

自由曲面等搭接率算法及激光熔覆工艺实现

苏昊, 石拓*, 石世宏, 傅戈雁

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 曲面激光熔覆由于搭接率变化, 易导致熔覆层厚薄不均。提出了一种自由曲面激光熔覆等搭接率熔道的轨迹生成算法。采用深度相机采集曲面的点云数据, 确定一条点云束, 对其拟合后作为初始熔道轨迹并根据等距逐步法得到加工点集。采用求交切片法获得垂直熔覆方向的曲面轮廓, 在轮廓上搜寻加工点集的等距点。由等距点集拟合后一道熔覆轨迹, 从而保证搭接率相等。重复上述步骤直到轨迹遍历曲面。按加工点的法向量方向确定熔覆喷头的运动姿态, 使喷头轴线始终垂直加工表面。对半球形封头表面进行熔覆实验, 结果表明: 等间距轨迹规划算法结合喷头的变姿态适配, 可获得搭接率一致的曲面熔道; 得到的自由曲面激光熔覆层厚度均匀, 硬度较高, 无明显的道间隆起或凹陷等缺陷。

关键词 激光技术; 自由曲面; 激光熔覆; 搭接率; 熔覆层

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0402008

Algorithm and Implementation of Laser Cladding with Equal Overlapping Ratio on Free-Form Surface

Su Hao, Shi Tuo*, Shi Shihong, Fu Geyan

School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract The thickness of cladding layers on free-form surface tends to be nonuniform owing to an instable overlapping ratio in the laser cladding process. In this paper, a trajectory generation algorithm for a laser cladding with an equivalent overlapping ratio on a free-form surface is proposed to solve this problem. A depth camera was used to collect the point cloud data on the whole surface. A point cloud beam was fitted as initial cladding layer, and a processing point set was obtained using the equidistant step method. The contour along the vertical direction of the cladding layer was identified by cross-section slicing, and equidistant points of processing points were fitted for ensuring the equality of the overlapping ratio. The next processing trajectory was fitted from the obtained equidistant point set until it traversed the entire surface. The posture of a cladding nozzle was determined along the normal vector direction of the processing points to keep the axis of the nozzle perpendicular to the machined surface. The results of the surface cladding experiment conducted on a hemispherical end socket reveal that cladding layer with equal overlapping ratios can be obtained by combining the equidistant trajectory algorithm and posture adaptation of the nozzle. In addition, the cladding layer on the free-form surface exhibit uniform thickness and high microhardness and have no obvious defects such as inter-channel bulging or depression.

Key words laser technique; free-form surface; laser cladding; overlap ratio; cladding layer

OCIS codes 100.3010; 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

激光熔覆具有热变形小、稀释率低以及形成的熔覆层组织致密、硬度高、与基体结合好等一系列优点, 已被广泛用于零件表面强化^[1-2]。但对于空间自

由曲面的激光熔覆来说, 曲面梯度与曲率变化较大, 将采用平行切片法求取的截面轮廓作为熔覆路径时, 熔覆层各熔道之间的间距不等, 搭接率不断改变, 疏密不均的熔道会导致熔覆层隆起或凹陷, 厚薄不均, 严重影响曲面的熔覆质量。姜付兵等^[3]通过

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-11-13; 录用日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61903268)、江苏省自然科学基金(BK20190823)

* E-mail: shituo@suda.edu.cn

机器人夹持激光熔覆喷头使喷头轴线始终垂直于加工表面,采用示教法实现了大角度倾斜曲面的均匀熔覆。但这种方法的精度较低,编程过程复杂,仅适用于等截面曲面零件,通用性不强。董玲等^[4]采用等距平行截面与三角网格化后的点云模型求交获得了加工点位置,陈影等^[5]对采集到的点云以直接等距切片的方式规划激光熔覆路径,但这两种方法都无法保证自由曲面上熔道搭接率始终相等。任乃飞等^[6]提出了自适应切片的方式,通过改变切片厚度来保证熔道间搭接率相等,在一定程度上改善了搭接率不相等的问题,但是自适应切片只能保证在某一垂直于熔道的截面上熔道间距相等。

本文提出了一种等搭接率激光熔覆层的路径规划算法。利用深度相机获取曲面点云,选择采集点并拟合出第一道熔覆轨迹,然后根据等距离步长法在这条轨迹上搜索得到加工点集。搜索每一加工点附近的一群点,对这群点沿垂直熔覆方向采用求交法^[7]求出通过加工点平面且垂直于熔覆方向的轮廓。在轮廓上根据熔道间距获取下一熔覆轨迹上的点,拟合下一轨迹上的点集获得后一道熔覆轨迹。同时,计算加工点的法向矢量,得到熔覆喷头姿态,保证熔覆喷头在加工过程中始终垂直于加工表面。采用等间距轨迹规划法并结合喷头姿态的调整,实现了自由曲面的激光均匀熔覆。

2 等间距轨迹规划算法

2.1 点云的获取与处理

深度相机 Kinect V2 采用飞行时间法(TOF)测量物体距离相机的距离,生成深度图,深度图按照灰度级的方式存储不同像素点的距离值。根据深度图像素坐标系与摄像机坐标系之间的转换关系,计算出物体像素点在摄像机坐标系下的位置,最终生成点云^[8]。

将待熔覆曲面零件置于某一水平面上,采集得到包含水平面与零件的点云。采用深度相机采集到的点云比较稀疏,在进行局部切片并拟合曲线时,可能会出现两个截断面之间无点的情况。上采样^[9]可使稀疏点云稠密化,保证两个截断面之间有足够的点。为了获取零件的点云模型,需要分割掉水平面的点云。PCL 点云库中的随机采样一致性算法(RANSAC)^[10]对噪声点的敏感度较低,可以较为准确地提取出水平面的点云,从而将零件点云分割出来;然后,将零件点云模型向水平面方向投影,得到水平面上的点集,如图 1(a)所示;再采用基于

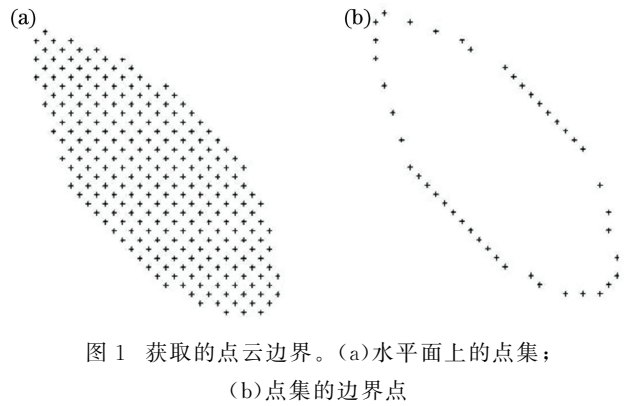


图 1 获取的点云边界。(a)水平面上的点集;
(b)点集的边界点

Fig. 1 Obtained boundary of point cloud. (a) Point set on horizontal plane; (b) boundary points of point set

Delaunay 三角网的空间聚类算法^[11]对所有点(内部数据点和边界数据点)进行聚类,最终可以获得边界上的数据点,如图 1(b)所示,边界数据点将作为后续的终止条件。

2.2 初始熔覆轨迹规划

对于点云数据 Ω , $\Omega = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$, $p_i = \{x_i, y_i, z_i\} \in \mathbf{R}^3$ 。由于点云的数据量大,因此利用 PCL 中的 Kd-tree^[12-13]数据结构为所有点 p 建立拓扑关系,以利于在点云中快速寻找符合条件的点。在点云中选择一条点云束,拟合这条点云束后得到平滑的曲线及函数表达式,作为初始熔覆轨迹。

设定激光熔覆的扫描方向为 y ,实际加工时从端点 $p_s(x, y, z)$ 开始,到端点 $p_e(x', y', z')$ 结束。根据轨迹点的拟合函数可以求出 y 值对应的点,定义这一过程为 $\text{solve}(y)$ 。得到某一加工点后,令这一加工点的 y 值加上一个很小的计算步长 ∂_c ,用 $\text{solve}(y + \partial_c)$ 求出加上计算步长后的点坐标。定义两拟合点的距离为 $\text{Dis}(y_e, y_i)$,其中 $y_e = y_i + \partial_c$,当 $\text{Dis}(y_e, y_i)$ 大于等于加工步长 ∂_m 时,将 $\text{solve}(y_e)$ 求出的点作为下一加工点。重复上述步骤直到无法生成新的加工点。获取加工点的流程如图 2 所示。

2.3 后搭接熔道轨迹规划

在初始熔道的基础上规划后续熔道的步骤如下:

1) 从上条轨迹上选择所有的加工点,利用 Kd-tree 将每一加工点设为搜索点 p_{sc} ,设置搜索半径 r ,搜索距离 p_{sc} 长度不大于 r 的点,得到一块局部点云 Ω_{in} 。

2) 对于每一个搜索点 p_{sc} ,都有一个通过它且垂直于熔覆方向的平面 E ,为了求出 Ω_{in} 在 E 上的轮廓线,根据点云切片法设置平面 E_l 和 E_r 到平面 E

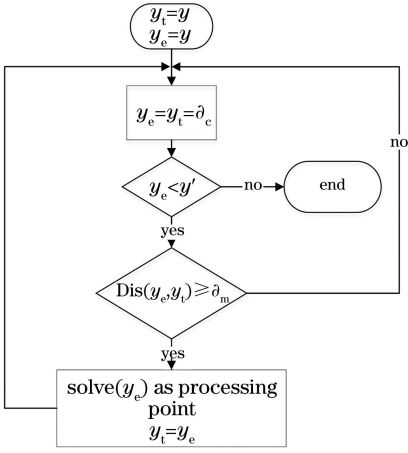


图 2 加工点获取流程图

Fig. 2 Flowchart of getting processing point

的距离为带宽的一半 $(\delta/2)^{[14]}$ 。在点云 Ω_{in} 内, E_1 和 E 之间的这块点云为 $\Omega_1, \Omega_1 = \{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1i}\}$;在 E_r 和 E 之间的这块点云为 $\Omega_r, \Omega_r = \{p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{ri}\}$ 。为 Ω_1 中的所有点 p_{1i} 在 Ω_r 中找到距其最近的点 p_{ri} ,这两点的连线与 E 的交点为 p_i ,最终在平面 E 上得到了点集 $\Omega_p, \Omega_p = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ 。

3) 拟合 Ω_p 中的点,在这条拟合曲线上搜索距离 p_{se} 长度为 $(1-\eta) \times d$ 的点,将其作为下一熔覆轨迹上的点,其中 η 为熔道的搭接率, d 为熔道宽度。图 3(a)是由上一条熔覆轨迹生成下一条熔覆轨迹的过程,从图中可以看出:新生成轨迹上端超出投影轮廓,下端有缺失部分。

4) 采用射线法 $^{[15]}$ 判断这些点是否在轮廓内,若有不在轮廓内的点,便将其删去,再将所有的点拟合,然后下端点沿着拟合曲线延长,直到超出轮廓为止,修正后的轨迹如图 3(b)所示。

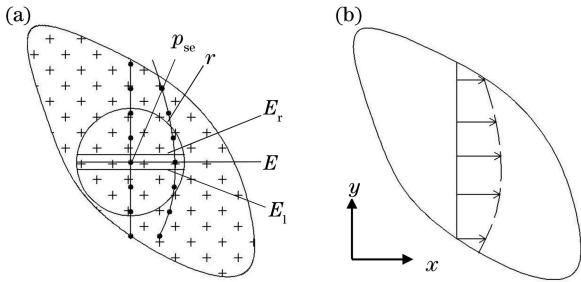


图 3 后续轨迹的生成。(a)后一道熔覆轨迹的生成;
(b)轨迹边界的判定

Fig. 3 Generation of follow-up trajectory. (a) Generation of next trajectory; (b) judgement of trajectory's boundary

5) 重复上述步骤,直到轨迹遍历曲面为止。

2.4 喷头姿态的确定

曲面熔道上的各点具有不同的法向加工位

置,这就需要适时改变激光熔覆喷头的空间姿态。给 KUKA 机器人设定一个工具坐标系 $\{T\}$, $\{T\}$ 的原点设定为激光熔覆过程中加工离焦量所在的点,即 TCP 点。 i, j, k 表示工具坐标系主轴的方向, k 方向与熔覆喷头轴线方向同向, j 方向为熔覆喷头的前进方向,按照叉乘的定义可得 $i = j \times k$ 。KUKA 机器人的控制参考坐标系为基坐标系 $\{B\}$,某一点 P 在 $\{B\}$ 中的表达用 3×1 的位置矢量写成 $P^{(B)}, P^{(B)} = (p_x \ p_y \ p_z)^T$ 。熔覆喷头在不同位置的加工姿态即是 $\{T\}$ 相对于 $\{B\}$ 的表达 $^{[16-17]}$ 。

选取熔覆轨迹上的一个加工点 $P_s^{(B)}$,根据加工步长确定终止加工点 $P_e^{(B)}$,在相邻的后一道熔覆轨迹上,选取辅助点 $P_a^{(B)}$ 。设向量 $P_{se} = (P_e^{(B)} - P_s^{(B)})$, $P_{sa} = (P_a^{(B)} - P_s^{(B)})$,则熔覆喷头的方向向量 $V = P_{sa} \times P_{se}$ 。

i, j, k 用坐标系 $\{B\}$ 表达时写成 $i_T^{(B)}, j_T^{(B)}, k_T^{(B)}$, $\{T\}$ 相对于 $\{B\}$ 姿态表示为 $R_T^{(B)}$,那么

$$R_T^{(B)} = (i_T^{(B)} \ j_T^{(B)} \ k_T^{(B)}) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

在 $\{B\}$ 坐标系中,绕 Z 轴旋转 α 角度表示为 R_Z^α ,绕 Y 轴旋转 β 角度表示为 R_Y^β ,绕 X 轴旋转 γ 角度表示为 R_X^γ ,按照欧拉角 $^{[18]}$ 描述为

$$R_T^{(B)} = R_T^{(B)}(\gamma, \beta, \alpha) = R_Z^\alpha R_Y^\beta R_X^\gamma = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (2)$$

整理(12)式后可得 $\beta = A \tan 2(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}), \alpha = A \tan 2(r_{21}/\cos \beta, r_{11}/\cos \beta), \gamma = A \tan 2(r_{32}/\cos \beta, r_{33}/\cos \beta)$ 。其中 $A \tan 2$ 是一个双变量反正切函数。

图 4 是熔覆喷头在某一加工点时的姿态。

3 实验与结果分析

3.1 实验

实验设备包括苏州大学激光制造技术研究所自主研发的可变姿态光内送粉熔覆喷头 $^{[19]}$ 、IPG-YLS-2000-TR 光纤激光器、GTV-PF2/2 型送粉器、

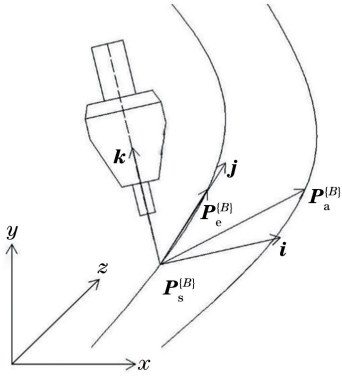


图 4 熔覆喷头姿态

Fig. 4 Posture of cladding nozzle

KUKA 六轴机器人和微软 Kinect V2 深度相机。基体材料为 304 不锈钢,熔覆材料为 Fe313 粉末,其粒度为 45~74 μm ,化学成分如表 1 所示。

表 1 铁基合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Fe-based alloy powder

Element	C	Si	Cr	B	Fe
Mass fraction /%	0.1	2.5~3.5	13~17	0.5~1.5	Bal.

3.2 半球封头熔覆实验

图 5(a)为置于水平面上的半球管道封头,图 5(b)是利用 Kinect V2 获取的点云。

以半球的球心为原点,在相邻熔道上任取两点 $P_1(x-\delta/2, y, z)$, $P_2(x+\delta/2, y, z')$, δ 表示切片厚度或者熔道间距。图 6(a)表示沿 x 方向采用等距切片法得到的 P_1 、 P_2 两点间的距离,图 6(b)表示采用本文算法得到的两点间距离。可以看出,采用等距切片法得到的相邻熔道间距有较大差异,而采用本算法得到的相邻熔道间距相等。

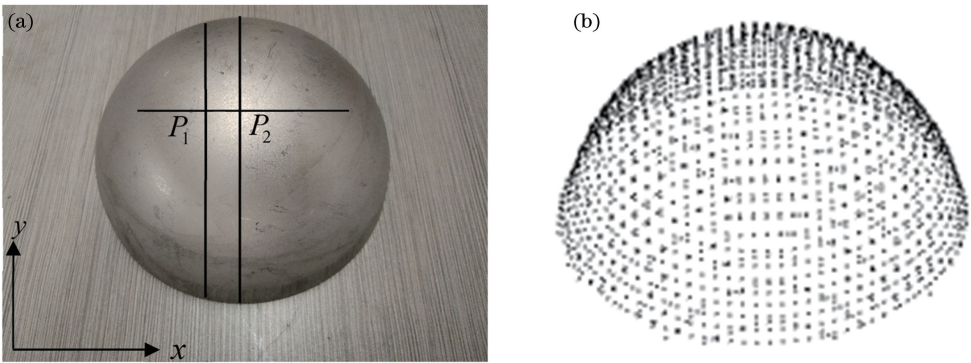


图 5 零件点云的采集。(a)置于水平面上的零件;(b)获取的点云

Fig. 5 Collection of part's point cloud. (a) Part on horizontal plane; (b) obtained point cloud

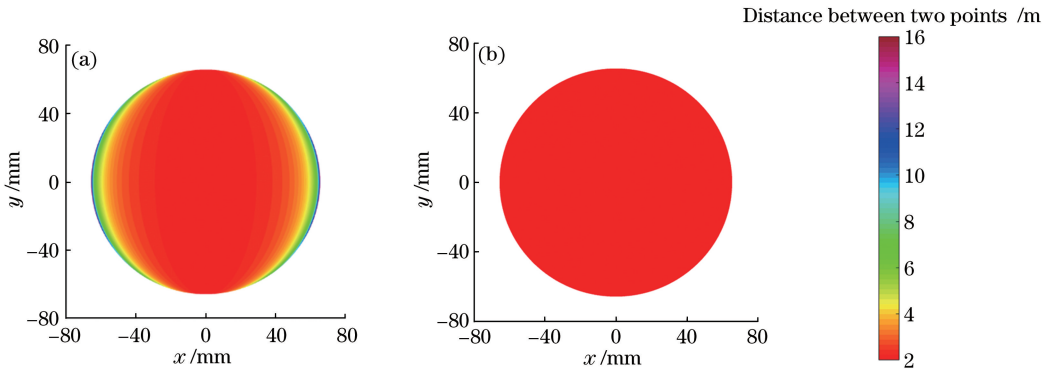


图 6 相邻熔道间距的对比。(a)等距切片法;(b)本算法

Fig. 6 Comparison of adjacent cladding-passes distance. (a) Isometric slicing method; (b) proposed method

选择通过封头球心的平面轮廓作为起始熔覆轨迹。图 7 和图 8 分别是熔覆轨迹与实际熔覆效果图,从图 8 中可以看出,熔覆层光亮且表面无裂纹和粘粉现象。

3.3 熔覆效果

3.3.1 厚度与熔道间距分析

选取 100 个不同位置测量熔覆层的厚度,测量

结果如图 9 所示,可见:平均熔覆厚度为 0.434 mm,标准差为 0.032 mm。熔覆层波紋度较小,熔覆层整体厚度均匀,无明显的道间隆起或凹陷等缺陷,表面形貌较好。

图 10 表示熔覆层相邻熔道的间距,可见:相邻熔道间距在 (1.6 ± 0.2) mm 之间波动,波动范围较小,说明本文方法很好地保证了熔道间距的相等,即

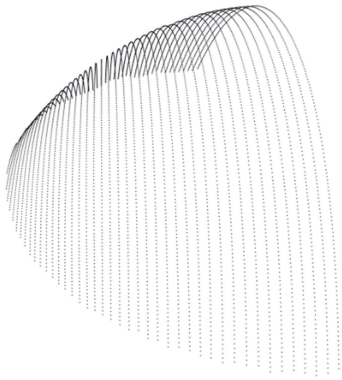


图 7 熔覆轨迹

Fig. 7 Trajectory of laser cladding



图 8 熔覆层实物图

Fig. 8 Photo of cladding layers

实现了熔道等搭接率。

3.3.2 熔覆层组织与硬度分析

在本次实验的 39 条熔覆单道中选取第 1、第 8、

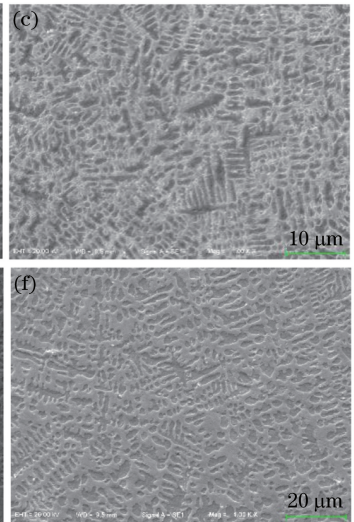
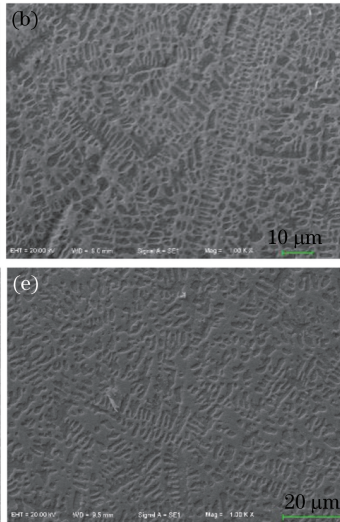
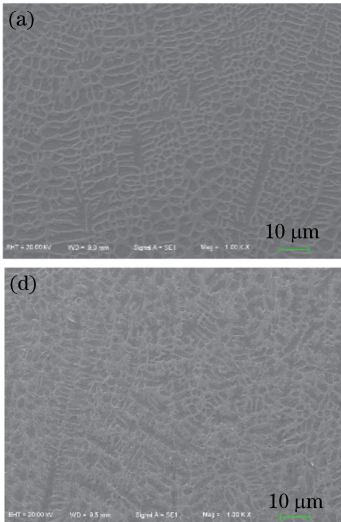


图 11 不同熔覆层中部的显微组织。(a)第 1 条熔道；(b)第 8 条熔道；
(c)第 16 条熔道；(d)第 24 条熔道；(e)第 32 条熔道；(f)第 39 条熔道

Fig. 11 Microstructures in middle of different cladding layers. (a) The first cladding-pass; (b) the eighth cladding-pass; (c) the sixteenth cladding-pass; (d) the twenty-fourth cladding-pass; (e) the thirty-second cladding-pass; (f) the thirty-ninth cladding-pass

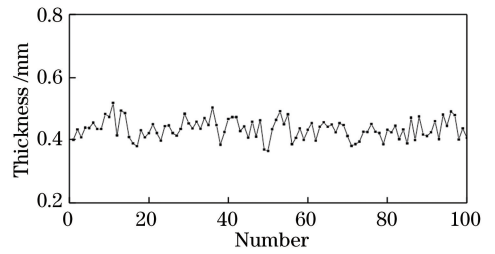


图 9 熔覆层厚度

Fig. 9 Thickness of cladding layer

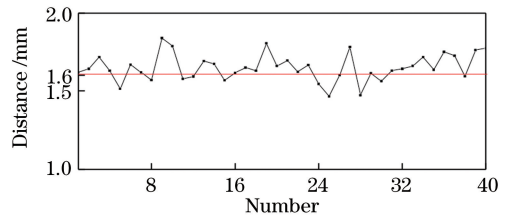


图 10 相邻熔道的间距

Fig. 10 Distance of adjacent cladding-passes

第 16、第 24、第 32、第 39 条熔覆单道,将试样在王水中腐蚀 5 s,然后在 HITACHI S-4700 型冷场发射扫描电镜(SEM)下放大 1000 倍,观察熔覆层中间的微观组织。由图 11 可以看出,各熔覆单道组织均匀致密,晶粒细小,组织以柱状枝晶和等轴枝晶为主,这主要是因为熔覆层中部不易与外界发生热交换,温度梯度较小,同时熔池结晶速度和成分过冷度较大。此外,熔覆层内部无微裂纹、气孔等缺陷。

从初始熔道开始,沿垂直于激光扫描方向选取 30 条不同的熔道,分别测量每一个熔道横截面的显

微硬度,每条熔道取一个测试点,且测试点位置相同。使用 Everone MH-5 型显微硬度计测量这些测试点的硬度,结果如图 12 所示,平均硬度值为 638.85 HV,整体硬度明显高于基材硬度(210 HV)。

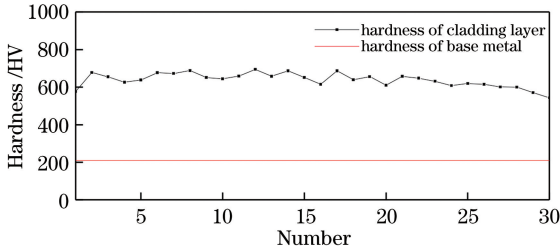


图 12 熔覆层的硬度

Fig. 12 Hardness of cladding layer

4 结 论

本研究提出的等间距路径规划算法可以保证熔道搭接率始终相等。机器人在熔覆过程中连续变换姿态,以保证熔覆喷头始终垂直于零件表面,从而得到表面形貌较好的激光熔覆层。熔覆层硬度高,厚度均匀,适合用作表面强化层,提高零件的耐磨损性和使用寿命。而且,本文算法具有良好的通用性,可以用来完成各种空间曲面零件的激光熔覆强化。

参 考 文 献

[1] Gao X J, Guo N N, Zhu G M, et al. Research status of high-entropy alloys coating prepared by laser cladding[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 107-117.
高绪杰, 郭娜娜, 朱光明, 等. 激光熔覆制备高熵合金涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 107-117.

[2] Feng H, Li J F, Sun J. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0803003.
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.

[3] 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): 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] Dong L, Yang X C, Zhang H M, et al. Path generation for repairing damaged parts of free-form

surfaces in laser remanufacturing[J]. Chinese Journal of 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.

[5] Chen Y, Sun W L, Huang Y, et al. Robot path planning of laser cladding and remanufacturing of curved surface parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0502001.
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): 0502001.

[6] Ren N F, Hu R X, Wan J. Study on adaptive point data slicing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 118-121.
任乃飞, 胡汝霞, 万俊. 点云自适应切片方法研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 118-121.

[7] Liu Y F, Ke Y L. Hybrid slicing technology in reverse engineering [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(6): 741-745.
刘云峰, 柯映林. 反求工程中的混合切片技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(6): 741-745.

[8] Gao X, Zhang T, Liu Y, et al. Visual SLAM lecture 14: from theory to practice[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2017: 87-91.
高翔, 张涛, 刘毅, 等. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 87-91.

[9] Zhang W T, Jiang H L, Yang Z, et al. Data-driven upsampling of point clouds [J]. Computer-Aided Design, 2019, 112: 1-13.

[10] Schnabel R, Wahl R, Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection [J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(2): 214-226.

[11] Liu D Q, Nosovski G V, Sourina O. Effective clustering and boundary detection algorithm based on Delaunay triangulation [J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(9): 1261-1273.

[12] Schauer J, Nüchter A. Collision detection between point clouds using an efficient k-d tree implementation [J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(3): 440-458.

[13] Zhu D H. Point cloud library PCL tutorial [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 104-108.
朱德海. 点云库 PCL 学习教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 104-108.

[14] Ke Y L, Wang Q. 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.
- [15] Chen R Q, Zhou J, Yu L. Fast method to determine spatial relationship between point and polygon [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 59-63.
陈瑞卿, 周健, 虞烈. 一种判断点与多边形关系的快速算法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 59-63.
- [16] John J C. Introduction to robotics: mechanics and control[M]. Yuan C, Li C Q, Chen X Y, *et al*, Transl. 6th ed. Beijing: China Machine Press, 2014: 14-41
John J C. 机器人学导论[M]. 袁超, 李成群, 陈心颐, 等, 译. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 14-41.
- [17] Liu L F, Yang X C. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering [J]. Chinese Journal of 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.
- [18] Zhou L, Cai J D, Qian W, *et al*. Simple and convenient teaching of welding torch orientations for arc welding robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 73-77.
周律, 蔡锦达, 钱炜, 等. 弧焊机器人焊枪姿态的简便示教[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 73-77.
- [19] Shi S H, Fu G Y, Wang A J, *et al*. Laser processing and forming technology of inner light powder feeding and inner light powder feeding nozzle: 200610116413.1[P]. 2008-03-26.
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: 200610116413.1[P]. 2008-03-26.