

# 变截面薄壁空心弯扭结构件激光熔化沉积成形工艺与精度研究

蔡家轩<sup>1</sup>, 石拓<sup>2\*</sup>, 石世宏<sup>1</sup>, 张荣伟<sup>1</sup>, 刘广<sup>1</sup>, 王宇<sup>1</sup>, 庄锐<sup>1</sup>

(1. 苏州大学机电工程学院激光制造技术研究所, 江苏苏州 215021;

2. 苏州大学光电科学与工程学院, 江苏苏州 215006)

**摘要:** 基于光内送粉激光熔化沉积 (laser melting deposition, LMD) 技术, 研究变截面薄壁空心弯扭结构件的成形工艺。针对该类复杂结构件成形轨迹规划的难点, 提出空间轨迹单元离散分层法对结构件进行分层并生成离散沉积单元, 按设计的路径进行每个离散沉积单元的沉积。针对在实际成形过程中由于机械臂采用线段单元拟合的方式实现光滑曲线运动导致的误差, 提出空间变姿态基点偏移补偿技术, 对成形过程中实际姿态变化基点的位置偏移进行补偿, 以此实现对尺寸误差的有效控制。最终实现变截面薄壁空心弯扭结构件的激光熔化沉积成形, 成形所得结构件尺寸精度较高, 形状尺寸误差在-0.44%~1.83%之间, 结构件平均厚度在 5.9~6.19 mm 之间, 结构件显微硬度在 269~282.2 HV 之间, 结构件表面和内部皆致密均匀, 无明显的气孔、裂缝等缺陷。

**关键词:** 激光熔化沉积; 变截面弯扭结构; 离散分层; 基点偏移补偿; 尺寸精度

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220436

## 0 引言

变截面薄壁空心弯扭结构件在航空航天、机械、船舶等领域具有广泛应用, 如螺旋桨结构、汽轮机中的空心叶片等<sup>[1]</sup>, 该类零件一般具有扭曲悬垂、截面自由变化等特征, 它的型面为进行弯扭的变截面, 属于较为复杂的自由曲面, 生产应用中对其几何精度要求高。传统上多以数控铣削、精密铸造、特种加工等加工方式为主<sup>[2]</sup>, 但这些加工方式存在材料利用率低、生产周期长和加工成本高等问题, 且在某些场合下无法达到实际使用要求。激光熔化沉积 (laser melting deposition, LMD) 技术是一种新型的快速成形技术<sup>[3-4]</sup>, 具有成形零件结构复杂、无模具近净成形、工艺制程简单等优点。文中基于光内送粉 LMD 技术, 对变截面薄壁空心弯扭结构件的激光熔化沉积展开研究。

王聪<sup>[5]</sup>等建立了高度工艺参数模型, 将熔覆层的

截面形状与工艺参数对应, 成形了具有大扭转角的薄壁件。Rajeev Dwivedi 等<sup>[6]</sup>基于人工智能直接从模型制造结构件, 实现了激光成形的自动化, 成形得到简单的扭曲叶轮。石龙飞等<sup>[7]</sup>采用激光近净成形技术, 使用特制的软件分析得到成形路径的程序, 成形了单个三元叶片, 但表面阶梯效应明显。石拓等<sup>[8]</sup>采用法向分层方法, 利用喷头连续变姿态, 成形了倾斜角从 0° 逐渐变化至 81° 的悬垂薄壁件。王明雨等<sup>[9]</sup>基于法向分层提出随形离散分层法, 解决了具有截面多方向扭曲的结构件的成形路径规划问题, 实现了多元扭曲结构件的堆积。

目前, 国内外对变截面弯扭结构件的成形多以等截面扭转为主, 而对于在空间中变截面且发生弯扭的结构件鲜有报道。变截面薄壁空心弯扭结构件在空间呈现三维扭曲状, 具有扭曲悬垂、截面自由变化等特征, 文中基于光内送粉 LMD 技术, 提出空间轨迹单

收稿日期: 2022-06-23; 修订日期: 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金 (62173239, 61903268)

作者简介: 蔡家轩, 男, 硕士生, 主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。

导师简介: 石世宏, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光快速成形方面的研究。

通讯作者: 石拓, 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光快速成形方面的研究。

元离散分层法完成成形轨迹规划,空间变姿态基点偏移补偿技术对实际姿态变化基点的位置偏移进行补偿,最终实现了变截面弯扭结构件的 LMD 成形并有效控制了尺寸误差。

## 1 实验材料及设备

### 1.1 实验材料

实验基板采用 304 不锈钢,经砂纸打磨、无水乙醇清洗等预处理后进行实验,其化学成分及其含量如表 1 所示。

表 1 304 不锈钢的化学成分及其含量 (质量分数, wt.%)

Tab.1 Chemical compositions and content of 304 stainless steel (mass fraction, wt.%)

Composition	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Fe
Content	0.07	2.00	0.05	0.03	0.08	17.50-19.50	8.00-10.50	0.10	Bal.

成形材料选用 Fe314 金属粉末,粉末粒度为 50~119  $\mu\text{m}$ ,其化学成分及其含量如表 2 所示。

表 2 Fe314 合金粉末的化学成分及其含量 (质量分数, wt.%)

Tab.2 Chemical compositions and content of Fe314 alloy powder(mass fraction, wt.%)

Composition	C	Si	Ni	Cr	B	Fe
Content	0.1	1.0	1.0	15.0	1.0	Bal.

### 1.2 实验设备

实验采用德国 GTV 公司的 GTV PF2/2 型送粉器、中空环形光内送粉熔覆喷头、锐科 RFL-C6000W 激光器,运动装置由六轴 KUKA 机械手臂和附加旋转工作台组成,所用载粉气和保护气皆为氮气。其中,中空环形光内送粉喷头为实验室自主研发<sup>[10]</sup>,其原理如图 1 所示,采用圆锥镜和环形剖面镜将实心光束转化为中空环形光束,送粉管位于熔覆喷头(图 2)中轴线上,与激光束同轴,准直保护气包裹送粉管<sup>[11-12]</sup>。载气、准直气和保护气的共同作用极大减小了重力对粉末颗粒运动轨迹的影响,使光内送粉激光熔覆喷头具有优异的集束性,光粉气达到精准耦合。因此,相比于传统的光外送粉熔覆,光内送粉不仅提高了粉末

利用率且可实现在空间任意角度的熔覆,能够满足文中实验变截面薄壁空心弯扭结构件的成形需求。

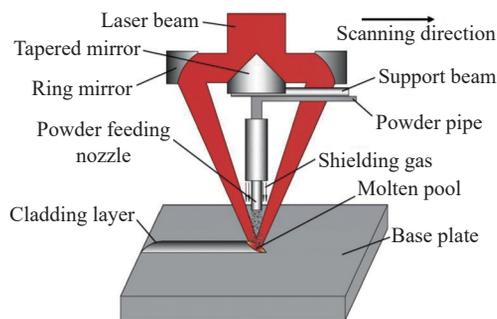


图 1 中空环形光内送粉原理图

Fig.1 Principle diagram of hollow ring power feeding in laser



图 2 光内送粉熔覆喷头实物图

Fig.2 Physical drawing of powder feeding cladding nozzle in laser

## 2 实验方法

### 2.1 结构件几何模型

实验基于汽轮机的空心叶片,设计堆积一个变截面薄壁空心弯扭结构件,其模型图如图 3 所示,由结构件的形状特点可知,它具有大角度扭曲悬垂、截面变化等特征,型面为进行弯扭的变截面。该结构件横截面的中心线  $L$  为一道半径  $R=30\text{ mm}$ ,圆心角  $\theta_1=30^\circ$  的弧线,即截面具有弯曲的特征,上下端面存在相对扭转角  $\theta_2=60^\circ$ ,即截面具有扭转的特征,上下端面为尺寸不同的椭圆形,即截面具有不断变化的特征,整体壁厚为 6 mm。该结构件是一个以尺寸不断变化的椭圆为截面,并伴随着截面间的相对扭转,且以中

心线弧线为弯曲生长路径,完成成形的变截面薄壁空心弯扭结构件。

### 2.2 结构件空间轨迹单元离散分层法

在传统的激光熔化沉积成形过程中,喷头一般保持竖直状态在水平面上进行运动,但是此方法仅适用于成形无悬垂特征的结构件,在成形有悬垂特征的结构件时,见图 3(a),随着角度的增大,层与层之间的错位会发生累积,最终导致“漏光”,无法完成成形且已成形成表面粗糙度较大。

苏州大学石拓等<sup>[8]</sup>提出法向分层方法,如图 4(b)所示,对结构件沿着形状轮廓进行法向分层,喷头轴线始终与基体表面轴线方向一致,并不断跟随变化,该方法使得相邻沉积层间没有错位,有效解决了使用水平分层法带来的因错位分层引起的台阶效应,提高了结构件的表面精度,且能够成形一些较为简单的悬垂结构和倾斜面。

变截面弯扭结构件在空间呈现三维扭曲状,具有大角度扭曲悬垂、截面变化等特征,截面的形状随弯曲的中心弧线  $L$  连续渐变,如图 5 所示。为了实现该结构件的成形,文中基于上述分析的法向分层原理,

提出空间轨迹单元离散分层法对该变截面弯扭结构件进行分层,其具体步骤如下:

(1) 如图 5(a) 所示,以截面椭圆为基准,根据该结构件的形状特点,将结构件分为  $P_1$  和  $P_2$  两个部分进行分层,即以椭圆端点为始末点将截面等弧长分割成相同的两个部分,且两端面对应的弧的端点在不弯扭变化时的垂直投影是重合的;

(2) 如图 5(b) 所示,取  $P_1$  部分的中心弧线  $L_1$ ,沿  $L_1$  作法向切片得切片  $m_j$ ,沿  $L_1$  纵向作等圆心角分割并相对扭转得切片层  $n_j$ ,相邻切片之间的弯曲角为  $\Delta\theta_1$ ,相对扭转角为  $\Delta\theta_2$ ;

(3) 如图 5(c) 所示,对步骤 (2) 所得切片沿沉积轨迹进行空间轨迹单元离散分层,得具有不同方位特征的离散沉积单元  $E_{nk}$ ,用各部分离散单元上下底面的中心连线来表示该离散沉积单元的方向向量,向量的长度为该单元的高度,向量的倾角为该单元的倾角。离散单元在同一熔覆层内高度保持一致,在相邻沉积层之间的离散单元  $E_{n(k-1)}$  和  $E_{nk}$  呈错位分布,各离散单元的倾角成等角度线性变化,将层内离散单元横向拼接即为该段边线的喷头沉积的实际路径,纵向拼接

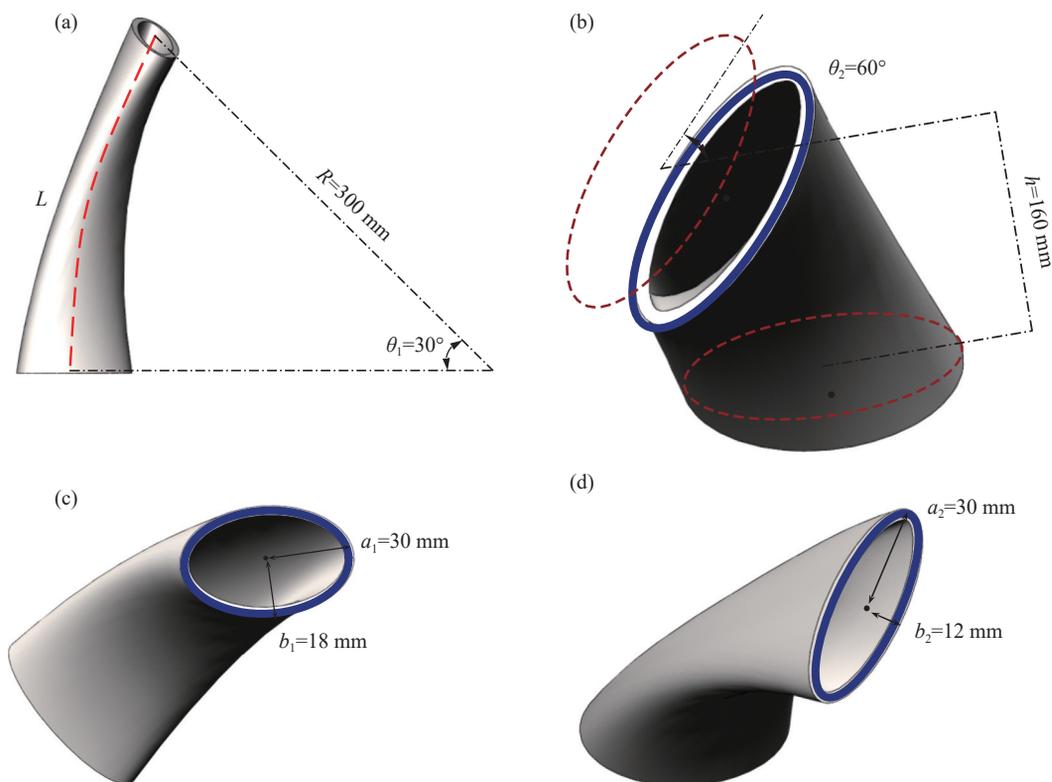


图 3 结构件几何模型。(a) 轴测图; (b) 端面扭转示意图; (c) 底端面; (d) 顶端面

Fig.3 Geometric model of frame member. (a) Axonometric drawing; (b) Schematic diagram of end face torsion; (c) Bottom end face; (d) Top end face

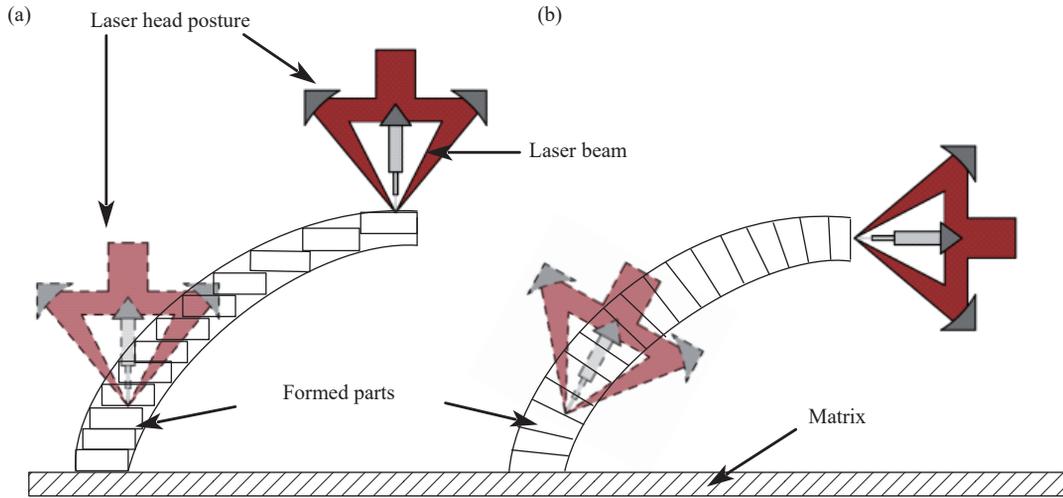


图 4 不同方式激光熔化沉积示意图。(a) 水平分层示意图; (b) 法向分层示意图

Fig.4 Schematic diagram of laser melting deposition with different ways. (a) Diagram of horizontal layers; (b) Diagram of normal layers

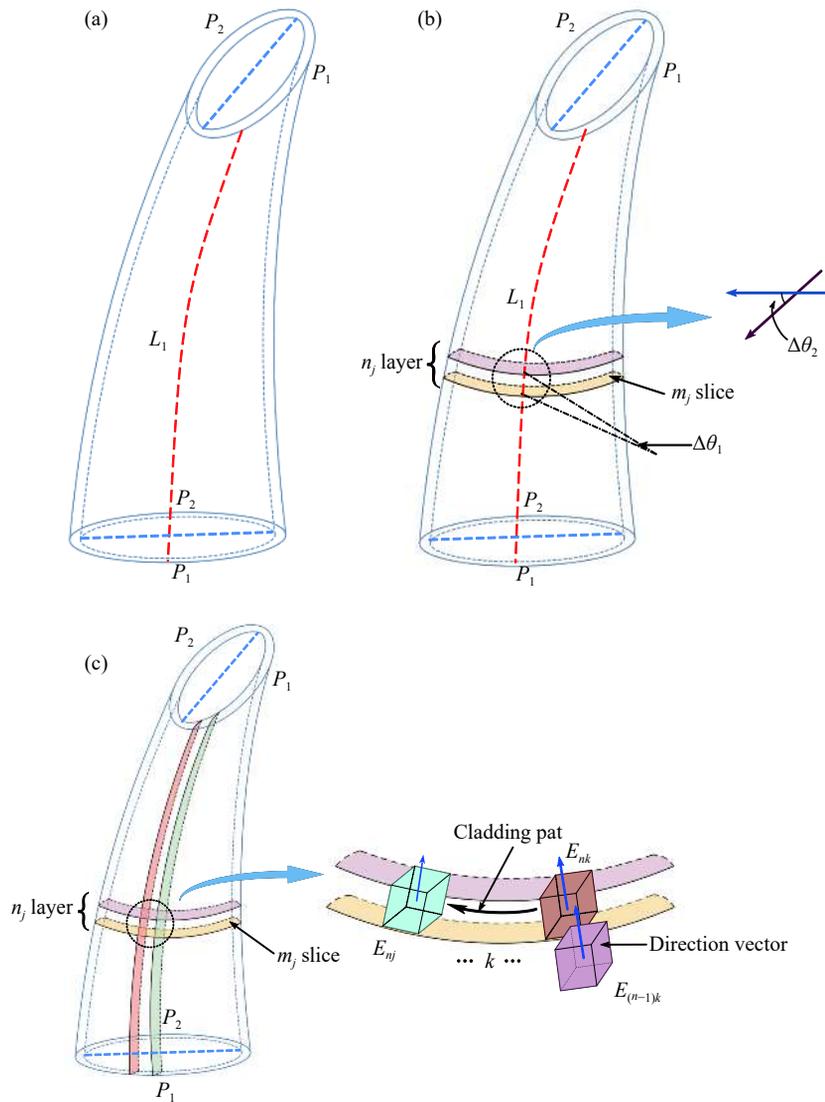


图 5 结构件分层方法。(a) 将结构件划分为两部分; (b) 获取切片层; (c) 离散沉积单元

Fig.5 Method of layering frame members. (a) The structural member is divided into two parts; (b) Getting slice layer; (c) Discretizing sedimentary unit

为层间结构件的生长方向,与整个结构件的中心弧线  $L$  的切线方向是一致的;

(4) 对  $P_2$  重复前两个步骤,并进行封闭拼接,拼接点即为椭圆截面的分割点。变截面弯扭结构件具有扭转和悬垂的特征,因此相邻切片层的内外侧的高度不同,分层得到的离散沉积单元的高度也不同,将相邻切片层按等圆心角拼接便能够得到整个结构件的分层信息。

根据空间轨迹单元离散分层法的原理可知,获得和计算每个离散沉积单元的位置和方向信息,便可获得喷头进行沉积时环形光斑的运动轨迹,按设计的路径完成每个离散沉积单元的沉积,即可完成对整个结构件的沉积。

如图 6 所示,在结构件的沉积过程中,喷头的环形光斑所在的工具坐标系相对于基体所在的基坐标系发生平移和旋转。以变截面弯扭结构件的中心轴线  $L$  与基板的交点为原点建立基面坐标系  $C_1$ ,其  $x$  轴与喷头沉积的第一层沉积的单道的方向一致, $z$  轴垂直于基体平面,以喷头光斑中心点为原点,建立工具坐标系  $C_i$ ,其初始  $z$  轴与基面坐标系的  $z$  轴重合。

前文通过空间轨迹单元离散分层法所得到的离散沉积单元,可视作坐标系中具有方向信息和大小信息的某点,每个离散沉积单元都有一个相对于基面坐

标系  $C_1$  作变换的工具坐标系  $C_i$ , $C_i$  相对于  $C_1$  做平移变换和旋转变换,故两个坐标系间的空间位置表示关系可以用齐次变换矩阵  $M_{1n(k)}$  表示,则在第  $n$  层切片后,其第  $n$  层沉积层的第  $k$  个离散沉积单元的工具坐标系  $C_{n(k)}$  相对于基面坐标系  $C_1$  作了  $n-1$  次的位置变换,此时齐次变换矩阵  $M_{1n(k)}$  为:

$$M_{1n(k)} = M_{12} \cdot M_{23} \cdots M_{(i-1)i} = \begin{pmatrix} R_{1n(k)} & 0 \\ T_{1n(k)} & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:  $T_{1n(k)}$ 、 $R_{1n(k)}$  分别描述了第  $n$  层沉积层的第  $k$  个离散沉积单元的工具坐标系  $C_{n(k)}$  相对于基面坐标系  $C_1$  所作的平移、旋转变换,由此可计算出各切片层平面相对基面坐标系的空间位置及方向信息,转化为  $T_{1n(k)}$ 、 $R_{1n(k)}$ ,代入齐次变换矩阵  $M_{1n(k)}$ ,控制喷头作相应的运动变换即可实现变截面弯扭结构件的成形,以  $P_1$  部分为例,每层叶片的轨迹信息获取步骤如下(示意图见图 6):

(1) 将工具坐标系  $C_1$  沿  $OO_1$  向量平移到第  $n$  层沉积层第  $k$  个离散单元点  $P$ ,得到工具坐标系  $C_2$ ;

(2) 将工具坐标系  $C_2$  绕着自身的  $x$  轴旋转  $n \cdot \Delta\theta_1$  度得到工具坐标系  $C_3$ ,此时工具坐标系  $C_3$  的  $z$  轴与中心线  $L_1$  在点  $P$  处的切线共线,其中  $\Delta\theta_1$  为每层沉积层对应的旋转角度,记  $\alpha = n \cdot \Delta\theta_1$ ;

(3) 将  $C_3$  坐标系绕着自身的  $z$  轴旋转  $n \cdot \Delta\theta_2$  个扭转角得到工具坐标系  $C_4$ ,此时  $C_4$  坐标系的  $x$  轴即为光斑的运动方向,其中  $\Delta\theta_2$  为每层沉积层对应的旋转角度,记  $\beta = n \cdot \Delta\theta_2$ 。

$P_2$  部分同样如此,结合后得出,该弯扭结构件在第  $n$  层沉积层第  $k$  个单元的工具坐标系  $C_{n(k)}$  相对于基面坐标系  $C_1$  的齐次变换矩阵为:

$$M_{1n(k)} = M_{12} \cdot M_{23} \cdot M_{34} \quad (2)$$

式中:

$$M_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, M_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$M_{34} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\text{其中} \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ R \cdot (1 - \cos \alpha) \\ R \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}.$$

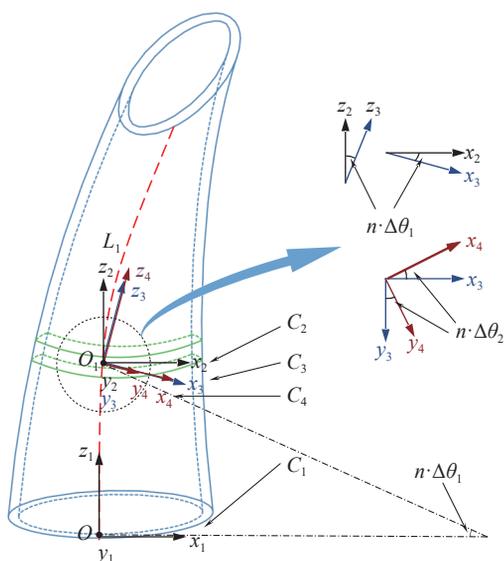


图 6 基面坐标系和工具坐标系变换过程

Fig.6 Transformation process of base coordinate system and tool coordinate system

据上,得到所有切片层内的每个离散沉积单元的  $T_{1n(k)}$  和  $R_{1n(k)}$ , 即可得到喷头的平移和旋转变换信息, 由公式 (2) 计算出工具坐标系  $C_{n(k)}$  相对于基面坐标系  $C_1$  的齐次变换矩阵  $M_{1n(k)}$ , 获得喷头在进行工作时运动的位置和方向信息, 即空间运动轨迹信息, 喷头按照轨迹信息在离散单元之间均匀过渡, 完成每层沉积层的沉积, 直至完成整个变截面弯扭结构件的成形。

### 2.3 空间变姿态基点偏移补偿技术

采用空间轨迹单元离散分层法进行变截面弯扭结构件的分层和沉积成形的过程中, KUKA 机械臂需要不断地变化自身所处的姿态以适应变截面弯扭结构件的形状特点, 该姿态信息包括结构件成形时的扫描路径信息和喷头在工作时的姿态信息<sup>[13-14]</sup>。

结构件成形时的扫描路径信息由 2.2 节提出的空间轨迹单元离散分层法可以获得, 而喷头在工作时的姿态是由 KUKA 机械臂进行控制的, KUKA 机械臂采用了一种路径角度连续变化过渡的方法, 采用多段变角度直线进行拟合得到曲线, 实际运动路径直线的角度不断发生变化, 每段直线对应喷头的的一个变化角度, 将这些直线进行拟合, 便能得到喷头在工作时的姿态信息。

如图 7 所示, 在成形一个半径为  $R$  弧面时, 以  $\alpha$  为单位角度将圆弧等分成数段, 用每等分段的弦来拟合圆弧, 每段弦长为  $L$ 。如图可知, 每段弦长  $L$  越小,  $\alpha$  的数目越多, 值越小, 拟合所得到的弧的误差越小。当  $\alpha$  较小时, 可以近似圆弧  $l$  为:

$$l \approx L = 2R \cdot \sin(\alpha/2) \quad (3)$$

由于变截面弯扭结构件具有大角度的弯曲和扭转的特征, 喷头在进行该结构件的分层和沉积过程

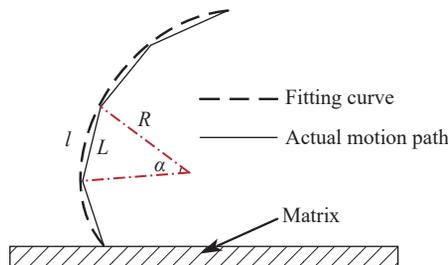


图 7 喷头曲线运动路径拟合示意图

Fig.7 Schematic diagram of curve motion path fitting of nozzle

中, 其姿态也需进行如此的角度变化。文中实验的喷头的角度变化是通过 KUKA 机械臂绕坐标基点 (工具坐标系原点) 进行旋转来实现的, 该基点即为姿态变换基点。实验要求喷头进行姿态变化后, 激光的光斑直径需要与已成形的沉积层保持一致, 否则便会出现错位而造成阶梯状的凸点, 导致成形所得结构件的表面粗糙度变大, 长期积累甚至出现“漏光”导致沉积终止。

每层的姿态变化基点应该是固定的, 通常为某一固定离焦距的位置, 但在成形过程中, 随着沉积层数及截面弯扭角度的增加, 结构件截面的尺寸发生明显变化, KUKA 机械臂采用的线段单元拟合的方式实现光滑曲线运动使得喷头姿态变化基点的位置产生误差<sup>[15]</sup>, 所成形的沉积层的高度和喷头的提升量不适应, 导致实际离焦量与设定的离焦量有误差, 但机械臂在沉积的过程中无法自动判断激光光斑的位置并进行调整, 导致出现成形误差。

如图 8(a) 所示, 喷头在沉积完第  $n$  层后, 需要变化角度进行第  $n+1$  层的沉积, 但由于上述问题, 在沉积完  $n$  层后, 误差累积导致本应在  $O_1$  处的姿态变化

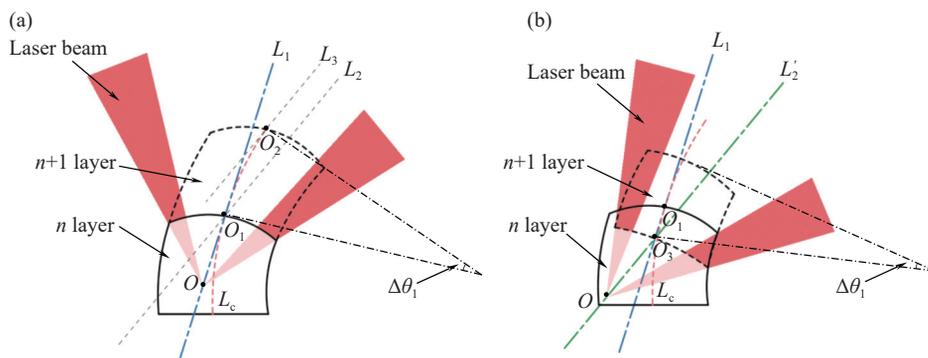


图 8 补偿前喷头光斑位置示意图。(a) 完成第  $n$  层沉积; (b) 姿态变化基点偏移

Fig.8 Schematic diagram of nozzle spot position before compensation. (a) Completing the deposition of the  $n$ th layer; (b) Attitude change base point offset

基点偏移至  $O_3$  喷头的光束轴线由  $L_1$  旋转至  $L_2$  处, 如图 8(b) 所示, 喷头的光斑不能完成全覆盖第  $n$  层沉积层, 导致层间沉积层出现错位而造成阶梯状的凸点, 因此, 需要计算  $O_1$  和  $O_3$  间的相对位置, 在喷头光束轴线进行旋转前对姿态变化基点的位置进行补偿。

计算  $O_1$  和  $O_3$  间的相对位置, 示意图见图 9(a), 喷头的初始光束轴线  $L_1$  与竖直方向夹角为  $\alpha$ ,  $L_1$  变化至  $L_2$  处的角度变化为  $\beta$ , 理论姿态变化基点  $O_1$  与实际姿态变化基点  $O_3$  间的距离为  $\Delta d$ , 即姿态变化基点

的偏移量, 将该偏移量沿  $y$  轴和  $z$  轴方向进行分解, 通过几何计算得偏移量  $\Delta y$  和  $\Delta z$  分别为:

$$\Delta y = 2\Delta d \cdot \sin(\beta/2) \cdot \cos(\alpha + \beta/2) \quad (4)$$

$$\Delta z = 2\Delta d \cdot \sin(\beta/2) \cdot \sin(\alpha + \beta/2) \quad (5)$$

在完成第  $n$  层的沉积后, 在程序中运行公式 (4)、(5) 对应的变化, 将实际姿态变化基点的位置调整至  $O_1$  处, 如图 9(b) 所示, 即可有效地实现对喷头姿态变化基点位置的补偿, 实现自动调整控制。

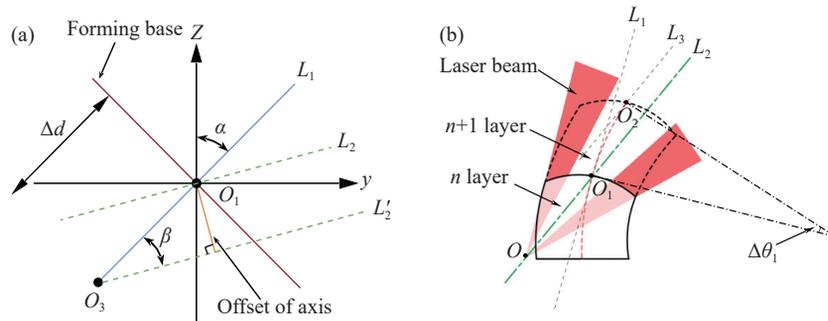


图 9 补偿调整示意图。(a) 变姿态基点偏移几何示意图; (b) 补偿后喷头光斑位置示意图

Fig.9 Schematic diagram of compensation adjustment. (a) Geometric schematic diagram of variable attitude base point offset; (b) Schematic diagram of nozzle spot position after compensation

如图 10(a) 所示, 在完成喷头姿态变化基点位置补偿和喷头姿态变化后, 喷头的光束轴线由  $L_1$  变化至  $L_2$ , 与图 9(b) 中第  $n+1$  层沉积层表面中心线  $L_3$  平行, 通过第  $n$  层沉积层表面中心点  $O_1$ , 保证了喷头光斑能够完全覆盖沉积的第  $n$  层沉积层表面弧  $\widehat{aO_1c}$ , 且结构件中心线  $L_c$  上的离焦量不变。

由于实验拟成形的变截面弯扭结构件具有大角

度扭曲悬垂、截面变化等特征, 且采用空间轨迹单元离散分层法进行分层, 结构件的每一层外侧的体积大于内侧体积, 见图 10(a), 截面面积  $S_{abo2O_1} > S_{cdo2O_1}$ , 因此在进行沉积时, 工艺上要求在完成第  $n$  层沉积, 进行喷头姿态变化后, 熔道生长量体积的外侧需要大于内侧。如图 10(a) 所示,  $L_4$  是过点  $O_1$  的等离焦量线, 由图可知, 离焦量  $c > O_1 > a$ , 因此能量密度  $E_a > E_{O_1} > E_c$ , 在

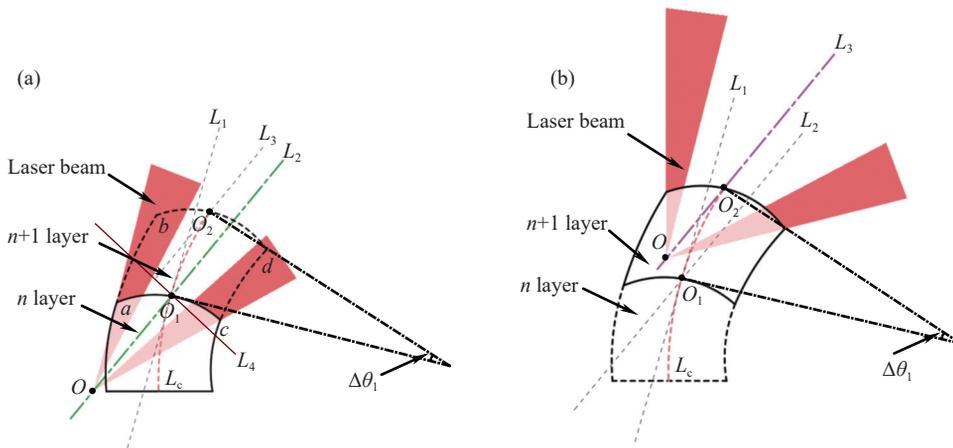


图 10 沉积层空间变角度生长示意图。(a) 沉积层生长过程; (b) 完成第  $n+1$  层沉积

Fig.10 Schematic diagram of spatial variable angle growth of sedimentary layer. (a) Growth process of sedimentary layer; (b) Completing the deposition of layer  $n+1$

送粉器送粉充足的情况下, 沉积层生长量应该  $a > O_1 > c$ , 满足熔道生长量体积的外侧需要大于内侧的工艺需求。

图 10(b) 所示为完成第  $n+1$  层的沉积后的状态, 重复上述步骤, 即可完成变截面弯扭构件的高精度沉积。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 结构件堆积

实验基于笔者团队实验室自主研发的光内送粉沉积喷头, 根据文中提出的空间轨迹单元离散分层法

对结构件进行切片, 将计算得到的离散沉积单元的方位特征信息赋给 KUKA 机械臂的计算机进行处理, 使用 KRL 程序语言中的几何操作命令将离散单元的工具坐标系与基面坐标系相关联, 最终获得该变截面弯扭结构件的成形轨迹程序, 并在程序中应用文中提出的空间变姿态基点偏移补偿技术, 对实际姿态变化基点的位置偏移进行补偿, 提升成形精度。该多元弯扭结构件的激光熔化沉积成形过程如图 11 所示, 其中图 11(a) 的成形过程由于未使用空间变姿态基点偏移补偿技术, 误差不断累积, 造成了“漏光”现象, 最终导致成形的终止。

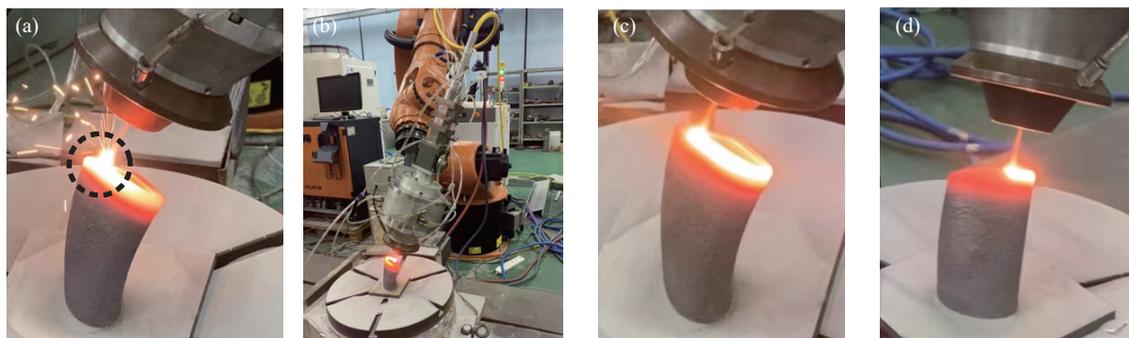


图 11 成形过程。(a)“漏光现象”;(b)成形过程全景图;(c)成形过程正视图;(d)成形过程侧视图

Fig.11 Forming process. (a) "Laser leakage"; (b) Panorama of forming process; (c) Front view of forming process; (d) Side view of forming process

实验过程中, 将结构件分为 200 层进行成形<sup>[16]</sup>, 使用的激光初始功率为 4 000 W, 到第 20 层降低至 2 100 W, 每层降低 85 W, 扫描线速度为外侧 7.8 mm/s, 内侧 7.2 mm/s, 离焦量为 -8.5 mm, 送粉量为 45 g/min, 每层的提升量  $\Delta h=0.8$  mm。其中, 在计算空间变姿态基点偏移补偿数据时, 理论姿态变换基点  $O_1$  和实际姿态变换基点  $O_3$  之间的距离  $\Delta d=\Delta h/3$ , 喷头的初始光束轴线  $L_1$  与竖直方向夹角为  $\alpha$  值为  $n \cdot 0.15^\circ$ ,  $L_1$  变化至  $L_2$  处的角度变化  $\beta$  为  $0.15^\circ$ , 将这些数据代入公式 (4)、(5) 即可得到在进行每层的沉积前需要调整的偏移量  $\Delta y$  和  $\Delta z$  的值。

#### 3.2 结构件检测

##### 3.2.1 尺寸误差分析

文中提出并应用空间轨迹单元离散分层法和空间变姿态基点偏移补偿技术, 分别对变截面薄壁空心弯扭结构件的成形进行轨迹规划和尺寸误差控制, 故该节对沉积完成的结构件进行尺寸误差分析<sup>[17]</sup>, 成形所得结构件实物图如图 12 所示。

将未使用空间变姿态基点偏移补偿技术成形的结构件与使用了该技术成形的结构件进行对比, 如图 13(a) 所示, 未使用补偿技术时成形的结构件在成形过程中, 喷头的实际姿态变化基点发生了偏移, 随着沉积层数的增加, 偏移量  $\Delta y$  和  $\Delta z$  的值累积使得成形过程中的“漏光现象”愈发严重, 最终导致成形的终止, 而如图 13(b) 所示, 使用补偿技术成形的结构件尺寸误差明显减少, 最终顺利完成了结构件的成形。

经过测量, 如图 14 所示, 沉积成形得到的结构件下端面尺寸为  $a'_1=30.25$  mm,  $b'_1=17.92$  mm, 上端面尺寸为  $a'_2=30.34$  mm,  $b'_2=12.22$  mm, 与设计尺寸的误差分别为 0.83%、-0.44%、1.13%、1.83%; 中心线  $L=153.5$  mm, 与设计尺寸的误差为 2.22%; 悬垂弯曲角度  $\theta'_1=30.58^\circ$ , 上下端面相对扭转角  $\theta'_2=60.68^\circ$ , 与设计尺寸的误差分别为 1.93% 和 1.13%。由此可见, 该结构件实际成形尺寸与设计尺寸的相对误差较小, 成形形貌较好, 且表面平整无明显气孔或夹杂缺陷。

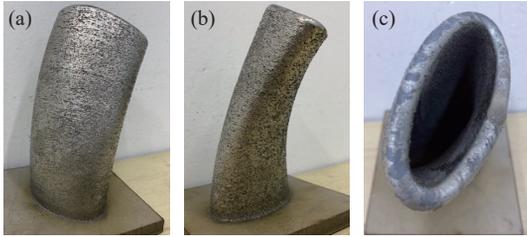


图 12 成形所得结构件实物图

Fig.12 Physical drawing of formed structural parts

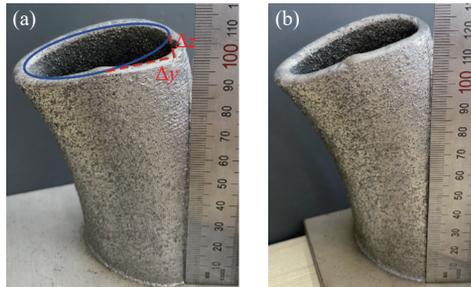


图 13 空间变姿态基点偏移补偿技术使用对比图。(a) 未使用; (b) 已使用

Fig.13 Comparison diagram of space variable attitude base point offset compensation technology. (a) Not used; (b) Used

如图 15 所示,对结构件的壁厚进行测量分析,分别取如图所示的四条路径  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  自下而上的 10 个点处的壁厚进行测量,四条路径上的壁厚分别在 5.9~6.14 mm、5.95~6.17 mm、5.98~6.12 mm、5.92~

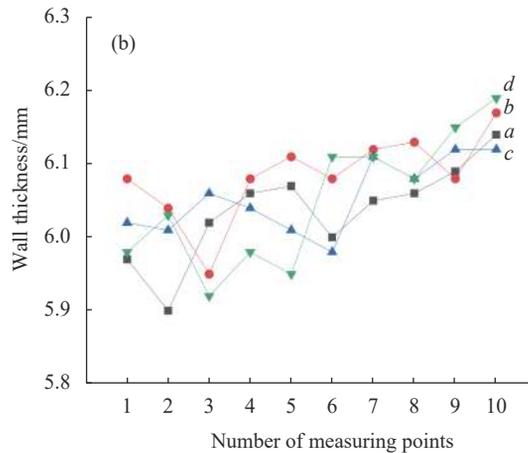


图 15 结构件实际壁厚测量。(a) 测量点取样示意图; (b) 不同位置取样的壁厚

Fig.15 Actual wall thickness measurement of structural members. (a) Sampling diagram of measuring points; (b) Wall thickness sampled at different locations

3.2.3 显微组织分析

对图 16 所示的结构件中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三个位置进行

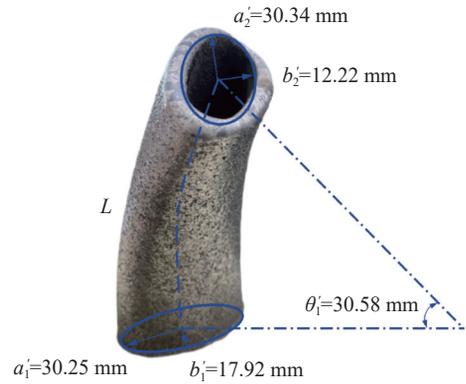


图 14 结构件实际尺寸示意图

Fig.14 Schematic diagram of actual dimensions of structural members

6.19 mm 之间,使用该工艺参数设计的单道理论值为 6 mm,故该结构件的整体壁厚基本保持稳定。

3.2.2 显微硬度分析

如图 16 所示,对该结构件的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三个位置沿着熔覆层的生长方向各选取 10 个测量点进行取样,采用 MH-5 显微硬度计进行显微硬度测量,使用菱形锥头对试样施加压力,加载载荷为 500 g,保压时间为 10 s,通过测量目镜中观察到的菱形压痕对角线长度计算硬度值,并用维氏硬度表示输出结果。结果如图所示,三个取样位置的显微硬度分别在 270.3~280.2 HV、269~282.2 HV、272~280.2 HV 之间,可见该结构件的整体显微硬度基本保持稳定,分布较为均匀。

线切割取样,处理后得到的显微组织图如图 17 所示,可见该结构件内部组织致密均匀,没有明显的气孔、

裂缝等缺陷。各组织部分以树枝晶为主,树枝晶的生长方向即结构件在成形时的散热方向,由于激光熔化沉积成形过程是快速熔化、快速冷却的凝固过程,极大的过冷度导致成形的晶粒细小、组织细密,从图 17

可以看出,区域 2 的组织相较于区域 1 明显更得粗大、疏松,这是因为在成形过程中,在沉积下一层时,当前的沉积层上表面会受到激光的二次加热,导致部分枝晶受到破坏,晶粒粗大。

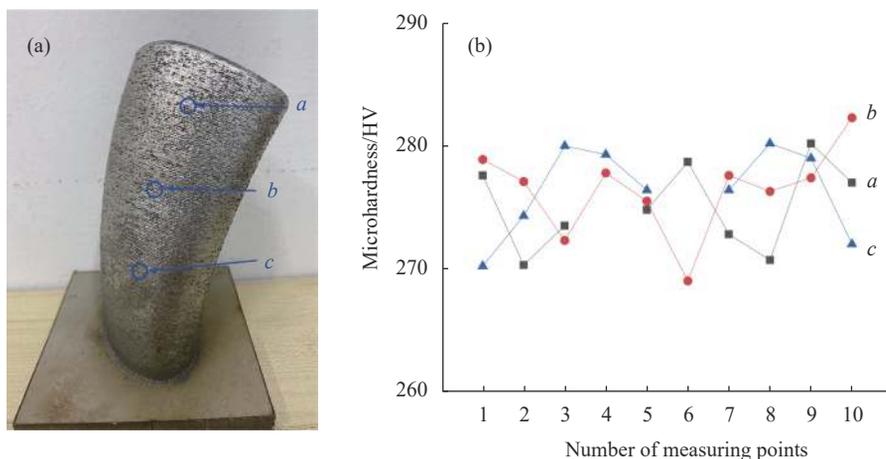


图 16 结构件显微硬度测量。(a) 测量点取样示意图; (b) 不同位置取样的显微硬度

Fig.16 Microhardness measurement of structural parts. (a) Sampling diagram of measuring points; (b) Microhardness of samples taken at different locations

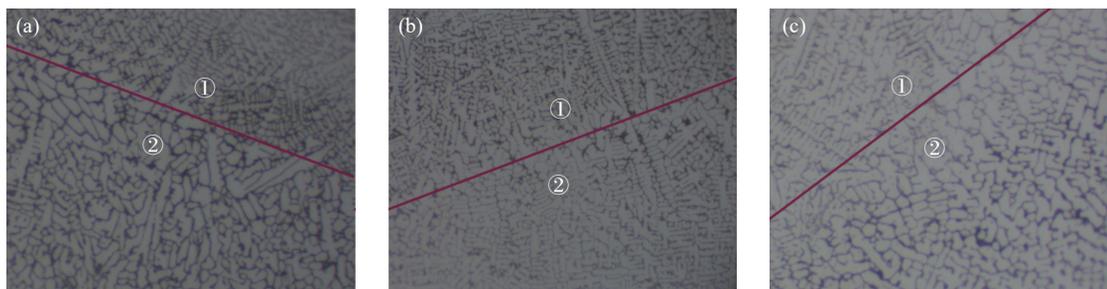


图 17 显微组织图

Fig.17 Microstructure diagram

### 4 结 论

(1) 文中提出了空间轨迹单元离散分层法,通过该方法获得离散沉积单元,以此来记录成形过程中喷头的方向和高度信息,并通过坐标系进行成形轨迹规划,解决了具有扭曲悬垂、截面自由变化等特征的变截面弯扭结构件的分层问题,实现了结构件的稳定成形。

(2) 在控制程序中应用文中提出的空间变姿态基点偏移补偿技术,对喷头的实际姿态变化基点的位置偏移进行补偿,即在进行每层沉积前对偏移量  $\Delta y$  和  $\Delta z$  进行补偿调整,以保证离焦量的一致性,通过该方法有效控制成形尺寸误差,提升成形精度。

(3) 成形所得结构件尺寸精度较高,形状尺寸误差在  $-0.44\% \sim 1.83\%$  之间,结构件平均厚度在  $5.9 \sim 6.19 \text{ mm}$  之间,结构件显微硬度在  $269 \sim 282.2 \text{ HV}$  之间,结构件表面和内部皆致密均匀,无明显的气孔、裂缝等缺陷。

#### 参考文献:

[1] Zhu Y W, Xu J W, Zhao J S. Forming law and experimental study of large twist integral turbine blade by electrochemical generative machining [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006(17): 1778-1783. (in Chinese)

[2] Wei J H, Kuang Y. Research on ceramic shell technology of

- large complex thin wall integral investment casting [J]. *Casting Technology*, 2016, 37(3): 488-491. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] Huang L F, Sun Y N, Wang G J. Research progress of laser cladding high-entropy alloy coating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 59(24): 240003. (in Chinese)
- [5] Wang C, Shi S H, Fang Q Q, et al. Research on laser cladding forming of close-packed multivariant twisty thin-wall parts [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0602004. (in Chinese)
- [6] Rajeev Dwivedi, Radovan Kovacevic. An expert system for generation of machine inputs for laser-based multi-directional metal deposition [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46: 1811-1822.
- [7] Shi Longfei. Experimental study on laser near net shape metal three-dimensional impeller blade [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] Wang M Y. Research on laser cladding forming of multivariate twisted structural parts based on optical powder feeding [D]. Suzhou: Suzhou University, 2021. (in Chinese)
- [10] 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): 79-85. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] Wan L, Shi S, Xia Z R. Directed energy deposition of CNTs/AlSi10Mg nanocomposites: Powder preparation, temperature field, forming, and properties [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106984.
- [13] Yu L L, Shi S H, Di K Y. Research on the laser cladding inclined wall accumulation based on the internal laser coaxial-powder feeding technology [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(3): 264-266. (in Chinese)
- [14] Yu C, Miao Q Y, Shi L F, et al. Experimental research on laser engineered net shaping of thin-walled structures with large inclination angles [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(5): 595-602. (in Chinese)
- [15] Meng W D. Experimental study on space variable attitude laser stacking with optical powder feeding [D]. Suzhou: Soochow University, 2015. (in Chinese)
- [16] Pang Y F, Fu G Y, Wang M Y, et al. Parameter optimization in high deposition rate laser cladding based on response surface method and genetic neural network model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602112. (in Chinese)
- [17] Li D S, Shi T, Shi S H, et al. Laser cladding forming technology of flat-top thin-walled part based on special-shaped base surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102002. (in Chinese)

## Research on laser melting deposition forming process and accuracy of thin-walled hollow bending and torsion structural parts with variable cross-section

Cai Jiakuan<sup>1</sup>, Shi Tuo<sup>2\*</sup>, Shi Shihong<sup>1</sup>, Zhang Rongwei<sup>1</sup>, Liu Guang<sup>1</sup>, Wang Yu<sup>1</sup>, Zhuang Rui<sup>1</sup>

(1. Institute of Laser Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou University, Suzhou 215021, China;

2. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

### Abstract:

**Objective** Variable cross-section thin-walled hollow bending and torsion structural parts have been widely used in aerospace, machinery, shipbuilding and other fields, such as propeller structure, hollow blades in steam

turbines, etc. These parts generally have the characteristics of twisting and overhanging, free change of section, etc. Its profile is a variable cross-section for bending and torsion, belonging to a relatively complex free surface, which requires high geometric accuracy in production and application. Traditionally, CNC milling, precision casting, special machining and other processing methods are mainly used, but these processing methods have problems of low material utilization, long production cycle and high processing costs, and in some cases can not meet the actual use requirements. Laser melting deposition (LMD) technology is a new rapid prototyping technology, which has the advantages of complex structure of forming parts, near net forming without mold, and simple process. Based on the technology of laser melting deposition (LMD), the laser melting deposition of thin-walled hollow bending and torsion structure with variable cross-section is studied in this paper.

**Methods** Variable cross-section thin-walled hollow bending and twisting structural parts are three-dimensionally twisted in space, with the characteristics of twisting, overhanging and free change of cross-section. Based on the technology of laser melting deposition (LMD) with optical powder feeding, this paper proposes the discrete layered method of space trajectory element to complete the forming trajectory planning (Fig.5), and proposes the compensation technology of base point offset of space variable attitude to compensate the position offset of the actual attitude change base point (Fig.10). Finally, the laser melting deposition forming of the bending and twisting structural parts with variable cross-section was realized and the dimensional error was effectively controlled.

**Results and Discussions** In view of the difficulties of forming trajectory planning of such complex structural parts, the discrete layered method of space trajectory element is proposed to layer the structural parts and generate discrete deposition units, and each discrete deposition unit is deposited according to the designed path. In view of the error caused by the smooth curve movement of the manipulator using line segment element fitting in the actual forming process, the space variable attitude base point offset compensation technology is proposed to compensate the position offset of the actual attitude change base point in the forming process, so as to realize the effective control of the size error (Fig.13).

**Conclusions** Through the above methods, the forming dimensional error is effectively controlled, the forming accuracy is improved, and finally the laser melting deposition forming of thin-walled hollow bending and torsion structural parts with variable cross-section is realized. The dimensional accuracy of the formed structural parts is relatively high, the shape dimensional error is between  $-0.44\%$  and  $1.83\%$ , the average thickness of the structural parts is between 5.9 and 6.19 mm, the microhardness of the structural parts is between 269 and 282.2 HV, and the surface and interior of the structural parts are dense and uniform, without obvious pores, cracks and other defects.

**Key words:** laser melting deposition; variable cross-section bending torsion structure; discrete layering; base point offset compensation; dimensional accuracy

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (62173239, 61903268)