

## 激光熔覆再制造复杂轴类零件的轨迹规划

黄 勇<sup>1,2</sup>, 孙文磊<sup>1</sup>, 陈 影<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047  
2. 新疆工程学院 机械工程系, 新疆 乌鲁木齐 830091)

**摘 要:** 对于复杂轴类零件的激光熔覆再制造, 实现轨迹规划及自动编程较为困难。针对这种情况, 结合逆向工程与轴类零件再制造的特点, 完成了基于非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线的复杂轴类零件表面逆向。提出了面向激光熔覆再制造的 NURBS 曲线等弧长插补方法并设计了一种基于 Romberg 求积公式的牛顿迭代数值算法。开发了 6 自由度关节机器人的轨迹规划及辅助编程程序。对实验零件熔覆层金相组织、厚度、显微硬度进行了测试和分析。结果表明, 熔覆层与基体形成冶金结合; 熔覆层厚度均匀, 在光束最大倾斜至水平夹角 42° 时, 熔覆层厚度比最厚处减少 0.034 mm; 显微硬度明显高于基材。证明了这是一种可靠的激光熔覆再制造方法。

**关键词:** 激光熔覆; 复杂轴类零件; 再制造; 机器人; 等弧长插补

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0506005

## Trajectory planning of laser cladding remanufacturing for complex shaft shaped part

Huang Yong<sup>1,2</sup>, Sun Wenlei<sup>1</sup>, Chen Ying<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China  
2. Department of Mechanical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830091, China)

**Abstract:** It is difficult to achieve trajectory planning and automatic programming for the remanufacturing of complex shaft shaped part. Aiming at this case, reverse measurement was completed based on non uniform rational B-spline (NURBS) curve for surface of part. A constant arc increment interpolation method was presented for laser cladding remanufacturing and the Newton iteration algorithm based on Romberg integral method was proposed and designed. A program based on 6 DOF robot was developed for trajectory planning and computer aided programming. The morphology, microstructure, thickness and micro-hardness of layer were tested and analyzed. It is observed that, the cladding layer and substrate have a good metallurgical bond, layer thickness is uniform, when the max laser beam tilt angle from the horizontal is 42°, cladding thickness decreases 0.034 mm compared with maximum thickness, the micro-hardness is significantly higher than the substrate. Experimental results show the effectiveness of the method proposed.

**Key words:** laser cladding; complex shaft shaped parts; remanufacturing; robot;  
constant arc increment interpolation

收稿日期: 2016-09-01; 修订日期: 2016-10-01

基金项目: 新疆维吾尔自治区高技术研究发展项目(201513102)

作者简介: 黄勇(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光熔覆、再制造方面的研究。Email: lishi182@163.com

通讯作者: 孙文磊(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事 CAD/CAM、制造业信息化技术方面的研究。

Email: sunwenxj@163.com

## 0 引言

随着社会对再制造工程的迫切需求及激光制造技术的快速发展,激光再制造技术已经成为绿色再制造工程中的重要技术组成。先进制造领域在智能化、自动化和信息化技术方面的不断进步促进了机器人技术与激光技术的结合<sup>[1]</sup>,特别是可以与机器人柔性耦合的大功率工业型光纤激光器的出现使修复复杂形状和结构的零件成为可能。

目前激光熔覆技术以其较高的加工精度、能量密度和较大的成形柔韧性被广泛应用于零件制造和失效零件的再制造领域<sup>[2]</sup>。轴类零件在装备中占有很大比重,普通轴类零件的激光熔覆修复技术已经比较成熟,国内外都有成功的应用<sup>[3-6]</sup>。对于高附加值零件,一般具有复杂的形状和表面,熔覆轨迹的规划成为控制熔覆质量的关键因素之一。国内外学者研究了各种轨迹对熔覆质量的影响。任维彬等根据 FV520(B) 钢叶片根部破损情况,研究了单向、交叉等多种激光扫描轨迹<sup>[7]</sup>。Tabernerero 和 Calleja 等基于五轴数控实验平台,在半球面上规划出多种激光熔覆轨迹,并对结果进行了对比<sup>[8-9]</sup>。但是,再制造零件由于各种失效原因,缺少几何信息,无法按照直接制造的方法进行轨迹规划。而且激光熔覆工艺本身存在一定的特殊性,光粉配合对熔覆层的成形质量有重要影响<sup>[10]</sup>。对于具有复杂外形的再制造轴类零件,如何实现熔覆轨迹的规划,缺乏相关的研究。

关节式机器人具有多自由度、柔性好的特点,所以基于机器人平台可以实现更复杂的激光轨迹及姿态控制。目前越来越多的研究集中于机器人与光纤激光器结合的集成平台<sup>[11]</sup>,针对这种平台开发出相应的轨迹规划方法有重要的工程意义。

## 1 再制造轴类零件的逆向及重构

获得零件表面的几何尺寸数据是进行零件再制造的一个重要前提。但是由于磨损等原因,造成再制造零件尺寸与原设计尺寸存在偏差。特别是对于具有复杂轮廓的轴类零件,母线通常是曲线,不可能依靠原始设计资料计算目前尺寸,需要通过技术手段对零件进行尺寸逆向。根据轴类零件激光熔覆的基本原理,零件的母线是激光插补运动的轨迹,所以对

母线的逆向和重构是轴类零件再制造的关键。

非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线可以精确便捷地描述自由曲线、曲面,国际标准化组织(ISO)颁布的 STEP 标准中,把 NURBS 方法作为自由曲线、曲面表示的唯一方法,可以利用 NURBS 曲线对零件母线进行重构<sup>[12]</sup>。目前,三次 NURBS 曲线是工程中最常用的一类,其在节点 $[u_{i+3}, u_{i+4}]$ ( $0 \leq i \leq n-2$ )上的矩阵表达形式为:

$$q_i(t) = \frac{\begin{bmatrix} [1 & t & t^2 & t^3] M_i \\ \omega_i v_i \\ \omega_{i+1} v_{i+1} \\ \omega_{i+2} v_{i+2} \\ \omega_{i+3} v_{i+3} \\ \omega_i \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} [1 & t & t^2 & t^3] M_i \\ \omega_{i+1} \\ \omega_{i+2} \\ \omega_{i+3} \end{bmatrix}} t = \frac{u - u_{i+3}}{u_{i+4} - u_{i+3}} \quad (1)$$

式中: $M_i$ 为与节点相关的矩阵; $\omega_i$ ( $0 \leq i \leq n$ )为控制顶点; $v_i$ ( $0 \leq i \leq n$ )为控制点权因子。对于三次 NURBS 曲线,将节点矢量  $U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+5}]$  两端节点重复度取为 4,  $u_0=u_1=u_2=u_3=0$ ,  $u_{n+2}=u_{n+3}=u_{n+4}=u_{n+5}=1$ 。对于与型值点  $p_i$  对应的其他节点  $u_{i+3}$ ,可采用目前工程中常用的积累弦长参数化法计算。这一方面的研究已经十分成熟,具体内容参见参考文献[13]。

## 2 激光等弧长插补方法

### 2.1 轴类零件激光熔覆的基本原理

对于普通轴类零件,在激光熔覆过程中激光束的扫描路径为工件表面的螺旋线,如图 1 所示。为实现该路径,轴类零件需要绕中心转动,同时激光束沿零件母线做插补运动。两种运动要满足一定的耦合

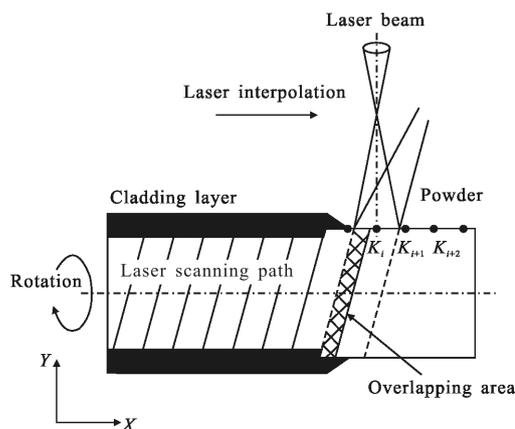


图 1 轴类零件激光熔覆原理

Fig.1 Principle of laser cladding of shaft parts

关系。假设激光束在母线上的插补点为  $K_i, K_{i+1}, \dots$ , 轴旋转一周, 激光束沿母线方向插补一段长度  $K_i K_{i+1}$ , 且每次插补长度相等。因为插补轨迹是直线, 激光束离焦距并不需要变化, 所以这种方法只在沿轴线的方向做等步距的插补运动。

对于复杂轴类零件, 母线  $AB$  是曲线(图 2)。如果按照通常的单向等步距插补法来处理, 每一次插补激光在  $X$  轴向的进给距离  $\Delta X$  相等, 而激光实际扫过的弧长是不均匀的。尤其在曲线切线斜率较大的位置, 单道熔覆宽度明显发生变化, 导致激光功率密度和熔覆层厚度不均匀。为了解决这个问题提出一种新的基于激光熔覆再制造的激光等弧长插补方法。

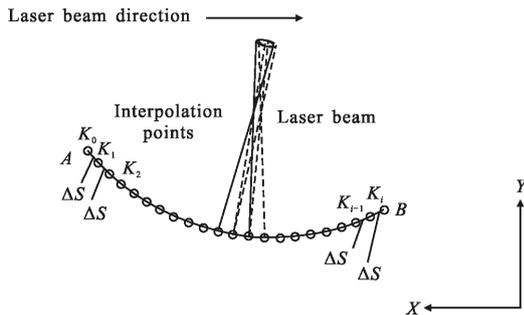


图 2 等弧长插补法

Fig.2 Constant arc increment interpolation method

### 2.2 激光等弧长插补方法插补点计算

零件母线  $AB$  是逆向得到的 NURBS 曲线(图 2),

$$q_{ix}'(t) = \frac{(C_{Ax_2} + C_{Ax_3}t + C_{Ax_4}t^2)(C'_{Ax_1} + C'_{Ax_2}t + C'_{Ax_3}t^2 + C'_{Ax_4}t^3) - (C'_{Ax_2} + C'_{Ax_3}t + C'_{Ax_4}t^2)(C_{Ax_1} + C_{Ax_2}t + C_{Ax_3}t^2 + C_{Ax_4}t^3)}{(C'_{Ax_1} + C'_{Ax_2}t + C'_{Ax_3}t^2 + C'_{Ax_4}t^3)^2} \quad (5)$$

$$q_{iy}'(t) = \frac{(C_{Ay_2} + C_{Ay_3}t + C_{Ay_4}t^2)(C'_{Ay_1} + C'_{Ay_2}t + C'_{Ay_3}t^2 + C'_{Ay_4}t^3) - (C'_{Ay_2} + C'_{Ay_3}t + C'_{Ay_4}t^2)(C_{Ay_1} + C_{Ay_2}t + C_{Ay_3}t^2 + C_{Ay_4}t^3)}{(C'_{Ay_1} + C'_{Ay_2}t + C'_{Ay_3}t^2 + C'_{Ay_4}t^3)^2} \quad (6)$$

式中:  $t_{i-1}$  为前一次插补曲线段终点的参量;  $L, \omega\%$  为设计的工艺参数, 都是已知量。所以公式(4)是关于  $t_i$  的方程, 解出  $t_i$  再代入公式(2), 可以得到第  $i$  段插补曲线的终点。依次计算下去, 最终按照等弧长原则计算出曲线上每一个插补点。

设积分上限函数:

$$S(x) = \int_{t_e}^x \sqrt{q_{ix}'(t)^2 + q_{iy}'(t)^2} dt \quad (7)$$

式中:  $t_e$  为已知参量。方程  $S(x) = \Delta s$  的根  $t^*$  就是插补点的参量值;  $\Delta s$  为根据要求所确定的插补弧长。因为公式(7)中积分运算无法得到分析解, 所以必须采用数值方法求解方程。函数  $S(x)$  为单调递增函数<sup>[14]</sup>, 且  $S'(x) = \sqrt{q_{ix}'(x)^2 + q_{iy}'(x)^2} \neq 0, S''(x) = \frac{1}{2}(q_{ix}'(x)^2 +$

满足公式(1)的分段参数方程。将公式(1)进行简化, 可以把直角系下的点坐标  $K_i(X_i, Y_i)$  表示成:

$$\begin{cases} q_{ix}(t) = \frac{C_{Ax_1} + C_{Ax_2}t + C_{Ax_3}t^2 + C_{Ax_4}t^3}{C'_{Ax_1} + C'_{Ax_2}t + C'_{Ax_3}t^2 + C'_{Ax_4}t^3} = X_i \\ q_{iy}(t) = \frac{C_{Ay_1} + C_{Ay_2}t + C_{Ay_3}t^2 + C_{Ay_4}t^3}{C'_{Ay_1} + C'_{Ay_2}t + C'_{Ay_3}t^2 + C'_{Ay_4}t^3} = Y_i \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{matrix} \begin{matrix} C_{Ax_1} \\ C_{Ax_2} \\ C_{Ax_3} \\ C_{Ax_4} \end{matrix} \end{matrix} = M_{ix} \begin{matrix} \omega_{ix} v_{ix} \\ \omega_{(i+1)x} v_{(i+1)x} \\ \omega_{(i+2)x} v_{(i+2)x} \\ \omega_{(i+3)x} v_{(i+3)x} \end{matrix} \begin{matrix} C'_{Ax_1} \\ C'_{Ax_2} \\ C'_{Ax_3} \\ C'_{Ax_4} \end{matrix} = M_i \begin{matrix} \omega_{ix} \\ \omega_{(i+1)x} \\ \omega_{(i+2)x} \\ \omega_{(i+3)x} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \begin{matrix} C_{Ay_1} \\ C_{Ay_2} \\ C_{Ay_3} \\ C_{Ay_4} \end{matrix} \end{matrix} = M_{iy} \begin{matrix} \omega_{iy} v_{iy} \\ \omega_{(i+1)y} v_{(i+1)y} \\ \omega_{(i+2)y} v_{(i+2)y} \\ \omega_{(i+3)y} v_{(i+3)y} \end{matrix} \begin{matrix} C'_{Ay_1} \\ C'_{Ay_2} \\ C'_{Ay_3} \\ C'_{Ay_4} \end{matrix} = M_i \begin{matrix} \omega_{iy} \\ \omega_{(i+1)y} \\ \omega_{(i+2)y} \\ \omega_{(i+3)y} \end{matrix}$$

根据参数方程曲线的弧长计算公式, NURBS 曲线上的弧长:

$$\Delta s_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \sqrt{q_{ix}'(t)^2 + q_{iy}'(t)^2} dx \quad (3)$$

为保证每一次插补激光扫过的曲线弧长相等,  $\Delta s_i$  必须是恒定值。根据激光熔覆多道搭接理论:

$$\Delta s_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \sqrt{q_{ix}'(t)^2 + q_{iy}'(t)^2} dx = (1 - \omega\%)L \quad (4)$$

式中:  $L$  为工艺设计单道熔覆宽度;  $\omega\%$  为熔覆搭接率。

$q_{iy}'(x)^2 > 0$ , 所以方程  $S(x) - \Delta s = 0$  满足牛顿迭代收敛条件。根据以上结论提出一种基于 Romberg 求积公式的牛顿迭代算法求解方程的近似解。

第一步, 根据牛顿迭代法构造迭代格式  $x_{k+1} = x_k - \frac{S(x_k) - \Delta s}{S'(x_k)}$ 。因为迭代初值影响到迭代次数和收敛特性, 所以要选择合适的迭代初值。假设点  $K_{i-1}K_i$  之间的弧长  $\Delta s$  满足插补要求,  $K_i(t^*)$  为所求插补点。  $K_{i-1}K_i'$  为曲线上的弦长, 也等于  $\Delta s$ 。根据几何关系  $K_i'$  点接近  $K_i$  点, 且有  $K_i'(t') > K_i(t^*), t' > t^*$ 。可以取  $t'$  为迭代初值  $x_0 = t'$ 。根据两点距离公式:

$$K_{i-1}K_i' = \sqrt{(q_x'(t') - q_x'(t_{i-1}))^2 + (q_y'(t') - q_y'(t_{i-1}))^2} = \Delta s \quad (8)$$

式中:  $t_{i-1}$  和  $\Delta s$  为已知量, 可以求解出  $t'$ 。

第二步,代入初值  $t'$  进行迭代。采用 Romberg 法计算  $S(x)$  中的积分值。

第三步,反复迭代直至要求,最终求得  $t_k$  即为  $t^*$  的数值近似解。将  $t_k$  带入公式(2)即可求得插补点  $K_i(X_i, Y_i)$ 。

### 2.3 激光束姿态的规划

为保证每次插补激光扫过弧长的均匀性,激光光斑在基材表面上的投影面积必须相等。根据光学原理,激光只有与照射区域垂直且离焦量不变,激光光斑在表面上的投影面积才不会发生变化。但是对于曲面,每一点的法矢都不相同,不可能实现光束与整个曲面垂直。为了达到以上要求,只能够近似激光中心线与插补点处的法矢重合。所以对于等弧长插补,每两个插补点之间激光束角度要发生变化,也就是在进行线段插补的同时还要进行角度插补,这一过程称为激光姿态的规划。

关节式机器人的自由度灵活,能够直接对坐标系旋转自由度进行编程控制,无需进行运动学逆解,是控制激光束的理想平台。如图 3 所示,在激光焦点处设置工具坐标系(Tool Center Point, TCP)。激光束可以实现  $(X, Y, Z, A, B, C)$  6 个自由度的运动。根据激光束控制的要求和 6 自由度关节式机器人的特点,只需要计算相邻插补点激光束的角度差。

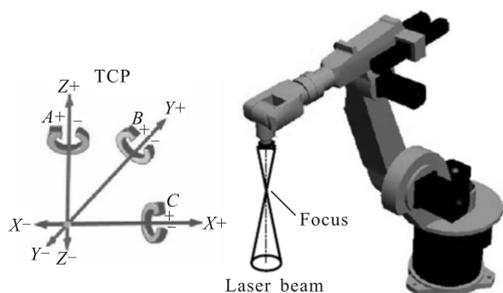


图 3 机器人工具坐标系

Fig.3 Tool coordinate system of robot (TCP)

工件母线(图 2)上某相邻插补点为  $K_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 、 $K_i(X_i, Y_i)$ 。两点处的切线斜率为  $k_{i-1} = -\tan(\theta_{i-1}) = -\frac{1}{f'(x_{i-1})}$ ,  $k_i = -\tan(\theta_i) = -\frac{1}{f'(x_i)}$ 。两点切线之间的夹角  $\Delta\theta$  也是激光束的角度差,根据几何关系:

$$\tan(\Delta\theta) = \tan(\theta_i - \theta_{i-1}) = \frac{f'(x_i) - f'(x_{i-1})}{1 + f'(x_i)f'(x_{i-1})} \quad (9)$$

根据参数方程所决定的函数求导法则,把公式(2)代入公式(9),得到:

$$\tan(\Delta\theta) = \frac{q_x'(t_i)q_y'(t_{i-1}) + q_x'(t_{i-1})q_y'(t)}{q_y'(t_i)q_y'(t_{i-1}) + q_x'(t_i)q_x'(t_{i-1})} \quad (10)$$

再带入公式(5)、(6),可以求得  $\tan(\Delta\theta)$ 。因为相邻插补点之间距离和切线角度变化微小,所以实际工程应用中可以简化处理:

$$\Delta\theta \approx \tan(\Delta\theta) \quad (11)$$

### 2.4 速度规划

激光束与粉末流对工件表面扫描的速度就是通常所谓的激光熔覆速度。该速度是激光熔覆过程中一项重要的工艺参数,通常需要从平面样件的工艺实验确定。对于轴类零件,熔覆运动分解为绕轴的转动和激光沿曲线的插补运动。

设工艺试验确定的激光扫描速度为  $V$  mm/s,那么激光在零件某截面圆周方向完成一周扫描所需时间:

$$T_i = \frac{\pi D_i}{V} \quad (12)$$

式中:  $D_i$  为零件母线第  $i$  个插补点处截面的圆周直径。因为零件旋转一周,激光应该沿母线插补一段弧长  $\Delta s$ 。所以插补速度:

$$V_i = \frac{\Delta s}{T_i} \quad (13)$$

把公式(12)带入公式(13)得到:

$$V_i = \frac{\Delta s V}{\pi D_i} \quad (14)$$

## 3 复杂轴类零件激光熔覆再制造实验

### 3.1 零件母线逆向与重构

所选用实验零件如图 4 照片所示,熔覆位置为一变截面回转体,母线为曲线。应用 INSPECTOR 三坐标测量仪沿工件轴线方向对实验零件熔覆表面母

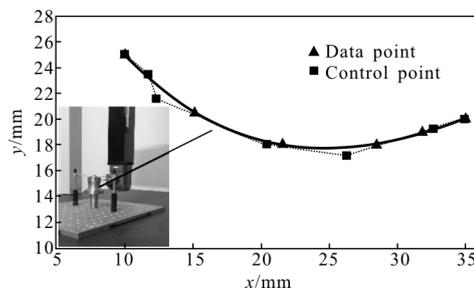


图 4 零件母线的 NURBS 曲线重构

Fig.4 Reconstruction of part generatrix based on NURBS curve

线进行测量,一共测得 6 个型值点,利用 NURBS 曲线进行重构,反求出控制点。

### 3.2 激光熔覆实验

实验装备由 IPG 光纤激光器 YLS-4000-S2, KUKA KR30HA 机器人,伺服旋转工作台,XSL-PF-01A-2 负压式气载送粉系统组成。激光聚焦头(PLFDH0125)使用抛物聚焦镜,焦距  $f=300\text{ mm}$ ,焦点光斑直径  $2\text{ mm}$ ,配置侧向送粉喷嘴及调整机构。载气与保护气为氩气。零件基材为 Q235。采用 KF310 铁基自熔性合金粉末,粉末成分见表 1。

表 1 铁基合金粉末 KF310 的化学成份(质量分数%)

**Tab.1 Chemical composition of the Fe-base alloy powder KF310 (mass fraction %)**

Element	Cr	B	Si	C	Ni	Mn	Fe
Content	14-16	0.9-1.1	0.9-1.1	0.1-0.3	1.5-2.5	0.5-1.0	Bal

在平面上进行多道搭接熔覆工艺实验,优选出一组工艺参数:激光功率  $2\ 000\text{ W}$ ,离焦量  $16\text{ mm}$ ,送粉速度  $15\text{ g/min}$ ,载气速度  $600\text{ L/h}$ ,激光扫描速度  $8\text{ mm/s}$ ,搭接率  $50\%$ 。为了减小粉末摆动对光粉配合的影响,增加了载气流量和送粉速度,提高了粉末刚性。工艺实验熔覆层外观平整光滑、表面无裂纹,单道熔覆宽度  $2.5\text{ mm}$ ,熔覆高度  $0.6\text{ mm}$ (熔覆层顶面到平板基材表面的距离),硬度达到  $45\text{ HRC}$ 。经过 PT 探伤,无缺陷。

在 MATLAB 中编写等弧长插补算法程序、仿真程序及 KUKA 机器人编程软件 OrangeEdit 的接口程序。根据工艺实验,插补弧长( $\Delta s=1.25\text{ mm}$ )。计算插补点、姿态及插补速度。调用仿真程序,模拟激光扫描路径、插补点、姿态如图 5 所示。在插补起点处,激

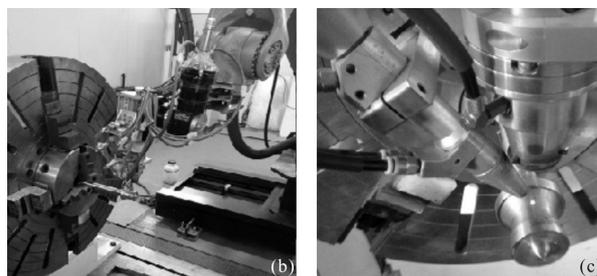


图 5 激光扫描路径和插补点

Fig.5 Laser scanning path and interpolation points

光束中心线与水平方向的夹角为  $42^\circ$ 。调用 Orange 软件,将计算结果写成 KUKA 机器人代码,送入机器人控制器。实验前用砂纸打磨零件去除氧化皮和油污并用丙酮擦拭干净。合金粉末烘干去除水分,保证流动性。图 6(a)为实验后零件表面,熔覆层均匀明亮,没有宏观裂纹和其他缺陷。

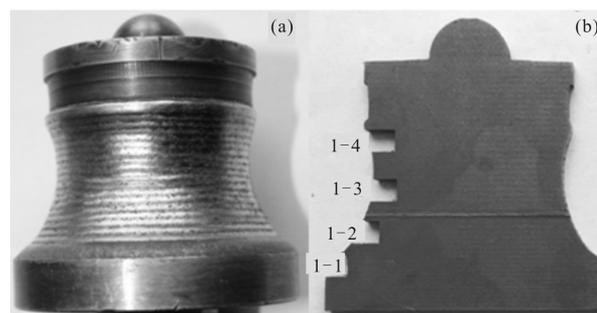


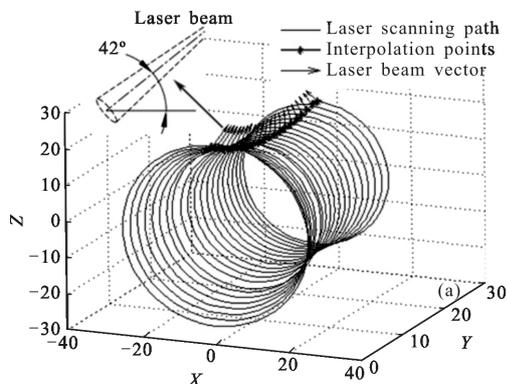
图 6 熔覆层和试样位置

Fig.6 Cladding layer and sampling position

### 3.3 激光熔覆层金相及厚度

为了研究曲面不同位置处熔覆层的情况,如图 6(b)所示,使用线切割机沿工件轴线切开实验工件,取出厚度为  $4\text{ mm}$  的截面。沿零件的母线均匀选择了 4 个位置,做为研究对象。分别在这 4 个位置切下正方形试样观察金相组织及测量熔覆层厚度。这些位置的试样依次标记为 1-1、1-2、1-3、1-4。

试样经过打磨、抛光和腐蚀。腐蚀溶液为质量分数  $20\%$  的  $\text{FeCl}_3$ , 腐蚀时间  $10\text{ min}$ 。使用 Quanta FEG 250 电镜对试样进行观察。如图 7 所示,可以观察到试样的显微组织主要由柱状树枝晶组成。枝晶生长的特点是优先选择与热流接近的方向做为生长方向。基体做为低温侧,形成了自上而下垂直于固液界面的大梯度温度场<sup>[15]</sup>。所以图 8 中可以观察到靠近基体侧的熔覆层枝状晶基本垂直于固液界面,呈



现典型的快速凝固外延生长特点。熔覆层与基体的结合界面存在一条光滑平整的平面晶带，说明二者之间呈良好的冶金结合。

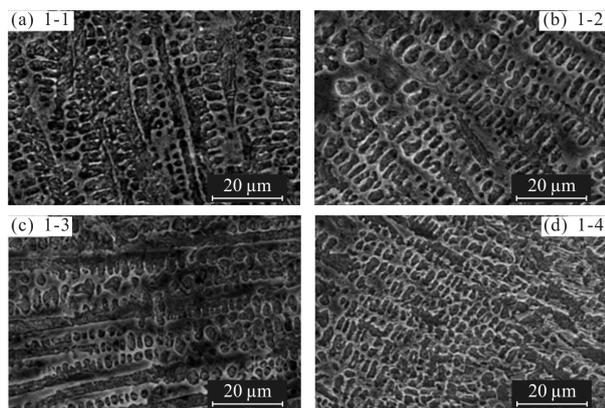


图 7 熔覆层截面显微组织

Fig.7 Microstructures of the transverse section of cladding layer

为了测量激光熔覆层的厚度，将金相照片导入 AUTOCAD 软件，采用与电镜标尺线性插值的方法测量和计算 4 个不同位置的熔覆层厚度(包括基材熔化深度)。将 4 个位置的熔覆层厚度与位置标示在一张坐标图上,如图 8 所示。可以看出零件 1-3 处熔

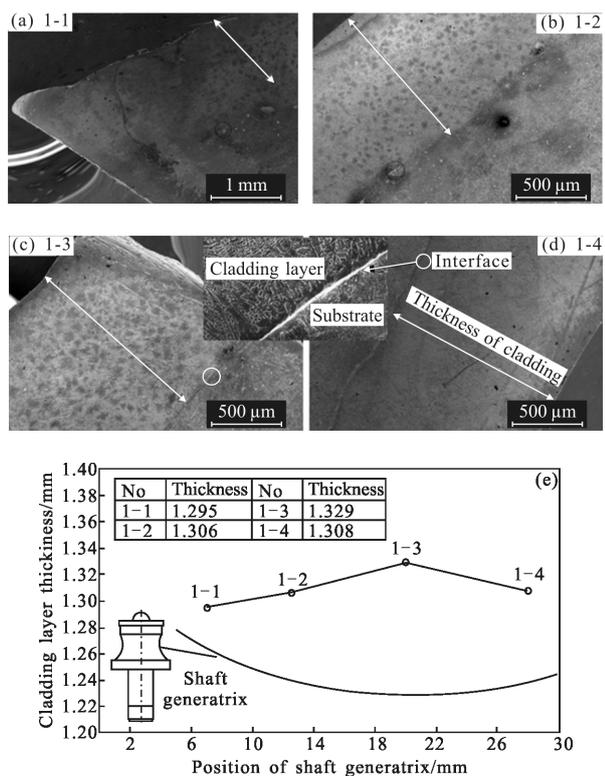


图 8 熔覆层厚度随位置的变化

Fig.8 Thickness of cladding layer in different locations

覆层厚度最大。这是因为 1-3 处零件母线斜率最小，基本水平，光与粉的配合情况最接近平板工艺实验。所以光粉配合情况最好，粉末利用率最高，熔覆层厚度最大。1-1 处是熔覆的起始区域，激光束中心线与水平的夹角在这里达到实验最大值  $42^\circ$ 。粉末流受重力影响，光粉配合情况较差。但是，熔覆层厚度与 1-3 处只相差 0.034 mm，因为实验中采用了较大的载气流量和送粉速度，提高了粉末流刚性，减少了重力对粉末流的影响。另外，姿态规划要求插补过程中激光离焦量不变，光束摆动绕激光焦点。从理论上保证了光粉配合区域变化较小。实验结果说明采用等弧长插补法得到的熔覆层厚度比较均匀。

### 3.4 激光熔覆层硬度

将 1-1 至 1-4 号试样处理后，使用 HXD-1000 型金属显微维氏硬度计测量显微硬度。第一个测试点选择在激光熔覆层 0.2 mm 深度处，再沿着熔覆层厚度方向每隔 0.2 mm 测量一次，一共测量 9 次。每次加载力 0.2 kgf, 加载时间 15 s。

图 9 为硬度随熔覆层深度变化的曲线。从图上分析,1-1、1-2、1-3、1-4, 4 个位置的熔覆层硬度大小变化趋势基本一致,同一深度硬度变化较小,说明 4 个位置所经受的能量过程基本相似。这是因为每一次插补激光扫过的弧长相等,光斑面积变化较小,理论上激光功率密度不变。

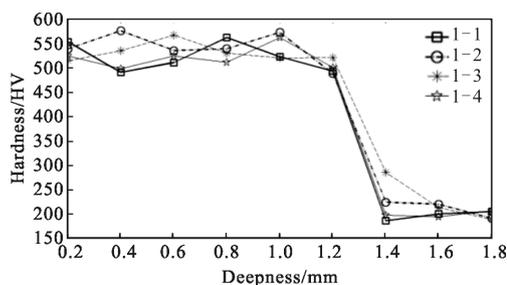


图 9 熔覆层显微硬度

Fig.9 Microhardness of cladding layer

材料深度超过 1.2 mm 后,硬度急剧下降,说明熔覆层厚度(包括基材熔化深度)大致在 1.2~1.4 mm 之间。这是因为超过该范围后为基体材料,硬度会大幅下降。这与上一节关于熔覆层厚度的结论一致。

## 4 结论

综上所述,得出以下结论:

(1) 应用 NURBS 曲线实现复杂轴类零件的尺寸逆向,通过实验验证这是一种比较可行的方法。

(2) 为避免激光熔覆过程中插补点沿曲线分布不均的情况,提出一种基于 NURBS 曲线的等弧长插补方法,保证了每一次插补激光扫过的弧长相等且光斑大小恒定,这种方法非常适合关节式机器人的编程控制。

(3) 对实验样件的 4 个位置进行采样分析,结果表明得到的熔覆层与零件基体形成冶金结合,组织致密,无缺陷。熔覆层厚度均匀,在光束最大倾斜至水平夹角  $42^\circ$  时,熔覆层厚度比最厚处减少  $0.034\text{ mm}$ ,硬度明显高于基体且变化趋势一致,说明等弧长插补法是一种针对复杂轴类零件再制造的可靠轨迹规划方法。

参考文献:

[1] Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2780-2798. (in Chinese)  
 杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用 [J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2780-2798.

[2] Yan Shixing, Dong Shiyun, Xu Binshi, et al. Characterization and optimization of process in laser cladding Fe314 alloy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 235-240. (in Chinese)  
 闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. Fe314 合金激光熔覆工艺优化与表征研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 235-240.

[3] Zhao Wenqiang, Miao Hongbin, Liang Yan. Research of laser cladding repair technology on shearer picks [J]. *Coal Mine Machinery*, 2012, 33(4): 175-177. (in Chinese)  
 赵文强, 苗鸿宾, 梁艳. 采煤机截齿的激光熔覆修复技术研究[J]. 煤矿机械, 2012, 33(4): 175-177.

[4] Li Baoling, Wen Zongyin, Liu Xuhong, et al. An experimental study of laser cladding technology applied for axle Surface repair[J]. *Applied Laser*, 2007, 27(8): 290-294. (in Chinese)  
 李宝灵, 温宗胤, 刘旭红, 等. 激光熔覆技术应用于轴类零件表面修复的实验研究[J]. 应用激光, 2007, 27(8): 290-294.

[5] Dong Shiyun, Zhang Xiaodong, Xu Binshi, et al. Laser cladding remanufacturing of 45 steel cam shaft worn cam [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2011, 25(4): 85-87. (in Chinese)  
 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(4): 85-87.

[6] Feng Hui, Li Jianfeng, Sun Jie. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser

cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0803003. (in Chinese)  
 封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803003.

[7] Ren Weibin, Dong Shiyun, Xu Binshi, et al. Experimental analysis of laser remanufacturing for FV520 (B) steel blade simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3303-3308. (in Chinese)  
 任维彬, 董世运, 徐滨士, 等. FV520(B) 钢叶片模拟件激光再制造成形试验分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3303-3308.

[8] Tabernero I, Calleja A, Lamikiz A, et al. Optimal parameters for 5-axis laser cladding [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 45-52.

[9] Calleja A, Tabernero I, Fernández, et al. Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 56: 113-120.

[10] Wang Zhijian, Dong Shiyun, Xu Binshi, et al. Effect of laser cladding processing parameters on metal forming eminency and geometry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 315-319. (in Chinese)  
 王志坚, 董世运, 徐滨士, 等. 激光熔覆工艺参数对金属成形效率和形状的影响[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 315-319.

[11] Liu Lifeng, Yang Xichen. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0703008. (in Chinese)  
 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.

[12] Dai Shijie, Zhang Yi, Wang Zhiping, et al. Trajectory planning of welded repair for aero-engine blades based on NURBS curve [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(1): 23-26. (in Chinese)  
 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.

[13] Yuan Anfu, Jiang Yan. Interpolation method of cam profile based on cubic nurbs curve [J]. *Manufacturing Automation*, 2009, 31(7): 111-114. (in Chinese)  
 袁安富, 江沿. 基于三次 NURBS 曲线的凸轮轮廓插值方法[J]. 制造业自动化, 2009, 31(7): 111-114.

[14] Sharp R J, Thorne R W. Numerical method for extracting an arc-length parameterization from parametric curve [J]. *CAD*, 1982, 14(2): 1-7.

[15] Feng Liping, Huang Weidong, Li Yanmin, et al. Investigation on the microstructure and composition segregation of the laser metal forming directional solidification [J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 2002, 38(5): 501-506. (in Chinese)  
 冯莉萍, 黄卫东, 李延民, 等. 激光金属成形定向凝固显微组织及成分偏析研究[J]. 金属学报, 2002, 38(5): 501-506.