

激光沉积成形熔池尺寸分析与预测

钦兰云¹, 徐丽丽¹, 杨光¹, 刘奇², 王维¹

- (1. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136;
2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

摘要: 激光沉积制造过程中, 单道沉积宽度主要受激光熔池宽度的制约, 稳定的熔池是保证成形精度的前提。为了建立工艺参数激光功率、扫描速度以及送粉速率与熔池尺寸之间的经验模型, 采用非匀速段关光控制及卡尔曼滤波技术对采集的熔池测量数据进行去噪处理, 以实现成形过程熔池宽度的精确检测, 为熔池宽度预测精度提供了保证。基于正交试验建立了多元回归模型, 其拟合优度可达 94%, 最大误差不超过 4.5%。经单一变量试验方法验证, 结果表明熔池宽度与激光功率呈正相关, 与扫描速度呈负相关, 实验结果与回归分析结果具有较好的一致性。

关键词: 卡尔曼滤波; TA15 钛合金; 经验模型; 熔池宽度; 回归分析

中图分类号: TG146.2*3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1106009

Analysis and prediction of melt pool size in laser deposition manufacturing

Qin Lanyun¹, Xu Lili¹, Yang Guang¹, Liu Qi², Wang Wei¹

- (1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

Abstract: During laser deposition manufacturing process, the forming width of the single track is mainly controlled by the melt pool width. However, high geometric accuracy is premised on the stable size of the melt pool. In order to establish an empirical model described relationship between the melt pool width and main process parameters (laser power, scanning speed, and powder feeding rate), turn off laser control in uneven speed stage was used and Kalman filtering was applied to denoise the measured data of the melt pool width. An empirical model between the process parameters of laser deposition and the width of molten pool was established based on orthogonal experimental design with a goodness-of-fit of 94%, and the maximum error was less than 4.5%. The results of single variable experiments conducted to the model show that the melt pool width has a positive correlation to the laser power and a negative to the scanning speed. The experimental results were in good agreement with the regression analysis.

Key words: Kalman filter; TA15 titanium alloy; empirical model; melt pool width; regression analysis

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100504); 国家自然科学基金(51505301, 51375316); 辽宁省自然科学基金(2015020118)

作者简介: 钦兰云(1977-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光沉积制造和修复技术等方面的研究。Email: qinly@sau.edu.cn

0 引言

激光沉积制造是一种基于激光熔覆技术的增材制造技术,近年来已广泛应用于航空航天、汽车以及医疗等领域^[1-3]。该技术具有成形制件机械性能高、冶金结合均匀、稀释率低等突出优点,可用来制造传统制造技术难以完成的各种复杂形状的零部件,同时基于激光材料加工固有的快速加热和冷却特性,可满足低成本、短周期、高性能的生产需要^[4-6]。在激光沉积过程中,粉末吸收激光束能量,落入激光束直接照射区域的熔池内并迅速凝固,激光、粉末和熔池交互作用形成沉积层^[7-8]。随着科学技术的发展,各领域对制件的质量日渐苛刻,而高质量的成形件应该具有高成形精度、低稀释率和小孔隙度。通常沉积过程选用恒定的工艺参数,随着沉积过程基底温度的逐渐增加,导致制件成形不均匀,出现蘑菇效应(沉积方向上沉积宽度逐渐增加)和不均匀的沉积层高度等现象^[9]。同时,成形过程的灵敏度较高,加工系统工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉速率等)的轻微波动、沉积环境(温度、湿度、粉末分布等)以及沉积过程(表面张力、熔池流动和熔池形貌等)都会改变预设的实验条件,从而导致制件产生不同程度的成形缺陷,增加了沉积过程实时监测及精确控制的难度^[10-11]。因此,该技术目前仍面临着微观结构优化、成形件尺寸控制以及提高成形过程效率等亟待解决的难题。

为了保证成形制件的质量和精度,国内外众多学者提出了模拟、实时传感和在线控制沉积过程等方法。Hua Tan 等^[12]对薄壁件形成过程进行了二维瞬态模拟,建立了基于 CCD 摄像机的熔池反馈控制,分析了不同工艺参数下薄壁件成形厚度、薄壁件两端形貌以及停光后沉积制件的温度变化,并提出了调整激光在成形件两端驻留时间的策略以改善薄壁试样两端尺寸精度。Sörn Ocylok 等^[13]研究并对比分析了不同工艺参数和预热温度下熔池面积的变化,发现在影响熔池面积的工艺参数中,激光功率影响效果最为明显,提出激光功率自适应控制的单道沉积制造方法。Lijun Song 等^[14]设计了基于双色高温计和高速摄像机的混合控制器并实现了熔池厚度的稳定增长,减小了每层厚度与规定层厚间的误差。

I Tabernero 等^[15]建立了基于计算流体力学模型和热源模型的激光沉积制造数值模型,并利用镍基高温合金对模型进行了实验验证,模型对熔池高度和宽度的预测值与测量值间的平均误差较小。James Warton 等^[16]开发了一个简单的 PID 控制器,并建立了以该控制器和反馈补偿为基础的闭环控制系统,获得了尺寸均匀的熔池,并利用该系统加工出了尺寸均匀的 L 形薄壁件。可见,对激光沉积制件成形精度的影响因素和控制问题已引起国内外研究团队的高度重视。

文中建立了基于 CCD 工业相机的熔池监测系统,并应用卡尔曼滤波技术对采集到的熔池宽度测量信号进行去噪处理,以实现成形过程熔池宽度的精确检测,为建立准确模型以精确预测熔池宽度建立了基础。针对成形单道两端宽度差异问题进行了分析,并提出了合理的控制策略,保证了沉积过程熔池宽度的稳定性。并基于正交实验设计方案及回归分析方法建立了激光沉积制造工艺参数与熔池宽度之间的关系模型。

1 实验设备和材料

激光沉积制造实验是在沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室建立的激光沉积制造设备上完成的。实验采用输出功率可达 6 000 W 的 IPG 光纤激光器,波长为 1 064 nm。激光功率、扫描速度等工艺参数由专用增材制造软件控制。熔池监测系统如图 1 所示,主要包括:CCD 工业相机,CCD 采集卡以及装有自主开发图像处理软件的 PC。监测熔池的 CCD 相机型号为 CF8/5 MXLG,帧率为 60,像素为 768×494,曝光时间为 1/60~1/100 000 s,光谱为黑白。图像采集卡型号为 SDK2500,每秒可采集 25 帧,分辨率可达 720×576。实验中氩气为粉末运载气体,同时氩气也作为保护气体防止熔池发生氧化。其他设备还包括同轴送粉器、光路传输系统等。其中合束镜为 YAG 合束镜,反射率超过 98%,水平倾斜 45°安装,熔池自发射的可见光束透过镜组入射到 YAG 合束镜上,在合束镜上全反射到 CCD 相机前的反射镜上,然后全反射到相机中。相机镜头前装有 1 064 nm 的滤光片,透过率为 0.1%的中性减光片,以及对镜头起到保护作用的耐高温保护镜片。

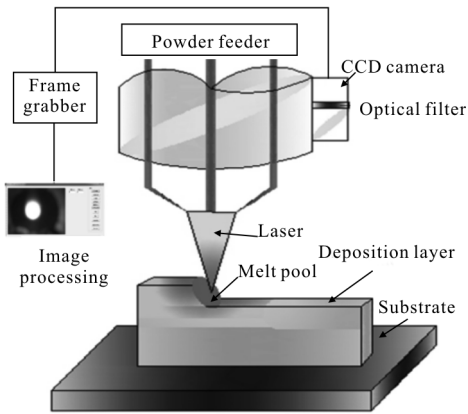


图 1 激光沉积制造在线监测系统示意图

Fig.1 Schematic view of online monitoring system for laser deposition manufacturing

基材采用锻造退火态 TA15 钛合金,其名义化学成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V,成分如表 1 所示。实验前对基材进行打磨后用丙酮擦拭;沉积金属粉末为 TA15 球形粉,粉末粒径为 44~149 μm,经 120 °C 真空烘干备用。

表 1 TA15 钛合金化学成分

Tab.1 Chemical compositions of TA15 titanium alloy (wt %)

| Element | Al | Zr | Mo | V | Ti |
|---------|---------|---------|----------|---------|-----|
| Content | 5.5-7.1 | 1.5-2.5 | 1.05-2.0 | 0.8-2.5 | Bal |

2 结果与讨论

2.1 基于卡尔曼滤波的熔池宽度检测

实验过程采用 CCD 相机拍摄熔池图像,图像采集卡获取熔池的图像信息后,采用自主开发的图像处理软件对图像进行灰度分析,选择合理的阈值将熔池轮廓从背景中提取出来,并对不规则熔池轮廓进行椭圆拟合,图像处理过程如图 2 所示。定义熔池宽度为垂直于熔池进给方向上的熔池拟合椭圆的轴长。

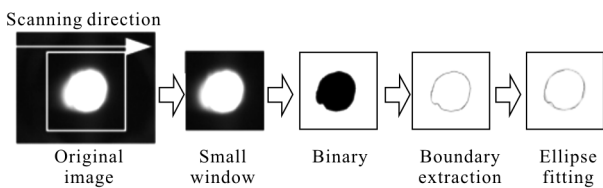


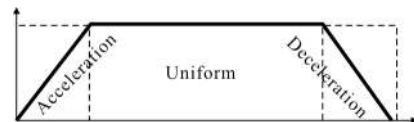
图 2 熔池图像处理过程

Fig.2 Image processing of melt pool

在单道沉积过程中,沉积层宽度与熔池宽度的变化规律一致,尺寸均呈现出在起始和终止两端较中间稳定段大的现象,如图 3 所示。这是由于实际扫描速度受到激光头和工作台动态响应的影响,在成形两端存在加减速的现象,实际扫描速度可分为图 3 所示的加速段、稳速段和减速段。而熔池宽度主要受热输入控制,其能量密度公式为:

$$E = \frac{P}{Dv} \quad (1)$$

式中: E 为比能量, J/mm^2 ; P 为激光功率, W ; D 为光斑直径, mm ; v 为激光扫描速度, mm/s 。由于加减速段的平均速度较稳速段低,而激光功率和光斑直径是恒定的,因此在加减速段激光输入到基材上的比能量较大,熔池温度较高,体积较大。



(a) 扫描速度变化示意图

(a) Schematic view of scanning velocity



(b) 单道沉积层

(b) Single deposition layer



(c) 熔池尺寸变化

(c) Size change of melt pool

图 3 激光沉积单道沉积层宏观形貌

Fig.3 Morphology of single-pass laser deposition manufacturing

为了避免加减速对熔池尺寸的影响,设计了如图 4(a)所示的开关光控制方式,激光头从 A 位置开始启动,起光点为 B 位置,并在 C 位置关光,但激光头移动至 D 位置停止,从而使有效沉积过程避开了加减速的干扰。采用此控制策略沉积长 30 mm 的单道(如图 4(c)),工艺参数为:激光功率 $P=2\ 000\ W$,扫描速度 $V=7\ mm/s$,送粉速率 $Q_m=5.2\ g/min$ 。记录熔池宽度信息,与常规扫描方式下的沉积过程熔池宽度进行对比(如图 4(b))。可见,开关光控制策略可有效避免熔池宽度在沉积道首末两端的不稳定现象。

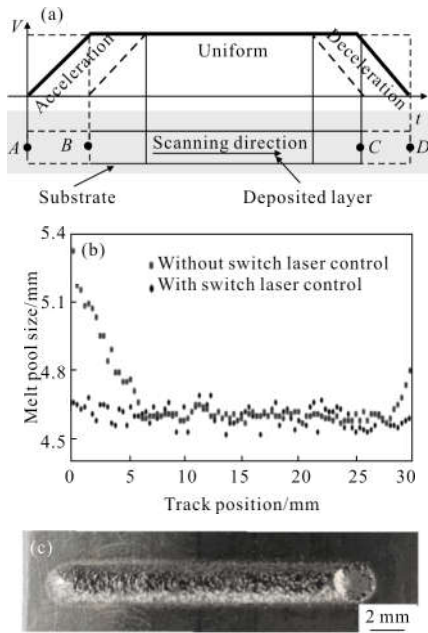


图 4 开关光控制

Fig.4 Switch laser control

实验数据(图 4(b))显示即使在速度稳定段,熔池宽度的测量值也存在一定的波动现象,这是由于测量信号中存在系统噪声和测量噪声。噪声干扰不仅影响熔池宽度检测的精确性,还会降低熔池宽度与工艺参数间经验模型的可靠性。为了去除熔池图像信息中存在的噪声,利用卡尔曼滤波^[17](Kalman Filtering, KF)技术建立了一阶滤波模型,对熔池宽度信号进行去噪处理。标准卡尔曼滤波动态系统及测量模型为:

$$x_t = Ax_t + BU_t + \omega_t \quad (2)$$

$$y_t = Hx_t + v_t \quad (3)$$

式中: x_t 为 t 时刻的系统状态; U_t 为 t 时刻对系统的控制量; A 和 B 为系统参数; y_t 为当前测量值; H 为测量系统的参数; ω_t 和 v_t 分别为当前状态系统噪声和测量噪声,且假设二者均为高斯白噪声,即均值和方差均为零。

由于沉积过程熔池流动迅速,因此可认为某一时刻的熔池宽度与上一时刻熔池宽度相等,且没有控制量,测量值跟熔池宽度直接对应,那么 $A=1, U_t=0, H=1$ 。由卡尔曼滤波原理可知,在 k 时刻,熔池宽度为 $d_k = d_{k-1} + \omega_k$,熔池宽度测量值为 $d'_k = d_k + v_k$ 。由 $k-1$ 时刻熔池宽度的最优状态 $d_{(k-1|k-1)}$ 可预测出 k 时刻的熔池宽度 $d_{(k|k)}$ 及其协方差 $P_{(k|k)}$ 分别为:

$$d_{(k|k)} = d_{(k-1|k-1)} \quad (4)$$

$$P_{(k|k)} = P_{(k-1|k-1)} + Q \quad (5)$$

式中: Q 为系统状态协方差; $P_{(k-1|k-1)}$ 为 $k-1$ 时刻最优熔池宽度的协方差。结合 k 时刻熔池宽度的预测值和测量值,可以估计当前状态的熔池宽度最优结果及其协方差分别为:

$$d_{(k|k)} = d_{(k|k-1)} + Kg_k [d'_{(k|k-1)} - d'_{(k|k-1)}] \quad (6)$$

$$P_{(k|k)} = [I - Kg_k] P_{(k|k-1)} \quad (7)$$

式中: Kg_k 为卡尔曼增益, $Kg_k = P_{(k|k-1)} [P_{(k|k-1)} + R]^{-1}$, R 为熔池宽度测量值的协方差;由于系统为单模型单测量,因此单位矩阵 $I=1$ 。

为了检测卡尔曼滤波技术对熔池宽度信息获取的精确度,进行了单道验证实验,实验采用的工艺参数为: $P=1800\text{ W}, V=11\text{ mm/s}, Q_m=5.2\text{ g/min}$ 。卡尔曼滤波法预测熔池时,熔池宽度初始值设定为 3.5 mm 。记录图像处理软件获取的熔池宽度信息以及卡尔曼滤波处理后的熔池信息,并绘制如图 5 所示曲线。经计算,熔池宽度测量值方差为 4.08×10^{-3} ,而经过卡尔曼滤波后的熔池宽度方差为 7.01×10^{-5} 。可见,经卡尔曼滤波后噪声干扰得到了较大的抑制,熔池宽度信息波动程度显著下降,为获取高精度的熔池宽度回归模型提供了数据保障。

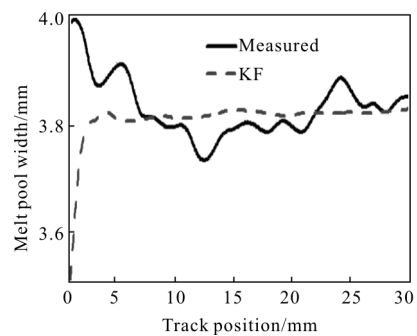


图 5 熔池宽度测量值及卡尔曼滤波值

Fig.5 Plots of measured and KF filtered melt pool width

2.2 熔池宽度的多元回归与实验验证

基于激光沉积制造逐层叠加的工艺特性,单道沉积宽度被认为是影响成形制件最终形貌的重要参数。精确的预测道宽对沉积单道薄壁件以及宽度变化复杂的制件有着重要的影响。假设沉积过程中

材料的热物性参数不受温度的影响,且不考虑熔池表面的对流换热作用,并认为熔池截面为圆盘状,那么由一系列的平衡关系可得出熔池宽度的理论模型^[18]为:

$$D_m = 2 \times \left(\frac{AP}{2^{5/2} \rho c_p (T_m - T_0) \sqrt{Kv} [\operatorname{erfc}(1) - 1/(e\sqrt{\pi}) + 1/\sqrt{\pi}]} \right)^{2/3} \quad (8)$$

式中: A 为激光吸收率; P 为激光功率; T_0 为初始温度; v 为扫描速度; c_p 为液态熔池的定压比热容; ρ 为材料密度; K 为热扩散系数。公式(8)显示熔池的宽度与激光功率呈正相关,与扫描速度呈负相关。同时熔池宽度还受到激光辐射率、材料的初始温度以及密度等影响。文中主要探讨工艺参数对熔池宽度的影响,建立对激光沉积成形精度影响较大的三个主要工艺参数与熔池宽度的经验模型,模型输入变量为激光功率、扫描速度以及送粉速率,模型的输出变量为熔池宽度。为了减少实验次数降低消耗,且不影响信息的全面性和精确性,采用正交实验设计方案,实验包括三因素五水平下的 25 组同规格的单道沉积实验,单道长度为 30 mm,道间距为 10 mm,足以排除单道间热量传递对熔池宽度的干扰。各沉积单道的工艺参数及实验结果见表 2。各组实验均采用图 4(a)中开关光控制策略,并运用卡尔曼滤波对熔池信息去噪。

Oliveria 等^[19]发现指数模型可以较精确地预测激光沉积单道成形特性,基于指数模型提出如下回归方程:

$$D = K(P^\alpha V^\beta Q_m^\gamma) + c \quad (9)$$

式中; D 为熔池宽度; α 、 β 、 γ 分别为三个工艺参数回归系数; c 为回归常数。利用 SPSS 数据分析软件,在显著性概率 95%的条件下,根据正交实验结果及回归方程(9)建立工艺参数与熔池宽度间的经验模型。结果显示,回归方程拟合优度判定系数 $R=0.92$,三个工艺参数的回归系数 α 、 β 、 γ 分别为 0.569、-0.203、-0.020,而 $Qm^{0.020} \approx 1$,可见送粉速率对熔池宽度几乎无影响,这与理论模型公式(8)的结果一致。令 $\gamma=0$,对模型进行回归分析,得到了更好的拟合优度 $R=0.94$,同时 $K=0.225$, $\alpha=0.467$,

$\beta=-0.165$, $b=-1.235$ 。模型预测结果见表 2,经计算最大误差率不超过 4.5%,该模型可较精确地估计不同工艺参数下的熔池宽度。由各参数的回归系数可知,熔池宽度随着激光功率的增大而增大,随着扫描速度的增大而减小,且激光功率对熔池宽度的影响比扫描速度对熔池宽度的影响更显著($|\alpha|>|\beta|$)。

表 2 各沉积单道的工艺参数及实验结果

Tab.2 Parameters and experimental results of each single track

| No. | P/W | V/mm·s ⁻¹ | Q _m /g·min | Melt pool width/mm | | |
|-----|-------|----------------------|-----------------------|--------------------|------------|-------|
| | | | | Measured | Calculated | Error |
| 1 | 2 000 | 7 | 7.2 | 4.65 | 4.44 | 4.5% |
| 2 | 2 200 | 15 | 3.3 | 4.13 | 4.00 | 3.1% |
| 3 | 2 200 | 9 | 7.2 | 3.97 | 4.16 | 4.2% |
| 4 | 2 200 | 13 | 11.1 | 4.19 | 4.13 | 1.4% |
| 5 | 2 200 | 11 | 9.1 | 4.17 | 4.28 | 2.3% |
| 6 | 2 000 | 9 | 9.1 | 4.18 | 4.21 | 0.9% |
| 7 | 1 800 | 13 | 5.2 | 3.71 | 3.65 | 1.6% |
| 8 | 1 400 | 9 | 5.2 | 3.29 | 3.38 | 2.7% |
| 9 | 2 000 | 15 | 5.2 | 3.68 | 3.77 | 2.4% |
| 10 | 1 800 | 11 | 3.2 | 3.82 | 3.78 | 1.0% |
| 11 | 2 200 | 7 | 5.2 | 4.77 | 4.70 | 1.5% |
| 12 | 1 600 | 15 | 9.1 | 3.16 | 3.28 | 3.7% |
| 13 | 1 800 | 15 | 7.2 | 3.49 | 3.53 | 1.1% |
| 14 | 1 800 | 9 | 11.1 | 3.79 | 3.95 | 4.2% |
| 15 | 1 600 | 13 | 7.2 | 3.30 | 3.38 | 2.7% |
| 16 | 2 000 | 13 | 3.3 | 4.01 | 3.89 | 2.9% |
| 17 | 1 600 | 9 | 5.2 | 3.63 | 3.51 | 2.3% |
| 18 | 1 400 | 7 | 3.3 | 3.60 | 3.57 | 0.8% |
| 19 | 1 600 | 7 | 11.1 | 3.83 | 3.88 | 1.3% |
| 20 | 1 400 | 13 | 9.1 | 3.20 | 3.11 | 2.8% |
| 21 | 1 600 | 9 | 3.3 | 3.80 | 3.67 | 3.4% |
| 22 | 1 800 | 7 | 9.1 | 4.42 | 4.37 | 1.1% |
| 23 | 2 000 | 11 | 11.1 | 4.11 | 4.04 | 1.9% |
| 24 | 1 400 | 11 | 7.2 | 3.11 | 3.23 | 3.8% |
| 25 | 1 400 | 15 | 11.1 | 3.16 | 3.05 | 3.4% |

为验证回归分析的正确性,探究各工艺参数对熔池宽度影响的显著性,采用单一变量的实验方法,分别对各工艺参数等倍数增加,沉积长 30 mm 单

道,实验采用的工艺参数及各水平取值见表 3。

表 3 过程参数及各水平取值

Tab.3 Parameters and their design levels

| Parameters | Levels of parameters | | | Other parameters | |
|------------------------|----------------------|-------|-------|------------------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| P/W | 800 | 1 600 | 2 400 | $v=10$ | $Q_m=6$ |
| $v/mm \cdot s^{-1}$ | 5 | 10 | 15 | $P=1\ 600$ | $Q_m=6$ |
| $Q_m/g \cdot min^{-1}$ | 3 | 6 | 9 | $P=1\ 600$ | $V=10$ |

各工艺参数对熔池宽度的定量影响如图 6 所示。显然,激光功率定倍波动对熔池宽度的影响较扫描速度等倍波动对熔池宽度的影响要更加显著,而送粉速率的成倍增加对熔池宽度几乎无影响。同时,熔池宽度与激光功率呈正相关性,与扫描速度呈负相关性。验证了回归分析结果的正确性。

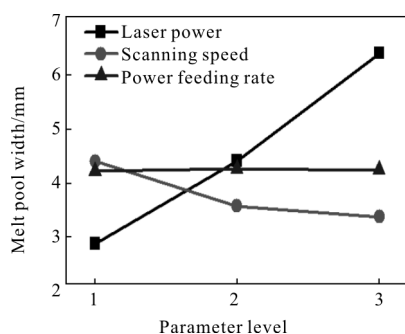


图 6 不同工艺参数水平下熔池宽度

Fig.6 Melt pool width for different process parameter level

3 结论

(1) 建立基于 CCD 工业相机的激光熔池监测系统,采用专用图像处理软件对采集熔池图像进行灰度分析、轮廓提取工作,并对轮廓进行椭圆拟合,同时为了保证监控熔池尺寸稳定性,采用了非匀速扫描段关光控制策略

(2) 采用卡尔曼滤波技术对激光熔池的测量数据进行去噪处理,显著降低熔池尺寸波动程度,提高了熔池检测精度,保证了熔池尺寸与工艺参数间关系模型的可靠性。

(3) 基于正交实验数据和 SPSS 的回归分析模块,建立了激光功率、扫描速度和送粉速率与熔池宽度间的经验模型,模型具有较高拟合优度。单一变量验证实验结果显示:激光功率对熔池宽度的影响较

扫描速度更为显著,而送粉速率对熔池宽度影响较小,实验结果与回归分析结果一致。

参考文献:

- [1] A laa Elwany, Gustavo Tapia. A review on process monitoring and control in metal -based additive manufacturing [J]. *Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(6): 1-10.
- [2] Shi Qimin, Gu Dongdong, Xia Mujian, et al. Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of Ti/Inconel718 composites [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 84: 9-22.
- [3] Zhong Chongliang, Andres Gasser, Jochen Kittel, et al. Improvement of material performance of Inconel718 formed by high deposition-rate laser metal deposition [J]. *Material and Design*, 2016, 98: 128-134.
- [4] Yu Jun, Lin Xin, Chen Junjie, et al. Mechanics and energy analysis on molten pool spreading during laser solid forming [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256: 4612-4620.
- [5] Jiang Shujuan, Liu Weijun, Xiang Fei. Research on measuring and control system of metal powder laser shaping [C]//International Conference on Mechatronics and Automation, 2006: 1717-1721.
- [6] Han Lijun, Liou F W, Srinvas Musti. Thermal behavior and geometry model of melt pool in laser material process [J]. *Department of Mechanical and Aerospace*, 2005, 127: 1005-1014.
- [7] Ravi G A, Hao X J, Wain N, et al. Direct laser fabrication of three dimensional components using SC420 stainless steel [J]. *Materials and Design*, 2013, 47: 731-736.
- [8] Amitava De, Tarasankar Debroy. Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(116): 124905.
- [9] Lie Tang, Robert G. Melt pool temperature control for laser metal deposition processes-Part1: Online temperature control [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132: 0110101-0110109.
- [10] Qiu Chunlei, Ravi G A, Chris Dance, et al. Fabrication of large Ti-6Al-4V structures by direct laser deposition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 692: 351-361.
- [11] Parisa Farahmand, Liu Shuang, Zheng Zhe, et al. Laser cladding assisted by induction heating of Ni - WC composite enhanced by nano-WC and La₂O₃ [J]. *Ceramics International*,

- 2014, 40(10): 15421–15438.
- [12] Tan Hua, Chen Jing, Lin Xin, et al. Process analysis for laser solid forming of thin-wall structure [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50(1): 1–8.
- [13] Sörn Ocylok, Eugen Alexeev, Stefan Mann, et al. Correlation of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 228–238.
- [14] Song Lijun, Vijayavel Bagavath–Singh, Bhaskar Dutta, et al. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2012, 58(1): 247–256.
- [15] Taberero I, Lamikiz A, Martínez S, et al. Geometric modelling of added layers by coaxial laser cladding [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 913–920.
- [16] Ding Yaoyu, James Warton, Radovan Kovacevic. Development of sensing and control system for robotized laser –based direct metal addition system [J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 10: 24–35.
- [17] Peng Dingcong. Basic principle and application of Kalman filter [J]. *Software Guide*, 2009, 8(11): 32–35. (in Chinese) 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用 [J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 32–35.
- [18] Liu Jichang, Li Lijun. Effects of process variables on laser direct formation of thin wall [J]. *Science Direct*, 2007, 39: 231–236.
- [19] Onwubolu G C, Davim J P, Carlos Oliveira, et al. Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39: 1130–1134.