

## 基于中空激光光内送粉技术的扇形结构件激光成形研究

周 斌<sup>1</sup>, 石世宏<sup>1</sup>, 邓志强<sup>1</sup>, 石 拓<sup>2</sup>, 傅戈雁<sup>1</sup>, 方琴琴<sup>1</sup>

(1. 苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215021;

2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 基于中空激光光内送粉技术, 运用实时变姿态方法和法向分层方法, 进行了具有不等高熔道特征的扇形结构件成形研究。分析了熔道层高与扫描速度之间的对应关系, 结合不等高熔道的几何模型和熔道层高与扫描速度之间的关系, 采用分段变速的方法熔覆出了不等高熔道。在此基础上进行多道不等高熔道堆积, 成形出了扇形薄壁墙结构。分析表明, 所获得成形件尺寸精度较高, 相对尺寸误差控制在 7% 以内; 成形件各处显微组织差异较小, 组织细密、均匀。

**关键词:** 中空激光光内送粉; 变姿态; 分段变速; 不等高熔道; 扇形结构件

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0906007

## Laser cladding forming of fan-shaped part based on hollow laser beam inside powder feeding technology

Zhou Bin<sup>1</sup>, Shi Shihong<sup>1</sup>, Deng Zhiqiang<sup>1</sup>, Shi Tuo<sup>2</sup>, Fu Geyan<sup>1</sup>, Fang Qinqin<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on hollow laser beam inside powder feeding technology, the study of forming fan-shaped part whose cladding height was unequal was carried out by the method of variable attitude forming and normal lamination method. The connection between cladding height and scanning velocity was analyzed. The cladding with unequal height was formed by the method of piecewise variable velocity combining geometric model and the connection above. Based on this method, the fan-shaped part was formed. The experimental result indicates that the formed part has high-precision dimension and good surface quality. In addition, the microstructures of the part at different parameter have no significant differences, and all achieve small grain size and compact texture.

**Key words:** hollow laser beam inside powder feeding; variable attitude; variable velocity; cladding with unequal height; fan-shaped part

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100300); 江苏省重点研发项目(BE2015067)

作者简介: 周斌(1992-), 男, 硕士生, 主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。Email: 20145229019@stu.suda.edu.cn

导师简介: 石世宏(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光快速成形方面的研究。Email: shishihong@suda.edu.cn

## 0 引言

激光近净成形技术 (Laser Engineered Net Shaping, LENS) 是 20 世纪 90 年代中后期基于激光熔覆技术和快速原型技术的基础上发展起来的一种新技术。它综合了激光熔覆技术与快速成形技术的优点, 无需借助刀具和模具就能直接制造出各种复杂的金属零件, 具有成形零件复杂、组织性能优良、加工材料范围广泛、柔性化程度高、成本较低等独特优点, 受到了业界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。

然而, LENS 技术为无支撑自由成形, 一般限于在水平面或小角度斜面上熔覆堆积, 故无法成形具有如悬垂、扇形类结构特征的零件。苏州大学的石拓运用光内送粉成形技术与空间变姿态法向分层成形技术, 成功熔覆成形出悬垂薄壁件<sup>[4]</sup>。但是, 仅通过光内送粉成形技术与空间变姿态法向分层成形技术是无法成形扇形结构件的, 扇形结构件的结构特征决定了不等高熔道的成形是成形扇形结构件的基础。文中提出了一种不等高熔道的成形方法, 并结合光内送粉技术与空间变姿态法向分层成形技术成功堆积出了扇形结构成形件。

## 1 光内送粉技术与空间变姿态法向分层技术

### 1.1 光内送粉成形系统

实验采用笔者实验室自主研发的光内送粉喷头(图 1)。圆形激光束经过光学系统的转换成环形激光束; 单束粉管竖直置于中空的无光区域, 并保证粉束与激光束同轴, 粉末垂直送入熔池<sup>[5-6]</sup>。

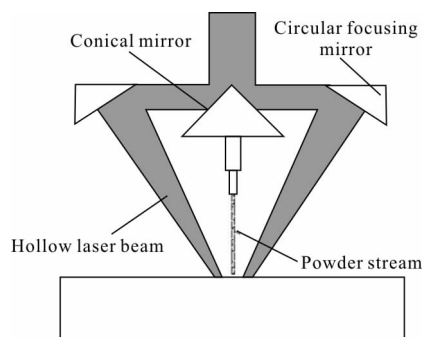


图 1 中空激光光内送粉原理

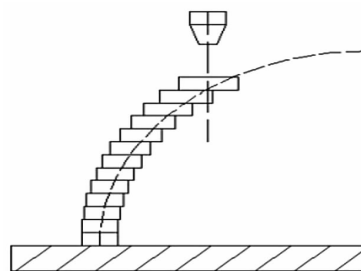
Fig.1 Principle of hollow-laser beam inside powder feeding

该实验要求激光熔覆喷头能实现大角度倾斜, 因此对粉束的汇聚性有较高的要求。光内送粉喷头

以垂直基面单束送粉方式使其空间变姿态成形制造成为可能。载气送粉方式能克服重力影响, 将粉束精准送进熔池。实验表明, 载气送粉的粉束细、准、挺、直, 汇聚性程度高<sup>[7]</sup>, 为该实验变姿态分层熔覆堆积奠定了良好的基础。

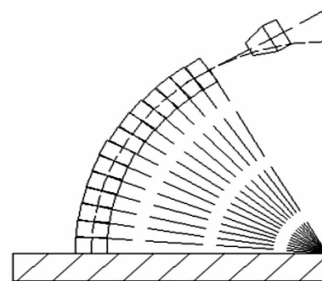
### 1.2 空间变姿态法向分层技术

现有分层技术通常为水平分层法, 如图 2(a)所示。它是保持熔覆喷头始终竖直, 在水平方向上做不同路径的扫描, 从而获得一定形状的结构件。从扫描路径上看, 后一层的路径是前面一层路径的重复或者是某些位置的路径变化<sup>[8]</sup>。文中采用一种法向分层法, 如图 2(b)所示。它是沿着轮廓的曲率半径方向分层, 同时改变喷头的姿态, 使得喷头轴线方向始终与已成形成面的法线方向一致。成形件轮廓的切线方向连续变化, 则喷头的姿态需要连续变化才能保证其与成形面法线方向保持一致<sup>[9]</sup>。



(a) 水平分层堆积

(a) Horizontal layered accumulation



(b) 法向分层堆积模型

(b) Normal direction layered accumulation

图 2 不同分层方式激光堆积示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser accumulation with different layered ways

对文中成形扇形结构件而言, 如采用水平分层法, 当上下层位错过大时会造成熔池悬垂部分的流淌, 从而导致成形件壁厚不均匀乃至塌陷。如采用法向分层法, 上下层之间无错位, 可顺利实现扇形

弯曲结构的堆积。法向分层法突破了传统方法的局限,能消除错位台阶,实现扇形结构等大角度悬垂件的成形。

## 2 实验

### 2.1 实验设备

激光喷头采用光内送粉喷头。激光器采用 YLS-2000-TR2 光纤激光器,最大输出功率 2 kW。运动机构采用六轴联动的 KuKa 机械臂,运用该机械臂能够实现喷头的实时变姿态运动。送粉器采用 GTV PF2/2 的送粉器,该送粉器送粉均匀、流畅,满足该实验的要求。送粉载气与准直保护气均采用氮气。

基板采用 45 钢,堆积材料为 Fe313 铁基合金粉末,它的颗粒大小为 150~325 目,成分如表 1 所示。

表 1 Fe313 成分表

Tab.1 Composition of Fe313

Composition	C	Si	Cr	B	Fe
Mass fraction	0.1%	2.5%~3.5%	13%~17%	0.5%~1.5%	BAL.

### 2.2 不等高熔道的成形

对扇形结构件进行法向分层规划如图 3 所示。其由多个不等高熔道单元 *abcd* 组成。因此,不等高熔道的成形是扇形结构成形的基础。

将图 3 所示不等高熔道单元在曲率半径方向

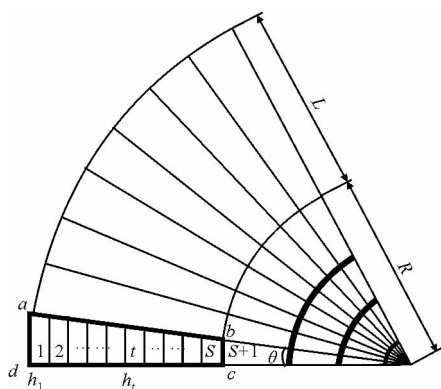


图 3 不等高熔道的几何模型

Fig.3 Model of the cladding with unequal height

上分成 *S* 个部分,得到 *S*+1 段高度,分别记为  $h_1, h_2, \dots, h_{s+1}$ 。建立不等高熔道的几何模型为:

$$\frac{1}{R} \times h_1 \left[ (R+L) - \frac{L}{S} \times (t-1) \right] = h_t \quad (1)$$

式中:*R* 为扇形结构件的内弯曲率半径;*L* 为扇形结

构件的宽度;*t* 为变量,它的取值区间是:[1,*S*]。

研究得知,熔覆层的层高主要受扫描速度、激光功率、离焦量以及送粉量的影响<sup>[10-11]</sup>。当激光功率、离焦量以及送粉量参数保持恒定,扫描速度的变化会影响单位时间内进入熔池的送粉量。扫描速度大,单位时间进入熔池的粉末就少,熔覆层的层高就低,反之层高就高。设熔覆层的层高与扫描速度在一定的范围内近似成线性关系,层高与扫描速度间的工艺模型如下:

$$H = a + b \times V \quad (2)$$

式中:*H* 为熔覆层的层高;*a* 与 *b* 为待定系数;*V* 为熔覆喷头的扫描速度。

取激光功率  $P=1$  kW,送粉速度  $M_p=8$  g/min,离焦量  $f=-3.5$  mm,不同扫描速度 ( $V=4\sim 8$  mm/s) 下单道熔覆层高度变化数据如表 2 所示。

表 2 不同扫描速度下的单道高度

Tab.2 Cladding height of different scanning speeds

Velocity/ mm·s <sup>-1</sup>	Power/kW	Defocus- ing	Powder amount/ g·min	Cladding height/mm
4	1	-3.5	8	0.8
4.5	1	-3.5	8	0.763
5	1	-3.5	8	0.703
5.5	1	-3.5	8	0.643
6	1	-3.5	8	0.603
6.5	1	-3.5	8	0.55
7	1	-3.5	8	0.485
7.5	1	-3.5	8	0.442
8	1	-3.5	8	0.395

对表 2 中的单道熔道高度数据进行回归,得到 *H* 关于 *V* 的工艺模型为:

$$H = 1.222 - 0.104 \times V \quad (3)$$

将由公式(2)确定的各段层高值  $h_1, h_2, \dots, h_{s+1}$  代入公式(3)确定熔道各段的扫描速度值  $V_1, V_2, \dots, V_{s+1}$ ,采用表 1 的熔覆工艺参数从而得到图 4 所示的不等高熔道。由图 4 可见,熔覆出的熔道表面平整,无裂纹、疏孔等缺陷。



图 4 不等高熔道

Fig.4 Cladding with unequal height

### 2.3 扇形薄壁墙结构成形

扇形薄壁件设计尺寸如图 5 所示。该扇形薄壁件的内弯曲率半径  $R=55\text{ mm}$ ，宽度  $L=60\text{ mm}$ ，扇形圆心角为  $75^\circ$ ，壁厚  $3\text{ mm}$ 。

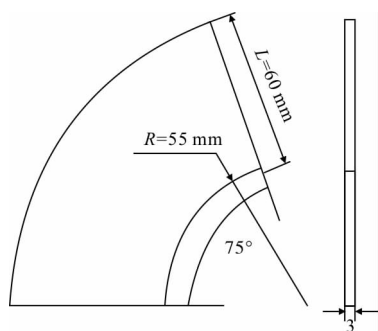


图 5 成形件设计尺寸

Fig.5 Design size of formed part

对扇形结构件的设计模型法向分层 180 层，从而分层角度  $\theta$  与不等高熔道的第一段层高值  $h_1$  为：

$$\theta = \frac{75}{180} = 0.41^\circ \quad (4)$$

$$h_1 = R \times \theta = 55 \times 0.41 \times \frac{\pi}{180} = 0.39\text{ mm} \quad (5)$$

将求出来的数值  $h_1$  代入公式(2)确定其余各段层高值。之后将确定的各段层高值  $h_1, h_2, \dots, h_{s+1}$  代入公式(3)从而确定熔道各段的扫描速度值  $V_1, V_2, \dots, V_{s+1}$ 。

取激光功率  $P=1\text{ kW}$ ，送粉速度  $M_p=8\text{ g/min}$ ，离焦量  $f=-3.5\text{ mm}$ ，以计算确定的各段扫描速度值进行变速激光熔覆，完成第一道不等高熔道。将熔覆头偏转  $\theta$  角度并在对应位置提升一个单道高度，从而完成熔覆头的姿态调整。待姿态调整完毕后，重复上述步骤最终熔覆成形图 6 的成形件。

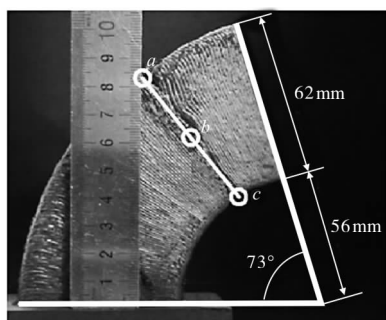


图 6 成形件实际尺寸

Fig.6 Size of formed part

## 3 成形件检测

### 3.1 尺寸分析

测量成形件的尺寸(图 5)并与设计尺寸(图 6)进行对比发现：成形件尺寸与设计尺寸基本一致，误差范围控制在 7% 以内。

如图 5 所示，成形件的设计壁厚为  $3\text{ mm}$ 。图 7 为成形件壁厚沿高度方向的趋势图，由图可知：成形件的壁厚基本维持在设计尺寸范围附近并做上下跳动。壁厚的最大绝对误差  $0.2\text{ mm}$ ，最大相对误差  $6.7\%$ 。壁厚沿高度方向产生上下跳动的原因是：由于成形系统没有加装闭环控制系统，因此设定每层的实时提升量为固定值，从而导致成形过程的离焦量会在固定值附近进行上下跳动。又因为离焦量的变化会影响熔道的宽度，因此成形件的壁厚在设计尺寸范围附近做上下跳动<sup>[10]</sup>。

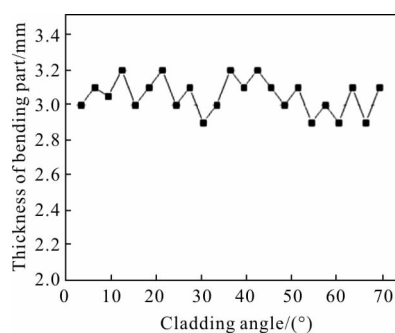


图 7 成形件壁厚沿角度方向的变化

Fig.7 Thickness variation of bending part along direction of angle

图 8 所示为成形件壁厚沿弯曲半径方向上的壁厚，由图可发现：成形件除了首末位置宽度较设

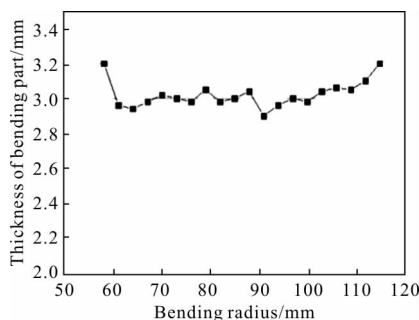


图 8 成形件壁厚沿弯曲半径方向的变化

Fig.8 Thickness variation of bending part along direction of bending radius



计尺寸相差较大之外,其余绝大部分熔覆层壁厚较稳定,与设计尺寸相差不大。因为成形件的首末位置分别对应开光与关光的地方,因此成形件在该处宽度的尺寸较设计尺寸偏差大。图 8 中壁厚的最大绝对误差为 0.2 mm,最大相对误差为 6.7%。

### 3.2 组织分析

将样件在扫描速度方向上进行切割、打磨、抛光与腐蚀后再作金相显微分析。图 9(a)、(b)、(c)分别表示为图 6 的外弯、中部和内弯区域的放大图,各区域成形扫描速度分别为 4、6、8 mm/s。图 9 中所取截面均平行于速度方向。

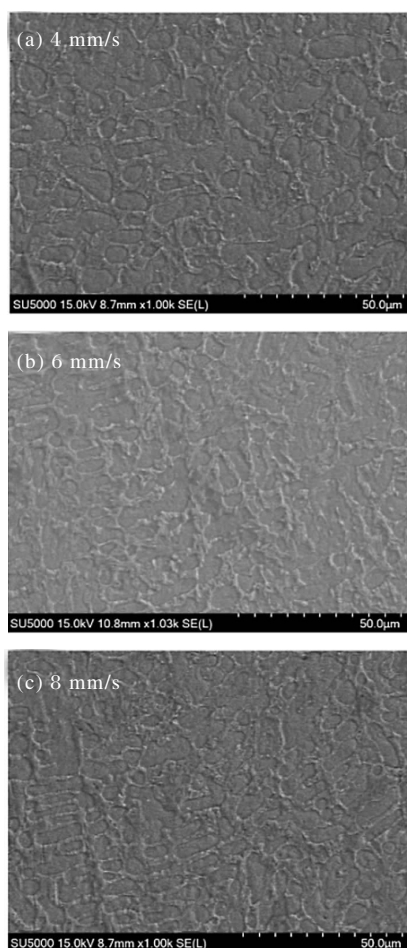


图 9 不同扫描速度下的 SEM 照片

Fig.9 SEM image under different velocity

金属粉末在熔池瞬间熔化,再瞬间凝固。在极快的冷却速度下,过冷度极大,因此形成的晶粒非常细小<sup>[4]</sup>。由图 9 可知:不同扫描速度下的样件其微观组织的晶粒度等级一致,并且都是由一定方向的树枝晶组成。因为所取样件距基体较远,散热方

式由基体处的三维散热变为现在的二维散热,散热的主要方式为与空气的热对流。热量主要沿着外轮廓法向方向散失,温度梯度在此方向上最大,而在平行于外轮廓的方向冷却速度较小,因此熔池在凝固过程中具有明显的方向性,形成彼此相互平行且与外轮廓表面相垂直的树枝晶。

## 4 结 论

(1) 建立了熔道层高与扫描速度关系的工艺模型,采用分段变速的方法成形出了不等高熔道,熔覆出的熔道表面平整,无裂纹、疏松等缺陷。

(2) 运用变姿态法向分层技术,堆积多道不等高熔道,成形了扇形结构件。

(3) 对成形件的尺寸与微观组织分析可知:成形件的最大尺寸误差为 6.7%。不同扫描速度下的微观组织差异小。

### 参考文献:

[1] Yang Guang, Wang Xiangming, Wang Wei, et al. Microstructure and property of laser cladding TiC reinforced composition coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 795-799. (in Chinese)  
杨光, 王向明, 王维, 等. 激光熔覆制备 TiC 颗粒增强涂层的组织和性能[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 795-799.

[2] Tang Shujun, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, et al. Microstructure and property of selective laser cladding Ni-Al intermetallic compound coating on H13 steel surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1621-1626. (in Chinese)  
唐淑君, 刘洪喜, 张晓伟, 等. H13 钢表面激光选区熔覆 Ni-Al 金属间化合物涂层的组织与性能[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1621-1626.

[3] An Xulong, Liu Qibin, Zheng Bo. Microstructure and properties of laser cladding high entropy alloy MoFeCrTiWAl<sub>x</sub>Si<sub>y</sub> coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1140-1144. (in Chinese)  
安旭龙, 刘其斌, 郑波. 激光熔覆制备高熵合金 MoFeCrTiWAl<sub>x</sub>Si<sub>y</sub> 涂层的组织与性能[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1140-1144.

[4] Shi Tuo, Wang Yiqing, Lu Bingheng, et al. Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology [J]. *Chinese J*

- Lasers*, 2015, 42(10): 1003003. (in Chinese)
- 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.
- [5] Yu Lingling, Shi Shihong, Di Keyun. Research on the laser cladding inclined wall accumulation based on the internal laser coaxial -powderFeeding technology [J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(3): 264-266. (in Chinese)
- 郁玲玲, 石世宏, 狄科云. 基于光内同轴送粉技术的激光熔覆斜壁堆积成形研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 264-266.
- [6] Lu Bin, Zhu Gangxian, Wu Jizhuo, et al. Laser direct forming process of thin-walled blade using variable spot by inside-beam powder feeding[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1203003. (in Chinese)
- 陆斌, 朱刚贤, 吴继焯, 等. 基于光内送粉激光变斑直接成形薄壁叶片的工艺研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203003.
- [7] Jiang Fubing, Shi Shihong, Fu Geyan. Numerical simulation of powder-gas flow field of inside-beam powder feeding nozzle with changing attitude [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(2): 145-151. (in Chinese)
- 姜付兵, 石世宏, 傅戈雁. 光内送粉喷头空间变姿态粉气流场数值模拟[J]. 激光技术, 2015, 39(2): 145-151.
- [8] Cai Wei, Fu Geyan, Shi Shihong, et al. Research on thickness control of variable diameter solid with coaxial inside-beam powder feeding laser cladding by defocusing technique [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0703003. (in Chinese)
- 蔡伟, 傅戈雁, 石世宏, 等. 基于离焦技术的光内送粉堆积变径体壁厚控制研究[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703003.
- [9] Meng Weidong, Shi Shihong, Shi Tuo, et al. Forming technology research of laser accumulation of reducing solid of revolution with changing laserhead posture [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10): 1003006. (in Chinese)
- 孟伟栋, 石世宏, 石拓, 等. 空间变姿态激光堆积变径回转体成形技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003006.
- [10] Fu Geyan, Liu Yu, Shi Shihong, et al. Control of process parameters for accumulate screwy thin-walled part by laser cladding with coaxial inside-beam powder feeding [J]. *Electromachining and Mould*, 2014(2): 43-46. (in Chinese)
- 傅戈雁, 刘宇, 石世宏, 等. 光内同轴送粉激光熔覆堆积扭曲薄壁件工艺参数的控制[J]. 电加工与模具, 2014(2): 43-46.
- [11] Shi Gaolian, Shi Shihong, Zhang Jia. The influence of defocusing amount of hollow beam on the quality of single cladding channel [J]. *Applied Laser*, 2012, 32(6): 505-509. (in Chinese)
- 石皋莲, 石世宏, 张甲. 中空光离焦量对单熔道质量的影响[J]. 应用激光, 2012, 32(6): 505-509.