

# 空间多元密排扭曲薄壁件的激光熔覆成形研究

王聪, 石世宏, 方琴琴, 傅戈雁, 鹿霖, 周亮

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 基于光内送粉技术,进行了空间密排多元扭曲薄壁件的成形研究,获得了熔覆喷头的空间运动轨迹及姿态;根据熔覆层截面与工艺参数之间的解析关系和单道实验,建立了高度工艺模型,并进行了二元扭曲薄壁成形;采用间歇熔覆工艺,完成了多元密排扭曲薄壁叶片的堆积。检测结果表明,成形件表面平整,叶片单元最小间隙为6.5 mm,叶片厚度基本稳定在2.7 mm;各部位组织致密、显微硬度分布较均匀。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;光内送粉;多元密排扭曲薄壁件;离散分层

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0602004

## Research on Laser Cladding Forming of Close-Packed Multivariant Twisty Thin-Wall Parts

Wang Cong, Shi Shihong, Fang Qinqin, Fu Geyan, Lu Lin, Zhou Liang

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

**Abstract** Based on the inside-laser powder feeding technology, the forming research of close-packed multivariant twisty thin-wall parts is performed. The spatial motion trajectory and the pose of the cladding nozzle are obtained. According to the analytic relationship between the cladding layer section and the process parameters as well as the single-pass experiment, the height process model is set up and the forming of binary twisty thin-wall parts is performed. The close-packed multivariant twisty thin-wall parts are accumulated by the intermittent cladding process. The testing results show that the surface of formed parts is smooth, the minimum clearance among blade units is 6.5 mm, and the thickness of blades is mainly stable around 2.7 mm. The distributions of the microstructure and microhardness are relatively homogeneous.

**Key words** laser technique; laser cladding; inside-laser powder feeding; close-packed multivariant twisty thin-wall parts; discrete layers

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引言

扭曲薄壁类零件(如发动机叶片、扇叶)在航空航天、机械等领域具有广泛的应用,而多元密排扭曲结构具有较高的工作效率。传统多采用数控铣、铸造、电解等方式进行加工,但这些方法存在材料利用率低、生产周期长等问题。并且,由于铣削刀具尺寸和加工空间等的限制,传统加工方法一般难以完成密排多元扭曲件的切削加工。激光熔覆成形是一种快速无模成形技术,具有可直接成形复杂结构薄壁,工艺流程短,材料利用率高等优点,因此采用激光熔覆技术成形扭曲薄壁件具有重要应用前景<sup>[1-3]</sup>。

目前,对扭曲件成形的研究大多集中在一维扭曲或弯曲类薄壁件。Shang等<sup>[4]</sup>研究了层间搭接率和倾斜极限,并形成出了一维旋转薄壁件,其最大倾角为30.4°,研究指出层间搭接率是产生塌陷的直接原因。

收稿日期: 2017-01-10; 收到修改稿日期: 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(51675359)、国家重点研发计划(2016YFB1100300)、苏州市科技计划(SYG201541)

作者简介: 王聪(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。E-mail: 1182609970@qq.com

导师简介: 石世宏(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事激光快速成形方面的研究。

E-mail: shishihong@stu.suda.edu.cn(通信联系人)

Wang 等<sup>[5]</sup>通过建立偏移模型的方法,堆积出倾斜圆弧薄壁结构件,偏移模型法会在倾斜结构表面产生台阶效应。Yu 等<sup>[6]</sup>建立了倾斜结构倾角模型,分析了水平偏移量、扫描速度等对成形角度的影响,指出光内送粉喷头能够成功堆积斜壁的层间偏移率应在 6% 以内。Fu 等<sup>[7]</sup>通过优化工艺参数和数值模拟的方式,成形出表面良好的一维扭曲薄壁件且最大倾角为 18.036°,成形件具有较好的质量。Keist 等<sup>[8]</sup>通过对多种几何结构薄壁件进行力学性能测量和显微组织观察,分析了薄壁件几何结构对其性能的影响。Abele 等<sup>[9]</sup>采用选区激光熔化技术堆积了多孔薄壁结构,并分析了工艺参数对零件的成形精度、力学性能的影响。Dwivedi 等<sup>[10]</sup>采用几何推理和合理路径规划的方法成形了扭曲叶轮。

密排多元扭曲薄壁件是一种特殊复杂空间结构类零件,扭曲角大,多元扭曲加上叶片密排使成形空间小而曲折。目前,密排多元扭曲薄壁件的成形以及利用激光熔覆成形的研究鲜见报道。本文采用激光光内送粉技术,沿扭曲件主中心线法平面法向切片、层内二次离散的分层方式,喷头轴线沿熔层的法线方向连续空间变姿态进行扫描,结合理论模型和单道实验建立熔覆层高度的工艺模型,堆积出了具有弯扭组合特征的密排二元扭曲薄壁件样件。

## 2 实验材料及设备

实验基体材料采用 304 不锈钢,成形材料选用 Fe 313 金属粉末,粉末粒度为 45~74  $\mu\text{m}$ ,粉末化学成分(质量分数)为 C(0.1%),Si(2.5%~3.5%),Cr(13%~17%),B(0.5%~1.5%),Fe(余)。实验采用的中空激光光内送粉喷头的送粉原理如图 1 所示。通过光路转换系统,将实心柱形光束转化为倒锥形中空光束,单根粉管居中,粉管外侧设置有环状准直气管,粉束受到载气和保护气的压力作用,克服了重力对粉末的影响,光粉耦合性好。与传统的光外同轴送粉相比,光内送粉的粉束集束性好,粉末利用率高,可进行空间任意角度熔覆成形<sup>[11]</sup>。实验采用美国阿帕奇公司生产的 IPG YLS-2000-TR 型 2 kW 光纤激光器,选用德国 GTV 公司的 GTV PF2/2 型送粉器。运动装置主要由 6 轴 KUKA 机器人和旋转工作台组成。实验中使用氮气作为送粉载气和保护气体。

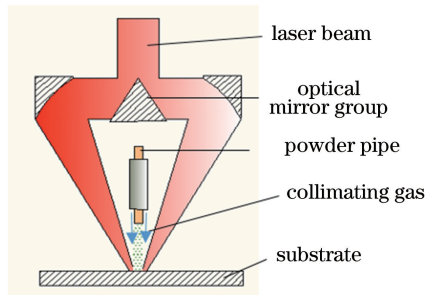


图 1 光内送粉原理

Fig. 1 Principle of inside-laser powder feeding

## 3 实验方法

### 3.1 建立堆积模型

实验堆积弯曲和扭转组合的二元薄壁扭曲件模型如图 2(a)、(b)所示。零件的截面长度  $L = 40 \text{ mm}$ ,截面中心弯曲半径  $R = 140 \text{ mm}$ ,圆心角为  $48^\circ$ ,两端面相对扭转角为  $80^\circ$ ,扭曲特征在弯曲方向上均匀变化。在此基础上,在半径为 30 mm 的柱面上堆积具有三个叶片单元的密排扭曲件,每个单元间隔的圆心角为  $15^\circ$ ,模拟的密排叶轮叶片模型如图 2(c)所示。

### 3.2 切片离散分层法

上述二元扭曲薄壁件成形过程可看成矩形截面中心沿着半径为 140 mm 的圆弧作均匀移动,且截面法线始终与圆弧当前位置的切线方向一致,同时截面沿着中心均匀发生扭转,即截面中线相对于原始截面中心线与圆弧角度呈线性变化。矩形截面短边对称轴上的点在一簇中心弯曲半径为 140 mm 的弯曲管状表面上移动,弯管半径为轴线上的点到截面中心的距离,图 3 所示为截面短边中点轨迹所在的弯曲圆柱表面。

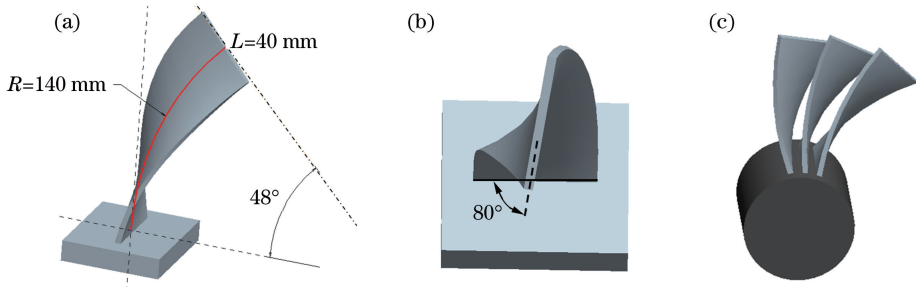


图 2 设计模型。(a)主视图;(b)俯视图;(c)模拟密排叶片

Fig. 2 Designed model. (a) Front view; (b) top view; (c) simulated close-packed blade

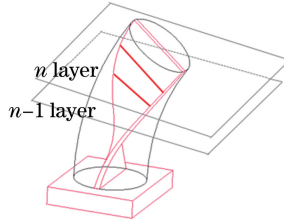


图 3 截面短边中点运动轨迹所在的柱形弯曲表面

Fig. 3 Cylindrical bending surface where motion trajectory of mid-point at section short-cut locates

该类扭曲件具有复杂的倾斜特征,若采用传统的水平分层方式进行堆积,表面存在阶梯效应,且堆积大倾角结构时熔池易产生塌陷,存在堆积倾角极限<sup>[4,6]</sup>。Meng 等<sup>[11]</sup>利用光内送粉技术的光粉耦合特性,采用法向分层方式,将光束倾斜进行熔覆,光束轴向与加工位置侧面切线始终保持一致,实现了上下层无错位堆积,能够克服熔池塌陷并消除表面台阶效应,可实现倾斜角在 $0^\circ \sim 81^\circ$ 的变化。

为充分利用已形成熔覆层作为下一层的熔覆基体,结合文献<sup>[11]</sup>的分层原理,针对二元扭曲件的特点,本文采用沿主中心线法平面法向切片、层内二次离散的分层法对扭曲件进行分层。首先根据零件特点提取零件主中心线,然后根据主中心线进行法向切片,最后根据层切片特点进行二次离散得到离散单熔覆元。对于上述二元扭曲件,易知弯曲方向上的中心轴线为其主中心线,该中心线为一圆弧,如图 3 所示,沿径向以  $\Delta\alpha$  角度对其进行等角度分割,即  $\Delta\alpha$  为每层切片的弯曲角度,图 4(a)所示为其第  $n$  层切片。同一切片内沿扫描方向各部分的高度和倾斜角不同,在扫描方向上以  $\Delta l$  等距离散分割该层切片,得到的离散单元如图 4(b)所示,各离散单元倾斜角和高度在单元内部近似相同,且用离散单元上下底面中心连线构成的向量来表征该单元的高度与方向,堆积时光束与各离散位置的向量方向保持一致,图 4(c)所示为  $n$  层第  $k$  个单元  $E_{nk}$ 。

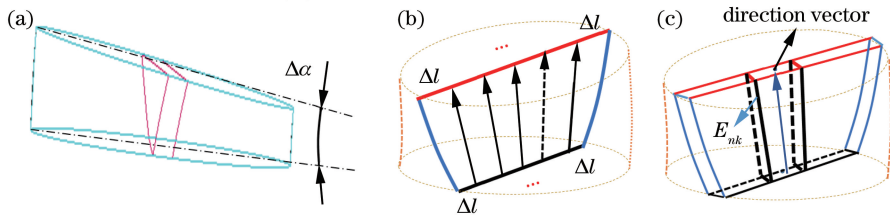


图 4 弯扭件分层方式。(a)弯曲方向切片;(b)扫描方向离散;(c)离散单元

Fig. 4 Layered approach of bend torsion parts. (a) Slice along bend direction; (b) dissociation along scanning direction; (c) discrete unit

### 3.3 离散单元计算

#### 3.3.1 扭曲件轨迹形成过程

多元扭曲件成形轨迹比较复杂,根据 3.2 节分层原理,光束的运动轨迹规划主要是各离散单元的空间方位计算过程,获取各层离散单元的空间方位后进行拼接即可得到成形轨迹。

激光熔覆喷头的移动实际上是工具坐标系相对基面参考坐标系的运动,主要包括平移和旋转运动。针

对本实验模型的成形,先将零件沿主中心轴线以  $\Delta\alpha$  角度进行  $N$  等分,以中心线与基体的交点为原点建立参考坐标系  $T_0$ 。且  $Z$  轴与基体表面垂直, $X$  轴为第一层扫描轨迹所在直线;然后以光束工作位置为工具坐标系中心,且  $Z$  轴与光束轴线重合,建立工具坐标系  $T_1$ ,使初始工具坐标系与基面坐标系完全重合。光束工具坐标系位置的移动以及姿态的调整主要可分为以下几个过程,并如图 5 所示。

- 1) 熔覆第  $n$  层时,将工具坐标系平移至第  $n$  等分点,平移向量为  $\overrightarrow{OP}$ ;
- 2) 将工具坐标系沿自身  $X$  轴旋转  $(n-1)\Delta\alpha$ ,此时工具坐标系  $T_{n1}$  的  $Z$  轴与中心轴线相切;
- 3) 再将此时的工具坐标系沿自身  $Z$  轴旋转  $(n-1)\Delta\theta$ ,其中  $\Delta\theta$  为层间相对扭转角,此时工具坐标系  $T_{n2}$  为第  $n$  层参考坐标系,且  $X$  轴与该层待成形切片扫描成形轨迹重合。工具坐标系沿着  $T_{n2}$  坐标系的  $X$  轴正向移动至该层熔覆起点,然后向  $X$  轴负方向移动,同时光束轴线绕  $X$  轴旋转时,与各离散单元方位一致。

每层的堆积都是利用上一熔覆层作基体,所以以所在层的坐标系  $T_{n2}$  为参考调整喷头姿态,熔覆喷头在第  $n$  层中心时垂直于该层切片平面。第  $n$  层扫描方向与  $T_{n2}$  的  $X$  轴平行,步骤 3) 中光束绕  $T_{n2}$  坐标系的  $X$  轴转角为离散单元与参考平面夹角,距中心  $l$  处相对于上一层切片参考平面的倾角  $\beta$  可根据如下过程得出。

如图 6 所示,将第  $n$  层切片向第  $n-1$  层切平面进行投影,投影点到该层参考坐标系  $X$  轴的距离为  $\Delta x$ ,根据几何关系可得:

$$\Delta x = l \sin \Delta\theta + R - l \sin [(n-1)\Delta\alpha] - [R - l \sin(n \cdot \Delta\alpha)] \cos \Delta\theta, \quad (1)$$

式中  $l$  为  $T_{n2}$  坐标系  $X$  轴上计算点的  $X$  坐标分量。第  $n$  层  $l$  处点到第  $n-1$  层平面的距离  $\Delta h$  为

$$\Delta h = \{R - l \sin [(n-1)\Delta\theta]\} \cdot \sin \Delta\alpha. \quad (2)$$

(1) 式等号右边第一项起主要作用,其余项很小可以忽略不计,则

$$\beta = \arctan \frac{R \sin \Delta\theta}{\{R - l \sin [(n-1)\Delta\theta]\} \cdot \sin \Delta\alpha}. \quad (3)$$

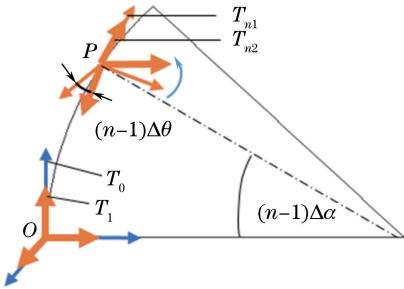


图 5 多元扭曲件成形轨迹形成过程

Fig. 5 Formation process of forming trajectory of multivariate twisty part

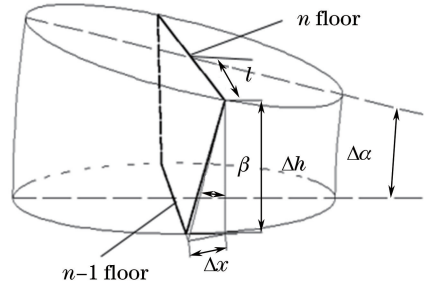


图 6 离散单元倾角计算原理图

Fig. 6 Schematic diagram of calculating oblique angle of discrete units

### 3.3.2 离散单元方位计算

空间某点在基面坐标系  $T_0$  和工具坐标系  $T_1$  中的向量表示分别为  $r_0$  和  $r_1$ ,工具坐标系  $T_1$  在基面坐标系  $T_0$  中先作平移变换再作旋转变换时,空间中的点在两个坐标系中的向量满足

$$r_0 = S_{01} + R_{01} \cdot r_1 = M_{01} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $S_{01}$ 、 $R_{01}$  分别为工具坐标系在基面坐标系中的平移向量和旋转矩阵; $M_{01}$  为齐次坐标变换矩阵,是坐标系位置和姿态的综合描述。本实验的坐标系之间有多步变换,先为每个离散单元分配一个坐标系,将每层离散为  $m$  个单元,单元长度为  $\Delta l$ ,第  $n$  层第  $k$  个单元坐标系  $T_{nk}$  相对于基面坐标系作三次齐次坐标变换,则  $k$  单元坐标系相对基面坐标系  $T_0$  的齐次坐标变换矩阵为

$$M_{0nk} = M_{01} \cdot M_{1n} \cdot M_{nk} = \begin{bmatrix} R_{0k} & S_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{式中 } \mathbf{M}_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & S_x \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & S_y \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & S_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{1n} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{nk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_k \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$(S_x, S_y, S_z)^T = (0, R\{1 - \cos[(n-1)\Delta\alpha]\}, R\sin[(n-1)\Delta\alpha])^T, \alpha = (n-1)\Delta\alpha, \theta = (n-1)\Delta\theta, \beta = \arctan \frac{R \sin \Delta\theta}{\{R - l_k \sin[(n-1)\Delta\theta]\} \cdot \sin \Delta\alpha}, l_k$  为第  $k$  个单元在  $T_{n2}$  坐标系中的  $X$  坐标。

(5)式中  $\mathbf{S}_k, \mathbf{R}_{0k}$  分别描述第  $k$  个离散单元相对基面坐标系的空间位置和方向信息,第  $n$  层切片上的离散单元相对于基面坐标系的位置信息以及姿态信息已经用矩阵的形式描述出来,机器人按照  $\mathbf{S}_k, \mathbf{R}_{0k}$  中的信息进行运动即可完成成形件的堆积。

### 3.4 建立熔覆层高度模型

根据切片离散分层的原理可知,同一切片层不同的离散单元具有不同的熔道高度,且在扫描方向上呈非线性变化。需要为每个熔覆单元匹配相应的工艺参数以保证熔覆层的高度与对应的离散单元保持一致,从而保证光斑大小保持不变,下面通过理论分析与实验研究建立熔覆层高度工艺模型。

#### 3.4.1 熔覆层截面轮廓数学模型建立

单道截面形状直接影响成形件的形状精度和性能,有必要建立简单的截面几何模型,为成形工艺参数的选择提供参考。根据熔道的对称性,以熔道截面的对称轴为  $Z$  坐标轴,熔覆层横截面与基板的交线为  $X$  轴建立坐标系,如图 7 所示,描述熔覆层截面的几何参数主要有熔覆层宽度  $D$ ,熔覆层高度  $H$  和熔覆层和基体的接触角  $\phi$ 。

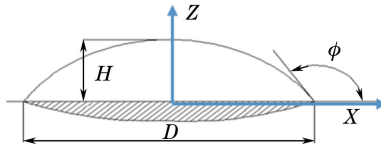


图 7 熔覆层截面几何描述示意图

Fig. 7 Geometric description diagram of cladding layer section

由文献[12],可将熔覆层截面轮廓曲线用抛物线模型来描述,并且假设其解析式为

$$z(x) = -c|x|^t + H, \quad (6)$$

通过计算得到解析式参数为

$$\begin{cases} t = (-\tan \phi \cdot d) / H \\ c = H/d^t \end{cases}, \quad (7)$$

对解析式单侧进行积分得到熔覆层的截面面积  $S$  为

$$S = 2 \int_0^d (-cx^t + H) dx = \frac{t}{t+1} Hd. \quad (8)$$

设单位长度上熔覆材料的质量为  $m$ ,激光功率为  $P$ ,扫描速度为  $V$ ,根据质量和能量守恒定律可得

$$P\eta t = m(C\Delta T + \Delta H_f), \quad (9)$$

式中  $\eta$  为激光效率,  $\Delta T$  为熔覆材料的温度变化,  $\Delta H_f$  为材料的熔化潜热,将  $t = 1/V$  代入可得熔覆层的理论面积  $S$  为

$$S = \frac{P}{(V/\eta) \cdot (C\Delta T + \Delta H_f)}, \quad (10)$$

结合(8)式可得熔覆截面几何参数和激光工艺参数的关系:

$$\frac{t}{t+1} Hd = \frac{P}{(V/\eta) \cdot (C\Delta T + \Delta H_f)}. \quad (11)$$

从(11)式可以看出,熔覆层的截面参数与激光功率、熔覆材料、激光热利用效率、扫描速度以及材料物理特性有关。

### 3.4.2 熔覆层高度工艺模型

光学系统和熔覆材料体系确定以后,熔覆层截面参数主要与激光功率、扫描速度、光斑尺寸和送粉速率有关。在单层切片内实现熔覆层高度的非线性变化,熔覆工艺参数在不同的位置需作实时调整。文献[13]通过改变送粉量的大小来改变熔覆层的高度,但是送粉系统送粉量的改变具有延迟性,不能实现实时变化,会对熔池的稳定造成影响。激光功率和扫描速度影响熔覆层的高度<sup>[14]</sup>,可根据熔覆位置的参数要求作出实时改变,由(11)式并结合设备的可操作性,采用改变扫描速度的方案来获得不等高的熔道。

在送粉量为 8 g/min,激光功率为 750 W,扫描速度在 1~16 mm/s 变化范围内进行熔覆单道实验,实验结果如图 8(a)所示。可以看出,随着扫描速度的增加,熔覆层的高度逐渐减小,且减小的速率逐渐趋于平缓。随着扫描速度的增加,激光同基体和粉末的作用减小,激光的能量作用密度减小,进入熔池的粉末量会减少,熔池尺寸减小,因此熔道高度减小。

为获得熔覆层高度与扫描速度的关系,对实验结果进行拟合。由(11)式可以看出,熔覆层截面积与扫描速度呈幂函数关系,扫描速度在 1~16 mm/s 范围内时用幂函数拟合熔覆层高度  $H$  和扫描速度  $V$  的关系,得到:

$$H = 2.59925 \cdot V^{-0.8772}, \quad (12)$$

数据拟合相关系数为 0.98065,拟合效果较好,拟合后的曲线如图 8(a)所示。

观察图 8(a)可以发现,扫描速度在 3~8 mm/s 范围内时,熔覆层高度随速度的变化率较快,且近似呈线性关系。为了便于实际计算,选用此段数据作为熔覆工艺速度参数的匹配区间,并对该段数据进行线性拟合,拟合结果为

$$H = 1.51943 - 0.15171V, \quad (13)$$

数据拟合相关系数为 0.9238,仍具有较高的拟合程度,拟合结果如图 8(b)所示。

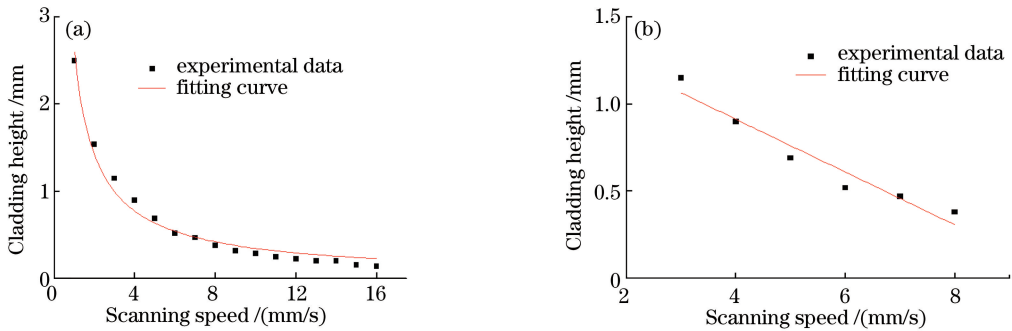


图 8 熔道高度拟合结果。(a)幂函数拟合;(b)线性拟合

Fig. 8 Fitting results of cladding height. (a) Power function fitting; (b) linear fitting

### 3.5 分段生长熔覆工艺

叶片堆积常采用两种策略。1)逐层堆积,即每片叶片熔覆完成一层,然后借助外部旋转轴实现下一叶片的当前层熔覆。叶片数较多时,需要多次旋转,成形效率低。2)独立单元成形,即每熔覆完成一个叶片单元,再进行下一叶片熔覆。该方法不适用于密排叶片,因为两单元间距较小,相邻单元间光束易发生干涉。

本文采用分段生长熔覆工艺,可在提高效率的同时避免光束干涉。具体策略为:每个扭曲薄壁单元堆积  $N$  层后进行下一单元的堆积。堆积路径如图 9 所示,假设熔覆各单元均已熔覆  $N$  层,具体过程为:1)当前单元熔覆至  $2N$  层;2)旋转至下一单元继续熔覆至  $2N$  层;3)按照步骤 2)继续进行,直至所有单元均堆积至  $2N$  层,然后按照步骤 1)、2)进入下一个循环。每熔覆完成  $N$  层,作一次旋转运动,相比逐层堆积工艺,该策略成形效率大大提高,同时避免了独立单元法的光束干涉问题。

### 3.6 实验过程

将切片分为 20 个离散单元,每个单元长度为 2 mm,第  $n$  层  $T_{n2}$  坐标系  $X$  正方向的端点所在单元开始编号为 1。选用 3.4.2 节工艺参数,扫描速度选用范围为 3~8 mm/s,熔覆层高度变化区间为 1.15~0.39 mm。设定激光熔覆喷头沿主中心每次旋转角度  $\Delta\alpha$  为  $0.15^\circ$ ,每层相对上次扭转角  $\Delta\theta$  为  $0.25^\circ$ ,

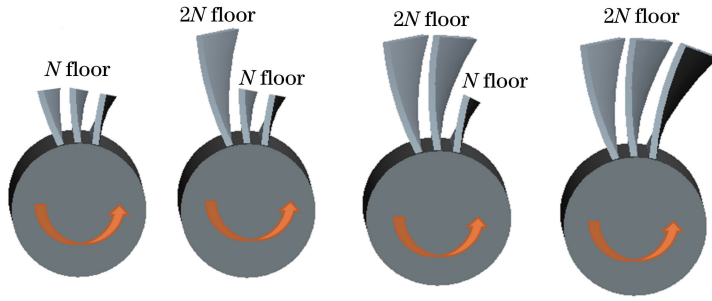


图 9 间歇熔覆工艺路径示意图

Fig. 9 Path diagram of intermittent cladding process

切片厚度在 0.39~0.53 mm 之间变化,共熔覆 320 层。根据(3)式可计算第  $n$  层第  $k$  个离散单元相对于第  $(n-1)$ 层第  $k$  个单元的倾斜角度  $\beta_{nk}$  为

$$\beta_{nk} = \arctan \frac{l_k \sin \Delta\theta}{\{R - l_k \sin [(n-1)\Delta\theta]\} \cdot \sin(\Delta\alpha)}, k \in [1, 20], \quad (14)$$

每层切片的 20 个离散单元位置和光束姿态利用 KUKA 机器人的几何操作命令按照(5)式进行计算。第  $n$  层第  $k$  个离散单元的实际生长高度为

$$h_{nk} = \{R - l_k \sin [(n-1)\Delta\theta]\} \cdot \sin \Delta\alpha / \beta_{nk}, \quad (15)$$

将  $h_{nk}$  带入(13)式可以求出第  $k$  点需要的实际扫描速度,经计算在选用工艺参数范围内的熔覆层高度满足单元实际高度要求。

按照切片离散分层堆积法,利用熔覆层高度模型变速度堆积二元扭曲薄壁件,采用分段生长熔覆堆积工艺成形密排叶片,两叶片单元间隙圆心角为  $15^\circ$ ,每个叶片间歇层数  $N$  为 10,共堆积 190 层,成形过程如图 10 所示,成形件如图 11 所示。

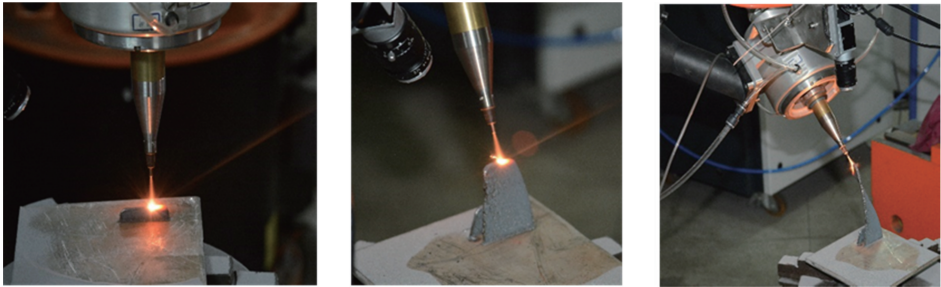


图 10 扭曲件堆积过程

Fig. 10 Forming process of twisty parts

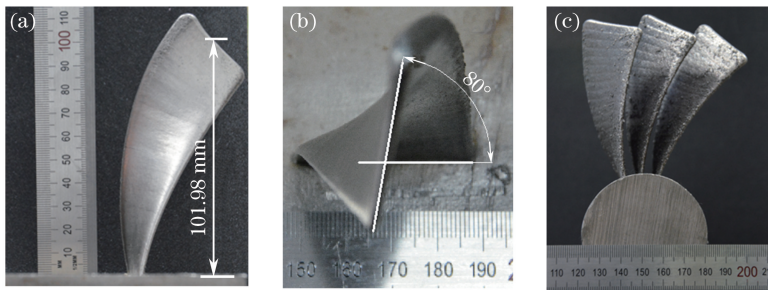


图 11 扭曲件及模拟密排叶片成形件。(a)扭曲件主视图;(b)扭曲件俯视图;(c)叶片成形件

Fig. 11 Formed parts of twisty parts and simulated close-packed blades. (a) Main view of twisty parts; (b) top view of twisty parts; (c) formed parts of blades

#### 4 成形件检测

成形件表面平整,无明显宏观裂纹。二元扭曲件的扭转角为  $80^\circ$ ,与理论值相等。顶端截面中心距基体

为 101.98 mm, 与理论值 104.04 mm 的相对误差为 -1.98%, 误差较小, 密排叶片单元顶端中心到基面的深度为 81 mm, 单元间的最小间距为 6.5 mm, 深度与单元间隙比为 12.46。

分别在二元扭曲件的端部和中部进行壁厚测量, 测量取样位置如图 12 所示, 测量结果为图 13。随着层数的增加, 端部 1 处的扫描速度增加, 熔池寿命减少, 熔覆层宽度略呈下降趋势, 最大相对误差为 -5.93%。中部的扫描速度基本保持不变, 随熔覆层数的增加, 有热量的积累, 熔覆层宽略有增加, 最大相对误差为 3.75%。随着层数的增加, 端部 2 的扫描速度减小, 熔池尺寸变大, 呈现出一定的宽化现象。最大相对误差为 6.25%。端部 1、中部、端部 2 的厚度基本稳定在 2.7 mm 左右。

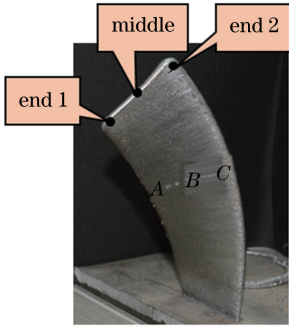


图 12 测量取样位置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of sampling positions for measurement

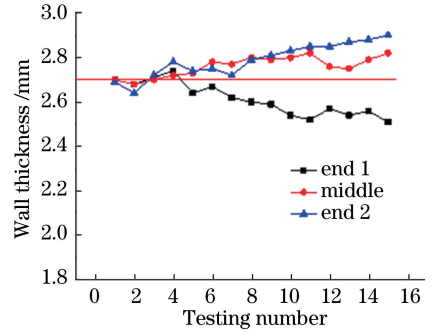


图 13 不同位置的壁厚

Fig. 13 Wall thicknesses at different locations

在图 12 所示二元扭曲件中段的 A、B、C 三个位置进行线切割取样以制备金相试样, 并对试样进行打磨、抛光和腐蚀处理。在 SU500 型扫描电镜 (SEM) 下进行观察, 得到的扫描电镜结果如图 14 所示。

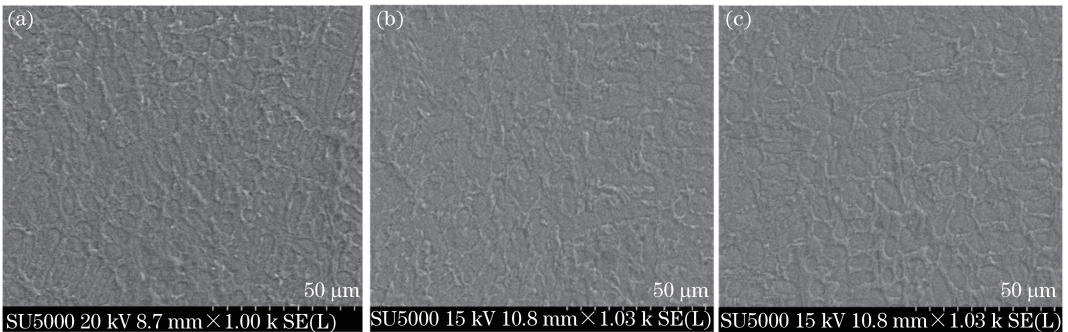


图 14 图 11 中 (a)A、(b)B、(c)C 处试样的扫描电镜结果

Fig. 14 SEM images of samples located at A, B, C in Fig. 11

激光熔覆成形是一个粉末快速熔化、熔池快速凝固的过程, 具有极大的过冷度, 所以晶粒较为细小。取样位置远离基体, 熔池的散热由基体处的三维散热转化为二维散热, 组织为致密的枝晶。从位置 A 到 C 扫描速度逐渐增加, 单位时间内的热量吸收增加, 热量积累, 熔池的寿命有所增加, 晶粒尺寸略有增大, 成形件整体无明显气孔、裂纹等缺陷, 组织致密, 具有良好的冶金质量。

分别在二元扭曲件的端部和中部进行显微硬度测量, 结果如图 15 所示。端部 1、中部、端部 2 的显微硬度分别在 591.3~700.5 HV、586.5~710.4 HV、585.8~703.1 HV 之间。靠近基体处硬度值较低, 端部 1 和中部硬度值基本保持稳定, 端部 2 由于扫描速度较小, 产生热量积累, 晶粒变大, 硬度值有所下降, 显微硬度整体分布较为平稳。

## 5 结 论

基于光内送粉技术, 针对多元薄壁扭曲件特点, 建立了熔覆层截面与工艺参数之间的抛物线解析式, 并根据单道实验结果获得了熔覆层高度与扫描速度之间的工艺模型, 完成了二元扭曲薄壁件的成形, 采用分段生长熔覆工艺完成了密排模拟叶片的堆积。检测结果表明: 二元扭曲薄壁件表面平整, 尺寸误差为



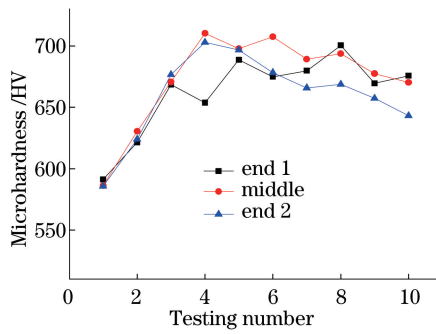


图 15 不同位置的显微硬度

Fig. 15 Microhardness at different locations

-1.98%; 密排叶片单元顶端中心到基面的深度为 81 mm, 单元间的最小间距为 6.5 mm, 深度与单元间隙比为 12.46; 成形件组织致密, 显微硬度整体分布均匀。

### 参 考 文 献

[1] Zhu Yongwei, Xu Jiawen, Zhao Jianshe. 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. 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 Jianhui, Kuang Ning. Ceramic shell technique for large complex thin wall investment structural castings[J]. Foundry Technology, 2016, 37(3): 488-491.  
魏建辉, 匡宁. 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] 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.

[4] Shang Xiaofeng, Liu Weijun, Wang Wei, et al. Slope limit of part made in metal powder laser shaping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 97-100.  
尚晓峰, 刘伟军, 王维, 等. 金属粉末激光成形零件倾斜极限[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 97-100.

[5] Wang Xuyue, Wang Yanfei, Jiang Hao, et al. Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103006.  
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.

[6] Yu Lingling, Shi Shihong, Di Keyun. Research on 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. 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.

[7] Fu Geyan, Liu Yu, Shi Shihong, et al. Control of process parameters for accumulate screwy thin-walled part by laser cladding with coaxial inside-beam powder feeding[J]. Electromachining and Mould, 2014(2): 43-46.  
傅戈雁, 刘宇, 石世宏, 等. 光内同轴送粉激光熔覆堆积扭曲薄壁件工艺参数的控制[J]. 电加工与模具, 2014(2): 43-46.

[8] Keist J S, Palmer T A. Role of geometry on properties of additively manufactured Ti-6Al-4V structures fabricated using laser based directed energy deposition[J]. Materials & Design, 2016, 106: 482-494.

[9] Abele E, Stoffregen H A, Kniepkamp M, et al. Selective laser melting for manufacturing of thin-walled porous elements[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 114-122.

[10] Dwivedi R, Zekovic S, Kovacevic R. A novel approach to fabricate uni-directional and branching slender structures using laser-based direct metal deposition[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 1246-1256.

[11] Meng Weidong, Shi Shihong, Shi Tuo, et al. Forming technology research of laser accumulation of reducing solid of revolution with changing laser head posture[J]. Chinese J 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.

- [12] Lu Bin, Zhu Gangxian, Wu Jizhuo, *et al.* Laser direct forming process of thin-walled blade using variable spot by inside-beam powder feeding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1203003.  
陆 斌, 朱刚贤, 吴继璋, 等. 基于光内送粉激光变斑直接成形薄壁叶片的工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203003.
- [13] Wang Xuyue, Guo Huiru, Xu Wenji, *et al.* Laser cladding forming of a ramp thin wall with variable powder feed rate [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 21(6): 701-705.  
王续跃, 郭会茹, 徐文骥, 等. 变送粉量法斜坡薄壁件的激光熔覆成形研究[J]. 中国机械工程, 2011, 21(6): 701-705.
- [14] Shi Gaolian, Shi Shihong, Wang Chen. Research on melt-path forming based on internal powder feeding through a hollow laser beam[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 385-390.  
石皋莲, 石世宏, 王 晨. 基于环形光内送粉的激光熔覆熔道成形研究[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 385-390.