

激光近净成形中熔池宽度实时监控系统的研究

杨 启,田虎成,闫昭华,袁自钧,陈向东
(合肥工业大学 智能制造技术研究院,安徽 合肥 230009)

摘 要:在激光近净成形过程中,为了快速有效地获取熔池区域信息并加以控制,文设计了 CCD 同轴拍摄系统获取熔池的双色图像,可以准确地获得熔池区域的图像信息,并利用最小外接矩形图像处理快速有效地获取熔池宽度,通过 PID 控制器调节激光功率加以控制。实验表明,基于双色图像的 CCD 同轴拍摄方法和熔池宽度闭环控制系统有效解决了激光往复扫描下薄壁工件的边缘凸起和上下宽度不均匀的问题。

关键词:激光近净成形;双色图像;最小外接矩形;熔池宽度监测;熔池宽度控制

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.09.005

Study on real-time monitoring system of molten pool width during laser engineered net shaping

YANG Qi, TIAN Hu-cheng, YAN Zhao-hua, YUAN Zi-jun, CHEN Xiang-dong
(Institute of Intelligent Manufacturing Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In the process of laser engineered net shaping, in order to quickly and efficiently to obtain the information of molten pool and control it, this paper designs a CCD coaxial camera system for dual color images of the molten pool, it can accurately obtain the image information of molten pool. The computer uses the minimum bounding rectangle image processing method to obtain the molten pool width quickly and efficiently, and controlled by PID controller to adjust the laser power. The experimental shows that the CCD coaxial camera system based on dual color image and the closed loop control of molten pool width can effectively solve the problem of edge bulge and uneven width of the thin-walled workpiece under the reciprocating laser scanning.

Keywords: laser engineered net shaping; dual color image; minimum bounding rectangle; width of molten pool; width control of molten pool

1 引 言

激光近净成形(laser engineered net shaping, LENS)技术是通过逐层的激光熔覆方法,从而实现立体金属件制造的过程,它可以解决传统制造方法无法解决的问题,具有加工灵活性高,成形件力学性能较好,致密度高等特点^[1]。加工件的成形质量受多种因素的影响,例如单层熔覆厚度,单道熔覆宽

度^[2],送粉速率,激光功率等。国内外研究学者对熔覆过程的监测控制主要是通过熔池温度,单道熔覆层高度,熔池形状变化等信号反馈,实时调节激光功率,扫描速度,送粉速度等参数,实现对激光近净成形过程的闭环控制。

在熔池监测环节中,熔池图像准确和清晰的获取,对后期图像处理及控制尤为关键。在激光近净

基金项目:合肥工业大学产学研校企合作科研项目(No. 13-522)资助。

作者简介:杨 启(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光精密制造与三维打印技术。E-mail:401980525@qq.com

收稿日期:2019-01-25

成形过程中, CCD 相机通常用来拍摄成形过程中熔池的图像, 并通过数字图像处理方法获取熔池状态的信息。Tan Hua, Chen Jing^[3] 等人建立了一种双色红外测温系统, 讨论了单层厚度的控制方案, 建立了熔池温度与熔池厚度的关系。雷剑波等人^[4] 等人使用 CCD 拍摄熔池, 利用 CCD 比色测温原理获得了熔池的温度分部信息。Lijun Song^[5] 等人提出了一种具有输入约束的广义预测控制策略, 采用双色高温计对熔池温度进行监测与控制。Asselin^[6] 等人使用了 3 组 CCD 相机监视熔池并通过阈值分割等图像处理算法来实现熔池尺寸的实时检测; 杨柳杉^[7] 等人利用侧向 CCD 拍摄并通过阈值分割、几何校正等图像算法获取熔池图像, 完成了激光熔覆熔池宽度的实时监测; 孙华杰^[8] 等人搭建双通道彩色 CCD 拍摄系统, 采用比色测温与 PID 控制策略相结合的方法实现了熔池温度的闭环控制, 消除了薄壁圆筒堆积过程中的热积累效应; J. T. Hofman, B. Pathiraj^[9] 等人利用单色 CMOS 相机获取熔池图像, 使用经验阈值设定法判定熔池位置, 通过控制功率大小来控制熔池大小, 以获得想要的稀释率; S. Moralejo, X. Penaranda^[10] 等人在 CCD 前使用一个 1064 nm 带阻滤波片和一个 700 nm 长通滤波片以获取熔池图像, 并通过前馈 PI 控制器控制熔池大小, 加快了控制过程的响应速度; Ehsan Toyserkani 和 Amir Khajepour^[11] 利用 CCD 侧向拍摄的单通道熔池图片, 通过 PID 控制器调整激光功率输入, 提高了工件的成形精度; Lijun Song, Fanghua Wang^[12] 等人使用两台 CCD 像机与熔池成 45° 角拍摄熔池, 利用相位一致法提取熔池边界, 消除熔池图像中的干扰, 并获得了熔池几何形状。

目前大多数的激光熔覆控制系统主要以控制熔池温度及熔池大小为主, 由于熔池高温的复杂环境, CCD 获取的熔池图像存在很多干扰, 仅仅通过图像处理无法准确判定熔池位置及大小, 实际控制的效果并不理想, 工件边缘凸起和上下层宽度不均匀等问题尚未解决^[13]。本文搭建的基于双色图像的熔池宽度实时监控系统的, 使用 CCD 同轴拍摄方法获取熔池双色图像, 通过对激光熔池温度分布的研究^[14], 可以快速准确地判断熔池区域, 并通过图像算法有效地获取熔池的宽度信息, 利用 PID 控制器实时调节激光功率, 以达到激光近净成形过程的闭

环控制。此系统有效解决了激光往复扫描下薄壁工件的边缘凸起和上下层宽度不均匀的问题, 提高了成形件的精度。

2 实验

2.1 实验材料及设备

本文搭建的激光熔覆系统如图 1(a) 所示, 实验采用连续波光纤耦合半导体激光器 (LASERLINE LDF 6000-100, 波长 (950 ± 20) nm, 最大激光输出功率 6000 W), 选用同轴粉末供给系统 (GTV PF22MFP) 和一个激光熔覆头单元 (COAX 8), 激光冷水机 (PH-LW190-TH2P) 等设备。运动装置选用六轴机器人 (KUKA KR 30 HA) 和水平工作台。同轴拍摄系统由彩色 CCD 相机 (WP-US140), 定焦镜头 (LM100JC 2/3 100 mm/F2.8), 窄带双通滤波片 (460 & 616 nm) 和半透半反镜等组成。实验所用材料为 Ni35 合金粉末, 其化学成分如表 1 所示。以 30 cm × 30 cm × 1 cm 的 45 号钢为基板, 采用高纯氮气作为保护气体。

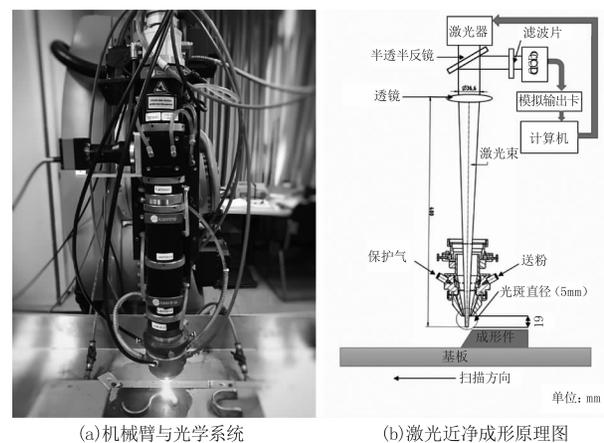


图 1 激光近净成形系统实物图及原理图

Fig. 1 Photo and schematic diagram of laser engineered net shaping system

表 1 Ni35 的化学成分 (wt %)

Tab. 1 Chemical composition of Ni35 powder (wt %)

C	Cr	Si	Fe	B	Ni
0.30	10.50	3.50	10.00	2.00	73.70

如图 1(b) 所示, 采用 400 mm 焦距的透镜将激光束聚焦在焦平面上, 光斑直径 5 mm, 熔覆头工作距离为 19 mm。采用半透半反镜将熔池热辐射反射到 CCD 拍摄系统中, 通过 460 & 616 nm 窄带双通滤波片和 CCD 相机获取熔池的双色图像, 由此形成了

熔池几何形状的同轴监测系统。使用计算机对图像数据进行处理,并通过模拟量输出卡将结果反馈给激光器用于实时调节激光功率的大小。

2.2 熔池区域的数值模拟

激光熔覆过程中熔池的温度变化和形态变化都会影响到最终的成型效果^[15],为了了解熔覆过程中熔池温度及形态的变化,本文使用数值模拟软件用

于模拟恒定激光功率下熔池的状态,实验参数如表 2 所示。在计算中,为了模拟在实际送粉过程中由连续加热和质量增加引起的几何变化,采用任意拉格朗日和欧拉方程进行建模,通过求解公式(1)的热传导方程,并考虑材料热物性参数随温度的变化,粉末对激光能量的吸收,以及相变潜热等因素,得到熔覆过程的数值模拟结果。

表 2 数值模拟过程中的实验参数

Tab. 2 The parameters in the processes of LENS

Experiment number	Laser power /W	Spot diameter /mm	Cladding speed / (mm · s ⁻¹)	Cladding length / (mm · layer ⁻¹)	Lifting amount / (mm · layer ⁻¹)
1	900	5	2	70	0.5
2	1100	5	2	70	0.5
3	1300	5	2	70	0.5
4	1500	5	2	70	0.5
5	1700	5	2	70	0.5
6	1900	5	2	70	0.5

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (1)$$

数值模拟下熔池图如图 2 所示,我们将沿着熔池运动方向的尺寸定义为熔池长度,垂直于熔池运动方向的尺寸定义为熔池宽度。熔池的温度分布由等温线表示,根据 Ni35 材料的熔点,定义熔池边界温度为 1270 K。

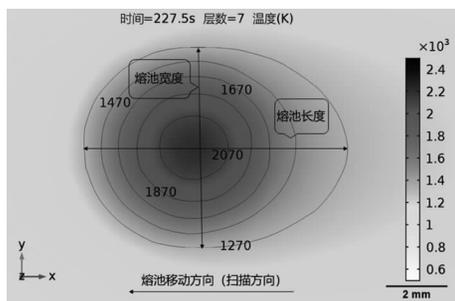
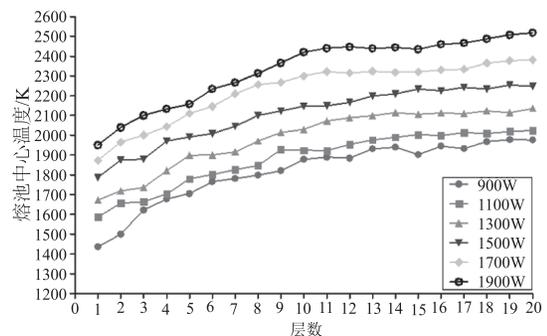


图 2 定义熔池的长宽

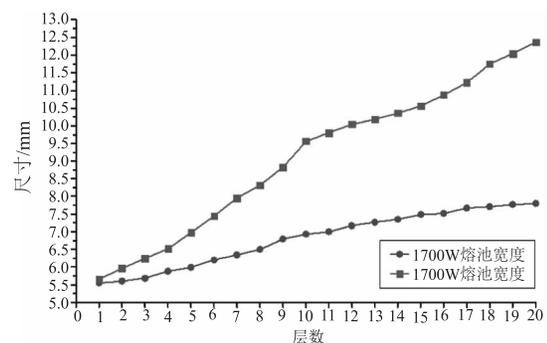
Fig. 2 Definition of the length and width of the molten pool

不同功率下熔池区域的中心温度和尺寸如图 3 所示,随着激光功率和层数的增加,熔池中心温度逐渐升高,熔池尺寸逐渐增大。如图 3(a)、(b)所示,相同功率下当层数增加至 10 层以后虽然温度增长幅度变小,但熔池的尺寸依旧持续上升,此时如果单

纯地控制熔池温度将无法有效地控制熔池尺寸的增长。



(a) 不同功率下每层的熔池中心温度模拟结果



(b) 1700W 恒功率下每层熔池长宽模拟结果

图 3 熔池区域的中心温度和尺寸大小的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of the central temperature and size of the molten pool

2.3 熔池的图像和宽度的获取

为了准确获取熔池区域的图像,我们通过双色测温法原理对熔池进行拍摄。当温度低于 3000 K 和波长 λ 小于 700 nm 时,普朗克公式可以用维恩的近似公式。根据双色测温原理^[16],可以得到熔池温度分布为:

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_b} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\ln \frac{R}{B} + K - 5 \ln \frac{\lambda_b}{\lambda_r}} \quad (2)$$

其中, C_2 是第二辐射常数; T 是熔池的温度; R 和 B 为熔池图像的灰度值; K 为 CCD 相机的响应系数。系统中使用 CCD 相机的颜色响应如图 4(a) 所示。为了避免波长之间的串扰,设计了两个波长的窄带滤波器,如图 4(b) 所示。因此,CCD 所拍摄的图像能够反映激光作用区域的温度分布。

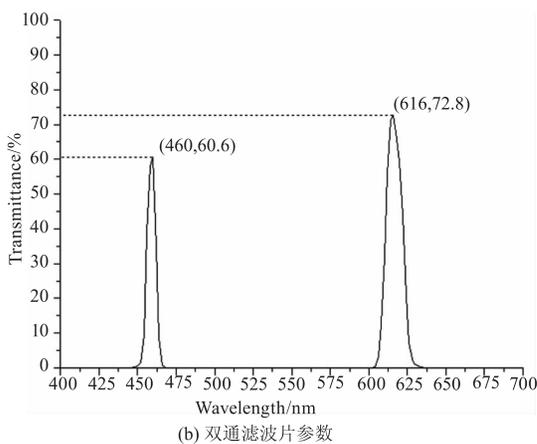
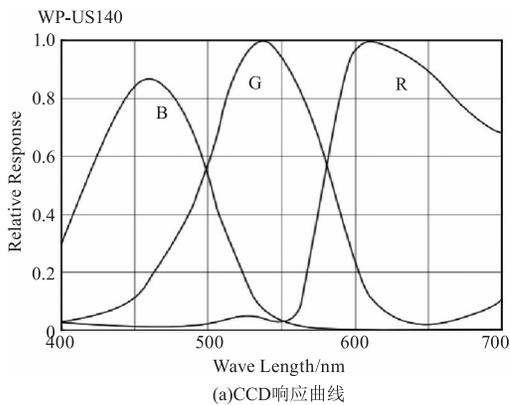


图4 CCD 响应曲线和双通滤波片参数

Fig. 4 CCD response curve and double-channel filter parameter

通过对红色通道和蓝色通道中性衰减和 CCD 增益的调节,CCD 相机可以获得熔池的精确图像。图 5 为熔池双色图像与仿真结果对比图,可以看出所拍摄熔池边界与模拟结果中熔池边界基本吻合。

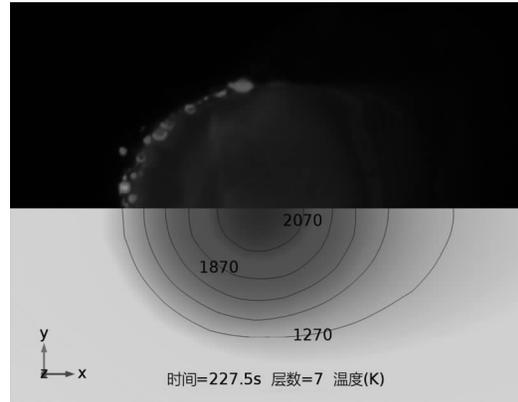


图5 熔池双色图像与仿真结果对比

Fig. 5 Images of molten pool compared with simulation

随着扫描方向的改变,熔池图像的方向也会发生改变,如图 6 所示,本文采用图像算法实时跟踪熔池的宽度和长度,通过检测图像轮廓得到熔池的最小边界矩形^[17],从而得到熔池的长度和宽度。图中外接矩形的长表示熔池的长度,外接矩形的宽表示熔池的宽度。校准得到的熔池实际尺寸为 52.8 pixels/mm。该软件每秒捕获 30 帧图像,程序仅需要 25 ms 就可以处理一帧图像并反馈信息给 PID 控制器以调整激光功率。

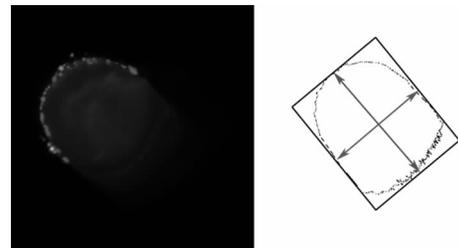


图6 熔池的图像和熔池的最小外接矩形

Fig. 6 Minimum bounding rectangle of the molten pool

2.4 不同激光功率对熔池长宽的影响

本文设计了不同功率下单道直线熔覆实验,观察熔池形状变化。实验参数如表 2 所示。实验结果如图 7、图 8 所示,不同激光功率下单道成形件各层中心点熔池的宽度和长度如图 7(a) 和 7(b) 所示,可以看出随着激光功率和层数的增大,熔池的宽度和长度逐渐增大。在 1500 W 激光功率时,熔覆件在第 8 层不同点处(每隔 1 mm 测量一次数据)的宽度和长度的变化如图 8(a) 和 8(b) 所示,可以看出,在工件末端激光扫描方向改变时,由于同一区域短时间内激光往复扫描,使得工件末端的宽度达到最大值,长度达到最小值。扩大的熔池融化了更多的金属粉末,最终导致了成形件端头的凸起。由于熔

池的长度受激光头移动方向的影响较大,在熔覆件端头处反而变短,所以熔池的宽度更能准确地反映熔池的熔化情况。

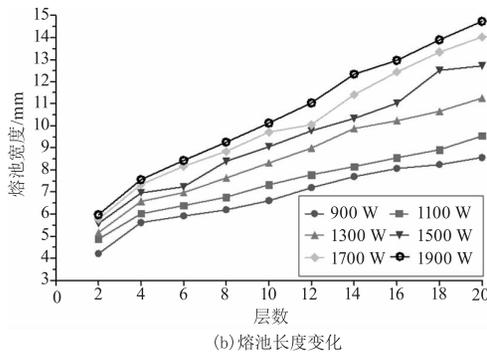
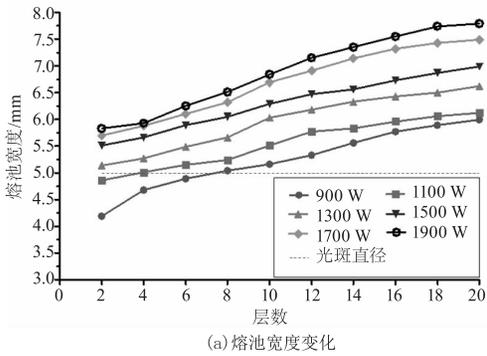


图 7 不同功率下随着层数增长熔池宽度和长度的变化
Fig. 7 Variation of width and length of molten pool as layer increase under different laser power

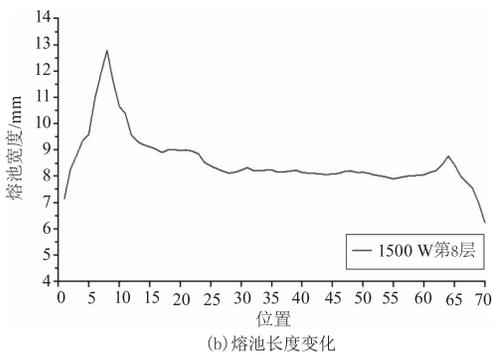
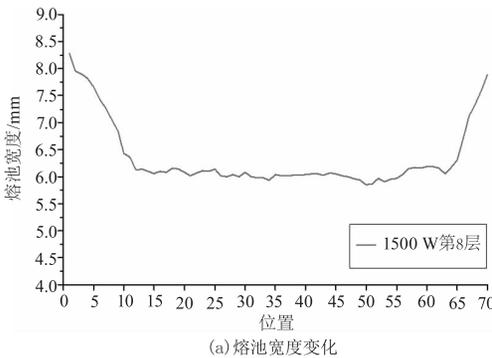


图 8 1500 W 第 8 层不同位置熔池宽度和长度的变化
Fig. 8 Variation of width and length of molten pool at different positions of layer 8 of 1500 W

2.5 宽度控制器设计

由实验得知,激光功率和熔池宽度呈非线性关系,这时需要 PID 控制器来实时调整激光功率使熔池宽度稳定不变,PID 控制流程图如图 9 所示。

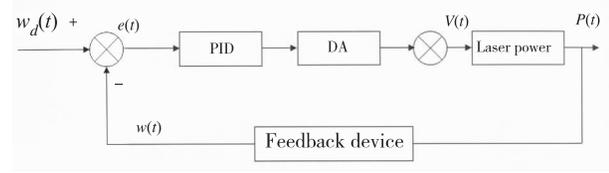


图 9 使用 PID 控制器完成熔池大小控制的流程图
Fig. 9 Flow chart of using PID controller to complete control of melting pool size

设 $w(t)$ 是实际熔池宽度; $w_d(t)$ 是设定的熔池宽度; $e(t)$ 是偏差值即熔池宽度差; $v(t)$ 是控制器对被控制对象的输出数值,即控制激光功率大小的电压值; $P(t)$ 为被控制对象输出值,即激光功率。以程序设定的时间做周期运算, t 为当前时刻。

$$e(t) = w_d(t) - w(t) \tag{3}$$

在激光功率控制环节中,通过调节每一时刻的激光功率,来使实际熔池宽度 w 趋近于设定熔池宽度 w_d ,根据控制原理,激光功率变化量 ΔP 的 PID 算法差分方程如下:

$$\Delta P = K_p e(t) + K_I \sum_{m=1}^t e(m) + K_D [e(t) - e(t-1)] \tag{4}$$

其中, K_p, K_I, K_D 分别为比例增益、积分增益、微分增益。

采用激光功率作为单个输入量,整个熔覆过程中,激光功率的 PID 控制算法表达式为:

$$P(t+1) = P(t) + K_p e(t) + K_I \sum_{m=1}^t e(m) + K_D [e(t) - e(t-1)] \tag{5}$$

3 实验结果与分析

本文在恒定功率模式和熔池宽度控制模式(调整激光功率以保持熔池宽度恒定)下进行了实验对比。实验中采用 Ni35 合金粉末(颗粒大小 $44 \sim 104 \mu\text{m}$)堆积 S 型单道薄壁工件,模型图及工件参数如图 10 所示。在宽度控制中将宽度值设定为 5.7 mm,由于粉末材料和基体的特性,当激光功率为 1700 W 时,下层工件宽度可达到设定值,所以在恒定功率模式与熔池宽度控制模式中将激光初始功率设置为 1700 W,实验参数如表 3 所示。

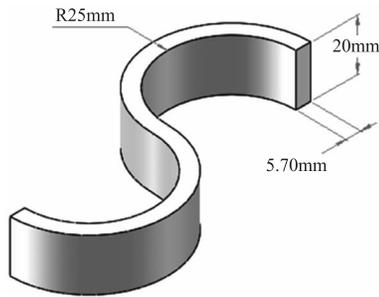


图 10 S 型工件 3D 模型图

Fig. 10 3D model diagram of S-shaped workpiece

表 3 熔覆过程的实验参数

Tab. 3 The parameters in the processes of LENS

Spot diameter /mm	Cladding speed / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Cladding length /mm	Lifting amount / $(\text{mm} \cdot \text{layer}^{-1})$	Powder feeding $(\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$
5	2	70	0.5	3.0

3.1 恒定功率下激光熔覆

图 11 表示在恒定功率下 40 层激光熔覆成形的薄壁工件。

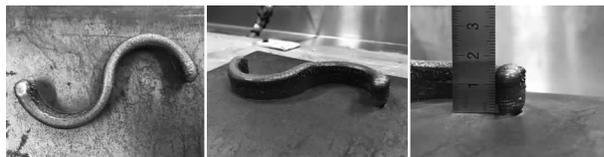


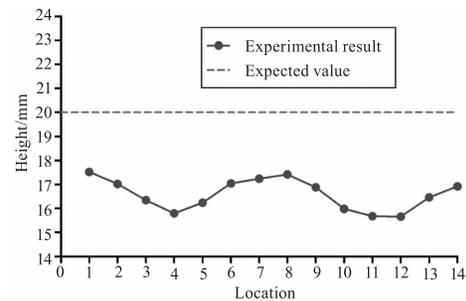
图 11 1700 W 恒功率下 40 层工件成形效果

Fig. 11 Forming effect of 40-layer workpiece at a constant power of 1700 W

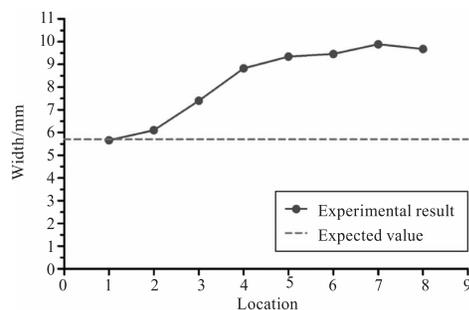
可以看出工件上下宽度差别明显,表面熔覆不平整,出现过烧现象,熔覆件成型质量较差。通过实际测量熔覆件上不同点的宽度和高度数据,如图 12 (a),12(b)所示,可以看出熔覆件尺寸没有达到预期值。在 S 型工件的扫描路径中,恒定功率下激光在不同曲线路径中热作用效果不同,熔池宽度不断变化,不同区域融化的粉末量也不同,使得成形件在熔池变宽的区域会形成高度和宽度的凸增。随着层数的增高,熔池温度不断增加,过热的温度使得熔覆件整体塌陷,低于预期高度。

激光近净成形过程中 6~12 层的熔池宽度变化如图 13 所示。随着层数的增加,熔池宽度不断增大。恒定功率下,在扫描方向改变时,激光光斑会短时间内在工件端头区域往复扫描,导致末端出现过度热积累,此时熔池的宽度迅速增大,如图中不同层之间的大波峰所示。当激光光斑处于 S 型工件正中心时,由于扫描半径方向的改变,在此区域也会出现过度熔覆的现象,如图中同一层中的小波峰所示。

随着熔覆层数的增加,过度热积累现象越来越严重,扩大的熔池最终会吸收更多的金属粉末,导致成形件在此区域形成凸起。



(a) 熔覆工件不同点的高度



(b) 熔覆工件不同点的上下宽度

图 12 恒定功率模式下熔覆

工件的外形尺寸测量结果

Fig. 12 Measurement results of the external dimensions of cladding workpiece in constant power mode

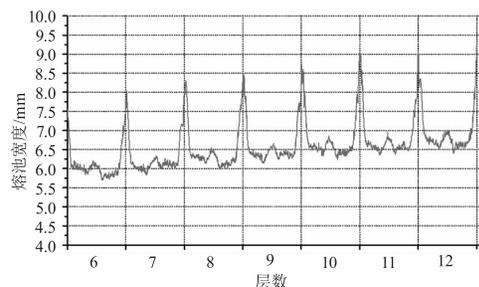


图 13 恒定功率模式下 6~12 层的熔池宽度变化

Fig. 13 Variation of molten pool

width of layers 6~12 in constant power mode

3.2 宽度控制下激光熔覆

在熔池宽度控制模式下,40 层工件成形效果如图 14 所示。



图 14 熔池宽度控制下 40 层工件成形效果

Fig. 14 Forming effect of 40-layer workpiece in the control of molten pool width mode

从图 14 中可以看出,熔池宽度控制系统通过检

测熔池宽度大小,快速反馈给 PID 控制器以调节激光功率,使得熔池宽度基本保持在设定参数值,过热现象得到了改善,保证了不同区域熔化的粉末量基本相同。通过实际测量熔覆件上不同点的宽度和高度数据,如图 15(a),15(b)所示,可以看出熔覆工件端头处和中心处不再形成凸起,尺寸基本达到了预期值,工件成形质量较好。

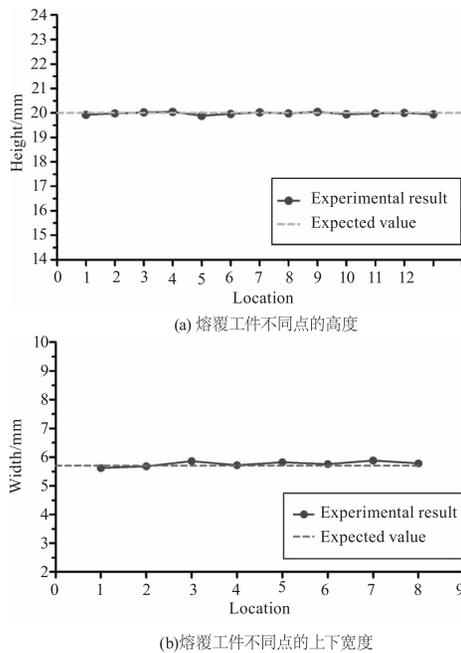


图 15 宽度控制模式下熔覆工件的外形尺寸测量结果

Fig. 15 Measurement results of the external dimensions of cladding workpiece in the control of molten pool width mode

熔池宽度控制过程中 6~12 层熔池宽度变化如图 16 所示,可以看出熔池宽度在设定值周围小幅度震荡,基本保持稳定。当激光光斑位于工件端头处时,熔池宽度有扩大趋势,如图中层与层之间的波峰所示,此时 PID 控制器通过降低激光功率迅速将此趋势抵消,由于熔池变化形态和激光功率之间具有一定的延迟性,短时间小趋势的熔池宽度增长并不会对熔覆件成形质量造成影响。

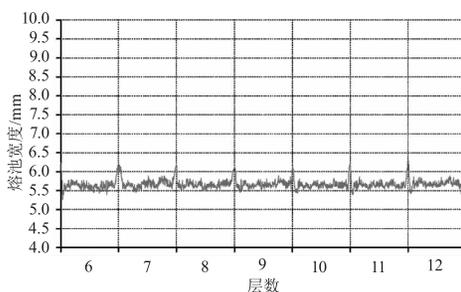


图 16 宽度控制模式下 6~12 层的熔池宽度变化

Fig. 16 Variation of molten pool width of layers 6~12 in the control of molten pool width mode

4 结 论

本研究中搭建的 CCD 同轴拍摄系统,利用熔池双色图像中所包含的温度分布信息,可以快速准确地判断熔池区域,通过最小外接矩形图像算法可以在不同扫描方向的情况下准确地获取熔池的宽度信息。当激光功率恒定时,随着层数的增加,熔池会不断增大,导致熔覆成形件的上下宽度不均匀。激光在往复扫描过程中,由于扫描方向改变等原因,会在某一区域发生过度热积累,导致熔池变大,工件形成凸起。本文所搭建的熔池宽度控制系统性能稳定,响应速度快,解决了激光往复扫描下薄壁工件的边缘凸起和上下宽度不均匀的问题。

参考文献:

- [1] X Wu, J Mei, et al. Near net shape manufacturing of components using direct laser fabrication technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135 (2 - 3): 266 - 270.
- [2] Sun Yuwen, Hao Mingzhong, et al. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd : YAG laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(7) : 985 - 995.
- [3] Tan Hua, Chen Jing, Lin Xin, et al. Research on molten pool temperature in the process of laser rapid forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(1 - 3) : 454 - 462.
- [4] LEI Jianbo, YANG Xiachen, CHEN Juan, et al. Determination of temperature field distribution on laser cladding surface[J]. China Laser, 2008, 35(10) : 1605 - 1608. (in Chinese)
雷剑波, 杨洗陈, 陈娟, 等. 激光熔覆池表面温度场分布的检测[J]. 中国激光, 2008, 35(10) : 1605 - 1608.
- [5] LI junsong, Member, IEEE, and Jyoti Mazumder, et al. Feedback control of melt pool temperature during laser cladding process[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(6) : 1349 - 1356.
- [6] Mathew Asselin, Ehsan Toyserkani, et al. Development of trinocular CD-based optical detector for real-time monitoring of laser cladding[C]//Mechatronics & Automation, IEEE International Conference, IEEE, 2005.
- [7] YANG Liusha, LIU Jinshui, LIU Jichang, et al. Study on CCD-based detection system for online monitoring of melt pool width in laser cladding[J]. Laser Technology, 2011,

- 35(3):315–318. (in Chinese)
杨柳杉,刘金水,刘继常,等. 基于 CCD 的激光熔覆熔池宽度的在线检测研究[J]. 激光技术,2011,35(3):315–318.
- [8] SUN Huajie, SHI Shihong, SHI Tuo, et al. Research on close-loop control of molten pool temperature during laser cladding process based on color CCD[J]. Laser Technology, 2018, 42(6):745–750. (in Chinese)
孙华杰,石世宏,石拓,等. 基于彩色 CCD 的激光熔覆熔池温度闭环控制研究[J]. 激光技术,2018,42(6):745–750.
- [9] J T Hofman, B Pathiraj, J van Dijk, et al. A camera based feedback control strategy for the laser cladding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11):2455–2462.
- [10] S Moralejo, X Penaranda, S Nieto, et al. A feedforward controller for tuning laser cladding melt pool geometry in real time[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2017, 89:821–831.
- [11] Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, et al. A mechatronics approach to laser powder deposition process [J]. Mechatronics, 2006, 16(10):631–641.
- [12] Lijun Song, Fanghua Wang, Simeng Li, et al. Phase congruency melt pool edge extraction for laser additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2017, 250:261–269.
- [13] ZHAO Zongren, TIAN Hucheng, YUAN Zijun, et al. Numerical simulation of edge embossment in laser engineered net shaping work piece[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2018, 41(7):928–933. (in Chinese)
赵宗仁,田虎成,袁自钧,等. 激光近净成形工件边缘凸起的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报, 2018, 41(7):928–933.
- [14] YUAN Yuhan, YANG Qi, YAN Zhaohua, et al. Research and measurement of surface temperature field in laser cladding forming molten pool[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(8):985–992. (in Chinese)
袁钰函,杨启,闫昭华,等. 激光熔覆成形中熔池表面温度场的检测与研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(8):985–992.
- [15] Lee Y S, Farson D F, et al. Surface tension – powered build dimension control in laser additive manufacturing process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5/8):1035–1044.
- [16] Peng Xiaoqi, Yan Jun, Sun Yuan. Design and implementation of high temperature field detector based on CCD image sensor [J]. Journal of Sensor Technology. 2010, 23(3):355–356.
- [17] D Chaudhuria, A. Samalb, et al. A simple method for fitting of bounding rectangle to closed regions [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(7):1981–1989.