

基于光内送粉多元扭曲结构的随形离散分层成形研究

王明雨¹, 石世宏^{1*}, 石拓^{2**}, 傅戈雁¹, 庞祎帆¹, 余司琪¹, 龚燕琪¹¹苏州大学机电工程学院, 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覆成形技术,进行了多元扭曲结构件的激光熔覆成形研究。基于结构件的扭曲特征,提出采用随形离散分层法对扭曲结构件作二次离散,解决了扭曲结构件中截面渐变结构的分层问题。依据获得的激光熔覆喷头空间运动轨迹信息,进行了多元扭曲结构件的成形。结果表明:成形的扭曲结构件表面基本平整,无宏观裂纹,表面粗糙度值在 $5.579 \mu\text{m}$ 以内;成形件平均厚度为 6.03 mm ,成形精度较高,形状尺寸误差在 $-3.45\% \sim 3.09\%$ 之间;成形件的显微硬度在 $271.6 \sim 284.5 \text{ HV}$ 之间,显微组织致密均匀,无明显的气孔和裂纹缺陷。

关键词 激光技术; 光内送粉; 激光熔覆; 多元扭曲结构件; 随形离散分层

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1002114

1 引言

在航空航天、机械、船舶等领域存在许多多元扭曲结构件,例如涡扇发动机进气道的风扇叶片、离心压缩机中的三元叶片和轮船的螺旋桨等。这些零件具有大倾角和扭曲等结构特征,给该类扭曲结构件的加工带来了极大困难。目前,多元扭曲结构件的加工主要以数控铣削、铸造、电解加工等方式为主^[1-2],但这些加工方式存在材料利用率低、生产周期长等问题,某些情况下难以满足使用要求。激光熔覆成形技术是在 20 世纪 90 年代提出的一种新型的金属零件快速成形技术^[3-6],可进行高性能、结构复杂零件的快速、无模具制造,因此研究人员针对激光熔覆成形多元扭曲结构件进行了广泛研究^[7-9]。

石龙飞^[10]先通过专业软件得到机器人的加工路径,然后采用水平分层方法实现了单个三元叶片的激光近净成形,但叶片表面会产生台阶效应;郁玲玲等^[11]建立了斜壁结构倾斜角度模型,分析了水平分层方法堆积倾斜结构时,偏移量、扫描速度等参数对斜壁倾斜角度的影响,并指出对于不同宽度的熔覆层,能够成功堆积斜壁的层间偏移率应小于 6% ;余超等^[12]提出了一种在激光束与垂直方向之间设

置预设夹角的方法,并采用该方法实现了无支撑大倾斜角薄壁结构的成形,最大倾角约为 60° ;王聪等^[13]采用变扫描速度参数匹配策略,使喷头轴线沿熔覆层的法线方向在空间作连续变姿态扫描,实现了大扭转、大偏转角密排多元薄壁件的激光熔覆成形;Dwivedi 等^[14]基于人工智能原理实现了激光多方向熔覆工艺过程的自动化,并通过合理规划运动轨迹成形出了扭曲叶片。

目前,国内外对多元扭曲结构件的激光熔覆成形多以等截面单一方向扭转为主,而对于在空间呈多方向扭曲的结构件的激光熔覆成形还鲜有报道,尤其是截面渐变的多方向扭曲结构件的激光熔覆成形更是甚少报道。本文基于自主研发的光内送粉技术^[15-17],采用随形离散分层方法得到了激光熔覆喷头的运动轨迹,实现了多元扭曲结构件的堆积成形。

2 实验设备及材料

2.1 实验设备

实验设备包括武汉锐科光纤激光技术股份有限公司生产的 RFL-C6000W 激光器、中空环形光内送粉喷头、GTVPF2/2 型送粉器,运动动力装置主要由六轴 KUKA 机器人和旋转工作台组成,采用氮

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2020-10-26; 录用日期: 2020-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(61903268, 51675359)、江苏省自然科学基金(BK20190823)

*E-mail: shishihong@suda.edu.cn; **E-mail: shituo@suda.edu.cn

气作为送粉载气和保护气体。

实验采用的中空环形光内送粉喷头的送粉原理如图 1 所示。采用光学转换系统将圆柱形实心光束转换成锥形中空聚焦光束,送粉管居中,粉末外侧设置环状准直气管。粉末在载气和保护气体的压力作用下克服重力的影响,与激光束实现精准耦合。与传统的光外送粉相比,光内送粉具有优异的粉末集束性,可以实现空间任意角度的熔覆。

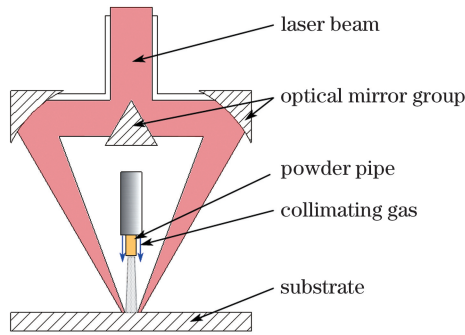


图 1 光内送粉原理

Fig. 1 Principle of inside-laser powder feeding

2.2 实验材料

基体材料采用 304 不锈钢。成形材料选用

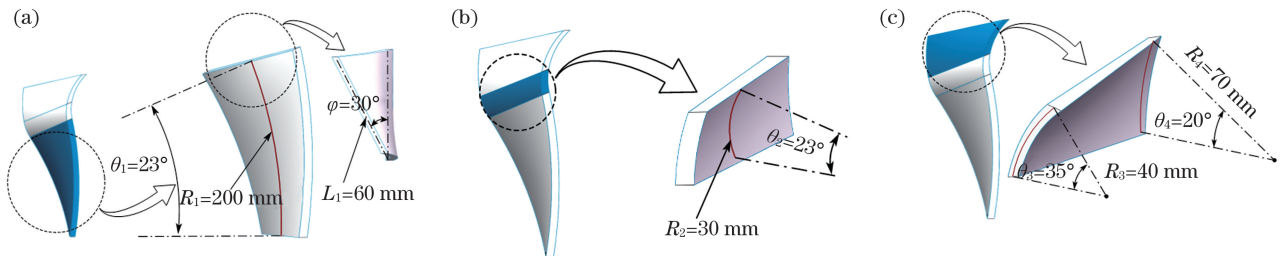


图 2 设计模型的两个部分。(a)第一部分;(b)第二部分;(c)第三部分

Fig. 2 Three parts of designed model. (a) The first part; (b) the second part; (c) the third part

3.2 随形离散分层法

上述多元扭曲结构件在空间中呈现为三维扭曲状,具有复杂的扭曲和倾斜特征。为了实现该扭曲结构件的激光熔覆成形,本文基于法向分层的原理^[18],采用一种随形离散分层的方法对该多元扭曲结构件进行分层:首先根据结构件的形状特点将结构件分为不同的部分,并提取各部分的中心线,然后沿着各部分的中心线进行法向切片,最后根据各部分切片层的特点再对其作二次离散,最终得到不同几何特征的离散熔覆单元。

步骤一:根据上述多元扭曲结构件的形状特点,将其分成三个部分,并提取三个部分的中心线 L_1 、 L_2 和 L_3 ,第一部分为等截面扭曲部分,第二部分为变方向扭曲结构过渡段,第三部分为截面渐变结构部分,如图 3(a)所示。

Fe314 金属粉末,粉末粒径为 $45 \sim 109 \mu\text{m}$,粉末的具体化学成分见表 1。

表 1 Fe314 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Fe314 alloy powder

Element	C	Si	Ni	Cr	B	Fe
Mass fraction /%	0.1	1.0	1.0	15.0	1.0	Bal.

3 实验方法

3.1 建立零件模型

基于航空涡扇发动机进气道中的风扇叶片,本文设计了一个多元扭曲结构件,其模型如图 2 所示。根据该结构件的形状特点,将其分为三部分:第一部分的横截面长度 $L_1 = 60 \text{ mm}$,横截面中心线的弯曲半径 $R_1 = 200 \text{ mm}$,圆心角 $\theta_1 = 23^\circ$,上下两端面的相对扭转角 $\varphi = 30^\circ$;第二部分为结构件变方向扭曲结构的过渡段,其横截面中心线的弯曲半径 $R_2 = 30 \text{ mm}$,圆心角 $\theta_2 = 23^\circ$,两端面无相对扭转角;第三部分为截面渐变结构,其纵向端面为两段圆弧,弯曲半径分别 $R_3 = 40 \text{ mm}$ 和 $R_4 = 70 \text{ mm}$,对应的圆心角分别为 $\theta_3 = 35^\circ$ 和 $\theta_4 = 20^\circ$ 。

步骤二:分别对三个部分作切片分层,得到图 3(b)所示的 m_1 、 m_2 和 m_3 切片。其中:第一、第二部分的切片为等截面切片,切片层的分层方向沿着中心弧线 L_1 和 L_2 的切线方向,切片层内的扫描方向为沿着截面的直线方向;第三部分为截面渐变结构,切片为弧长相等且半径不等的圆弧截面,其切片层的扫描方向与截面圆弧的切线方向一致,切片层内的扫描方向沿着中心线 L_3 的切线方向。

步骤三:如图 3(c)所示对第一、第二部分的切片沿着中心线 L_1 和 L_2 作等角度分割得到切片层 n_1 和 n_2 ,两部分各段熔覆层对应的弯曲角度分别为 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 。对第三部分沿着中心线 L_3 作等距分割得到切片层 n_3 ,每层切片高度为 ΔL 。

步骤四:对各部分所得的切片层作二次离散得到如图 3(d)所示的离散单元 E_{nk} 。用各部分离散单

元上下底面的中心连线表示该离散熔覆单元的方向向量,向量的长度为该单元的高度,向量的倾角为该单元的倾斜角度,即堆积时保持光束轴线与单元方向向量一致。其中:第一、第二部分离散单元的倾角

和高度在熔覆层内保持大致相同;第三部分离散单元的高度保持一致,在熔覆层内各离散单元的倾角成等角度线性递增,在相邻熔覆层之间的离散单元 $E_{n(k-1)}$ 和 E_{nk} 呈错位分布。

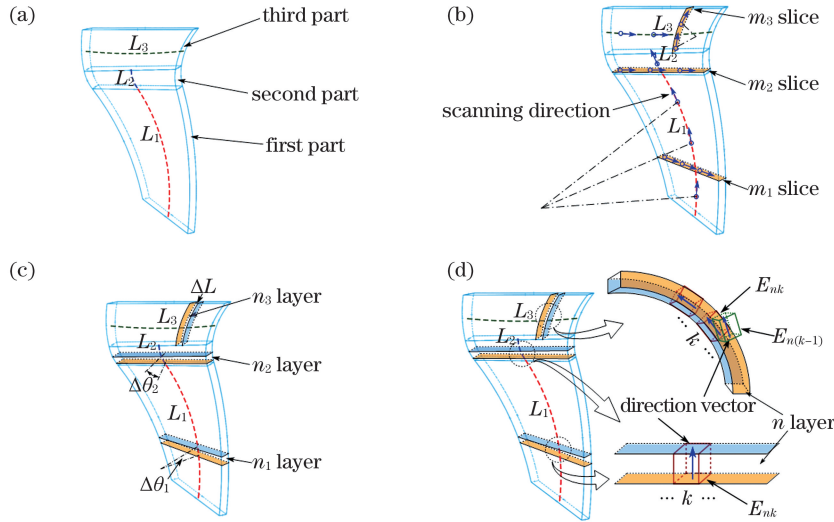


图 3 扭曲结构的分层方法。(a)按扭曲形状分层;(b)扫描方向;(c)沿扫描方向离散;(d)离散单元
Fig. 3 Layering method of twisted structure. (a) Layering according to twisted shape; (b) scanning direction; (c) dissociation along scanning direction; (d) discrete units

3.3 多元扭曲结构件成形轨迹规划

根据 3.2 节随形离散分层原理可知,光斑的运动轨迹是由各部分离散单元的位置和方向信息决定的。熔覆层的形成可以看成是光斑所在的工具坐标系相对于基板所在的基面坐标系作平移和旋转运动。

以第一部分中心线与基板的交点为原点建立基面坐标系 C_1 ,基面坐标系的 x 轴与第一层熔覆层的轨迹在同一直线上, z 轴与基板平面垂直。以熔覆所需离焦量下的光斑中心为原点建立工具坐标系 $C_i (i \geq 1, i \in \mathbb{N}_+)$,并且光束轴线与基面坐标系的 z 轴重合,当 $i=1$ 时,表示光斑运动的初始工具坐标系与基面坐标系重合。设空间某点 P 在基面坐标系 C_1 和工具坐标系 C_i 中的坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_i, y_i, z_i) ,工具坐标系 C_i 在基面坐标系 C_1 中作平移以及旋转变换,则两个坐标系下 P 点的坐标满足

$$\begin{pmatrix} x_i & y_i & z_i & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{T}_{1i} \cdot \mathbf{R}_{1i} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{M}_{1i}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{T}_{1i} 、 \mathbf{R}_{1i} 分别为工具坐标系 C_i 在基面坐标系 C_1 中的平移变换矩阵和旋转矩阵; \mathbf{M}_{1i} 为齐次坐标变换矩阵,描述了坐标系位置和方向的变换。采用随形离散分层得到的每个离散单元都相当于基面坐标系中的空间某点,都有一个相对于基面坐标系作变换的工具坐标系。则第 n 层切片第 k 个单元的工

具坐标系 C_{nk} 相对于基面坐标系 C_1 作了多次的齐次坐标变换,其齐次变换矩阵为

$$\mathbf{M}_{1nk} = \mathbf{M}_{12} \mathbf{M}_{23} \cdots \mathbf{M}_{(i-1)i}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{T}_{1nk} 和 \mathbf{R}_{1nk} 分别描述了第 n 层切片第 k 个单元的工具坐标系 C_{nk} 相对于基面坐标系 C_1 所作的平移变换和旋转变换。由此可知各离散单元相对于基面坐标系的位置和方向变化信息,熔覆喷头按照 \mathbf{T}_{1nk} 和 \mathbf{R}_{1nk} 得到的信息进行运动即可实现多元扭曲结构件的堆积成形。

如图 4(a) 所示,堆积到该扭曲结构件第 j ($1 \leq j \leq 3, j \in \mathbb{N}_+$) 部分第 n 层时,将初始工具坐标系 C_1 沿 \overrightarrow{OP} 向量平移到第 n 层切片第 k 个单元点 P ,得到工具坐标系 C_2 ;将工具坐标系 C_2 绕着自身的 x 轴旋转 $n \cdot \Delta\theta_j$ 角度得到工具坐标系 C_3 ,此时工具坐标系 C_3 的 z 轴与中心线 L_j 在点 P 处的切线共线;再将 C_3 坐标系绕着自身的 z 轴旋转 $n \cdot \Delta\varphi$ 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 $\Delta\theta_j$ 为扭曲结构件第 j 部分每个熔覆层对应的弯曲角度, $\Delta\varphi$ 为相邻熔覆层之间的相对扭转角。设熔覆层的层高为 Δh ,根据几何关系,有

$$\Delta\theta_j = \frac{180^\circ \times \Delta h}{\pi \times R_j}, \quad (3)$$

$$\Delta\varphi = \varphi \cdot \frac{\Delta\theta_j}{\theta_j}, \quad (4)$$

则该扭曲结构件第 n 层切片第 k 个单元的工具坐标

系 C_{nk} 相对于基面坐标系 C_1 的齐次变换矩阵为

$$\mathbf{M}_{1nk} = \mathbf{M}_{12} \cdot \mathbf{M}_{23} \cdot \mathbf{M}_{34}, \quad (5)$$

其中,

$$\mathbf{M}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x^j & T_y^j & T_z^j & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_j & \sin \alpha_j & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_{34} = \begin{bmatrix} \cos \beta_j & \sin \beta_j & 0 & 0 \\ -\sin \beta_j & \cos \beta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中:当 $j=1$ 时, $\alpha_1 = n \cdot \Delta\theta_1, \beta_1 = n \cdot \Delta\varphi$, $\begin{bmatrix} T_x^1 \\ T_y^1 \\ T_z^1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ R_1 \cdot (1 - \cos \alpha_1) \\ R_1 \cdot \sin \alpha_1 \end{bmatrix}^T$; 当 $j=2$ 时, $\alpha_2 = n \cdot \Delta\theta_2, \beta_2 = \varphi$,

$$\begin{bmatrix} T_x^2 \\ T_y^2 \\ T_z^2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ R_1 \cdot (1 - \cos \theta_1) + R_2 \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \theta_2) \\ R_1 \cdot \sin \theta_1 + R_2 \cdot (\sin \theta_2 - \sin \alpha_2) \end{bmatrix}^T; \text{ 当 } j=3 \text{ 时, } \alpha_3 = -n \cdot \Delta\theta_3, \beta_3 = \varphi, \begin{bmatrix} T_x^3 \\ T_y^3 \\ T_z^3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ R_1 \cdot (1 - \cos \theta_1) + R_2 \cdot (1 - \cos \theta_2) - R_3 \cdot (1 - \cos \alpha_3) \\ R_1 \cdot \sin \theta_1 + R_2 \cdot \sin \theta_2 + R_3 \cdot \sin \alpha_3 \end{bmatrix}^T.$$

该扭曲结构件的第三部分为截面渐变结构,其纵截面为圆弧面,并且不同段的截面圆弧的半径不等。设第 k 段纵截面圆弧的半径为 R_3^k ,层高为 Δh 的熔覆层在该段截面圆弧上对应的圆心角为 $\Delta\theta_3^k$ 。如图 4(b)所示,结构件第三部分横截面中心线由多个线段组合而成,相邻熔覆单元之间呈错位分布,根据几何关系可得相邻熔覆单元之间的错位距离为

$$\Delta s = R_3^{k-1} \cdot [1 - \cos(n \cdot \Delta\theta_3^{k-1})] - R_3^k \cdot [1 - \cos(n \cdot \Delta\theta_3^k)]. \quad (9)$$

若光束沿各个熔覆单元的中心线段运动,则相邻熔覆单元之间的错位距离会使机器人出现运动停顿,激光在错位处会多加载一段时间,这样会导致整个熔覆层的表面在错位处出现凸起现象。因此,如图 4(b)所示,本文利用机器人轨迹逼近的方法,通过程序命令的控制使机器人在错位处不发生运动停顿,而是沿着拟合曲线 L_3 运动,这样就可以解决上述分层方式导致的熔覆层错位和表面阶梯效应。

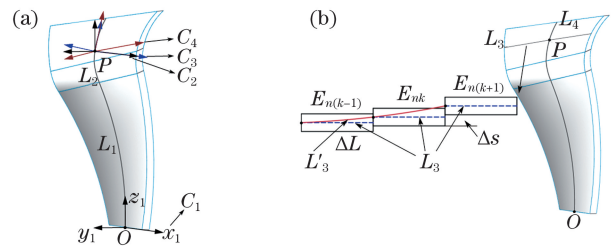


图 4 扭曲结构件的成形轨迹。(a) 坐标变换过程; (b) 第三部分的横截面

Fig. 4 Forming track of twisted structure. (a) Coordinate transformation process; (b) cross section of the third part

4 实验及检测

4.1 多元扭曲结构件的堆积

本实验采用的工艺参数如下:激光功率为 2100 W,扫描速度为 7.5 mm/s,离焦量为 -8.5 mm,送粉量为 43.5 g/min。实验中采用的

是自主研发的光内送粉喷头。图 5 为空间不同角度下粉末颗粒喷出粉管后的分布状态,可以看出,在不同的偏转角度下,粉末均具有良好的集束性,粉末流细小,挺度高,发散角度约为 4° ,未出现粉末因重力

影响而下垂的现象,能够实现堆积扭曲结构件时空多姿态变换的需求。根据图 2 设计的模型以及 3.2 节的分层方法进行多元扭曲结构件的成形,成形过程如图 6 所示,成形件如图 7 所示。

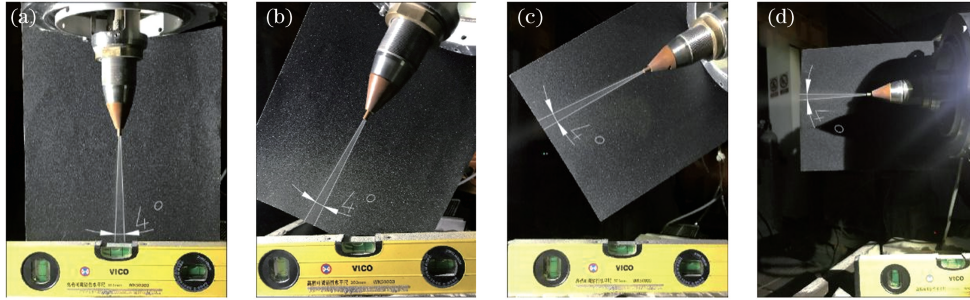


图 5 不同偏转角下粉末的分布状态。(a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° ; (d) 90°

Fig. 5 Powder distribution state under different deflection angles. (a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° ; (d) 90°

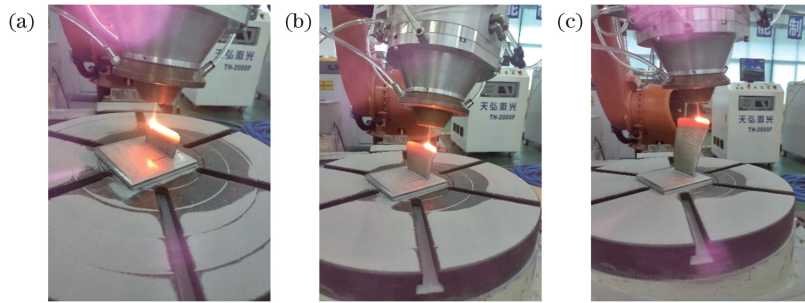


图 6 多元扭曲结构件的成形过程

Fig. 6 Forming process of multivariant twisted structure

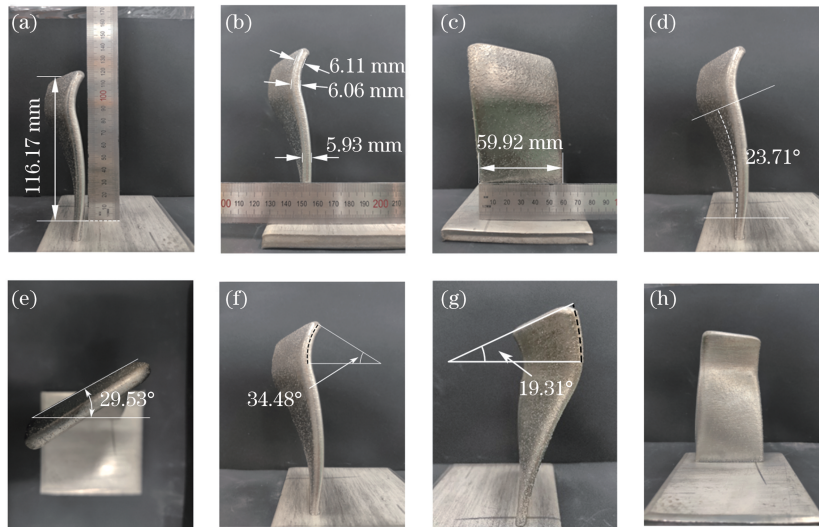


图 7 成形后的扭曲结构件。(a)成形件的高度;(b)成形件的厚度;(c)成形件的宽度;(d)第一部分的旋转角;(e)第一部分的扭转角;(f)第三部分前端的圆心角;(g)第三部分后端的圆心角;(h)成形件侧面

Fig. 7 Formed twisted structure. (a) Height of formed part; (b) thickness of formed part; (c) width of formed part; (d) rotation angle of the first part; (e) torsion angle of the first part; (f) center angle of the front end face of the third part; (g) center angle of the rear face of the third part; (h) side of the forming part

4.2 成形件检测

4.2.1 尺寸误差分析

由图 7 可知:该多元扭曲结构件的顶部中心距

基体的高度为 116.17 mm,与理论设计尺寸 113.59 mm 的相对误差为 2.27%;熔覆层宽度为 59.92 mm;第一、第二、第三部分的熔覆层平均厚度

分别为 5.93 mm、6.06 mm 和 6.11 mm (平均厚度为 6.03 mm)。熔覆层厚度自下而上呈上升趋势,这是由于随着熔覆层数的增加,熔覆层的热累积增大,熔池的存在寿命增加,同时,随着扭曲角度的增加,重力对熔池的影响也增大;因此,熔覆层厚度呈现出一定的宽化现象。成形件第一部分的旋转角和扭转角分别为 23.71° 和 29.53° ,与设计尺寸的相对误差为 3.09% 和 -1.57% 。第三部分两端面的圆心角分别为 34.48° 和 19.31° ,与设计尺寸的相对误差为 -1.49% 和 -3.45% 。该结构件成形精度较

高,成形尺寸与理论设计尺寸的相对误差较小。成形结构件整体形貌较好,表面平整,无宏观裂纹。

4.2.2 显微硬度分析

采用显微硬度计测量该扭曲结构件三个部分中间部位的硬度,测量取样位置如图 8(a) 所示,分别在位置 1、位置 2、位置 3 三个取样位置沿熔覆层生长方向进行显微硬度的测量,测量结果如图 8(b) 所示。三个取样部分的显微硬度分别在 271.6 ~ 283.1 HV、272.7 ~ 280.2 HV、272.8 ~ 284.5 HV 之间,整体显微硬度值基本保持稳定。

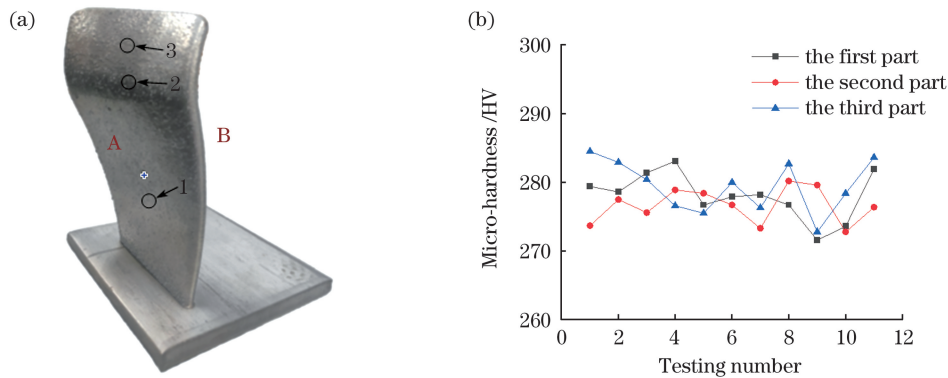


图 8 显微硬度测量。(a) 测量位置示意图; (b) 不同取样位置的显微硬度

Fig. 8 Micro-hardness measurement. (a) Schematic of sampling positions for measurement; (b) micro-hardness at different locations

4.2.3 表面粗糙度分析

采用 3D 轮廓测量仪对图 8(a) 中位置 1、位置 2、位置 3 三个取样位置的 A、B 两侧表面的粗糙度

进行测量,各部分两侧表面的三维形貌图如图 9 所示,图内同时给出了两侧表面的平均粗糙度 (S_a)。可见,表面粗糙度较小,在 $1.832 \sim 5.579 \mu\text{m}$ 之间。

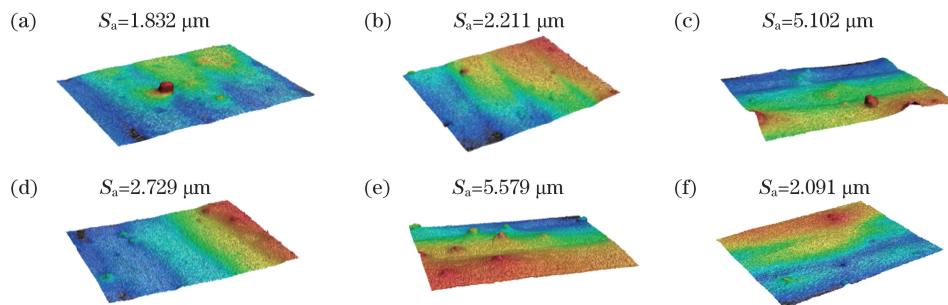


图 9 各部分 A、B 两侧表面的三维形貌图。(a) 第一部分 A 侧; (b) 第一部分 B 侧; (c) 第二部分 A 侧; (d) 第二部分 B 侧; (e) 第三部分 A 侧; (f) 第三部分 B 侧

Fig. 9 Three-dimensional topographies of the surfaces on A and B sides of each part. (a) A side of the first part; (b) B side of the first part; (c) A side of the second part; (d) B side of the second part; (e) A side of the third part; (f) B side of the third part

4.2.4 组织分析

对图 8(a) 所示的多元扭曲结构件中三个位置 (位置 1、位置 2、位置 3) 进行线切割取样,经镶样、打磨、抛光并腐蚀后,利用金相显微镜分别观察这三个区域的组织,结果如图 10 所示。结构件各部分组织均以树枝晶为主,树枝晶的生长方向即为成形件

的散热方向,组织致密均匀,无明显的气孔和裂纹。由于激光熔覆成形是快速熔化、快速冷却的凝固过程,在极快的冷却速度下,过冷度极大,因此形成的晶粒非常细小,组织较为细密。图 10 (a)、(b)、(c) 中②区的组织相比①区明显粗大、疏松。这是由于在扭曲结构件的堆积过程中,在堆积下一层熔覆层

时,当前熔覆层的表面受到激光的二次加热,熔覆层的上表面部分再次熔化,然后与新产生的熔池一起

重新凝固成新一层熔覆层,导致当前熔覆层的上部分枝晶受到破坏,晶粒变得粗大。

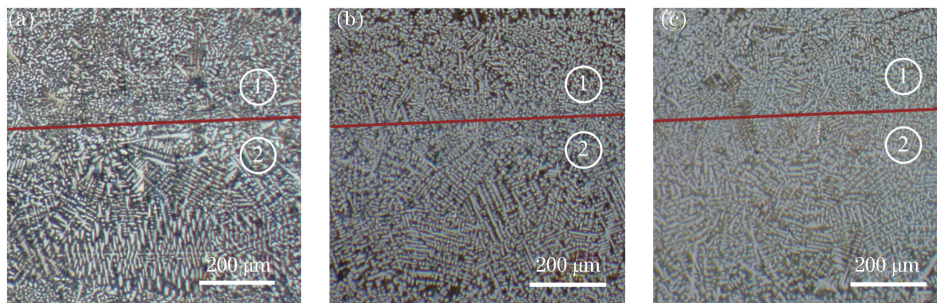


图 10 成形件不同位置处的显微组织。(a)位置 1;(b)位置 2;(c)位置 3

Fig. 10 Microstructures at different positions of formed part. (a) Position 1; (b) position 2; (c) position 3

5 结 论

针对多元扭曲结构件的成形轨迹问题,提出了随形离散分层的方法:对整个结构件作一次法向离散切片,再对得到的每层切片作二次离散,得到不同几何特征的离散熔覆单元。利用随形离散分层方法解决了多元扭曲结构件中截面渐变结构的分层问题,得到了激光熔覆喷头的空间运动轨迹信息,完成了多元扭曲结构件的堆积。成形件检测结果如下:成形件表面平整,表面粗糙度值在 $5.579 \mu\text{m}$ 以内;成形件的平均厚度为 6.03 mm ;成形件的成形精度较高,形状尺寸误差在 $-3.45\% \sim 3.09\%$ 之间;成形件不同部分的硬度稍有不同,基本稳定在 $271.6 \sim 284.5 \text{ HV}$ 之间;成形件整体组织无明显区别,各部分组织致密均匀,无明显的气孔、裂纹。

参 考 文 献

- [1] Zhu Y W, Xu J W, Zhao J S, et al. 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.
朱永伟, 徐家文, 赵建社, 等. 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.
- [2] Wei J H, Kuang Y. Ceramic shell technique for large complex thin wall investment structural castings [J]. Foundry Technology, 2016, 37(3): 488-491.
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.
- [3] Zhou C J, Sun W L. Review on laser remanufacturing research based on laser cladding [J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(9): 5-9.
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.
- [4] Li X Q, Chen Z G, Xia J A, et al. Amorphous structures in laser cladding of ZL111 aluminum alloy: semi-quantitative study by differential thermal analysis (DTA) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, B9(1): 85-90.
- [5] Li R, Yang X J, Zhao W, et al. Effect of femtosecond laser micromachining on the roughness of cladding sidewalls [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(11): 3244-3249.
李睿, 杨小君, 赵卫, 等. 飞秒激光加工对熔覆层侧壁粗糙度的影响 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3244-3249.
- [6] Huang L F, Sun Y N, Wang G J, et al. Research progress of laser cladding high-entropy alloy coating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240003.
黄留飞, 孙耀宁, 王国建, 等. 激光熔覆技术制备高熵合金涂层研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240003.
- [7] Wang X L. Study on laser material deposition process of 3D-flow blade feature structures [D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2019.
王鑫林. 三元叶片特征结构的激光直接制造工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [8] Kolluru K, Axinte D. Coupled interaction of dynamic responses of tool and workpiece in thin wall milling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(9): 1565-1574.
- [9] 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.
- [10] Shi L F. Experiment research on laser engineered net shaping of 3D-flow impeller blade [D]. Dalian,

- China: Dalian University of Technology, 2016.
- 石龙飞. 激光近净成形金属三元叶轮叶片实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [11] Yu L L, Shi S H, Di K Y, et al. 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.
- 郁玲玲, 石世宏, 狄科云, 等. 基于光内同轴送粉技术的激光熔覆斜壁堆积成形研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(3): 264-266.
- [12] 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.
- 余超, 苗秋玉, 石龙飞, 等. 大倾斜角薄壁结构激光近净成形实验研究[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(5): 595-602.
- [13] 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.
- 王聪, 石世宏, 方琴琴, 等. 空间多元密排扭曲薄壁件的激光熔覆成形研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0602004.
- [14] 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.
- [15] Shi S H, Fu G Y, Wang A J, et al. Technique for manufacturing inner-light powder-supplying by laser machining forming and inner-light powder-supplying spray head: CN101148760A[P]. 2008-03-26.
- 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: CN101148760A[P]. 2008-03-26.
- [16] Gong Y Q, Fu G Y, Shi T, et al. Local shielding gas model for laser cladding of titanium alloy in open environment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1102006.
- 龚燕琪, 傅戈雁, 石拓, 等. 开放环境下钛合金激光熔覆的局部气氛保护模型[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1102006.
- [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.
- 李东升, 石拓, 石世宏, 等. 异形基面平顶薄壁结构激光熔覆成形工艺研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102002.
- [18] Meng W D, Shi S H, Shi T, et al. Forming technology research of laser accumulation of reducing solid of revolution with changing laserhead posture[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1003006.
- 孟伟栋, 石世宏, 石拓, 等. 空间变姿态激光堆积变径回转体成形技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1003006.

Conformal Discrete Layering of Multivariant Twisted Structure Based on Inside-Laser Powder Feeding

Wang Mingyu¹, Shi Shihong^{1*}, Shi Tuo^{2**}, Fu Geyan¹, Pang Yifan¹,
Yu Siqu¹, Gong Yanqi¹

¹ School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

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

Abstract

Objective In the fields of aerospace, machinery, ships, etc., there are many multivariant twisted structures, such as fan blades in turbofan engine intakes, ternary blades in centrifugal compressors, and ship propellers. These parts have common structural features including large inclination and twisting, which cause great difficulties in processing. Currently, multivariant twisted structural parts are mainly based on computer numerical control milling, casting, electrochemical machining, etc. However, these machining methods have their own problems, such as low material utilization and long production cycles, and in some cases, it is difficult to meet performance requirements. Laser-cladding forming technology is a new type of rapid prototyping technology for metal parts that was proposed in the 1990s. It can be used for rapid and mold-free manufacturing of high-performance and complex parts. Therefore, research on laser-cladding forming of multivariant twisted structures has broad applications. At present, the laser-cladding forming of multivariant twisted structures at home and abroad is mostly based on uniform cross-section and

single-direction twisting, while there are few reports on the structural parts that are twisted in multiple directions in space, especially the formation of the gradual cross-section in this type of structural parts. Based on the self-developed optical internal powder feeding technology, this paper adopts the method of conformal discrete layering to obtain the movement trajectory of the laser-cladding nozzle, and realizes the accumulation and forming of the multivariant twisted structure.

Methods The multivariant twisted structure described in this paper presents a three-dimensional twisted shape in space, with complex twisting and tilting characteristics. To realize the laser-cladding forming of the twisted structural part, based on the principle of normal delamination, this paper proposes a method of discrete layering following the shape to layer the multivariant twisted structural part. First, the structure is divided according to the shape characteristics of the structural part. The structure are divided into different parts for layering and the center line of each part is extracted; then, normal slices are made along the center line of each part. Finally, according to the characteristics of each slice layer, the slices are discretized twice to produce a different discrete cladding unit with geometric characteristics. The movement trajectory of the light spot is determined by the position and direction information of each part of the discrete unit. The cladding nozzle moves according to the position and direction information in the discrete unit to accumulate and form the multivariant twisted structure.

Results and Discussions The conformal discrete layering method is proposed to layer the multivariant twisted structure to obtain discrete cladding units with different geometric characteristics [Fig. 3(d)]. The trajectory of the light spot is determined by the position and direction information of each part of the discrete unit. The formation of the cladding layer can be regarded as the translation and rotation of the tool coordinate system, where the light spot is located relative to the base coordinate system in which the substrate is located [Fig. 4(a)]. Through translation and rotation operations, the homogeneous transformation matrix of each discrete unit relative to the base coordinate system is obtained, and the changes in position and direction change of each discrete unit relative to the base coordinate system are obtained, thereby yielding the laser-cladding nozzle's movement track. This study uses the method of robot trajectory approximation, where, through the control of program commands, the robot does not stop at the dislocation position, and realizes the gradual cladding formation of the multivariant twisted structure [Fig. 4(b)]. The experiment uses a self-developed inside-laser powder-feed nozzle, which has good powder-beam bundling, and realizes the laser-cladding forming of multivariant twisted structural parts (Fig. 7).

Conclusions To obtain the forming trajectory of multivariant twisted structural parts, a method of discrete layering according to shape is proposed: a normal discrete slice of the entire structural part is made, and then each layer of the slices is discretized twice to obtain a discrete cladding unit with different geometric characteristics. The conformal discrete layering method is used to solve the layering problem of the gradual structure of the cross section in the multivariant twisted structure, obtain the spatial movement track information of the laser-cladding nozzle, and complete the accumulation of the multivariant twisted structure. The inspection results of the formed parts are as follows: the surface of the formed parts is smooth with a surface roughness value within $5.579\ \mu\text{m}$; the average thickness of the formed parts is $6.03\ \text{mm}$, and the thickness of each part is slightly increased; the forming accuracy of the formed parts is higher, with a shape and size error from -3.45% – -3.09% ; the hardness of the different formed parts differed slightly but were basically stable at 271.6 – $284.5\ \text{HV}$; there is no obvious difference in the overall structure of the formed part; and the structure of each part is dense and uniform, without obvious pores or cracks.

Key words laser technique; inside-laser powder feeding; laser cladding; multivariant twisted structure; conformal discrete layering method

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 220.4610