

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180831002

基于 NURBS 曲面的汽轮机叶片激光熔覆再制造路径规划

黄海博, 孙文磊, 张冠, 黄勇, 刘鹏良

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要: 针对汽轮机叶片的复杂造型, 提出一种基于 NURBS 曲面拟合的几何模型重构方法, 得到了一种获取稳定的激光功率密度的路径规划方法。通过计算点在曲面上的曲率, 将局部 NURBS 曲面拟合为曲率球, 对激光束扫描面积进行简化计算。根据熔覆加工精度要求, 调整激光头姿态沿曲面的法矢方向, 约束激光束扫描面积, 得到熔覆加工插补点, 保证了基材表面获取稳定的激光功率密度。根据插补点的法向矢量计算得到机器人对应的位姿, 利用 CIMOCO 软件验证熔覆轨迹的正确性; 通过试验得到较好的熔覆层, 证明了方法的可靠性和可行性, 为复杂曲面的激光熔覆再制造提供了一种新方法。

关键词: 激光熔覆; NURBS 曲面; 轨迹规划; 扫描面积; 功率密度

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)05-0175-09

Path Trajectory of Laser Cladding Remanufacturing for Turbine Blade Based on NURBS Surface

HUANG Haibo, SUN Wenlei, ZHANG Guan, HUANG Yong, LIU Pengliang

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Aiming at the complex modeling of turbine blades, a geometric model reconstruction method based on NURBS surface fitting was proposed, and a path planning way for obtaining stable laser power density was obtained. By calculating the curvature of the point on the surface, the local NURBS surface was fitted as a curvature sphere to simplify the calculation of the laser beam scanning area. According to the requirements for the precision of the cladding process, the laser beam scanning area was controlled by adjusting the posture of the laser head along the normal direction of the surface. Meanwhile, the interpolation point was obtained to ensure stable laser power density on the substrate surface. According to the normal vector of interpolation point, the corresponding pose of robot was obtained, and the correctness of laser cladding trajectory was verified by CIMOCO software. The high-quality cladding layer was experimentally prepared, which proved the reliability and feasibility of the method. A new method is provided for laser cladding remanufacturing of the complex curved surface.

Keywords: laser cladding; NURBS surface; path trajectory; scanning area; power density

0 引言

破损零件的修复是减少能源消耗、实现绿色工业发展道路的重要途径^[1]。激光熔覆作为新兴的工业技术, 以其低污染、高效率以及高的适应性等特性已经成为再制造领域的重点发展方向^[2-3]。

工业汽轮机作为现代大型火力发电厂, 原子能发电厂和大型船舶中的原动机, 长期在高温、高压、高转速和腐蚀介质的工况环境下工作, 容易造成叶片腐蚀、磨损、甚至断裂等危险。随着我国可持续发展战略的推进以及“中国制造 2025”的

收稿日期: 2018-09-12; 修回日期: 2018-10-01

网络出版日期: 2018-10-13 11:56; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20181013.1156.004.html>

通信作者: 孙文磊 (1962—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: CAD/CAM、制造业信息化; **E-mail:** sunwenxj@163.com

基金项目: 新疆高技术研究发展项目 (201513102)

Fund: Supported by High Technology Research and Development Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (201513102)

引用格式: 黄海博, 孙文磊, 张冠, 等. 基于 NURBS 曲面的汽轮机叶片激光熔覆再制造路径规划[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 175-183.

HUANG H B, SUN W L, ZHANG G, et al. Path trajectory of laser cladding remanufacturing for turbine blade based on NURBS surface[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 175-183.

宏伟计划的开展,对高附加值的关键零部件修复、汽轮机叶片的再制造是充分减少资源消耗、缩短新产品制造周期的有效途径之一。

由于汽轮机叶片按异形结构设计,表面形貌变化多端、结构复杂、路径不易规划等特性,给熔覆工作带来了巨大的困难。目前已有诸多国内外学者进行深入的探索与研究:Jumyung Um等^[4]指出了目前多层熔覆成形采用近似成形技术,容易造成熔覆过程中零件几何误差的累积,使得表面质量和成形质量不尽人意,基于 STEP-NC 提出了一种混合制造方法,通过拓扑数据使得加工过程中几何误差保持较小,得到一种高精度自动化加工工艺,并通过型腔模型的加工验证了方法的可行性。Zheng等^[5]对复杂繁琐的传统示教的编程方法进行了改善,提出了一种新的提高熔覆效率和精度的编程方法。将 CAD 模型转化为 STL 模型,根据边界拓扑信息建立拓扑关系,通过粒子群算法提高模型的精度,由计算机自动生成熔覆路径,大大提高了熔覆效率,并通过叶片的熔覆试验对方法的可靠性进行了验证。X. Penaranda等^[6]针对叶片类零件在熔覆过程中宽度变化问题提出了一种基于几何自适应的激光熔覆方法,研究了熔覆功率大小对熔覆涂层厚度的影响,得到宽度不同的熔覆层相应的激光功率大小,并通过压缩机叶片的修复证实了结果的正确性。董世运等^[7]使用激光熔覆技术对坦克凸轮轴再制造进行了研究,采用分段调整扫描速率和边缘补偿等措施进行路径规划,得到了精度高、组织致密的熔覆层。李淑玉等^[8]通过对阀芯端帽工作面激光熔覆扫描路径进行规划,使用双螺旋方式和直纹式扫描路径进行了熔覆试验,发现使用双螺旋式扫描路径的得到的涂层耐磨性是直纹式的 2.5 倍,变形量仅为直纹式的 1/3。姜付兵等^[9]通过同轴送粉方式研究了大角度、姿态连续变化的熔覆试验,通过调整熔覆喷头,使其轴线方向与曲面法矢保持一致,从而在大角度倾斜曲面上获取均匀的熔覆涂层。通过显微组织分析,发现熔覆层与基材形成了良好的冶金结合、组织细密、无裂纹和气孔等缺陷,为复杂曲面零件熔覆提供了新的解决方法。但在复杂曲面零件上获取理想的熔覆层及工艺的可控性还有待继续探索。

由于汽轮机叶片表面形貌较为复杂,其截面

为自由曲线,所以一般使用 NURBS 曲线进行拟合,进而将叶片拟合为 NURBS 曲面。影响熔覆层质量的因素主要有送粉率、扫描速率、激光功率密度等工艺参数,其中送粉率和扫描速率容易控制。激光功率密度与激光束直径及扫描面积有关,在复杂曲面熔覆过程中受工件表面形貌影响,难以控制。为了解决这一难题,提出了一种将局部 NURBS 曲面拟合为曲率球的方法,用以简化计算激光扫描面积。通过调节激光头的姿态改变激光扫描面积,获取熔覆插补点、得到熔覆加工路径,使得基材表面获取稳定的激光功率密度,获得理想的熔覆层。整个激光熔覆作业的流程如图 1 所示。

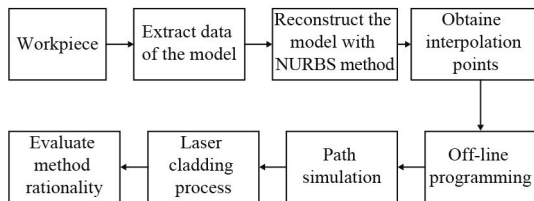


图 1 激光熔覆再制造流程图

Fig.1 Flow chart of laser cladding remanufacturing

1 叶片的 NURBS 曲面模型重构

作为描述工业产品几何形状的数学方法, NURBS 于 1991 年被列入工业产品数据交换的 STEP 国际标准^[10],在实际应用中,双三次 NURBS 已经能够达到 G^2 精度,所以用其来反求曲线曲面。

用理分式表示的 k 次 NURBS 曲面的方程为:

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)} \quad (1)$$

式中控制顶点 $d_{i,j}(i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n)$ 呈拓扑矩形排列, $w_{i,j}$ 是与顶点 $d_{i,j}$ 联系的权因子, $w_{ij}w_{m0}w_{0n}w_{mn} > 0$ 其余 $w_{ij} \geq 0$ 且顺序 $k \times l$ 个权因子不同时为零。 $N_{i,k}(u)(i = 0, 1, \dots, m)$ 和 $N_{j,l}(v)(j = 0, 1, \dots, n)$ 分别为 u 向 k 次和 v 向 l 次的规范 B 样条基^[11]。通过某厂家提供的部分叶片表面型值点如表 1。

将表 1 中的型值点中 y 方向作为 NURBS 曲面拟合的 U 方向,根据累计弦长法求得该方向上的节点矢量和控制点,再以 U 方向的控制点作为 V 方向的型值点,进行 V 方向的节点矢量和控制

表 1 部分汽轮机叶片表面型值点
Table 1 Surface data of several turbine blades

The first column			The second column			The third column			
<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	
15.00	9.36	1.04	20.00	-3.65	5.09	25.00	17.93	2.37	
15.00	-13.28	13.96	20.00	8.30	1.96	25.00	15.84	2.37	
15.00	-12.17	12.21	20.00	2.22	3.14	25.00	13.75	2.41	
15.00	-10.87	10.60	20.00	10.35	1.76	25.00	11.65	2.43	
.....									
15.00	15.49	0.11	20.00	18.59	1.08	25.00	-14.03	13.43	
15.00	13.43	0.33	20.00	12.41	1.56	25.00	-14.96	15.30	
15.00	11.37	0.56	20.00	-14.91	16.54	25.00	20.02	2.42	
.....									

点求解^[12], 最终通过 MATLAB 进行曲面拟合得到如下图 2 所示的叶片模型。

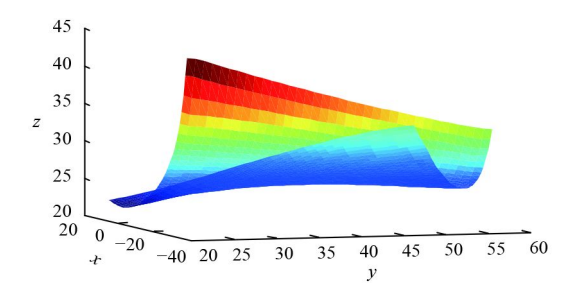


图 2 叶片的 NURBS 曲面拟合

Fig.2 Blade surface fitting with NURBS method

2 基材表面激光束扫描面积近似算法

2.1 曲率球拟合 NURBS 曲面

影响激光熔覆涂层质量的因素主要有送粉率、扫描速率、激光功率密度等工艺参数, 其中送粉率和扫描速率很容易得到控制, 而激光功率密度在复杂的曲面熔覆过程中, 由于激光束在基体上的扫描面积变化复杂, 这里提出了一种曲率球^[13]微小局部近似代替 NURBS 曲面的方法 (如图 3) 用于简化计算激光束扫描面积。对于给定的参数曲面 $P_{(u,v)}$, 如果知道曲面上任一点的坐标值 (u_0, v_0) , 就可以通过微分几何基本知识得到曲率球的相关参数: 其中曲面第一类基本型为:

$$E = P_u^2, F = P_u P_v, G = P_v^2 \tag{2}$$

曲面第二类基本型为:

$$L = n \cdot P_{uu}, M = n \cdot P_{uv}, N = n \cdot P_{vv} \tag{3}$$

其中 n 为点 (u_0, v_0) 处单位法向量:

$$n = (P_u \times P_v) / |P_u \times P_v| \tag{4}$$

设 κ_1 和 κ_2 为曲面上 P_0 点的两个主曲率:

$$\begin{cases} \kappa_1 = H + \sqrt{H^2 - K} \\ \kappa_2 = H - \sqrt{H^2 - K} \end{cases} \tag{5}$$

其中:

$$\begin{aligned} K &= (LN - M^2) / (EG - F^2) \\ H &= (EN - 2FM + GL) / 2(EG - F^2) \end{aligned} \tag{6}$$

取 $\kappa = \text{Max}(\|\kappa_1\|, \|\kappa_2\|)$, 为该点处曲率球的曲率, 曲率球的半径 $\rho = 1/\kappa$, 球心在单位法向量 n 所在方向上。由于曲率球是以曲面上某点的曲率的极大值的倒数为半径建立的球面, 该球面可以反映该点附近的曲面特性, 对于局部面积的计算误差较小, 所以这里采用该方法进行局部 NURBS 曲面面积的计算。

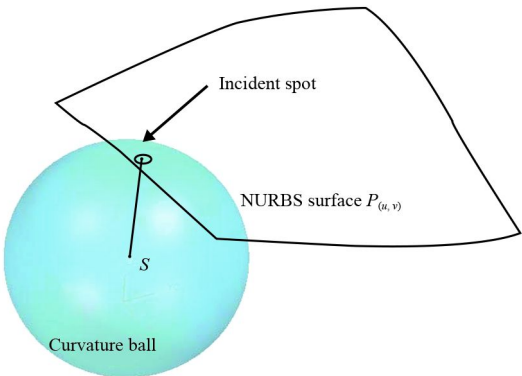


图 3 曲率球局部拟合自由曲面

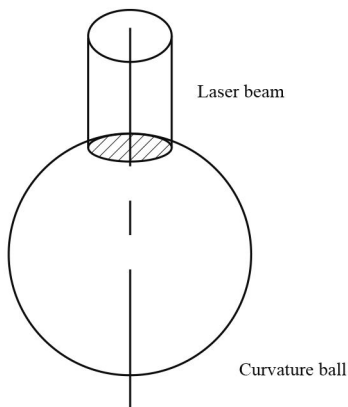
Fig.3 Local fitting of free-form surface by curvature sphere

2.2 激光束扫描面积计算方法

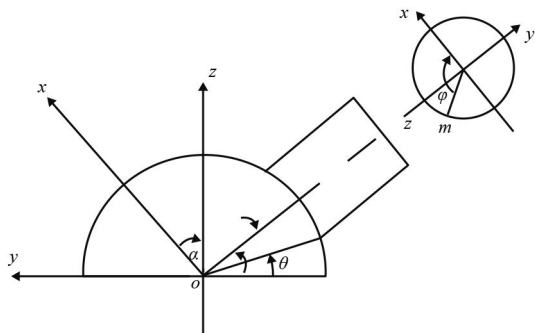
经过简化激光束与基材表面耦合模型, 激光束扫描区域可以近似为球面上的一部分, 由于激光束具有较好的方向性, 所以将激光束可以看成“圆柱体”。于是, 扫描面积即转化为圆柱体与球面的相贯线围成的空间曲面的面积, 大大简化了光斑扫描面积的计算。分析激光束照射在基材的情况, 总的来说可以分为两种形态: 圆柱体轴线过球心与球体相贯(图4); 圆柱体轴线不过球心与球体相贯(图5)。

对于过球心的情况扫描面积计算较为简单, 假设圆柱直径为 r , 球体直径为 R , 激光束照射在工件上的面积为 A 。球的方程可以表示为: $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$ 圆柱的方程表示为: $x^2 + y^2 = r^2$ 二者相贯线围成的面积可通过下式计算:

半球面被圆柱面所截出曲面为 Σ , 为半球面一部分, 方程为: $z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}$, 根据对面积的曲面积分计算法则:



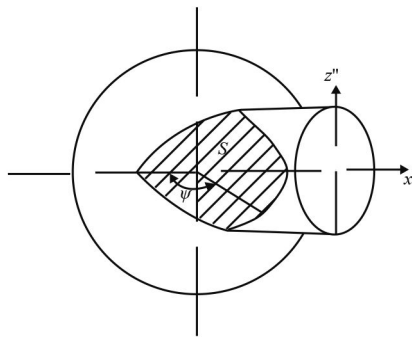
(a) Mathematical model by crossing the center of the sphere



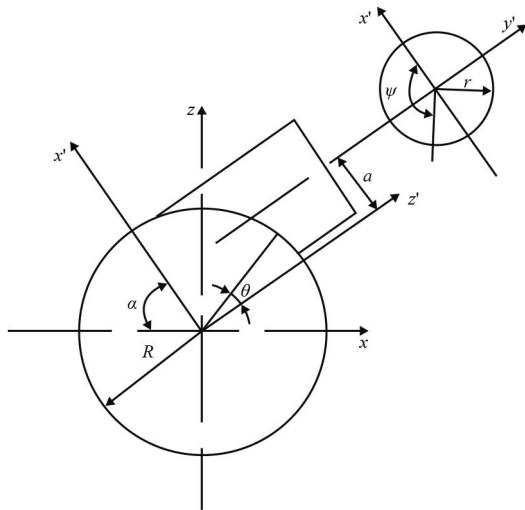
(b) Diagrammatic sketch by crossing the center of the sphere

图4 过球心圆柱与球面相贯

Fig.4 Crossing the spherical cylinder with the center of sphere



(a) Mathematical model without crossing the center of the sphere



(b) Diagrammatic sketch without crossing the center of the sphere

图5 不过球心圆柱与球面相贯

Fig.5 Crossing the spherical cylinder without the center of sphere

$$\begin{aligned} A &= \iint_{\Sigma} ds = \iint_{D_{xy}} \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2} dx dy \\ &= \iint_{D_{xy}} \frac{R}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} dx dy \end{aligned} \quad (7)$$

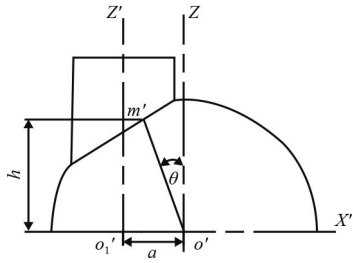
在极坐标下求解:

$$\begin{aligned} A &= \iint_{D_{xy}} \frac{R}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} dx dy \\ &= R \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^r \frac{\rho d\rho}{\sqrt{R^2 - \rho^2}} \\ &= 2\pi(R^2 - R\sqrt{R^2 - r^2}) \end{aligned} \quad (8)$$

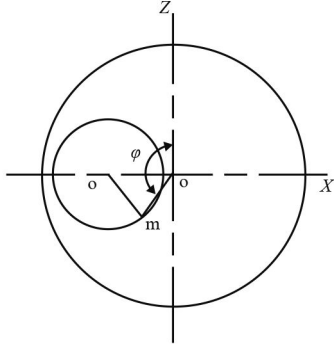
对于不过球心的情况可以同过坐标变换转化为如图6所示的形式:

计算方法同前面类似, 球面方程可以写成: $(x-a)^2 + y^2 + z^2 = R^2$, 圆柱面方程不变。则:

$$S = \iint_{D_{xy}} \frac{R}{\sqrt{R^2 - (x-a)^2 - y^2}} dx dy \quad (9)$$



(a) Schematic diagram of model transformation



(b) Intersection diagram of cylinder and sphere after model transformation

图6 坐标转换后圆柱与球体相贯

Fig.6 Cylinder and sphere intersection after the coordinate transformation

在极坐标下求解可得:

$$\begin{aligned}
 S &= \iint_{D_{xy}} \frac{Rs}{\sqrt{R^2 - (x-a)^2 - y^2}} dx dy \\
 &= \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^r \frac{Rr}{\sqrt{R^2 - a^2 - r^2 + 2ar \cos \theta}} dr \\
 &= \int_0^{2\pi} a \cos \theta \arcsin \frac{r - a \cos \theta}{\sqrt{R^2 - a^2 \sin^2 \theta}} d\theta + \\
 &\quad \int_0^{2\pi} \sqrt{R^2 - a^2 + 2ar \cos \theta - r^2} d\theta
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{式中: } a = R \sqrt{1 - (\cos \beta)^2}$$

$$\cos \beta = \frac{(xp_x + yp_y + zp_z)}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2})} \quad (11)$$

其中, $p(u, v) = \{p_x, p_y, p_z\}$ 为前一姿态的激光束的入射矢量。

3 激光束姿态调整方法

通过上述方法计算得到激光束扫描面积。但为了得到高质量的熔覆层, 需要保证熔覆过程中工艺参数的稳定, 这里的扫描面积能够直接反映激光功率密度的变化情况, 对于不满足熔覆加工要求的扫描面积, 在该处的激光功率密度必然也

不满足熔覆加工要求, 需要通过调节机器人末端姿态调整面积, 并得到熔覆加工插补点。通常调整方式是调整激光头轴线方向与曲面法向一致^[14], 但如何将插补点处的矢量信息变为能够被机器人识别的程序是实现熔覆加工的关键。

此次用于熔覆加工的设备为 KUKA 机器人, 其角度的变化顺序与航空领域的 roll—pitch—yaw 角度一致。角度 C 对应于 roll, 角度 B 对应于 pitch, 角度 A 对应于 yaw。记 $p_j = [x, y, z, a_x, a_y, a_z]$ 为一插补点, 其中 a_x, a_y, a_z 表示该点沿各坐标轴方向的矢量分量大小, 建立坐标系 PIJK, 通过坐标变换可以将激光熔覆头的位姿在世界坐标系 OXYZ 中描述 (如图 7 所示), 对姿态逆向求解即可得到对应的角度变化。其中, 坐标轴 K 轴为激光束方向与激光束矢量 K 相对应, $K = [a_x, a_y, a_z]^T$, J 轴正方向为激光束扫描前进方向, 与点在轨迹曲线的切向方向一致, 通过计算该点所在的 NURBS 曲线的切矢得到, 记 $J = [o_x, o_y, o_z]^T$, 通过数学知识可知, I 为 K 与 J 的叉积, 记 $I = [n_x, n_y, n_z]^T$ 。

由 I 、 J 、 K 构成的矩阵可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于 RPY 角度, 每次转动都是相对于参考系进行的, 可以获得的姿态矩阵为:

$$\begin{aligned}
 R &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $c\alpha = \cos \alpha$, $s\alpha = \sin \alpha$ 。

通过逆变换, 求解左乘矩阵 $\begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 的逆, 得到式 (13) 的左边为:

$$\begin{aligned}
 &\begin{bmatrix} c\alpha & s\alpha & 0 \\ -s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} n_x c\alpha + n_y s\alpha & o_x c\alpha + o_y s\alpha & a_x c\alpha + a_y s\alpha \\ n_y c\alpha - n_x s\alpha & o_y c\alpha - o_x s\alpha & a_y c\alpha - a_x s\alpha \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (14)$$

式 (13) 的右边为:

$$\begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} c\beta & s\beta s\gamma & s\beta c\gamma \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据矩阵的元素对应相等，可知

$$n_y c\alpha - n_x s\alpha = 0 \quad (16)$$

所以：

$$\alpha = A \tan 2(n_y, n_x) \quad (17)$$

当 $\cos\beta \neq 0$ 时，同理，根据矩阵元素相等可得：

$$\gamma = A \tan 2(o_z, a_z) \\ \beta = A \tan 2(-n_z, \sqrt{n_x^2 + n_y^2}) \quad (18)$$

当 $\cos\beta = 0$ 时，则逆解出现退化，只能求出 α 与 γ 的和或差，此时设定 α 值解出 γ 值，求得熔覆该叶片插补点的坐标及角度。

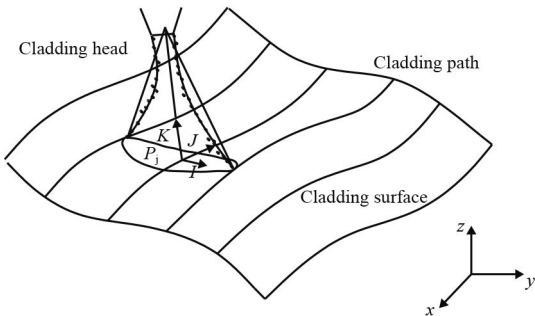


图7 熔覆作业坐标对应关系示意图

Fig.7 Schematic diagram of the coordinate correspondence for cladding operation

4 熔覆试验的仿真及加工

4.1 激光熔覆轨迹仿真

为了得到熔覆过程中的位姿变化，通过 MATLAB 对插补点处位姿进行求解如下图 8(a) 所示；为防止熔覆过程中出现碰撞或超程等危险情况，这里借助 CIMOCO 软件进行路径仿真，验证路径的正确性及可行性，得到如图 8(b) 所示的轨迹。

叶片材料为耐高温性能的司太立合金，化学成分如表 2。粉末材料为铁基粉末，其成分如表 3 所示。熔覆试验前，先对试验样件清洗，进行熔覆前处理。以路径规划的位姿放置在工作台并根据工艺试验设置熔覆工艺参数如表 4 所示。根据插补算法将得到的熔覆程序导入熔覆设备

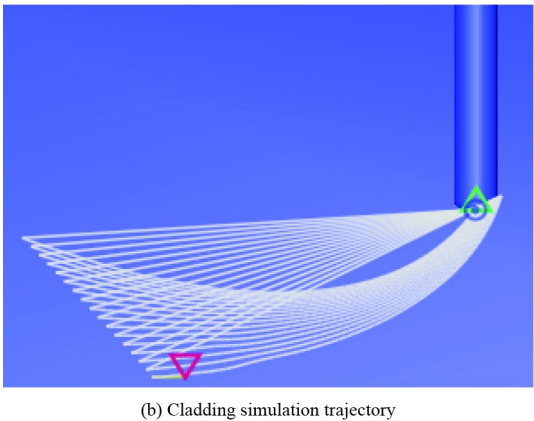
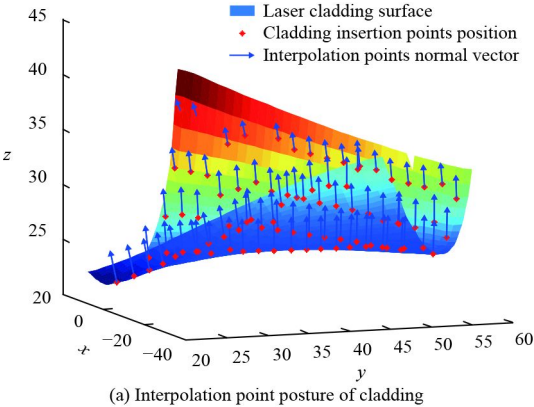


图8 叶片激光熔覆插补计算与轨迹仿真结果

Fig.8 Interpolation calculation and track simulation of blade laser cladding

表 2 司太立合金的化学成分

Table 2	Chemical composition of the Stellite						(w/%)
Element	C	Si	Cr	Ni	W	Fe	Co
Content	1.8	1.4	29	≤3.0	9.0	≤3.0	Bal.

表 3 铁基合金粉末的化学成分

Table 3	Chemical composition of Fe-based alloy powder						(w/%)
Element	Mn	Cr	Ni	Tb	B	Si	Fe
Content	1.3	10.9	6.3	3.2	0.1	0.8	Bal.

表 4 叶片激光熔覆工艺参数

Table 4	Parameters of the laser cladding blade	
Parameter	Value	
Laser power / kW	1.8	
Powder feeding rate / (g·s ⁻¹)	20	
Laser scanning speed / (mm·s ⁻¹)	4	
Lap rate	50%	
Cladding width / mm	4	

中，使用激光熔覆设备，根据熔覆程序对叶片进行熔覆加工。

4.2 叶片激光熔覆试验对比分析

等弧长算法作为复杂曲面熔覆的常见方法, 是以弧长为约束条件离散熔覆轨迹, 搜索插补点。但该方法并没有考虑熔覆过程中工艺参数的稳定性。为了验证提出等面积方法的合理性与可行性, 这里与等弧长算法获得的路径规划方法进行了对比, 得到的熔覆结果如图 9 所示。且通过

SEM 对熔覆层显微组织分析得到各部位的形貌图(如图 10 所示)。

图 9(a)(c) 为激光熔覆前的工件形貌图, 二者尺寸相同。图 9(b) 为等面积方法得到的熔覆结果, 图 9(d) 为等弧长方法得到的熔覆结果。可以发现宏观形貌上, 等面积算法所得熔覆层厚度均匀, 光亮平整, 但等弧长算法所得熔覆层的终点

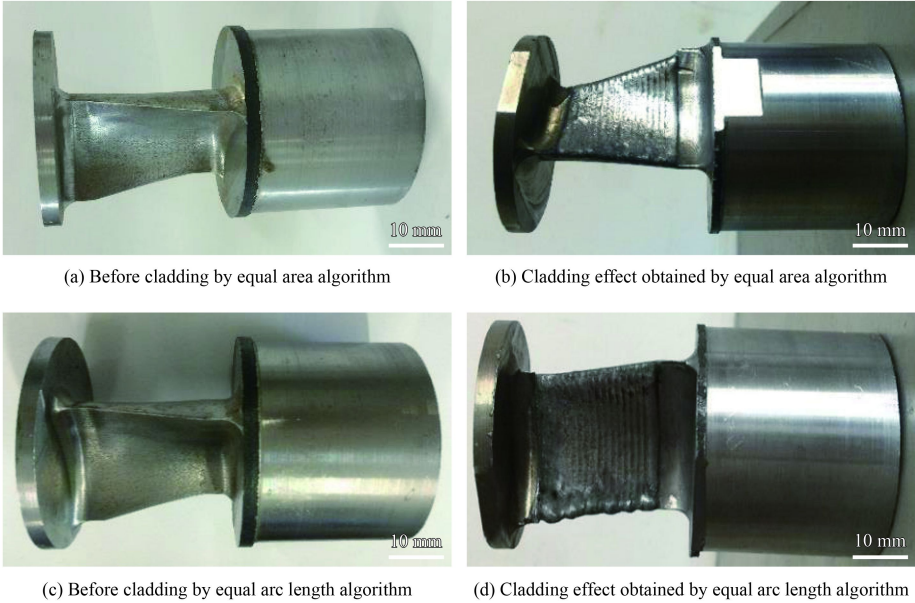


图 9 叶片激光熔覆试验结果对比
Fig.9 Comparison results of blade laser cladding

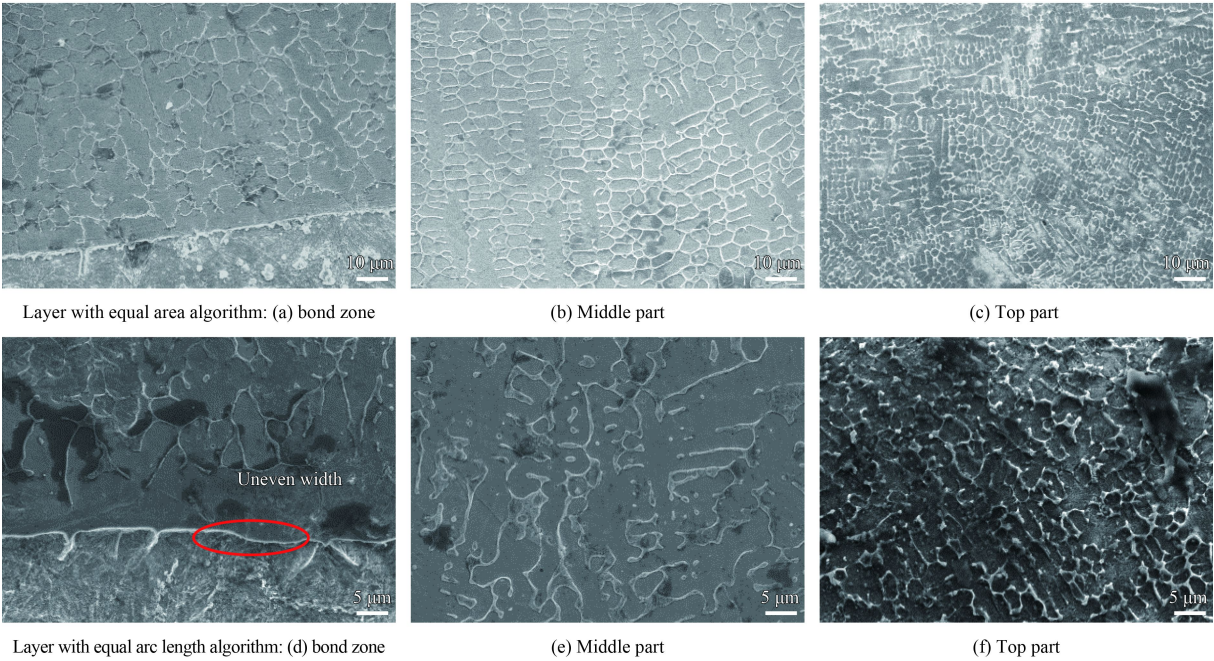


图 10 叶片熔覆层各部位 SEM 形貌
Fig.10 SEM images of different parts on the blade cladding layer

处有积瘤现象出现,这是由于等弧长算法只考虑了熔覆过程中离焦量的改变,激光头的熔覆姿态没有调整,导致机器人在减速过程中每一道的熔覆工艺参数扫描速度降低,致使实际熔覆过程中粉末相对增多,无法取得理想的熔覆层。

图 10(a)为等面积算法所得熔覆层显微形貌,从图 10(a)(b)(c)中可看到一条亮白色的白线,这说明熔覆层与基体形成了良好的冶金结合,由于温度梯度的影响。在图 10(b)(c)中可以看到熔覆层中部到顶部的柱状晶/等轴晶的变化,组织生长均匀,无明显缺陷,这与 Hunt-Lu 提出的晶体转变模型一致,在一定程度上反映了该方法的可行性。

图 10(d)(e)(f)为等弧长算法所得熔覆层的显微形貌,图 10(d)中发现结合界面形成了平面晶,形成了冶金结合,但宽度不均匀。这是由于路径规划不合理,熔覆过程中参数不稳定造成的。工艺在熔覆层中部和顶部有夹杂物出现,这是由于熔覆过程中熔池吸收的能量不均匀,结合界面处温度较高,在热量传递过程中,低熔点的溶质受温度梯度作用,流动到熔覆层中部及顶层,影响组织生长的均匀性,从而出现夹杂物。

5 结 论

复杂曲面零件的熔覆遇到的主要问题是:建立的几何模型误差大、熔覆过程中工艺参数不稳定、熔覆路径难以规划等,针对这些难题进行了研究。

(1) 借助拟合精度较高的 NURBS 曲线、NURBS 曲面构建模型,减小了由于几何模型造成的误差,提高了激光熔覆再制造精度,为熔覆路径规划提供了前提条件。

(2) 从保证激光功率密度的稳定性出发,采用控制激光束在基材表面的扫描面积来保证激光熔覆工艺参数的稳定性,为获得高质量熔覆涂层提供了保障。

(3) 通过 CIMOCO 软件进行路径仿真,保证了熔覆路径的准确性提高了熔覆加工效率,并根据熔覆层质量分析,验证了方法的可靠性。

参考文献

[1] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.
XU B S. Remanufacture engineering and its development in

China[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 1-6 (in Chinese).

- [2] 韩玉勇, 鲁俊杰, 李剑峰, 等. 基于激光熔覆的车床主轴再制造[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 147-153.
HAN Y Y, LU J J, et al. Lathe spindle remanufacturing based on laser cladding technology[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 147-153 (in Chinese).
- [3] 黄勇, 孙文磊, 陈影, 等. 曲面塑料模具激光熔覆再制造快速加工路径生成方法[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 150-158.
HUANG Y, SUN W L, CHEN Y, et al. Rapid processing path generation method for curved surface plastic mold remanufacturing by laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 150-158 (in Chinese).
- [4] UM J, RAUCH M, HASCOËT J Y, et al. STEP-NC compliant process planning of additive manufacturing: remanufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5): 1-16.
- [5] ZHENG H, CONG M, DONG H, et al. CAD-based automatic path generation and optimization for laser cladding robot in additive manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9-12): 1-10.
- [6] PERARANDA X, MORALEJO S, Lamikiz A, et al. An adaptive laser cladding methodology for blade tip repair[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(3): 1-7.
- [7] 董世运, 张晓东, 徐滨士, 等. 45 钢凸轮轴磨损凸轮的激光熔覆再制造[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(2): 85-87.
DONG S Y, ZHANG X D, XU B S, et al. Laser cladding remanufacturing of 45 steel camshaft worn cam[J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 2011, 25(2): 85-87 (in Chinese).
- [8] 李淑玉, 田新国, 李成彪. 阀芯端帽激光合金化扫描路径及耐磨性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 98-102.
LI S Y, TIAN X G, LI C B. Study on wear-resistance and scanning path of laser alloying on end cap working face[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 98-102 (in Chinese).
- [9] 姜付兵, 石世宏, 石拓, 等. 基于光内送粉技术的激光加工机器人曲面熔覆试验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 106-112.
JIANG F B, SHI S H, SHI T, et al. Experimental research on curved surface cladding based on robotic technology and inside-laser powder feeding technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 106-112 (in Chinese).
- [10] 戴士杰, 张熠, 王志平, 等. 基于 NURBS 的航空发动机叶片焊接修复的轨迹规划[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 23-26.
DAI S J, ZHANG Y, WANG Z P, et al. Trajectory planning of welded repair for aero-engine blades based on NURBS curve[J]. Transactions of the Welding Institution, 2015,

36(1): 23-26 (in Chinese).

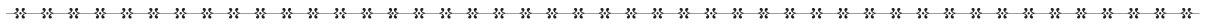
[11] 乐英. 基于 NURBS 曲面的汽轮机叶片重构及插补算法的应用研究[D]. 北京华北电力大学, 2011.
YUE Y. Research on reconstruction of steam turbine blade based on NURBS surface and interpolation algorithm application[D]. Beijing North China Electric Power University, 2011 (in Chinese).

[12] 陈燕丽. NURBS 复杂自由曲面造型方法的研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
CHEN Y L. Study on modeling method of NURBS complex free surface[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014 (in Chinese).

[13] 杨伟民, 楼天良, 林志伟, 等. 基于曲率球的参数曲面自适应三角化方法研究[J]. 制造业自动化, 2014, 36(10): 66-71.
YANG W M, LOU T L, LIN Z W, et al. Parametric surface triangulation based on curvature sphere[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(10): 66-71 (in Chinese).

[14] 陈影, 孙文磊, 黄勇, 等. 激光熔覆曲面零件再制造的机器人路径规划[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 79-88.
CHEN Y, SUN W L, HUANG Y, et al. Robot path planning of laser cladding surface parts remanufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 79-88 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)



• 本刊讯 •

第七届全国材料物理模拟与数值模拟学术会议将在福州召开

第七届全国材料物理模拟与数值模拟学术会议将于 2018 年 12 月 5—8 日在福建省福州市召开。此次会议旨在结合在我国新材料研制和加工领域(包括冶金工艺、材料制备、压力加工、焊接、铸造、热处理及其他新工艺)对物理模拟和数值模拟技术的广大需求,围绕材料、冶金和热加工领域物理模拟和数值模拟技术的基础理论,生产过程中物理模拟与数值模拟试验、软件的开发与应用、产业化生产及应用、成果转化中共性问题进行探讨和交流。欢迎各高等院校、科研院所、企业单位、设备厂家积极参加。同时会议将选拔推荐一批论文,参加 2019 年在俄罗斯举行的第九届材料物理模拟与数值模拟国际会议。

会议主题包括但不限于以下内容:①材料、冶金和热加工领域物理模拟与数值模拟的基本理论与发展方向;②在热/力模拟试验机及其他冶金和热加工试验设备上进行的物理模拟试验;物理模拟技术在新材料研制和热加工领域(包括冶金、压力加工、焊接、铸造、热处理、增材制造、粉末冶金、表面改性及其他新工艺)中的应用;③材料研制和热加工领域数值模拟及本构方程的建立;产品质量的监测、预报和控制;专家系统、人工神经网络技术在材料和冶金领域的应用等;④物理模拟试验设备的功能开发;⑤数值模拟软件的开发与应用;计算材料学及分子动力学模拟等;⑥钢铁材料、镁合金、铝合金、钛合金、高温合金等结构材料潜能的开发;⑦新能源材料与技术、新型材料电子封装技术、材料与环境的耦合研究;⑧其他领域(包括纳米技术、高能束、自蔓延、功能材料及梯度材料合成技术等)。所涉及的材料不仅是金属材料,也包括非金属材料如陶瓷、非金属基复合材料、高分子材料、生物材料等。

论文摘要(要求)截止日期为 2018 年 11 月 15 日。
会务联络人: 邱瑞婷 18059059553; E-mail: 120475352@qq.com

(本刊编辑部 供稿)