

激光金属沉积堆高闭环控制研究

石 拓¹, 卢秉恒¹, 魏正英¹, 周 亮², 石世宏²

¹西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049;

²苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 激光金属沉积(LMD)传统上多采用固定的工艺参数进行扫描堆积成形,每层的实际堆积高度一般是固定且不可控的。为提高成形稳定性和成形件的精度,补偿堆高误差,开发了一种可实时变化工艺参数的堆高闭环控制系统。通过反馈实际堆高与设定期望层高之间的误差,控制实际堆高达到设定值。设计 P 和 PI 两种控制器,分别以扫描速度和激光功率作为输入参量来控制实际堆高。结果表明,变扫描速度控制优于变激光功率控制,实际层高的最佳稳态波动范围可达 ± 0.015 mm;PI 控制器可使总堆高达到期望值;当送粉速率发生突变时,P 控制系统具有良好的鲁棒性;P 控制器的阶跃响应曲线与成形件剖面纹理显示的堆高变化一致。该系统为堆高的可控和堆高误差补偿提供了新方法。

关键词 激光技术; 激光金属沉积; 工艺参数; 堆高; 闭环控制

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0702004

Research of Closed-Loop Control of Deposition Height in Laser Metal Deposition

Shi Tuo¹, Lu Bingheng¹, Wei Zhengying¹, Zhou Liang², Shi Shihong²

¹School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

²School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract In laser metal deposition (LMD), fixed process parameters are mostly used during the deposition. The actual deposition height of each layer is generally fixed and uncontrollable. In order to improve forming stability and accuracy of the forming parts, and compensate the error of deposition height, a real time closed-loop control system of deposition height with variable process parameters is development. The actual deposition height is controlled by means of the feedback of the error between actual deposition height and the set desired layer height. Both P-controller and PI-controller are designed, and scanning speed and laser power as input variables are implemented respectively to control the actual deposition height. The experimental results indicate that the variable scanning speed control is better than variable laser power control. The best fluctuation range of the actual deposition height is ± 0.015 mm. The total deposition height can achieve the desired total layer height using PI-controller. If the powder feeding rate changes abruptly, the P-control system has a nice robustness. The sectional view of cladding layer texture shows the variable deposition heights, which are in accord with the step response curve of P-controller. The system provides a new method to control deposition height and to compensate deposition error.

Key words laser technique; laser metal deposition; process parameter; deposition height; closed-loop control

OCIS codes 140.3390; 140.3380; 350.3850

1 引 言

激光金属沉积(LMD)技术基于激光熔覆技术与快速成形技术^[1-5]对零件的 CAD 模型进行分层切片与路径规划,然后利用激光熔覆形成具有一定宽度和高度的熔道,通过层层堆积而形成实体。LMD 技术具有

收稿日期: 2016-12-02; **收到修改稿日期:** 2017-03-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100304)、国家自然科学基金(51675359)

作者简介: 石 拓(1984—),男,博士研究生,主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。E-mail: tuo.shi@qq.com

导师简介: 卢秉恒(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事先进制造技术方面的研究。

E-mail: bhlu@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

无模具、成形时间短、尺寸不受限制等优点,成形的实体层间呈冶金结合,而且成形体的组织均匀致密。选择性激光熔化(SLM)是一种激光 3D 打印技术^[6-7]。与 SLM 相比,LMD 的成形尺寸精度较低,特别在多层堆积时易造成尺寸失稳。LMD 多采用固定的工艺参数进行扫描堆积成形,每层的实际堆高一般是固定且不可控的,实际堆高与 Z 轴的单层同步提升量不一致,这会使激光的离焦量发生变化,进而导致成形件的尺寸精度低,甚至发生堆积塌陷、失稳。

许多研究采用正交试验和工艺经验相结合的方式来确定熔覆层的实际高度。例如:通过单道正交试验寻找不同离焦量下堆高相等的工艺参数组合^[8];利用单因素正交试验模型得出的二次回归方程来预测熔覆层的高度^[9];利用 BP(反向传播)神经网络建立熔覆层高度的预测模型,当预测的熔覆层高度偏离期望值时,对加工参数进行调整^[10]。上述文献均采用开环方法改变工艺参数,进而控制实际的堆高。然而在成形过程中,熔覆层的实际堆高会受到工艺参数、基体状况、装备状况等复杂因素的影响,即使完全相同的工艺参数,前后两次熔覆堆积的高度都有可能不相等。因此,即便是通过大量试验得到的堆高的预测值仍然难以与期望值完全一致,不能保证成形过程的稳定。

也有学者对堆高的测量及控制方法进行了研究。第一类方法为根据测量的堆高值,用控制器随时间变化的工艺参数来控制堆高^[2,11],这种方法易因反馈滞后而造成补偿位置的偏后。第二类方法为测量激光的离焦量,同时适应性改变 Z 轴提升量以保持离焦量不变。本课题组前期研发了基于 CCD(Charge coupled device)视觉传感器的层高测量系统^[12-14],即基于离焦量不变原理实现了闭环自适应堆积控制^[15-17]。第二类方法虽然能够较好地防止熔覆过程失稳,但每层的堆高不可预测,也不能控制其达到期望值,因此不能满足复杂形状零件的成形要求,如精确控制堆高,满足尺寸精度和组织均匀等。

本文提出了一种堆高的精确反馈控制方法:依据当前熔覆层离散点的堆高数据,规划下一道熔覆工艺参数,以补偿堆高误差,使实际堆高最终收敛于期望层高。根据这一离散点堆高补偿法,实际的熔覆堆高既可保持不变,又可主动改变至新的稳定的期望值。

2 试验条件

试验采用中空环形激光内送粉熔覆喷头装置,其原理如图 1 所示。平行激光束经反射镜组后形成中空的环形激光束,从单粉管的中轴线上喷射出粉末。激光内送粉熔覆喷头具有粉末利用率高、粉末可控性好等优点^[15-17]。由图 1 可见,在一定的离焦量下,激光光斑保持一定的宽度,将基体表面与粉末熔化形成熔池。

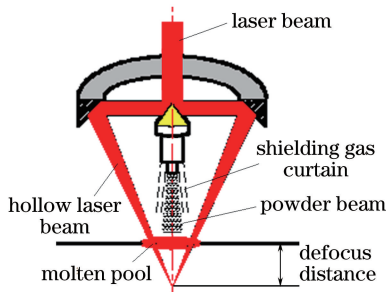


图 1 中空环形激光内送粉原理

Fig. 1 Principle of hollow laser beam internal powder feeding

图 2 为 LMD 堆高闭环控制系统及直壁墙堆积试验。运动机构为 6 轴 KUKA 机器人 KR 60-3F,采用 IPG YLS-2000-TR 型光纤激光器和 GTV PF2/2 型送粉器,保护气和载粉气均使用氮气。以 Basler acA1300-30gm 高速 CCD 相机作为堆高传感器,图像采集频率约为 $35 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$,基于光学三角法原理和图像分析实现堆高的测量^[12]。工控机处理采集的图像,得出的堆高数据送至控制器计算,通过 ProfiNet 总线将提升量 ΔZ 、激光功率 P 、扫描速度 v 等数据实时传输给机器人控制器,进而控制机器人、激光器等执行机构。

成形试验中的基体材料为 45 钢。激光熔覆材料选用 Fe313 铁基合金粉末,粉末颗粒的直径为 $75 \sim 106 \mu\text{m}$,其成分见表 1。

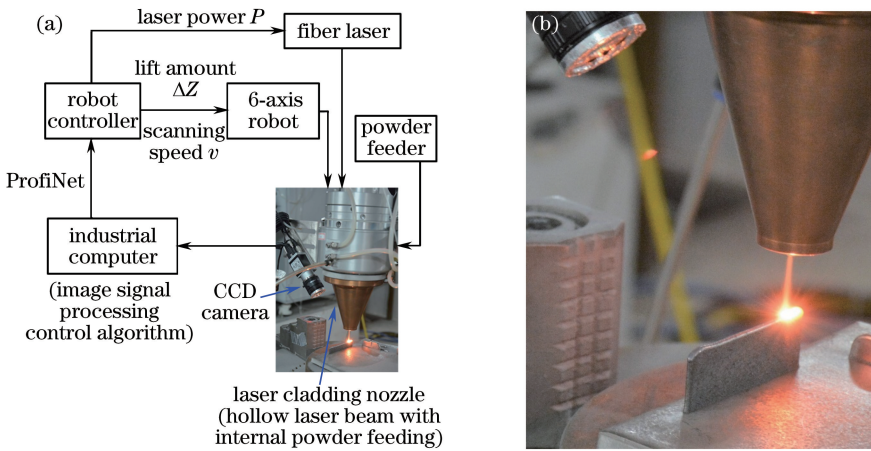


图 2 (a) LMD 堆高闭环自动控制系统及 (b) 直壁墙堆积试验

Fig. 2 (a) LMD layer height closed-loop automatic control system and (b) straight wall stacking experiment

表 1 Fe313 铁基合金粉末的成分(质量分数, %)

Table 1 Composition of Fe313iron-based alloy powder (mass fraction, %)

Composition	C	Si	Cr	B	Fe
Mass fraction	0.1	2.5-3.5	13-17	0.5-1.5	Bal.

3 控制器设计

在 LMD 中,熔覆层的高度、宽度及熔池温度等由激光功率、送粉速率、离焦量、扫描速度等多个工艺参数共同决定^[10,18]。因其为非线性多输入多输出系统,各参数之间相互影响,存在复杂的耦合关系,难以建立统一的数学模型,故采用单因素反馈控制试验。当数学模型不够准确,各工艺参数在一定范围内取值时,单因素反馈控制试验能通过反馈控制使实际堆高达到期望值。

中空环形激光扫描时的能量密度公式为^[16]

$$E = P / (Dv) \tag{1}$$

光斑能量密度 E 与激光功率 P 成正比,与光斑外环直径 D 、扫描速度 v 成反比。 E 和送粉速率 m 共同影响熔道截面的高度和宽度。

激光光斑直径为 2.5 mm(离焦量不变)、送粉量为 $8 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 、激光功率为 800 W 时的堆高和层宽随扫描速度的变化曲线如图 3 所示。可见,随着扫描速度从 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,堆高从 0.78 mm 降至 0.09 mm,而层宽则始终保持在 2.5 mm 左右。光斑直径为 2.5 mm(离焦量不变)、送粉量为 $8 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 、扫描速度为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的堆高和层宽激光功率的变化曲线如图 4 所示。可见,随着激光功率从 600 W 增加至 2000 W,堆高由 0.20 mm 缓慢增加至 0.51 mm,层宽则由 2.52 mm 增加到 3.40 mm。

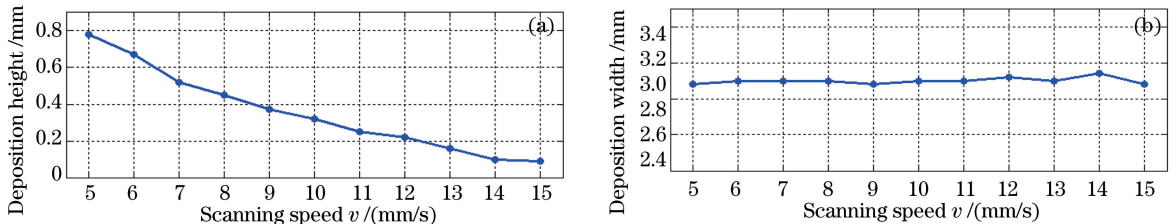


图 3 正交试验结果。(a)堆高随扫描速度的变化;(b)层宽随扫描速度的变化

Fig. 3 Orthogonal experiment results. (a) Change of deposition height with scanning speed; (b) change of deposition width with scanning speed

由图 3、图 4 可知,当扫描速度在一定范围内取值时,扫描速度的减小能带来激光能量密度、单位长度接受粉末量的双重增加,因此堆高增加得较明显。而激光光斑的宽度恒定,因此层宽增加很小。激光功率的增大只会引起激光能量密度增加,使熔池面积增大,落入熔池中的粉末量增加,从而使堆高和层宽均增大。图

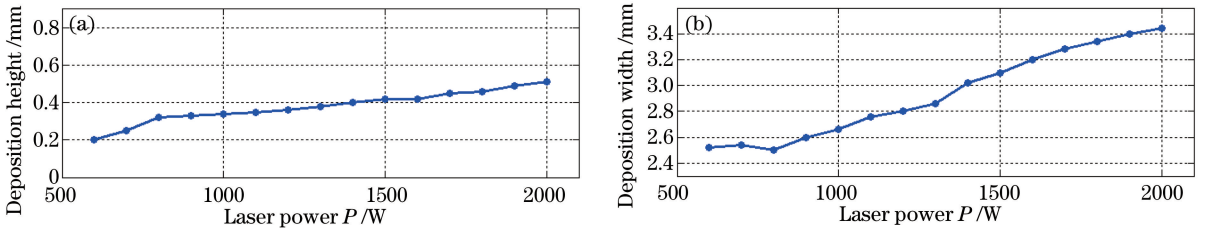


图 4 正交试验结果。(a)堆高随激光功率的变化;(b)层宽随激光功率的变化

Fig. 4 Orthogonal experiment results. (a) Change of deposition height with laser power;
(b) change of deposition width with laser power

3(a)与图 4(a)的曲线均为单调曲线,呈现出简单的非线性,因此可尝试使用 PID(比例-积分-微分控制器)方法进行控制。

设计 PID 控制器,分别进行扫描速度-实际堆高、激光功率-实际堆高的单输入控制试验。设 h_d 为期望层高, h 为实际堆高,是传感器测得的单层多个离散点堆高的平均值。以层为周期进行反馈计算, k 为当前熔覆层号,则

$$e(k) = h_d(k) - h(k), \quad (2)$$

式中 e 为第 k 层实际堆高与期望层高的误差,即堆高差。

在扫描速度控制环中,通过每层修正扫描速度来使实际堆高 h 趋近于期望层高 h_d 。根据数字控制原理^[19-20],每层需要的速度变化量 Δv 可以表达为 PID 算法的差分方程

$$\Delta v = K_p e(k) + K_i \sum_{m=1}^k e(m) + K_D [e(k) - e(k-1)], \quad (3)$$

式中 K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, K_D 为微分增益。两层间的速度变化量为两个速度的差

$$\Delta v = v(k+1) - v(k), \quad (4)$$

式中 k 为当前的熔覆层号, $k+1$ 为下一熔覆层号。由(3)、(4)式可得

$$v(k+1) = v(k) + K_p e(k) + K_i \sum_{m=1}^k e(m) + K_D [e(k) - e(k-1)], \quad (5)$$

式中比例项 $K_p e(k)$ 的作用是对 $v(k)$ 进行修正, K_p 一般取负值。这样,当实际堆高小于期望层高时, $K_p e(k)$ 为负值,使下一层的扫描速度减小,熔道变高。当 $K_p e(k)$ 为正值时,则下一层的扫描速度加快,熔道变低。积分项可以消除系统的累积误差,使层层熔覆堆积的总高度达到期望值。本试验的控制器中不使用(5)式中的微分项。

(5)式是将扫描速度作为单个输入量对堆高进行控制。如果采用激光功率作为单个输入量,则对堆高的 PID 控制可以表达为

$$P(k+1) = P(k) + K_p e(k) + K_i \sum_{m=1}^k e(m) + K_D [e(k) - e(k-1)]。 \quad (6)$$

4 试验过程与结果

在离焦量为 -3.6 mm、光斑宽度为 2.8 mm 的条件下,逐层向上堆积成形了长为 50 mm 的直壁墙。分别变化扫描速度(P 控制器、PI 控制器)和激光功率(P 控制器),进行堆高的闭环控制试验。在成形过程中变化期望层高 h_d ,观察系统的阶跃响应性能。

4.1 变扫描速度-堆高控制(P 控制器)

试验的初始工艺参数与控制参数见表 2。

表 2 变扫描速度-堆高控制(P 控制器)系统参数

Table 2 System parameters for variable scanning speed-deposition height control (P-controller)

Laser power /W	Initial scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Initial powder feeding rate /($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	K_p / s^{-1}	K_i	K_D
620	6	6.5	-10	0	0

期望层高 h_d 设定为 $0.3\text{ mm} \rightarrow 0.2\text{ mm} \rightarrow 0.25\text{ mm}$ 阶跃信号,堆高和扫描速度随层数的变化如图 5 所示。其中 $0 \sim 14$ 层为 Z 轴随动提升,实际堆高略高于 0.3 mm 。从第 15 层开始启动 P 控制器,扫描速度开始增大,实际堆高回落至 0.3 mm 附近。在 $19 \sim 35$ 层,堆高稳定在 0.3 mm 左右,波动范围为 $\pm 0.025\text{ mm}$,稳态的扫描速度为 $6.6 \sim 7.2\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从第 36 层开始,期望层高降至 0.2 mm ,扫描速度迅速上升至 $12\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,实际堆高降低。实际堆高的阶跃响应存在 $2 \sim 3$ 层的响应延迟,在第 42 层第一次达到稳态值,在第 47 层左右达到稳态。在 $47 \sim 63$ 层,实际堆高稳定在 0.2 mm 左右,波动为 $\pm 0.03\text{ mm}$,稳态的扫描速度为 $11.1 \sim 11.8\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从第 64 层开始,期望层高升至 0.25 mm ,扫描速度下降至 $8 \sim 9\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,实际堆高存在 $5 \sim 6$ 层的响应延迟,在第 77 层左右达到稳态。此后期望层高稳定在 0.25 mm ($77 \sim 97$ 层),波动仅为 $\pm 0.015\text{ mm}$ 。稳态扫描速度为 $8.6\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

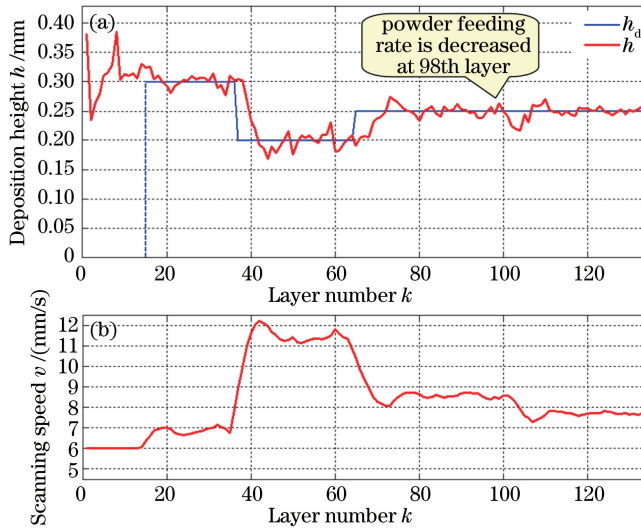


图 5 变扫描速度-堆高控制(P 控制器)的(a)堆高、(b)扫描速度随层数的变化

Fig. 5 (a) Deposition height and (b) scanning speed varied with layer number by variable scanning speed-deposition height control (P-controller)

在第 98 层,将送粉速率由 $6.5\text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 减至 $5.85\text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$,由于单位时间内落入熔池的粉末量减少,实际堆高 h 开始下降,堆高差 e 增大,系统自动降低扫描速度来补偿落入熔池的粉末量,同时功率密度增大。到第 105 层,实际堆高重新回到期望值 0.25 mm 附近,达到稳态,说明系统具有良好的稳健性。扫描速度由第 98 层前的 $8.6\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右降至第 105 层后的 $7.7\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。当工作环境、工艺参数发生变化(如送粉器送粉不稳定)时,系统可自动调整扫描速度,使实际堆高重新回到期望值。

4.2 变扫描速度-堆高控制(PI 控制器)

试验的初始工艺参数与控制参数见表 3。

表 3 变扫描速度-堆高控制(PI 控制系统)系统参数

Table 3 System parameters for variable scanning speed-deposition height control (PI-controller)

Laser power / W	Initial scanning speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Initial powder feeding rate / ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	K_P/s^{-1}	K_I/s^{-1}	K_D
620	6	6.5	-10	-0.5	0

期望层高设定为 $0.3\text{ mm} \rightarrow 0.2\text{ mm} \rightarrow 0.25\text{ mm}$ 阶跃信号,堆高、扫描速度随层数的变化如图 6 所示。图中期望层高的变化与图 5 基本一致。 $0 \sim 15$ 层为 Z 轴随动提升,从第 16 层开始,启动 PI 控制器。在阶跃响应开始的第 38 层、第 67 层处,I 环节的累加部分均清零。

图 6 中各个阶跃响应位置的稳态层数、超调量、稳态波动等参数均不及图 5 中 P 控制器的效果,这是由 I 环节的累积造成的。由于增加了 I 环节,实际堆高的累积误差会被逐渐消除,如 A 所指的两个区域面积基本相等,可相互补偿。期望层高为 0.2 mm 的区域在 $38 \sim 66$ 层,这 29 层的期望总堆高为 $0.2\text{ mm} \times 29 =$

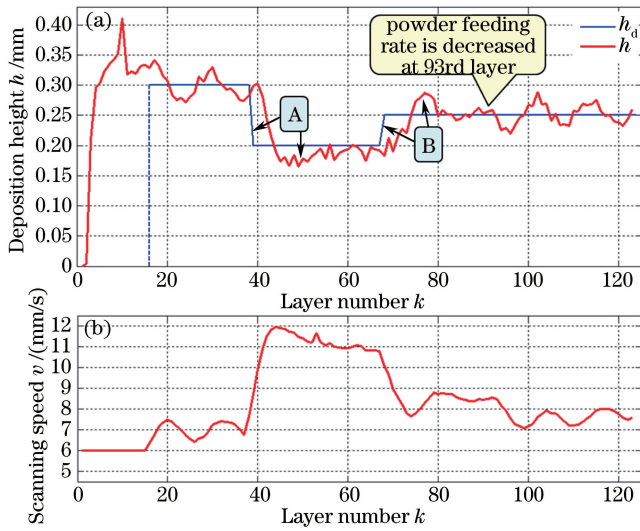


图 6 变扫描速度-堆高控制(PI控制器)的(a)堆高、(b)扫描速度随层数的变化

Fig. 6 (a) Deposition height and (b) scanning speed varied with layer number by variable scanning speed-deposition height control (PI-controller)

5.8 mm, 实际总堆高为 5.8811 mm, 两者基本一致。在 I 累加部分误差趋于零后, 实际堆高基本达到稳态。类似地, B 所指的 2 个区域也可以相互补偿。在本试验中, PI 控制器的收敛速度虽然不及 P 控制器的收敛速度, 并存在一定振荡, 但总堆高可以达到期望总堆高, 这在 LMD 中是必需的。

与图 5 类似, 送粉速率在第 93 层由 $6.5 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 减至 $5.85 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, 实际堆高下降。由于加入了 I 环节, 导致实际堆高 h 发生振荡, 并呈缓慢收敛的趋势。

4.3 变激光功率-堆高控制(P控制器)

试验初始工艺参数与控制参数见表 4。

表 4 变激光功率-堆高控制(P控制器)系统参数

Table 4 System parameters for variable laser power-deposition height control (P-controller)

Initial laser power /W	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Powder feeding rate /($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	$K_P / (\text{W} \cdot \text{mm}^{-1})$	K_I	K_D
730	6	6.5	1500	0	0

期望层高设定为 $0.3 \text{ mm} \rightarrow 0.32 \text{ mm} \rightarrow 0.34 \text{ mm}$ 阶跃信号, 堆高、激光功率随层数的变化如图 7 所示。其中 0~15 层为 Z 轴随动提升。从第 13 层开始, 启动 P 控制器。由于图 4 中单位功率对实际堆高改变的影响较小, 故设定较小变化的阶跃响应, 每次提升 0.02 mm。

在期望层高为 0.3 mm 的区域, 16~22 层的实际堆高 h 略大于期望层高 h_d , 而激光功率则不断下降至 313 W。在第 36 层, 期望层高提升至 0.32 mm, 激光功率逐渐回升并稳定在 400 W 左右。从第 55 层开始, 期望层高提升至 0.34 mm, 经过 3~4 层后实际堆高也达到了 0.34 mm 左右, 激光功率则提升到 500 W 以上。全过程中堆高的稳态波动范围为 $\pm 0.025 \text{ mm}$ 。

对比 7~12 层和 45~53 层, 730 W 和 400 W 的激光功率都可使实际堆高稳定在 0.32 mm 左右。这是由于基板为常温, 7~12 层尚处于向基板传热的过程中, 熔池温度不高。而在 45~53 层, 由于重复加热, 热累积使基体温度不断升高, 使熔池在较低功率下也能达到较高的温度。在 20~54 层, 激光功率小于或等于 400 W, 过低的激光功率导致金属粉末得不到充分熔化, 层内组织疏松, 易产生内应力、裂纹等缺陷。

综合图 4、图 7 的试验结果可知, 较小的堆高变化需要较大的功率变化来控制。图 4 中的所有堆高均是在基板上单层熔覆后测量得到的, 传热方式为三维传热。而图 7 中的堆高则为向上层层累加后测得的, 传热方式为二维传热, 与图 4 中熔池的热场、温度场均不相同。加之熔池宽度同步变化等因素, 导致图 4 中功率与堆高之间的单调增长关系未体现在图 7 中。

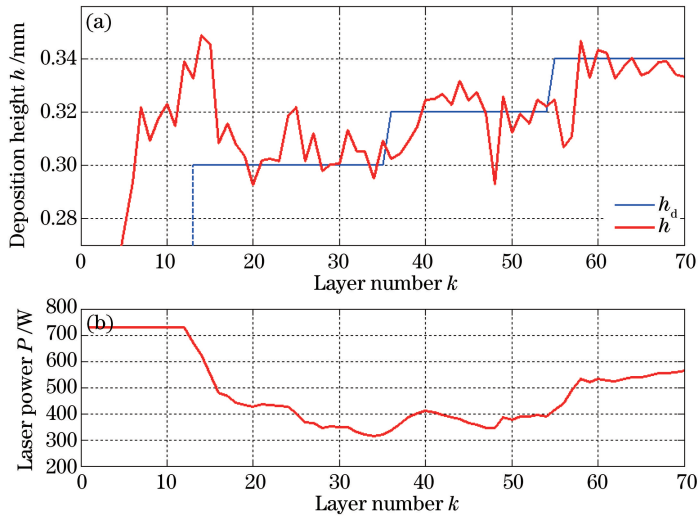


图 7 变激光功率-堆高控制(P 控制器)的(a)堆高、(b)功率随层数的变化

Fig. 7 (a) Deposition height and (b) laser power varied with layer number by variable laser power-deposition height control (P-controller)

4.4 成形件剖面纹理

4.1 小节中的变扫描速度-堆高控制(P 控制器)成形的薄壁墙零件如图 8 所示。在高约 14 mm 处可见一条较明显的分界痕迹,即为图 5 中第 40 层附近期望层高 0.3 mm→0.2 mm 变化处。减去底层未进行堆高测量的约 2 mm 高的预热熔覆层,分界线高度约为 12 mm,与期望总堆高 0.3 mm×40=12 mm 一致。

在图 8 所示成形件上沿箭头方向切取试件,将试件镶样、磨抛、腐蚀后,采用徕卡 DM-IRM 型金相显微镜拍摄,黄色菱形标记处的剖面如图 9 所示。图 9 的熔覆层纹理显示了图 5 中 34~54 层区域,即图 5 中期望层高由 0.3 mm 变化到 0.2 mm 的区域。各层高度已标出,由下至上,实际堆高首先稳定在 0.3 mm 左右,经过数层变化、波动之后,堆高最终稳定在了 0.2 mm 左右。这与图 5 中测量的实际堆高变化是一致的。

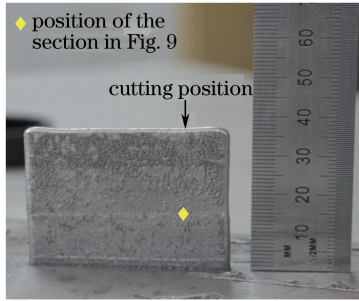


图 8 变扫描速度-堆高控制(P 控制器)的成形件

Fig. 8 Formed part deposited with variable scanning speed-deposition height control (P-controller)

5 结 论

本文基于 LMD 堆高传感器,研究堆高闭环控制方法,得到以下结论:

- 1) 设计数字 P、PI 控制器结构,确定控制参数,通过计算实际堆高与设定期望层高之间的误差来修正扫描速度、激光功率等工艺参数,控制实际堆高不断向期望堆高趋近。
- 2) 在通过改变扫描速度来控制实际堆高的试验中,P 控制器可使单层实际堆高精确地达到期望值,最佳稳态波动范围为±0.015 mm,在送粉速率变化的干扰下具有良好的鲁棒性;P 控制器阶跃响应曲线显示的堆高值变化与成形件剖面纹理显示的熔覆层堆高变化与一致;PI 控制器的阶跃响应虽然存在一定振荡,收敛速度低于 P 控制器,但可使总堆高精确达到期望值。
- 3) 在通过改变激光功率来控制实际堆高的试验中,设计 P 控制器,堆高响应的稳态波动范围为

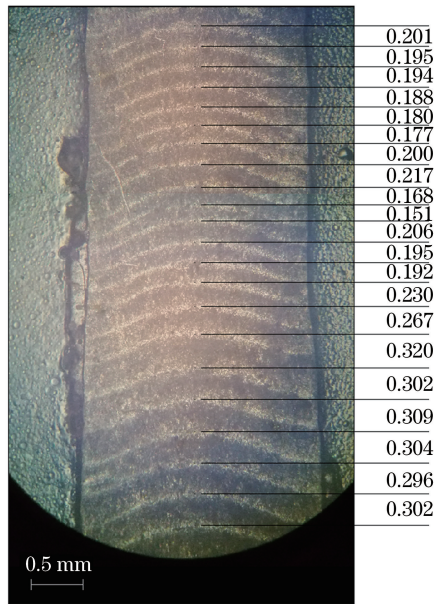


图 9 期望层高 0.3~0.2 mm 变化处剖面熔覆层纹理

Fig. 9 Sectional view of cladding layer texture in 0.3-0.2 mm area of desired layer height

±0.025 mm。改变激光功率的堆高控制精度稍逊于改变扫描速度的堆高控制精度。

4) 在影响 LMD 堆高的工艺参数中,送粉量是主要因素。通过改变扫描速度、激光功率可在一定范围内对实际堆高进行修正,并可精确控制单层堆高和总堆高。采用本文的闭环控制方法后,熔道高度预测模型的建立不需要十分精确,模型中各工艺参数可有一定的取值范围,建模难度降低。可将堆高达到稳态后的、已优化的扫描速度作为下一次堆积的初始速度。本文的方法也可用于自动寻找成形一定高度和宽度熔道的工艺参数组合,以替代繁琐的正交试验。

参 考 文 献

- [1] Choi J, Chang Y. Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(4): 597-607.
- [2] Mazumder J, Dutta D, Kikuchi N, *et al.* Closed loop direct metal deposition: art to part[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4): 397-414.
- [3] Huang Weidong. Laser solid forming technology: rapid freeform fabrication of high performance and compact metallic component [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007.
黄卫东. 激光立体成形: 高性能致密金属零件的快速自由成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [4] Du Qiu, Hang Xiaolin, Wang Mingdi, *et al.* Mechanism and experimental study of laser milling on laser cladding parts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101403.
杜 秋, 杭小琳, 王明娣, 等. 激光铣削对激光熔覆成形件的整形机理和实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101403.
- [5] Jiang Yuejuan, Lu Bingheng, Fang Xuewei, *et al.* 3D printing-based internet collect-manufacturing mode [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2016, 22(6): 1424-1433.
姜月娟, 卢秉恒, 方学伟, 等. 基于 3D 打印的网络化集散制造模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6): 1424-1433.
- [6] Santos E C, Shiomi M, Osakada K, *et al.* Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12): 1459-1468.
- [7] Lin Hui, Yang Yongqiang, Zhang Guoqing, *et al.* Tribological performance of medical CoCrMo alloy fabricated by selective laser melting[J]. Acta Optica Sinica, 2016(11): 1114003.
林 辉, 杨永强, 张国庆, 等. 激光选区熔化医用钴铬钼合金的摩擦性能[J]. 光学学报, 2016(11): 1114003.
- [8] Wu Jizhuo, Zhu Gangxian, Lu Bin, *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.
- [9] Xie Hongmei. Process study and profile prediction on laser cladding of titanium alloys[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
谢红梅. 钛合金激光熔覆工艺与形貌预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [10] Jiang Shujuan, Liu Weijun, Nan Liangliang. Laser cladding height prediction based on neural network[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 269-274.
姜淑娟, 刘伟军, 南亮亮. 基于神经网络的激光熔覆高度预测[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 269-274.
- [11] 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(3/4): 280-292.
- [12] Shi Shihong, Wang Tao, Sun Chengfeng. A Measuring device and its measuring method of molten pool defocusing amount during laser cladding process: 201410235777.6[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: 201410235777.6[P]. 2014-08-13.
- [13] Wang Yiqing, Shi Tuo, Lu Bingheng, *et al.* Layer height measurement device and closed-loop control strategy in laser cladding forming: 201510176039.3[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: 201510176039.3[P]. 2015-04-14.
- [14] Wang Haibo. Study on storey dynamic control of laser 3D deposition process based on PMAC[D]. Suzhou: Soochow University, 2009.
王海波. 基于 PMAC 的激光三维堆积层高随动控制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2009.
- [15] 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.
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.
- [16] Meng Weidong, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.* Experimental study about vertical surface accumulation with coaxial inside-beam power 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.
- [17] Shi Tuo, Lu Bingheng, Shi Shihong, *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.
- [18] Song L, Bagavath-Singh V, Dutta B, *et al.* Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1/4): 247-256.
- [19] Lunze J. Regelungstechnik 2: mehrgrößensysteme, digitale regelung[M]. [S.l.]: Springer-Verlag, 2012.
- [20] Qin Yanhai. The digital PID Control and its applicaion[J]. Journal of Southwest Nationalities College (Natural Science Edition), 1997, 23(1): 49-54.
秦沿海. 数字 PID 控制原理及其应用[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 1997, 23(1): 49-54.