

变壁厚偏心圆环结构激光熔覆成形及闭环控制

沈婷¹, 石拓^{2*}, 傅戈雁¹, 张锐¹, 胡晔¹

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 基于光内送粉技术, 激光熔覆成形了变壁厚偏心圆环结构。规划了变壁厚偏心圆环的成形扫描路径, 利用基于机器视觉的层高控制软件获得了每个成形段的实际高度, 并与设定的期望高度进行对比, 建立了基于比例积分(PID)控制器的速度校正模型。成形的偏心圆环结构的最小壁厚为 2.14 mm, 最大为 6.38 mm。每段总堆高与期望总堆高的误差较小, 整体高度相对平整, 具备较高的成形精度。成形件不同壁厚处的晶粒组织均匀致密, 晶粒尺寸接近。

关键词 激光技术; 激光熔覆成形; 变壁厚结构; 偏心圆环; 闭环控制; 比例积分控制器

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0302007

Laser Cladding Forming and Closed-Loop Control of Thickness-Variable Eccentric Ring Structure

Shen Ting¹, Shi Tuo², Fu Geyan¹, Zhang Rui¹, Hu Ye¹

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

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

Abstract Based on the hollow laser beam internal powder feeding technology, the thickness-variable eccentric ring structure is fabricated by laser cladding forming. The scanning paths for forming the thickness-variable eccentric ring structures are planned. The layer-height control software based on machine vision is used to obtain the actual height for the each forming layer, which is compared with the desired height. The speed-correction model based on the proportion-integration (PI) controller is established. The forming eccentric ring structure has the minimum wall thickness of 2.14 mm and the maximum wall thickness of 6.38 mm. The error of actual total height with respect to the desired one of each segment is relatively small and the overall height is relatively flat, which shows the forming accuracy is high. At positions with different wall thicknesses of forming parts, the grain structure is uniform and grain size is comparable.

Key words laser technique; laser cladding forming; thickness-variable structure; eccentric ring; closed-loop control; proportional plus integral controller

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

在工程应用中存在许多变壁厚金属结构, 如涡轮叶片、球缺、桶形件等^[1-4]。传统的冷冲、铸造、锻造和数控铣削等是加工变壁厚金属零件的常用方式, 其存

在材料利用率低、加工时间长、生产成本高等缺点^[4]。激光熔覆成形(LCF)作为一种增材制造技术, 具有成形速率高、成形精度高、自由成形且材料利用率高等优点^[5]。该加工方式是利用计算机三维分层软件对零件计算机辅助设计(CAD)模型进行分层处理, 获取

收稿日期: 2017-09-14; 收到修改稿日期: 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61475107)、国家重点研发计划(2016YFB1100304)

作者简介: 沈婷(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆增材制造方面的研究。E-mail: 694026311@qq.com

导师简介: 傅戈雁(1959—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光熔覆增材制造方面的研究。

E-mail: fugeyan@suda.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: tuo.shi@qq.com

零件每层参数信息,规划扫描路径,激光熔覆喷头再根据规划路径成形金属零件^[5]。变壁厚结构的 LCF 通常都是根据不同宽度进行多道搭接。此方法存在路径复杂以及搭接率难以选择等问题^[6]。陆斌等^[6-8]采用分段成形的方法成形了变壁厚结构。由于存在多种不确定性因素,且缺少实时反馈系统,设定的提升量与实际堆积层高会出现不匹配,成形容易失败^[9-10]。石拓等^[11]基于层高控制系统,提出了一种熔道层高的精确反馈控制方法。这种方法使熔覆堆高变得可控,提高了激光熔覆的成形精度。

本文采用聚焦光路离焦改变激光光斑尺寸的方式,对不同的光斑尺寸进行了参数匹配,结合熔道层高的精确反馈控制方法,实现了每层一次性变宽度扫描,非搭接成形了变壁厚偏心圆环结构。

2 实验材料、系统与方法

2.1 实验材料

实验材料包含基体材料和熔覆材料。由于同种材料之间容易实现冶金结合,故分别采用不锈钢

304 和 Fe313。不锈钢 304 的熔点为 1400 ~ 1455 °C,具有较好的耐热性和耐腐蚀性。Fe313 粉末价格低,应用范围广,易于推广。该粉末的组成为:0.1% C, 0.5% ~ 1.5% B, 2.5% ~ 3.5% Si, 13% ~ 17% Cr (以上皆为质量分数),其余为 Fe。

2.2 实验系统

实验系统采用德国 IPG 公司生产的型号为 YLS-2000-TR 的 IPG 光纤激光器、德国 GTV 公司生产的型号为 PF 2/2M 的 GTV 送粉器、德国 KUKA 公司生产的自由度为 6 的 KUKA 加工机器人、中空激光光内送粉喷头和层高测控系统等。成形系统采用闭环控制,如图 1 所示。

实验采用的激光光内送粉喷头由本实验室自主研发^[5-7,12],其原理如图 2 所示。送粉喷头作为 LCF 系统的重要组成部分,直接影响成形零件的成形质量。光内送粉喷头有助于实现光、粉、气一体同轴。在送粉率、光斑尺寸、激光功率和扫描速度等众多因素中,成形件的宽度主要取决于光斑尺寸,图 2 中三个不同的光斑宽度对应不同的离焦量。

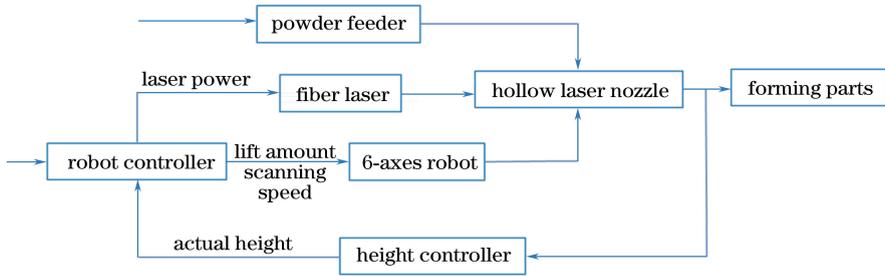


图 1 偏心圆环成形闭环控制系统

Fig. 1 Closed-loop control system of forming of eccentric ring structure

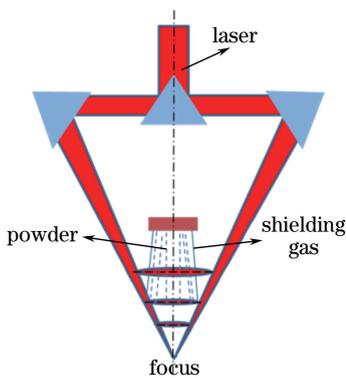


图 2 光内送粉示意图

Fig. 2 Schematic of hollow laser beam internal powder feeding

2.3 成形方法

变壁厚偏心圆环结构要求壁厚渐变且表面平整,实体模型如图 3(a) 所示。光斑尺寸的变化与激光离焦量相对应,故须在不同宽度处匹配不同的离

焦量。为了适应离焦量的变化,并使粉末获得足够的能量,须为每个离焦量配以合适的激光功率,因此采用分段成形的实验方法^[8]。根据圆环宽度变化范围确定段数,成形过程中的光斑宽度变化如图 3(b) 所示。成形时,为了确保圆环各段高度一致,为各段设定高度期望值。通过层高控制软件获取每段实际高度,利用比例积分 (PI) 控制器,结合期望高度与实际高度实时调整各段扫描速度,使熔覆层实际高度接近于期望高度且能在期望高度值附近小幅度波动,从而实现对成形过程的闭环控制。

3 路径规划及速度模型

3.1 路径规划

在直角坐标系中,圆方程为 $X^2 + Y^2 = R^2$, 其中 R 为圆的半径。 A 为圆上任意一点,其坐标为 $(R\cos\theta, R\sin\theta)$, 其中 θ 为 OA 与 X 轴间的夹角,如图 4 所示。

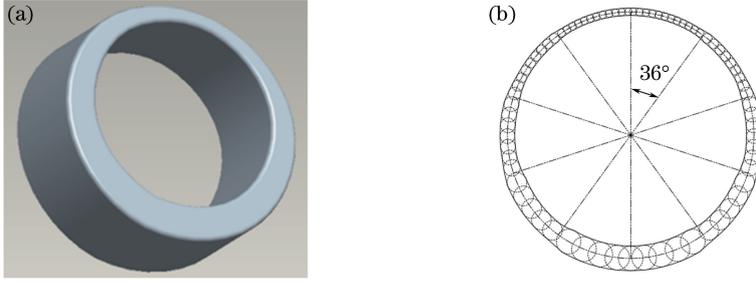


图 3 变壁厚圆环。(a)模型实体图;(b)不同宽度处的光斑

Fig. 3 Thickness-variable ring. (a) Physical model; (b) light spots at different widths

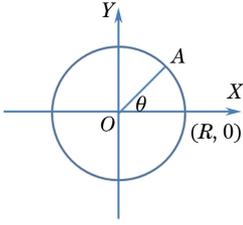


图 4 圆上点的示意图

Fig. 4 Schematic of point on circle

变壁厚偏心圆环划分成 n 段圆弧,对应弧长为 $2\pi R/n$,其中 n 为偶数。在成形时,不同宽度的圆弧之间设定圆弧夹角为 2° 的过渡段,喷头的提升或降低、离焦量的改变将在过渡段中进行,以保证成形过程的平稳。

令 $\mu = 360/n$,则

$$\begin{cases} X_{i,j,k} = X_0 + R \cos[k + (j-1)\mu] \\ Y_{i,j,k} = Y_0 + R \sin[k + (j-1)\mu] \end{cases}; \quad (1)$$

当 $0 \leq k < \mu - 1$ 时,

1) 当 $i=1$ 时,

$$\begin{cases} Z_{i,j,k} = Z_0 + (j-1), & 1 \leq j \leq n/2 \\ Z_{i,j,k} = Z_{i,j-1,k}, & j = n/2 + 1 \\ Z_{i,j,k} = Z_{i,j-1,k} - 1, & n/2 + 1 < j \leq n \end{cases}, \quad (2)$$

2) 当 $i > 1$ 时,

$$Z_{i,j,k} = Z_{i-1,j,k} + h_{i-1,j,k}; \quad (3)$$

当 $k = \mu - 1$ 时,

$$\begin{cases} Z_{i,j,k} = \frac{1}{2}(Z_{i,j,\mu-2} + Z_{i,j+1,k}), & 1 \leq j < n \\ Z_{i,j,k} = \frac{1}{2}(Z_{i,j,\mu-2} + Z_{i+1,1,0}), & j = n \end{cases}; \quad (4)$$

当 $k = \mu$ 时,

$$\begin{cases} Z_{i,j,k} = Z_{i,j+1,0} & 1 \leq j < n \\ Z_{i,j,k} = Z_{i,j,\mu-2} + h_{i,1,0} & j = n \end{cases}, \quad (5)$$

式中 i 为层数 ($i \geq 1$), j 为段号 ($j \geq 1$), k 为角度 ($0 \leq k \leq \mu$), μ 为每段圆环的度数, $h_{i,j,k}$ 为第 i 层第

j 段的实际层高, (X_0, Y_0, Z_0) 为第一层变壁厚圆环圆心坐标, $(X_{i,j,k}, Y_{i,j,k}, Z_{i,j,k})$ 为第 i 层第 j 段角度为 $\mu(j-1) + k$ 处的激光熔覆喷头的空间坐标。

利用(1)~(5)式,基于层高控制软件,能够实时获取小范围内的实际高度。计算每段 $0 \leq k \leq \mu$ 范围内大量高度值,取其平均值作为该段的实际高度。

3.2 速度模型

偏心圆环每段扫描速度采用数字 PI 控制算法。

第 $i+1$ 层第 j 段的扫描速度修正为

$$v_{i+1,j,k} = v_{i,j,k} + k_p(h_r - h_{i,j,k}) + k_i \sum_{m=1}^i (h_r - h_{m,j,k}), \quad (6)$$

式中 k_p 为数字比例系数, k_i 为数字积分系数,均为常数,且单位为 s^{-1} 。第 $i+1$ 层第 j 段的扫描速度取决于第 i 层第 j 段的扫描速度、实际高度与期望高度 h_r 的差值,实际总堆高与期望总堆高的差值。当第 i 层第 j 段成形完成后,层高控制软件获取其实际层高, KUKA 控制器能立刻算出下一层第 j 段的扫描速度。当 $0 \leq k < \mu - 1$ 时,每层每段的扫描速度 $v_{i+1,j,k}$ 为一恒定值,不随 k 的变化而变化。

当实际堆高小于期望高度时,则希望下一层该段扫描速度减慢。反之,则希望下一层该段扫描速度加快,即 $v_{i+1,j,k}$ 与 $h_r - h_{i,j,k}$ 呈反比例关系,因此 k_p 应取负值。同理可知, $v_{i+1,j,k}$ 与 $\sum_{m=1}^i (h_r - h_{m,j,k})$ 呈反比例关系,因此 k_i 也应取负值。

由于采用不关闭激光的方式进行连续扫描,各段工艺参数不同。为保证相邻两段的扫描速度、离焦量等参数的平滑衔接,在段间需要设定一个较小的过渡段,使激光喷头能够平缓地从一个离焦量变化到另一个离焦量。图 5 所示每段红色区域的弧长即为过渡段的弧长。在过渡段中,喷头在水平方向沿着过渡段圆弧熔覆,同时在垂直方向逐渐提升或降低位置,以改变离焦量。喷头在垂直平面的轨迹

为斜直线。相比于在垂直方向直接提升,此方法能够有效避免提升点出现凸起等缺陷,保持成形件平整。为确保过渡段的高度与两侧高度保持一致,提升量和过渡段弧长的三角函数关系如图 6(a)所示,过渡段速度与水平方向速度的关系如图 6(b)所示。

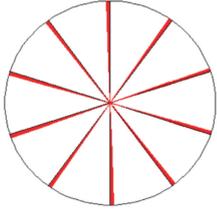


图 5 过渡段示意图

Fig. 5 Schematic of transition

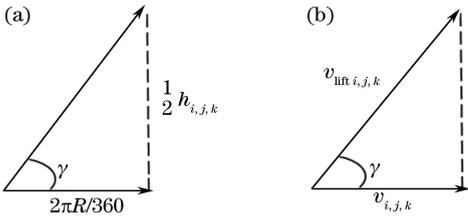


图 6 (a) 提升量与弧长间的三角关系; (b) 速度三角关系

Fig. 6 (a) Triangle relationship between lifting capacity and arc length; (b) triangle relationship between speeds

在图 6(b)中,当 $k = \mu - 1$ 和 $k = \mu$ 时,过渡段

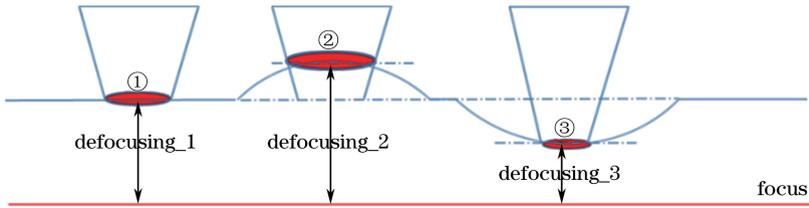


图 7 自愈合原理图

Fig. 7 Principle of self-healing

图 7 中①处为设定的期望离焦量 defocusing₁,受基体平整度影响,同一平面离焦量有所不同,图 7 中②处离焦量为 defocusing₂,大于期望离焦量,图 7 中③处离焦量为 defocusing₃,小于期望离焦量。光斑直径取决于离焦量的大小,而激光能量密度与激光功率、光斑直径和扫描速度相关,即

$$E = \frac{P}{Dv}, \quad (10)$$

表 1 初始参数匹配表

Table 1 Initial parameter matching table

Segment number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Defocusing D /mm	-8	-7	-6	-5	-4	-4	-5	-6	-7	-8
Laser power P /W	1200	1050	920	780	650	650	780	920	1050	1200
Expected width /mm	6.25	5.55	4.65	3.50	2.50	2.50	3.50	4.65	5.55	6.25
Scanning speed v /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	4	5	6	11	13	13	11	6	5	4

中 X 向与 Z 向的合成速度为

$$v_{\text{lift } i,j,k} = \frac{v_{i,j,k}}{\cos \gamma}, \quad (7)$$

其中

$$\cos \gamma = \frac{\frac{2\pi R}{360}}{\sqrt{\left(\frac{2\pi R}{360}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}\right)(h_{i,j,k})^2}}, \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),得到

$$v_{\text{lift } i,j,k} = \frac{\pi R v_{i,j,k} \sqrt{\left(\frac{2\pi R}{360}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}\right)(h_{i,j,k})^2}}{90 h_{i,j,k}}. \quad (9)$$

4 成形实验

在送粉率不变的情况下,每段的离焦量和激光功率为预先设定值。在成形中,通过 PI 控制算法调整每段扫描速度,使熔覆高度在设定的期望高度值附近达到动态稳定。LCF 受各种不确定因素的干扰,成形表面不平整,存在缺陷,成形质量受影响。中空激光送粉喷头的离焦量自愈合效应能够弥补不确定因素对表面平整度的影响^[13-15],自愈合原理图如图 7 所示。

式中 E 为能量密度, P 为激光功率, D 为光斑直径, v 为扫描速度。在相同工艺参数下,①处能量密度大于②处的,②处生长高度低于①处的;③处能量密度大于①处的,③处生长高度高于①处的。激光能量密度不同,熔化的粉末量也不同,不同离焦量处熔道的生长高度也不同,因此能够逐渐弥补高度差。偏心圆各段期望宽度见表 1,综合考虑各参数间的互相影响,离焦量选取在 $-8 \sim -4$ mm 的自愈合区间内。

成形一个左右对称的变壁厚偏心圆环,将模型划分为 10 段,每段 36° ,前 5 段与后 5 段的参数对称,具体参数见表 1。前 5 段离焦量在 $-8\sim-4$ mm 内变化,每段离焦量变化量为 1 mm。该 5 段对应的功率值分别为 1200,1050,920,780,650 W。后 5 段离焦量则在 $-4\sim-8$ mm 内变化,每段离焦量变化量与前 5 段相同,每段对应功率则是在 650~1200 W 内变化。当离焦量较大时,配以大功率激光与较慢的扫描速度;当离焦量较小时,配以较小功率的激光和较快的扫描速度,使粉末有足够的能量熔化。离焦量、功率和扫描速度通过单道实验已基本匹配,能有效地避免粉末的过熔化和夹杂现象。各段送粉率均为 $6\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$,设定堆积层数为 130。

在成形实验中,根据速度调整范围与各参数之间的匹配关系,将控制模型中的比例系数 k_p 设定为 -0.00300 s^{-1} ,积分系数 k_i 设定为 -0.00035 s^{-1} 。成形中,扫描速度需设定上下限,以防止自适应调整过程中扫描速度过快或过慢。在成形过程中,当激光离焦量较大时,激光喷头粉嘴距离熔池(加工平面)较近,且机械手移动速度较慢。在离焦量、功率和送粉率等参数不变情况下,熔覆层高度与扫描速

度成反比,速度越慢,熔覆层高度越高,喷嘴容易过热。因此,在多次实验中,将扫描速度设定在 $1.9\sim 20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,成形过程如图 8 所示。

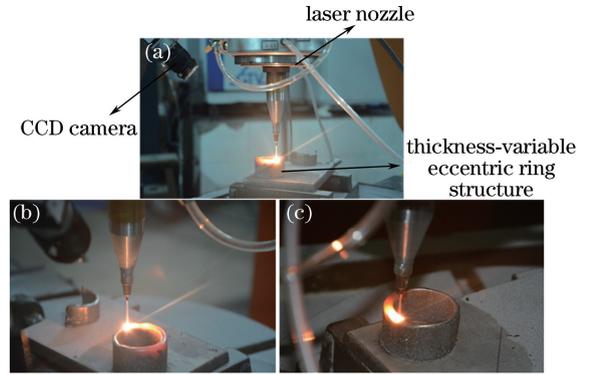


图 8 变壁厚偏心圆环成形过程

Fig. 8 Forming process of thickness-variable eccentric ring

5 实验结果及分析

5.1 高度变化

图 9 所示为偏心圆环第 1~5 段成形过程中的高度控制曲线,所有曲线均收敛于期望高度 (0.23 mm) 附近,使成形过程既具有较快的响应速

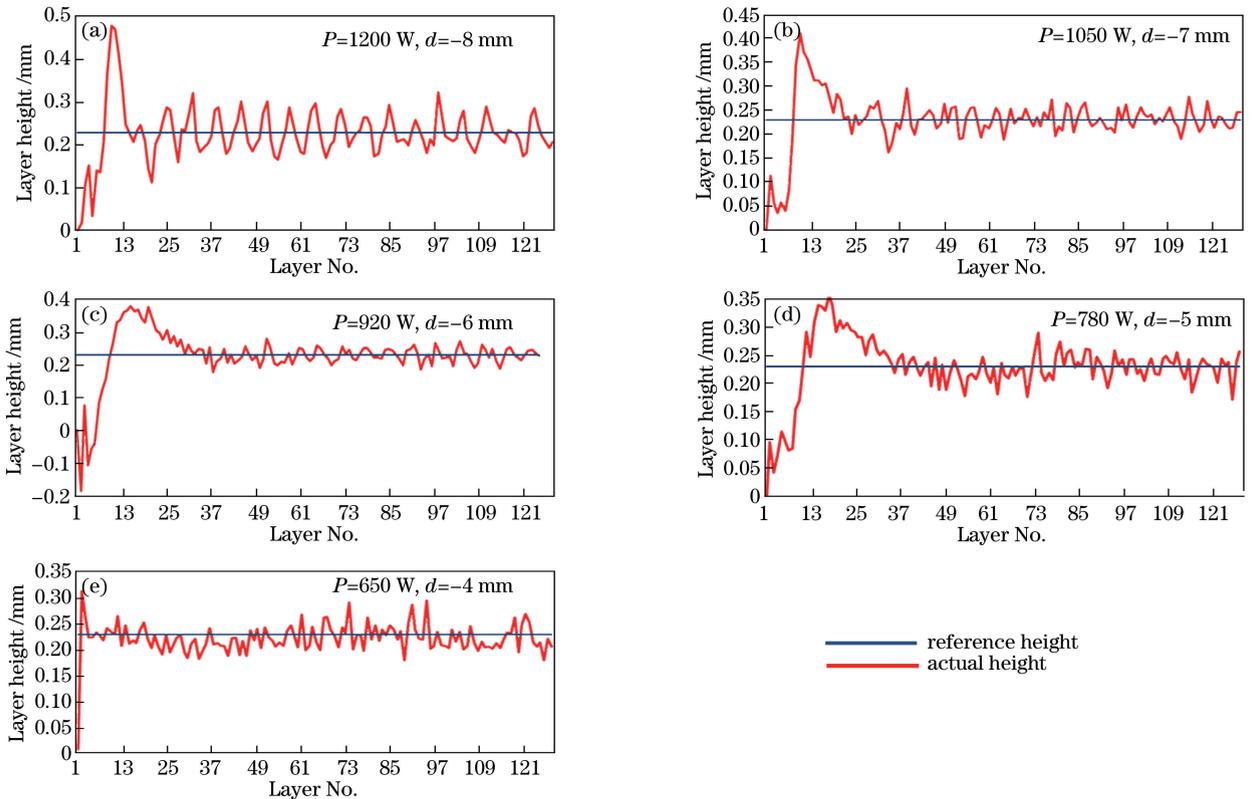


图 9 各段的高度变化曲线。(a)第 1 段;(b)第 2 段;(c)第 3 段;(d)第 4 段;(e)第 5 段

Fig. 9 Height variation curves of segments. (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4; (e) No.5

度又能稳定控制扫描速度。实际总堆高是所有层中对应段数的实际高度之和,每层每段的实际高度是该段各处高度的平均值,由层高控制软件获得。同一段的高度略有差别,如图 10 所示,具体实验结果见表 2。同一段中的扫描速度和激光功率为恒定值,同一段中不同部位离焦量不同,因此各处熔覆层生长高度略有不同。图 9 中蓝线表示期望高度(0.23 mm),大于 0.23 mm 的红线所围面积与小于 0.23 mm 的几乎相等,表明 PI 控制中的积分环节充分发挥控制作用,实际总堆高与期望总堆高的误差较小。一共扫描 130 层,单层每段期望高度均为

0.23 mm,偏心圆环总高度期望值为 29.90 mm。实验结果表明,加入 PI 控制器的成形系统具有很高的成形精度。

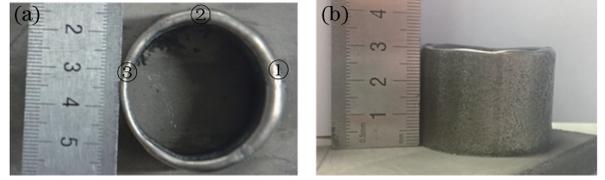


图 10 成形后的变壁厚偏心圆环。(a)俯视图;(b)主视图
Fig. 10 Thickness-variable eccentric ring after forming.
(a) Top view; (b) front view

表 2 各段参数

Table 2 Parameters of each segment

Segment No.	Scanning speed v / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Actual height / mm	Reference height h_r /mm	Total deposited height error /mm
1	3.61680	29.1009	29.90	-0.7991
2	4.44240	29.5128	29.90	-0.3872
3	6.29560	29.9076	29.90	0.0076
4	11.76250	29.9621	29.90	0.0621
5	16.97500	29.1515	29.90	-0.7485
6	13.91860	28.9230	29.90	-0.9770
7	9.37676	29.1553	29.90	-0.7447
8	5.58236	29.8236	29.90	-0.0764
9	4.26298	29.8743	29.90	-0.0257
10	4.00730	29.6005	29.90	-0.2995

5.2 宽度变化

成形的变壁厚偏心圆环各段实际宽度与期望宽度略有偏差,见表 3。对于实验初始参数完全相同的两段,最终获得的扫描速度和宽度也有所不同,通过对比分析发现,这是由于实验基板表面略有不平

整,两处离焦量有所不同。在离焦量变化的情况下,因为成形过程中有实时反馈高度的 CCD 传感器和 PI 控制器,成形系统具备一定的自适应性和容错性,所以依然能成形壁厚变化、高度一致的偏心圆环结构,实体件如图 10 所示。

表 3 偏心圆环每段宽度

Table 3 Width of each segment of eccentric ring

Segment number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Expected width /mm	6.25	5.55	4.65	3.50	2.50	2.50	3.50	4.65	5.55	6.25
Actual width /mm	6.28	5.52	4.72	3.84	3.18	2.14	2.96	4.02	5.58	6.10

5.3 组织分析

图 10(a)中①、②、③处为偏心圆环的第 1、3、5

段,这三段对应的电子扫描显微镜图分别如图 11(a)~(c)。由图 11 可知,变壁厚偏心圆环组织

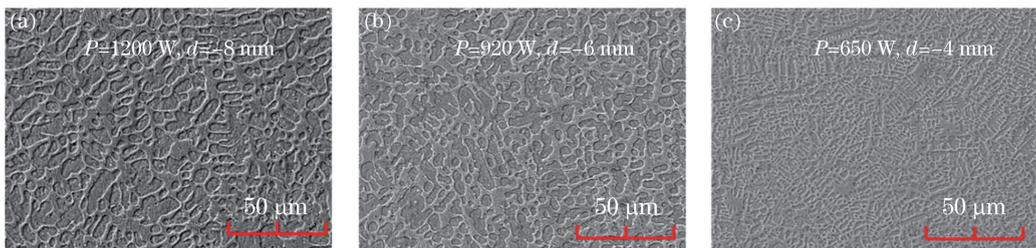


图 11 图 10 中不同位置的电子扫描显微镜图。(a) ①;(b) ②;(c) ③

Fig. 11 SEM images at different positions marked in Fig. 10. (a) ①; (b) ②; (c) ③

较为均匀致密,壁厚与晶粒尺寸变化趋势相同。由于激光功率小、扫描速度快,壁厚窄处成形的晶粒较为细小,以树枝晶为主。壁厚宽处激光功率较大且扫描速度较慢,热量累积多,保温时间长,形成的晶粒尺寸比壁厚窄处大,不易开裂。圆环整体性能主要以壁厚宽处为指标,壁厚宽处组织无明显缺陷,晶粒尺寸在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 范围内,仍属于细晶组织。

6 结 论

规划了偏心圆环结构的扫描路径,采用变离焦量、分段变功率与变扫描速度的方法实现了每层一次扫描堆积成形,多层堆积出了变壁厚偏心圆环结构。使用基于机器视觉的层高控制软件,设计了数字 PI 控制器,实现了变壁厚偏心圆环结构成形过程的闭环控制。成形的偏心圆环结构壁厚从 2.14 mm 变到 6.38 mm 再变到 2.14 mm,壁厚变化明显且过渡平滑。每段高度控制曲线最后都收敛在期望高度 0.23 mm 附近,在比例系数为 $-0.00300\ \text{s}^{-1}$ 、积分系数为 $-0.00035\ \text{s}^{-1}$ 时可得到较好的控制性能。每段总堆高与期望总堆高的误差较小,各段之间保持平整,且成形件晶粒尺寸与壁厚的变化趋势相同。

参 考 文 献

- [1] Cai Z G, Song G F, Lin L F, *et al.* Foundation of thickness model of large and gradual-change thin-wall part[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2008(5): 49-50.
蔡志刚, 宋国峰, 林立芳, 等. 大型薄壁变壁厚零件壁厚模型的建立[J]. *机械设计与制造*, 2008(5): 49-50.
- [2] Song Y W, Yu W W, Zhu J, *et al.* Parametric design of turbo-jet blades with unequal thickness[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(3): 304-309.
宋玉旺, 余伟巍, 朱剑, 等. 变壁厚涡轮叶片参数化设计[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2008, 20(3): 304-309.
- [3] Han M L, Lin X S, Tang E L. Optimization design of variable wall thickness of EFP warhead with hemispherical liner[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2015, 34(5): 54-57, 70.
韩明蕾, 林溪石, 唐恩凌. 变壁厚球缺型 EFP 战斗部结构优化设计[J]. *沈阳理工大学学报*, 2015, 34(5): 54-57, 70.
- [4] Zhou T A. The simulation optimization research of backward extrusion process on deep cylindrical part with variable thickness[D]. Guangzhou: South China

University of Technology, 2010.

周泰安. 变壁厚铝质深筒形件反挤压工艺模拟优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

- [5] 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 LCF 研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0602004.
- [6] Lu B, Zhu G X, Wu J Z, *et al.* Laser direct forming process of thin-walled blade using variable spot by inside-beam powder feeding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1203003.
陆斌, 朱刚贤, 吴继璋, 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] Zhu G X, Shi S H, Fu G Y, *et al.* Realization and research of unequal-width cladding layers by using variable laser spot with the inside-laser powder feeding[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(1): 25-28.
朱刚贤, 石世宏, 傅戈雁, 等. 激光变斑熔覆不等宽熔道的工艺实现及实验研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(1): 25-28.
- [8] 石拓, 卢秉恒, 魏正英, 等. 激光成形均匀变宽零件的方法: 201610861588.9[P]. 2016-09-29.
- [9] Long R S, Liu W J, Xin F, *et al.* Effects of scanning methods on temperature during laser directly metal shaping[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(4): 528-531.
龙日升, 刘伟军, 邢飞, 等. 扫描方式对激光金属沉积成形过程温度的影响[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(4): 528-531.
- [10] Hua Y, Choi J. Adaptive direct metal/material deposition process using a fuzzy logic-based controller [J]. *Journal of Laser Application*, 2005, 17(4): 200-210.
- [11] 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.
- [12] Liu S, Kong F R, Shi S H, *et al.* Study of a hollow laser beam for cladding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014 (73): 147-159.
- [13] Yang X H, Zhang A F, Li D C, *et al.* Influence of process parameters on self-healing ability in laser metal direct forming[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0603023.
杨小虎, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形工艺参数对形貌自愈合能力的影响[J]. *中国激光*,

2011, 38(6): 0603023.

- [14] Wu J Z, Zhu G X, Lu B, *et al.* Influence of self-regulation-effect on forming quality of thin-walled parts with variable laser spot cladding[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 145-150.
吴继璋, 朱刚贤, 陆斌, 等. 自愈合效应对光内送粉激光变斑熔覆成形薄壁件的影响[J]. 西安交通大学

学报, 2016, 50(1): 145-150.

- [15] Pi G, Zhang A F, Zhu G X, *et al.* Self-healing-effect in laser direct metal manufacturing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(11): 77-81.
皮刚, 张安峰, 朱刚贤, 等. 激光金属直接成形中形貌自愈合效应研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 77-81.