

异形基面三元叶片激光送粉增材制造研究

李宽¹, 石拓^{2*}, 石世宏^{1**}, 傅戈雁¹, 王明雨¹, 张荣伟¹, 刘广¹

¹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 基于激光内送粉熔覆技术,进行了异形基面三元叶片的熔覆成形研究。根据三元叶片的大倾角、大扭曲等结构特征提出了流线分层法,解决了三元叶片成形过程中轨迹规划的问题。根据流线分层法得到了熔覆成形时光内送粉喷头的空间运动轨迹,并进行了三元叶片的熔覆成形。结果表明:三元叶片成形件的表面平整,表面平均粗糙度值在 $4.065 \mu\text{m}$ 以内,有效缓解了台阶效应;三元叶片与异形基面实现了较好的冶金结合,成形件的平均厚度为 5.97 mm ,厚度的相对误差为 $-1.4\% \sim 1.03\%$,扭转角的相对误差为 -4.67% ,成形精度较高;随着成形件高度的增加,激光熔池处的热积累明显,显微硬度略微降低,显微组织略微增大,成形件显微硬度在 $348.3 \sim 360.4 \text{ HV}$ 之间,金相组织整体致密均匀,无明显的孔洞或裂纹缺陷。

关键词 激光技术; 光内送粉; 流线分层; 三元叶片

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0202019

1 引言

三元叶片多存在于航空航天涡轮喷气发动机、大型船舶燃气轮机和汽车先进涡轮发动机的叶轮中,三元叶片与叶轮机体的结合处大多为不规则的异形曲面。三元叶片是一种特殊的复杂空间结构类零件,具有大倾角、大扭曲等结构特征,符合三元流动设计理论,目的是使流体经过叶轮时减少能量损耗,提高叶轮的工作效率。因此,三元叶片的制造受到了极大重视,其独特的结构也对加工提出了严苛要求。三元叶片主要通过数控电火花加工与数控铣削等技术加工而成^[1-2],加工过程中材料去除量大且加工周期较长。20 世纪 90 年代,一种新型的成形技术——激光增材制造被提出^[3-5],该技术可用于复杂结构件的高效、无模制造。因此,对激光增材制造三元叶片的研究具有重要的应用价值^[6-7]。目前,针对激光熔覆成形三元叶片和复杂动力结构件的相关研究还存在许多不足。

研究人员对成形件进行分层的方法多为水平分

层法,或在水平分层的基础上使层间错位,实现有限的倾角或扭曲,但这会产生明显的台阶效应,并且这类分层方法仅适用于在平板或圆柱母线上的熔覆成形,不适用于在曲面上熔覆成形三元叶片。

石龙飞^[8]采用激光近净成形技术,利用特定软件得到了加工路径的轨迹代码,在水平方向上逐层扫描成形了单个三元叶片,但扭转与倾斜处的叶片表面具有阶梯效应;王鑫林^[9]研究了不同的工艺参数(激光功率、离焦量、扫描速度、单层高度提升量、送粉量等)对三元叶片垂直薄壁、悬垂薄壁和斜坡薄壁结构成形特征的影响,为激光熔覆成形三元叶片的制造提供了理论指导,但他并未熔覆成形出三元叶片;余超等^[10]采用在激光束与垂直方向之间设置预设夹角的方法,近净成形了 60° 大倾角无支撑的斜薄壁件;王聪等^[11]建立了高度工艺模型,熔覆时使熔覆喷头轴线与熔覆层法线重合,成形了具有大扭转角的扭曲薄壁件;Dwivedi 等^[12]利用人工智能原理直接基于数字模型制造零件,实现了激光近净成形的自动化,成功熔覆出了简单的扭曲叶轮。张

收稿日期: 2021-07-06; 修回日期: 2021-07-20; 录用日期: 2021-08-09

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

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

海宁^[13]采用激光熔覆再制造方法对磨损的滚筒螺旋叶片进行了轨迹验证和激光修复,熔覆后的叶片几何特征与原叶片基本一致。任德亮等^[14]沿曲面短边方向由下向上进行“之”字形激光熔覆,熔覆效果较好;多道多层搭接时,下一层的起点相对上一层的起点偏移 1.5 mm,得到的熔覆成形效果较好,但他并未涉及如何在异形基面上熔覆成形件。

目前,在异形基面上进行激光送粉增材制造三元叶片的研究还鲜有报道,该类成形件具有大倾角、大扭转的结构特征,台阶效应和曲面熔覆层内的应力难以消除,易开裂。针对此类难题,本研究团队基于实验室自主研发的光内送粉熔覆喷头^[15-17],提出了流线分层的方法,即将三元叶片沿主基面径向圆弧的切平面进行等距划分,以分割单元表示熔覆喷头的运动轨迹信息,最终成功实现了三元叶片的熔覆成形,为其他复杂动力结构件的成形提供了新思路。

2 实验材料及设备

2.1 实验材料

实验异形基体材料为 45 钢,成形粉末材料采用 Inconel 718 合金粉末,粉末粒径为 53~150 μm ($D_{10}=58.1 \mu\text{m}$, $D_{50}=94.2 \mu\text{m}$, $D_{90}=154.0 \mu\text{m}$),该粉末的化学成分如表 1 所示。

表 1 Inconel 718 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Inconel 718 alloy powder

Element	Mass fraction / %
Ti	0.680
Cr	20.490
Fe	20.680
Nb	5.230
Mo	3.230
Co	0.048
Ni	Bal.

2.2 实验设备

实验使用的激光器为武汉锐科光纤激光技术股份有限公司生产的 RFL-C6000W 型光纤激光器,熔覆喷头为本研究团队自主研发的中空光内送粉喷头,使用六轴 KUKA 机器人控制喷头的轨迹,送粉器型号为 GTV PF2/2;熔覆过程中的保护气体和送粉载气均为氮气。

熔覆喷头采用中空环形光内送粉方式,即“光包粉”的耦合结构,原理如图 1 所示。激光束经圆锥反射镜反射到环形反射镜上,再由环形反射镜聚焦成中空环形光斑。粉管和准直气管安装在中空环形光斑的中轴线上,送粉时粉管外围的准直气管通入气体,增加粉末的集束性;通过调节准直气与载气的气压,可以降低重力对粉末的影响,从而实现在空间中任意角度熔覆。相较于传统的光外送粉,光内送粉熔覆喷头对粉末的集束性更强,光粉耦合效果更好。

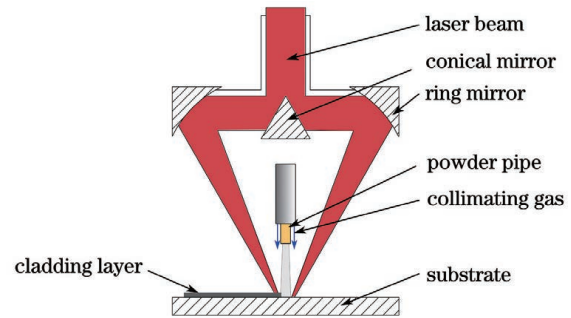


图 1 中空环形光内送粉原理

Fig. 1 Principle of powder feeding in hollow ring laser

3 实验方法

3.1 建立零件模型

基于航空涡轮风扇发动机叶片,本研究团队设计了一个三元叶片结构件,如图 2 所示。三元叶片基板的上底面圆半径 $R_1=25 \text{ mm}$,基板的下底面圆半径 $R_2=125 \text{ mm}$,导流板母线的半径 $r_1=100 \text{ mm}$ 。

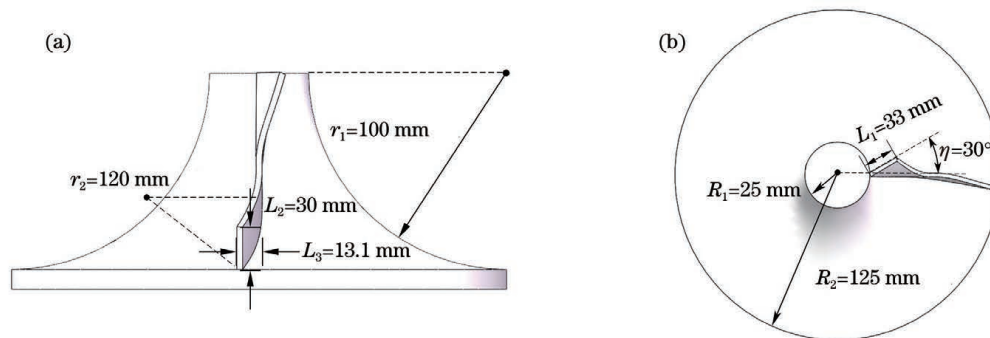


图 2 设计模型。(a)主视图;(b)俯视图

Fig. 2 Designed model. (a) Front view; (b) top view

叶片前沿端面长 $L_1 = 33 \text{ mm}$, 最大扭转角 $\eta = 30^\circ$, 叶片尾缘长 $L_2 = 30 \text{ mm}$, 尾缘弯曲部分为半径 $r_2 = 120 \text{ mm}$ 的圆弧叶片, 尾缘偏移距离 $L_3 = 13.1 \text{ mm}$.

3.2 流线分层法

上述三元叶片在流动方向上是弯曲的, 呈三维扭曲状, 其空间示意图如图 3 所示。该叶片的成形过程可以看成是平滑曲面 F 沿着其中心的法线 L 作均匀移动, 法线始终在叶片主基平面上。与此同时, 叶片前部曲线扭转, 叶片尾部曲线弯转, 即叶片前部和尾部与叶片主基平面的角度呈曲线变化。

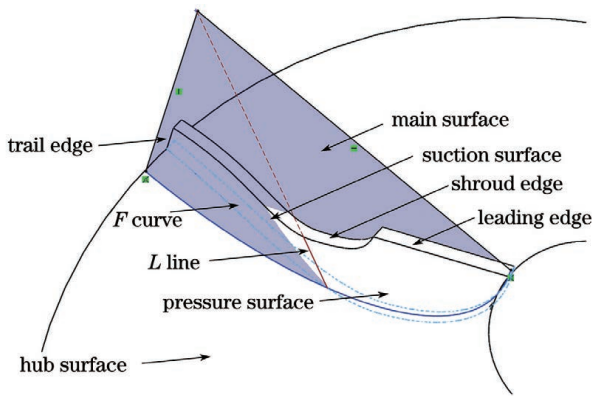


图 3 三元叶片模型示意图

Fig. 3 Model diagram of ternary blade

该三元叶片具有复杂的扭曲特征, 若采用传统的水平分层方法进行熔覆, 成形件的侧面会产生阶梯效应, 且在熔覆大倾角扭曲结构时熔池易塌陷。

同时, 用于堆积叶片的基板也呈内凹曲面, 并非常见的水平基板, 叶片各单元的位置及方向信息都难以获取。为了在内凹曲面上成形三元叶片, 本研究团队提出了流线分层法, 即: 沿主基面径向圆弧的切平面切片, 再将单个熔覆层等分为若干个分割单元的分层方法。

该三元叶片的主基面为一圆弧面, 如图 3 所示。先在主基面上进行叶片单元的划分, 沿主基面径向圆弧的切平面进行等距划分, 即 Δh 为每层切片的高度, 图 4(a) 所示为第 n 层切片。如图 4(b) 所示, 同一切片内不同单元的扫描方向始终与该单元的切线方向一致, 沿着扫描方向, 各单元部分的高度和倾斜角度不同, 整个切片呈圆弧状。在扫描方向上以 Δl 等距划分圆弧切片, 得到的分割单元如图 4(c) 所示, 各分割单元内部的高度相同, 且在主基面上对应的圆心角 $\Delta\varphi$ 相同。用分割单元上下底平面的中心连线构成的向量来表征该分割单元的高度与偏转方向, 堆积时光束轴线与分割单元的方向保持一致, 图 4(d) 所示为第 n 层第 k 个单元 E_{nk} 。对叶片在主基面上再次分割分层后, 按照三元叶片的扭曲形状对主基面叶片单元进行空间变换, 包括对叶片前沿部分和尾缘部分进行空间变换。叶片主基面上的分割单元在叶片前沿部分以及尾缘部分的变换包括平移和旋转, 从而得到叶片前沿部分和尾缘部分分割单元的位置和姿态信息, 如图 4(e)、(f) 所示。

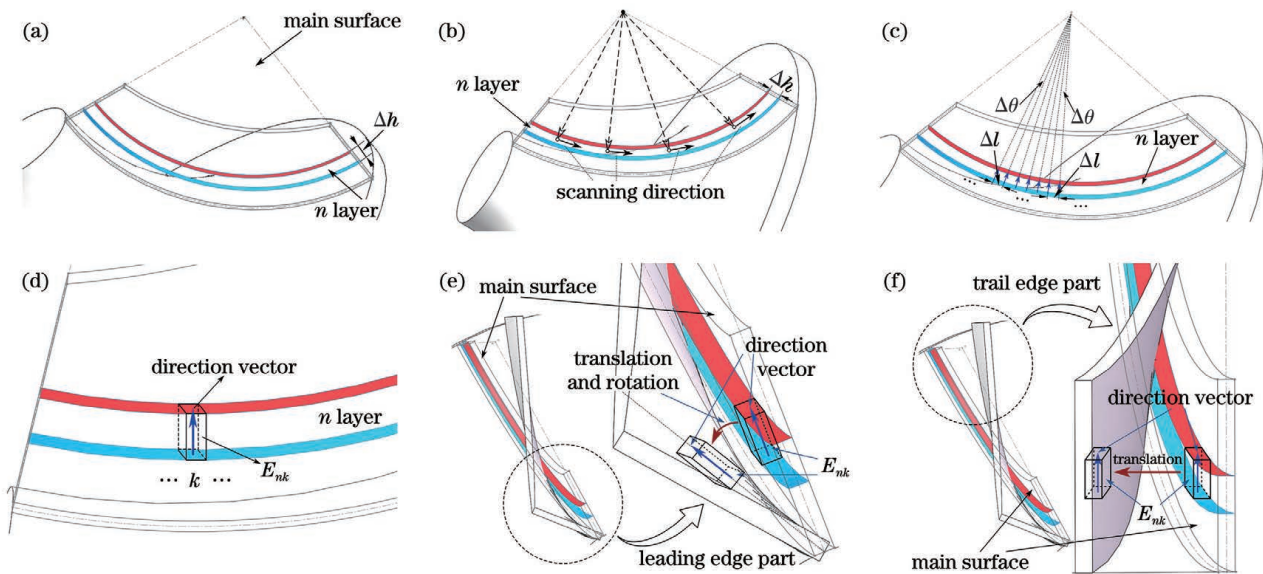


图 4 三元叶片的分层方式。(a) 径向切片; (b) 扫描方向; (c) 扫描方向分割; (d) 分割单元; (e) 叶片前沿部分; (f) 叶片尾缘部分

Fig. 4 Layered approach of ternary blade. (a) Slice along radial direction; (b) scanning direction; (c) segmentation in the scanning direction; (d) discrete unit; (e) blade leading edge part; (f) blade trailing edge part

3.3 轨迹规划

3.3.1 三元叶片的轨迹规划

三元叶片的成形轨迹较为复杂,由 3.2 节的流线分层原理可知,喷头的运动轨迹规划主要是各分割单元的位置和偏转方向的计算过程,在得到各切片层内分割单元的位置和方向后进行拼接即可得到叶片的成形轨迹。

喷头的运动轨迹实际上是光斑所在的工具坐标系相对于基体的基面坐标系的运动,包括旋转和平移运动。对于本实验中三元叶片的成形,先将叶片零件沿主基面径向以 Δh 长度进行 n 等分,同时再将第 n 层切片以 Δl 等距划分,每段 Δl 在主基面上对应的圆心角为 $\Delta\theta$ 。以叶片前沿与导流体的交点为原点建立基面坐标系 C_1 ,且该坐标系的 z 轴与叶片前沿起始点的切平面垂直, y 轴沿着导流体的轴线方向,同时也是喷头扫描轨迹的分方向;然后以基面坐标系 C_1 作为喷头工作位置的初始工具坐标系,且喷头轴线与基坐标系 z 轴重合。由喷头所确定的工具坐标系位置的移动与姿态的变化分为主基面、叶片前沿部分和尾缘部分,轨迹的形成可分为以下几个过程:

1) 如图 5(a)所示,叶片堆积到第 n 层时,在主

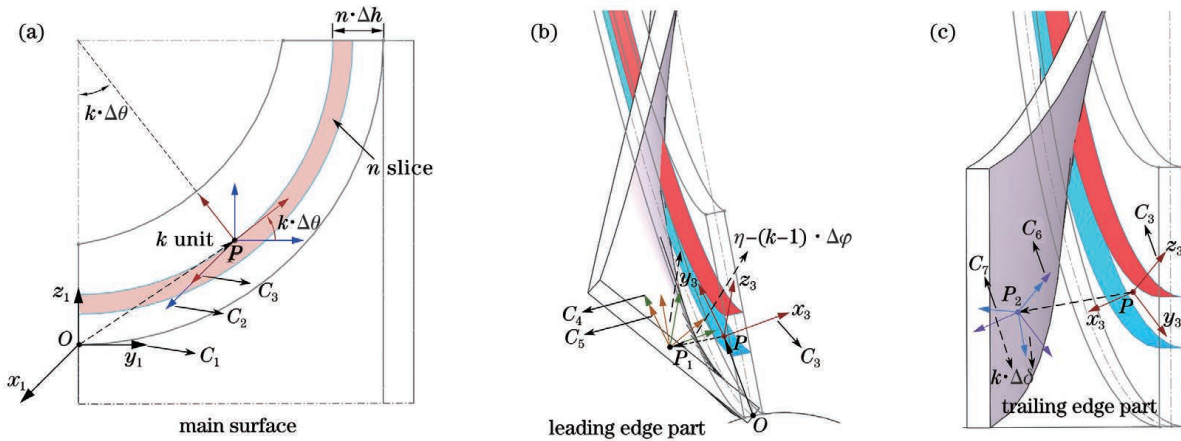


图 5 三元叶片成形轨迹的形成过程。(a)主基面;(b)叶片前沿部分;(c)叶片尾缘部分

Fig. 5 Formation process of forming trajectory of ternary blade. (a) Main surface; (b) blade leading edge part; (c) blade trailing edge part

3.3.2 分割单元的计算

由 3.3.1 节可知,为了实现三元叶片的轨迹成形,需要对多个坐标系作多次变换,各个工具坐标系的位置移动和姿态变化以及各分割单元的方位计算可分为以下几个过程:

基平面上将工具坐标系 C_1 沿着 \overrightarrow{OP} 向量平移至第 n 层切片第 k 个单元点 P ,得工具坐标系 C_2 。

2) 将工具坐标系 C_2 绕自身 x 轴旋转 $k \cdot \Delta\theta$ 得到工具坐标系 C_3 ,此时工具坐标系 C_3 的 z 轴与单元 E_{nk} 的切平面垂直,且其延长线指向主基平面圆心。

3) 如图 5(b)所示,在成形叶片前沿部分时,将工具坐标系 C_3 平移至 C_4 坐标系,平移向量为 $\overrightarrow{PP_1}$;再将此时的工具坐标系 C_4 绕着自身的 y 轴旋转 $\eta - (k-1) \cdot \Delta\varphi$,得到工具坐标系 C_5 ,其中 η 为叶片前沿部分端面的最大扭转角, $\Delta\varphi$ 为叶片前沿部分每层切片间相邻分割单元的相对扭转角。此时 C_5 坐标系为第 n 层 E_{nk} 单元在叶片前沿部分的参考坐标系,并且此时坐标系的 y 轴与该分割单元的扫描轨迹一致, z 轴与该分割单元的方向向量重合。

4) 如图 5(c)所示,在成形尾缘部分时,将工具坐标系 C_5 沿着向量 $\overrightarrow{PP_2}$ 平移至 C_6 坐标系,再将此时 C_6 坐标系绕着自身的 z 轴旋转 $k \cdot \Delta\delta$ (此处的 $\Delta\delta$ 为叶片尾缘部分每层切片间相邻分割单元的相对偏转角),得到工具坐标系 C_7 。此时 C_7 坐标系为第 n 层 E_{nk} 单元在叶片尾缘部分的参考坐标系,且 E_{nk} 单元在主基面和尾缘部分的方向向量相等。

1) 设空间某点 P 在基体的基面坐标系 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 在基体的基面坐标系 C_1 内作旋转与平移变换时,空间内的 P 点在这两个坐标系中的向量满足

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

式中： \mathbf{R}_{1i} 、 \mathbf{T}_{1i} 分别为工具坐标系在基体的基面坐标系中的旋转变换矩阵与平移变换矩阵； \mathbf{M}_{1i} 为齐次变换矩阵，描述了坐标系位置与姿态的变换。根据 3.2 节所述的三元叶片的分层方式，为每个分割单元分配一个坐标系，第 n 层切片第 k 个单元的工具坐标系 C_{nk} 相对于基体的基面坐标系 C_1 作了多次齐次变换。齐次变换矩阵为

$$\mathbf{M}_{1nk} = \mathbf{M}_{12} \cdot \mathbf{M}_{23} \cdot \dots \cdot \mathbf{M}_{(i-1)i} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{1nk} & \mathbf{0} \\ \mathbf{T}_{1nk} & \mathbf{1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中： \mathbf{T}_{1nk} 、 \mathbf{R}_{1nk} 分别表示第 n 层切片第 k 个单元

的工具坐标系 C_{nk} 相对于基体的基面坐标系 C_1 所作的平移和旋转变换。由此得各分割单元相对于基面坐标系的位置与姿态的变化，喷头按 \mathbf{T}_{1nk} 与 \mathbf{R}_{1nk} 进行运动，即能实现三元叶片的熔覆成形。

2) 当叶片单元在主基面上时，如图 5(a) 所示， C_1 坐标系经过平移得到 C_2 坐标系， C_2 坐标系再经过旋转得到 C_3 坐标系，则主基面第 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

$$\mathbf{M}'_{1nk} = \mathbf{M}_{12} \cdot \mathbf{M}_{23}, \quad (3)$$

$$\text{式中：} \mathbf{M}_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T'_x & T'_y & T'_z & 1 \end{pmatrix}; \mathbf{M}_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \alpha = k \cdot \Delta\theta; \begin{pmatrix} T'_x \\ T'_y \\ T'_z \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 0 \\ r_1 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha - [r_1 - (r_1 - n \cdot \Delta h) \cdot \cos \alpha] \cdot \sin \alpha \\ r_1 \cdot \sin^2 \alpha + [r_1 - (r_1 - n \cdot \Delta h) \cdot \cos \alpha] \cdot \cos \alpha \end{pmatrix}^T。$$

3) 当叶片单元在叶片前沿部分时，如图 5(b) 所示， C_3 坐标系经过平移得到 C_4 坐标系， C_4 坐标系再经过旋转得到 C_5 坐标系，则叶片前沿部分第 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

$$\mathbf{M}''_{1nk} = \mathbf{M}'_{1nk} \cdot \mathbf{M}_{34} \cdot \mathbf{M}_{45}, \quad (4)$$

$$\text{式中：} \mathbf{M}_{34} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T''_x & T''_y & T''_z & 1 \end{pmatrix}; \mathbf{M}_{45} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \beta = \eta - (k - 1) \cdot \Delta\varphi; \begin{pmatrix} T''_x \\ T''_y \\ T''_z \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} -n \cdot \Delta h \cdot \tan \beta \cdot \cos \beta \\ 0 \\ -n \cdot \Delta h \cdot \tan \beta \cdot \sin \beta \end{pmatrix}^T。$$

4) 当叶片单元在叶片尾缘部分时，如图 5(c) 所示， C_3 坐标系沿着向量 $\overrightarrow{PP_2}$ 平移得到 C_6 坐标系， C_6 坐标系再绕其 z 轴顺时针旋转 $k \cdot \Delta\delta$ 得到 C_7 坐标系，则叶片尾缘部分第 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

$$\mathbf{M}'''_{1nk} = \mathbf{M}'_{1nk} \cdot \mathbf{M}_{36} \cdot \mathbf{M}_{67}, \quad (5)$$

$$\text{式中：} \mathbf{M}_{36} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T'''_x & T'''_y & T'''_z & 1 \end{pmatrix}; \mathbf{M}_{67} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \gamma = k \cdot \Delta\delta; \begin{pmatrix} T'''_x \\ T'''_y \\ T'''_z \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} r_2 \cdot (1 - \cos \gamma) \cdot (\cos \gamma + \sin \gamma) \\ r_2 \cdot (1 - \cos \gamma) \cdot (\cos \gamma - \sin \gamma) \\ 0 \end{pmatrix}^T。$$

4 实验结果

4.1 三元叶片成形件的堆积

本次实验基于实验室自主研发的光内送粉熔覆喷头采用变工艺参数的方法进行,曲面熔覆时成形件内应力会增大。为防止三元叶片与基体结合处发生开裂现象,提高最初的 5 道熔覆层的激光功率,并且熔覆成形前将基体预热到 400 °C 左右,实验过程中用平板调温电炉对基体进行保温处理。

熔覆层前 5 道的激光功率由 3600 W 逐层降低至 2100 W,每层降低 300 W,叶片前中部(即在主基平面对应的圆心角为 0°~40°处)的扫描速度为 7.5 mm/s,41°~64°处的扫描速度由 7.5 mm/s 线性增加到 12.5 mm/s,64°~90°处的扫描速度为

12.5 mm/s,离焦量为 -8.5 mm,送粉量为 45.6 g/min。根据 3.3 节得到的轨迹信息进行三元叶片的熔覆成形,具体熔覆过程如图 6 所示,三元叶片成形件实物图如图 7 所示。

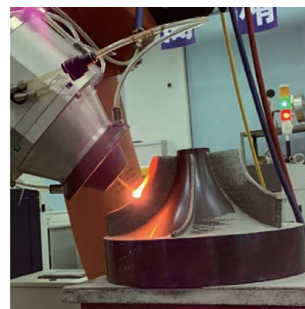


图 6 三元叶片的成形过程

Fig. 6 Forming process of ternary blade

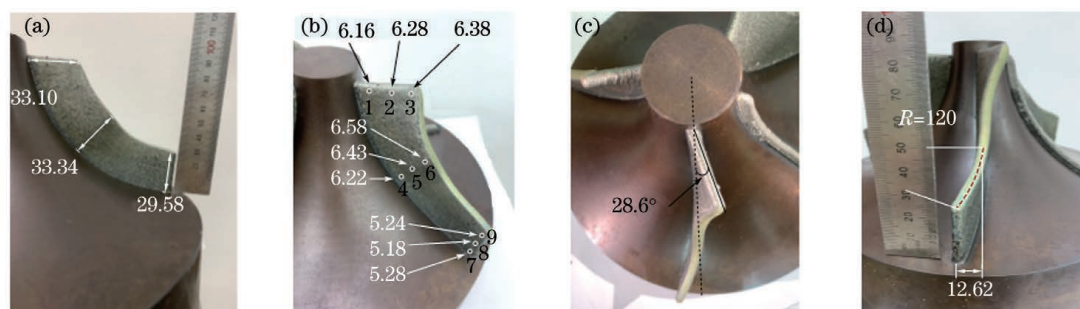


图 7 三元叶片成形件。(a) 叶片高度;(b) 叶片厚度;(c) 叶片前沿;(d) 叶片尾缘

Fig. 7 Ternary blade after forming. (a) Blade height; (b) blade thickness; (c) blade leading edge; (d) blade trailing edge

4.2 三元叶片成形件的检测

4.2.1 尺寸误差分析

三元叶片前沿与中部的理论尺寸均为 33 mm,尾缘为 30 mm。由图 7 可知,三元叶片前沿的高度为 33.10 mm,中部为 33.34 mm,尾缘为 29.58 mm,其相对误差分别为 0.3%、1.03%和 -1.4%。叶片前沿 1、2、3 处的厚度分别为 6.16、6.28、6.38 mm,中部 4、5、6 处的厚度分别为 6.22、6.43、6.58 mm,尾缘 7、8、9 处的厚度分别为 5.28、5.18、5.24 mm,这几处的平均厚度为 5.97 mm。叶片前沿扭转角为 28.6°,与理论扭转角 30°的相对误差为 -4.67%;叶片尾缘偏移量为 12.62 mm,与理论值 13.1 mm 的相对误差为 -3.66%。叶片前沿到中部的宽度逐渐增加,增加的方向为熔覆时的扫描方向以及垂直于扫描轨迹的法线方向。这是由于逐层熔覆时产生了热积累,熔池存在的时间更长,对流更充分,导致熔道的宽度和高度略微增加;而尾缘处的扫描速度较快,在激光功率及冷却条件不变的情况下,熔池存在时间有所减少,拖尾区的范围也相应缩小,熔道的宽度和高度随之减小。最终三元叶片成

形件的精度较高,实际尺寸与理论值之间的相对误差较小,且三元叶片的整体形貌较好,熔覆起点与终点较为平整,与基体结合紧密,无宏观裂纹。

4.2.2 显微硬度分析

如图 8(a)所示,取三元叶片中部由下到上 a、b、c 三处位置,测量成形件的显微硬度,每个区域沿着由下到上的方向即 a 到 c 的方向打 8 个显微硬度点。实际测量数据如图 8(b)所示。a、b、c 三处区域的显微硬度范围在 353.5~360.4 HV、349.2~360.2 HV、348.3~355.6 HV 之间,可以发现靠近基体处的 a 点显微硬度较高,远离基体位置的 c 点硬度较低,硬度数值上下有些许波动,可能是由于同一选择区域中的测量值既包含细晶区又有重熔区,但是大体可以看出硬度的高低趋势,三元叶片成形件的显微硬度基本保持稳定。

4.2.3 表面粗糙度分析

采用三维光学轮廓仪对图 8(a)中 a、b、c 三个位置的 R、L 两侧表面进行表面粗糙度测量,各位置表面的原始三维形貌如图 9 所示。根据 ISO 25178 标准,采用 S-L 滤波处理完成波长截断。低通滤波

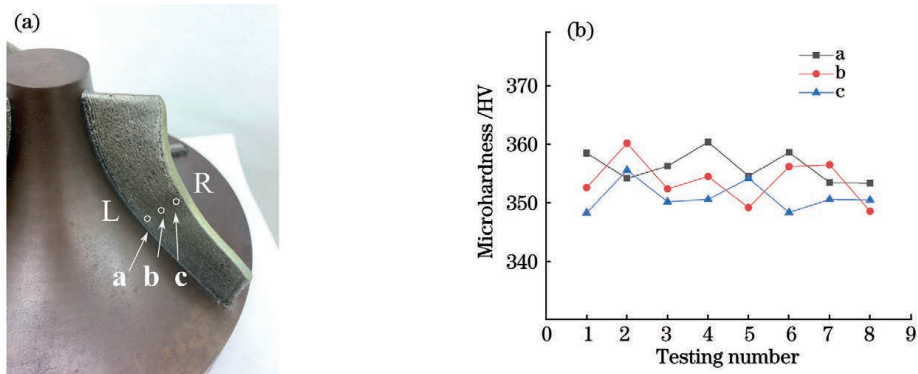


图 8 显微硬度测量。(a)测量位置;(b)a、b 和 c 处的显微硬度

Fig. 8 Microhardness measurement. (a) Measurement positions; (b) microhardness at positions a, b, and c

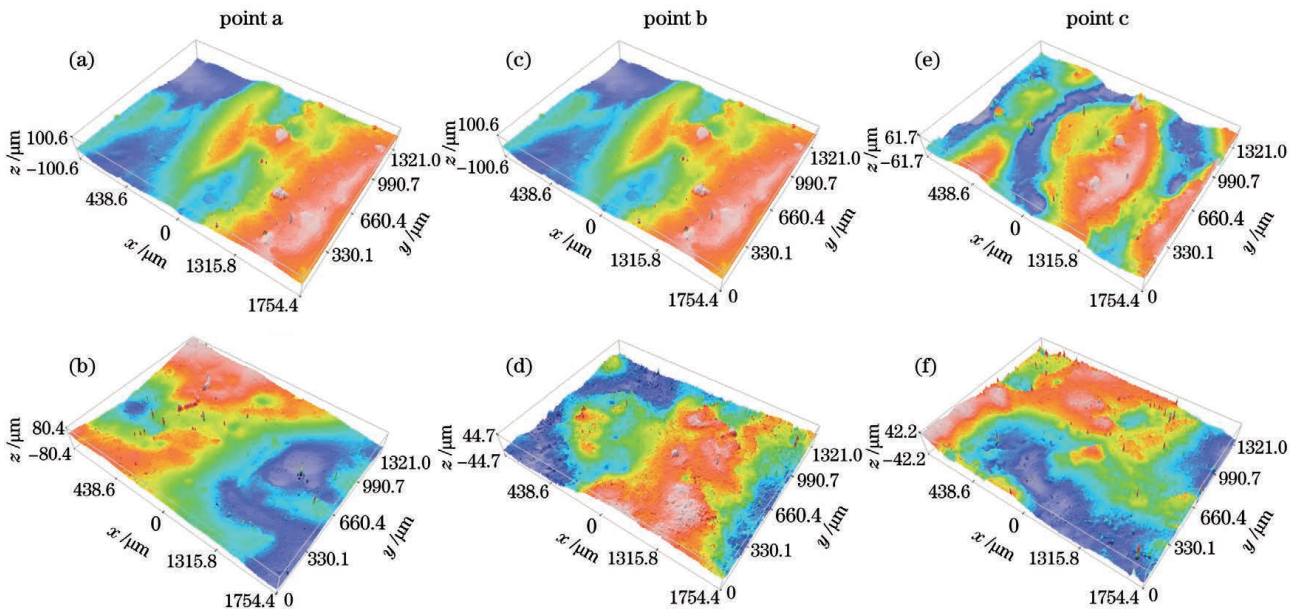


图 9 三元叶片两侧表面的三维形貌图。(a) (c) (e) R 侧; (b) (d) (f) L 侧

Fig. 9 Three-dimensional topographies of both sides of ternary blade. (a) (c) (e) R side; (b) (d) (f) L side

器(S-filter)设置为 $8\ \mu\text{m}$,用于去除设备测量噪声,得到基础表面;高通滤波器(L-filter)设置为 $250\ \mu\text{m}$,用于去除样品表面的干扰形状,得到测量表面。两侧表面评估区域的平均粗糙度值(S_a)如表 2 所示。由表 2 可知,三元叶片 L 侧 a、b、c 处的表面粗糙度值较低且较稳定,R 侧的值较大且呈下降的趋势。这是由于叶片前端的扭转方向为 R 侧,熔覆过程中被加热的粉末在重力作用下易黏附在熔池的 R 侧,而黏附在 L 侧的较少,所以 L 侧的表面粗糙度数值较低。又由于 a 处靠近基体,喷头中的保护气易在此处形成湍流,粉末不能被及时带走,被湍流带入熔池中,而 b 处和 c 处距基体的高度逐渐增大,保护气在熔池处垂直于熔池,能够及时带走熔池外围的粉末,减小了外围粉末对熔池的干扰,所以 R 侧的表面粗糙度数值呈下降的趋势。最终得到的

三元叶片表面平整,有效降低了台阶效应,表面粗糙度在 $1.782\sim 4.065\ \mu\text{m}$ 之间。

表 2 三元叶片两侧的平均表面粗糙度值(S_a)

Table 2 Average roughness value of both sides of ternary blade (S_a)

Position	$S_a/\mu\text{m}$
Position a on R side	4.065
Position a on L side	1.817
Position b on R side	3.380
Position b on L side	1.782
Position c on R side	2.591
Position c on L side	1.849

4.2.4 组织分析

用线切割机在图 8(a)所示的 a、b、c 三点区域

取样,将切割下来的合金试样进行打磨、抛光、腐蚀,然后放至金相显微镜下观察,并拍摄下三个区域的组织照片,照片如图 10 所示。由于激光送粉增材制造过程中合金粉末经历了快速加热熔融与快速凝固,具有较大的过冷度,所以整体组织的晶粒较细小且致密。

在图 10(a)、(b)、(c)中,①区为重熔区,②区为细晶区,且②区的组织较①区更细密。这是由于逐层熔覆时,下一层的激光会照射到上一熔覆层的表面,导致上一熔覆层的部分晶粒得以生长,组织变得略微粗大。整体看图 10(a)、(b)、(c)所示的三张图,组织有逐渐变大的趋势。a 处最靠近基体,其散热方式为三维散热,温度梯度大,细晶区组织以外延

生长的细枝晶为主,重熔区的组织除了细枝晶外还存在少量胞状晶;b 处为三元叶片的中部区域,其散热方式主要是以辐射散热与对流换热为主的二维散热,热传导速率较低,温度梯度减小,加之激光熔覆的热累积,熔池存在时间长,导致细枝晶逐渐长大,其中部分细枝晶生长为粗大的树枝晶,并夹杂着胞状晶。同时,由于激光增材制造急热急冷的加工特性,树枝晶定向生长,以垂直于熔覆层的方向为主。c 处为叶片顶层区域,由于热积累进一步加剧,冷却速率和热传导速率进一步降低,成形组织主要为均匀的树枝晶,其间夹杂着少量等轴晶。a、b、c 处的组织形态也印证了成形件显微硬度由大到小的变化趋势。

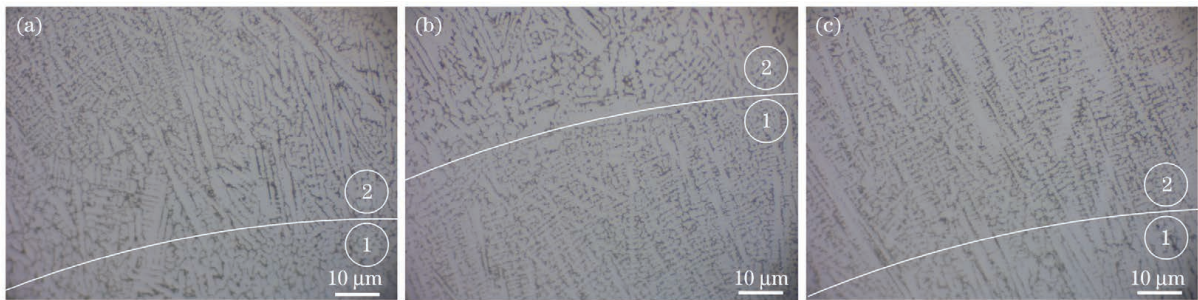


图 10 三元叶片不同位置处的显微组织。(a) a 处;(b) b 处;(c) c 处

Fig. 10 Microstructures of different positions of ternary blade. (a) Position a; (b) position b; (c) position c

XRD 衍射测试结果如图 11 所示。可以看到,沉积态 Inconel 718 三元叶片的 XRD 谱中出现了三个强峰:(111)晶面峰、(200)晶面峰和(220)晶面峰,同时还存在 Laves 相的几个弱峰。这说明沉积态 Inconel 718 的主要物相为面心立方(FCC)的 γ 相,Laves 相在组织中的占比很小。另外,对于其织构变化而言,沉积态 Inconel 718 三元叶片的(200)晶面峰强度明显弱于原始粉末,这一点与选区激光熔

化 Inconel 718 的(200)晶面峰普遍增强的特性有着明显的不同^[18],表明其组织的择优取向也与选区激光熔化成形件有着较大差异。由于本次实验在激光沉积过程中采用了非常大的激光功率(>2100 W),熔池较为宽大(>6 mm),并进行了基体预热,因此熔池到基体的传热路径变得不再非常显著,平行于沉积方向的传导热流也相对减少,形成了较弱的温度梯度。传热的分散直接影响原子的排列和晶粒的取向,最终导致了沉积态(111)晶面峰的增强^[19]。

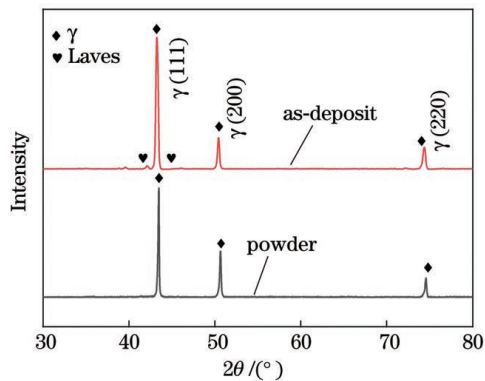


图 11 Inconel 718 粉末与三元叶片顶部沉积态组织的 XRD 图

Fig. 11 XRD patterns of Inconel 718 powder and the top of ternary blade

5 结 论

针对三元叶片熔覆成形的轨迹问题,本研究团队提出了流线分层法;通过模型分析与熔覆工艺优化,成功熔覆出与异形基面达到冶金结合的三元叶片成形件,其厚度的相对误差为 $-1.4\% \sim 1.03\%$,扭转角的相对误差为 -4.67% ,成形精度较高。

三元叶片表面平整,成形件 L 侧的表面粗糙度值较低且较稳定,R 侧的表面粗糙度值较大且呈下降的趋势,平均粗糙度值在 $4.065 \mu\text{m}$ 以内,有效缓解了台阶效应。

随着成形件高度的增加,激光熔池处的热积累

明显,显微硬度略微降低,显微组织略微增大,三元叶片成形件的显微硬度在 348.3~360.4 HV 之间,金相组织整体致密均匀,无明显的孔洞或裂纹缺陷。

参 考 文 献

- [1] Wu Y N. Research on NC EDM machining technology of ternary flow closed impeller [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
吴彦农. 三元流闭式叶轮数控电火花加工技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [2] Zhang K Y. Structural analysis and optimal design of milling fixture for aeroengine precision forging blades [D]. Yantai: Yantai University, 2020.
张凯尧. 航空发动机精锻叶片铣削工装结构分析与优化设计 [D]. 烟台: 烟台大学, 2020.
- [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 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.
- [5] Huang L F, Sun Y N, Wang G J. 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. 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Shi L F. Experiment research on laser engineered net shaping of 3D-flow impeller blade [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [9] Wang X L. Study on laser material deposition process of 3D-flow blade feature structures [D]. Dalian: 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Dwivedi R, Kovacevic R. An expert system for generation of machine inputs for laser-based multidirectional metal deposition [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14): 1811-1822.
- [13] Zhang H N. Research on the path and trajectory of the manipulator in laser cladding of the shearer blade [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
张海宁. 滚筒螺旋叶片激光熔覆中机械臂路径轨迹问题研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
- [14] Ren D L, Lin Q, Li T, et al. Laser cladding repair technology and path of cold-worked dies [J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 54-60.
任德亮, 林齐, 李婷, 等. 冷作模具曲面激光熔覆修复工艺及路径研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(3): 54-60.
- [15] Shi S H, Fu G Y, Wang A J. Laser processing forming technology of optical internal powder feeding and optical internal powder feeding nozzle: CN101148760A [P]. 2008-03-26.
石世宏, 傅戈雁, 王安军. 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] Holland S, Wang X Q, Chen J, et al. Multiscale characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 182-194.
- [19] Park J H, Bang G B, Lee K A, et al. Effect on microstructural and mechanical properties of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting with rescanning by low energy density[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 785-796.

Laser Powder Feeding Additive Manufacturing of Ternary Blade with Abnormity Base Plane

Li Kuan¹, Shi Tuo^{2*}, Shi Shihong^{1**}, Fu Geyan¹, Wang Mingyu¹, Zhang Rongwei¹,
Liu Guang¹

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

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

Abstract

Objective Ternary blades are used in the impellers of aerospace turbojet engines, large-scale marine gas turbines, and automotive advanced turbine engines. The joints connecting the ternary blades to the impeller base are irregularly shaped surfaces. The ternary blade has special, complex, and spatial structure with a large inclination angle, large distortion, and other characteristics that conform to the ternary flow design theory; this design reduces energy loss when fluid travels through the impeller and improves its efficiency. Thus, ternary blade manufacturing has received considerable attention, and its unique structure imposes severe processing requirements. However, ternary blades are mainly processed by Computerized Numerical Control Electrical Discharge Machining (CNC EDM) and CNC milling; the number of materials eliminated during the processing is enormous, and the processing cycle is extensive. Laser additive manufacturing, a revolutionary type of forming technique, was proposed in the 1990s, which is used for efficient and moldless manufacturing of complicated structural elements. The research on laser additive manufacturing of ternary blades has significant practical applications. Currently, most multi-twisted blade formation, both home and abroad, is performed on a flat or cylindrical generatrix, and there are few reports on laser powder feeding additive manufacturing ternary blades on special-shaped base surfaces. The technique of streamline layering is proposed in this study, and the cladding formation of the ternary blade is effectively accomplished; this is based on the optical inner powder feeding cladding nozzle produced independently in the laboratory.

Methods The three-element blades described in this study are curved in the flow direction and are three-dimensionally twisted, with complex twisting and tilting characteristics. The blade stacking substrate is a concave curved surface rather than a standard horizontal substrate. However, it is challenging to obtain information on each unit's location and direction. The bottom of the three-element blade is an arc main base surface on the special-shaped base surface. Thus, this study proposes the following streamlined layering methods: first, the primary base surface is divided evenly in the radial direction to obtain circular arc slices perpendicular to the radial direction; second, the arc slices are divided equidistantly along the scanning direction to obtain the division unit; lastly, the vector formed by the centerline of the upper and lower planes of the division unit is used to determine the height and deflection direction. Further, when stacking, the nozzle's axis aligns with the dividing unit's direction; the cladding nozzle moves according to the division unit's position and direction, and the final splicing obtains the formed part of the ternary blade.

Results and Discussions To obtain segmentation units with varied structural characteristics, the streamline layering technique is developed for stacking the ternary blade's forming parts [Fig. 4(f)]. The homogeneous

transformation matrix of each segmentation unit relative to the base coordinate system is determined through translation and rotation calculation, thus, determining the positional and directional information of each segmentation unit [Fig. 5(c)]. Further, the laser cladding nozzle in this study is an optical internal powder-feeding nozzle, which is independently developed in the laboratory; the cladding nozzle is installed on a six-axis robotic arm. During cladding, the axis of the cladding nozzle aligns with the dividing unit's direction and fits along the curve. The single-layer arc slice cladding is completed by splicing the trajectory of each segmentation unit, and the multilayer arc slice overlaps to generate the ternary blade laser cladding, forming a portion with an enormous inclination, complex bending, and torsion structure (Fig. 7).

Conclusions The streamline layering technique is proposed in this study to tackle the ternary blade laser cladding formation trajectory problem. The main base surface is evenly spaced along the radial direction to obtain arc slices perpendicular to the radial direction, which are then evenly spaced along the scanning direction to obtain the segmentation unit. The streamlined layering technique is proposed in this study to solve the problem of ternary blade structural parts layering, bending, and inclination, and to accomplish the accumulation of ternary blade forming parts. The inspection results of the formed parts are as follows: the surface of the ternary blade-formed parts is smooth, and the average surface roughness value is less than $4.065\ \mu\text{m}$, which effectively reduces the step effect; it achieves a good metallurgical combination with the irregular base surface, and the average thickness of the formed parts is $5.97\ \text{mm}$. The relative errors of thickness and torsion angle are from -1.4% to 1.03% and -4.67% , respectively. The forming accuracy is high. The heat accumulation at the laser molten pool is evident as the height of the formed part increases. Further, the microhardness reduces as the microstructure increases; the microhardness of the formed part ranges from 348.3 to $360.4\ \text{HV}$, and the metallographic structure is uniformly dense with no evident holes or cracks.

Key words laser technique; inside-laser powder feeding; streamline layering; ternary blade