

激光熔覆曲面零件再制造的机器人路径规划

陈 影, 孙文磊, 黄 勇, 黄海博, 王鑫龙

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047

摘要 根据激光熔覆工艺特性, 针对曲面零件提出了一种路径规划方法, 采用三维扫描仪获取熔覆曲面点云数据, 应用点云切片法得到熔覆路径上的点集。利用等弓高得到稀疏化轨迹点集, 运用非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面拟合得到加工点的法矢量, 并按该方向偏置一定距离得到枪头运动轨迹点。通过熔覆实验并对实验样件作定量分析, 发现表面上的熔覆层质量良好, 从而验证了该方法的可靠性和实用性, 该研究为其他曲面零件的熔覆再制造修复提供了一定的参考。

关键词 激光技术; 曲面零件; 路径规划; 激光熔覆; NURBS 曲面; 熔覆层

中图分类号 TG156.99

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0502001

Robot Path Planning of Laser Cladding and Remanufacturing of Curved Surface Parts

Chen Ying, Sun Wenlei, Huang Yong, Huang Haibo, Wang Xinlong

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

Abstract A path planning method for curved surface parts based on the process characteristics of laser cladding is proposed. The point cloud data of the cladding curved-surface are obtained by the 3D scanner and the point set on the cladding path is obtained by the point cloud slicing method. The equal bow height is utilized to make the trajectory point set sparse and the non-uniform rational B-splines (NURBS) curved-surface is fitted to obtain the normal vector of the processing point, and the motion trajectory point of the nozzle is obtained by skewing a certain distance along the direction of this vector. Through the cladding experiment and the quantitative analysis of the experimental sample, it is concluded that the quality of the cladding layer on the curved surface is good, which verifies the reliability and practicability of the proposed method and provides certain reference for the cladding and remanufacturing of other curved-surface parts.

Key words laser technique; curved surface parts; path planning; laser cladding; NURBS curved-surface; cladding layer

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

1 引 言

对于曲面零件的激光熔覆加工再制造, 熔覆路径直接影响工件表面的熔覆效果和熔覆层质量。在曲面零件上进行熔覆修复再制造, 一直是现代生产中一个迫切需要解决的问题。董玲等^[1]采用等距截面与三角网格模型进行求交运算对自由曲面破损零件进行激光熔覆修复, 得到了较好的熔覆效果。刘立峰等^[2]结合逆向工程重构修复区的三维形貌, 对凸轮轴按熔覆加工工艺进行路径规划, 得到了一种有效的求取加工控制点矢量算法。姜付兵等^[3]利用机器人能够实现柔性加工的特点, 使同轴送粉喷头始终与熔覆加工点法线重合, 并对曲面熔池以及熔覆道成型进行分析, 得出通过控制准直气速度能够使熔道宽度保持稳定的结论, 最

收稿日期: 2016-11-24; **收到修改稿日期:** 2017-01-12

基金项目: 新疆高技术研究发展项目(201513102)、自治区公共技术服务体系建设项目(2015531096)

作者简介: 陈 影(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆修复方面的研究。E-mail: 1018978730@qq.com

导师简介: 孙文磊(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事 CAD/CAM 及先进制造技术方面的研究。

E-mail: sunwenxj@163.com(通信联系人)

终在大角度曲面上得到了质量良好的熔覆层。Calleja 等^[4]利用五轴数控加工的方法,结合软件 Unigraphics 的后处理模块规划路径,为激光熔覆曲面的堆积加工提供了一种新方法。朱刚贤等^[5]通过对激光加工机器人系统的程序控制实现了基板 $0^\circ \sim 150^\circ$ 的倾斜和熔覆头相应姿态的连续变化,研究了不同倾斜角度基板对熔覆层截面尺寸及组织的影响规律,并对熔池进行了受力分析。

自由曲面上的激光熔覆是多种因素耦合的非线性问题,熔覆层质量不仅与激光熔覆特征、枪头的数学模型、熔覆工艺参数^[6-7]及曲面的本身复杂特征有关,还与熔覆轨迹密切相关。目前,大多数曲面激光熔覆路径规划都基于计算机辅助设计(CAD)模型重构技术,但该技术计算难度较大,且需要加工人员具备较好的 CAD 基础;同时,大部分相关研究对于加工点的求取并没有进行详细的方案介绍,且法矢的求取方法各不相同。本文结合逆向工程技术获取曲面点云数据,采用点云切片技术对得到的点云数据直接进行处理,最终形成曲面零件熔覆路径,保证熔覆加工点的精度,同时提高了计算效率。根据熔覆工艺特性确立弓高值,进而稀疏化切片上的加工点,从而获得熔覆加工点。采用非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面拟合熔覆曲面,分析曲面的微分几何特性,可较为准确地得到加工点的法向矢量,并得到熔覆枪头的姿态,该研究为激光熔覆在复杂曲面再制造领域的推广提供了一种有效的加工方法。

2 同轴光粉作用模型及送粉实验

建立同轴光粉作用模型是进行轨迹规划的前提,光粉作用模型需要考虑熔覆时激光光斑大小、激光束有效加工直径、熔覆粉末由喷嘴喷出时产生的粉末流束腰直径和范围,以及由于曲面零件的表面形状变化和激光加工的特性所需要预留的枪头防撞距离。根据熔覆层形成冶金结合的条件,计算出有效熔覆加工时的离焦量变化范围,为确定加工点提供理论依据。熔覆加工时光粉作用模型如图 1(a)所示^[8],其中 L 为激光工作直径, W 为散射宽度。零件表面获得冶金结合熔覆层的必要条件是粉末流的束腰直径 d 在激光束的有效加工直径范围 D 内,即 $D \geq d$,由此得出在激光熔覆加工过程中,有效加工范围在图 1(a)所示的 3~4 之间,激光枪头在平行于激光束方向的移动范围为 $\Delta\epsilon$ 。图 1(b)为送粉实验示意图,可得出粉末束腰直径、束腰高度以及束腰长度随枪头角度的变化范围,同时找出合适的送粉载气流量,确定熔覆工艺参数。

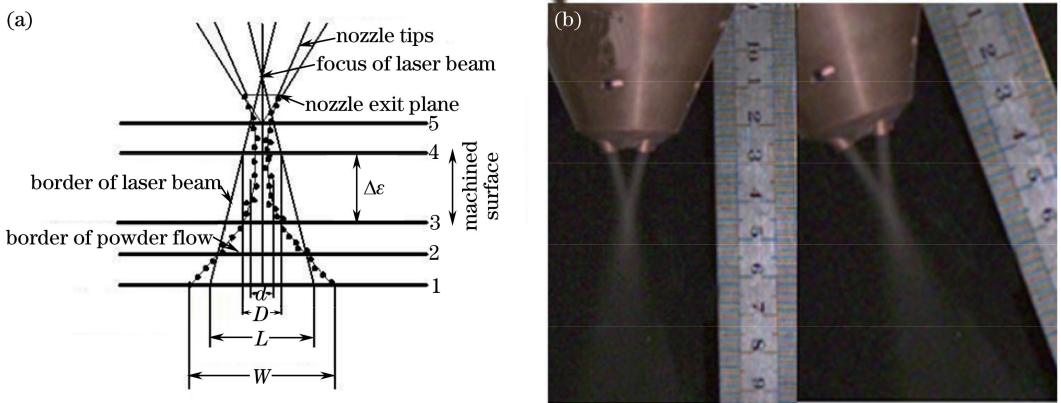


图 1 (a)光粉作用模型和(b)送粉示意图

Fig. 1 (a) Model of interaction between light and powder and (b) schematic diagram of powder feeding

3 曲面零件熔覆路径的生成

3.1 曲面点云切片

获取曲面零件的表面信息是进行熔覆加工轨迹规划的第一步,随着逆向反求技术的日益成熟,逆向三维扫描已成为反求零件三维模型和表面数据的主要方法之一。通过三维扫描仪获得待熔覆曲面离散点的几何坐标数据点云 $\Omega = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$,其中 $P_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ 为点坐标。对获得的点云数据进行拼合、去噪、滤波、精简处理,得到边界轮廓清晰、误差小、密度适中的点云,如图 2(a)所示。对处理后的点云用一定厚度的平面族 Γ 与之相交,进行切片,生成熔覆轨迹。切片的厚度 κ 由点云密度确定,即 $\kappa = k \times \rho$,其中 ρ 为

点云密度, k 为系数, 一般取 1~4。切片的方向主要与熔覆的曲面有关, 一般情况下需引入人工交互手段, 结合熔覆曲面的实际情况, 综合考虑扫描路径往返的次数, 遵循加工效率最高的原则, 减少空行路程和跳跨时间, 从而减少开关光、粉、气的次数。通常切片方向与熔覆路径相互垂直。在切片时, 一般使切片方向平行于某一坐标轴, 因此当点云模型不与任意一轴平行时, 应采用坐标变换使其达到要求, 从而方便切片设计。平面族 Γ 中每个切平面的间距 δ 为熔覆路径间距, 主要受熔覆搭接率的影响, 由熔覆搭接实验具体确定, 如图 2(b) 所示。熔覆面是自由曲面, 激光枪头会根据零件曲率变化而发生角度改变, 因此需要根据激光熔覆曲面零件的工艺特点, 采用变姿态方法进行熔覆工艺实验, 并从工艺参数中选出最优的一组, 作为曲面熔覆实验的工艺参数, 经测量得到单道熔覆宽度和高度, 再计算得到切平面间距 δ 和相应的搭接率 η_δ [2]:

$$\delta = \frac{\{[(w/2)^2 + h^2]/(2h)\}^2 \arcsin(wh)/[(w/2)^2 + h^2] - [(w/2)^2 - h^2]/(hw)}{h}, \quad (1)$$

$$\eta_\delta = \frac{w - \delta}{w}, \quad (2)$$

式中 w 为单道熔覆道的宽度, h 为熔覆道的高度。

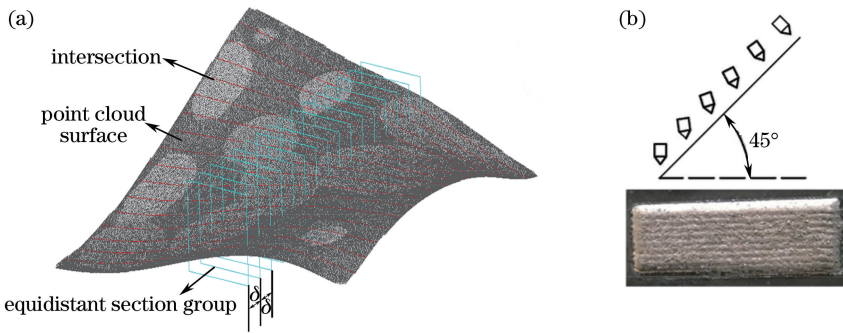


图 2 (a)点云切片示意图;(b)变姿态熔覆搭接示意图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of point cloud slicing; (b) schematic diagram of cladding overlapping with variable attitude

最终得到点云与每一个切平面交线上的切片点云^[9-10] $D_i = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$, 如图 3 所示, 即为生成的熔覆加工轨迹。

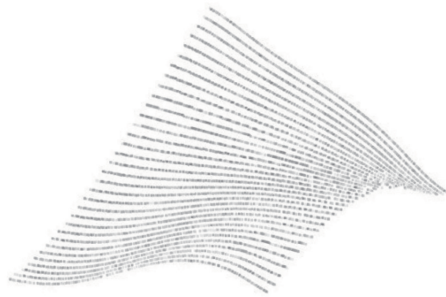


图 3 切片点云

Fig. 3 Sliced point cloud

3.2 曲面加工点的确定

激光熔覆过程中, 由切片得到的曲面熔覆轨迹上的点云数据特别密集, 在一个光斑直径范围内包含许多点。如果激光枪头对每个点进行插补加工, 会降低加工效率, 减慢激光扫描速度, 增大熔覆比能量, 导致较大程度的合金化, 进而产生大稀释率、污染熔覆层, 损害熔覆层性能^[11]。然而, 如果扫描速度和加工步长弓高过大, 基体与熔覆层之间不能形成冶金结合, 达不到熔覆的目的。因此, 需要合理设计熔覆点数量, 得到符合要求的加工点。根据同轴光粉作用模型, 利用熔覆过程中激光枪头在平行于激光束方向上的移动范围 $\Delta\epsilon$, 进行点云稀疏, 得出满足要求的熔覆数据点, 如图 4 所示。

图 4(a) 为加工点的求取方法, 首先对切片后的点云按照熔覆扫描方向进行排序, 得到 $d_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ 。然后在排好序的截面上, 连接 d_i 与 d_{i+2} , 则 d_{i+1} 到 d_i, d_{i+2} 连线的距离为 $d_{\epsilon_{i+1}}$ 。若

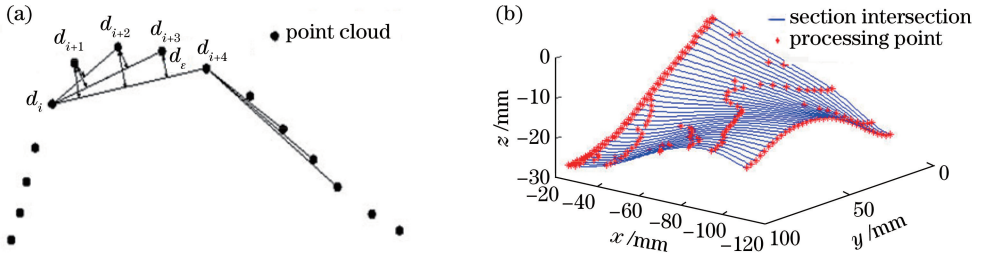


图 4 熔覆加工点的求取。(a)熔覆点的求取方法;(b)表面上的加工点

Fig. 4 Obtaining of cladding processing point. (a) Method for obtaining cladding points; (b) processing points on curved-surface

$d_{\epsilon_{i+1}} < \Delta\epsilon$, 则继续向下搜索, 连接 d_i 与 d_{i+3} , 分别求出 d_{i+2}, d_{i+1} 到 d_i 与 d_{i+3} 连线的距离 $d_{\epsilon_{i+2}}, d_{\epsilon_{i+1}}$, 若 $\max(d_{\epsilon_{i+1}}, d_{\epsilon_{i+2}}) < \Delta\epsilon$, 继续搜寻下一个点, 直到 $\max(d_{\epsilon_{i+1}}, d_{\epsilon_{i+2}}, d_{\epsilon_{i+3}}, \dots, d_{\epsilon_{i+n}}) > \Delta\epsilon, n = 1, 2, 3, \dots, m - 1$, 则 d_{i+n} 为其中一个加工点, 同时以 d_{i+n} 为起点, 以同样的方法继续往下搜寻下一个加工点, 并依次输出, 得出满足要求的加工点集。求取两点间直线的方程为

$$\frac{x - x_i}{x_{i+n} - x_i} = \frac{y - y_i}{y_{i+n} - y_i} = \frac{z - z_i}{z_{i+n} - z_i} = t, \quad (3)$$

式中 t 为斜率。

中间点到其他两端点连线之间距离 d_{ϵ} 为

$$d_{\epsilon} = \left\{ [(z_{i+n} - z_i)(y - y_i) - (y_{i+n} - y_i)(z - z_i)]^2 + [(x_{i+n} - x_i)(z - z_i) - (z_{i+n} - z_i)(x - x_i)]^2 + [(y_{i+n} - y_i)(x - x_i) - (x_{i+n} - x_i)(y - y_i)]^2 \right\}^{1/2} / [(x_{i+n} - x_i)^2 + (y_{i+n} - y_i)^2 + (z_{i+n} - z_i)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

求得的熔覆曲面切片上每条熔覆道上的加工点如图 4(b)所示。

3.3 熔覆曲面法矢量的计算

在熔覆过程中, 要求激光束始终与激光扫描点的法向矢量重合。可通过分析曲面的微分几何特性, 求出曲面上加工点的法向矢量。非均匀有理 B 样条曲线^[12-14]为标准解析曲线曲面及自由型曲线曲面提供了统一的数学表示方法, 同时为工程数据库的存取及应用提供了便利, 因此采用 NURBS 曲面拟合熔覆面点云 $P(u, v)$ 并建立数学表达式, 即

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}, \quad (5)$$

式中 $d_{i,j} (i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n)$ 为熔覆曲面上相对应的控制顶点, 可由型值点反求得到; $w_{i,j}$ 为其下标相对应的控制点的全因子, 要求 $w_{0,0}, w_{m,0}, w_{0,n}, w_{m,n}$ 均大于零, 其他 $w_{i,j} \geq 0$ 且 $k \times l$ 个权因子不能同时为零; u, v 代表曲面网格中横向截面与纵向截面的参数方向, $N_{i,k}(u), N_{j,l}(v)$ 分别为由 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{m+k+1}\}$ 方向和 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n+l+1}\}$ 方向的节点矢量按 De Boor-Cox 递推公式决定的规范 B 样条基函数; 当 k 和 l 同时为 3 时, (5) 式为 NURBS 双三次曲面方程。首先将由点云切片得到的三维数据点集 D_i 作为拟合 NURBS 曲面的型值点, 以切片方向作为 U 方向, 采用累计弦长法求出 U 方向的节点矢量, 进而反求出该方向上的控制点, 再以 U 方向控制点作为对应 V 方向的型值点, 求得曲面控制点集 $d_{i,j}$, 最后拟合出 NURBS 曲面, 如图 5(a)所示。

曲面上某熔覆点 $S(u_0, v_0)$ 关于 u 的偏导数即为 u 向切矢量, 即 $S_u(u_0, v_0) = \left. \frac{\partial S(u, v_0)}{\partial u} \right|_{u=u_0}$, v 向切矢

量 $S_v(u_0, v_0) = \left. \frac{\partial S(u_0, v)}{\partial v} \right|_{v=v_0}$, 若 $S_u(u_0, v_0) \times S_v(u_0, v_0) \neq 0$, 则该点在曲面上的法向矢量为

$$\mathbf{n} = \frac{S_u(u_0, v_0) \times S_v(u_0, v_0)}{|S_u(u_0, v_0) \times S_v(u_0, v_0)|}. \quad (6)$$

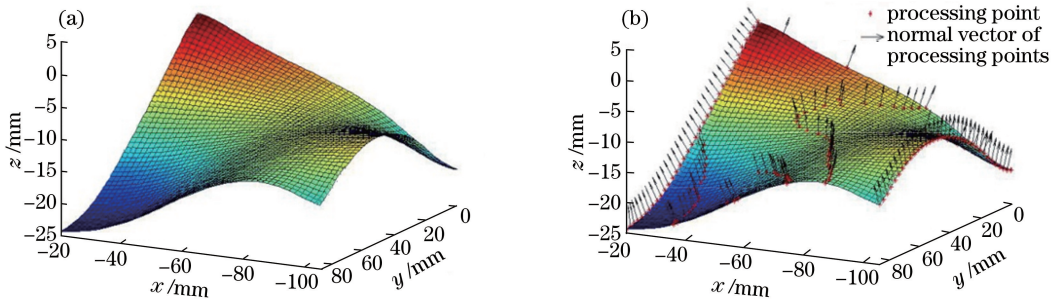


图 5 (a) NURBS 曲面; (b) 曲面上加工点法矢

Fig. 5 (a) NURBS curved-surface; (b) normal vector of processing points on curved-surface

最后对曲面上加工点求取法向矢量,如图 5(b)所示。

激光熔覆在加工过程中,激光枪头与加工点要保持一定的距离,因此需要将加工点向法矢方向偏置一定的距离 τ ,以得到枪头的行驶轨迹点。若在曲面上获得的加工点集为 P_i ,则用偏置法按距离 τ 偏置得到熔覆枪头的行走轨迹点 S_i 为

$$S_i = P_i + \tau \frac{n_i}{\|n_i\|}, \quad (7)$$

式中 P_i 为加工点集, n_i 为曲面上对应点的法向矢量。为使曲面边界平整,一般将轨迹向曲面外延伸一定距离,以保证加工质量,最终形成的加工轨迹如图 6 所示。

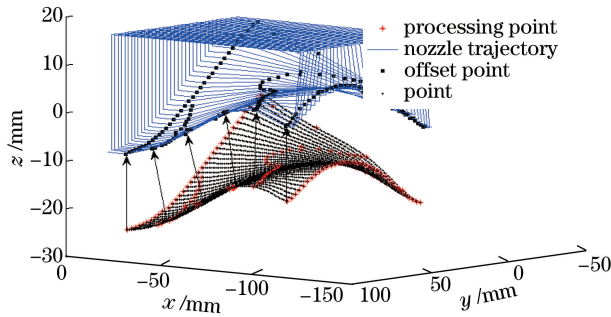


图 6 最终的激光枪头路径

Fig. 6 Final path of laser nozzle

4 机器人位置与姿态的确定

定义 a_x 、 a_y 、 a_z 分别为熔覆枪轨迹上加工点 P_j 点所在处的曲面法向矢量沿 X 、 Y 、 Z 方向的分量大小。在 P_j 点上建立固定在熔覆枪头上的局部坐标系 $PIJK$,则枪头在基体坐标系 $OXYZ$ 上的位置和姿态可以用 $PIJK$ 与 $OXYZ$ 的相对关系来确定,如图 7 所示。

若定义 P_j 处激光枪头的位置和姿态为 $p = [p_x \ p_y \ p_z \ \theta_z \ \theta_y \ \theta_x]$,其中 p_x 、 p_y 、 p_z 为点 P_j 在坐标系 $OXYZ$

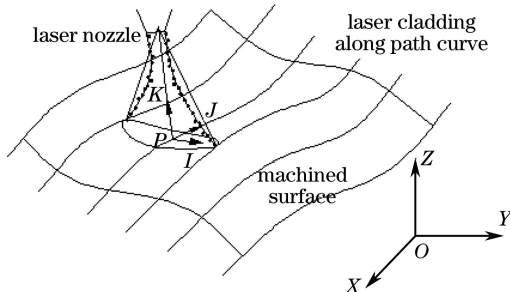


图 7 复杂曲面熔覆作业示意图

Fig. 7 Schematic diagram of cladding operation on complex curved-surface

下的值; $\theta_z, \theta_y, \theta_x$ 为PIJK在OXYZ坐标系下用欧拉角^[15]表示的姿态角。加工点 P_j 点的坐标即为枪头位置的坐标值,有 $p_x = x, p_y = y, p_z = z$ 。激光束矢量 \mathbf{K} 对应于局部坐标系PIJK中的K轴,则 $\mathbf{K} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$,因此只需求得I轴、J轴即可得到熔覆枪头姿态。令J轴正方向为熔覆点 P_j 沿曲线前进方向上的切线方向,则对 P_j 点所在截面上的点拟合NURBS曲线,并求出该点的切向矢量,得到 $\mathbf{J} = [o_x \ o_y \ o_z]^T$; \mathbf{I} 为 \mathbf{K} 与 \mathbf{J} 的叉积,记为 $\mathbf{I} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ 。则由 $\mathbf{I}, \mathbf{J}, \mathbf{K}$ 构成的旋转矩阵 \mathbf{R} 可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

机器人末端姿态的变化是激光加工点绕X、Y、Z各轴旋转得到,则其对应的转动齐次矩阵表示为

$$\mathbf{R}_{ot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{ot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{ot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由(9)式构成的复合转动矩阵 \mathbf{R}_{PY} 为

$$\mathbf{R}_{PY}(\theta_z, \theta_y, \theta_x) = \mathbf{R}_{ot}(z, \theta_z) \mathbf{R}_{ot}(y, \theta_y) \mathbf{R}_{ot}(x, \theta_x) \quad (10)$$

由(10)式可求出对应的欧拉角表示的姿态为

$$\mathbf{R} = [n \ o \ a] = \mathbf{R}_{PR}(\theta_z, \theta_y, \theta_x) \quad (11)$$

式中

$$\begin{cases} \theta_z = \text{ATAN2}(n_y, n_x) \\ \theta_y = \text{ATAN2}(-n_z, n_x \cdot \cos \theta_z + n_y \cdot \sin \theta_z) \\ \theta_x = \text{ATAN2}(a_x \cdot \sin \theta_z - a_y \cdot \cos \theta_z, o_y \cdot \cos \theta_z - o_x \cdot \sin \theta_z) \end{cases} \quad (12)$$

其中 ATAN2 是双变量反正切函数。利用上述方法计算得到轨迹上各熔覆点激光枪头的姿态,将得到的数据输入德国 KUKA 机器人编程软件 Orange Edit 进行高级编程,得出最终机器人的运行路径,进而形成熔覆加工代码。

5 实验与分析

5.1 熔覆设备及工艺参数的选定

对轨迹规划方法进行实验,采用图 8 所示的激光熔覆加工设备,主要包括德国 IPG 光纤激光器、六自由度 KUKA 机器人、同轴送粉喷头、送粉系统、气体保护系统及其他辅助装置^[16]。实验采用的熔覆工艺参数见表 1,熔覆材料采用 Fe#1 基粉末,具体化学成分见表 2。

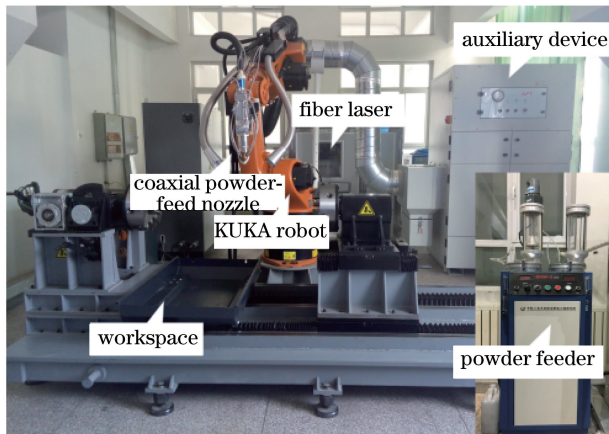


图 8 激光熔覆加工设备

Fig. 8 Laser cladding processing equipment

表 1 熔覆工艺参数

Table 1 Cladding process parameters

Laser power /kW	Defocusing amount /mm	Powder feeding rate /(g/min)	Laser scanning speed /(mm/min)	Lap rate /%	Cladding width /mm	Cladding height /mm	Parts substrate
1.8	16	12	500	50	4	1.5	45 # steel

表 2 Fe#1 基粉末的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions of Fe#1-base alloy powder (mass fraction, %)

Element	C	Si	Cr	Ni	Mo	Tb	Fe
Content	2.5-3.7	0.4-0.6	6.5-11	3.3-5.4	0.8-1.2	1.9-2.5	Bal.

5.2 熔覆层形貌与厚度分析

图 9 为 20 道熔覆搭接形成的熔覆层效果图,可以看出熔覆层表面光亮且波纹度较小,无表面裂纹和粘粉现象,在曲面曲率变化较大的位置搭接良好。为检测熔覆层厚度,从熔覆层边缘第一道开始,按熔覆进给方向进行切片,切片数量为 8 道,分别为第 1 道中间,第 1 道与第 2 道搭接部分,第 7 道中间,第 7 道与第 8 道搭接部分,第 13 道中间,第 13 道与 14 道搭接部分,第 19 道中间,第 19 道与第 20 道搭接部分。对每一道测量多点取平均值,得到各道的熔覆宽度如图 10 所示,可以看出,厚度变化明显呈锯齿形,这是由于搭接时出现了波峰和波谷。熔覆层厚度差均值约为 0.07 mm,说明熔覆层表面波纹度较小,熔覆质量较高,整体形貌较好。

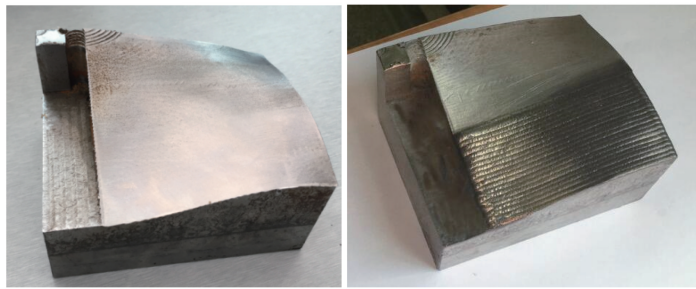


图 9 熔覆层实物效果图

Fig. 9 Physical effect diagram of cladding layer

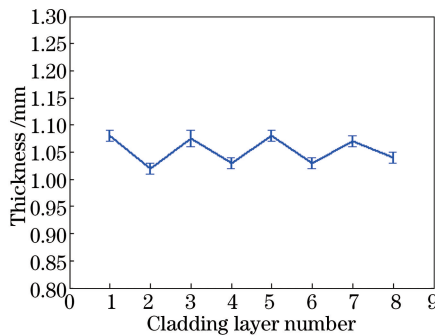


图 10 熔覆层厚度分布

Fig. 10 Thickness distribution of cladding layers

5.3 熔覆层显微组织分析

对熔覆层质量进行显微组织分析,首先将试样在王水中腐蚀 10~15 s,在 400 倍光学显微镜下观察得到熔覆层的微观组织图,如图 11 所示。其中图 11(a)为熔覆层结合区横截面形貌图,分别由熔覆层、结合区以及基体三部分组成,可以清晰看到熔覆层与基体之间存在明显的白色分界带,这是由于在熔覆凝固初期,界面结合处温度梯度较大,而结晶速率很小,在基体表面生长出了平面晶,说明基体与熔覆层形成了冶金结合。随着时间推移,温度梯度减小,结晶速率变大,在固液中产生正的温度梯度,则晶粒的生长方向平行于合金溶液最大的散热方向,并在靠近基体的熔覆组织中出现垂直于界面生长的胞状结构晶粒。图 11(b)和图 11(c)

为涂层中部和顶部的显微组织,其晶粒为树枝状结构且生长具有方向性。这是由于随着凝固的继续,温度梯度继续减小,结晶速率不断变大,在涂层中部和顶部出现许多枝晶组织;但中部散热主要通过基体一侧,而顶部散热渠道较多,顶部温度骤降形成新的晶核,因此在中部形成具有单一生长方向的柱状枝晶,而在顶部则出现自由生长的树枝晶。从图 12 所示的熔覆层结合区、中部和顶部的扫描电子显微镜(SEM)照片,可以看出熔覆层组织均匀、致密,有极少量气孔和显微缩孔产生。可以借助外界因素控制熔覆层缺陷的产生,如清理基材,干燥合金粉末,减小熔覆层厚度以及采用合适的保护气体流量等。

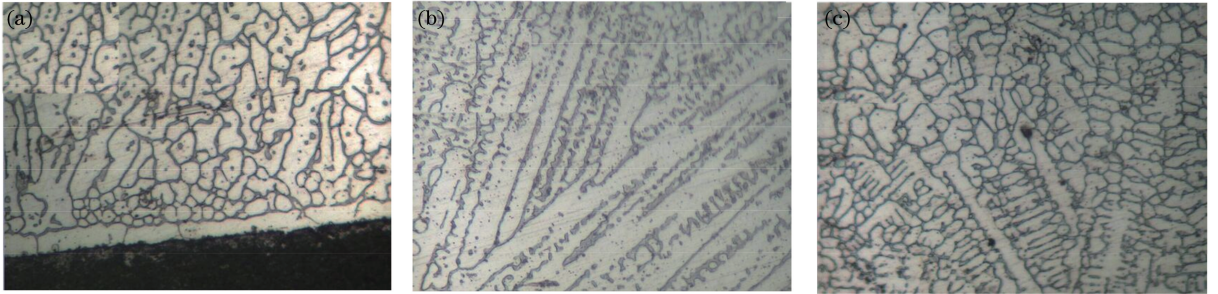


图 11 熔覆层显微组织。(a)结合区;(b)中部;(c)顶部

Fig. 11 Microstructure of cladding layer. (a) Bond zone; (b) middle part; (c) top part

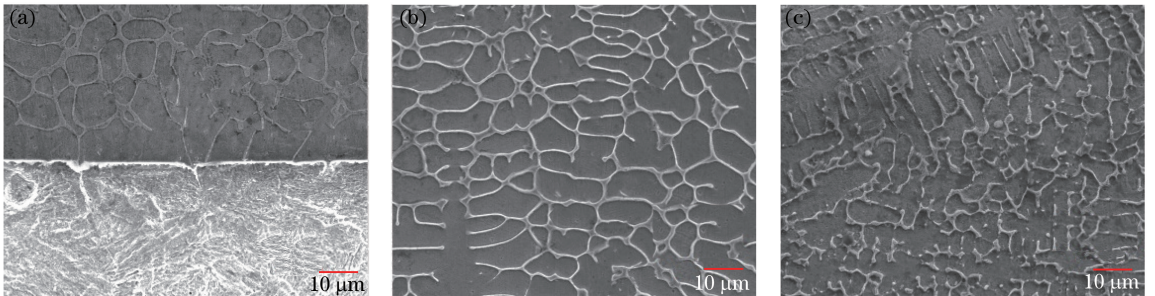


图 12 熔覆层 SEM 照片。(a)结合区;(b)中部;(c)顶部

Fig. 12 SEM photos of cladding layer. (a) Bond zone; (b) middle part; (c) top part

试样中熔覆层整体金相照片如图 13 所示,可以看出熔覆层整体形貌较好,微观的组织缺陷主要集中在熔覆层顶部。这是由于不同成分的元素凝固点不同,高熔点元素先凝固,而低熔点溶质元素随固液界面逐渐流向上层,使得表面的低熔点成分增多,不均匀性增加,在熔覆层组织中出現了一些粗大的夹杂物。一般情况下,熔覆修复后的零件一般要进一步进行机加工,以去掉表面熔覆层。

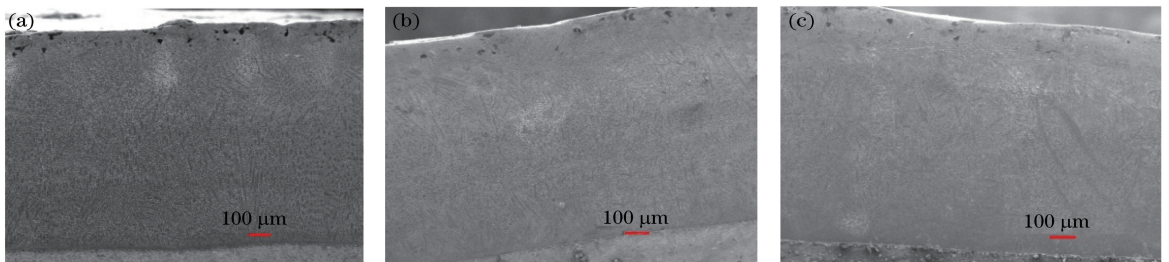


图 13 熔覆层整体金相照片。(a)结合区;(b)中部;(c)顶部

Fig. 13 Overall metallographic photos of cladding layer. (a) Bond zone; (b) middle part; (c) top part

5.4 熔覆层显微硬度

将在砂纸上磨好及抛光的样件在质量分数为 4% 的稀硝酸中腐蚀 3~5 s,使用显微硬度计分别对 8 道熔覆道中取得的试样进行显微硬度测量,每个试样测试点从距离熔覆层顶端同一高度开始,间隔一定距离朝基体方向依次取 9 个点,结果如图 14 所示。可以看出,不同试样的硬度分布因熔覆先后顺序稍有波动,但整体基本保持在 340 HV 左右。在同一熔覆道中,熔覆层硬度明显高于基体硬度。

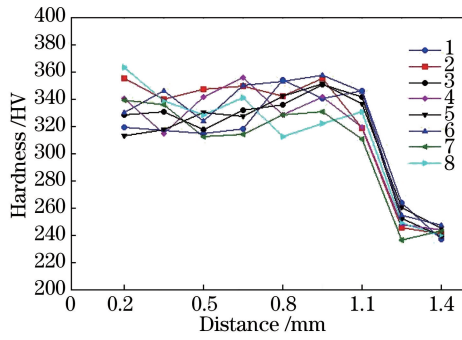


图 14 不同道次熔覆层横截面硬度分布

Fig. 14 Cross-sectional hardness distribution of cladding layer for different channels

6 结 论

直接对逆向扫描获取的曲面点云数据进行路径规划,避免了二次拟合曲面点造成的位置误差。采用简便的点云离散方法求取加工点,运用 NURBS 曲面拟合得出熔覆加工点的法向矢量,并将熔覆扫描点的位置和矢量转化为机器人加工代码,结合机器人柔性加工的特点,进行机器人连续变姿态熔覆加工实验,最终得到的熔覆层表面形貌良好、厚度均匀、组织致密,且没有产生明显裂纹和气孔。曲面不同位置熔覆层与基体均结合良好,且熔覆层硬度明显高于基材的,进一步说明了该方法的可行性。

参 考 文 献

[1] Dong Ling, Yang Xichen, Zhang Haiming, *et al.* Path generation for repairing damaged parts of free-form surfaces in laser remanufacturing[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0703007.
董 玲, 杨洗陈, 张海明, 等. 自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703007.

[2] Liu Lifeng, Yang Xichen. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0703008.
刘立峰, 杨洗陈. 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703008.

[3] Jang Fubing, Shi Shihong, Shi Tuo, *et al.* Experimental research on curved surface cladding based on robotic technology and inside-laser powder feeding technology[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0803003.
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): 0803003.

[4] Calleja A, Tabernero I, Ealo J A, *et al.* Feed rate calculation algorithm for the homogeneous material deposition of blisk blades by 5-axis laser cladding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(9): 1219-1228.

[5] Zhu Gangxian, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.* Research on variable reference plane cladding based on laser processing robot with inside-laser powder feeding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303010.
朱刚贤, 石世宏, 傅戈雁, 等. 基于激光加工机器人的光内送粉变基面熔覆研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303010.

[6] Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 296-301.
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.

[7] Li Yangliang, Bai Xiaobo, Wang Li, *et al.* Effect of laser cladding processing parameters on microstructure and properties of cladding layer[J]. Material & Heat Treatment, 2009, 38(12): 101-103.
李养良, 白小波, 王 利, 等. 激光熔覆工艺参数对熔覆层组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(12): 101-103.

[8] Liu Ximing. Powder-laser matching in the coaxial powder feeding and laser cladding process[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2012, 33(5): 513-520.
刘喜明. 同轴送粉激光熔覆过程中粉光匹配影响因素及控制研究[J]. 长春工业大学学报, 2012, 33(5): 513-520.

[9] Ke Yinglin, Wang Qing. Research on point cloud slicing technique in reverse engineering[J]. Journal of Computer-

- Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(8): 1798-1802.
- 柯映林, 王 青. 反求工程中的点云切片算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(8): 1798-1802.
- [10] Kiswanto G, Lauwers B, Kruth J. Gouging elimination through tool lifting in tool path 104 generation for five-axis milling based on faceted models[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(3): 293-309.
- [11] Xu Qinghong, Guo Wei, Tian Xitang. Effect of laser scanning velocity on macroscopic quality of laser cladding[J]. Aerospace Technology, 1997(4): 1-4.
徐庆鸿, 郭 伟, 田锡唐. 激光扫描速度对激光熔覆宏观质量的影响规律[J]. 航天工艺, 1997(4): 1-4.
- [12] Ding Han, Zhu Liming. Digital manufacturing complex surface geometry theories and methods[M]. Beijing: Science Press, 2011: 41-45.
丁 汉, 朱利民. 复杂曲面数字化制造的几何理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 41-45.
- [13] Jung H B, Kim K. A new parameterisation method for NURBS surface interpolation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(11): 784-790.
- [14] Brujic D, Ristic M, Ainsworth I. Measurement-based modification of NURBS surfaces[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(3): 173-183.
- [15] Miao Dongjing, Wang Guolei, Wu Liao, *et al.* Trajectory planning for freeform surface uniform spraying[J]. Journal of Tsinghua University, 2013, 53(10): 1418-1423.
缪东晶, 王国磊, 吴 聊, 等. 自由曲面均匀喷涂的机器人轨迹规划方法[J]. 清华大学学报, 2013, 53(10): 1418-1423.
- [16] Chen Ying, Sun Wenlei, Huang Yong, *et al.* Path planning of laser cladding for curved surface parts[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061405.
陈 影, 孙文磊, 黄 勇, 等. 曲面零件的激光熔覆路径规划[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061405.