

# 基于逆向工程的激光熔覆再制造路径规划

王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 黄勇

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加工效率和质量,实现离线编程,根据激光熔覆的工艺特性对曲面零件进行路径规划。基于逆向工程对零件建模,根据模型提出一种基于切平面法的路径生成方法,通过分析熔覆道搭接率来确定切平面间的距离,利用有效加工离焦量得出轨迹上的插补点集,通过计算插补点在三角形面片上的位置确定法矢,并用偏置法计算出激光枪头的位置与姿态,最后对曲面的熔覆层形貌和组织性能进行分析。相较于一般的路径规划算法,该方法建立在满足激光熔覆工艺参数的前提下,综合考虑了轨迹间距、光斑大小等多种因素,提升了熔覆效率和质量,利于实现激光熔覆在曲面零件再制造领域的推广。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 逆向工程; 曲面零件; 轨迹规划

**中图分类号** TG156.99 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.051401

## Path Planning of Laser Cladding and Remanufacturing Based on Reverse Engineering

Wang Xinlong, Sun Wenlei, Zhang Jianjie, Huang Yong

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

**Abstract** In order to improve the cladding processing efficiency and quality of curved surface parts and achieve off-line programming, the cladding path planning of curved surface parts is carried out according to the process characteristics of laser cladding. The modeling of parts is done based on the reverse engineering. A path generation method based on the tangent plane method is proposed according to the model. The distance between the tangential planes is determined by analyzing the overlap rate of cladding tracks. The interpolation point set along the trajectories is obtained by using defocusing amount for effective processing, and the normal vector is determined by calculating the location of interpolation points on the triangular patch. The position and attitude of the laser nozzle are calculated with the offset method. The morphology and structural property of cladding layer on surfaces are analyzed. Compared with general path planning algorithms, the proposed method, based on the premise of satisfying laser cladding process parameters, comprehensively considers many kinds of factors such as the track row spacing and the spot size. The cladding efficiency and quality are improved, which is beneficial to the promotion of laser cladding in the remanufacturing field of curved surface parts.

**Key words** laser technique; laser cladding; reverse engineering; curved surface parts; trajectory planning

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900

## 1 引言

激光熔覆是指将料粉末置于基体表面,经高能激光束辐照使粉末与基体表层同时熔凝,形成与基体发生冶金结合的熔覆层的表面强化绿色加工技术<sup>[1-4]</sup>。曲面零件具有很高的自由度和良好的力学性能,广泛应用

**收稿日期:** 2016-11-07; **收到修改稿日期:** 2016-12-30

**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)、2014年新疆大学博士启动资金(112-61180)

**作者简介:** 王鑫龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆修复方面的研究。E-mail: 1059013800@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: sunwenxj@163.com

于各个领域<sup>[5]</sup>,但其表面不规则,如何修复破损件一直是一个难题。六自由度机器人的引入为激光熔覆再制造系统的柔性化提供了理想的方案,该机器人能够调整激光束的位姿,使激光束和粉末平行于曲面法矢方向而聚焦在曲面零件表面<sup>[6-7]</sup>。董玲等<sup>[8]</sup>通过规划激光熔覆轨迹修复了自由曲面破损零件,得到了较好的加工效果。刘立峰等<sup>[9]</sup>利用激光熔覆修复凸轮轴得到了一种有效的加工控制点矢量算法。激光熔覆修复复杂曲面零件技术逐渐成为曲面零件再制造的发展方向。但受工艺条件的限制,复杂曲面熔覆表面的质量难以保证<sup>[10]</sup>。对于曲面零件的再制造激光熔覆加工,熔覆路径的规划至关重要,直接影响着工件表面的熔覆效果。

本文利用实验室先进的设备,以同轴送粉的方式,对复杂曲面零件进行了熔覆路径规划实验。结合实验结果,分析熔覆层形貌、显微和金相组织及显微硬度,验证熔覆路径规划的可行性,为激光熔覆再制造曲面零件获得高质量熔覆层提供了一定的参考。

## 2 曲面零件建模及激光熔覆路径规划

### 2.1 曲面零件建模

在再制造之前,一般并不能确切知晓零件的结构形貌以及几何尺寸。通过逆向工程测量方法,获取曲面零部件的表面数据点集,然后用 Imageware 和 Geomagic 软件,进行曲面零件的逆向建模。在计算机上得到三维模型是轨迹生成的必要步骤,图 1 所示为曲面零件逆向三维建模流程图,其中 STL 为立体光刻。

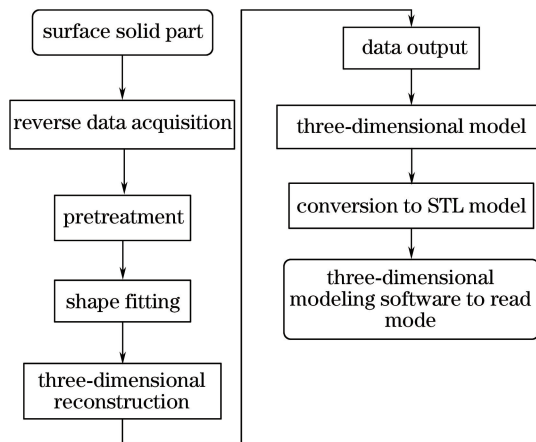


图 1 曲面零件逆向建模流程图

Fig. 1 Flow chart of reverse modeling of curved surface parts

图 1 中“逆向数据采集”是得到零件曲面表面信息关键的第一步,采用德国 GOM 公司的 ATOS 三维扫描仪对曲面零件进行数据采集,获得被测零件表面的点云数据信息。由于测量中不可避免地存在测量误差,尤其在曲率变化剧烈的部位,因此需要对得到的点云数据进行处理。对获得的三维点云数据进行“预处理”,结果如图 2(a)所示。对散乱点云数据,进行曲面的拼接拟合,使其与实体的误差减至最小,即“形状拟合”。“三维重构”是逆向建模的重要步骤,可充分直观地展现出零件的三维模型。“数据输出”指模型输出格式的选择,当完成逆向建模后,生成不同数据格式模型。如图 2(b)所示,将三维模型转化为 STL 模型,以便于 Pro-E、UG 等三维软件读取,为后续的轨迹规划做准备。



图 2 曲面零件的(a)点云数据和(b) STL 模型

Fig. 2 (a) Point cloud data and (b) STL model of curved surface parts

### 2.2 生成熔覆路径的方法

对建好的零件模型生成熔覆路径,目前应用较广泛的是刀具接触点(CC)路径截面线法<sup>[11-12]</sup>,即加工曲

面零件的表面被平行平面组或者曲面组切割,得到的一系列截交线即为加工枪头轨迹在零件表面上的投影线。假定熔覆时激光光斑大小不变,并按一定顺序均匀地扫描工件表面,在实际应用中,可用构造等距平面<sup>[13]</sup>的方法求熔覆轨迹在表面上的投影线,如图3(a)所示。确定切平面间的距离即熔覆轨道的距离,是求熔覆轨迹的关键。熔覆层宏观表面的平整度主要受搭接率影响,建立理论搭接模型,如图3(b)所示,分析并计算切平面的间距,其中 $w$ 为单道熔覆层的宽度, $h$ 为高度,相邻两道的熔覆中心(即光斑中心)分别是 $O_1$ 、 $O_2$ , $d$ 为相邻两熔覆道的中心距(即 $O_1O_2$ ), $h_s$ 为搭接后表面波峰与波谷间的高度差, $d$ 为切平面间距。

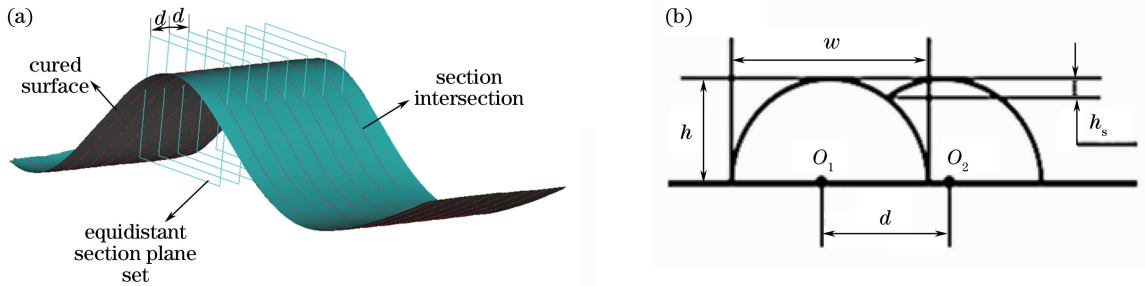


图3 (a)截平面法生成的轨迹;(b)理论搭接模型

Fig. 3 (a) Trajectory generated with cutting plane method; (b) theoretical lap model

从图3(b)可知, $h_s$ 越小,外貌平整度越好。相邻两熔覆道中心距即切平面间距 $d$ 影响 $h_s$ 的取值,因此 $d$ 值决定表面质量。通过实验获得熔覆层单道宽度 $w$ 及高度 $h$ 后,可计算得到切平面间距 $d$ 以及临界搭接率 $\eta_d$ :

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

$$\eta_d = \frac{w - d}{w}. \quad (2)$$

### 2.3 熔覆轨迹离散点的确定

激光熔覆加工时,为了提高加工效率和质量,尽量减少激光枪头的角度摆动,激光枪头并不需要严格按照三角面片与切平面的交点运动。因此需要在轨迹上找出满足要求的插补点集,减少激光枪头运动直线段的个数,精简加工程序,以实现离线编程。图4(a)所示为光粉作用原理图。

为了使零件表面获得冶金结合熔覆层,熔覆零件与枪头的距离应保持在 $\tau$ 之内、 $\varepsilon_1$ 之外,即有效加工的距离变化范围 $\Delta\varepsilon$ 为 $\tau - \varepsilon_1$ 。在直线插补激光枪头运动加工过程中,每一个插补点都应在熔覆有效离焦量的变化范围内<sup>[14]</sup>,因此每个插补点之间的弓高误差 $\varepsilon$ 应小于离焦量变化范围 $\Delta\varepsilon$ ,即 $\varepsilon \leq |\Delta\varepsilon|$ ,如图4(b)所示。

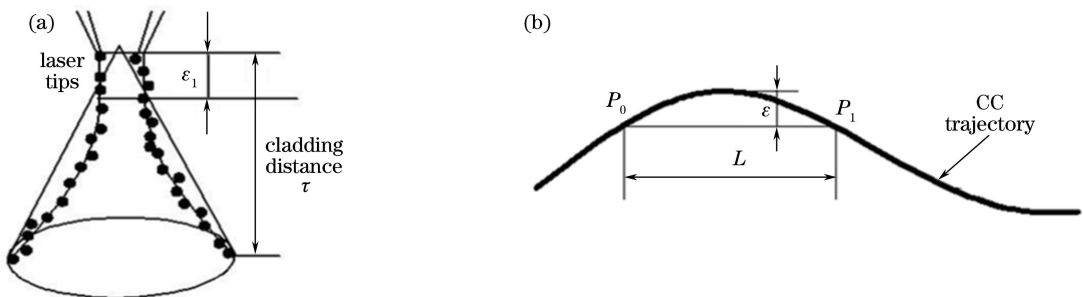


图4 (a)光粉作用原理图;(b)熔覆步长的确定

Fig. 4 (a) Principle diagram of light and powder interaction; (b) determination of cladding step length

根据上述条件,得出曲线的弓高误差大小要求。在三维软件中,用等选公差插补出满足要求的各个轨迹曲线上的点集,从而稀疏点集,求得表面上的加工点坐标 $(x, y, z)$ ,再用偏置法得出激光枪头的位置。图5为稀疏的插补加工点集。

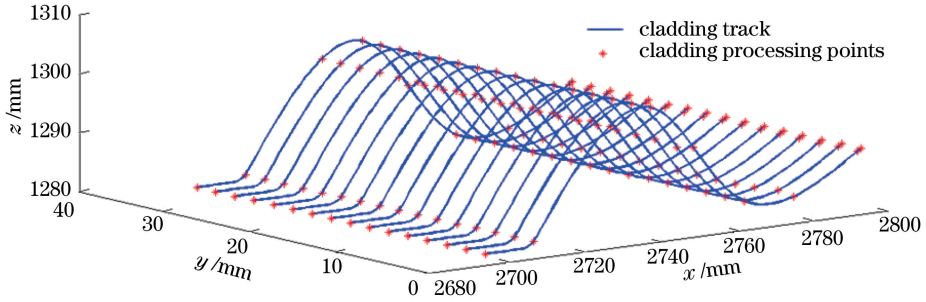


图 5 曲面轨迹离散插补点集

Fig. 5 Discrete interpolation point set along curved trajectory

## 2.4 激光枪头姿态的确定

激光束在曲面零件表面的光斑大小,受激光束光轴与零件表面法矢的夹角  $\theta$  的影响。 $\theta$  越大,工件表面被照射的光斑被拉得越长,导致能量分布不均匀,进而影响基体对激光的吸收率;同时影响粉末流,使粉末分布发生变化,束腰位置改变。因此,在熔覆加工过程中,应尽量保持激光束与曲面上加工点的法矢在同一直线上。每个三角形面片都可用一个法矢和三个顶点来描述<sup>[15-17]</sup>。要计算加工点的法矢,首先分析加工点与三角形面片的位置关系,图 6 中有三种情况:图 6(a)中插补点在三角形面片顶端,图 6(b)中插补点位于三角形面片之内,图 6(c)中插补点在三角形面片的边上。分别计算三种情况下各点的法矢。

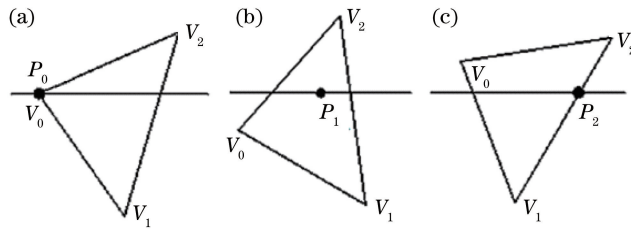


图 6 加工点与三角面片位置关系

Fig. 6 Positional relationship between processing point and triangular facet

第一种情况,点在三角网格顶点上,三角网格顶点的法矢一般可用与其共顶点的三角形法矢的面积加权平均来计算<sup>[18]</sup>。设与  $V_0$  共顶点的三角形有  $m$  个,则与  $V_0$  相邻的点为  $V_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, m$ ),由  $V_0$ 、 $V_i$ 、 $V_{i+1}$  组成的三角形面片的面积为  $S_i$ ,法矢为  $N_i$ ,且

$$N_i = \frac{\overrightarrow{V_i V_0} \times \overrightarrow{V_{i+1} V_0}}{\|\overrightarrow{V_i V_0} \times \overrightarrow{V_{i+1} V_0}\|}, \quad (3)$$

$$S_i = \frac{\|\overrightarrow{V_i V_0} \times \overrightarrow{V_{i+1} V_0}\|}{2}. \quad (4)$$

顶点处  $V_0$  的法矢为

$$N_{P_1} = N_{V_0} = \frac{\sum_{i=0}^m S_i N_i}{\sum_{i=0}^m S_i}. \quad (5)$$

第二种情况,点在三角形面片之内,则法矢为三角形面片的法矢:

$$N_{P_1} = \overrightarrow{V_1 V_0} \times \overrightarrow{V_2 V_0}. \quad (6)$$

第三种情况,点在三角形面片的边上,顶点  $V_1$ 、 $V_2$  的法矢分别为  $N_1$ 、 $N_2$ ,两点间的距离为  $D$ ,设  $P_2$  到  $V_1$  的距离为  $d_1$ ,可通过插值的方式得到点  $P_2$  的法矢为

$$N_{P_2} = \left(1 - \frac{d_1}{D}\right) \frac{N_1}{\|N_1\|} + \frac{d_1}{D} \frac{N_2}{\|N_2\|}. \quad (7)$$



## 2.5 激光枪头路径的获取

按照上述方法计算曲面上加工点的位置和姿态,再用偏置法得到激光枪头的位置与姿态,各点按照顺序排列。理论上要确保机器人加工姿态,激光束垂直于加工面,但实际加工中应使激光束轴线与加工面的法线有一定角度,以避免激光的光束反射进入加工头造成光路损伤。为防止熔覆时枪头在熔覆一道结束后,因角度转变太大产生积瘤和抖动,从而影响表面质量,一般将路径向外延伸一段距离,再将点按顺序连接起来,即可得到加工轨迹线,如图 7 所示。

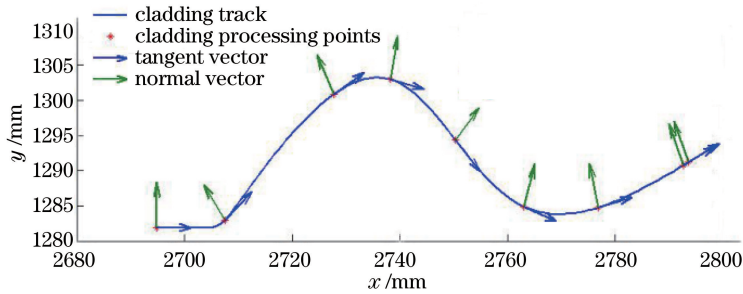


图 7 最终的枪头路径

Fig. 7 Final nozzle path

## 3 实验验证结果与分析

### 3.1 激光熔覆再制造修复系统的建立

激光熔覆再制造原理是在高能量激光束辐射下基体和粉末同时熔化,凝固形成具有冶金结合的熔覆层。激光再制造系统应该包含激光制造系统、送粉系统、工作台及运动执行机构、软件控制系统以及其他辅助装置<sup>[19]</sup>。实验采用德国 IPG 公司的 YLS-2000-TR 光纤激光器,采用德国 KUKA 机器人 KR30HA 和同轴送粉方式,系统布局如图 8 所示。

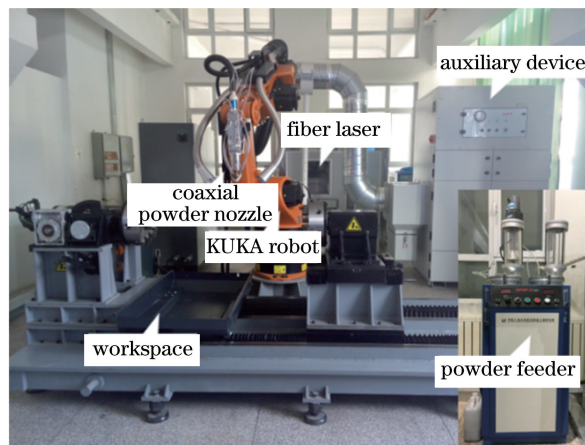


图 8 激光熔覆设备

Fig. 8 Laser cladding equipment

### 3.2 熔覆材料选择

基体材料为经过调质处理的 45 # 钢,硬度为 20~30 HRC。根据熔覆材料与基材性能相近的原则,选择铁基合金粉末,其成分如表 1 所示。铁基合金粉末熔覆层硬度适中,韧性好,熔覆涂层抗裂性能好。

表 1 Fe 基粉末的化学成分(质量分数,%)

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

Element	C	Si	Cr	Ni	Mo	Tb	Fe
Content	3.79	0.54	15.8	7.2	1.29	3.01	Bal.

### 3.3 熔覆工艺参数的选定及结果

对于同一曲面零件采用不同的熔覆路径规划方法时,熔覆精度和熔覆效率可能会有很大差异,因此,研究曲面零件熔覆路径规划方法一直被认为是该技术的核心任务。按照以上方法,在 Matlab 中编程算出熔覆点的坐标和法矢,得到机器加工枪头在各点的坐标和姿态。实验室采用的 IPG 光纤激光器和 KUKA 六自由度串联式机器人组成的柔性加工系统,具有很高的自由度,能对复杂的曲面进行熔覆加工。以 S 型自由曲面零件为例,进行工艺实验,效果图如图 9 所示,选取表 2 所示熔覆工艺参数。图 10 为熔覆前后曲面零件对比图。在激光熔覆过程中,路径较为平滑,从图中可以看出,熔覆层表面良好,较为平整。

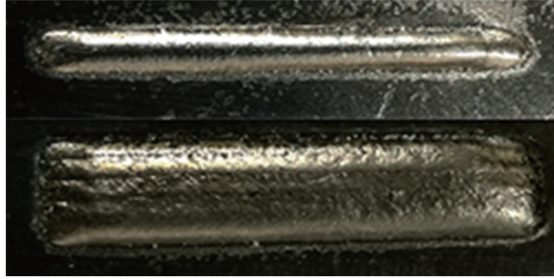


图 9 熔覆工艺实验效果图

Fig. 9 Effect picture of cladding process test

表 2 熔覆工艺参数

Table 2 Cladding process parameters

Laser power /kW	Defocusing amount /mm	Powder feed rate /(g/min)	Laser scanning speed /(mm/min)	Overlap rate /%	Cladding width /mm	Cladding height /mm	Part substrate
1.8	12	15	500	50	4	1.05	45 # steel

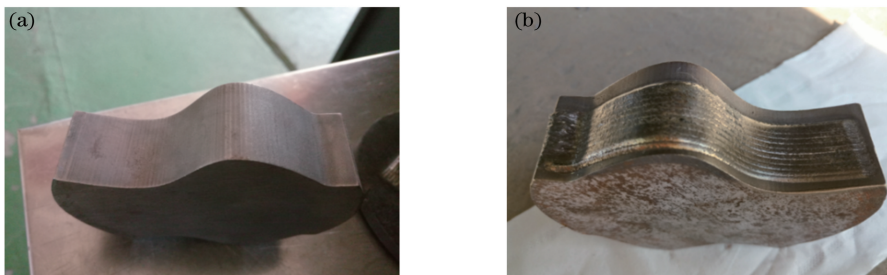


图 10 熔覆前后曲面零件对比图。(a)熔覆前;(b)熔覆后

Fig. 10 Contrast of curved surface parts (a) before and (b) after cladding

### 3.4 熔覆层金相组织分析

分别对熔覆层试样的横截面金相组织拍摄光学显微和扫描电子显微(SEM)图像,如图 11 所示。选取每个试样多个单道的位置进行拍摄,试样的弓端金相组织 SEM 图像如图 12(a)所示,其结合区金相组织 SEM 图像如图 12(b)所示。

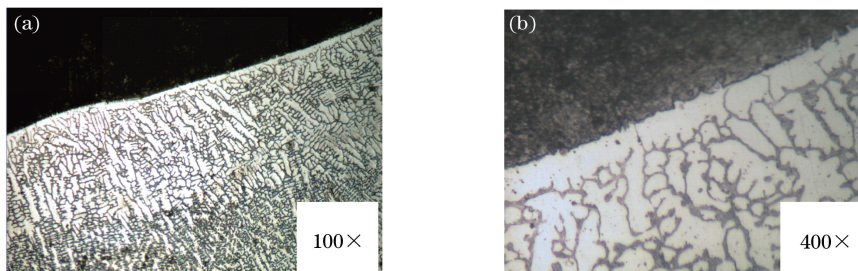


图 11 熔覆层横截面组织。(a)光学显微图像;(b) SEM 图像

Fig. 11 Cross-sectional structure of cladding layer. (a) Optical microscopic image; (b) SEM image

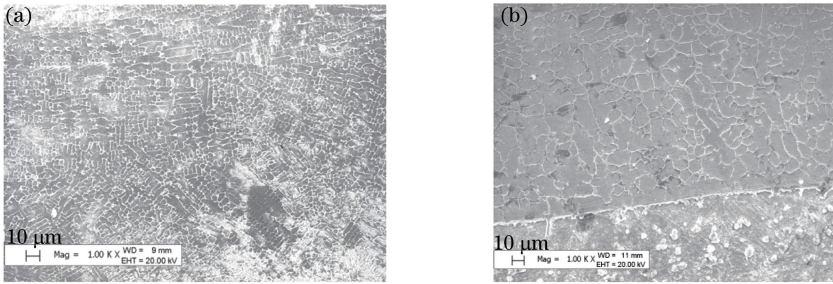


图 12 熔覆层(a)顶端和(b)结合区的金相组织 SEM 图像

Fig. 12 SEM micrographs of metallographic microstructures (a) on top and (b) of bond zone of cladding layer

从图 12(a)可知,曲面熔覆层顶端因散热方向的无规律性,组织大多为细小等轴树枝晶,其组织致密、匀称,无明显的气孔和微裂纹。从图 11 和图 12(b)可以看到,熔覆层与基体之间有很明显的一条亮带,说明基体与熔覆层形成了冶金结合,达到熔覆质量要求。熔覆层结合区存在典型柱状晶,始终沿基材外延方向垂直基材表面生长。从结合区金相组织可看出,熔覆层与基材结合良好,验证了该熔覆轨迹规划方法的可行性。

### 3.5 熔覆层显微硬度

将在砂纸上打磨并抛光的样件置于质量分数为 4% 的稀硝酸中腐蚀 10~15 s,然后用显微硬度计对试样进行 7 道显微硬度的测量,距离熔覆层顶端同一高度对每个道次依次分别取 9 个点,不同道次熔覆层横截面硬度分布如图 13 所示。从图可以看出,熔覆层硬度主要在 370 HV 左右波动,不同试样的硬度分布基本一致,同一熔覆道中熔覆层硬度高于基体硬度。

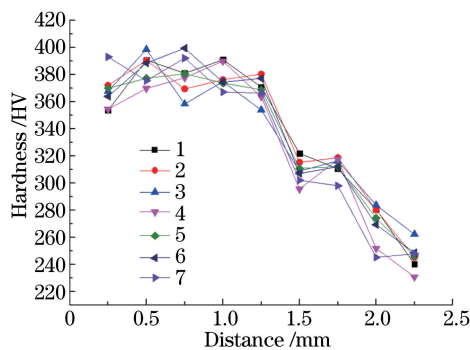


图 13 不同道次熔覆层横截面硬度分布

Fig. 13 Cross-sectional hardness distributions of cladding layer for different channels

## 4 结 论

采用逆向工程与激光熔覆再制造相结合的方式,根据激光熔覆的工艺特性,对曲面零件进行路径规划。通过逆向采集和点云数据处理建立熔覆曲面理论模型。基于熔覆加工搭接率计算各熔覆道间距,通过同轴送粉在有效离焦量范围确定熔覆弓高误差,并依据等弓高快速计算加工点。根据 STL 三角形面片进行插补点法矢的计算,并按加工点法矢方向偏置一定距离得到枪头运动轨迹。最后进行熔覆实验,结果表明熔覆层曲面波纹度较小,显微组织致密、匀称,无明显的气孔和微裂纹,且熔覆层硬度明显高于基体的,验证了路径规划的合理性,为激光熔覆再制造复杂自由曲面零件的应用提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Yuan Qinglong, Feng Xudong, Cao Jingjing, *et al.* Research progress in laser cladding technology[J]. Materials Review, 2010, 24(2): 112-116.  
袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(2): 112-116.
- [2] Tan Youhong, Liu Min, Ma Wenyong. Microstructure and wear resistance of  $Y_2O_3$ -WC-B<sub>4</sub>C laser alloying layer crack on 60CrMnMo steel[J]. Materials Protection, 2013, 46(12): 13-16.

- 谭友宏, 刘敏, 马文有.  $Y_2O_3$  对 WC-B<sub>4</sub>C 激光合金化层裂纹与耐磨性能的影响[J]. 材料保护, 2013, 46(12): 13-16.
- [3] Zhang Dongdong, Shi Yan, Liu Jia, *et al.* Research on controlling the crack in laser cladding of high hardness coating[J]. Applied Laser, 2014, 34(1): 1-8.  
张栋栋, 石岩, 刘佳, 等. 激光熔覆高硬涂层裂纹控制研究[J]. 应用激光, 2014, 34(1): 1-8.
- [4] Xu Jintao, Li An, Liu Dong, *et al.* Research on corrosion resistance and wear resistance of laser cladding Cr<sub>3</sub>Si/ $\gamma$  multi-phase coating[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0303006.  
徐金涛, 李安, 刘栋, 等. 激光熔覆 Cr<sub>3</sub>Si/ $\gamma$  多相涂层耐腐蚀性和耐磨性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303006.
- [5] 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.
- [6] Jiang 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.
- [7] 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.
- [8] 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(2): 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(2): 0703007.
- [9] 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.
- [10] Zhao Yafan, Chen Chuanzhong. Mechanism and prevention of cracking of laser cladding metal ceramic coatings[J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 16-19.  
赵亚凡, 陈传忠. 激光熔覆金属陶瓷涂层开裂的机理及防止措施[J]. 激光技术, 2006, 30(1): 16-19.
- [11] Zhou Jianjun, Liu Huran, Lou Yi, *et al.* Efficient precision CNC machining complex surfaces[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014.  
周建军, 刘鹤然, 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.
- [12] Li H W, Thutnea R, Feng H Y. An improved tool path discretization method for five-axis sculptured surface machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(9): 994-1000.
- [13] 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 Technical University, 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: 辽宁工程技术大学, 2003: 25-30.
- [14] 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.
- [15] Dai Guangming, Hou Zhanghao, Wurikaixi Aiyiti. Research on trajectory generation of spraying gun of automatic plasma spraying equipment[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(10): 132-136.  
戴光明, 侯章浩, 乌日开西·艾依提. 自动等离子喷涂设备喷枪轨迹生成研究[J]. 矿山机械, 2015, 43(10): 132-136.
- [16] Chen Wei, Zhao Dean, Li Fazhong. Tool trajectory planning of robotic spray painting and its experiment for complex curved surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 204-208.



- 陈伟, 赵德安, 李发忠. 复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 204-208.
- [17] Fu Zemin. Research on RE/RP/RT integration technology of complex curved surface parts[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006: 2-20.  
付泽民. 复杂曲面零件的 RE/RP/RT 集成技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006: 2-20.
- [18] Zhu Xinxiong. Free curve and surface modeling technology[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2000: 2-20.  
朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2000: 2-20.
- [19] Zhou Chaojun, Sun Wenlei. Review of laser remanufacturing research based on laser cladding[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(9): 7-9.  
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): 7-9.