 张吉平, 等. 三分光束光内同轴送丝熔覆层几何形貌预测[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0305005.  
Jiang W W, Fu G Y, Zhang J P, et al. Prediction of geometrical shape of coaxial wire feeding cladding in three-beam[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0305005.
- [17] 石拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003003.  
Shi T, Wang Y Q, Lu B H, et al. Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003003.
- [18] 张荣伟, 万乐, 石拓, 等. 薄壁空心球体的多自由度随形激光熔化沉积制备工艺与精度[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202018.  
Zhang R W, Wan L, Shi T, et al. Multi-degree of freedom conformal laser metal deposition process and precision of thin-walled hollow sphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202018.
- [19] 王宇, 石拓, 石世宏, 等. 弧面扭曲结构件激光内送粉熔覆成形研究[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202015.  
Wang Y, Shi T, Shi S H, et al. Inside-laser powder feeding cladding forming of arc-shaped twisted structural parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202015.
- [20] 王明雨, 石世宏, 石拓, 等. 基于光内送粉多元扭曲结构的随形离散分层成形研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002114.  
Wang M Y, Shi S H, Shi T, et al. Conformal discrete layering of multivariant twisted structure based on inside-laser powder feeding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002114.
- [21] 李春生. 三维成形中空环形激光传输建模及光料耦合分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.  
Li C S. Modeling for transmission and conversion of hollow circular laser and analysis on coupling between laser and materials in three-dimensional laser manufacturing[D]. Suzhou: Soochow University, 2010.
- [22] Shi J J, Zhu P, Fu G Y, et al. Geometry characteristics modeling and process optimization in coaxial laser inside wire cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 341-348.

## Influence of Substrate Irradiation Proportion on Stability of Laser Coaxial Wire-Melting Deposition

Jin Lei<sup>1</sup>, Shi Shihong<sup>1\*</sup>, Wei Chao<sup>1</sup>, Cao hao<sup>1</sup>, Shi Tuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

### Abstract

**Objective** Laser wire-melting deposition is a directed energy deposition technology that uses the laser as a heat source to melt the wire materials. During the wire feeding and melting processes, the annular laser beam is blocked and separated by

the central wire material. As a result, only part of the beam is irradiated onto the substrate. Therefore, research needs to be conducted to investigate the influences of the beam irradiation proportions of the wire and the substrate on the stability of laser coaxial wire-melting deposition. The mechanisms and effects of two different transition processes in wire-melting deposition, namely, "droplet" transition and "bead" transition, are analyzed and explained through the relationship between the laser irradiation proportions of the wire and the substrate.

**Methods** To study and analyze the mechanism and effect of the laser coaxial wire-melting process, this paper explored the influence of the proportion of the laser energy absorbed by the substrate with a self-developed inside-laser coaxial wire-feeding processing head. The mechanism of the melting transition process was analyzed with a high-speed camera at 500 frame/s. In addition, the deposition process and the relationship between the dynamic process and the experimental parameters in the wire-melting deposition technology were studied by mathematical model calculation and experiment verification.

**Results and Discussions** By geometric beam conversion, this paper obtained a mathematical model of the energy intensity of the annular laser beam in the negative defocus region (Fig. 3). Laser irradiation (Fig. 4) and the mathematical model of irradiation situation (Fig. 5) were illustrated. The substrate irradiation proportion was defined and calculated. The energy distribution (Fig. 6) in the irradiated area was obtained by combining the mathematical model and the shape form. Two types of transition processes in wire-melting deposition were photographed by a high-speed camera, and the irradiation proportion curves (Fig. 8) were drawn to characterize the stability condition of wire-melting deposition.

**Conclusions** According to the laser melting deposition experiment using the coaxial wire feeding technology, the substrate irradiation proportion, which is between 36% and 73%, increases as the defocusing amount increases. The wire-melting deposition process is closely related to the substrate irradiation proportion. Specifically, a small proportion will cause the "droplet" transition behavior that is in a critical state between stability and instability. The surface morphology of the melting track is discontinuous and droplet-like, and the intervals among the droplets increase as the proportion decreases. In contrast, a large proportion will lead to the "bead" transition behavior that is in a relatively stable state during the whole wire-melting process. The aspect ratio of the melting track is between 3.39 to 4.87. In the following laser wire-melting deposition experiment, a better melting track shape is achieved when the laser power is 3700 W, the wire-feeding speed is  $25 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , the scanning speed is  $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , and the defocusing amount is 4.5 mm. In this case, the substrate irradiation proportion is 71.8%.

**Key words** laser optics; laser melting deposition; inside-laser coaxial wire feeding; substrate irradiation proportion; process stability; high-speed photography