

# 不等高结构件激光近净成形闭环控制

张锐<sup>1</sup>, 石拓<sup>2\*</sup>, 石世宏<sup>1</sup>, 沈婷<sup>1</sup>, 傅戈雁<sup>1</sup>, 陈磊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021;

<sup>2</sup>西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049

**摘要** 利用光内送粉技术, 基于法向分层的路径规划, 结合层高测量系统, 对不等高扇形结构件的激光熔覆成形实现了闭环控制。提出了一种分层分段控制的新方法, 使成形件宽度一致。建立了速度比例-积分(PI)控制器, 使实际总堆高达到了期望值, 实现了结构件的高精度成形。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 快速成形; 离焦量不变; 不等高熔道; 速度控制

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0302005

## Closed-Loop Control of Laser Engineered Net Shaping of Unequal-Height Parts

Zhang Rui<sup>1</sup>, Shi Tuo<sup>2</sup>, Shi Shihong<sup>1</sup>, Shen Ting<sup>1</sup>, Fu Geyan<sup>1</sup>, Chen Lei<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

**Abstract** Based on the inside-laser powder feeding technology, the normal stratified path planning, and the high-level measurement system, the closed-loop control of laser cladding forming of fan-shaped unequal-height parts is conducted. A new method of hierarchical and segmented control is proposed, which ensures the width of forming parts consistency. The speed proportion-integration (PI) controller is established, which ensures that the actual heap reaches the desired value, and the high precision forming of structural parts is realized.

**Key words** laser technique; laser cladding; rapid prototyping; stable defocusing; unequal-height cladding tracks; speed control

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900

## 1 引 言

激光近净成形(LENS)技术<sup>[1-2]</sup>是在激光熔覆快速成形技术的基础上提出来的一种综合集成技术。该技术可以对构造复杂的结构件进行成形,且在零件成形后仅需少量加工或者不需要再加工就能使零件达到机械构件的工艺要求,具有高效高精度、轻量化以及低成本等优点,被广泛应用于各个领域。

传统的 LENS 技术是在小角度倾斜平面或水平面上以固定的工艺参数进行逐层扫描堆积,但涉及到一些复杂结构件,如齿轮叶片上的扇形锯齿、汽车发动机

的弯管等,则难以通过传统的 LENS 技术实现成形<sup>[3]</sup>。

王续跃等<sup>[4]</sup>通过改变送粉量的方式进行多层熔覆,成形出斜坡薄壁件。但频繁改变送粉量会导致每一段的粉末流量不等,无法快速达到期望流量值。如果某一段出现较大的误差,则会导致成形的失败。

胡帮友等<sup>[5]</sup>提出一种不等厚切片技术,将复杂螺线管沿生长方向的法平面进行等距切片,再进行逐层熔覆。该方法计算量过大,且没有普适性,只能对某个复杂零件进行分层计算。

石皋莲等<sup>[6]</sup>通过大量单道正交实验得出各种熔覆层高度对应的扫描速度,采用变扫描速度的方法成形

收稿日期: 2017-08-01; 收到修改稿日期: 2017-08-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100300)、国家自然科学基金(51675359)、江苏省重点研发项目(BE2015067)

作者简介: 张锐(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆快速成形控制方面的研究。E-mail: 736069180@qq.com

导师简介: 石世宏(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事激光快速成形方面的研究。

E-mail: shishihong@suda.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: tuo.shi@qq.com

出等高熔道,最终堆积出扇形结构件。此方法为开环方法,受成形工艺参数、成形环境等因素的影响,最终有可能出现成形精度不够,成形过程不稳定等现象。

Hua 等<sup>[7]</sup>使用两个沉积高度光学传感器测量堆高,设计了一种模糊逻辑控制器,堆积出数层不等高熔道。Fathi 等<sup>[8]</sup>采用沉积高度反馈法,使用比例积分微分(PID)控制器和变结构控制器成形出正弦形状的高低不等熔道。

本文利用图像传感器(CCD)熔道层高测量装置<sup>[9-12]</sup>测量层高,设计了闭环控制的方法,以控制不等高零件各个位置的高度。通过补偿误差实现了扇形结构件的稳定、高精度成形。

## 2 实验条件

### 2.1 实验设备条件

实验是以德国 KUKA 股份公司生产的型号为 KR 60-3F 的六轴 KUKA 机器人为驱动平台,配以德

国 IPG 公司生产的型号为 YLS-2000-TR 的光纤激光器以及德国 GTV 公司生产的型号为 PF2/2 的送粉器,采用氮气作为保护气及载粉气。使用德国 Basler 公司生产的 acA1300-30gm 高速 CCD 相机作为熔道堆高测量传感器,以  $35 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$  的图像采集速率实时采集熔池处的图像信息,通过工控机计算对应堆高,并同步传输至 KUKA 机器人控制器。

### 2.2 实验技术条件

实验采用苏州大学激光制造技术研究所研发的光内送粉喷头<sup>[3,13-14]</sup>,其原理如图 1(a)所示。利用特有的光学系统将圆形实心的激光束转化成中空环形聚焦激光束,粉管设计在光束中空处,实现光内同轴送粉。单粉束外围是环形准直保护气,对粉末起集束作用,减小粉末发散角,从而提高粉末利用率。在进行大角度倾斜熔覆时,粉束受到载粉气、保护气的同轴同向作用力,重力对粉束的影响减小,粉束保持很好的挺直度。

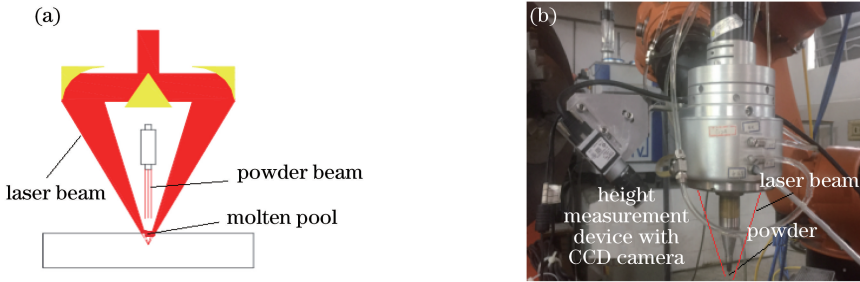


图 1 光内送粉。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 Inside-laser powder feeding. (a) Schematic; (b) physical picture

以扇形结构为例,传统的 LENS 方法大都采用水平平行分层法,如图 2 所示,这种方法会造成上下层间在熔道的边缘部分发生错位,这种台阶效应会导致成形边缘粗糙。若错位角过大,错位部分漏粉漏光,进而会造成成形失败。本实验采用空间变方位、非平行分层技术进行逐层逐段堆积<sup>[15]</sup>,如图 3 所示。沿着扇形结构件外部轮廓的曲率半径方向进行法向分层,将其分为若干条不等高熔道。每一条

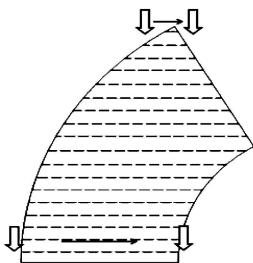


图 2 水平分层堆积模型

Fig. 2 Model of horizontal layered accumulation

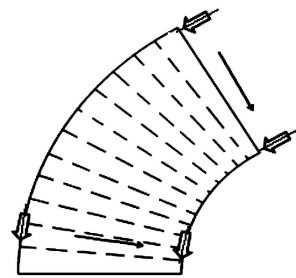


图 3 法向分层堆积模型

Fig. 3 Model of normal direction accumulation

熔道又分为若干段,分别进行熔覆,通过改变每一段的扫描速度,堆积出指定的高度,段数越多则越近似于一条平整的不等高熔道。同时,在每一层每一段的熔覆过程中,必须不断调整喷头的空间姿态,从而保证喷头以及粉嘴的中轴线方向与该段成形面的法线方向始终保持一致。该方法与传统的水平分层方法不同,它有效解决了因熔覆层之间错位而出现的台阶问题,可实现大角度悬垂扇形结构件的堆积成形。

### 3 实验方法

#### 3.1 不等高熔道的分段控制法

在图3中,利用法向分层将扇形结构件分为  $n$  条不等高熔道,取其中一条不等高熔道(记为第  $i$  层熔道),将其沿着曲率半径的方向进行等距分段,分成  $m$  段(1, 2, 3, ...,  $j$ , ...,  $m$ ),段号为  $j$ ,如图4所示,其中  $R$  为扇形结构件内侧的曲率半径,  $L$  为不等高熔道的长度。

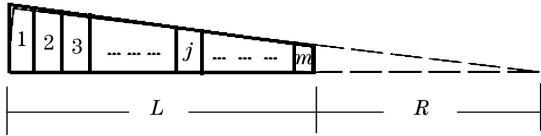


图4 不等高熔道的分段

Fig. 4 Segmentation of unequal-height cladding tracks

若记第  $i$  层第  $j$  段的期望高度为  $H_{ij}$ ,设计第1段的高度  $H_{i1}$ 后,不等高熔道各段的期望高度  $H_{ij}$  为

$$H_{ij} = \frac{H_{i1}}{m(L+R)} [m(L+R) - L(j-1)]. \quad (1)$$

激光熔覆的单道高度主要受激光功率  $P$ 、扫描速度  $V$ 、激光离焦量  $D$  以及送粉量的影响,若保持其他工艺参数不变,只改变扫描速度  $V$ ,熔道的高度和宽度都会有相应的变化。研究表明,随着扫描速度的增加,熔覆层的宽高比增加,说明扫描速度对熔覆层高度的影响高于对其宽度的影响<sup>[16-17]</sup>。这主要是因为扫描速度  $V$  越大,单位时间内激光输入熔池的能量以及进入熔池的粉末越少,熔覆层的高度也就越小。反之,扫描速度  $V$  越小,熔覆层高度越大。

针对各层各段的期望高度  $H_{ij}$  所匹配的扫描速度  $V$ ,许多研究都是对大量的正交实验得到的数据进行线性或非线形拟合,得出两者的数学模型。本实验采用熔覆层高度测量系统,即给定所需的期望高度,通过PI控制器不断调整扫描速度,使其测量出的实际高度  $H_{sij}$  无限逼近期望高度  $H_{ij}$ 。比例控制器设计如下:

$$V_{i+1} = V_i - K_p \times (H_r - H_s), \quad (2)$$

式中  $V_i$  为当前的扫描速度,  $V_{i+1}$  为修正后的下一层扫描速度,  $H_r$  为期望的层高,  $H_s$  为当前实际堆高,  $K_p$  为比例增益系数。

#### 3.2 扇形结构件的成形

周斌等<sup>[6]</sup>在堆积扇形结构件时,每层每段的扫描速度都是固定的,并且各段扫描速度是通过试凑法确定的,故实际堆高是未知的。此外,受外部环境

以及逐层温度和应力的累积等因素的影响,该扫描速度下对应的堆高会随层数的增加而变化,往往难以与期望高度保持一致。如果按照固定参数以固定姿态进行扫描,即各段的  $z$  轴提升量等于各段的期望高度,则各段的离焦量会发生变化,如图5所示。当某段的误差累积较大时,各段难以保持在设计的同一条线上,甚至会出现凹凸起伏、塌陷等,使成形失败。

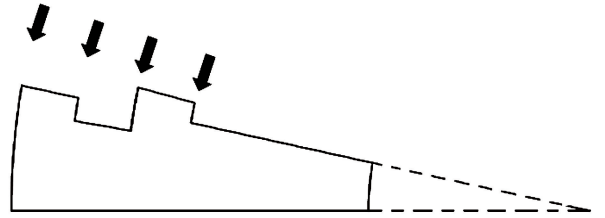


图5 以固定参数进行扫描的示意图

Fig. 5 Schematic of scanning with fixed parameters

为了解决上述问题,在分层熔覆的基础上,将每一层各段看作一个独立单元进行熔覆。采用层高测量系统对当前层每段的高度进行实时测量,记为  $H_{sij}$ ,与期望层高  $H_{ij}$  的差值记为误差  $E_{ij} = H_{ij} - H_{sij}$ 。在扫描下一层时,针对各段熔覆的实际高度,调节  $z$  轴的提升量,即在进行第  $i+1$  层扫描时,喷头的姿态偏转角度为  $i \times \theta$  ( $\theta$  为对应的扇形角度),第一段对应的  $z$  轴提升量为  $H_{s11} \times \cos(i\theta)$ ,第  $j$  段对应的  $z$  轴提升量为  $H_{sij} \times \cos(i\theta)$ 。在各段落之间加入一个细微的过渡段,当该段扫描结束后,通过短暂的过渡段来调整喷头的姿态和位置,以到达下一段的初始位置,其原理图如图6所示。利用该方法,可以确保各段的离焦量保持不变,从而使熔覆层的宽度保持一致<sup>[18]</sup>。

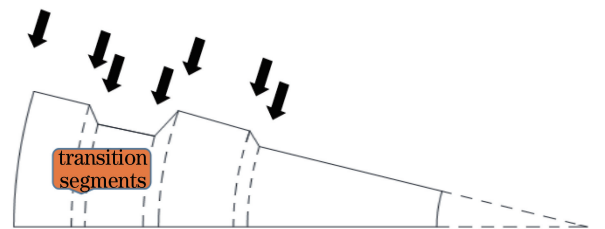


图6 加入过渡段的不等高熔道的熔覆过程

Fig. 6 Cladding process of unequal-height cladding tracks with transition segments

在保证离焦量不变的前提下,由于扇形结构件角度不断变大,在逐层逐段进行熔覆时,熔池会向下流淌,此时期望高度对应的扫描速度就会发生明显变化。因此在逐层逐段扫描时,需要根据实时测量的实际堆高  $H_{sij}$ ,利用速度控制器不断调节下一层

该段的速度,从而不断对之前每一段的累积误差  $\sum E_{ij}$  进行补偿,直至  $\sum E_{ij}=0$ 。

### 3.3 多段 PI 控制器设计

由于在成形过程中,调节扫描速度不仅是为了让实际堆高  $H_{sij}$  不断趋近于期望堆高  $H_{ij}$ ,即使得  $E_{ij}$  趋近于零,还是为了不断对前面的累积堆高误差  $\sum E_{ij}$  进行补偿,使得实际总堆高  $\sum H_{sij}$  与期望总堆高  $\sum H_{ij}$  基本一致。在速度控制器中设计比例环节和积分环节,设计的速度控制器如下:

$$V_{(i+1)j} = V_{ij} + K_P \times (H_{ij} - H_{sij}) + K_I \times (\sum H_{ij} - \sum H_{sij}), \quad (3)$$

式中  $V_{ij}$  为第  $i$  层第  $j$  段的速度,  $V_{(i+1)j}$  为该段在下一层的速度,  $K_I$  为积分增益系数。  $K_P \times (H_{ij} - H_{sij})$  为比例控制部分,主要目的是消除当前高度误差,实验中  $K_P$  取负值,这是因为当实际堆高小于期望高度,即  $H_{ij} - H_{sij} \geq 0$  时,  $K_P < 0$  可以使得  $V_{(i+1)j} \leq V_{ij}$ ,即降低下一层的扫描速度,使熔覆高

度增大。  $K_I \times (\sum H_{ij} - \sum H_{sij})$  为积分控制环节,主要目的是补偿之前的累积误差  $\sum E_{ij}$ 。

理论上,  $K_P$  越大,系统的响应速度越快,调节时间越短,但是  $K_P$  过大会造成最大偏差增大,振荡次数增加,调节时间变长,进而动态性能变差,使得闭环系统不稳定;  $K_I$  越大,积分作用越强,但  $K_I$  过大又会使调节作用过强,引起被调参数产生振荡。因此,需要通过实验分析得出最优的比例及积分系数。

### 3.4 不等高结构件闭环成形系统

不等高结构件闭环成形控制系统示意图如图 7 所示,给定 KUKA 机器人初始的扫描速度,熔覆第一层后,层高测量装置读取该层每段的堆积高度,求出堆高误差并传输给 PI 速度控制器,计算出下一层每一段对应的扫描速度,再传输给 KUKA 机器人控制器,从而调节 KUKA 机器人机械手臂的运行速度,如此往复循环堆积,最终堆积出扇形结构件。

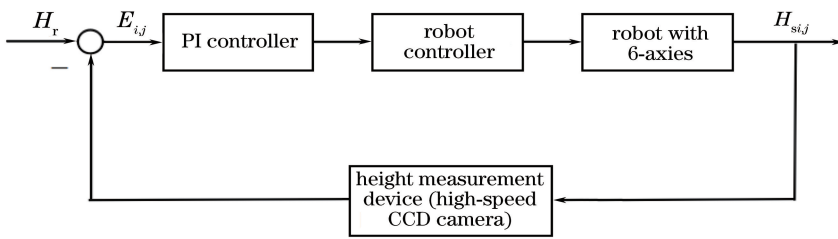


图 7 闭环成形系统示意图

Fig. 7 Flow chart of closed-loop forming system

## 4 实验过程和结果

设计不等高熔道,分 7 段分别进行闭环控制。每段长度为 8 mm,段与段之间的过渡段长 0.3 mm,外侧期望高度为  $H_1 = 0.43$  mm,内侧期望高度为  $H_7 = 0.25$  mm,中间每段高度差为 0.03 mm,则总长度为  $L = 57.8$  mm,对应的扇形角度  $\theta$  以及内圈半径  $R$  满足

$$R \times \theta = 0.25, \quad (4)$$

$$(R + L) \times \theta = 0.43, \quad (5)$$

合并(4)式和(5)式,得  $\theta = 0.178^\circ$ ,  $R = 80.28$  mm。

采用 Fe313 粉末以及 304 不锈钢基板,取激光功率  $P = 800$  W,送粉速度  $M = 6.15$  g·min<sup>-1</sup>,离焦量  $D = -4$  mm,利用 3.1 所述的方法,得到不等高熔道各段期望堆高  $H_r$  所对应的初始扫描速度  $V$ ,见表 1。

利用(3)式设计的多段速度控制器进行扇形结构件的堆积成形。比例系数  $K_P = -0.008$ ,积分系数  $K_I = -0.0005$ ,最终熔覆成形的结构件如图 8 所

表 1 各段期望高度  $H_r$  与对应的初始扫描速度  $V$   
Table 1 Desired heights of different segments and corresponding initial scanning speeds

| Segment No.                                    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Desired height /mm                             | 0.43 | 0.40 | 0.37 | 0.34 | 0.31 | 0.28 | 0.25 |
| Initial scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> ) | 5.9  | 6.5  | 7.1  | 7.8  | 8.1  | 9.3  | 9.9  |

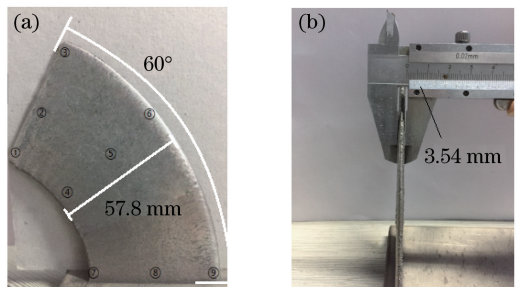


图 8 扇形结构成形件的(a)正视图和(b)右视图

Fig. 8 (a) Front view and (b) right view of fan-shaped forming parts

示。成形件一共扫描 326 层,偏转角度为  $60^\circ$ ,外观平整,光洁度较高,实际长度与设计一致,测量各处位置壁厚,误差范围在  $-0.06\sim 0.04$  mm,宽度基本一致。

提取高速 CCD 相机测得的每层每段的实时堆高,并绘制成图,图 9 所示为熔覆过程中扇形结构件各段前 290 层每层的高度,1~9 层为  $z$  轴随动提升,实际堆高  $H_{sij}$  略大于各段的期望堆高  $H_r$ 。前 10 层由于刚开始堆积,通过基板进行三维传热,加上受基板稀释率等因素的影响,前几层测出的堆高不稳定,带来较大的速度波动。等到 10 层后速度基本稳定,速度控制器开始

启用,熔覆层实际堆高开始下降,回落至期望高度  $H_r$  附近。从 105 层开始,熔覆高度开始出现波动,主要是因为此时扇形结构件的角度到达了  $20^\circ$  左右,由于存在高度差,熔池会发生一些位移,相邻段之间会相互影响,进而影响下一段的堆高。在 120 层左右,各段实际堆高又自动调整到了稳态。

图 10(a)~(c)分别为图 8(a)中⑥、⑤、④处的金相显微分析图,分别对应扇形结构件的外侧、中间部分以及内侧。从图 10 可以看出,三处的微观组织差异很小,均为沿一定方向生长的树枝晶,晶粒度等级一致。

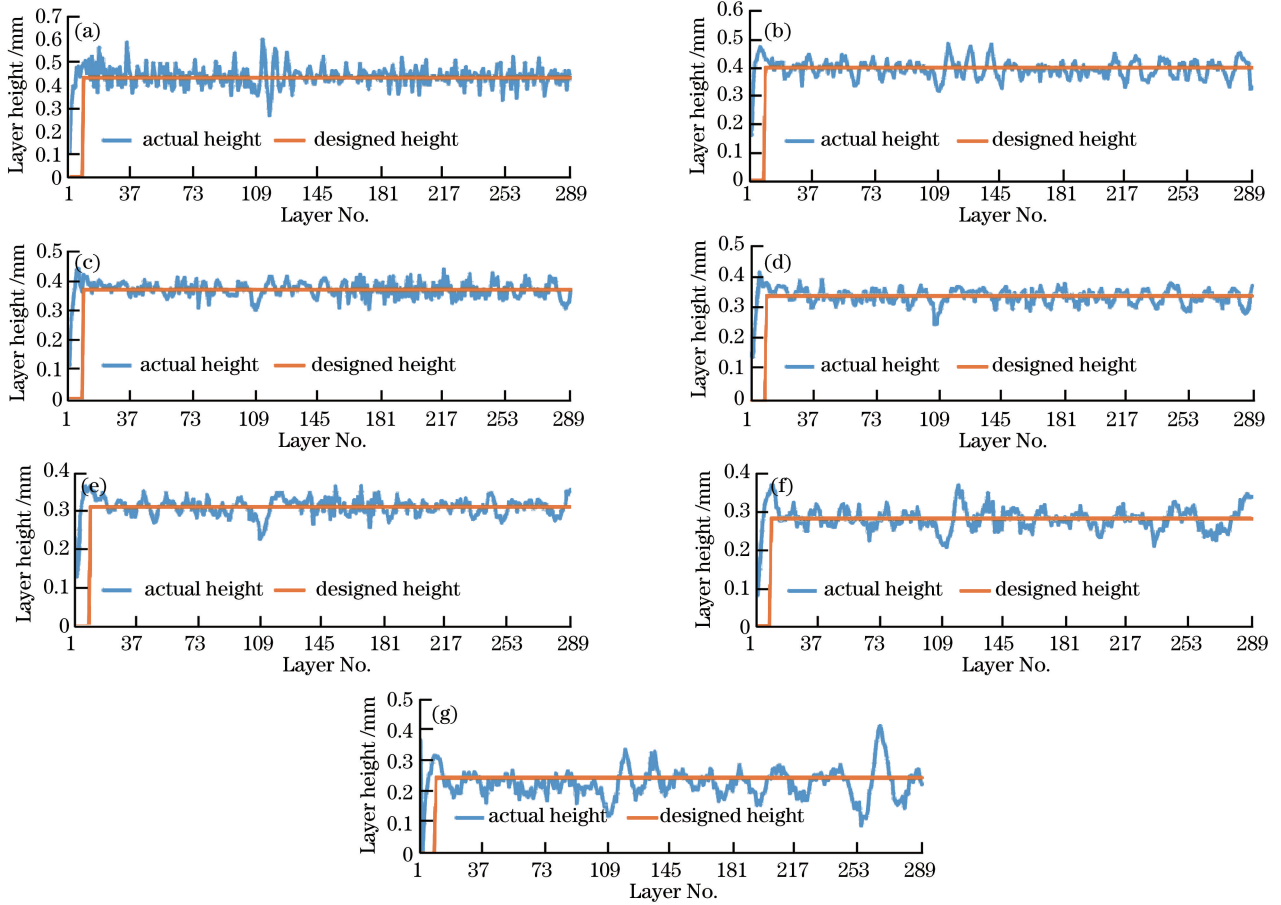


图 9 成形件各段的熔覆高度。(a)  $j=1$ ; (b)  $j=2$ ; (c)  $j=3$ ; (d)  $j=4$ ; (e)  $j=5$ ; (f)  $j=6$ ; (g)  $j=7$

Fig. 9 Cladding heights of different segments of forming parts.

(a)  $j=1$ ; (b)  $j=2$ ; (c)  $j=3$ ; (d)  $j=4$ ; (e)  $j=5$ ; (f)  $j=6$ ; (g)  $j=7$

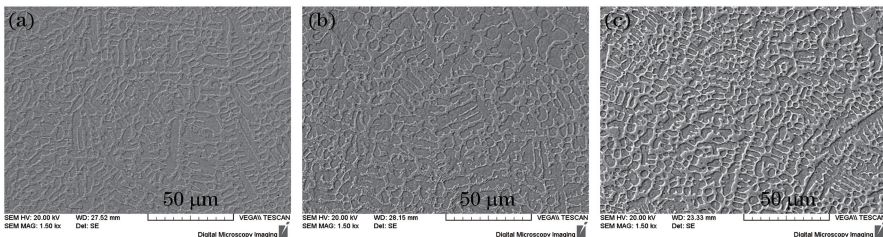


图 10 成形件不同处的金相显微分析图。(a) 外侧; (b) 中间; (c) 内侧

Fig. 10 Metallographic analysis images at different positions of forming parts. (a) Outside; (b) middle; (c) inside

## 5 结 论

基于层高测量装置,结合法向分层技术,提出了一种新的不等高结构件的闭环成形方法。改进了不等高熔道层高和扫描速度数学模型的获取方式,只需要给定期望高度,通过比例控制器不断自我调整,即可迅速得到对应的扫描速度。建立了速度 PI 控制器,使实际总堆高达到期望值,实现了扇形结构件的闭环成形。

## 参 考 文 献

- [1] Ma G Y, Wang J T, Niu F Y, *et al.* Influence of powder distribution on the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin-wall ceramic formed by laser engineered net shaping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0103006.  
马广义, 王江田, 牛方勇, 等. 粉末分布对激光近净成形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷薄壁件表面形貌的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103006.
- [2] Wu D J, Lu W F, Chen Y X, *et al.* Experimental study on ceramic of  $\text{ZrO}_2$ -13%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  by laser engineered net shaping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 0703004.  
吴东江, 卢卫锋, 陈云啸, 等.  $\text{ZrO}_2$ -13%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷薄壁件激光近净成形实验[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703004.
- [3] 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.  
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.
- [4] Wang X Y, Guo H R, Xu W J, *et al.* Laser cladding forming of a ramp thin wall with variable powder feed rate[J]. China Mechanical Engineering, 2011(6): 701-705.  
王续跃, 郭会茹, 徐文曦, 等. 变送粉量法斜坡薄壁件的激光熔覆成形研究[J]. 中国机械工程, 2011(6): 701-705.
- [5] Hu B Y, Zhang H O, Jiang J, *et al.* Layered-deposition manufacturing complex metal parts by unequal thickness slicing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011(2): 57-60.  
胡帮友, 张海鸥, 蒋疆, 等. 不等厚切片分层熔覆制造复杂金属零件[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011(2): 57-60.
- [6] Shi G L, Shi S H, Zhang J. The influence of

defocusing amount of hollow beam on the quality of single cladding channel [J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 505-509.

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.

- [7] Hua Y, Choi J. Adaptive direct metal/material deposition process using a fuzzy logic-based controller [J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(4): 200-210.
- [8] Fathi A, Khajepour A, Toyserkani E, *et al.* Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward PID controller [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 35(3): 280-292.
- [9] Sun C F, Shi S H, Fu G Y, *et al.* On-line monitoring and control based on CCD laser cladding forming process [J]. Applied Laser, 2013, 33(1): 68-71.  
孙承峰, 石世宏, 傅戈雁, 等. 基于 CCD 激光熔覆成形过程在线监测与控制[J]. 应用激光, 2013, 33(1): 68-71.
- [10] Shi S H, Wang T, Sun C F. A measuring device and its measuring method of molten pool defocusing amount during laser cladding process: CN201410235777.6[P]. 2014-08-13.  
石世宏, 王涛, 孙承峰. 一种激光熔覆熔池离焦量测量装置及其测量方法: CN201410235777.6[P]. 2014-08-13.
- [11] Wang Y Q, Shi T, Lu B H, *et al.* Layer height measurement device and closed-loop control strategy in laser cladding forming: CN201510176039.3[P]. 2015-04-14.  
王伊卿, 石拓, 卢秉恒, 等. 激光熔覆快速成形层高测量装置与闭环控制方法: CN201510176039.3[P]. 2015-04-14.
- [12] Shi T, Lu B H, Wei Z Y, *et al.* Research of closed-loop control of deposition height in laser metal deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0702004.  
石拓, 卢秉恒, 魏正英, 等. 激光金属沉积堆高闭环控制研究[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0702004.
- [13] Meng W D, Shi S H, Fu G Y, *et al.* Experimental study about vertical surface accumulation with coaxial inside-beam powder feeding [J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 594-597.  
孟伟栋, 石世宏, 傅戈雁, 等. 光内同轴送粉立面堆积成形实验研究[J]. 激光技术, 2015, 39(5): 594-597.
- [14] Shi T, Lu B H, Shi S H, *et al.* Laser metal deposition with spatial variable orientation based on hollow-laser beam with internal powder feeding

- technology[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 88: 234-241.
- [15] Deng Z Q, Shi S H, Zhou B, *et al.* Laser cladding forming of unequal-height curved arc-shaped thin-wall structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0902005.  
邓志强, 石世宏, 周斌, 等. 不等高弯曲弧形薄壁结构激光熔覆成形 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0902005.
- [16] Shi G L, Shi S H, Wang C. Research on melt-path forming based on internal powder feeding through a hollow laser beam[J]. Applied Laser, 2013, 33(04): 385-390.  
石皋莲, 石世宏, 王晨. 基于环形光管内送粉的激光熔覆熔道成形研究 [J]. 应用激光, 2013, 33(04): 385-390.
- [17] Wang C, Shi S H, Fang Q Q, *et al.* Research on laser cladding forming of close-packed multivariant twisty thin-wall parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602004.  
王聪, 石世宏, 方琴琴, 等. 空间多元密排扭曲薄壁件的激光熔覆成形研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602004.
- [18] Shi T, Lu B H, Wei Z Y, *et al.* Laser forming method of uniform-height parts: CN106216678A[P]. 2016-12-14.  
石拓, 卢秉恒, 魏正英, 等. 激光成形均匀变高零件的方法: CN106216678A[P]. 2016-12-14.