

弧面扭曲结构件激光内送粉熔覆成形研究

王宇¹, 石拓^{2*}, 石世宏^{1**}, 吴捷¹, 杨强³, 王明雨¹, 李建宾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;³中国飞机强度研究所结构冲击动力学航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要 通过研究弧面扭曲结构件激光熔覆成形轨迹规划难点,解决了以弧线为渐变路径的扭曲结构分层问题。基于中空激光内送粉熔覆成形技术并结合结构件自身几何特征,提出离散渐变分层法。首先在基体法平面内纵向分层,随后将各层二次离散成独立单元,最终按等圆心角将离散单元拼接成熔覆路径,成功实现了弧面扭曲结构件激光熔覆成形。所得成形件尺寸精度较高,表面平均粗糙度低至 $1.323 \mu\text{m}$,抗拉强度为 765.81 MPa ;不同区域的微观组织和显微硬度分布均匀,无明显气孔或夹杂缺陷。

关键词 激光加工; 激光熔覆; 光内送粉; 弧面扭曲结构件; 离散渐变分层; 路径规划

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2202015

1 引言

在航空航天、远洋机械、生物医疗等领域中许多零件存在弧面扭曲结构,如涡轮喷射发动机中的轴流式叶片、船用螺旋桨的桨叶等^[1-2]。该类零件多具有大角度扭转悬垂、截面空间异向生长等几何特征,如果使用传统工艺加工,不仅成本高、制造周期长,而且某些工况下零件也无法满足使用需求^[3]。激光熔覆成形技术可实现复杂结构零件的高精度、高效率、无模具近净成形,因此其在复杂扭曲结构的直接成形领域具有广阔的前景^[4-5]。

目前激光熔覆成形技术多采用水平分层法对零件进行切片,其中 Dwivedi 等^[6]基于几何推理的算法,制造出一系列基于线性和非线性空间轨迹的复杂几何形状,在五轴数控系统上激光熔覆堆积出了悬垂分支结构;王鑫林等^[7]采用激光直接制造工艺,通过切片软件完成机器人路径规划,实现了单个三元叶片堆积。但基于该方法下得到的成形件表面台阶效应严重,后续加工余量较大。苏州大学石拓等^[8]提出法向分层方法,通过熔覆头空间连续变姿态成形了悬垂薄壁件,倾斜角可从 0° 逐渐变化至

81° ,实现了大倾角悬垂结构的无支撑成形;王明雨等^[9]基于法向分层提出随形离散分层法,实现了以多方向扭曲和截面渐变为特征的多元扭曲结构件堆积。但由于受轨迹控制及熔覆工艺等限制,弧面扭曲结构的激光熔覆成形尚未得到有效研究。

弧面扭曲结构的各截面皆为圆弧面且以弧线为路径进行渐变,其端部存在大角度悬垂结构,目前国内对于该类型结构的路径规划研究报道甚少。本文基于自主研发的中空光内送粉熔覆技术,提出离散渐变分层法,完成其轨迹规划,最终实现了弧面扭曲结构件的熔覆堆积。

2 实验设备及材料

实验采用德国 GTV 公司的 GTV PF2/2 型送粉器、中空环形光内送粉喷头、锐科 RFL-C6000W 激光器,运动装置由 6 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由实验室自主研发,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,送粉管居中。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

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-06-11; 录用日期: 2021-06-30

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

动轨迹的影响,光粉气达到高度耦合。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熔覆。

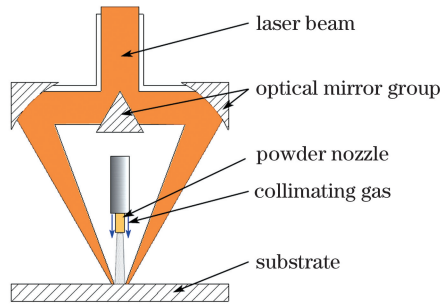


图 1 光内送粉原理

Fig. 1 Principle of inside-laser powder feeding

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。成形材料选用 Fe314

金属粉末,粉末粒度为 $50\sim 119\ \mu\text{m}$,其化学成分(质量分数)为 C(0.12%), Si(1.0%~1.5%), Cr(13%~17%), B(0.5%~1.5%), Fe(余)。

3 实验方法

3.1 零件几何模型

实验基于轴流式涡轮喷射发动机风扇叶片,设计并堆积一个具有弧面扭曲结构特征的零件,其模型如图 2 所示。由结构件形状特点可知:该结构件各截面在空间上异向生长。横截面由下至上曲率半径逐层增大,呈“倒生长”特征;两端纵截面为法向约束,以弧线为路径渐变且悬垂角沿扫描路径逐渐增大。结构件端面 1、端面 2 和底面皆为圆弧面,其半径和圆心角分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 和 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 ,具体尺寸及全局图见图 2。

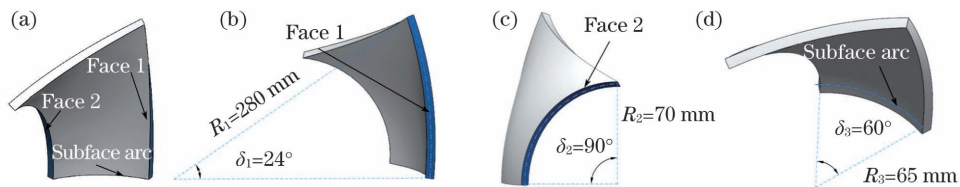


图 2 成形件模型。(a)全局图;(b)端面 1;(c)端面 2;(d)底面圆弧

Fig. 2 Forming part model. (a) Global shape; (b) face 1; (c) face 2; (d) subface arc

3.2 结构件离散渐变分层

由于结构件横纵截面在空间上都存在渐变特征,且其端面具有大角度悬垂结构,故常规的水平分层法已无法满足成形需求。为实现该弧面扭曲结构的激光熔覆成形,本文基于法向分层^[10]原理,提出离散渐变分层法,并对该弧面扭曲结构件进行分层。

首先提取结构件中心弧线,如图 3(a)所示,由于结构件两端纵截面为半径和圆心角都不同的圆弧面,且其变化路径为弧线,因此在基体法平面内不存在纵截面的渐变运动轴线。其次,取熔覆喷头第 i 层实际扫描路径为中心弧线 L_i ,并对结构件沿着中心弧线 L_i 作一次法向切片分层,得到切片 m_j ,如

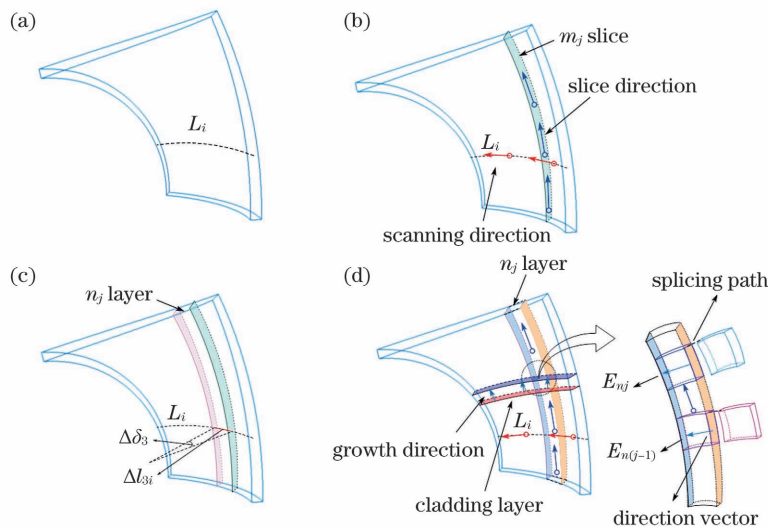


图 3 成形件分层方法。(a)提取中心线;(b)法向切片;(c)纵向离散分层;(d)曲线拼接单元

Fig. 3 Slicing method of formed structure. (a) Extract center line; (b) normal section; (c) dissociation along length; (d) curve splice units

图 3(b)所示,结构件两端纵截面为切片提供形状约束。随后沿着中心弧线 L_i 作等圆心角分割,得到切片层 n_j ,如图 3(c)所示,其对应的偏转角度和弧长分别为 $\Delta\delta_3$ 和 Δl_{3i} 。最后对切片层作层内二次离散,得到具有不同位置和方向信息的离散熔覆单元 E_{n_j} 和 $E_{n(j-1)}$,如图 3(d)所示,同一切片层内单元生长方向与纵截面圆弧相切,层间熔覆扫描方向与中心弧线 L_i 切线方向一致。

将离散熔覆单元进行等圆心角拼接,形成实际堆积时的单层熔覆层轨迹。由于该结构件呈“倒生长”特征,中心弧线 L_i 单位圆心角对应的弧长逐层变大,拼接路径上熔覆单元数也会随之增多。用各离散单元上下表面的中心连线构成的向量来表征该单元的方向和高度,熔覆过程中保持光束轴线与单元方向向量一致以实现熔覆层的无错位堆积。

3.3 结构件成形轨迹规划

根据离散渐变分层原理,光斑的运动轨迹信息取决于结构件各离散熔覆单元的空间方位。将喷头的路径规划和坐标系之间的相对运动结合,坐标系之间的相对运动主要为平移和旋转运动。以结构件端面 1 与底面圆弧的中心弧线交点为原点建立基面坐标系 B_0 ,基面坐标系 B_0 的 x 轴与第一层熔覆扫描路径相切,其 z 轴与基面垂直。以熔覆时的光斑中心为原点建立工具坐标系 C_i ,光束轴线垂直于已熔覆基面,可知初始工具坐标系 C_1 与 B_0 重合。

结构件经离散渐变分层后得到一系列具有不同几何特征的离散熔覆单元,分别赋予每个离散单元一个独立运动的工具坐标系。设第 n 层熔覆层第 k 个单元的工具坐标系为 C_{nk} ,将该单元看作基面坐标系 B_0 中某点,则该点在坐标系 B_0 和 C_{nk} 中的坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_{nk}, y_{nk}, z_{nk}) ,当工具坐标

系 C_{nk} 相对于基面坐标系 B_0 运动时,该点坐标在两坐标系下满足

$$\begin{aligned} (x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1) &= \\ (x_{nk} \ y_{nk} \ z_{nk} \ 1) \cdot \mathbf{R}_{1nk} + \mathbf{T}_{1nk} &= \\ (x_{nk} \ y_{nk} \ z_{nk} \ 1) \cdot \mathbf{M}_{1nk}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 \mathbf{T}_{1nk} , \mathbf{R}_{1nk} 分别描述工具坐标系 C_{nk} 相对于基面坐标系 B_0 所作的平移变换和旋转变换矩阵, \mathbf{M}_{1nk} 为齐次坐标变换矩阵,三者用以综合描述坐标系位置和方向的变换。熔覆喷头根据 \mathbf{T}_{1nk} , \mathbf{R}_{1nk} 中的信息进行运动即可获取弧面扭曲结构件的成形路径,其中各离散单元相对于基面坐标系的空间点位信息求解过程如下。

设同一熔覆层内端面 1 和端面 2 某点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, 两点坐标分别满足

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ (y_1 + R_1)^2 + z_1^2 = R_1^2 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_2 = -R_3 \cdot \sin \delta_3 \\ [(y_2 + R_2 + R_3 \cdot (1 - \cos \delta_3))]^2 + z_2^2 = R_2^2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: R_1, R_2 和 δ_1, δ_2 分别为结构件两端纵端面圆弧在基坐标系 B_0 中对应的半径及圆心角,如图 4(a)所示; R_3 和 δ_3 为底部端面圆弧在基坐标系 B_0 中对应的半径及圆心角,见图 4(b)。直线 P_1P_2 的长度为 s_n , 则有 $s_n = \sqrt{[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]}$ 。根据弦长和弧长的几何关系,可知圆弧 $\widehat{P_1P_2}$ 的长度 $l_n = s_n \cdot \delta_3 / 2 \cdot \sin(\delta_3 / 2)$ 。由于结构件两端纵截面存在角度变化,其变化路径的长度 l_n 会随着层高变化逐渐增大。同时, KUKA 机器人的曲线运动是通过多段直线拟合实现,设其单位拟合线段长度为 d , 则不同熔覆层内的离散单元数量 $k_n = l_n / d$ 。

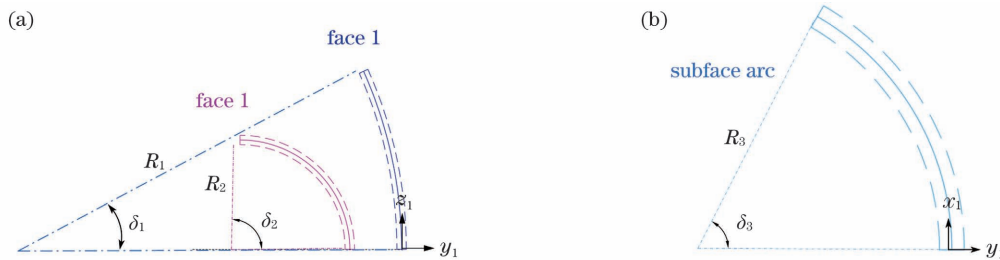


图 4 各端面在基面坐标系中的位置。(a)端面 1 和端面 2;(b)底面圆弧

Fig. 4 Location of each side in the coordinate system. (a) Face 1 and face 2; (b) bottom surface arc

以向量 \mathbf{v} 描述直线 P_1P_2 在基面坐标系中的方向,用 α, β 和 γ 表示方向向量 \mathbf{v} 在基面坐标系中的方向角,如图 5(a)所示,方向向量 \mathbf{v} 在基面坐标系

三个坐标平面的投影向量如图 5(b)所示,其与三个坐标轴的夹角为 θ_x, θ_y 和 θ_z , 则有

$$\mathbf{v} = \overrightarrow{P_1 P_2} = (F_x, F_y, F_z) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1), \quad (4)$$

$$\alpha = \arccos(F_x / \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}), \beta = \arccos(F_y / \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}), \gamma = \arccos(F_z / \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}), \quad (5)$$

$$\theta_x = \arccos(F_y / \sqrt{F_y^2 + F_z^2}), \theta_y = \arccos(F_z / \sqrt{F_x^2 + F_z^2}), \theta_z = \arccos(F_x / \sqrt{F_x^2 + F_y^2}). \quad (6)$$

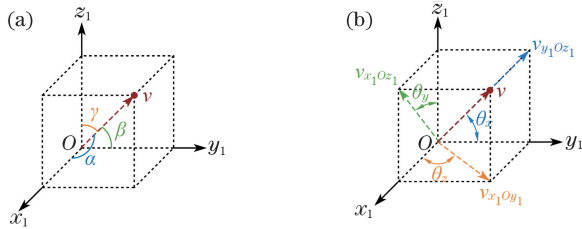


图 5 方向向量基面坐标系中的表示。(a)方向角；
(b)投影向量

Fig. 5 Representation of direction vector in base coordinate system. (a) Direction angle; (b) projection vector

设第 n 层熔覆层第 k 个离散单元 E_{nk} 坐标为 (x_{nk}, y_{nk}, z_{nk}) , 以点 P_1 为参考起点, 则有

$$\begin{cases} x_{nk} = x_1 + (k-1) \cdot d \cdot \cos \alpha \\ y_{nk} = y_1 + (k-1) \cdot d \cdot \cos \beta \\ z_{nk} = z_1 + (k-1) \cdot d \cdot \cos \gamma \end{cases} \quad (7)$$

(7)式即为任意离散单元 E_{nk} 的位置信息。离散渐变分层法基于法向分层, 光束轴线始终垂直于已熔覆平面, 由结构件纵截面角度的变化即可确定喷头倾角的变化。但由于纵截面以曲线为路径渐变, 因此变化过程不是简单的均匀线性变化。仍以 P_1 为起点, 离散单元 E_{nk} 的倾角 $\Delta\theta_{nk}$ 取决于其所在切片层的半径 R_{nk} , 设熔覆层层高为 Δh , 则有

$$R_{nk} = R_1 - \frac{(R_1 - R_2) \cdot (k-1)}{k_n - 1}, \quad \Delta\theta_{nk} = \frac{180^\circ \times \Delta h}{\pi \times R_{nk}}. \quad (8)$$

端面 1 的单位圆心角为 $\Delta\delta_1 = \Delta h / R_1$, 设 E_{nk} 的方向角为 (ρ_x, ρ_y, ρ_z) , 则有

$$\begin{cases} \rho_x = (n-1) \cdot \Delta\delta_1 + (k-1) \cdot \Delta\theta_{nk} \\ \rho_y = \theta_y \\ \rho_z = \theta_z \end{cases}. \quad (9)$$

至此纵向离散分层完成, 其示意图如图 6(a) 所示, 最后将具有不同位置和方向信息的熔覆离散单元进行横向曲线拼接, 拼接过程即为各单元所在工具坐标系相对于基面坐标系变换运动的过程, 如图 6(b) 所示: 首先将初始工具坐标系 C_1 沿着 \overrightarrow{OP} 向量平移到点 P , 得到工具坐标系 C_2 ; 随后将 C_2 先后绕自身 y 轴和 z 轴分别旋转 φ_y 和 φ_z , 得到工具坐标系 C_3 和 C_4 ; 最后将 C_4 坐标系绕自身 x 轴旋

转 φ_x , 得到工具坐标系 C_5 , 此时坐标系 C_5 的 x 轴与光斑的运动方向相切, z 轴始终与光束轴线方向保持一致, 且随着弧线路径渐变。则该结构件第 n 层熔覆层第 k 个离散单元的工具坐标系 C_{nk} 相对于基面坐标系 B_0 的齐次变换矩阵为

$$\mathbf{M}_{1nk} = \mathbf{M}_{12} \cdot \mathbf{M}_{23} \cdot \mathbf{M}_{34} \cdot \mathbf{M}_{45} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{1nk} & \mathbf{T}_{1nk} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\text{式中 } \mathbf{M}_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{23} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_y & 0 & -\sin \varphi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_y & 0 & \cos \varphi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{34} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_z & \sin \varphi_z & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_z & \cos \varphi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{45} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_x & \sin \varphi_x & 0 \\ 0 & -\sin \varphi_x & \cos \varphi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad \text{其中 } \varphi_x =$$

$$\rho_x, \varphi_y = \rho_y, \varphi_z = \rho_z, \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} x_{nk} \\ y_{nk} \\ z_{nk} \end{pmatrix}^T.$$

(10) 式将纵向离散分层得到的离散单元方位信息整合至齐次变换矩阵 \mathbf{M}_{1nk} 中, 完成了横向曲线拼接。至此, 可以得到获取成形件的轨迹信息时所需的平移变换矩阵 \mathbf{T}_{1nk} 和旋转变换矩阵 \mathbf{R}_{1nk} , 同时熔覆喷头按照 \mathbf{T}_{1nk} 、 \mathbf{R}_{1nk} 中得到的位置和方向信息进行运动即可实现弧面扭曲结构件的激光熔覆成形。

实验采用的工艺参数如下: 离焦量为 -8.5 mm, 此时光斑直径为 7.1 mm; 送粉量为 43.5 g/min; 激光功率从 4000 W 逐层递减至 2100 W, 在保证成形件不会因为持续热输入过大而坍塌的前提下改善其与基体的结合程度; 扫描线速度为 7.5 mm/s, 在熔

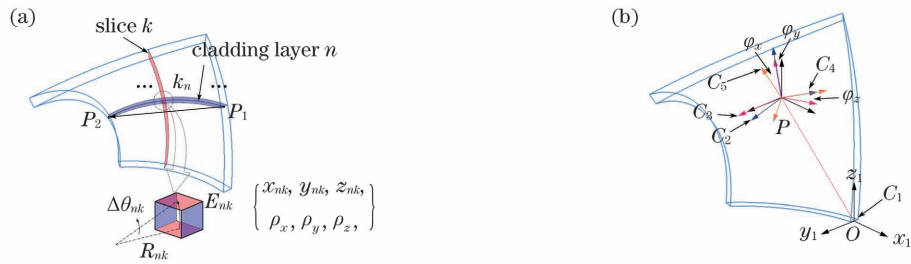


图 6 成形件轨迹规划过程。(a)离散单元空间方位;(b)坐标系变换

Fig. 6 Trajectory planning of deposition parts. (a) Discrete unit location; (b) coordinate transformation process

道两端设置减速段,减速段末端最低扫描线速度为 5 mm/s,采用熔覆层两端逐层定点减速的方法来防止熔覆层始、末端因熔覆喷头开、关光导致的能量不足而塌陷,同一熔覆层内两端减速段包含的离散单元数量相等,且其数量随结构件生长方向递增,扫描速度根据离散单元数量呈线性递减,以保证在熔覆层两端能够得到自适应能量补偿。

4 成形及分析

4.1 弧面扭曲结构件堆积

由于弧面扭曲结构件的“倒生长”几何特征且其端面存在大角度悬垂结构,理论上常规的水平分层切片方法无法实现结构件的熔覆堆积。为验证水平分层法在弧面扭曲结构激光熔覆成形领域的无效性,本研究以水平分层对结构件进行切片并实验,过程如图 7(a)所示。由于结构件倾角和悬垂结构的

存在,熔池受重力影响导致其流淌加剧,且喷头在端面 2 的位置时光粉耦合位置已经明显偏离熔池,故最终成形失败。

根据本文提出的离散渐变分层法,对结构件进行切片,并将求得的各离散熔覆单元空间方位信息赋予熔覆喷头,其成形过程如图 7(b)~图 7(d)所示,实验采用自主研发的光内送粉喷头,令准直气和保护气紧密包围粉束从而形成同轴环形压力区,以确保加工期间粉束挺直且始终垂直射入熔池,故粉末弹出量较少。同时该环形气帘区域可与熔池形成强制对流,加速熔池凝固,以减小重力对成形件端面大悬垂角处熔池流淌的影响。因此喷头在作空间连续变姿态熔覆时,其轴线与基体法线夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 区间内变化,成形件没有出现因熔池受重力作用滴落而导致的塌陷现象,且基于光内送粉熔覆自愈合原理^[11],成形件两端缺陷随层数增加逐渐被修复。

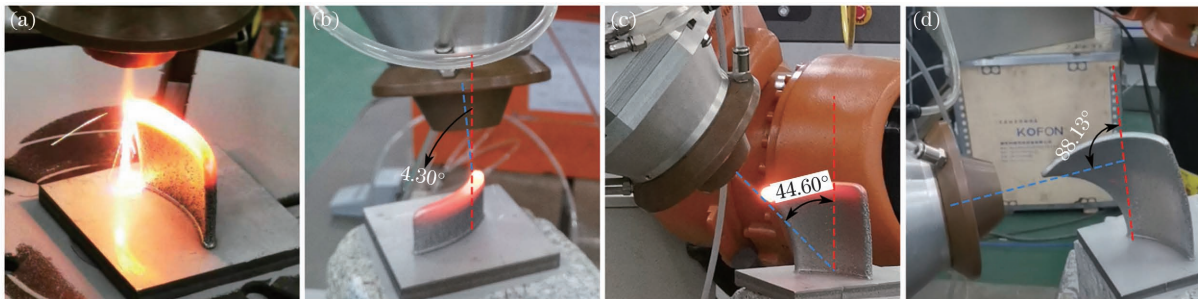


图 7 成形过程。(a)水平分层;(b)喷头倾角 4.3° ;(c)喷头倾角 44.6° ;(d)喷头倾角 88.13°

Fig. 7 Deposition process. (a) Horizontal slice; (b) nozzle tilt angle of 4.3° ; (c) nozzle tilt angle of 44.6° ; (d) nozzle tilt angle of 88.13°

4.2 成形件检测

4.2.1 尺寸误差分析

成形件尺寸如图 8 所示,其顶端最高点距离基体高度为 111.73 mm,其设计高度为 113.88 mm,高度尺寸相对误差为 -1.89% 。纵截面底部、中部和顶端的平均宽度分别为 6.15 mm、6.41 mm、6.56 mm,端面 2 悬垂处厚度较大为 6.85 mm。由于热输入持续增加使得熔池存续时间延长,同时悬垂结构加剧熔池流淌,导致成形件厚度逐层增加,故

其高度低于设计值。成形件纵截面大悬垂角及底面弧线圆心角分别为 88.13° 和 61.83° ,其对应理论尺寸相对误差分别为 -2.1% 和 3.05% 。由此可知成形件实际尺寸与设计尺寸的相对误差较小,成形精度较高。

4.2.2 力学性能测量

采用 MH-5 显微硬度计对成形件中部和悬垂面两个区域各 8 个点进行硬度测量,硬度计加载载荷为 500 g,保压时间为 10 s,取样位置如图 9(a)所

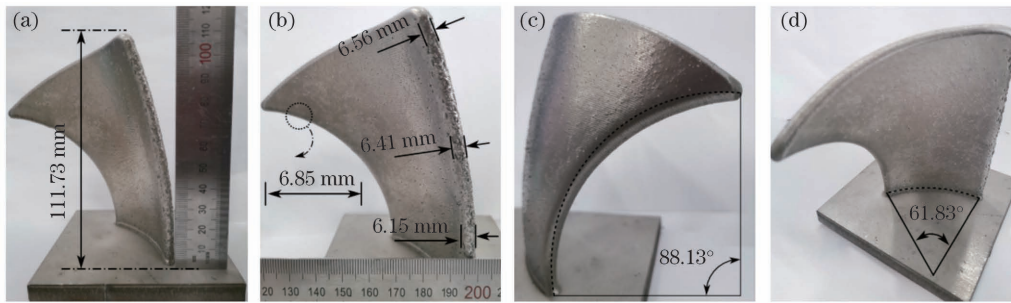


图 8 成形件尺寸。(a) 总高度；(b) 截面厚度；(c) 端面 2 圆心角；(d) 底面圆心角

Fig. 8 Sample dimension. (a) Total height; (b) section thickness; (c) central angle of face 2; (d) central angle of substrate

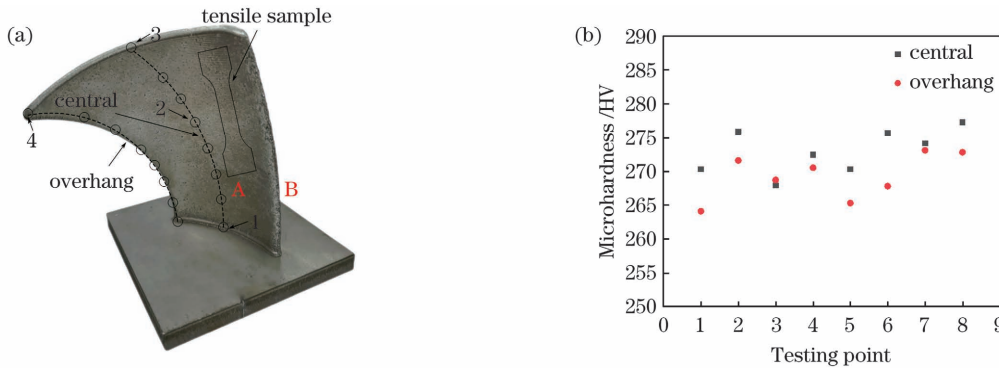


图 9 显微硬度测量。(a) 取样位置；(b) 不同取样位置的显微硬度

Fig. 9 Microhardness measurement. (a) Sampling regions; (b) microhardness at different locations

示,每个取样点测量三次取其平均值。结果如图 9(b)所示,中部和悬垂面的显微硬度分别在 267.9HV~277.2HV 和 264.1HV~273.3HV 之间。其中由于悬垂区域位于各熔覆层末端的减速段处,扫描速度减小导致更多热量累积,晶粒粗化,故硬度值略有下降,但整体显微硬度分布较为均匀。

根据国标 GB/T 228.1—2010 设计拉伸试样尺寸,取样位置见图 9(a)。经电火花线切割得到拉伸试样,采用 TSE105D 万能电子试验机在室温条件下以 1 mm/min 的应变速率对其进行拉伸试验。试验结果得到成形件的上屈服强度和最大抗拉强度

分别为 340.52 MPa 和 765.81 MPa,其断后伸长率为 11.2%。和等离子堆焊方法^[12]制得的 Fe314 成形件相比,本文工艺下的样品具有更高的强度,但塑性略差。通过 Zeiss Evo-18 场发射扫描电子显微镜观察成形件断口形貌,其微观形貌如图 10 所示。成形件断口呈现出明显的脆性断裂特征,整体形貌呈河流花样分布。其中存在较多杂乱不一的撕裂棱和解理台阶,表现为宏观上解理断裂与微观上局部解理断裂的混合断裂机制。同时解理面上密集分布的大量撕裂脊表明,激光熔覆工艺所制样品具有一定的韧性参考文献^[13]引用。

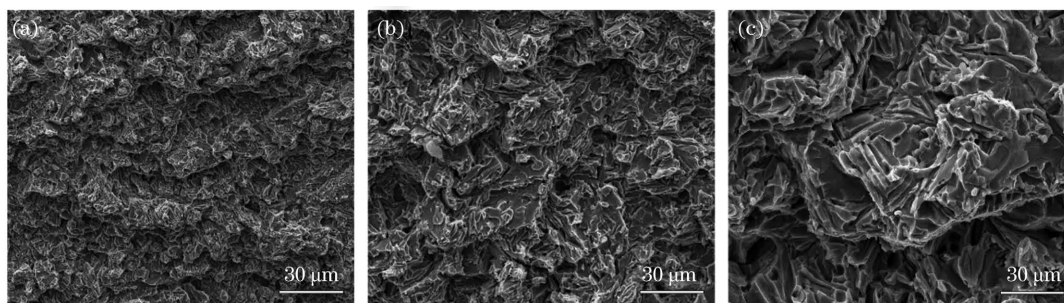


图 10 不同放大倍数下的拉伸断口形貌。(a) 1000 倍；(b) 2000 倍；(c) 5000 倍

Fig. 10 Tensile fracture morphology under different magnifications. (a) 1000×; (b) 2000×; (c) 5000×

4.2.3 表面粗糙度测量

采用 Sensofar-Neox 光学轮廓仪对图 9(a)中

1、2、3、4 四个取样位置的 A、B 两侧表面进行表面粗糙度测量,各部分表面的原始 3D 形貌图如

图 11(a)~图 11(h)所示。根据 ISO 25178 国际表面粗糙度评估标准,采用 S-L 滤波处理完成波长截断。其中:低通滤波器(S-filter)取 $8\ \mu\text{m}$,用于去除设备测

量噪声,从而获取基础表面;高通滤波器(L-filter)取 $250\ \mu\text{m}$,用于去除样品波纹和形状,以获取测量表面。两侧表面评估区域的平均粗糙度值(Ra)见表 1。

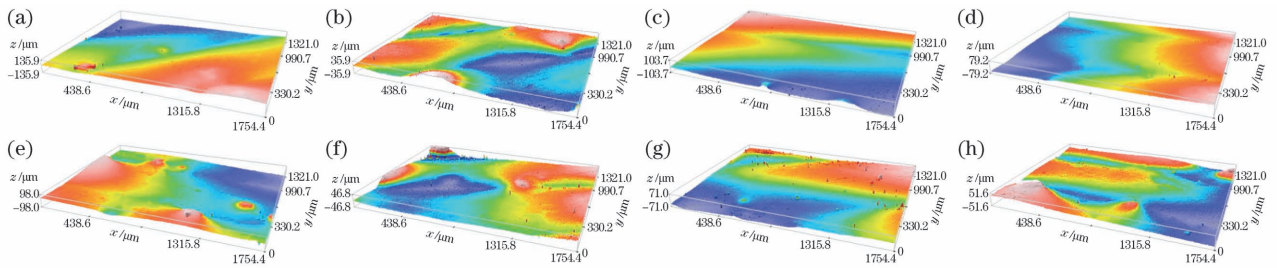


图 11 各位置 A、B 两侧表面 3D 形貌图。(a)位置 1A 侧;(b)位置 2A 侧;(c)位置 3A 侧;(d)位置 4A 侧;(e)位置 1B 侧;(f)位置 2B 侧;(g)位置 3B 侧;(h)位置 4B 侧

Fig. 11 3D topography of the surfaces on both sides of each region A and B. (a) A side of region 1; (b) A side of region 2; (c) A side of region 3; (d) A side of region 4; (e) B side of region 1; (f) B side of region 2; (g) B side of region 3; (h) B side of region 4

分析图 11 和表 1 可知,成形件表面平整,黏附粉末颗粒较少,无明显宏观裂纹缺陷,且其表面粗糙度较小,在 $1.32 \sim 9.638\ \mu\text{m}$ 之间。各位置 A 侧表面平均粗糙度均小于 B 侧,这是由于 A 侧表面为结构件内表面,在熔覆堆积过程中会受到下一熔覆层的重熔作用从而减少未熔粉末颗粒数量^[14]。

表 1 各位置 A、B 两侧表面的平均粗糙度值

Table 1 Average roughness value of the surface on both sides of each region A and B unit: μm

Position	region 1	region 2	region 3	region 4
Ra on A side / μm	1.3230	1.8493	1.8011	1.9366
Ra on B side / μm	7.0081	9.6380	8.0983	8.5120

4.2.4 组织分析

对图 9(a)所示成形件中 1、2、3、4 四个位置取

样,打磨抛光并以王水溶液(盐酸和硝酸溶液体积比 3:1 配制)腐蚀 30 s,利用 ZEISS 研究级倒置显微镜分别观察这四个区域的微观组织,其对应结果见图 12。位置 1 为熔覆初始阶段,导热散热条件较好,过冷度高,因此该区域以外延生长的细枝晶为主。随着熔覆层的增加,以对流换热和辐射散热为主的冷却方式冷却效率较低,晶粒沿着热量散失的方向长大,形成粗大的树枝晶和胞状晶。位置 3 和位置 4 都位于最后一层熔覆层,无重熔带来的二次加热,且保护气的强制对流作用使得散热相对较快,最终形成均匀的树枝晶并夹杂少量等轴晶^[15]。观察图 12(c)和图 12(d)发现,二者微观组织皆以致密的树枝晶为主,由此可知喷头持续平移和旋转运动对成形件的组织结构影响甚微,重力对熔池的影响在成形过程中能够得到有效控制。

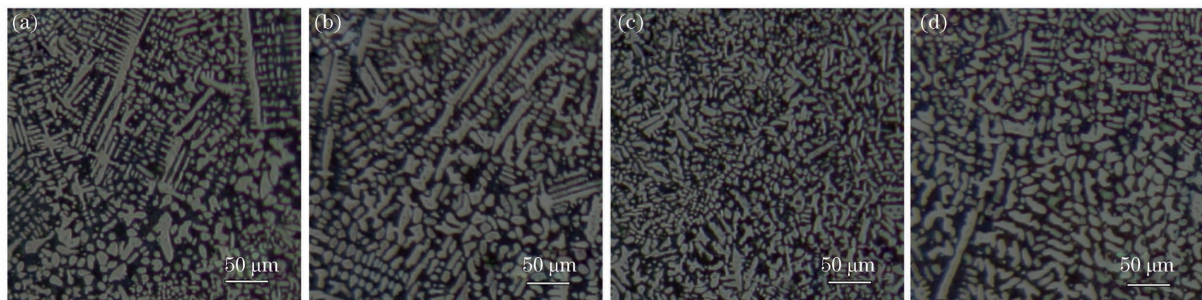


图 12 不同位置处显微组织。(a)位置 1;(b)位置 2;(c)位置 3;(d)位置 4

Fig. 12 Microstructures at different regions. (a) Region 1; (b) region 2; (c) region 3; (d) region 4

5 结 论

基于光内送粉熔覆成形技术和法向分层原理,提出了离散渐变分层方法:对结构件整体作法向切片,切片层以两端纵截面为约束并于层内作纵向离

散从而得到具有不同几何特征的离散熔覆单元,以等圆角曲线横向拼接离散单元形成实际熔道。解决了以弧线为渐变路径的扭曲结构的分层问题,实现了弧面扭曲结构件的激光熔覆堆积。成形件检测结果如下:成形件表面光亮平整,表面粗糙度在

1.323 ~ 9.638 μm 之间;成形件平均厚度为 6.49 mm,各部分厚度较为均匀,形状尺寸误差在 -2.1%~3.05%之间,成形精度较高;成形件不同区域显微硬度在 264.1HV~277.2HV 范围内波动,整体硬度差异不大;成形件抗拉强度和断后伸长率分别为 765.81 MPa 和 11.2%,断裂机制为解理断裂与局部准解理断裂的混合断裂;成形件显微组织以树枝晶为主,整体组织致密均匀,无明显气孔和夹杂缺陷。

参 考 文 献

- [1] Zhu Y W, Xu J W, Zhao J S. Study on the shaping law and test of electrochemical contour evolution machining for integral turbine with big-twisted blades [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(17): 1778-1783.
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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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 and Manufacture, 2007, 47(7/8): 1246-1256.
- [7] Wang X L. Study on laser material deposition process of 3D-flow blade feature structures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [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.
石拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件 [J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003003.
- [9] 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.
王明雨, 石世宏, 石拓, 等. 基于光内送粉多元扭曲结构的随形离散分层成形研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002114.
- [10] 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.
- [11] 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.
杨轼, 石世宏, 傅戈雁, 等. 中空环形激光离焦量对熔道凹凸缺陷自愈合效应的影响 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 79-85.
- [12] Xu X X, He W X, Qin J, et al. Effects of vibration acceleration on stress deformation, microstructures and properties of Fe314 alloy fabricated by plasma additive manufacturing [J]. China Surface Engineering, 2019, 32(5): 127-135.
许欣欣, 贺文雄, 秦晋, 等. 振动加速度对等离子增材制造 Fe314 合金应力变形和组织性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2019, 32(5): 127-135.
- [13] 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.
- [14] Pang Y F, Fu G Y, Wang M Y, et al. Parameter optimization of high deposition rate laser cladding based on the response surface method and genetic neural network model [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602112.
庞祎帆, 傅戈雁, 王明雨, 等. 基于响应面法和遗传

神经网络模型的高沉积率激光熔覆参数优化[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602112.

- [15] Zhou X X, Xin B, Gong Y D, et al. Effect of scanning direction on microstructure and mechanical properties of part formed via variable thickness layer

cladding deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0802003.

周显新, 辛博, 巩亚东, 等. 扫描方向对变厚度熔覆成形件组织与力学性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0802003.

Inside-Laser Powder Feeding Cladding Forming of Arc-Shaped Twisted Structural Parts

Wang Yu¹, Shi Tuo^{2*}, Shi Shihong^{1*}, Wu Jie¹, Yang Qiang³, Wang Mingyu¹, Li Jianbin¹

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

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

³Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract

Objective Many components in the aerospace, ocean machinery, biomedical, and other fields have curved twisted structures, such as the axial flow blades of turbojet engines and rotor blades of marine propellers. The majority of these components have geometric features, such as a large-angle twist/overhanging structure and a spatially-gradually changing cross section. When using traditional techniques to process such parts, the processing costs are high, the production cycle is long, and the components may not meet the user requirements under certain working conditions. Because laser cladding technology can achieve near-net shaping of complex structural parts without the use of a mold and with high precision and high efficiency, it has broad prospects in the field of direct shaping of complex twisted structures. The curved twisted structure is circular in cross section and tapered by arcs, with a large-angle overhanging structure at its end. A few reports on path planning for this type of structure were published in China and abroad. To accomplish tool-path planning and generation, a discrete gradient slicing (DGS) method is proposed in this study. Based on the self-developed annular laser beam based on axially fed powder cladding, a twisted structural component with an arc curve spine line was successfully built.

Methods Because the structural components studied in this paper had spatially-gradually horizontal and longitudinal section characteristics, as well as end faces with large-angle overhanging structures, the traditional horizontal slicing method did not meet the forming requirements. A DGS method based on the normal slicing principle was proposed to slice the curved twisted structural parts for realizing their laser cladding formation. First, the structural component's central curve was extracted. Because the structural part's longitudinal section was a circular arc with different radii and center angles at both ends, its change path was curved. There was no asymptotic growth axis of the longitudinal section in the base plate normal plane. The actual travel path of a cladding nozzle layer was used as the central arc.

Subsequently, the structural component was sliced along the central curve in a normal direction, and the longitudinal sections at the start and end of the structural part acted as shape constraints for the slices. Then, the sliced layers were divided along the central curve with equal centric angle, and finally, the sliced layers were further discretized within the layers to obtain discrete cladding elements with different positions and directions. The direction of growth of elements within the same layer was tangential to the longitudinal cross sectional curve, and the direction of interlayer cladding was consistent with the central curve's tangential direction. Finally, the cladding path was generated by slicing the discrete elements according to equal center angles. Due to the structure's "inverted growth" characteristic, the arc length corresponding to the unit central angle of the central arc became larger layer by layer, and the number of cladding units on the splicing path increased accordingly. The vector formed by the centerlines of each discrete unit's upper and lower surfaces was used to characterize the unit's direction and height. The beam axis was kept consistent with the unit direction vector during the cladding process to ensure that the cladding layer does not accumulate dislocations.

Results and Discussions The discrete gradual layering method is proposed to complete the layering of arc-shaped twisted structural parts, and discrete cladding units with different geometric characteristics are obtained [Fig. 3(d)]. By treating each discrete unit as a point in the base coordinate system and assigning it a tool coordinate system having independent motion, the homogeneous transformation matrix of each discrete unit relative to the base coordinate system is obtained via translational and rotational operations, and its position and posture information are determined [Fig. 6(a)]. Based on the translation and rotation of the tool coordinate system, where each unit is located relative to the base coordinate system with the substrate, the discrete cladding units with different spatial orientation information are spliced horizontally [Fig. 6(b)] to obtain the actual Cladding track. A self-developed optical internal powder-feeding nozzle combined with a six-axis robot line segment fitting technology was used in the experiment to achieve the cladding forming of arc-shaped twisted structural parts with “inverted growth” and cross sectional gradual characteristics [Fig. 9(a)].

Conclusions Based on the optical internal powder-feeding cladding forming technology and the principle of normal layering, a discrete gradual layering method is proposed: the structure is sliced in a normal direction, and the sliced layer is constrained by the longitudinal sections at both ends. In addition, the sliced layer is longitudinally discrete in the layer to obtain discrete cladding units with different geometric characteristics, and the units are horizontally spliced with equal central angle curves to form actual melting channels. The twisted structure-layering problem with the arc acting as the gradual path is solved, and the laser cladding accumulation of the curved twisted structure is realized. The inspection results of the formed parts are as follows: the surface of the formed parts is bright and smooth; the surface roughness is between 1.323 and 9.638 μm ; the average thickness of the formed parts is 6.49 mm; the thickness of each part is relatively uniform; and the shape and size error is between -2.1% and 3.05% . The forming accuracy is high; the microhardness of different areas of the formed part fluctuates in the range from 264.1HV to 277.2HV; the overall hardness difference is small; the tensile strength and elongation after formed part's fracture are 765.81 MPa and 11.2%, respectively. The fracture mechanism is a mixed fracture of cleavage fracture and local quasi-cleavage fracture. Besides, the microstructure of the formed part is dominated by dendrites, and the overall structure is dense and uniform without obvious pores and inclusion defects.

Key words laser processing; laser cladding; inside-laser powder feeding; arc-shaped twisted structural parts; discrete gradual layering; tool-path generation

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 220.4610