

文章编号: 1674-2869(2016)03-0288-05

等离子熔积复杂金属零件的数字化制造方法

胡帮友¹, 罗圆智^{2*}, 王桂兰³, 蒋 疆⁴

1. 化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学), 湖北 武汉 430205;
2. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205;
3. 华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;
4. 中国航天科工集团第四研究院, 北京 100854

摘要: 针对等离子熔积金属零件工艺特点, 提出适应复杂形状金属零件的综合切片技术, 包括适应单向生长、多向生长和渐变生长结构的等离子熔积制造需求的切片方法; 引入具有全局优化特性的基于Voronoi图方法的轨迹规划技术, 同时考虑自行研制的多轴数字化等离子熔积制造平台性能, 提出了熔积电流和进给量等制造参数实时控制方法, 通过帽形件和中空螺线管制造实验验证了该方法的有效性. 本方法解决了等离子熔积复杂金属零件的支撑工艺问题, 并通过再切片方法消除了熔积制造中的阶梯效应, 提高了制造精度. 为等离子熔积制造复杂形状金属零件提供了较为完整的数字化理论与技术支持.

关键词: 等离子熔积; 切片技术; 轨迹规划; 实时控制

中图分类号: TH164 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.03.017

Digital Method for Plasma Depositing Complex Metal Part

HU Bangyou¹, LUO Yuanzhi^{2*}, WANG Guilan³, JIANG Jiang⁴

1. Hubei Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety(Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China;
2. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of technology, Wuhan 430205, China;
3. School of Materials Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
4. The Fourth Academy of China Aerospace Science & Industry Corp., Beijing 100854, China

Abstract: Aimed at the characteristics of plasma depositing metal part process, we proposed the combination slicing technology for the complex metal part, including single direction growth, multidirectional growth and gradient growth structure slicing method, to meet the requirement of the hybrid plasma deposition process. Then we introduced the path generation technology with global optimization characteristics based on Voronoi diagram method, and proposed the real-time control method of the plasma deposition current and feeding rate parameters, considering the performance of self-developed multiple axes digital hybrid plasma deposition platform. The effectiveness of the proposed method was verified by the cap shape pieces and hollow solenoid manufacturing experiment. This method solves the supporting process problems of hybrid plasma deposition complex metal parts, and eliminates the staircase effect of plasma deposition process by re-slicing, which improves the manufacturing precision. It provides a relatively complete digital theory and technical support for plasma depositing complex metal part.

Keywords: plasma deposition; slicing; path generating; real-time control

收稿日期: 2016-04-12

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20121506); 武汉工程大学科学研究基金(14125051); 国家自然科学基金(50475134)

作者简介: 胡帮友, 博士, 讲师. E-mail: hubangyou@163.com

*通讯作者: 罗圆智, 硕士, 讲师. E-mail: jzyz_wit@126.com

1 引言

等离子熔积金属零件快速制造是基于分层原理的生长型制造技术,可以直接制造用于实际装备直接使役的各种零件或模具^[1-7]. 等离子熔积金属零件属于高能束制造技术,此外还有激光直接成形和电子束成形. 相比之下,成形效率高的等离子高能束的制造成本最低. 等离子高能束将金属材料熔融后在保护气中急冷,零件微观组织大大优于铸造工艺^[5-6],使役性能相对优越,能很好地满足现代产业对零件产品多品种变批量的广泛需求. 最初的等离子熔积金属零件工艺中均使用传统平面均匀切片方法,零件的生长方向为单一的Z方向. 对于等离子熔积制造金属零件工艺来说,这种单一方向的均匀切片技术限制了诸如大角度倾斜臂、悬臂或渐变几何特征等复杂形状零件的制造. 为此本文提出可以适应复杂形状金属零件等离子熔积制造的综合切片方法,引入基于Voronoi图的轨迹规划方法^[8-9],在6轴机器人数字化熔积制造平台上进行样件的制造实现.

2 熔积工艺规划方法

2.1 单向均匀切片

单向均匀切片方法是分层制造中普遍应用的零件切片方法. 该方法的切片法向为单一方向,一般为Z方向(铅垂方向),如图1(a)所示. 切片厚度根据不同工艺可以取0.1 mm到10 mm不等. 该方法在解决如大悬臂的问题时采用加支撑的方法来应对,但对于等离子熔积等工艺无法使用支撑技术时则无法直接制造具有大悬臂特征的零件.

2.2 多向均匀切片

单向均匀切片技术使用的制造平台一般为两轴半数控系统,刚好满足零件单向生长的制造需求. 当零件几何包含大悬臂结构时,一般采用添加支撑的方法,但是这种方法不适应等离子熔积制造金属零件的工艺. 为此提出适应多轴平台的多向均匀切片方法. 将复杂零件沿着不同法向分割成具有支撑关系的子块,每一个子块为一个可以按单向均匀切片完成制造的部分,如图1(b)所示. 实际制造需要多轴数字化制造平台来实现.

2.3 非均匀切片

对于应用于流体环境的复杂零件具有渐变结构特征时,单向或多向均匀切片方法的制造效果不理想. 使用均匀切片方法导致阶梯效应突出. 有研究者试图通过自适应切片技术^[10]来加以解决.

减小切片厚度从几何上可以改善阶梯效应,但由于等离子熔积制造工艺限制,切片厚度不能太小,故达不到理论上的改善效果;当零件本身存在较大倾角时,用单向切片方法熔积制造的金属零件在力学性能上会下降,从而导致不满足金属零件的使役需求. 同时渐变结构也难以用多向均匀切片方法进行处理,因此提出非均匀切片方法. 如图1(c)所示,每一切片的法向为零件几何特征的渐变方向,因此切片随几何特征的变化而变化. 这种方法使零件保持了最优生长方向,因而避开了导致熔积零件阶梯效应的单向切片因素,同时力学性能也保持最优.

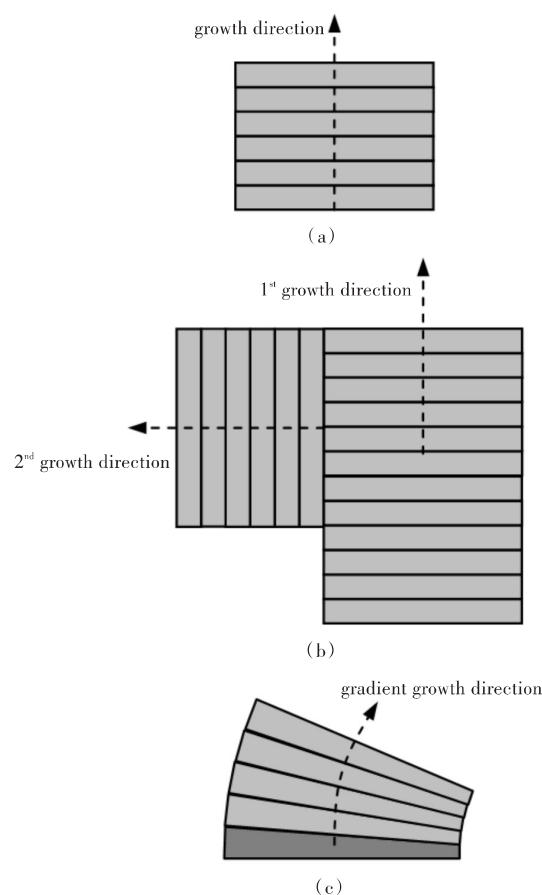


图1 综合切片技术原理

(a) 单向均匀切片; (b) 多向均匀切片; (c) 非均匀切片

Fig. 1 Principle of combination slicing

(a) Single direction slicing; (b) Multidirectional slicing;

(c) Nonuniform slicing

2.3.1 再切片 非均匀切片方法得到的相邻切片的法向一般是不同方向,因而每一切片是不等厚度的,实际制造时还需要再切片. 也就是将切片视为一个新的“零件”,对其进行单向切片,然后直接使用单向等离子熔积方法直接制造. 图2所示的是再切片方法,可以看出前4层已经表现出非均匀切

片特征,只是仍然存在阶梯效应;第5层的不仅在几何尺寸上达到设计要求,一个重要作用是消除阶梯效应。

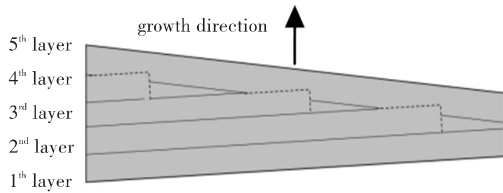


图2 非均匀切片的再切片

Fig. 2 Re-slicing for nonuniform slice

2.3.2 切片方向计算 对于均匀切片工艺来说,用户可以根据制造需求确定切片方向,但对于非均匀切片方法来说,切片方向是连续变化的,因此须由计算机通过计算来确定.这里引入高斯球冠法来计算切片方向,即切片的法向量(见图3).高斯球冠法将光固化立体造型术(STL)所有零件切片的节点所在表面的法向量映射到高斯球面上,得到点集 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$. 确定一个包含该点集的最小球冠,那么这个球冠底面的法向量 v_m 就是切片的法向量。

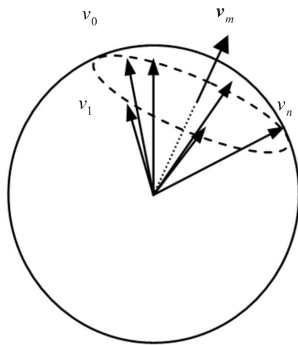


图3 采用高斯球冠法计算切片法向量

Fig. 3 Normal vector calculation via the principle of Gauss Spherical Crown

2.3.3 数值处理 对于STL零件来说,完成切片在数值上就是需要实现分层算法.分层的基本方法就是用一个指定的Z坐标值的XOY平面与STL实体模型中的所有三角面片求交.然后对求得的所有交线按首位连接关系进行排序得到一个或多个轮廓环,从而形成一个切片层.这里有一个需要在数值计算上必须处理的问题是:当一个或多个三角面片恰好在切片平面XOY上时,实数计算会引起几何拓扑错误.处理方法是将这些三角面片的Z坐标增加一个微小的增量的dZ,这样与其相邻的三角面片可以与切片平面XOY计算出相交直

线段,从而构成一个完整切片而避免造成几何拓扑上的问题.增量dZ的值一般在 1×10^{-16} mm 或更小量级,就算应用在微精密机械加工中也不会造成因为计算导致实际制造精度的损失,但对于数值计算结果的正确性则有上述本质影响。

在保证计算的正确性同时,这种处理策略也带来一个负面问题,即微线段.由于数控制造装备的运动单元的实际运动是一个加速度的物理运动,即从线段起点开始加速,达到设定速度后保持匀速运动,即将到达线段终点时开始减速,并在到达终点时速度接近于零以实现平稳停止.当使用微线段去驱动运动单元时,可以想象,由于运动的起点和终点相距很“近”,运动平台刚刚开始从零速度加速,就因为即将到达终点而必须减速(见图4).因此运动单元的宏观速度远远低于制造工艺设定的速度,这对于熔积制造这种带有传质传热的工艺来说,不仅大大降低制造效率,还会导致热输入和材料运输的不均匀性,严重影响零件的成形性,偏离工艺期望.所以必须对于切片中存在的微线段进行剔除,在保证合适的制造精度的前提下,尽可能剔除掉切片环中的点.剔除切片环中的一个点,意味着用一个相对较长的线段来代替原来两个较短的线段,引起的问题是加大了几何误差.通过计算监控这种误差,使之始终保持在等离子熔积制造的允许误差以内,同时尽可能多地剔除切片环中的点.这种方法在实验中明显的改善了制造系统的进给运动。

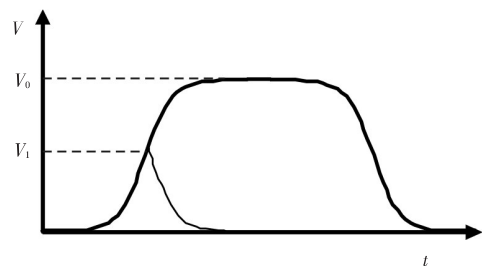


图4 微线段导致实际运动速度 V_1 偏离工艺速度 V_0
Fig. 4 Real velocity V_1 deviated from process velocity V_0 because of micro-line segments

3 实验部分

第一个实例给出了一个帽形零件分割制造的工艺过程.从等离子熔积工艺的角度来说,帽形零件的加工条件比叶轮件要复杂,因此需要引入本文所设计的多向分割制造方案来加以解决.图5中的高温帽形件被分割成5个形状简单易加工,且互相具有支撑关系的子块.根据其子块的相互支撑

关系可给出如表1的熔积工序.表1中0号加工支撑表示工作台基面.表1中的加工方向向量就是该子块支撑面的法向量.可以看出在8号子块的支撑下制造7号子块的情形.自制的5轴数字化制造平台可以实现工作台的任意翻转,这里子块的翻转就是通过复合轨迹间的转台控制指令控制转台来实现.转台控制指令由子块间的变换矩阵计算得到.系统实现已经记录了制造机床的5个运动轴的相对空间位置关系参数,这些参数在此处用来实现待制造子块的定位依据.

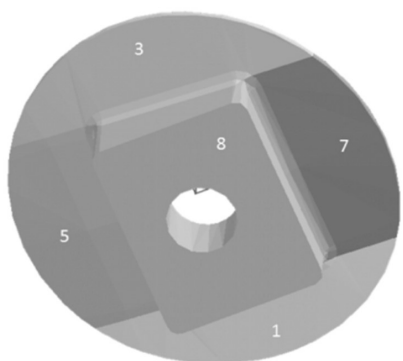


图5 多向分割帽形件各子块

Fig. 5 Subparts of a divided cap-shaped part

表1 多向分割帽形件熔积工序

Tab. 1 Depositing process of divided cap-shaped part

process index	index of subpart	index of supporting	increase vector
1	8	0	(0,0,1)
2	7	8	(1,0,0)
3	5	8	(-1,0,0)
4	3	8+7+5	(0,1,0)
5	1	8+7+5	(0,-1,0)

对于每一个子块,用单向切片方法进行切片,切片厚度为4 mm,由基于 Voronoi 图的轨迹算法可以得到其每一切片的加工轨迹,图6是计算得到的帽形件的熔积轨迹和轮廓铣削轨迹.图7是等离子熔积复合制造的帽形件实物.

非均匀切片的生长方向一般是连续变化的,要求制造系统能够连续改变工位的轴矢量,对于单个切片的制造则保持轴矢量不变.以渐变中空螺旋管为例,设直径 D 和壁厚 T 分别为渐变参数,则 D 和 T 的控制方程分别为:

$$D = D_b \times \left(1 - \frac{\alpha}{\theta}\right) + D_d \times \frac{\alpha}{\theta} \quad (1)$$

$$T = T_b \times \left(1 - \frac{\alpha}{\theta}\right) + T_d \times \frac{\alpha}{\theta} \quad (2)$$

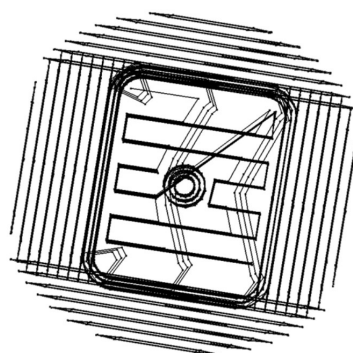


图6 帽形件的复合制造轨迹

Fig. 6 Combination path of cap-shaped part

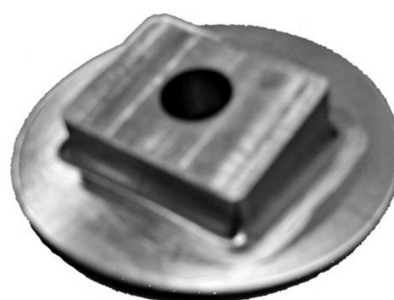


图7 帽形件制造样件

Fig. 7 Sample piece of cap-shaped part

式(1)~(2)中: α 是管轴线转动角,为区间 $[0, \theta]$ 上的任意值; θ 是总转动角,下标 b 和 d 分别表示底部和顶部.在本例中, θ 的值为 360° , D_b 为 80 mm, D_d 为 30 mm, T_b 为 15 mm, T_d 取 4 mm. 将管轴线等距分割,在分割点处进行切片,管轴线在该点处的切向量为切片方向.非均匀切片结果如图8(a)所示;按图1(c)的方法再切片并计算轨迹(见图9).本例中空螺旋管的壁厚是逐渐变小的,因此制造系统的给料速度和熔积电流也要随切片的实时变化按比例降低,制造实例表明,若要维持熔池不流淌,从第一切片熔积到最后一个切片,要控制熔积电流从 150 A 近似线性减小到 30 A.图8(b)是制造得到的中空螺旋管,其表面形貌接近铸造的近形制造水平.整个零件的熔积制造时间约为 30 h,相比使用模具制造的方法有非常显著的改善.对于等离子熔积制造金属零件工艺而言,被等离子束熔融的金属材料在前一个切片层上形成局部熔池.试验表明局部熔池会将前一层部分重融,这样可以部分平滑上一个切片可能存在的台阶,使熔积形貌得到改善,在一定程度上降低了对切片的要求,进一步提高了熔积制造的效率.

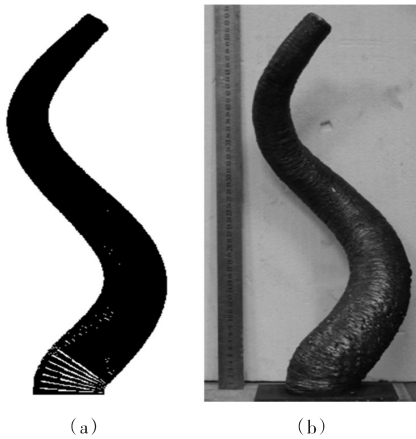


图8 螺线管非均匀切片和制造样件
(a)非均匀切片; (b)熔积制造样件

Fig. 8 Nonuniform slice of spiral tube and its sample manufacture

(a)Nonuniform slices ; (b) Sample manufacture

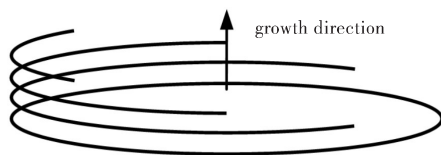


图9 再切片熔积轨迹

Fig. 9 Depositing path of one nonuniform slice.

4 结 语

以上研究了等离子熔积复杂形状金属零件的数字化制造方法,提出综合切片方法并引入Voronoi图方法实现零件的分层切片和轨迹规划等制造前处理工艺。

1)在多向均匀切片方法中利用子快间的天然支撑作用解决了熔积工艺支撑问题,在非均匀切片方法通过再切片方法解决熔积制造的阶梯效应,降低制造难度,提高了制造精度。

2)通过帽形件和中空螺线管的样件制造验证了上述方法的有效性.通过实时参数控制,实现了中空螺线管直径和管壁厚度的渐变控制,为等离子熔积制造复杂形状金属零件提供了较为完整的数字化理论与技术支持。

参考文献:

[1] ZHANG H O, XU J P, WANG G L. Fundamental study

on plasma deposition manufacturing [J]. Surface and coatings technology, 2003, 171(1-3):112-118.

[2] 张海鸥,吴红军,王桂兰,等.离子熔积直接成形高温合金件组织结构研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2005, 33(1): 54-56.

ZHANG H O, WU H J, WANG G L. Microstructure of directly formed super alloy by plasma fused-deposition [J]. Journal of Huazhong university of science and technology(nature science edition), 2005, 33(1): 54-56.

[3] ZHANG H O, HU S D, WANG G L. Simulation of powder transport in plasma jet via hybrid Lattice Boltzmann method and probabilistic algorithm [J]. Surface and coatings technology, 2006, 201(3-4):886-894.

[4] QIAN Y P, ZHANG H O. Direct rapid high-temperature alloy prototyping by hybrid plasma-laser technology [J]. Journal of materials processing technology, 2008, 208(1): 99-104.

[5] XIONG X H, ZHANG H O. Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling [J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(1): 124-130.

[6] ZHANG H O, HU B Y, WANG G L. A rapid forming method and simulation on controllable-porosity coating [J]. Science in China, series E: technological sciences, 2007, 50(6):786-796.

[7] MENG F, ZHANG H O, WANG G L, et al. Heat and mass transfer finite element simulation of clay ceramic prototype in high-temperature drying [J]. Applied mechanics and materials,2011, 128-129: 1147-1150.

[8] HELD M. Voronoi diagrams and offset curves of curvilinear polygons [J]. Computer aided design, 1998, 30(4):287-300.

[9] M HELD. VRONI: An engineering approach to the reliable and efficient computation of Voronoi diagrams of points and ling segment [J]. Computational geometry, 2001, 18(2): 95-123.

[10] 杨睿,郭东明,徐道明.理想材料零件数字化制造中的自适应切片算法研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9): 770-772.

YANG R, GUO D M, XU D M, et al. An adaptive slicing algorithm for digital manufacturing of ideal functional material components [J]. China mechanical engineering, 2003, 14(9): 770-772.

本文编辑:陈小平