

# 扭转弯曲变截面结构连续渐变分层光内送粉 熔化沉积成型研究

金磊<sup>1</sup>, 石世宏<sup>1\*</sup>, 石拓<sup>2\*\*</sup>, 魏超<sup>1</sup>, 张荣伟<sup>1</sup>, 张琪<sup>1</sup>, 王宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>苏州大学机电工程学院激光制造技术研究所, 江苏 苏州 215021;

<sup>2</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006

**摘要** 传统的加工方式难以实现变截面扭转弯曲结构件的成型。本文研究了变截面结构在扭转及弯曲变化下光内送粉激光熔化沉积成型的轨迹规划问题,提出了针对此种几何成型特征结构件的连续渐变分层法,实现了变截面结构在扭转弯曲变化下的分层成型。最后根据结构分层获得的光内送粉喷头空间三维轨迹变化的坐标信息进行了扭转弯曲变截面结构件的成型实验,实验结果表明:成型件表面平整且成型精度较高,成型件的弯曲角度和扭转角度分别为 46.18°和 44.79°,与原始设计角度的误差分别为 2.62%和 -0.47%;成型件初始圆形截面的直径和终止方形截面的边长分别为 59.63 mm 和 60.72 mm,与原始设计尺寸的误差分别为 -0.62%和 1.20%;成型件微观组织致密,无明显的气孔和裂纹。

**关键词** 激光技术; 激光熔化沉积; 扭转弯曲变截面结构; 连续渐变分层; 路径规划

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2202014

## 1 引言

航空航天、远洋船舶等领域中的许多零部件具有截面随着弯曲和扭转运动不断变化的结构,如涡轮风扇的进出气道、喷射机燃烧室的燃料进出口等<sup>[1-2]</sup>。该类结构件具有始末截面形状变化、大倾角弯曲和大角度扭转生长等几何空间特征。传统的减材加工,如铸造、数控铣削等,虽然技术较为成熟,但在加工上述结构件时存在工艺复杂或不易加工的难题<sup>[3]</sup>,而且在特定情况下无法满足加工要求<sup>[4]</sup>。增材制造技术通过 CAD 软件采集模型数据进而通过热源逐层堆积材料的方式来制造实体零件,具有高成型自由度的特点<sup>[5-7]</sup>。目前,增材制造技术在制造业中的应用规模正在逐步扩大,主流的金属增材制造技术有激光选区熔化(SLM)、激光熔化沉积(LMD)等,但工艺技术尚不成熟<sup>[8]</sup>。

相较于传统的减材加工方式,激光熔化沉积技术的成本较高且效率较低,但其在复杂零部件的成型上具有优势。无需任何模具,在计算机数控系统的驱动下,激光熔化沉积技术通过金属材料的激光熔化-快速凝固逐层沉积直接制备并成型出具有快速凝固组织特征的“近净形”金属零件。

王明雨等<sup>[9]</sup>针对结构件的多元扭曲特征提出了随

形离散分层法,并采用该方法对结构件进行二次离散,解决了该多元扭曲特征结构件中截面渐变部分的分层问题,并依据获得的喷头的空间运动轨迹信息,完成了多元扭曲结构件的成型;王宇等<sup>[10]</sup>先在基板的法平面上进行纵向分层,然后将得到的各分层进行二次离散,将各分层离散成独立单元,最后按照等圆心角将离散单元进行拼接,得到了熔覆轨迹路径,成功实现了弧面扭曲结构件的激光熔覆成型。以上两位研究人员通过规划机器人路径成功地对开放式结构(三元叶片、弧形叶片)进行了成型,但未对半封闭式结构进行研究。张荣伟等<sup>[11]</sup>通过对空心球体三维模型进行分段路径规划,建立了相应的熔池数学模型,提出了连续多姿态激光熔化沉积成型方法,该方法有效提高了激光熔化沉积技术对封闭件的成型能力;同时,他们对截面规则变化结构的成型过程进行了总结。Dwivedi 等<sup>[12]</sup>基于人工智能原理,采用工艺规划自动化的任务框架,实现了激光多方向熔覆工艺的数字模型自动化,并在计算机辅助设计和系统驱动的干预下,通过合理规划运动轨迹成型出了扭曲叶片。

目前,国内外主要研究的是截面不发生变化或者是截面呈规律性变化的扭转弯曲结构件,且主要通过激光选区熔化的方式实现结构件的成型,而对变截面扭转弯曲结构件尤其是初始与末端截面相差较大的扭

收稿日期: 2022-02-10; 修回日期: 2022-02-25; 录用日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(62173239)、江苏省自然科学基金(BK20190823)

通信作者: \*shishihong@suda.edu.cn; \*\*shituo@suda.edu.cn

转弯曲结构件的激光熔化沉积成型则鲜有报道。此种结构件的成型因为涉及大倾角和多扭转的情况,通过粉末输入熔池的方式会出现“漏光”现象<sup>[13-15]</sup>,从而导致成型件表面出现“台阶状”或者未熔粉末堆积成球的问题。

本团队首先通过先连续渐变分层后拼接离散单元的方法获得激光头的运动路径,有效避免了成型过程中出现的“漏光”问题,然后采用中空环形光内送粉熔化沉积技术<sup>[16]</sup>实现了变截面结构件的扭转

弯曲成型。

## 2 实验设备与材料

如图 1 所示,本实验所采用的激光熔化沉积成型系统主要由中空环形光内送粉喷头、RFL-C 6000 W 光纤激光器、GTV PF2/2 型送粉器、KUKA 六轴机器人臂以及附加的水平旋转工作台构成,所使用的载粉气和准直保护气均是 99.99% (体积分数) 的高纯度氮气。

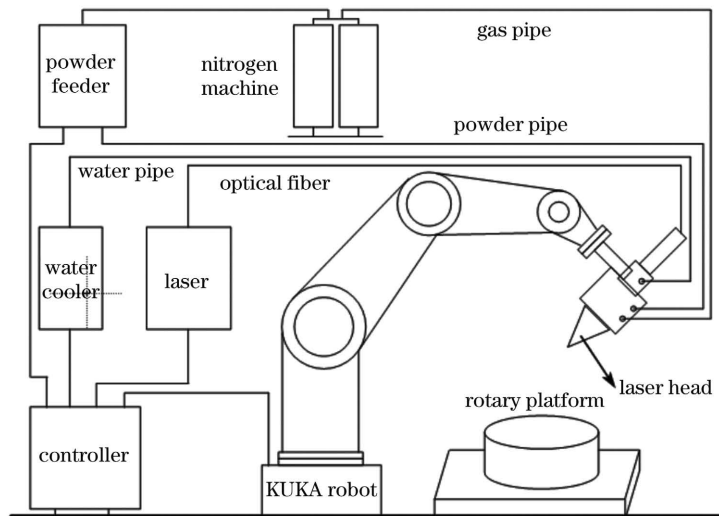


图 1 激光熔化沉积成型系统示意图

Fig. 1 Schematic of laser melting deposition forming system

实验中采用的中空环形光内送粉熔化沉积喷头为本实验室自主研发的<sup>[17]</sup>,可适用于多种材料的成型及涂层制备<sup>[18-19]</sup>,其外观及原理如图 2 所示。平行实心激光束经锥形分光镜和环形聚焦镜调制中空环形光斑,扫描线上的能量呈马鞍形分布。送粉喷嘴位于光

斑中心。环形激光包裹垂直下落的粉末,粉末与光束同轴。在准直保护气体作用下,光、粉、气三者精准耦合,显著提高了粉末的利用率。该设备可实现空间 360° 多自由度熔化沉积<sup>[20]</sup>,可实现大倾角、多扭转结构件的成型。

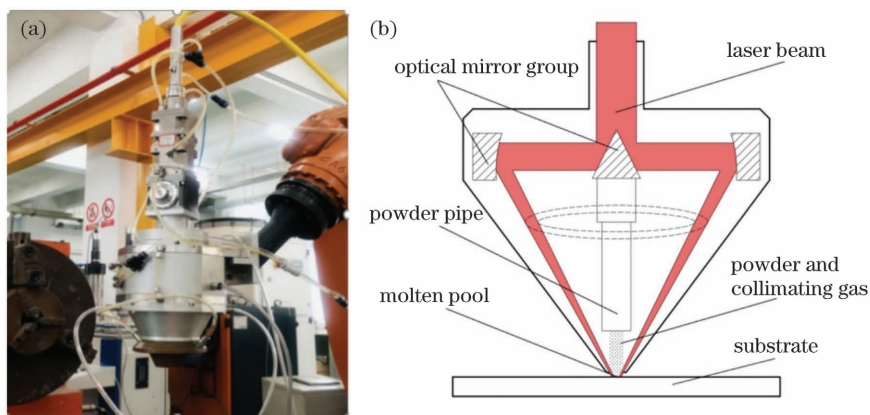


图 2 光内送粉设备及原理。(a) 设备;(b) 原理图

Fig. 2 Principle and equipment of inside-laser powder feeding. (a) Device; (b) principle

实验所采用的基板是尺寸为 150 mm × 150 mm × 15 mm 的 304 不锈钢平板,其化学成分如表 1 所示。实验前,先用 1000 目砂纸对基板表面进行打磨,再分别用棉球先后浸润适量的无水乙醇和丙酮进行手工擦拭,以清除基板表面的油渍。实验用粉末材料为

Fe314 金属粉末,其化学成分(通过扫描电子显微镜附带的能谱仪测量得到)如表 2 所示,粉末粒径为 50 ~ 120 μm,粒径分布如图 3 所示。采用该粒径分布的 Fe314 粉末进行熔化沉积成型实验有利于送粉器将其稳定送入激光头内。

表 1 304 不锈钢基板的化学成分

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel basal plate

| Element | Mass fraction / % |
|---------|-------------------|
| C       | 0.04              |
| Mn      | 0.93              |
| S       | 0.004             |
| Si      | 0.378             |
| Cr      | 18.83             |
| P       | 0.04              |
| Ni      | 8.11              |
| Fe      | Bal.              |

表 2 Fe314 金属粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of Fe314 metal powder

| Element | Mass fraction / % |
|---------|-------------------|
| C       | 0.1               |
| Si      | 1                 |
| Cr      | 15                |
| B       | 1                 |
| Ni      | 1                 |
| Fe      | Bal.              |

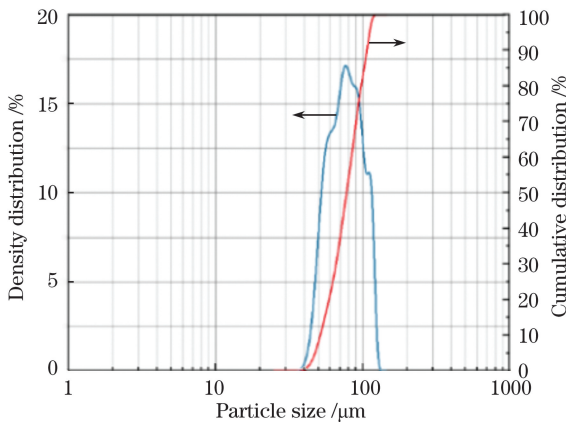


图 3 粒径分布图

Fig. 3 Particle size distribution

### 3 实验方法

#### 3.1 建立零件几何模型

基于航空涡轮发动机燃料室进口内流道设计实验零件模型。本团队设计了一个由圆形截面连续变化为正方形截面的扭转弯曲结构件,其模型如图 4 所示。由该结构件的形状特点可知,其由初始截面(圆形截面)沿成型轨迹通过扭转和弯曲运动变化至终止截面(方形截面)得到。初始圆形截面的直径为  $D_1$  ( $D_1 = 60 \text{ mm}$ ),最终正方形截面的边长是  $L_1$  ( $L_1 = 60 \text{ mm}$ ),结构件中心点集合为圆弧  $L_g$ ,该圆弧的圆心角和半径分别为  $\delta_1$ (即弯曲角为  $\delta_1$ )和  $R_1$ ,如图 4(a)所示。结构件的典型成型位置点包括初始截面上的  $P_{b1}$ 、 $P_{b2}$ 、 $P_{b3}$ 、 $P_{b4}$  及其运动变化至终止截面上的  $P_{f1}$ 、 $P_{f2}$ 、 $P_{f3}$ 、 $P_{f4}$ ,如图 4(b)所示。坐标系从  $C_b$  变化至  $C_f$ ,坐标系  $C_f$  与  $C_b$  在各自基面上的相对角度差为  $\Delta\delta$ ,即扭转角为  $\Delta\delta$ ,如图 4(c)所示。

#### 3.2 连续渐变分层法

图 4 所示截面渐变结构在空间中进行复杂的弯曲和扭转复合运动,具有大倾角、高扭曲特征。连续渐变分层方法以法向分层为基础,即,在熔化沉积成型过程中喷头的几何中心轴线始终与沉积平面保持垂直关系。该方法可以极大程度地减少错位堆积,从而在大倾角沉积过程中减少熔融粉末重力对熔池的影响。

根据零件三维模型的几何特征,采用连续渐变分层方法沿生长方向对结构件进行连续分层,然后将各沉积层离散成多个离散单元,再对各层离散单元进行拼接。详细步骤如下:

1)沿生长方向进行连续分层。由变截面扭转结构件的形状特点可知,各熔化沉积层沿着生长方向的轨迹  $L_g$ ,从初始端面(圆形截面)逐渐过渡到结束端面(方形截面)。 $L_g$  同时也是结构件的实体中心线,激光喷头始终与生长方向的轨迹  $L_g$  相切。根据上述生长特点,将实体模型划分为类圆阶段、圆趋方阶段及近方阶段,如图 5 所示。其中:类圆阶段的整体形状趋于圆

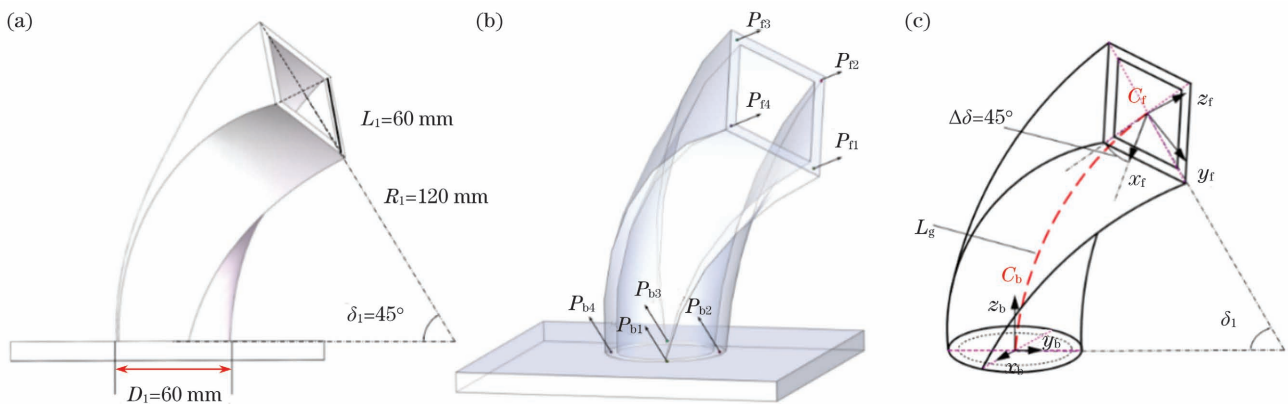


图 4 成型件模型。(a)三维模型;(b)典型成型位置点;(c)基面及坐标系变化

Fig. 4 Model of formed part . (a) Three-dimensional model; (b) critical forming points; (c) base plane and coordinate system transformation

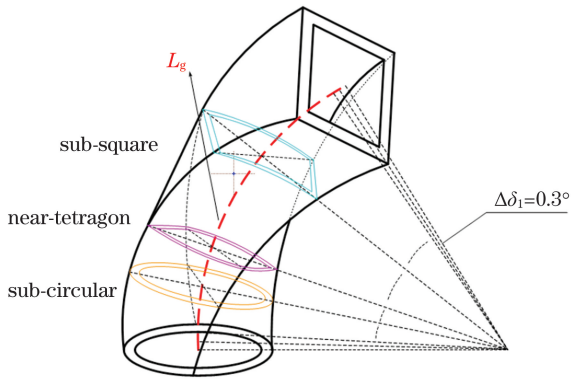


图 5 成型阶段的变化示意图

Fig. 5 Diagram of forming stage change

形,如图 6(a)所示;圆趋方阶段是截面从圆形变为方形的过渡段,其形状近似于方形各边外凸状,如图 6(b)所示;近方阶段的主要形状变化趋势与类圆阶段类似,并逐渐变为正方形。由 3.1 节可知结构件的弯曲角为  $\delta_1$ ,根据沿生长方向连续分层的思想,将  $\delta_1$  平均分成  $n$  等份,将结构件分成向心角度为  $\Delta\delta_1$  的沉积层。

2) 基于先离散后拼接的思想构建沉积层。将单层封闭沉积层等分成  $k$  个沉积单元,  $k=0$  为每层沉积的起始点,每个沉积单元对应的向心角度为  $\Delta\theta$ 。在熔化沉积阶段,将各沉积单元的空间三维信息进行拼接,构建熔化沉积层,如图 7(a)所示。

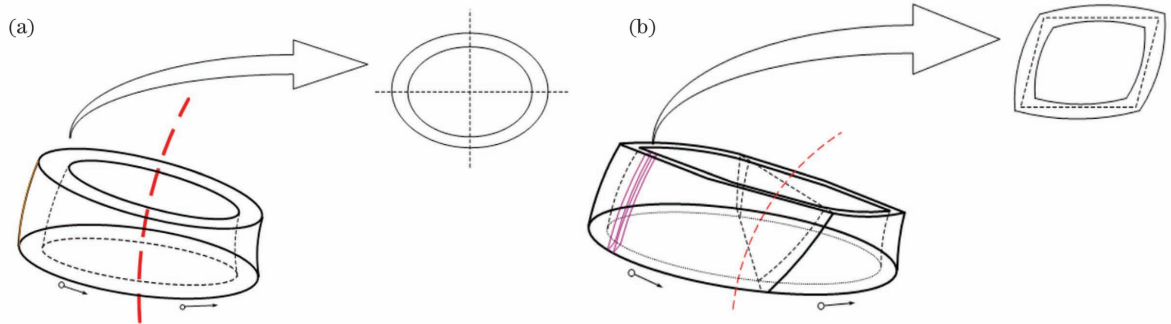


图 6 典型阶段示意图。(a)类圆阶段;(b)圆趋方阶段

Fig. 6 Diagrams of typical forming stage. (a) Sub-circular stage; (b) near-tetragon stage

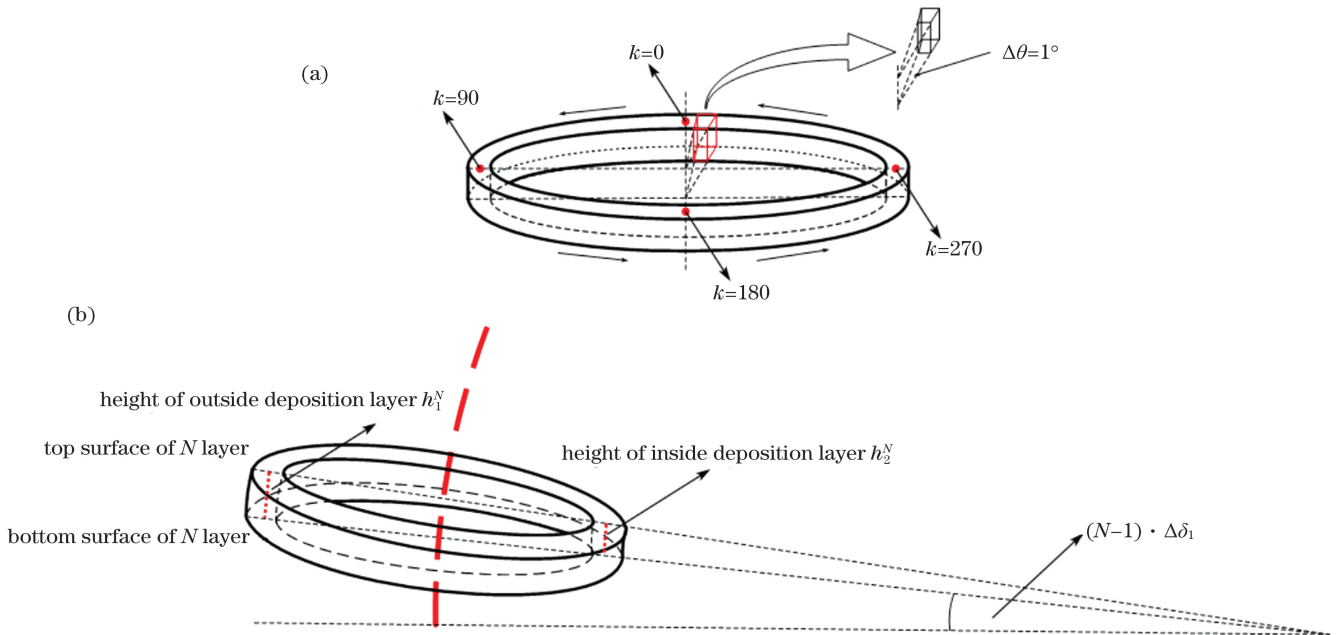


图 7 连续渐变分层法示意图。(a)单层离散拼接示意图;(b)每层渐变示意图

Fig. 7 Schematic of continuous gradual slicing method. (a) Diagram of separating and splicing method in one layer;

(b) diagram of continuous slicing method in each layer

以第  $N(0 < N \leq n)$  个沉积层为例,在实际熔覆过程中,该沉积层与最初始沉积层的圆弧中心角度差为  $(N-1) \cdot \Delta\delta_1$ ,由结构件连续渐变分层方法可知,最外侧沉积层的层高  $h_1^N$  一定大于最内侧沉积层的层高  $h_2^N$ ,如图 7(b)所示。要避免将开光点与闭光点设为这两个关键位置。第  $N$  个沉积层的顶面为第  $N+1$  个

沉积层的底面,通过调整工艺参数来获得不同高度的沉积层,即,在不同的离散点处通过调整扫描速度和激光能量来获得不同的沉积高度,如图 8 所示。在靠近最内侧沉积区域时,通过增大扫描速度来减少单位时间内熔池捕获的粉末量,以降低层高;在靠近最外侧沉积区域时,层高逐渐增大,如图 8(a)所示。当

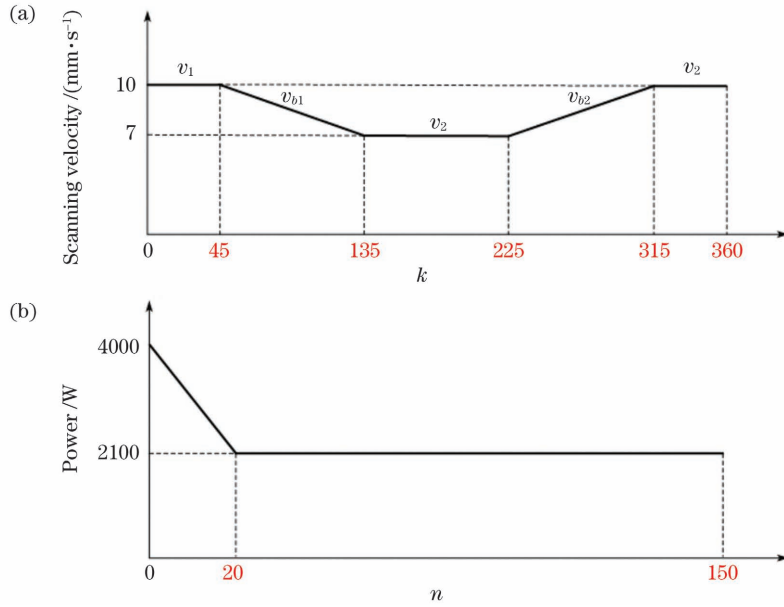


图 8 成型过程中扫描速度、激光能量匹配示意图。(a)单层离散单元扫描速度的变化示意图;(b)激光功率随成型层数增加变化的示意图

Fig. 8 Matching diagrams of scanning velocity and laser power in forming process. (a) Schematic of scanning velocity changing in each single discrete unit; (b) schematic of laser power changing with the increase of forming layers

$n \leq 20$  时,为了获得稳定的熔池,逐渐降低激光功率;当  $n \geq 20$  时,熔池趋于稳定,功率保持恒定,如图 8(b) 所示。

### 3.3 结构件成型轨迹路径规划

离散分层的本质是将几何结构件实体按照某种分割原则分为若干带有位置及方向信息的子实体,即有

$$V = \bigcup_{i=0}^{n-1} \Delta V_i, \quad (1)$$

式中: $\Delta V_i$  表示组成几何构件实体的子实体单元; $V$  表示几何构件实体整体。

按照离散的顺序完成每个沉积子实体单元的成型堆积,即可实现整个结构件的熔化沉积成型。每个子实体单元的位置是激光熔化沉积喷头在机械臂驱动下扫掠过的每个点,每个扫掠过的点的集合就是成型过程的完整的沉积轨迹姿态,每个点包含的姿态信息由每个离散子实体单元的位置和方向信息决定。

沉积喷头装载在 KUKA 机械臂上,喷头的实际运动轨迹可以理解为其所在的工具坐标系  $C$  相对于其基面坐标系  $B$  的相对运动,可视为坐标系  $C$  相对于坐标系  $B$  的运动,这种运动可以描述为坐标系  $C$  相对于坐标系  $B$  的位置变化和方向变化。位置可以简化看成是喷头在基面坐标系空间中的某个点,该点可以用一个  $3 \times 1$  的位置矢量表示,如图 9(a) 所示。坐标系  $B$  中某个位置  $P$  可以表示为

$${}^B P = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

工具坐标系  $C$  相对于基面坐标系  $B$  运动的信息包含了位置信息和方向信息,位置信息即为式(2),方向信息如图 9(b) 所示,可用坐标系  $C$  和坐标系  $B$  的三个坐标轴组成的带有坐标余弦值的  $3 \times 3$  旋转矩阵表示,即

$${}^B R = \begin{bmatrix} \cos(B_x, C_x) & \cos(B_x, C_y) & \cos(B_x, C_z) \\ \cos(B_y, C_x) & \cos(B_y, C_y) & \cos(B_y, C_z) \\ \cos(B_z, C_x) & \cos(B_z, C_y) & \cos(B_z, C_z) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: ${}^B R$  表示工具坐标系  $C$  相对于基面坐标系  $B$  的旋转变换矩阵。

本文分别用平移坐标系和旋转坐标系的映射来描述工具坐标系  $C$  在基面坐标系  $B$  中的整个变换过程。取空间中某点  $P$  在两个坐标系中的矢量分别为  $e_C$  和  $e_B$ ,如图 9(c) 所示。向量  $e_C$  可以看成是向量  $e_B$  先进行旋转变换再进行平移变化得到的,因此  $e_C$  和  $e_B$  满足

$$e_B = {}^B R \cdot e_C + T, \quad (4)$$

$${}^B P = {}^B R \cdot {}^C P + T, \quad (5)$$

$${}^B P = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}, \quad {}^C P = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: ${}^B P$  和  ${}^C P$  分别表示点  $P$  在坐标系  $B$  和坐标系  $C$  中的坐标向量; $T$  为平移矩阵,包含了进行变换所需的信息(位置信息和方向信息)。

考虑到整体的变换为空间三维线性变化,从一个坐标系变换到另一个坐标系的映射可以用单个矩阵样式的子式表示为

$$\begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B R & T \\ \mathbf{0} & t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^C P \\ 1 \end{bmatrix} = M_{CB} \cdot \begin{bmatrix} {}^C P \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中:  $t$  为整体比例因子,  $t=1$ ;  $\mathbf{0}$  是  $1 \times 3$  的零矩阵,  $\mathbf{0}=[0 \ 0 \ 0]$ ;  $M_{CB}$  是最终的齐次变化方程, 包含了工具坐标系  $C$  在基面坐标系  $B$  中的位置信息和方向

信息, 即包含了成型过程中所需要的平移变换和旋转变换(这里的旋转变换是扭转变化和弯曲变化的合称)。KUKA 机械臂的实际运动轨迹是进行  $n$  次坐标系齐次变换后得到的所有点的集合。将式(3)~(6)代入式(7)可以得到

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(B_x, C_x) & \cos(B_x, C_y) & \cos(B_x, C_z) & T_x \\ \cos(B_y, C_x) & \cos(B_y, C_y) & \cos(B_y, C_z) & T_y \\ \cos(B_z, C_x) & \cos(B_z, C_y) & \cos(B_z, C_z) & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ 1 \end{bmatrix} = M_{CB} \cdot \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

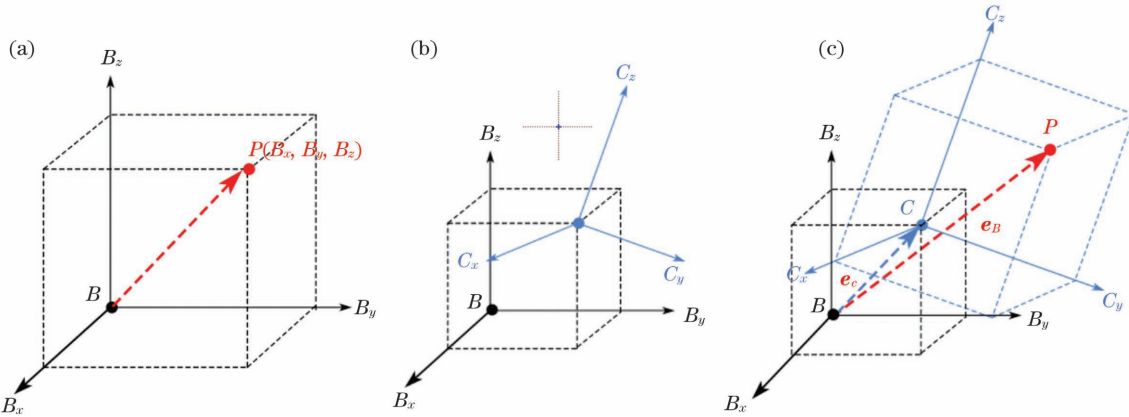


图 9 空间中任意某点  $P$  在基面坐标系和工具坐标系中的坐标变换示意图。(a) 点  $P$  在基面坐标系中的坐标; (b) 工具坐标系相对于基面坐标系的位置示意图; (c) 坐标变换示意图

Fig. 9 Coordinate transformation of any spatial point  $P$  in base CSYS and tool CSYS. (a) Coordinates of point  $P$  in base CSYS; (b) position of base CSYS relative to base CSYS; (c) coordinate transformation diagram

由连续渐变分层的原理可知, 激光圆形光斑的运动轨迹取决于该结构件通过切片分层之后获得的每个离散单元的方向信息和位置信息, 每个沉积层的成型等效于激光喷头在其所在工具坐标系围绕工具中心相对于上一个沉积层基面坐标系进行弯曲和扭转变形。3.2 节采用连续渐变分层的方法对具有弯曲扭转变形

的截面渐变结构件进行切片分层, 该方法采用的基本思想是沿生长方向连续分层, 各熔覆层先离散后拼接。基于这一思想, 本文将该结构件行程轨迹的位置信息与坐标系之间的相对运动变化结合起来。转换结合流程图如图 10 所示, 该转换流程图同时也表明了机器人内部转换坐标信息的逻辑顺序。

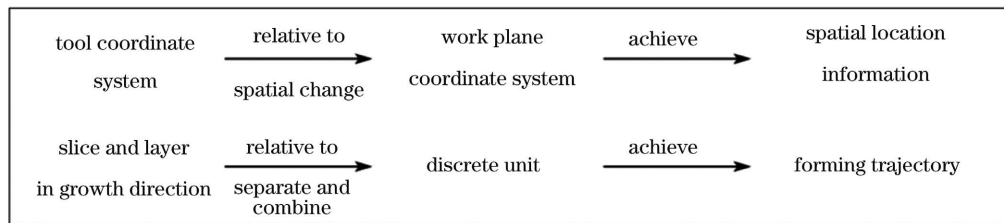


图 10 转换结合示意图

Fig. 10 Transformation and combination diagram

### 3.4 工具中心定位与位移补偿

基于 KUKA 六轴机器人搭载中空环形光内送粉熔化沉积喷头进行成型的方式涉及非水平面运动, 即弯曲和扭转运动。为防止成型过程中出现“漏光”现象, 需要对工具中心点进行设置, 即“TCP”标定, 如图 11 所示。以图 4(b) 中  $P_{bl}$  运动至  $P_{fl}$  的轨迹为例, 当运动至轨迹上某一点  $P_m$  时, 该点的空间信息坐标系为  $C_m(C_{BASE})$ , 喷头空间信息坐标系为  $C_{TOOL}$ , 坐

标系  $C_{TOOL}$  以  $P_m$  为空间中心围绕坐标系  $C_{BASE}$  进行任意变化。考虑到实际熔化沉积工作平面在激光焦点  $P_f$  上方 8.57 mm 处, 也就是点  $P_m$  位于点  $P_f$  上方 8.57 mm 处, 即离焦量为 -8.57 mm。

KUKA 机械臂的实际运动路径并非为连续曲线, 而是由多段紧密衔接的折线组成的, 故需要对此过程进行位移补偿, 否则易使成型件表面易出现“阶梯状”缺陷。补偿示意图如图 12 所示。将图 12(a)

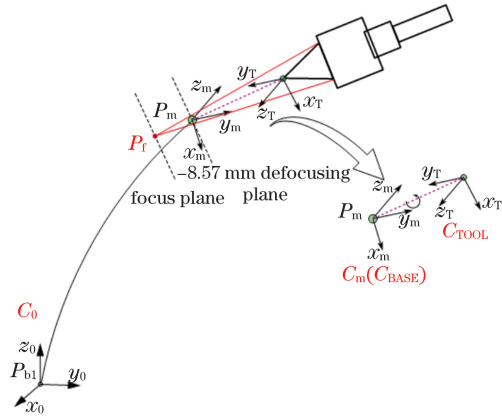


图 11 工具中心点设定示意图

Fig. 11 Schematic of tool center point setting

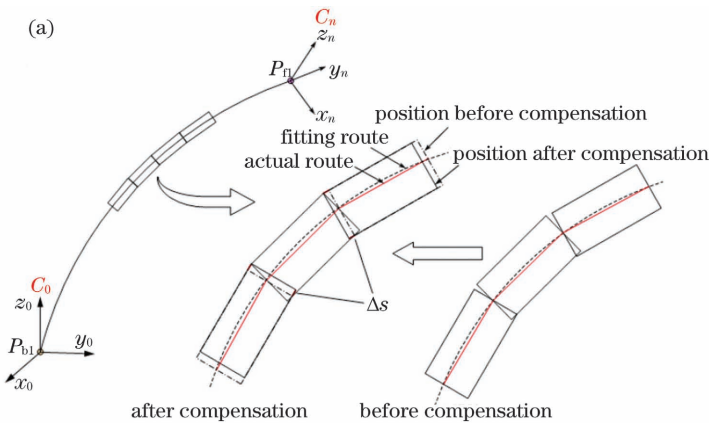


图 12 位移补偿示意图。(a)姿态变化示意图;(b)位移变化示意图

Fig. 12 Schematic of displacement compensation. (a) Schematic of posture changing; (b) schematic of displacement changing

## 4 成型及分析

### 4.1 尺寸误差分析

本实验采用的工艺参数如表 3 所示,激光功率与扫描速度的范围区间对应图 8 中的工艺参数匹配范围,采用第 2 节所述的光内送粉喷头。在不同的光内送粉沉积喷头偏转角度下,粉末流束均具有良好的耦合性,集束性显著。成型过程如图 13 所示,在熔化沉积成型过程中,熔池未出现由重力作用引起的滴落塌陷现象,且基于光内送粉熔化沉积的自愈合原理<sup>[21]</sup>,

中的位移补偿过程简化为图 12(b)所示的位移变化示意图。假设喷头的光束轴线与竖直方向的夹角为  $\alpha$ ,从补偿前变换到补偿后位置的角度变化为  $\beta$ ,进行变换后的角度基点与熔覆层实际生长高度的距离为  $\Delta d$ 。喷头的实际偏移量可以分解为沿着  $y$  和  $z$  方向的偏移量  $\Delta y$  和  $\Delta z$ ,即

$$\Delta y = 2\Delta d \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right), \quad (9)$$

$$\Delta z = 2\Delta d \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right). \quad (10)$$

在熔覆成型过程中,将上述偏移量写入 KUKA 机械臂的 KRC 程序中,即可实现喷头的位移补偿控制。

成型件表面完好。最终通过激光熔化沉积成型出的构件实物图如图 14 所示。

表 3 激光熔化沉积成型工艺参数

| Parameter  | Value     |
|--|-----------|
| Laser power /W   | 2100-4000 |
| Defocus distance /mm   | -8.57     |
| Scanning speed /( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )          | 7.0-10.0  |
| Powder delivery amount /( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 45.9      |

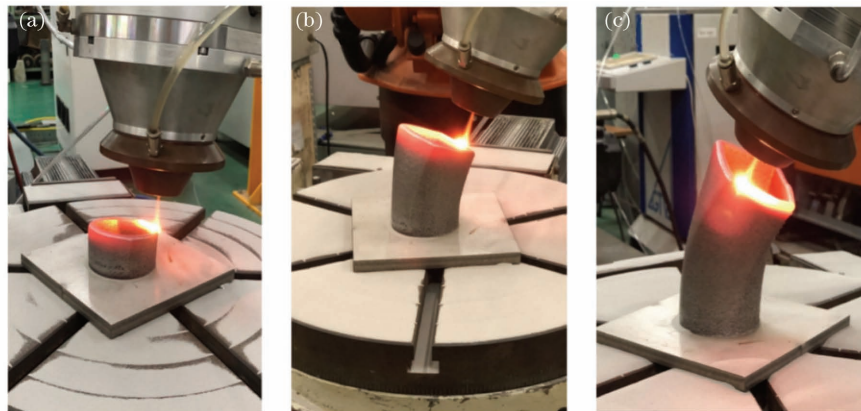


图 13 成型过程。(a)类圆阶段;(b)圆趋方阶段;(c)近方阶段

Fig. 13 Forming stages. (a) Sub-circular stage; (b) near-tetragon stage; (c) sub-square stage

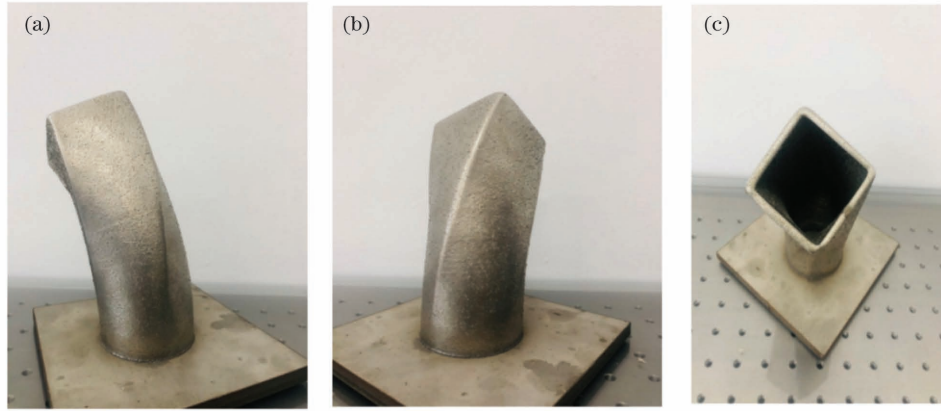


图 14 成型件实物图。(a)左后侧视图;(b)右后侧视图;(c)顶部视图

Fig. 14 Photos of formed part. (a) Left back side view; (b) right back side view; (c) top view

接下来对成型件的尺寸误差进行分析。成型件的弯曲角度  $\delta'_1$  和扭转角度  $\Delta\delta'$  分别为  $46.18^\circ$  和  $44.79^\circ$ ，与设计尺寸的误差分别为  $2.62\%$  和  $-0.47\%$ ；成型件初始圆形截面的直径和终止方形截面的边长分别为  $59.63\text{ mm}$  和  $60.72\text{ mm}$ ，与设计尺寸的误差分别为  $-0.62\%$  和  $1.20\%$ ，如图 15 所示。由此可见，弯曲角度对于连续渐变分层成型的敏感度更高。该结构件的成型精度较高，成型尺寸与理论设计尺寸的相对误差较小，整体形貌较好。

对成型件的壁厚进行测量与分析。在上述工艺参数下熔覆单道的理想宽度为  $6\text{ mm}$ ，分别沿着  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  路径自上而下取 12 个点，测量该点所在位置处的壁厚，测量结果如图 16 所示。 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  路径上取样部分的壁厚区间分别为  $5.86 \sim 6.14\text{ mm}$ 、 $5.87 \sim 6.18\text{ mm}$ 、 $5.88 \sim 6.17\text{ mm}$ 、 $5.87 \sim 6.13\text{ mm}$ ，整体壁厚基本保持稳定。

#### 4.2 显微组织分析

在图 16 所示  $b$  路径内侧 1、2、3 三个位置取样并镶嵌(镶嵌料由树脂粉和固化剂按照质量比为  $1:0.8$  进行配比)，将镶嵌好的试样放入模具中常温静置  $20\text{ min}$ ；接着对试样进行研磨、抛光、腐蚀处理，腐蚀溶液为王水(用盐酸溶液与硝酸溶液按体积比  $3:1$  配制而成)，腐蚀时间为  $30\text{ s}$ ；然后使用金相显微镜分别观

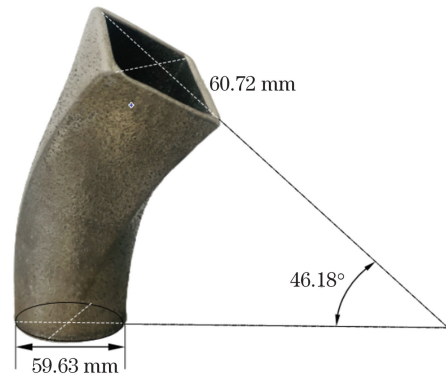


图 15 成型件的实际尺寸

Fig. 15 Real size of forming part

察上述三个区域的组织，结果如图 17 所示。可见，取样位置处的组织主要以树状晶为主，其生长方向即为热量消散的方向，组织致密，无明显的气孔和裂纹。激光熔化沉积是骤热骤冷的凝固过程，极短的时间内就会形成极大的过冷度，因此形成的晶粒非常细小，且整体排布致密。在三个位置处，区域②中的晶粒相比区域①中的晶粒明显粗大和稀疏。这是因为结束沉积某一层后进行下一层熔化沉积时，激光会对上一层已沉积区域进行二次加热，相当于激光重熔，导致该部分区域的枝晶遭到破坏并重新结晶，故而晶粒变得粗大，晶粒的分布也变得稀疏。

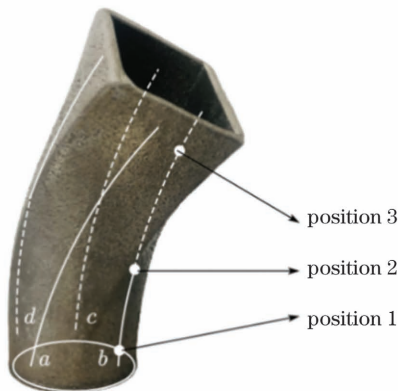
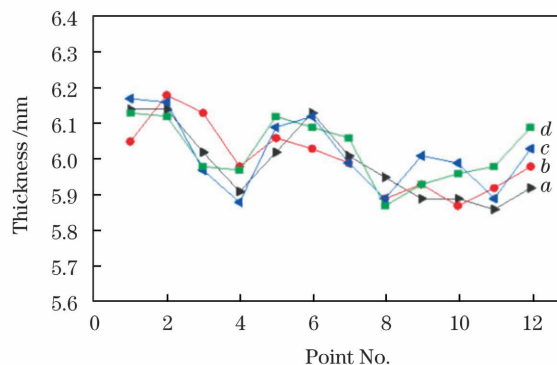


图 16 几何尺寸测量

Fig. 16 Geometric size measurement





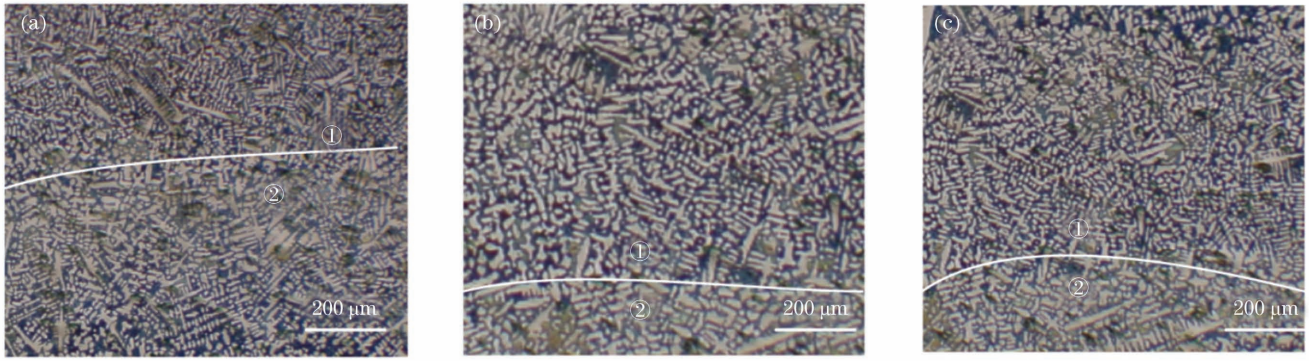


图 17 不同位置处的显微组织。(a)位置 1;(b)位置 2;(c)位置 3

Fig. 17 Microstructures at different positions. (a) Position 1; (b) position 2; (c) position 3

## 5 结 论

本文提出了一种适用于扭转弯曲变截面结构件成型的连续渐变分层方法,将获得的 KUKA 机械臂三维运动坐标信息与成型过程工艺参数匹配,实现了该结构的连续稳定成型。

本文采用基于法向分层的连续渐变分层方法成功解决了变截面结构件在扭转弯曲变化条件下的分层问题,同时采用加入位移补偿的方式,有效避免了成型过程中出现的“漏光”效应。

成型件表面平整且成型精度高,整体尺寸精度在  $-0.62\% \sim 1.20\%$  之间,扭转角度和弯曲角度的尺寸精度分别为  $2.62\%$  和  $-0.47\%$ ,成型件表面无明显的气孔和裂纹;成型件组织致密,组织整体呈树状晶,内部无明显的气孔和裂纹缺陷。

## 参 考 文 献

- [1] 朱永伟,徐家文,赵建社. 大扭曲度整体涡轮叶片展成电解加工成形规律及试验研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(17): 1778-1783.  
Zhu Y W, Xu J W, Zhao J S. Study on the shaping law and test of electrochemical contour evolution machining for integral turbine with big-twisted blades [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(17): 1778-1783.
- [2] 周超军,孙文磊. 基于激光熔覆的激光再制造研究综述[J]. 矿山机械, 2015, 43(9): 5-9.  
Zhou C J, Sun W L. Review on laser remanufacturing research based on laser cladding[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(9): 5-9.
- [3] 魏剑辉,匡宇. 大型复杂薄壁整体熔模精密铸件的陶瓷型壳技术研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(3): 488-491.  
Wei J H, Kuang Y. Ceramic shell technique for large complex thin wall investment structural castings [J]. Foundry Technology, 2016, 37(3): 488-491.
- [4] 欧阳华兵,于忠海,陈田,等. 核电水室封头的分区域加工路径规划[J]. 机械设计与制造, 2014(5): 253-255.  
Ouyang H B, Yu Z H, Chen T, et al. Sub-regional process planning for large nuclear power head[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(5): 253-255.
- [5] 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(12/13): 1459-1468.
- [6] 王续跃,王彦飞,江豪,等. 圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103006.

- Wang X Y, Wang Y F, Jiang H, et al. Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0103006.
- [7] Milewski J O, Lewis G K, Thoma D J, et al. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 75(1/2/3): 165-172.
- [8] Frazier W E. Metal additive manufacturing: a review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [9] 王明雨,石世宏,石拓,等. 基于光内送粉多元扭曲结构的随形离散分层成形研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002114.  
Wang M Y, Shi S H, Shi T, et al. Conformal discrete layering of multivariant twisted structure based on inside-laser powder feeding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002114.
- [10] 王宇,石拓,石世宏,等. 弧面扭曲结构件激光内送粉熔覆成形研究[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202015.  
Wang Y, Shi T, Shi S H, et al. Inside-laser powder feeding cladding forming of arc-shaped twisted structural parts [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202015.
- [11] 张荣伟,万乐,石拓,等. 薄壁空心球体的多自由度随形激光熔化沉积制备工艺与精度[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202018.  
Zhang R W, Wan L, Shi T, et al. Multi-degree of freedom conformal laser metal deposition process and precision of thin-walled hollow sphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202018.
- [12] Dwivedi R, Kovacevic R. An expert system for generation of machine inputs for laser-based multi-directional metal deposition [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14): 1811-1822.
- [13] Wu X, Mei J. Near net shape manufacturing of components using direct laser fabrication technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2/3): 266-270.
- [14] Griffith M L, Keicher D M, Atwood C L, et al. Freeform fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)[EB/OL]. [2021-02-06]. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/69929>.
- [15] 钱远宏,谭华,黄卫东. 倾斜基体表面激光立体成形沉积特性研究[J]. 应用激光, 2015, 35(1): 53-57.  
Qian Y H, Tan H, Huang W D. The deposition morphology of laser solid forming on the inclined surface[J]. Applied Laser, 2015, 35(1): 53-57.
- [16] Shi S H, Fu G Y, Wang A J, et al. Laser processing forming and manufacturing intra-light powder feeding process and optical powder feeding nozzle: 200610116413.1[P]. 2016-12-01.
- [17] 石世宏,王晨,徐爱琴,等. 基于环形光内送粉激光熔覆温度场的数值模拟[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303002.  
Shi S H, Wang C, Xu A Q, et al. Temperature field numerical simulation of laser cladding based on internal powder feeding through a hollow laser beam[J]. Chinese Journal of Lasers,

- 2012, 39(3): 0303002.
- [18] Wan L, Shi S H, Xia Z X, et al. Directed energy deposition of CNTs/AlSi10Mg nanocomposites: powder preparation, temperature field, forming, and properties[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106984.
- [19] 万乐, 石世宏, 夏志新, 等. 激光预热/流体冷却辅助激光金属沉积 AlSi10Mg 成形 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 20200365.  
Wan L, Shi S H, Xia Z X, et al. Laser preheating/fluid cooling assisted deposition of AlSi10Mg [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200365.
- [20] 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.  
Shi T, Wang Y Q, Lu B H, et al. Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1003003.
- [21] 杨轼, 石世宏, 傅戈雁, 等. 中空环形激光离焦量对熔道凹凸缺陷自愈合效应的影响 [J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0503002.  
Yang S, Shi S H, Fu G Y, et al. Impact of hollow ring laser defocused amount on melting channel bump defect self healing effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0503002.

## Research on Continuous Gradual Slicing of Twisted Variable Cross-Section Structure through Inside-Laser Powder Feeding by Laser Melting Deposition

Jin Lei<sup>1</sup>, Shi Shihong<sup>1\*</sup>, Shi Tuo<sup>2\*\*</sup>, Wei Chao<sup>1</sup>, Zhang Rongwei<sup>1</sup>, Zhang Qi<sup>1</sup>, Wang Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laser Additive Manufacturing Research Center, School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

### Abstract

**Objective** Many structural components, such as twisted variable cross-section structures, are used extensively in various industries, including aerospace, biomedical devices, ocean machinery, or other fields, such as marine propellers and combustor chambers of jet engines. Most parts have geometric characteristics, such as large-angle twists, large-angle bends, and spatial gradient-change cross-section structures. Under some working conditions and application requirements, the abovementioned twisted variable cross-section structure parts are difficult to process using conventional subtractive manufacturing techniques, such as the casting and milling processes. Using powder-feeding metal additive manufacturing, such as laser melting deposition (LMD) technology, can effectively avoid this problem and achieve excellent precision and near-net shaping of complex structure parts without a physical model. There have recently been a few reports on the route planning for this type of geometric characteristics structure in the field of laser melting deposition technology, both at home and abroad. Thus, a continuous gradual slicing and discrete method is proposed to obtain the route information and complete the forming.

**Methods** The typical horizontal slicing can no longer meet the forming needs of the abovementioned structure, given that the structure sections examined in this research exhibit spatial geometric characteristics of large twist angles, large bending angles, and spatial gradient-change cross-section structures. A continuous gradual slicing and discrete method was proposed to layer, slice, and separate the forming parts to realize laser metal deposition forming of this structure. The original three-dimensional model is first constructed and segmented using the aforementioned procedure. The six-axis KUKA robotic arms can then be equipped with position and posture data. Finally, multiple experiments were performed to obtain the best forming process parameters and excellent forming parts. After the forming experiment, the geometric parameters of the formed part are measured based on model analysis, and three points along the deposition angle are selected for cutting and sampling.

**Results and Discussions** The continuous gradual slicing method is proposed to complete the layering of twisted variable cross-section structure parts, and discrete deposition units with different geometric characteristics are obtained [Fig. 7(a)]. The homogeneous transformation matrix is obtained by rotating each deposition discrete unit as a point in the base coordinate and tool base coordinate systems. Thus, its position and posture information is determined (Fig. 9). According to the information above, the deposition units with different spatial orientation information (Fig. 10) are spliced horizontally to gain the actual deposition track. In the forming stage, a powder-feeding head and six-axis robot were used to achieve the twisted variable cross-section structure parts.

**Conclusions** A continuous gradual layering method is proposed that is based on the inside-laser powder-feeding technology and the principle of laser metal deposition; the twisted variable cross-section structure is sliced according to its geometric characteristics, and the sliced layer and deposition units are successfully obtained. The layering problem of the twisted variable cross-section structure is solved, and the laser metal deposition accumulation of the twisted variable

cross-section structure is also realized. The results of the formed parts are as follows: the formed part has a high surface smoothness and forming accuracy; the bending angle and torsion angle of the formed parts are  $46.18^\circ$  and  $44.79^\circ$ , and the errors with the original design angle are  $2.62\%$  and  $-0.47\%$ , respectively; the diameter of the initial circular section and the side length of the end square section of the formed part are 59.63 mm and 60.72 mm respectively, and the errors with the original design size are  $-0.62\%$  and  $1.20\%$ . There are no obvious defects, such as pores and cracks, on the formed part's surface, and each formed part's structure is dense and uniform. Finally, the continuous gradual layering forming technique effectively improves the forming ability of LMD technology for the twisted variable cross-section structure parts. This provides support for its wider application in the additive manufacturing field.

**Key words** laser technique; laser melting deposition; twisted variable cross-section structure; continuous gradual slicing; path planning