

# 曲面零件的激光熔覆路径规划

陈影 孙文磊 黄勇 周超军

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047

**摘要** 为了提高曲面零件的熔覆质量,根据激光熔覆的工艺特性对曲面零件进行了路径规划。对熔覆实验设备进行简单的介绍,建立曲面零件模型。根据模型提出一种基于切平面法的路径生成方法,并利用熔覆道搭接率来确定切平面间距离;通过分析有效加工离焦量来计算步长大小,得出轨迹上的插补点集,进而分析加工控制点,并用偏置法得到枪头的位置与姿态;通过熔覆加工工艺实验进行验证,得到表面质量良好的熔覆层,从而验证了轨迹规划方法的合理性。

**关键词** 激光技术; 曲面零件; 路径规划; 激光熔覆; 熔覆设备; 熔覆层

中图分类号 TG156.99

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.061405

## Path Planning of Laser Cladding for Curved Surface Parts

Chen Ying Sun Wenlei Huang Yong Zhou Chaojun

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

**Abstract** In order to improve the laser cladding quality of curved surface parts, the path planning of laser cladding is carried out according to the technical characteristics of laser cladding. The laser cladding equipment is introduced, and the model of cured surface parts is established. According to the model, an orbital path generation method based on the cutting plane method is proposed and the distance between cutting planes is determined by the cladding road overlap ratio. The effective processing defocusing amount is analyzed to calculate the processing step to obtain the interpolation point sets on the track and locate the processing control points. The offset method is used to get the position and attitude of the laser tip. The proposed method is verified by experiments with a high surface cladding quality, which proves the rationality of the path planning approach.

**Key words** laser technique; curved surface parts; path planning; laser cladding; cladding equipment; cladding layer

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390

## 1 引言

随着工业的发展,曲面零件因具有较高的自由度,良好的力学性能等优点,在各个领域被广泛应用。然而,由于其表面的不规则性,曲面零件的制造修复一直是一个难题<sup>[1]</sup>。激光熔覆是近年来发展较快的表面改性技术,具有很高的经济效益,能够实现选区熔覆,可获得各种性能的熔覆层,熔覆选材广泛,实用性好<sup>[2-6]</sup>。目前,研究较为广泛的是平面的熔覆加工工艺实验,大都着重于对熔覆层的组织性能与激光熔覆工艺参数的研究和优化,对于曲面零件的熔覆路径规划鲜有介绍。然而熔覆路径规划是工业应用中不可缺少的一部分,它直接影响曲面零件表面的熔覆效果,因此本文根据曲面的特点,结合熔覆的工艺特性,利用六轴机械手和光纤激光器相结合组成的柔性加工系统<sup>[7]</sup>,对曲面零件进行熔覆路径规划,不仅可以保证熔覆质量和加工效率,同时能够实现离线编程,对于激光熔覆在曲面零件上的应用具有重要的意义。

收稿日期: 2015-12-23; 收到修改稿日期: 2016-01-18; 网络出版日期: 2016-05-19

基金项目: 新疆维吾尔自治区高技术研究发展计划(201513102)、新疆自治区科技支疆项目(2013911032)

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,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: 1156785330@qq.com

## 2 激光熔覆设备组成

激光加工技术一般指激光器及光学技术,具有广泛的发展前景,设备也得到了不断的完善,在保证精度的同时,自动化程度也不断得到提高,更加适应生产的需求<sup>[8]</sup>。如图 1 所示,激光熔覆系统主要由几个部分组成<sup>[9]</sup>:a 为激光器及光路系统,激光发生器是激光熔覆设备的核心部分,作为熔化金属粉末的高能量密度的热源,其性能直接影响熔覆的效果。光路系统将激光器产生的能量传导到加工区域,光纤是当今光路系统的主要代表。实验采用的激光器为 IPG 光纤激光器 YLS-4000-S2,能够实现柔性加工;b 为送粉系统,是激光熔覆设备的一个关键部分,送粉系统的技术属性及工作稳定性对最终形成的熔覆层的质量、精度以及性能有重要的影响。送粉系统通常包括送粉器、粉末传输管道和送粉喷嘴。采用的送粉系统为气动送粉系统,因此还包括供气装置;c 为控制设备及工作台,是激光熔覆不可缺少的设备,是实现自动化的前提,目前使用较为广泛的是 X-Y 工作台和 3+2 轴工作台,实验在 KUKA 六自由度串联式机器人 KR30HA 系统下对曲面进行路径规划,此系统自由度高,能实现对复杂曲面进行熔覆加工;d 为气体保护系统,是为了防止激光熔覆过程中基体受热氧化,可减小沉积层的表面张力,提高层与层之间的浸润性,保护气体通常为氩气、氦气及氮气;e 为冷却系统,主要用于冷却激光头、激光器以及光纤,大多采用水冷,冷却装置可延长设备的寿命;f 为辅助装置——激光烟雾净化器,主要对加工过程中产生的烟雾和粉尘进行处理。稳压箱及控制柜,是对工作电压起稳压作用,保证设备在额定电压下工作。检测与反馈装置,是对激光熔覆过程进行实时检测,并根据检测结果对熔覆过程进行反馈控制,以保证激光熔覆的稳定性,可以大幅提高熔覆精度。

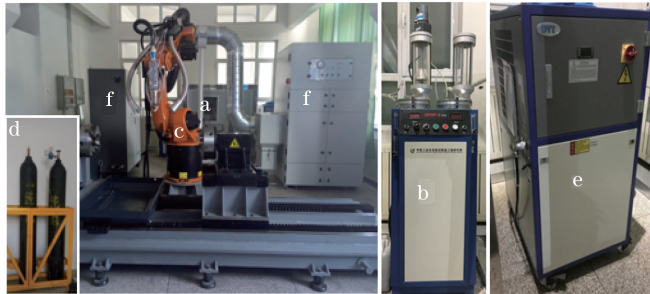


图 1 激光熔覆设备

Fig. 1 Laser cladding equipment

## 3 曲面零件模型的建立

熔覆加工曲面零件时,需获知零件的表面信息。首先要对曲面零件建立模型,其中包括建立曲面零件的三维数字模型和数学几何模型。利用基于零件的三维模型生成熔覆轨迹,利用几何模型对曲面上的点进行微分几何特性分析,确定插补控制点的坐标及方向,以编写熔覆加工程序。

### 3.1 曲面三维模型的建立

对于已有图纸的零件,可根据图纸用三维建模软件建立较为精确的零件模型;对于只有零件实体的模型,如图 2 所示,需先获取曲面零部件的表面数据点集,再通过 CAD/CAM(计算机辅助设计/计算机辅助分析)软件,进行曲面零件的逆向建模,具体步骤为:1)数据采集是用各种测量工具和方法来取得被测零件表面的点云数据信息,在采集数据的过程中,应注意保证数据点的完整性及精确性,以便为后续建模重构工作打

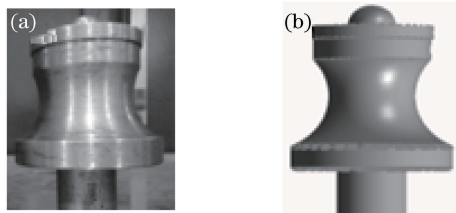


图 2 (a) 零件实体; (b) 实体三维模型

Fig. 2 (a) Part entity; (b) three-dimensional model of part entity

好基础;2)预处理是对测量时产生的误差进行整理或修补一些缺损的数据点的过程;3)形状拟合是指用散乱的数据点拟合曲面,实现曲面的重构和三维模型的反求,使之与实体的误差减到最小;4)三维重构即模型构建,是逆向工程中的重要环节,通过此步,零件的三维模型就可以充分直观地显现出来;5)数据输出是指输出格式的选择和转换,完成逆向建模后,生成各种不同数据格式模型。

### 3.2 熔覆曲面几何数学模型的建立

根据零件的实际情况,获取需要熔覆的曲面并建立数学表达式。目前几乎全部的大型 CAD 系统都把 NURBS[非均匀有理 B(basis)样条曲线]作为定义零件几何形状的数学表示方法并对外提供了接口,所以建立 NURBS 曲面表达式<sup>[10]</sup>是曲面几何数学模型建立的必要步骤。NURBS 曲面的表示公式为

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) W_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) W_{i,j}}, \quad (1)$$

式中  $u$  和  $v$  是曲面网格的行和列的方向,  $P_{i,j} (i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m)$  为三维控制点,  $W_{i,j}$  为  $P_{i,j}$  对应的权重,  $N_{i,p}(u)$  是沿  $u$  向的第  $i$  个  $p$  次基函数,  $N_{j,q}(v)$  是沿  $v$  向的第  $j$  个  $q$  次 B 样条基函数,它们分别是由  $u$  向节点矢量  $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n+p+1}\}$  和  $v$  向节点矢量  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{m+q+1}\}$  按照德布尔递推(De Boor-Cox)公式递推计算得到。因此, NURBS 曲面可用控制顶点  $P_{i,j}$ 、基函数幂次  $N_{i,p}(u)$  和  $N_{j,q}(v)$ 、节点矢量  $U$ 、 $V$  以及权因子  $W_{i,j}$  这 4 类参数来表示。

根据测量得到的数据点或者三维逆向的模型提取点集进行重构得到的向量函数的曲面表达式为

$$S(u, v) = \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix}, u, v \in [0, 1]. \quad (2)$$

## 4 曲面零件熔覆路径的规划

### 4.1 熔覆路径的生成方法

提取零件模型中所需熔覆的曲面进行路径生成。目前,研究比较广泛的是 CC(Cutter Contact)路径截面线法<sup>[11-13]</sup>,即用平行平面组或者曲面组去切割加工曲面零件表面,所得到的一系列截交线即为加工枪头在零件表面上的轨迹投影线。在实际应用中,为了简便计算,一般采用的截面大都是平面或回转曲面。理想情况下,可认为熔覆时激光光斑大小不变,因此可采用构造等距平面<sup>[14]</sup>的方法求得熔覆轨迹在表面上的投影线,如图 3 所示。

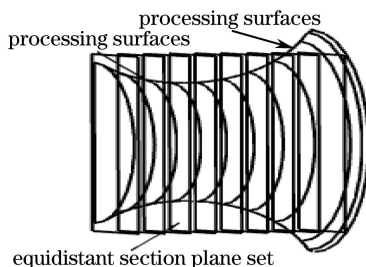


图 3 截面法生成轨迹

Fig. 3 Trajectory generated by cutting plane method

根据要求所采用的截面方程为

$$ax + by + cz + d = 0, \quad (3)$$

式中  $a, b, c, d$  为系数,曲面在笛卡儿坐标系下表示方程为  $S(x, y, z) = 0$ , 则得到截面与曲面交线的方程为

$$\begin{cases} S(x, y, z) = 0 \\ ax + by + cz + d = 0 \end{cases} \quad (4)$$

## 4.2 熔覆路径间距的确定

在熔覆过程中,激光枪头运动路径间距主要受搭接率的影响,建立的理论搭接模型如图 4(a)所示,以此来分析切平面的间距与熔覆工艺参数的关系。



图 4 搭接模型与实验。(a) 理论搭接模型; (b) 搭接实验

Fig. 4 Lap model and experiment. (a) Theoretical lap model; (b) lap experiment

图 4 中  $w$  代表单道熔覆层的宽度,  $h$  代表其高度,  $O_1$ 、 $O_2$  分别为相邻两熔覆道的熔覆中心(即光斑中心),  $d_0$  为相邻两熔覆道的中心距,  $h_s$  为搭接后表面波峰与波谷之间高度差。由图 4(a)可知,  $h_s$  越小, 表面平整度越好。而  $h_s$  的取值受相邻两熔覆道中心距  $d_0$  的影响, 所以表面质量主要由  $d_0$  值决定。通过搭接实验[图 4(b)], 获得单道熔覆层的宽度  $w$  及高度  $h$ , 选出一组最优工艺参数作为实验的工艺参数, 并由下式计算出切平面间距  $d_0$  以及临界搭接率  $\eta_d$ 。

$$d_0 = \frac{\{[(w/2)^2 + h^2]/(2h)\}^2 \arcsin(wh)/[(w/2)^2 + h^2] - \{[(w/2)^2 - h^2]/[2h \times (w/2)]\}}{h}, \quad (5)$$

$$\eta_d = \frac{w - d_0}{w}. \quad (6)$$

## 4.3 熔覆步长的确定

熔覆加工时激光枪头不能严格地沿着曲面零件廓形运动, 一般是用圆弧或折线逼近方式生成截交线轨迹, 存在一定的误差。要保证熔覆质量, 熔覆步长应满足弦高误差的要求。熔覆加工时, 光粉作用原理如图 5 所示。

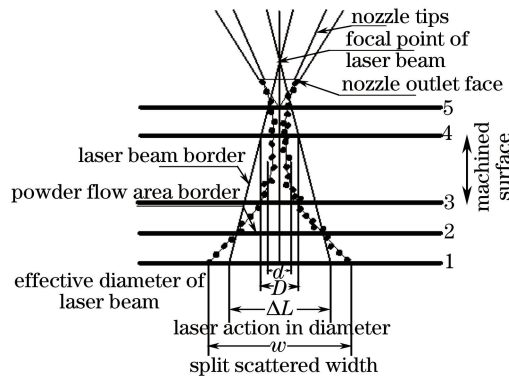


图 5 光粉作用原理图

Fig. 5 Schematic diagram of light powder

图中熔覆激光束的有效加工直径为  $D$ , 熔覆粉末流束由喷嘴口喷出后产生的粉末流的束腰直径为  $d$ , 零件表面获得冶金结合熔覆层的条件为  $d \leq D$ , 对应工作面位置如图 5 中水平线 3~5。在实际熔覆过程中, 加工工件表面在向喷嘴口靠近时, 由位置 4 向 5 移动时, 喷嘴口会因激光的反射和材料的辐射产生很高的温度, 使粉末材料过早软化导致喷嘴口粘连堵死, 熔覆工艺不能继续进行, 同时由于是曲面零件, 表面高度差起伏变化, 激光枪头相对移动空间不足, 发生碰撞零件等问题, 最终确定工作面位置可在水平线 3~4 之间, 令其为曲面离焦量变化范围  $\Delta\epsilon$ 。

激光枪头在直线插补运动加工过程中, 每一个插补点应满足熔覆有效离焦量的变化范围要求, 因此每个插补点之间的弦高误差  $\epsilon$  应小于离焦量变化范围  $\Delta\epsilon$ , 即  $\epsilon \leq |\Delta\epsilon|$ 。熔覆步长可用直线逼近的方式作为控制误差大小的依据, 如图 6 所示。

图中 CC 轨迹为熔覆零件表面与截平面的交线,  $P_0$  为轨迹上一加工点, 表达式为  $P_0[u(s), v(s)]$ , 其中  $s$  是该路径线上的弧长参数,  $P_1$  是  $P_0$  在该轨迹线上的下一个加工点,  $L$  是满足要求的步长, 步长曲线在进

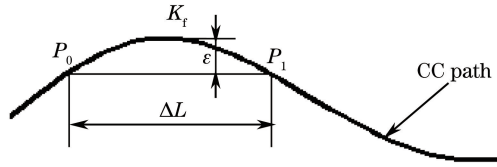


图6 熔覆步长确定

Fig. 6 Determining cladding step length

给方向上的法曲率为

$$K_f = \left\langle \frac{d^2 p_0}{ds^2}, \mathbf{n} \right\rangle = \frac{\Delta L \cdot (du)^2 + 2Mdu dv + N (dv)^2}{E (du)^2 + 2Fdu dv + G (dv)^2}, \quad (7)$$

对于曲面上的任意一点,分析其微分几何特性,得到零件表面上插补点的一阶、二阶偏导数以及该点处的法矢  $\mathbf{n}$  为

$$\mathbf{S}_u = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u}, \mathbf{S}_v = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v}, \mathbf{S}_{uu} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial u^2}, \mathbf{S}_{vv} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial v^2}, \mathbf{S}_{uv} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial u \partial v}, \quad (8)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{S}_u \times \mathbf{S}_v}{|\mathbf{S}_u \times \mathbf{S}_v|}, \quad (9)$$

求得曲面的第一类基本量为  $E = \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_u$ 、 $F = \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_v$ 、 $G = \mathbf{S}_v \cdot \mathbf{S}_v$ ; 曲面的第二类基本量为  $L = \mathbf{n} \cdot \mathbf{S}_{uu}$ 、 $M = \mathbf{n} \cdot \mathbf{S}_{uv}$ 、 $N = \mathbf{n} \cdot \mathbf{S}_{vv}$ 。直线逼近误差要求  $\frac{1}{8} |K_f| (\Delta L)^2 < \epsilon$ , 则步长  $\Delta L$  大小为

$$\Delta L \leq 2 \sqrt{\frac{2\epsilon}{K_f}}. \quad (10)$$

#### 4.4 熔覆轨迹离散点的确定

实际熔覆时,为了编程的需要,应得到各个插补点的信息。在每一段熔覆的参数曲线上,离散点数  $N_1$  可估计为

$$N_1 = \frac{S}{\Delta L}, \quad (11)$$

式中  $S$  为弧长。将轨迹离散成点集后,求得激光枪头的加工位置坐标  $(x, y, z)$ , 从而形成由直线逼近的加工路径,其生成的曲面加工插补点集如图7所示。

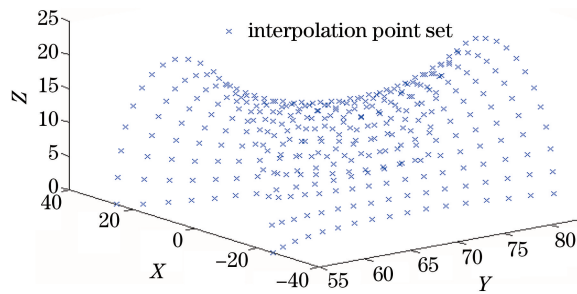


图7 曲面轨迹离散插补点集

Fig. 7 Discrete interpolation point set of curved trajectory

#### 4.5 确定激光枪头的姿态

激光光轴相对于工件表面法矢存在夹角  $\theta$  时会影响激光束落在曲面零件表面的光斑的大小,  $\theta$  越大,照射在工件表面的光斑被拉得越长,这会导致能量分布不均匀,进而影响基体对激光的吸收率。同时,粉末分布产生变化,束腰位置随之改变。所以在熔覆加工过程中,要求激光束与曲面上加工点的法矢在同一直线上。以此作为确定加工过程中激光枪头姿态的条件,计算出各个插补点的法矢。如图8所示为建立的曲面熔覆加工过程示意图。熔覆加工过程在各个插补点的法矢由(9)式求得,从而得出在每个点处的激光枪头的姿态。

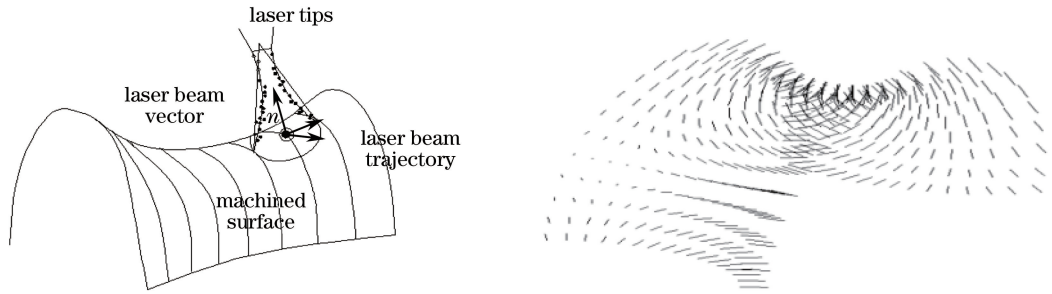


图 8 熔覆加工示意图

Fig. 8 Schematic diagram of cladding processing

#### 4.6 激光枪头路径的获取

通过上述方法计算出轨迹上各个加工点的位置坐标和法矢。激光熔覆为非接触加工,激光枪头喷嘴与零件曲面需保证一定的加工距离 $\tau$ ,因此枪头的运动点集信息可由偏置法<sup>[15]</sup>得到。曲面上加工点集 $P_i$ 沿着对应法矢向量 $n_i$ 方向的偏置距离为 $\tau$ 时, $P_i$ 的偏置点为

$$S_i = P_i + \tau \frac{n_i}{\|n_i\|}, \quad (12)$$

式中 $S_i$ 包含了激光枪头的位置坐标和姿态信息,用(12)式计算整个曲面零件上的插补点列 $P$ ,即得到激光枪头加工运动点集 $S = [(x_i, y_i, z_i, ax_i, ay_i, az_i), i = 1, 2, 3, \dots]$ ,进而可形成机器人运动代码。在实际熔覆中,一般需将激光枪路径往加工曲面向外延伸一定距离,并把各路径线的拐角处理成圆弧,以避免激光枪头因速度突变产生振动和熔覆积瘤而影响表面成型效果。最终所求得激光枪头运动路径如图9所示。

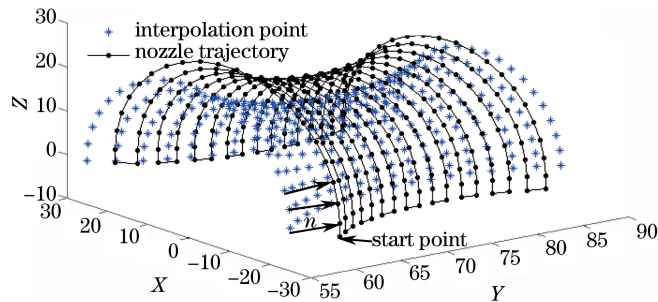


图 9 最终的激光枪头路径

Fig. 9 Final path of laser nozzle

## 5 实验

对规划的路径进行实验验证,采取如表1所示的熔覆工艺参数,熔覆粉末采用KF310铁基自熔性粉末,表2所示为激光枪头的位置坐标及姿态,其中 $x, y, z$ 为加工点在空间坐标系中的坐标值, $A, B, C$ 为对应曲面在机器人工作坐标系中的矢量值。按表2的值进行加工,最后得到熔覆后的零件,并分析零件熔覆后的质量,得到的结果如图10所示。从宏观上分析实验熔覆层表面质量,如图10(a)、(b)所示,发现熔覆层表面波纹度较小,并无表面裂纹和积瘤缺陷产生;图10(c)为切片式样,用20%质量分数的 $FeCl_3$ 溶液腐蚀后,可以清晰地看到熔覆层和基体结合良好,无气孔和裂纹等缺陷;从熔覆层横截面积测试熔覆层厚度和硬度值,得到的结果如图10(d)~(g)所示,进而从微观上分析熔覆质量。图10(d)为熔覆层横截面组织,由熔覆层、结合区、基体三部分组成,可以看出熔覆层组织均匀致密,未出现裂纹、气孔等缺陷,熔覆层组织从基体到熔覆层表面分别为胞状晶、柱状枝晶、接近熔覆层表面的树枝晶,从图10(d)中看到在熔覆层与基体之间存在很明显的自亮层,为在基体表面生长的平面晶组织,说明基体与熔覆层形成了冶金结合,达到熔覆质量要求;从图10(e)看出熔覆层厚度均匀,从图10(f)可以看出熔覆层硬度比基体高,因为激光熔覆过程中熔池快速凝固使熔覆层的晶粒细化,组织致密,起到了很好的晶界强化作用;图10(g)是切割后实验曲面样品沿曲线曲率方向的硬度值,从熔覆层到基体

不同距离测出的熔覆层硬度、热影响区硬度、基体硬度沿曲面的变化趋势,得到了硬度沿曲面的变化情况,通过对式样的分析,说明熔覆效果良好,从而验证了该熔覆轨迹方法的可行性。

表1 熔覆工艺参数

Table 1 Cladding process parameters

Laser power /kW	Defocusing amount /mm	Powder feed rate /(g/min)	Laser scanning speed /(mm/min)	Lap rate/%	Cladding width /mm	Cladding height /mm	Part substrate
2	16	15	500	50	2.5	0.6	Q235

表2 熔覆路径各点对应参数表

Table 2 Parameter list corresponding to each point in cladding path

$x$	$y$	$z$	$A$	$B$	$C$
83.1222	-3	24.5301	-0.7769226	0.03801314	0.6284475
83.1222	0.0473	24.5301	-0.7578283	0.009052476	0.6523913
83.1742	3.9667	24.1139	-0.6887596	0.19979	0.6969176
83.2316	7.7668	23.068	-0.7098886	0.2171231	0.6700117
83.293	11.3471	21.42	-0.6646487	0.4013679	0.6301952
83.35669	14.6129	19.2136	-0.6766137	0.4602425	0.5747789
83.4211	17.4778	16.507	-0.6632	0.5596025	0.4970019
83.4845	19.8663	13.3719	-0.6144633	0.6909913	0.3807439
83.5451	21.715	9.891	-0.5994473	0.7285692	0.3314361
...	...	...	...	...	...
59.3062	4.5497	-27.2665	0.7749013	0.1602334	-0.6114355
59.3062	0.0224	-27.6798	0.7727568	0.02250525	-0.6343032
59.3062	-3	-27.6798	0.7727568	0.02250525	-0.6343032

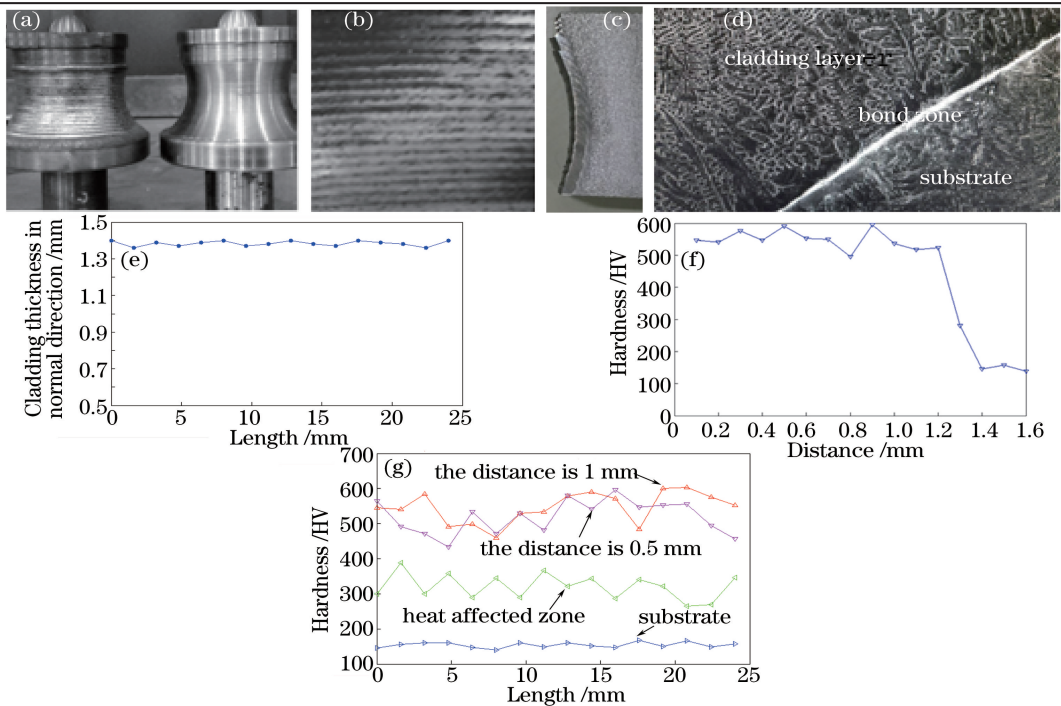


图10 熔覆实验结果。(a) 熔覆实验对比图;(b) 熔覆层表面形貌;(c) 熔覆层截面式样;(d) 熔覆层横截面组织;

(e) 熔覆厚度沿曲面分布;(f) 熔覆层表面到基体的硬度分布;(g) 离基体不同距离处熔覆层硬度分布

Fig. 10 Cladding experimental results. (a) Comparison of cladding experiments; (b) surface morphology of cladding layer;

(c) cross-sectional shape of cladding layer; (d) cross-sectional structure of cladding layer; (e) cladding thickness

distribution along curved surface; (f) hardness distribution from cladding layer surface to the base;

(g) hardness distribution of cladding layer with different distances from the base

## 6 结 论

随着激光熔覆加工技术的应用越来越广泛,对曲面零件进行熔覆再制造的质量及效率的要求也越来越高,进一步研究激光熔覆在曲面零件上的路径规划方法,一直是该领域的研究难点和热点。根据激光熔覆的工艺特性,规划出合理的曲面零件加工路径,获得良好的熔覆层质量,是激光熔覆在再制造中推广应用的前提。该方法主要针对激光熔覆工艺参数不变的情况,结合曲面的特点,综合考虑轨迹排距、光斑大小等多种因素,相较一般的路径规划算法而言,在保证加工效率和质量的基础上,实现了离线编程,同时通过实验得到了表面质量良好的熔覆层,验证了该方法的可靠性,为实现激光熔覆在曲面零件再制造上的推广提供了一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- Zhao Shitian, Zhao Dongbiao, Fu Yingying, *et al.*. Maximum cutter size calculating for free-form surface machining based on improved genetic algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(2): 289-293.  
赵世田, 赵东标, 付莹莹, 等. 基于改进遗传算法求取加工自由曲面的最大刀具尺寸[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(2): 289-293.
- Yao Jianhua, Zhang Qunli, Ye Liangwu. Application and prospect of laser surface beam welding technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(2): 57-60.  
姚建华, 张群莉, 叶良武. 激光表面堆焊技术及其发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(2): 57-60.
- Wu P, Zhou C Z, Tang X N. Microstructural characterization and wear behavior of laser clad nickel-based and tungsten carbide composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 66(1): 84-88.
- Li Yajiang, Li Jianing. *Laser welding /cutting /cladding*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 200-207.  
李亚江, 李嘉宁. *激光焊接/切割/熔覆技术*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 200-207.
- Li Fuquan, Wang Shuli, Chen Yanbing, *et al.*. Investigation of bioceramic composite coatings fabricated by laser cladding on Ti6Al4V surface[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0603005.  
李福泉, 王树立, 陈彦宾, 等. Ti6Al4V 表面激光熔覆生物陶瓷复合涂层研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0603005.
- Lei Dingzhong, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.*. Research of hollow broadband laser cladding method[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1103001.  
雷定中, 石世宏, 傅戈雁, 等. 宽带激光内送粉熔覆工艺研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1103001.
- Yang Xichen. *Laser processing robot and its industrial applications*[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2780-2798.  
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.
- Lou Qihong. Recent progress of laser technology and it's application in solar cell research[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3187-3192.  
楼祺洪. *激光技术新进展及其在光伏产业中的应用*[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3187-3192.
- 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.
- Ding Han, Zhu Limin. *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.
- Zhou Jianjun, Liu Huran, Lou Yi, *et al.*. *Efficient precision CNC machining complex surfaces*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014.  
周建军, 刘鹄然, 楼易, 等. *复杂曲面高效精密数控加工*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.
- Li H W, Thutnea R. An improved tool path discretization method for five-axis sculptured surface machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technolog*, 2007, 33(9): 994-1000.
- 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.
- Wang Gang. Research on algorithm of automatic generation of interference-free tool path of freeform surfaces with curves of cross sections in the machining of the freeform surfaces[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering Technology,



2003: 25-30.

王 刚. 自由曲面加工中基于截面线法的刀具轨迹生成研究[D]. 阜新: 辽宁技术工程大学, 2003: 25-30.

- 15 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.