

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170429001

曲面塑料模具激光熔覆再制造快速加工路径生成方法

黄勇, 孙文磊, 陈影, 黄海博, 刘金朵

(新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要: 对于曲面塑料模具, 在其表面快速生成激光熔覆加工路径非常困难。针对这种情况, 直接以零件的逆向点云模型为研究对象, 通过平面与点云求交得到以密集离散点表示的近似激光扫描路径, 避免了反求建模的过程。以离焦量变化极限为约束条件, 在路径上搜索插补点。提出利用插补点的最近点来计算插补点曲面法向矢量作为激光束姿态的近似快速算法。应用镍基自熔性合金粉对 P20 材质的模具零件曲面表面进行了试验。金相分析表明所形成熔覆层组织均匀、致密, 缺陷稀少; 熔覆层与基体之间形成冶金结合。熔覆层中部组织出现了垂直于界面生长的柱状树枝晶, 而在顶部许多的柱状树枝晶发育成等轴树枝晶。熔覆层的平均显微硬度达到 330~350 HV_{0.2}。路径中段的熔覆层厚度比起始点增加了 10%。

关键词: 曲面; 激光熔覆; 加工路径; 塑料模具; 再制造

中图分类号: TG174.44; TH17

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)05-0150-09

Rapid Processing Path Generation Method for Curved Surface Plastic Mold Remanufacturing by Laser Cladding

HUANG Yong, SUN Wen-lei, CHEN Ying, HUANG Hai-bo, LIU Jin-duo

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047)

Abstract: It is difficult to generate a rapid laser cladding processing path on surfaces for plastic mold. Regarding the reverse point cloud model of parts as the research subject, the approximate processing path was developed by calculating the intersection of the plane and point cloud. This method avoids a complex reverse process. The processing points on the path were searched based on the defocus distance limit criteria. Using the nearest point to the processing point, a fast algorithm was presented to calculate normal vector of the processing points on the curved surface. Mold parts made of P20 material with a curved surface were tested using Ni base alloy powder. Metallographic analysis show that the laser cladding layer has dense microstructure, and metallurgically bonds to the substrate. In the middle of the cladding layer, columnar dendrites grow perpendicular to the interface, but many columnar dendrites at the top develop into equiaxed dendrites. The microhardness of the cladding zone is 330~350 HV_{0.2}. The cladding layer thickness in the middle of the path is 10% higher than that of the starting point.

Keywords: curved surface; laser cladding; machining path; plastic mould; remanufacturing

收稿日期: 2017-04-29; 修回日期: 2017-07-08

网络出版日期: 2017-09-15 16:57; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170915.1657.002.html>

通讯作者: 孙文磊 (1975—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: CAD/CAM、制造业信息化; E-mail: sunwenxj@163.com

基金项目: 新疆维吾尔自治区高技术研究发展项目 (201513102)

Fund: Supported by High Technology Research and Development Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (201513102)

引文格式: 黄勇, 孙文磊, 陈影, 等. 曲面塑料模具激光熔覆再制造快速加工路径生成方法[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 150-158.

HUANG Y, SUN W L, CHEN Y, et al. Rapid processing path generation method for curved surface plastic mold remanufacturing by laser cladding[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 150-158.

0 引言

损伤零件的再制造修复是挽回巨大经济与时间损失,提高资源利用率,实现国家经济可持续发展的重要途径^[1-2]。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失效零件的再制造领域^[3-4]。表面磨损及腐蚀在模具的失效比例中约占40%~50%,导致每年巨大的经济损失^[5]。因此,采用激光熔覆技术对模具的破损部位进行修复以及对模具进行表面强化以延长模具使用寿命,有重要意义。但现代工业中的塑料模具与汽车冲压模具多具有复杂曲面特征。这给激光熔覆路径生成带来很多问题。对于曲面的激光熔覆路径生成,需要完成两个环节。曲面反求建模环节和激光熔覆路径规划环节。

零件基体表面是激光熔覆的目标,其几何特征决定了激光熔覆的工艺及激光扫描路径生成方式。对于具有曲面特征的再制造零件,由于各种失效原因及减材前处理工艺后,曲面特征已发生较大变化。通常需要通过逆向技术来获得当前曲面的离散几何信息,再建立各类反求模型来表征目前的曲面,这就是曲面反求建模环节。这类模型包括三角面片模型(STL)、自由曲面模型(贝齐尔曲面、B样条曲面、非均匀有理B样条曲面(NURBS)等。刘立峰、董玲、方艳、戴士杰等提出了截平面与样条曲面、三角面片等各类反求模型求交的算法来确定激光扫描的路径^[6-9]。但是所采用的三角面片模型和自由曲面模型都是通过对点云数据进行去噪、滤波、精简、拟合、拼接等处理得到的,修整和完善模型需要耗费大量时间。

而对于激光熔覆路径规划,大量研究都参照了曲面多轴铣削的方法。A.Calleja等应用曲面多轴铣削的刀路模型在UG中规划出球面的激光扫描路径^[10-11]。但是,多轴铣削工艺与激光熔覆工艺并不相同。多轴铣削刀路模型需要花费大量时间进行隐式曲面与参数曲面的求交、偏微分等运算。其精确性已远远超出了激光熔覆的工艺要求,造成大量插补点冗余。而企业对再制造的快速响应要求不断提高,不允许在前处理及路径规划阶段花费大量时间。所以研究面向曲面激光熔覆的快速加工路径生成技术及其应用有重要意义。

1 基于点云模型的激光熔覆快速加工路径生成技术

1.1 复杂曲面的点云模型

点云(三维数据点)是逆向工程中的概念,是通过各种三维数据测量仪采集得到的产品表面的数据坐标值,反应了产品表面的位置信息。点云只包含坐标信息,是一种表征物体表面的离散模型。图1(b)所示较为理想的点云,其数据集合可用 Ω 表示。其中 $\Omega=\{m_1, m_2, m_3, \dots, m_i\}$, $m_i=(x_i, y_i, z_i)$ 。其中 m 代表三维坐标系中的点, x, y, z 分别代表平面坐标系的数值。

虽然点云模型不能够完全准确表征曲面的几何特征,但是对于激光熔覆的工艺要求来说,高密度点云模型完全可以满足熔覆路径规划的要求(图1(d))。这就避免了对点云进行分片拟合及拼接的反求建模过程,节省了再制造时间。

1.2 曲面上熔覆路径的生成

激光熔覆通常采用多道搭接、逐道扫描的工艺方式。熔覆扫描路径可以通过一组相互平行的平面与曲面求交生成。如果直接采用点云模型,就避免了平面与参数曲面求交的复杂计算过程。平行平面与点云直接求交的算法如下。

如图1(b),已知点云为 Ω ,在点云中建立坐标系 $xyzo$ 。规划扫描方向,在行距方向上生成等间隔的一组平行平面 $[E_1, E_2, E_3 \dots E_i]$,如图1(c)。点云与平行平面求交 $\Omega \cap [E_1, E_2, E_3 \dots E_i]$,得到了点云中满足平面方程的点,如图1(d)。但是平面厚度为零,不可能有大量点刚好落在平面上。为了得到足够密集的点来逼近熔覆扫描路径,还要搜索离距平面最近的点。

(1) 设一组平行平面中的一片为 E ,在此平面两侧分别做一辅助平面 E_l 与 E_r 。辅助平面与 E 的距离为 t , $t_{\min} \geq 3-4$ 倍点云平均间隔^[12],如图2所示。

(2) 在平面 E 与平面 E_l 之间任取点 m_{li} ,在另一侧平面 E_r 与 E 之间找到与其距离最近点 m_{ri} 。在寻找 m_{ri} 时,建立以 m_{li} 为中心, l 为边长的立方体包围盒, $l=0.25t$ 。计算包围盒内处于 E_r 与 E 之间的点的数量 num ,若 $num=0$,将 l 增加步长 $\Delta t=l$,继续搜索直至 $num>0$;计算所有包围盒内的点至 m_{li} 的距离,距离最小者为目标点 m_i 。

(3) 同理按照步骤(2)的搜索方法,在平面

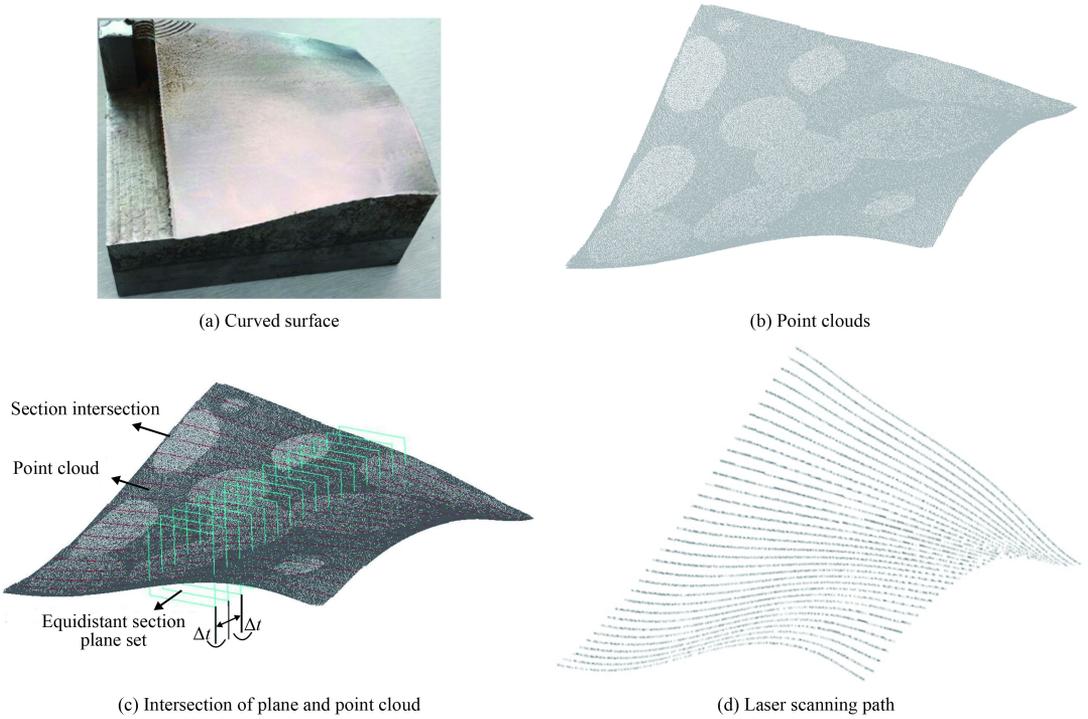


图1 曲面上激光扫描路径生成

Fig.1 Laser scanning path generation on curved surface

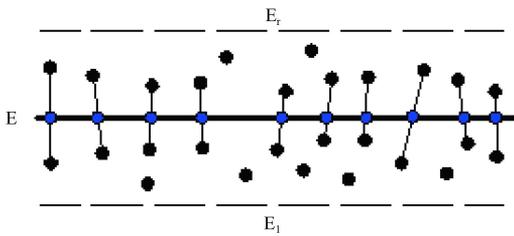


图2 平面与点云求交算法

Fig.2 Algorithm for plane and point cloud

E 与平面 E_1 之间搜索与 m_{ri} 距离最近的点 m_{li}' ，并判断 m_{li} 与 m_{li}' 是否为同一点，若为同一点，则 m_{li} 与 m_{ri} 为有效配点对，将其记录，否则舍弃。

(4) 按照步骤 (2)、步骤 (3) 同样的方法，对平面 E 与平面 E_1 之间 (也可以是平面 E 与平面 E_2 之间) 所有点都进行遍历计算，并记录所有有效配点对。

(5) 将所有有效配点对 (例如 m_{li} 与 m_{ri}) 连接成线段。根据 (1) 式求出直线段 $m_{li}m_{ri}$ 与平面 E 的交点 $d_i(x_i, y_i, z_i)$ ；求出的所有交点组成集合即为最终获取的点云与平面 E 求交的点集 $[d_1, d_2, d_3, \dots, d_n] = \Omega \cap [E_1, E_2, E_3, \dots, E_n]$ ，文中定义为平面点集。该点集的密度能够近似逼近单道熔覆扫描路径。同理按照以上算法也可以求出点云与其它平面相交的点集。这些点集构成了激光扫描路径如图 1(d) 所示。

$$\begin{cases} Ax + By + Cz + D = 0 \\ \frac{x - x_{li}}{x_{ri} - x_{li}} = \frac{y - y_{li}}{y_{ri} - y_{li}} = \frac{z - z_{li}}{y_{ri} - y_{li}} \end{cases} \quad (1)$$

熔覆行距方向的方向矢量为 $m = \{A, B, C\}$ ， $m_{li} = (x_{li}, y_{li}, z_{li})$ ， $m_{ri} = (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri})$ 。

1.3 路径插补点搜索算法

对于曲面激光熔覆，扫描路径通常是自由曲线。目前大多数运动控制系统都不具备自由曲线的插补功能，需要利用微小直线段来近似逼近曲线轮廓。这种微小直线段称为插补步长，直线段两端点为插补点。如图 3 所示， $K_i K_{i+1}$ 两插补点之间的微小弧长为理论激光扫描路径，而直线段 (弦长) L_i 为插补步长。弧与弦之间的最大距离弓高为光束实际运动时离焦量在两点之间变化 ε_i 。根据离焦量变化理论及其对激光熔覆成型影响的工艺试验可以得到离焦量变化允许极限值 $\varepsilon_{\max}^{[13]}$ ，所有 ε_i 应该有 $\varepsilon_i \leq \varepsilon_{\max}$ 。所以，需要通过 ε_{\max} 值来反求两插补点之间的距离。由于用参量表达的自由曲线数学模型非常复杂，通过弧长弓高来计算弦长非常困难，无法满足再制造快速响应的需要。

根据文中内容，如果曲面采用点云模型来表征，激光扫描路径近似为一组密集的在同一平面

上的离散点。由于密集点之间的距离远小于光斑直径, 可以在以上近似曲线路径的密集离散点集中搜索加工插补点。这样把空间曲线上的搜索问题转化成平面上有限离散点的搜索问题, 极大简化了算法, 提高了路径规划效率。如图4所示设平面与点云求交后得到的一组平面点集 $[d_1, d_2, d_3 \dots d_i]$, 可以近似表示一条路径。在平面点集中搜索加工插补点的算法如下。

- (1) 假设平面点集 $[d_1, d_2, d_3 \dots d_i]$ 中 d_i 为某段插补起点, 连接点 d_i 与 d_{i+2} , 并求 d_{i+1} 到连线的距离为 δ_{i+1} 。
- (2) 设离焦量变化允许的极限值为 ε_{\max} 。若 $\varepsilon_i > \varepsilon_{\max}$, 离焦量变化超差, 则 d_{i+1} 为插补点。
- (3) 若 $\varepsilon_i < \varepsilon_{\max}$, 则离焦量变化在允许范围内, 应继续向下搜索。连接点 d_i 与 d_{i+3} , 求取新的 d_{i+1} 与 d_{i+2} 到 $d_i d_{i+3}$ 连线的距离 ε_{i+1} 与 ε_{i+2} 。比较 $\max[\varepsilon_{i+1}, \varepsilon_{i+2}]$ 与 ε_{\max} 的大小, 判断离焦量变化是否超差。若超差, 则上个搜索点 d_{i+2} 为插补点。若不超差, 同理依次往下搜索直到 $\max[\varepsilon_{i+1}, \varepsilon_{i+2}, \varepsilon_{i+3}, \dots, \varepsilon_{i+n}] > \varepsilon_{\max}, n=1, 2, 3, \dots$ 。则 d_{i+n} 为其中一个插补点。
- (4) 然后以 d_{i+n} 为起点, 以同样方法继续往下搜索, 依次找出所有插补点集 $D = \{P_i; i = 0, 1, 2, \dots\}$ 。
- (5) 最后一步, 若搜索到平面点集的最后一个点仍有 $\varepsilon_{i+1} < \varepsilon_{\max}$, 结束搜索, 最后一个点也为插补点。

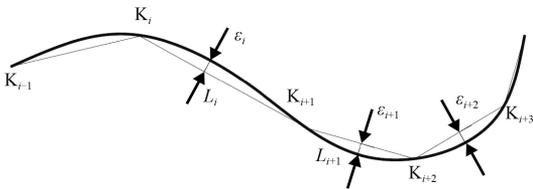


图3 曲线插补原理

Fig.3 Principle of curve interpolation

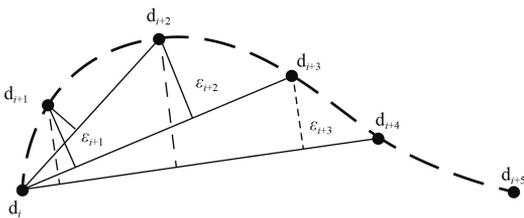


图4 激光扫描路径插补点计算

Fig.4 Computing processing point on laser scanning path

1.4 插补点激光束姿态计算

为保证激光与基体作用时, 能量输入的均匀性, 一般要求基材表面上激光光斑面积不发生太

大变化。对于曲面, 为了达到以上要求, 激光束的轴线需要尽可能与插补点处的曲面法矢重合。这种控制激光束入射角的过程称为激光姿态的规划。但是, 点云模型并不包含点的偏导矢信息。所以提出一种利用最近点的近似法矢快速算法, 避免了复杂的拟合和偏导计算。

如图5所示, 假设平面 E 与点云相交得到平面点集 $[d_1, d_2, d_3 \dots d_i]$ 。 E_1 与 E_r 为求交时的辅助平面。 m_{li} 与 m_{ri} 是求 d_i 时的一对配对点, 则 d_i 是线段 $m_{li} m_{ri}$ 与平面 E 的交点。应用1.3中的插补点搜索方法, 假设确定了 d_i 为路径上的一个插补点。 d_{i+1} 是平面点集中, 沿扫描方向上 $(\overrightarrow{d_i d_{i+1}})$ 方向紧邻 d_i 的一个点(不一定是插补点)。 m_{ri} 在 d_i 的行距方向侧。 $\overrightarrow{d_i m_{ri}}$ 与 $\overrightarrow{d_i d_{i+1}}$ 分别为点 d_i 到点 m_{ri} 和点 d_i 到点 d_{i+1} 的向量。插补点处激光束的轴线矢量 n 可以近似为:

$$n = \frac{\overrightarrow{d_i m_{ri}} \times \overrightarrow{d_i d_{i+1}}}{|\overrightarrow{d_i m_{ri}} \times \overrightarrow{d_i d_{i+1}}|} \quad (2)$$

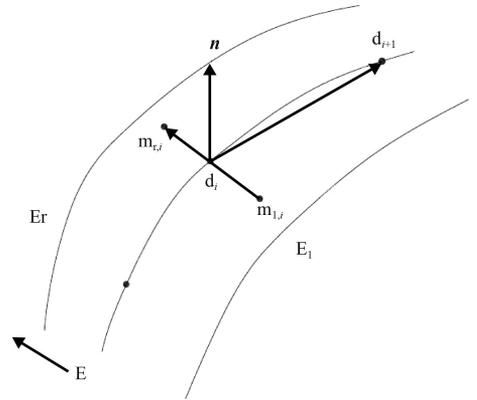


图5 插补点激光束姿态

Fig.5 Laser beam posture of processing point

2 模具再制造应用试验

2.1 试验设备与方法

试验系统由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负压式气载送粉器及冷却系统组成。激光波长: 1 070~1 080 nm; 激光聚焦头(PLFDH0125)使用抛物聚焦镜。为避免干涉采用长程聚焦镜, 焦距 $f=600$ mm, 焦点光斑直径4 mm。配置侧向送粉喷嘴及调整机构。载气与保护气为氩气。

模具零件如图6所示为一注塑模具,其模腔零件的表面为曲面,需要对曲面局部进行修复(图中圈出部分)。模具材料为P20模具钢(成分见表1),硬度达到280~300 HB。为满足材料表面耐腐蚀及耐高温性能要求,采用硬度相近的镍基自熔性合金粉末KF-Ni35进行修复,成份见表2。激光功率2500 W,光斑直径4 mm,送粉速度30 g/min,载气速度600 L/h,激光扫描速度10 mm/s,搭接率50%。熔覆单层,20道。

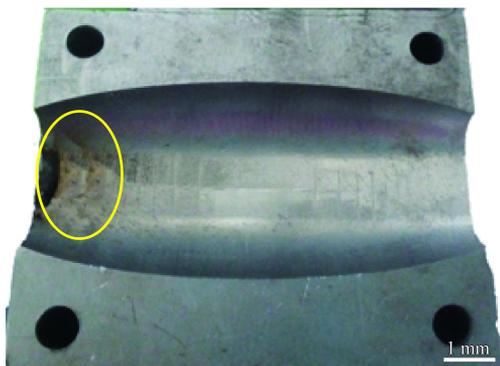


图6 待局部修复的注塑模具

Fig.6 Part of the injection mold to be repaired

表1 P20模具钢的化学成份

Element	C	Cr	Mo	Mn
Content	0.28-0.40	1.40-2.00	0.30-0.55	0.60-1.00
Element	Si	S	P	
Content	0.20-0.80	≤0.030	≤0.030	

表2 镍基合金粉末的化学成份

Element	Cr	B	Si	C	Fe	Ni
Content	9-10.5	2	3-3.5	0.3	5	Bal.

2.2 模具曲面点云模型及快速路径生成

对注塑模具零件进行表面处理,使用清洗剂将零件表面清洗干净。对零件需要再制造的曲面表面喷涂一层显像剂,防止表面反光。标定好三维扫描仪。将零件置于标定板上,进行全方位的扫描。对所得点云进行去噪和滤波处理,去除误差和冗余点。最后得到点云模型如图7(a)所示,总计产生点47 756个,点云密度8.425/mm²。按4 mm直径的圆形光斑计算,每个光斑面积内平均

超过150个点。点间隔远小于光斑直径,所以点云密度足够满足插补点搜索需要。

规划求交平面的生成方向,建立参考坐标系(平行平面尽量沿参考坐标系的某根坐标轴方向生成)。根据再制造要求从点云一端开始生成20片平行平面(沿x轴),平面间隔2 mm,如图7(b)所示。按照平面与点云求交的算法,得到平面点集,也就是激光扫描的近似路径。如图7(c)所示,“*”点表示平面点集。以第二道路径为例(箭头引出处),平面点集共计213个点,点数量、密度足够逼近连续曲线。根据插补点计算方法,设满足离焦量变化的极限为 $\epsilon_{\max}=0.02$ mm,在每一道点集上搜索满足极限的插补点,如图7(c)所示的小圆点。以第二道为例,共搜索插补点13个(表3)。从图7(d)和表3中分析,路径两端插补点间距较近,曲面底部插补点间距较大。由于曲面底部比顶部更为平坦,曲率也小于顶部。根据弓高计算公式,底部的插补步长较大,所以插补点间距离较远,与相关研究结论一致^[14],证明该算法正确。最后根据插补点矢量近似算法,算出插补点处曲面近似法向矢量(图7(e)),作为激光束姿态。如果模具凹模与粉末喷嘴干涉(曲率较大处),还需使用变位机配合。

2.3 试验结果及分析

图8所示试验宏观结果中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位置搭接良好。

使用线切割机床,在表面的熔覆层上切下部分金相试样。对切下的试样打磨抛光,在王水中腐蚀10~15 s后,通过扫描电子显微镜(SEM)对其微观结构进行了分析。图9(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3部分组成,从图中可以清晰看到熔覆层与基体之间存在亮白色界面,这是由于在熔池凝固初期,界面结合处温度梯度较大,而结晶速率很小,故在基体表面生长出平面晶,这是快速凝固的重要特征,说明基体与熔覆层形成了冶金结合^[15]。图9(b)为熔覆层中部区域,这个区域温度梯度有所减小,热流方向仍然垂直于固液界面,由于晶粒的生长方向平行于散热方向,所以熔覆中部组织出现垂直于界面生长的柱状树枝晶。图9(c)为顶部的显微组织,顶部温度梯度继续减小,热流

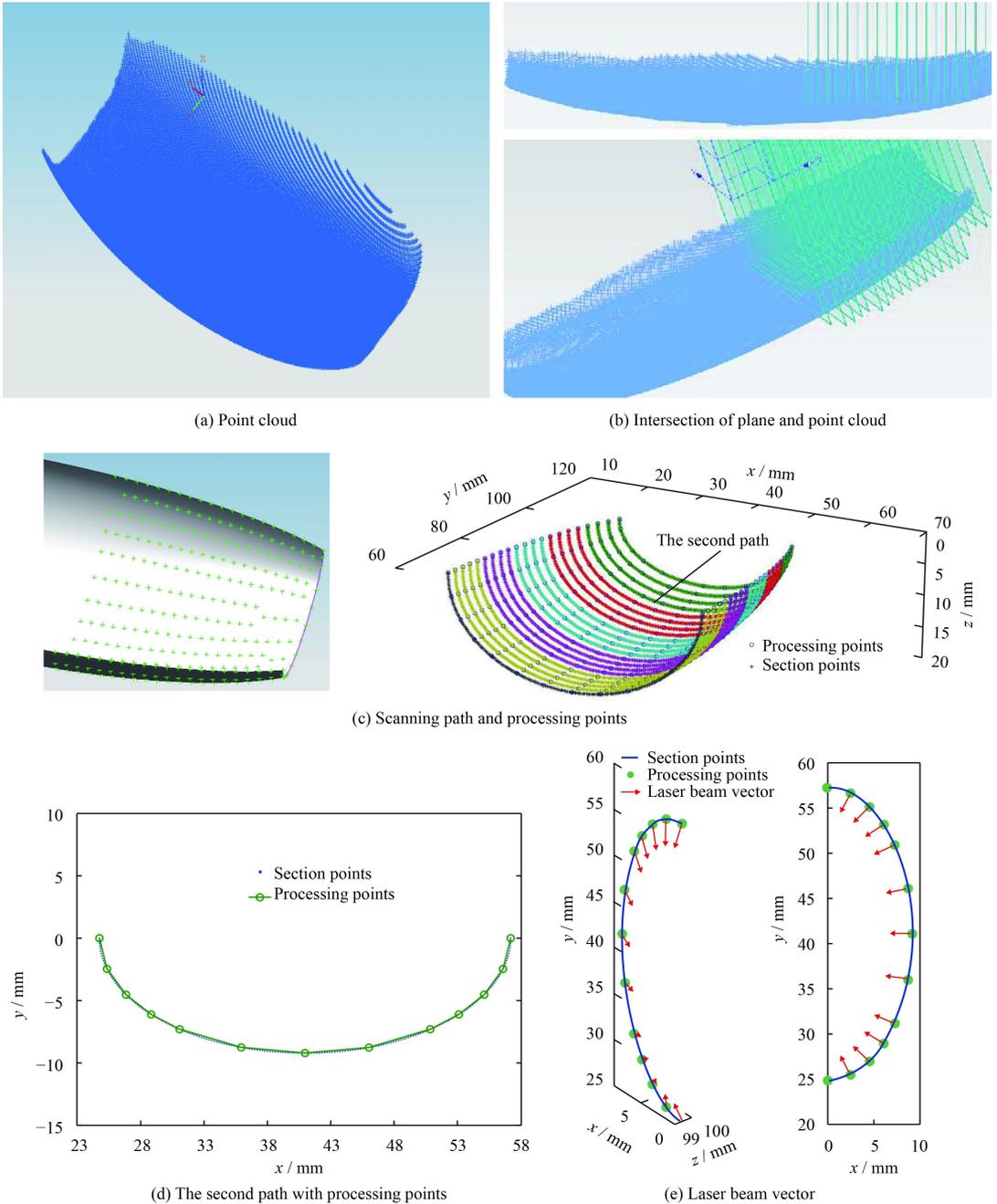


图 7 激光扫描路径和插补点生成

Fig. 7 Generation of laser scanning path and processing points

方向由垂直界面方向转向为平行于激光扫描方向。这导致枝晶取向发生了变化, 另一方面许多柱状树枝晶发育成等轴树枝晶。根据“成分过冷”理论, 低速平界面向胞/枝晶转变主要取决于温度梯度 G_L 和凝固速率 v 的比值即参数 G_L/v 。如果 G_L/v 满足界面稳定条件 (G_L/v 足够大), 凝固界面可以呈平面形态^[16]。而 MS(Mullins-Sekerka) 界面稳定性理论对于平界面生长给出了更全面的定义^[17]。

$$\sigma = \frac{\frac{K_L G_L}{2\bar{K}\bar{\alpha}}(\alpha_L - \frac{v}{a_L}) - \frac{K_S G_S}{2\bar{K}\bar{\alpha}}(\alpha_S - \frac{v}{a_S}) + A}{\frac{L_V}{2\bar{K}\bar{\alpha}} + \frac{m_0 G_C}{v(\alpha - pv/D_L)}} \quad (3)$$

式 (3) 中 $A = -\Gamma\omega^2 + m_0 G_C \frac{\alpha - v/D_L}{\alpha - pv/D_L}$

$$\alpha = \frac{v}{2D_L} + [(\frac{v}{2D_L})^2 + \omega^2 + \frac{\sigma}{D_L}]^{1/2}$$

$$\alpha_L = \frac{v}{2a_L} + [(\frac{v}{2a_L})^2 + \omega^2 + \frac{\sigma}{a_L}]^{1/2}$$

表3 第2道路径插补点坐标、法向矢量及两点间步长、弓高

Table 3 Coordinate, normal vector, step length, and high arch of processing points on the the second path

Point No.	Coordinate			Normal vector			Interpolation step length / mm	High arch length / mm
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>		
1	100	0	24.766	-0.353 0	0	0.935 6	Starting point	Starting point
2	100	-2.461 5	25.367	-0.347 7	-0.412 5	0.841 9	2.533 8	0.018 3
3	100	-4.529 4	26.866	-0.341 5	-0.663 2	0.665 8	2.554	0.018 0
4	100	-6.111 9	28.853	-0.340 7	-0.792 0	0.506 5	2.540 5	0.017 7
5	100	-7.299 9	31.105	-0.343 2	-0.860 9	0.375 45	2.546 1	0.017 8
6	100	-8.754	35.966	-0.349 5	-0.921 2	0.170 4	5.073 1	0.017 0
7	100	-9.208	40.998	-0.352 2	-0.935 9	0	5.052 9	0.016 3
8	100	-8.765 6	46.046	-0.349 4	-0.921 2	-0.170 8	5.067 4	0.017 3
9	100	-7.303	50.888	-0.343 2	-0.861 1	-0.375 0	5.057 4	0.017 7
10	100	-6.110 8	53.148	-0.340 7	-0.791 9	-0.506 6	2.555 5	0.018 0
11	100	-4.532 4	55.131	-0.341 5	-0.663 5	-0.665 6	2.534 6	0.018 1
12	100	-2.466 5	56.629	-0.347 7	-0.413 3	-0.841 5	2.551 9	0.018 3
13	100	0	57.234	-0.353 0	0	-0.935 6	2.539 5	0.018 5



图8 镍基合金在曲面上的熔覆层形貌

Fig.8 Morphology of Ni-base alloy cladding layer on covered surface

$$\alpha_S = \frac{v}{2a_S} + \left[\left(\frac{v}{2a_S} \right)^2 + \omega^2 + \frac{\sigma}{a_S} \right]^{1/2}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{K_L \alpha_L + K_S \alpha_S}{2\bar{K}}$$

$$\bar{K} = \frac{K_L + K_S}{2}$$

$$p = 1 - k_0$$

其中, a_L , a_S , 分别是液固相的热扩散系数; K_L , K_S 分别是液固相导热系数; G_L , G_S 是界面上液固相侧温度梯度, G_C 是界面前沿液相中的浓度梯度, Γ 为 Gibbs-Thompson 系数; D_L 是溶质在液相中的扩散系数; L_V 为凝固潜热; ω 为几何干扰

频率; k_0 为平衡溶质分配系数; (3) 式所确定的界面稳定性条件取决于 σ 的符号。由于 (3) 式右端分母恒为正, 所以稳定条件完全取决于分子的符号。通常情况下金属凝固过程中热扩散长度远大于空间扰动波长, 即 $\frac{v}{2a_L} \leq \omega$ 和 $\frac{v}{2a_S} \leq \omega$, 所以式 (3) 可简化为:

$$S(\omega^2) = -\bar{G}_T - \Gamma\omega^2 + m_0 G_C \frac{\alpha - v/D_L}{\alpha - pv/D_L} \quad (4)$$

$$\text{式 (4) 中, } \bar{G}_T = \frac{(K_L \alpha_L + K_S \alpha_S)}{2\bar{K}}$$

由式 (4) 可以得出界面稳定性取决于温度梯度的方向与大小。这说明温度梯度是影响合金组织形态的重要因素之一。由于激光熔池底部液相与基体保持稳固接触, 热流方向从液相进入基体, 与凝固方向相反。凝固界面处的温度梯度最大而凝固速率几乎为零。因此凝固开始时形成平面晶, 如图 9(a) 中亮白区。随着液固界面向液相内部的推进和热量的累积, 凝固速率快速增加, 温度梯度降低, 界面失稳, 平面晶向胞状晶转变 (图 9(a)(b))。在熔池顶部凝固速率进一步增加, 温度梯度逐步降低。同时, 由于热流方向与温度梯度的关系, 温度梯度方向也从垂直于界面转变成接近或平行于激光扫描方向。根据 Hunt 提出的柱状晶/等轴晶生长形态转变解析模型^[17], 这时在顶部会出现转向枝晶和等轴晶。这与图 9(c) 中的情况一致。

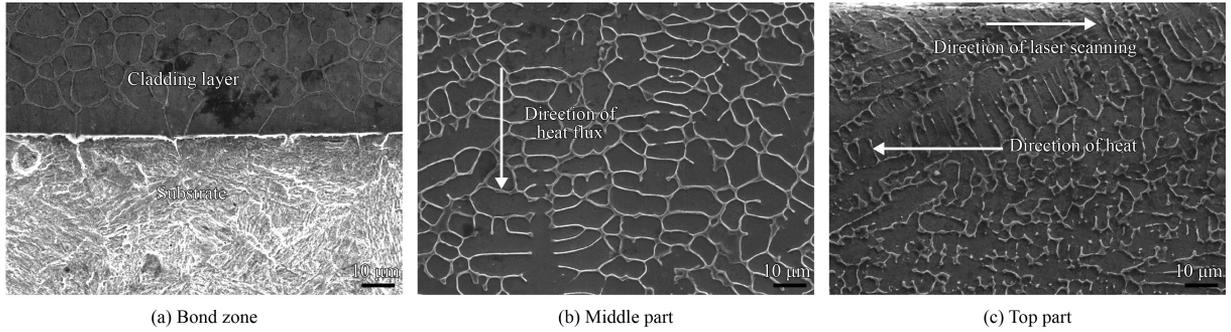


图9 熔覆层各部位的扫描电子显微镜

Fig.9 SEM images of different parts in the cladding layer

在第2道路径中,从起点开始依次选择3个位置,切下试样并依次编号1、2、3(见图8中1、2、3)。用金属显微维氏硬度计测量显微硬度。第一个测试点选择在距熔覆层顶端 ≥ 0.2 mm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2 N,加载时间15 s。图10为所测显微硬度随材料厚度变化的趋势。材料整体硬度在330~350 HV_{0.2}左右,稍高于基体材料。1号试样在0.9~1.0 mm厚度处硬度处于下降趋势,且下降较快。2号、3号样在1.1 mm厚度处硬度开始下降。因为熔覆层材料硬度高于基材,所以硬度开始下降的区域为熔覆层与基体的结合区域。熔覆层顶部到硬度开始下降区域的距离可以近似等于熔覆层厚度。以上趋势说明2、3号样的熔覆层厚度较1号样略大。厚度提高了约10%。这是因为1号样处于熔覆起点,亦是启动激光和送粉的开始点,光粉配合效果较其他位置不理想,粉末进入熔池的量较少,熔覆层厚度较薄,容易生成缺陷,如图8中所标示的每一道起

点位置。这需要在工艺规划过程中采取一些措施解决以上问题。

3 结论

(1) 提出了曲面激光熔覆快速加工路径生成方法,其效率优势体现在以下3个方面。①直接采用点云模型来表征曲面,省去了曲面反求建模环节。②通过平行平面与点云直接求交生成平面点集来近似逼近激光熔覆路径,避免了平面与参数曲面求交的复杂计算过程。③提出了利用最近点来计算插补点曲面法向矢量作为光激光束姿态的近似快速算法,避免了复杂的拟合和偏导计算。

(2) 应用镍基自熔性合金粉对P20材质的模具零件曲面表面进行了试验。经过金相分析表明所形成熔覆层组织均匀、致密,缺陷稀少;熔覆层与基体之间形成冶金结合。熔覆层的显微硬度达到330~350 HV_{0.2}左右。试验结果表明快速路径生成方法符合激光熔覆工艺要求且高效,能够应用在塑料模具再制造中。

参考文献

- [1] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.
XU B S. Remanufacture engineering and its development in China [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 1-6(in Chinese).
- [2] 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.
YANG X C. Laser processing robot and its industrial applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 2780-2798(in Chinese).
- [3] 罗奎林, 郭双全, 何勇, 等. 激光熔覆修复航空发动机风扇机匣 TC4 钛合金静子叶片[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 141-146.

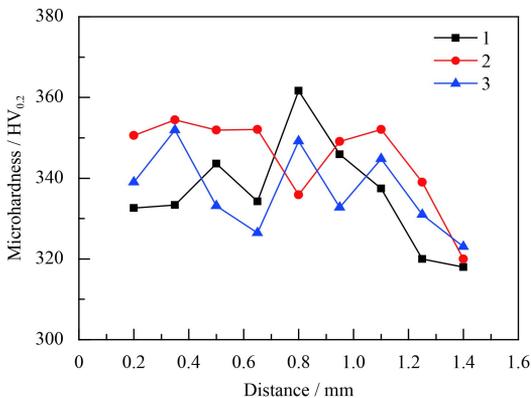


图10 熔覆层显微硬度随厚度的变化趋势

Fig.10 Change trend of microhardness for the cladding layer with thickness

- LUO K L, GUO S Q, HE Y, et al. Repairing TC4 titanium stator blade of aero-engine fan casing by laser cladding[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(6): 141-146 (in Chinese).
- [4] 韩玉勇, 鲁俊杰, 李剑峰, 等. 基于激光熔覆的车床主轴再制造[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(6): 147-153.
HANY Y, LU J J, LI J F, et al. Lathe spindle remanufacturing based on laser cladding technology [J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(6): 147-153 (in Chinese).
- [5] CONG D, ZHOU H, YANG M. The mechanical properties of H13 die steel repaired by a biomimetic laser technique[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 53(53): 1-8.
- [6] 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.
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 (in Chinese).
- [7] 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, 17(2): 0703007.
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, 17(2): 0703007 (in Chinese).
- [8] 方艳, 杨洗陈, 雷剑波. 基于激光再制造机器人的表面浅斑缺陷识别[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1203005.
FANG Y, YANG X, LEI J B. Research on shallow spot defect detection based on laser remanufacturing robot[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1203005 (in Chinese).
- [9] 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路径规划[J]. *焊接学报*, 2015, 36(1): 23-26.
DAI S J, ZHANG Y, WANG Z P, 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).
- [10] TABERNERO I, CALLEJA A, LAMIKIZ A, et al. Optimal parameters for 5-axis laser cladding[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 45-52.
- [11] CALLEJA A, TABERNERO I, FERNÁNDEZ A, et al. Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 56: 113-120.
- [12] 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.
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 (in Chinese).
- [13] 张甲, 石世宏, 王永康, 等. 离焦量对环形光内送粉单道熔覆质量的影响[J]. *苏州大学学报: 工科版*, 2011, 31(1): 39-42.
ZHANG J, SHI S H, WANG Y K, et al. Research about the quality of single-layer laser cladding using coaxial inside-beam powder feeding with defocused quantity[J]. *Journal of Soochow University (Engineering Science Edition)*, 2011, 31(1): 39-42 (in Chinese).
- [14] ZENG Y, GONG J. The trajectory optimization of spray painting robot for conical surface[J]. *Advanced Materials Research*, 2010(139-141): 2189-2194.
- [15] 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): 501-50.
FENG L P, HUANG W D, LI Y M, 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).
- [16] Kurz W. *Fundamentals of solidification*[M]. 3rd revised edition. Switzerland: Transaction of Technology Publications, 1989: 44-47.
- [17] 黄卫东. 激光立体成型[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 78-104.
HUANG W D. *Laser solid forming*[M]. Xi'an: North western Polytechnical University Press, 2007: 78-104 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)