

激光沉积制造形貌偏差检测与控制研究

钦兰云¹, 谢永凯¹, 杨光^{1*}, 王伟¹, 王向明²

¹沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136;

²中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

摘要 在激光沉积制造过程中, 热累积等因素会导致实际成形形貌与理想形貌存在较大偏差, 从而阻碍沉积制造的进一步进行。为此, 本文提出了基于点云数据的形貌偏差检测与控制方法。采用高速轮廓测量仪扫描沉积体表面, 将获得的形貌点云数据与沉积层切片理论数据进行对比, 提取出构成偏差区域的点云数据, 对偏差点云进行分层切片, 然后运用图像边界识别算法提取切片偏差轮廓, 确定偏差轮廓区域在原始切片轮廓区域中的准确位置, 改变偏差轮廓区域内的填充间距, 为其填充成形轨迹, 最后生成沉积程序并对偏差区域进行补偿加工。实验结果表明, 补偿后获得的成形表面的平面度误差较补偿前减小了 65.1%。本文方法能够显著提高零件的成形精度, 实现了检测和补偿的自动化, 使激光沉积制造可以连续进行。

关键词 激光技术; 激光沉积制造; 形貌偏差检测; 路径规划; 点云切片

中图分类号 TG156

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1002113

1 引言

激光沉积制造(LDM)技术是增材制造技术的一种, 它按照预定的加工路径, 采用激光逐层熔化同步送入的金属粉末形成熔池, 熔池快速凝固后即可实现金属零件的直接制造^[1-2]。该技术以其独特的技术优势被誉为是一种变革性的一体化制造技术^[3], 在航空航天、国防、医疗等领域具有广阔的发展前景^[4]。激光沉积制造是一个多参数相互作用的过程, 在激光功率、扫描速度、扫描间距和送粉速率等参数的共同作用下, 成形件会不可避免地产生塌边及表面凹陷等现象^[5], 使工件的成形精度降低, 此缺点被认为是制约金属构件激光沉积制造发展的主要缺点之一^[6-8]。在沉积制造过程中, 沉积体表面会出现凹凸不平的现象^[9], 并且由于堆积作用的影响, 在多次层叠制造后, 凹处越凹, 凸处越凸^[10]。

为确保零件的成形精度, 需要对制造过程进行控制。目前, 国内外学者对激光直接制造过程的研究^[11]主要是通过监测熔池温度和熔覆层高度的变

化来控制激光输出功率、送粉速率等工艺参数, 抑或将增材加工和减材加工结合在一起, 最终达到保证零件成形精度的目的。卞宏友等^[12]采用红外热像仪实时采集沉积层面的温度, 根据温度进行分区, 然后采用适应性间距生成扫描路径, 这种方法可以有效提高工件的成形质量。Ding 等^[13]搭建了一套传感和控制系统, 该系统采用光电传感器检测粉末流速, 采用红外成像装置监测熔池形状(将监测的熔池形状作为反馈), 采用控制器调节激光功率; 以上措施可使熔池尺寸更加均匀, 降低了工件的表面粗糙度。Song 等^[14]在实验过程中采用 3 个高速 CCD 摄像机监测熔覆层的高度, 如果熔覆层高度超过阈值, 高度控制器就会降低激光输出功率, 以避免材料过度堆积, 从而实现熔覆层高度的稳定增长。Boschetto 等^[15]将熔融堆积(FDM)技术与精加工(BF)技术相结合, 根据创建的轮廓预测模型预测工件的轮廓形态, 然后利用 BF 技术降低工件的表面粗糙度。在加工过程中利用铣削加工提升成形精度的方法会影响沉积层的力学性能^[16], 同时, 对于硬

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-11; 录用日期: 2020-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51975387)、国家重点研发计划(2016YFB1100504)、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开放基金(SHSYS2017003)

*E-mail: yangguang@sau.edu.cn

度较高的零件,铣削加工较为困难且影响成形效率^[17]。对于钛合金的激光沉积制造,为防止氧化反应的发生^[18],需要对工件进行封箱气氛保护。当加工过程中形貌偏差过大时,必须开箱对其进行修补,从而延长了制造周期,同时也会影响成形零件的性能。所以,在激光沉积制造过程中对沉积体形貌进行控制是非常必要的。

本文建立了沉积体形貌检测和控制系統,实现了对沉积体形貌偏差的自动检测与控制。将形貌检测系统集成到激光沉积制造设备上,形貌检测系統就可以自动扫描沉积体,并将其与沉积体模型进行对比,获得偏差区域的点云数据;然后根据偏差区域的点云生成补偿沉积路径,就可以实现对沉积体形貌偏差的补偿,从而提高样件的成形精度,保证沉积制造的连续进行。

2 形貌检测和控制系统的建立

本文中的形貌检测和控制系統是将形貌检测系统集成在沈阳航空航天大学自主研制的激光沉积制造系統中,如图 1 所示。激光沉积制造系統主要由激光器、光纤、送粉器、冷却系統和气氛保护系統等组成。实验采用的激光器是 IPG 光纤激光器,其输出功率可达 6000 W,波长为 1064 nm。激光功率、送粉速率等工艺参数由控制台控制,沉积路径由控制台中的路径规划软件完成。形貌检测系統采用的是 LJ-V7300 型高速轮廓测量仪,其扫描频率为 10~1000 Hz,其所采集的数据的 x 方向重复精度为 60 μm , z 方向重复精度为 5 μm 。测量头和激光头安装在 z 轴上,用于对沉积体的形貌进行检测。

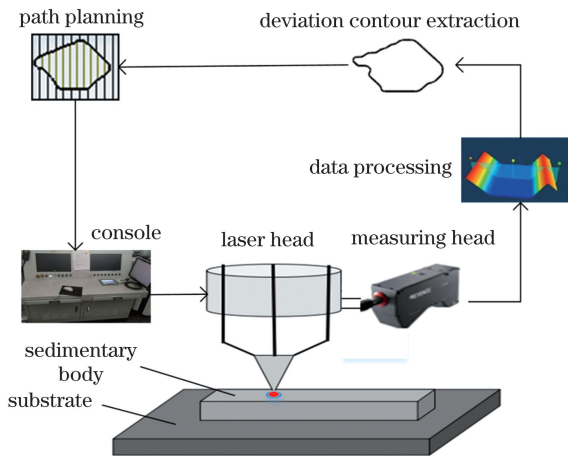


图 1 形貌检测和控制系統原理图

Fig. 1 Schematic of morphology detection and control system

MATLAB 软件处理点云数据,并将得到的偏差轮廓发送至路径规划软件,生成补偿路径,实现加工过程中对沉积体形貌的自动补偿。

3 偏差点云数据的获取与处理

激光沉积制造中工件的形貌都具有唯一性,为了精确定位形貌偏差区域,本研究团队利用高速轮廓测量仪扫描工件表面,获得工件形貌偏差区域的信息。本节的主要内容包括形貌点云数据的采集、预处理以及偏差点的提取和切片轮廓的求取等。

3.1 形貌点云数据的获取与预处理

使用高速轮廓测量仪扫描工件表面,采集的点云数据存储于二维矩阵 \mathbf{H} 中,其中的每个值都是表面高度的测量值。矩阵的行对应于单个扫描行,不同的行对应不同时间获得的扫描行。相邻行之间的距离 (Δy) 由设备的采样频率和扫描速度决定,连续两个相邻点之间的距离 (Δx) 通过设备设定。测量系統由测量仪坐标系 $O_c-x_c y_c z_c$ 和笛卡尔坐标系 $O_w-x_w y_w z_w$ 组成,如图 2 所示。利用 (1)~(3) 式^[19]将二维高度矩阵转换为笛卡尔坐标系下的三维点云 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ 。

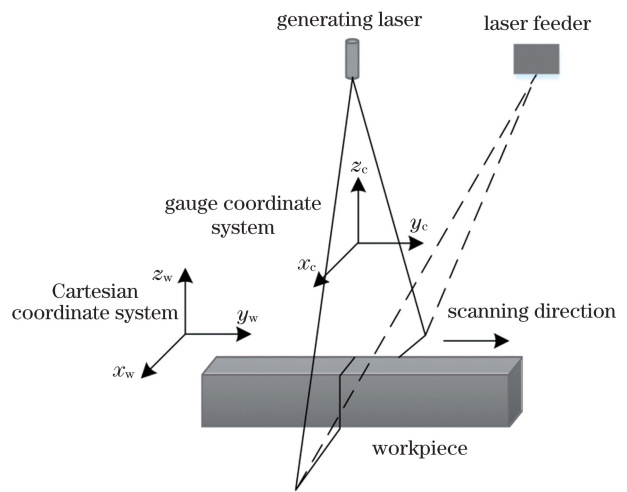


图 2 轮廓测量仪三维测量数学模型

Fig. 2 Three-dimensional measurement mathematical model of profilometer

$$x = c \Delta x + \Delta h_x, \quad (1)$$

$$y = r \Delta y + \Delta h_y, \quad (2)$$

$$z = H(r, c) + \Delta h_z, \quad (3)$$

式中: r 和 c 是二维矩阵 \mathbf{H} 的行数和列数; Δh_x 、 Δh_y 和 Δh_z 为测量仪坐标系和笛卡尔坐标系之间的差值; $H(r, c)$ 为工件表面高度的测量值。由于外部环境的干扰和工件表面复杂性等随机效应,原始点云

数据中包含着许多噪声点^[20]；因此，在分析这些数据之前，必须进行去噪处理。本文首先采用基于聚类的直通滤波去除离工件主体部分点云较远的噪声点，然后采用高斯滤波去除离主体部分点云较近的噪声点^[21]，以减小测量误差的影响。

3.2 点云切片偏差轮廓的提取与分离

由于沉积制造中工件偏差区域的形状是任意和随机的，因此系统需要具有处理复杂偏差点云的能力。点云切片处理流程如图 3(a)所示。首先，将点云数据与沉积层切片理论数据进行对比，得到偏差区域的点云；然后使用一组平行于 z 轴的平行平面对偏差点云进行分层切片，分层平面间的间距为激光沉积制造过程中每层扫描时 z 轴的抬升量，将分层点云投影到 xOy 平面上，得到切片点云。对于某层切片点云 $P = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ ， n 为该层点数，点 p_i 的坐标为 (x_i, y_i) ， D 和 T 为最小包围

矩形的长和宽。对该矩形进行划分，使之成为 q 行 w 列网格阵列。采用(4)~(5)式计算点 p_i 落在哪个单元格中。

$$k = \text{int} [(x_i - x_{\min}) / S], \quad (4)$$

$$m = \text{int} [(y_i - y_{\max}) / S], \quad (5)$$

式中： S 为单元格的尺寸； m 为点 p_i 所在列数； k 为点 p_i 所在行数； int 为取整函数。对于有点落入的单元格，令其值为 1，否则为 0，由此生成二值图像，如图 3(b)所示。在生成栅格数据时，单元格尺寸会影响最终的精度。网格尺寸的选取方法^[22]如(6)式所示。

$$S = \alpha \sqrt{D \times H / n}, \quad (6)$$

式中： α 为单元格尺寸的调节因子，其经验值为 1.0~1.5。利用图像边界识别算法^[23]提取二值图像外轮廓的像素点，并将像素点的行列号代入(4)~(5)式中求取像素点坐标，坐标点即为切片偏差轮廓点。

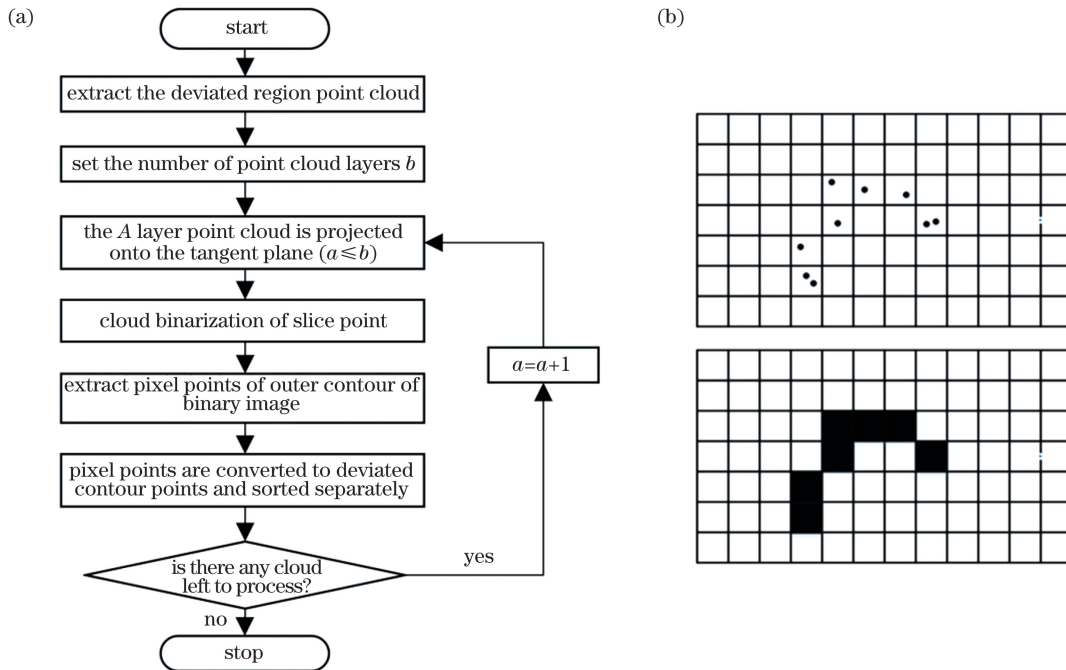


图 3 点云切片处理过程。(a)点云切片偏差轮廓提取及排序流程图；(b)点云二值图像的生成过程
Fig. 3 Point cloud slicing process. (a) Flow chart of point cloud slice deviation contour extraction and sorting;
(b) point cloud binary image generation process

通过图像处理技术提取的偏差轮廓点的排列方式是杂乱无序的，且可能包含多个轮廓，所以需要轮廓点进行分离和排序。本文采用改进最近邻域搜索法^[24]对轮廓点进行排序和分离。对经过最近邻域搜索并排序的点进行标记，标记后将点按顺序存入新的矩阵中。当搜索完一个完整的轮廓点后，更换标记数值，对未标记的点继续进行搜索排序，直至轮廓点全部被标记；提取出不同标记值的点存入不

同的矩阵内，每个矩阵代表的是一个具有完整轮廓的数据点，至此完成轮廓的排序及分离工作。由于激光沉积制造过程需要使轮廓尽量平滑，因此，利用均匀三次 B 样条曲线^[25]来拟合偏差轮廓特征线。

3.3 补偿路径规划

在本文所述的补偿路径生成过程中，补偿路径是基于上一层沉积层偏差轮廓分布情况和下一层原始切片轮廓实现的。首先确定偏差轮廓区域在原始

切片轮廓区域中的位置,然后通过改变偏差轮廓区域内的填充间距、激光功率和送粉速率等工艺参数来完成沉积体的形貌偏差补偿。改变送粉速率有较强的滞后性,而改变激光功率虽然可以调整熔池宽度^[26],但是对沉积体凹陷区域的补偿效果不佳,所以本文选择改变偏差区域的填充间距。根据偏差区

域的形貌特征选取合适的填充间距,生成成形轨迹。图 4(a)中的 L2 和 L3 为凹陷区域偏差轮廓,L1 为原始切片轮廓。补偿路径规划如图 4(b)所示,改变偏差区域 R2 和 R3 的填充间距,其他区域正常扫描,并基于分组平行线填充路径方法生成沉积路径^[27]。

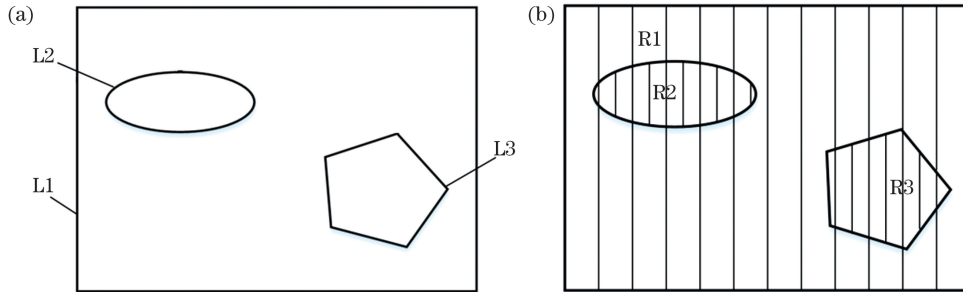


图 4 补偿路径规划过程。(a)原始切片轮廓和偏差轮廓;(b)补偿路径规划

Fig. 4 Compensation path planning process. (a) Original slice contour and deviation contour; (b) compensation path planning

4 实验及结果分析

4.1 样件制备

为了验证形貌偏差检测及控制方法,本研究团队通过模拟实际成形过程中表面出现凹陷的现象,预制了表面有凹陷的样件,并将其作为研究对象。样件的三维模型如图 5(a)所示,在基板上沉积尺寸为 $100\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 4.2\text{ mm}$ 的样件,表面预制缺陷的深度为 1.2 mm ,预制缺陷的形状复杂且不规

则,符合实际沉积加工时的情形。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,具体成分如表 1 所示。实验前对基板进行打磨,并用无水乙醇擦拭其表面,以除去污染物,保证加工面的清洁。沉积金属粉末为 TA15 球形粉,其粒径为 $44 \sim 149\text{ }\mu\text{m}$,经 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 真空烘干后备用。沉积工艺参数如下:激光功率 2400 W ,扫描速度 10 mm/s ,送粉速率 8 g/min , z 轴抬升量 0.6 mm 。样件的形貌如图 5(b)所示。

表 1 TA15 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA15 titanium alloy

Element	Al	Zr	Mo	V	Ti
Mass fraction / %	5.5-7.1	1.5-2.5	1.02-2.0	0.8-2.5	Bal.

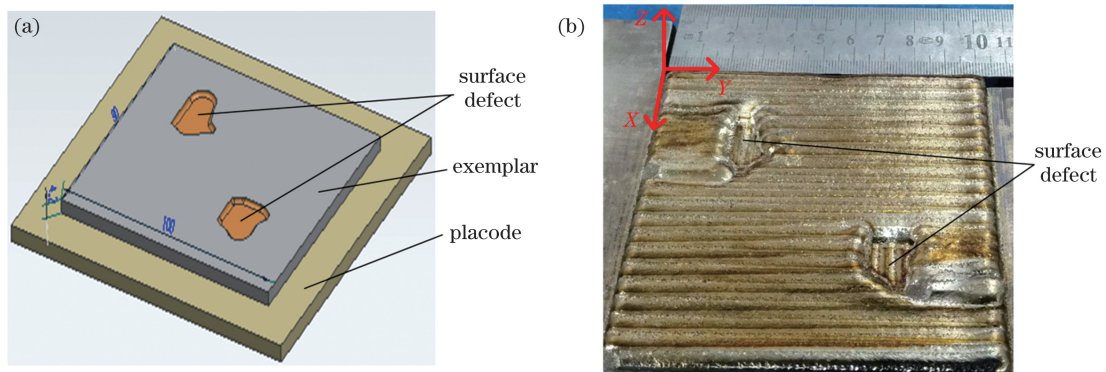


图 5 样件的三维模型和实物图。(a)三维模型;(b)实物图

Fig. 5 Three-dimensional model and photo of sample. (a) Three-dimensional model; (b) photo

4.2 形貌点云数据的采集及预处理

使用高速轮廓测量仪对样件表面进行扫描,扫

描频率为 20 Hz ,扫描速度为 600 mm/min ,获得形貌点云数据共 59297 个点,将数据存入矩阵 \mathbf{H} 中。

测得数据相邻行之间的距离 Δy 为 0.5 mm, 每行中两个相邻点之间的距离 Δx 为 0.3 mm。通过 (1)~(3) 式将高度测量值转化为笛卡尔坐标系下的三维点云, 如图 6 所示。此时的点云含有较多噪声, 尤其是在曲率变化较大的地方。对点云进行滤波去噪处理, 滤除误差点, 得到较为理想的点云, 如图 7 所示。用一对平行于 z 轴的平面包容去噪后的点云数据, 每个平面保证至少与 3~4 个点接触, 并符合交叉准则、三角形准则和直线准则中的一条^[28], 这样一对平行平面就构成了最小包容区域, 它们之间的距离为平面度误差^[29]。如图 8 所示, 平面 A_1 、 A_2 构成了点云的最小包容区域, 它们之间的距离为 1.95 mm, 即平面度误差 $f=1.95$ mm。

4.3 偏差区域点云的提取和处理

对样件进行几何形貌分析, 在加工模型中创建对齐参考特征, 在点云中创建相似的特征。将点云

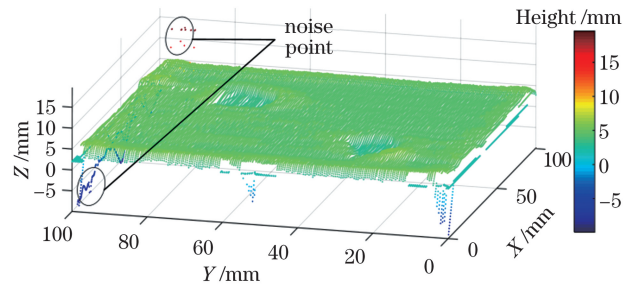


图 6 原始形貌点云

Fig. 6 Point cloud of original morphology

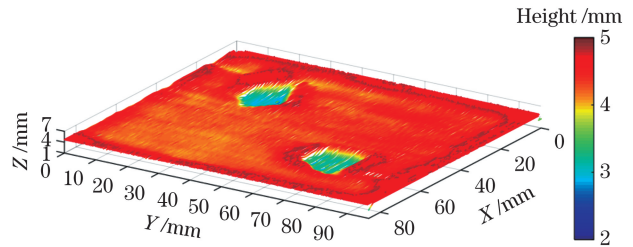


图 7 预处理后的三维点云

Fig. 7 Three-dimensional point cloud after pretreatment

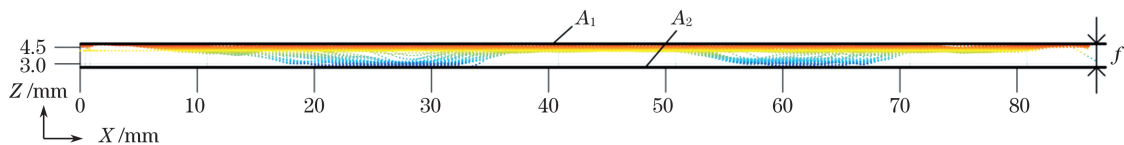


图 8 平面度误差计算

Fig. 8 Calculation of flatness error

中的特征与加工模型中的参考特征对齐, 设定坐标原点为样块左上顶点。通过对比点云数据与沉积层切片理论数据, 设定误差阈值为 0.2 mm, 提取出偏差区域的点云, 提取结果如图 9 所示。

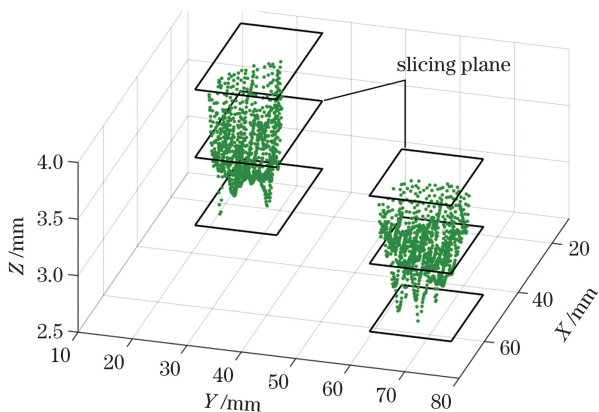


图 9 偏差区域的点云

Fig. 9 Point cloud of deviated region

对偏差区域的点云沿 z 轴正向分层切片, 分层平面间的距离为 0.6 mm, 分层数为 2。将分层点云分别投影到 xOy 平面上, 得到切片点云。图 10(a) 是第 1 层切片点云及栅格结构, 图中显示的两组分

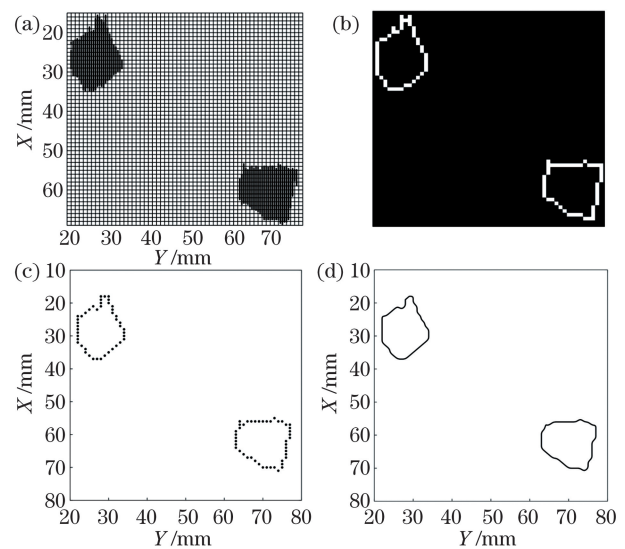


图 10 偏差点云的处理过程。(a)切片点云栅格化;(b)点云二值化;(c)切片偏差轮廓点;(d)偏差轮廓特征线拟合

Fig.10 Deviation point cloud process. (a) Slice point cloud rasterization; (b) point cloud binarization; (c) slice deviation contour points; (d) deviation profile feature line fitting

离的点集为该层两处偏差区域的点云, 其中栅格尺

寸 $S=1.0\text{ mm}$ 。将切片点云转换成二值图像格式,如图 10(b)所示。利用图像边界识别算法提取二值图像外轮廓的像素点,通过(4)~(5)式将像素点转换为切片偏差轮廓点坐标,如图 10(c)所示。原本密集的点集经过上述处理后成为可以表达偏差区域位置和形状的点集。将偏差轮廓点进行分离和排序后,使用均匀三次 B 样条曲线进行拟合,得到偏差轮廓特征线,如图 10(d)所示,拟合后的偏差轮廓特征线光滑且无尖角。重复上述操作,直至提取出所有分层点云的切片偏差轮廓。

4.4 形貌偏差补偿与结果分析

原始切片轮廓为 $100\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ 的矩形,偏差轮廓为不规则的闭合多边形。将偏差轮廓点和原始切片轮廓点转换成 SLC 格式并导入路径规划软

件中,设置偏差区域填充间距为 2 mm ,其他正常区域填充间距为 2.3 mm ,生成补偿路径,其中补偿路径层数和偏差点云分层数一致。补偿路径如图 11(a)所示。对样品进行补偿加工,补偿后的样品形貌如图 11(b)所示,对比图 5(b)所示的样品形貌可知,补偿后,成形表面相对更加平整。使用轮廓测量仪扫描补偿后的样品表面,去噪后样品表面形貌点云如图 11(c)所示,可见,样品表面偏差程度较补偿前明显降低。利用一对平行平面 B_1 和 B_2 包容样品补偿后表面的点云数据,如图 11(d)所示,求得其平面度误差 f 为 0.68 mm ,平面度误差较补偿前减小了 65.1% ,显著降低了样件的形貌偏差。但是在扫描线起点和终点处因为速度变化会产生少量堆积,需要在后续研究中继续优化。

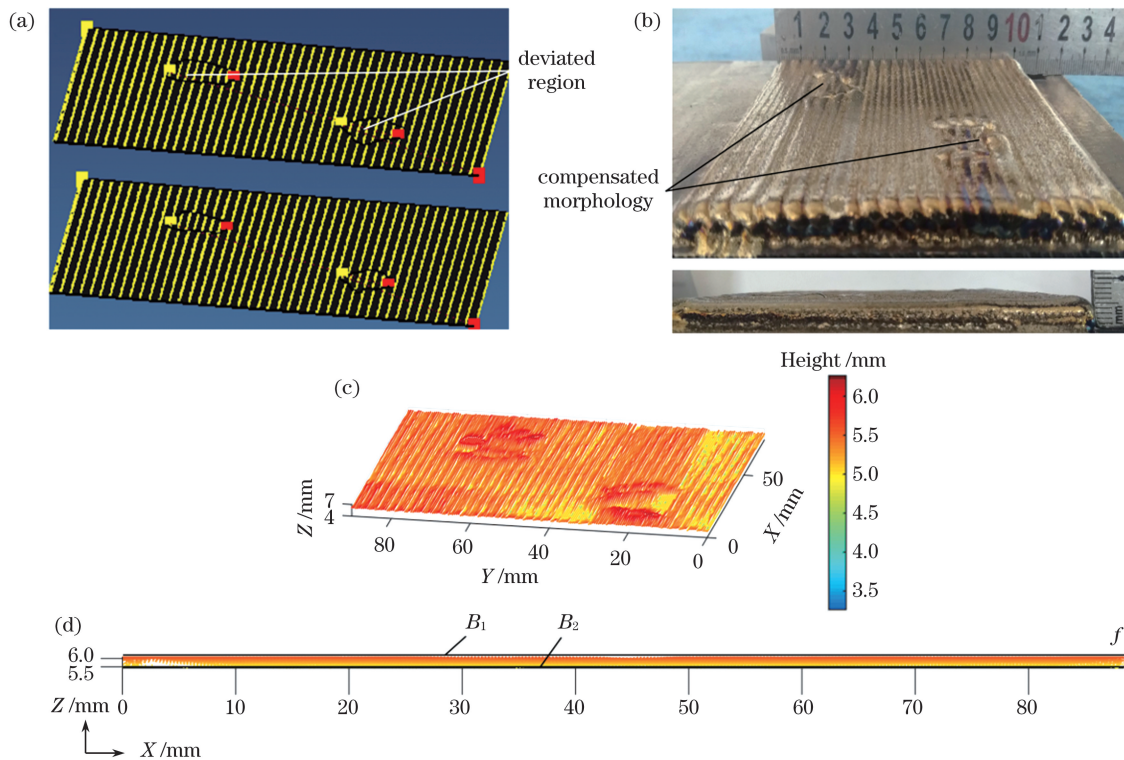


图 11 补偿路径规划及结果。(a)补偿路径;(b)补偿后的样品形貌;(c)补偿后的表面点云;(d)平面度误差计算
Fig. 11 Compensation path planning and results. (a) Compensation path; (b) morphology of compensated sample;
(d) surface point cloud after compensation; (d) calculation of flatness error

5 结 论

本文主要研究了基于零件表面点云数据的形貌偏差检测及控制方法,得到的主要结论如下:

1) 建立激光沉积制造形貌检测系统,扫描零件表面并对获得的点云数据进行分析,提取出偏差区域的点云,对偏差点云进行分层切片,然后利用图像边界识别算法提取切片点云的外轮廓点,并使用均

匀三次 B 样条曲线拟合轮廓特征线。

2) 确定偏差轮廓区域在原始切片轮廓区域中的准确位置,然后根据偏差区域的形貌特征改变填充间距,填充成形轨迹,生成补偿路径。

3) 建立形貌控制系统,当沉积体出现较大形貌偏差时,根据检测数据规划补偿路径,对零件进行补偿加工。实验结果表明,补偿后样品表面的平面度误差减小了 65.1% ,显著提高了样件的成形精度,

保证了沉积制造的持续进行,并减小了后续减材过程的加工余量。

参 考 文 献

- [1] Tapia G, Elwany A. A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(6): 060801.
- [2] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
- [3] Li X Q, Jiang R P. Progress of the basic research on the manufacture of high-performance light alloy large complex structural components used in aerospace and aeronautics[J]. *China Basic Science*, 2015, 17(1): 11-20.
李晓谦, 蒋日鹏. 航空航天用高性能轻合金大型复杂结构件制造基础研究进展[J]. *中国基础科学*, 2015, 17(1): 11-20.
- [4] Qin L Y, Wu J B, Wang W, et al. Microstructures and fatigue properties of Ti-6Al-2Mo-2Sn-2Zr-2Cr-2V titanium alloy fabricated using laser deposition manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1002008.
钦兰云, 吴佳宝, 王伟, 等. 激光增材制造 Ti-6Al-2Mo-2Sn-2Zr-2Cr-2V 钛合金组织与疲劳性能研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1002008.
- [5] Xiao B, Li B, Xia C Y, et al. Power flow method used to vibration transmission for two-stage vibration isolation system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(5): 106-113.
肖斌, 李彪, 夏春艳, 等. 基于功率流法双层隔振系统振动传递[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(5): 106-113.
- [6] Turner B N, Gold S A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: materials, dimensional accuracy, and surface roughness [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, 21(3): 250-261.
- [7] Li Z X, Zhang Z Y, Shi J C, et al. Prediction of surface roughness in extrusion-based additive manufacturing with machine learning[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 57: 488-495.
- [8] Budinoff H, McMains S. Prediction and visualization of achievable orientation tolerances for additive manufacturing[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 75: 81-86.
- [9] Du Q, Hang X L, Wang M D, 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.
- [10] Feng Z J. Study on molten pool monitoring system based on accurate remanufacturing of key components of shield machine by laser cladding [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
冯志杰. 盾构关重件激光熔覆精准再制造熔池监测系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [11] Qiao Y L, Song J L, Shi X L, et al. Research progresses on detection and control of laser cladding forming process [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(12): 14-20.
乔亚丽, 宋建丽, 石晓蕾, 等. 激光熔覆成形过程的检测与控制研究进展[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(12): 14-20.
- [12] Bian H Y, Fan Q C, Li Y, et al. Scan path generating method based on temperature subarea of laser deposition shaping [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(24): 57-62.
卞宏友, 范钦春, 李英, 等. 基于温度分区的激光沉积成形扫描路径生成方法[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(24): 57-62.
- [13] Ding Y Y, Warton J, Kovacevic R, et al. Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system [J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 10: 24-35.
- [14] Song L J, Singh V B, 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(1/2/3/4): 247-256.
- [15] Boschetto A, Bottini L. Surface improvement of fused deposition modeling parts by barrel finishing [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, 21(6): 686-696.
- [16] Xiang B L, Yang H C, Li Z H, et al. Research on residual stress of the TB6 titanium alloy face milling surface[J]. *New Technology & New Process*, 2018(10): 28-32.
向波罗, 杨后川, 李召华, 等. 钛合金 TB6 铣削表面残余应力研究[J]. *新技术新工艺*, 2018(10): 28-32.
- [17] Yue C X, Wang Y W, Gao H N, et al. FEM simulation research on convex surface splicing mold milling process [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(16): 34-42.
岳彩旭, 王彦武, 高海宁, 等. 凸曲面拼接模具铣削过程三维有限元仿真研究[J]. *航空制造技术*, 2018,

- 61(16): 34-42.
- [18] Liu J, Wang W X, Cheng X, et al. Oxidation behaviors of Ti60A titanium alloy processed by laser additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702007.
刘金, 王薇茜, 程宇, 等. 激光增材制造 Ti60A 钛合金的氧化行为 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702007.
- [19] Zhang G F, Wang J W, Cao F, et al. 3D curvature grinding path planning based on point cloud data[C]//2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), August 29-31, 2016, Auckland, New Zealand. New York: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [20] Wang X F, Zhang X Q, Ren X K, et al. Point cloud 3D parent surface reconstruction and weld seam feature extraction for robotic grinding path planning [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1/2): 827-841.
- [21] Wang G L, Gao T, Guo M, et al. Noise elimination of point cloud in phase-based TLS point cloud [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(S1): 190-194.
王国利, 高婷, 郭明, 等. 相位式地面三维激光扫描点云的噪声滤除 [J]. 测绘通报, 2019(S1): 190-194.
- [22] Guo J P, Yu J P, Peng X, et al. Fast speed detection method and system for the mesh size in large flat area [J]. Process Automation Instrumentation, 2016, 37(2): 69-71.
郭继平, 于冀平, 彭翔, 等. 大面积平面网格尺寸快速检测方法 & 系统 [J]. 自动化仪表, 2016, 37(2): 69-71.
- [23] Cheng X J, Fang F. Morphology-based scattered point cloud contour extraction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(11): 1738-1743.
程效军, 方芳. 基于形态学的散乱点云轮廓特征线提取 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(11): 1738-1743.
- [24] Fu J S, Li B. Multi-contour sorting algorithm based on point cloud cross-section data points [J]. Henan Science, 2019, 37(6): 933-937.
付敬帅, 李斌. 基于点云截面数据点的多轮廓排序算法 [J]. 河南科学, 2019, 37(6): 933-937.
- [25] Zhang Y H, Du Y, Pan F, et al. Intelligent vehicle path tracking algorithm based on cubic B-spline curve fitting [J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(6): 1562-1567.
张永华, 杜煜, 潘峰, 等. 基于三次 B 样条曲线拟合的智能车轨迹跟踪算法 [J]. 计算机应用, 2018, 38(6): 1562-1567.
- [26] Arias J L, Montealegre M A, Vidal F, et al. Real-time laser cladding control with variable spot size [J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 8970: 89700Q.
- [27] Bian H Y, Yang G, Li Y, et al. Grouping parallel scan path generating method of metal laser deposition shaping [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 171-176.
卞宏友, 杨光, 李英, 等. 金属激光沉积成形分组平行扫描路径生成方法 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 171-176.
- [28] Wu H L. Several methods of evaluation of flatness error [J]. Industrial & Science Tribune, 2015, 14(22): 68-69.
吴呼玲. 平面度误差评定的几种方法 [J]. 产业与科技论坛, 2015, 14(22): 68-69.
- [29] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Measurement of departures from flatness: GB/T 11337—2004 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 平面度误差检测: GB/T 11337—2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

Detection and Control of Morphology Deviation in Laser Deposition Manufacturing

Qin Lanyun¹, Xie Yongkai¹, Yang Guang^{1*}, Wang Wei¹, Wang Xiangming²

¹ School of Mechatronic Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China;

² Shenyang Aircraft Design Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Shenyang, Liaoning 110035, China

Abstract

Objective With the rapid development of science and technology, there is increasing demand for high-precision workpieces in various fields, especially in space shuttles, aero-engines, space station, and medical fields. As one of

the important branches of additive manufacturing, laser deposition-manufacturing technology plays an important role in high-precision and high-intensity manufacturing. In the laser deposition-manufacturing process, owing to the effects of some factors, such as heat accumulation, inevitably produces edge collapse, and the surface concave and convex inequality forming size deviation value phenomenon, resulting in a large deviation between the actual morphology and the ideal morphology. It affects the forming accuracy of the workpiece, and after multiple stacking manufacturing, the more concave the concave, the more convex the convex, which hinders the further progress of deposition manufacturing. Currently, research institutions and universities globally mainly focus on the optimization of forming processes, analyses of the structures and performance of the formed parts, and stress distribution during the forming process. There are only a few studies on improving the forming accuracy, such as morphology deviation and control. Meanwhile, it is vital to detect and control morphology deviations in sedimentary layers during forming processes.

Methods In this study, a high-speed profilometer was used to set up a sedimentary profile detection system, which was integrated into laser deposition-manufacturing equipment to detect and control sedimentary profile deviations. First, the high-speed profilometer was used to scan the surface of the sedimentary body, and the obtained three-dimensional morphology point cloud data were compared with the theoretical data of the sedimentary layer slices to extract the point cloud data that form the deviation area. Then, the deviated-area point cloud was layered and sliced, and the slices were converted to binary images by organizing the point cloud. The image boundary pixel points were extracted with the image boundary recognition algorithm and converted to coordinate points (i. e., the deviation contour point of the slice). The deviation contour feature line was fitted with the cubic B-spline curve. Finally, the accurate position of the deviated contour area in the original section contour area was determined, the filling space within the deviated contour area was changed, the forming track was filled, the deposition program was generated, and the deviated area was compensated. The flatness error on the surface of the sedimentary body before and after compensation was calculated, and the variation of the surface morphology deviation was analyzed.

Results and Discussions The results show that the morphology detection system can quickly obtain the morphology point cloud data of sedimentary bodies (Fig. 6). After the point cloud was denoised, a relatively ideal point cloud was obtained (Fig. 7). A pair of parallel planes was used to contain the denoised point cloud data to form the minimum containment area, and the flatness error value of the sample was obtained (Fig. 8). The morphologic point clouds are compared with the theoretical data of standard sediment slices to extract the deviated area point clouds (Fig. 9). The point cloud of the deviated region was layered and sliced, and the slices were converted into binary images. Then the deviated contour points of the slices were extracted and fitted using the image boundary recognition algorithm (Fig. 10). Finally, we propose a compensation path planning method based on changing the filling space of the deviated area to generate a compensation path, and the degree of depositional morphology deviation after compensation processing was significantly reduced compared with that before compensation (Fig. 11).

Conclusions Based on the above results, we draw the following conclusions. The laser deposition-manufacturing morphology detection system established can quickly scan the surface of the deposition to obtain the morphology point cloud data and the contour of the deviated region by processing the point cloud data. The accurate position of the deviated contour area in the original section contour area can be determined. Since the sedimentary shape is a sag deviation, the filling trajectory of the deviated contour area is filled and the compensation path is generated by reducing the filling space of the deviated contour area. The experimental results show that the deviation of the morphology of the sediment was compensated. The surface flatness error of the sample before and after compensation was 1.95 mm and 0.68 mm, respectively. This represents a 65.1% decrease in the fatness error. The degree of morphology deviation of the sample was significantly reduced, ensuring continuous deposition manufacturing and small machining allowance in the subsequent material reduction processes.

Key words laser technique; laser deposition manufacturing; morphology deviation detection; path planning; point cloud slicing

OCIS codes 140.3390; 150.5495; 240.6700