DOI: 10.3901/JME.2013.07.171

金属激光沉积成形分组平行扫描路径生成方法*

卞宏友¹ 杨光¹ 李英² 钦兰云¹ 王维¹ 尚纯¹

(1. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室 沈阳 110136;

2. 中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限公司技术中心 沈阳 110043)

摘要: 结合金属零件激光沉积成形工艺和现有平行扫描路径生成方法,分析局部过熔覆和欠熔覆问题的根本成因,提出一种基于轮廓极值点识别判断的金属零件激光沉积成形优化分组平行扫描路径生成方法。基于分层轮廓的外偏置轮廓采用极值点处增线式扫描的方法生成扫描填充线,避免因扫描间距误差引起成形层面轮廓局部边界缺损,保证成形零件具有一定的加工余量。提出基于极值点与过渡扫描线位置关系判断优化分组连接填充矢量的方法来生成分组扫描路径,避免扫描填充线不当连接引起的过熔覆。试验表明:这种扫描路径可有效提高成形层面平整度和工件质量,保障成形加工的顺利进行。

关键词: 金属激光沉积成形 分组平行扫描 轮廓极值点 扫描间距误差 过渡扫描线

中图分类号: TP391

Grouping Parallel Scan Path Generating Method of Metal Laser Deposition Shaping

BIAN Hongyou¹ YANG Guang¹ LI Ying² QIN Lanyun¹ WANG Wei¹ SHANG Chun¹

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136;

2. Technique Center, Shenyang Liming Aviation Engine (Group) Co., Ltd, Shenyang 110043)

Abstract: The essential reason of over-cladding and under-cladding problem are indicated through analyzing both those existing parallel scan mode and the characteristic of metal laser deposition shape. A new kind of grouping parallel scan path generating method is presented based on recognizing and judging extreme point profiled contour. The method of increasing scan line based on recognizing extreme points of offset profiled contour is adopted when scan filling lines are generated according to the set scan space, avoid boundary defects of shaping layer because of scan space error, and ensure shaping part which has a consistent machining allowance. Grouping parallel scan path is generated through optimizing to group and connect filling lines based on judging the dubiety of between the related extreme point and transition line, avoid improper transition line. Practical application shows that the scan path can effectively enhance both t shaping layer smoothness and fabrication quality, ensure to shape successfully.

Key words: Metal laser deposition shaping Grouping parallel scan Extreme point Scan space error Transition line

0 前言

基于材料叠加思想的快速成形技术应用越来越广泛,尤其是金属零件的激光快速成形技术由于可直接制造出致密金属零件,被认为是最有发展前途的方法之一,已成为目前国内外研究的热点。目前金属零件的激光快速成形技术主要可分为激光直

接制造(Direct laser fabrication, DLF)技术和激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)技术两大类^[1-3]。

激光选区熔化技术的主要特征为金属材料通过预铺粉形式进入熔化区,并采用较小功率激光器作为加热源,功率一般只有几百瓦级。该技术能实现零件的高精度净成形,最佳加工精度可以达到 ± 0.01 mm;非常适合制造形状复杂、尺寸较小的精密零件,特别是具有中空结构的零件^[1-3]。

激光直接制造技术的主要特征为采用送粉器或送丝机同步输送金属原料,并采用高功率激光器

* 辽宁省自然科学基金(201202173)、中航工业产学研创新工程(CXY2011SH16)和辽宁省教育厅科学技术研究(L2011026)资助项目。
20121012 收到初稿,20130301 收到修改稿

作为加热源,功率一般达到几千瓦级;可实现完全致密、高性能、大型复杂金属零件的“近成形”快速制造。由于激光功率大,光斑直径大,单层堆积厚度和单道堆积宽度多达几毫米(例如美国AeroMet公司开发的Lasform系统单层堆积厚度达4 mm,单道堆积宽度达13 mm),成形效率高,更加适合大型结构件的快速研制要求;但激光直接制造大型结构件时,加工精度一般在 ± 2 mm,因此工件在完成制造后,还需要进行后续机械加工工序才能满足大型结构件最终的使用要求。美国Sandia实验室的LENS技术、美国AeroMet公司的Lasform技术、西北工业大学的激光立体成形技术以及北京航空航天大学激光熔化沉积技术等按其技术特征都可归类于此类激光直接制造技术,已利用该技术制造了飞机钛合金结构件并实现了装机应用,与大型钛合金结构件传统的制造技术(锻造+机加、锻造+焊接)相比,该技术具有材料利用率高、成本低、周期短、柔性高以及不需要大型模锻设备等优点,在航空、航天等国防装备研制和生产中具有广阔的应用前景^[3-7]。

本文作者开展的金属零件激光沉积成形工艺按其技术特征归类于激光直接制造技术。激光沉积成形过程是一个由点到线、由线到面、由二维到三维的逐道逐层累积过程。在沉积成形过程中,激光及同轴送粉头组件要按照扫描路径熔覆成形零件的每一个层面,从而做大量的扫描运动,显然,合理地生成零件每一层的扫描路径对于提高激光沉积成形工艺的效率和质量至关重要^[8-9]。

基于同一材料叠加原理,目前金属材料激光沉积成形扫描路径主要是借鉴采用非金属材料快速原型扫描路径的生成方法。快速原型扫描路径主要可采用环形扫描和平行扫描,由于环形扫描路径生成十分复杂,实际应用中多采用平行扫描路径,即先将分层轮廓向内偏置半个扫描线宽进行轮廓扫描保证边缘整齐,然后对成形层内部采用设定扫描间距生成平行路径实现填充扫描。文献[10-12]提出了可避开孔洞和凹槽提高成形效率的平行扫描路径生成算法(图1a)。

激光沉积成形系统的特点是实际扫描时扫描头沿扫描线经过之处都会均匀送粉熔覆,采用现有平行扫描路径进行扫描成形时,在轮廓内外环极值点处常常出现局部凸起的过熔覆现象或局部沟壑的欠熔覆现象(图1b);这严重影响边界成形精度和成形层的平整度,直接影响后续成形加工的顺利进行。因此,分析产生过熔覆和欠熔覆现象的根本原因,提出金属激光沉积成形扫描路径规划方法,避免过熔覆和欠熔覆发生,提高成形件质量。

图1 现有扫描中的过熔覆和欠熔覆现象

1 过熔覆和欠熔覆问题成因

1.1 轮廓极值点处的扫描间距误差与过熔覆或欠熔覆

在文献[10-12]提出的算法生成的平行扫描路径中,内部平行填充扫描线的获取方法:在 y 值最小的极小值点和最大的极大值点之间按照设定的扫描间距布置扫描线和截面轮廓多边形求交,将每条扫描线上的交点排序并组合成填充线。因此,在极值点处轮廓扫描线与填充扫描线间的实际扫描间距计算如下,以外环极大值点为例来说明(图2a):在此将待考察极值点和 y 值最小的极小值点之间 y 方向上的距离称为待扫描距离,将待扫描距离与设定的扫描间距 d 的比值取整即可得到该待扫描区域的扫描线数 m

$$d_{\max} = y_{\max 1} - (y_{\min} + dm) \quad (1)$$

$$\Delta d_{\max} = |d_{\max} - d| \quad (2)$$

式中, $y_{\max 1}$, $y_{\min}$ 为当前极值点和最小值点的 y 坐标值, $d_{\max}$ 为当前极值点与扫描区域内最后一条扫描线之间的实际扫描距离, $\Delta d_{\max}$ 为扫描间距误差,分析可知扫描间距误差最大可达接近一个扫描间距。

由上可知,只要当前考察的极值点和 y 值最小的极小值点之间的待扫描距离与设定的扫描间距的比值不是整数,在极值点处就会出现扫描间距误差。

实际采用轮廓扫描加内部填充扫描时,当轮廓扫描线与内部填充平行扫描线的实际扫描间距比确定的扫描间距偏小时,会导致相邻扫描线重叠面积过大造成局部凸起的过熔覆现象,反之,则产生欠熔覆现象;而且扫描间距误差越大则过熔覆或欠熔覆现象越明显。从上述分析可知,现有的轮廓扫描加内部填充扫描的扫描路径,这种扫描间距误差带来的过熔覆和欠熔覆现象不可避免会出现;而由于金属激光沉积的扫描间距可多达几毫米,且扫描间距误差最大可达接近一个扫描间距,由此带来的过熔覆或欠熔覆十分明显,严重影响边界成形精度和成形层的平整度,直接影响后续成形加工的顺利进行。

1.2 过渡扫描线与过熔覆

内部扫描线需要进行分组, 同一扫描线组内的填充矢量按照所处位置的不同进行分组, 同一填充矢量组内相邻填充矢量之间采用过渡扫描线来连接, 以此来形成若干个可连续扫描的扫描矢量组。

如图 2 所示, 目前分组方法可分为两种。

(1) 分组扫描 1: 如图 2a 所示, 当激光扫至边界即回折反向填充同一区域, 由此将扫描线分组^[10]。

(2) 分组扫描 2: 如图 2b 所示, 根据扫描线上填充线段的段数变化与否来分组^[11-12]。

图 2 现有分组扫描路径示例

如图 2a 和图 2b 所示, 在极值点区域处, 相邻填充扫描线之间的过渡扫描线常常出现跨越极值点及其所在边的现象而导致过熔覆而影响成形层的平整度, 这属于不当的填充矢量过渡连接, 其根本成因是过渡扫描线跨越了极值点及其所在边, 在扫描路径生成中应避免出现此类情况。而按照分组扫描 1 和分组扫描 2 的分组原则, 这种不当过渡连接不可避免会出现。

针对上述分析的轮廓扫描加内部平行填充的扫描方式中存在的轮廓极值点处扫描间距误差以及不当填充矢量连接而导致过熔覆或欠熔覆问题的根本成因; 文献[13-14]提出了采用适应性扫描间距的分区和自适应扫描路径生成方法, 可减小过熔覆或欠熔覆程度。

为从根本上消除因扫描路径规划而导致的成形过程中出现的过熔覆或欠熔覆问题, 结合激光沉积成形零件属于近成形需要保留一定机械加工余量的实际需求, 本文提出舍弃轮廓扫描, 完全采用内部平行填充扫描方式来规划扫描路径; 并提出基于

极值点识别判断的优化分组平行扫描路径生成方法, 其基本思想为首先基于分层轮廓的外偏置轮廓采用极值点处增线式扫描的方法生成扫描填充线, 避免因扫描间距误差引起成形层面轮廓局部边界缺损, 保证成形零件具有一定的加工余量; 然后提出基于极值点与过渡扫描线位置关系判断优化分组连接填充矢量的方法来生成分组扫描路径, 避免扫描填充线的不当连接。

2 分组平行扫描路径生成方法

基于极值点识别判断的优化分组平行扫描路径生成方法的具体实现过程如下。

(1) 分层轮廓向外偏置形成求交轮廓。因为激光沉积成形零件处于近成形状态, 需要后续机械加工才能达到尺寸精度要求, 成形零件应该留有一定的后续加工余量。而由前述分析可知, 内部填充扫描线与轮廓之间在极值点附近不可避免存在扫描间距误差。当舍弃轮廓扫描, 单纯采用内部平行填充扫描方式来规划扫描路径, 平行填充扫描线与分层轮廓的扫描间距误差依然不可避免。当扫描间距误差小于半个扫描线宽时, 扫描成形层轮廓大于分层轮廓, 此时成形工件局部有加工余量; 但当扫描间距误差大于半个扫描线宽时, 扫描成形层轮廓小于分层轮廓, 造成工件局部边界缺损, 此时出现工件局部无加工余量缺陷, 并且扫描间距误差越大, 局部缺损越严重。

为保证成形零件具有一定的加工余量, 本文提出将分层轮廓采用等距偏置方法向零件本体外偏置一定距离来生成偏置轮廓。由于最大扫描间距误差最大为接近一个扫描间距, 且因相邻扫描存在一定搭接, 扫描线宽大于扫描间距, 故除去半个扫描线宽的量值外, 偏置距离一般取大于扫描间距的一半即可保证成形轮廓有加工余量; 也可结合实际后续加工余量需要来设定。

该偏置轮廓作为与内部平行填充扫描线求交点的求交轮廓。

(2) 独立轮廓组划分。在分层偏置轮廓中, 找到每个外轮廓和其所属内环形成一个独立轮廓组。由于独立轮廓组的内外环之间构成一个待填充的连通子区域, 扫描路径规划就是以此作为基本单位来进行的。

(3) 搜索独立轮廓组的极值点。假设扫描线方向为水平方向, 在独立轮廓组中的内外环多边形上找到所有极值点, 按各点 y 值由小到大的顺序, 存

入极值点数组中；极值点可分为平凡极值点和非平凡极值点，非平凡极值点总是成对出现，构成了一条水平边。

(4) 极值点处增线式扫描线布置。增线式的扫描线数量计算：取 y 值最小的极小值点和最大的极大值点，过这两点水平线间的轮廓内区域为待扫描区域，进而可得到两点之间 y 方向待扫描距离，此时按照平行于 x 坐标轴方向扫描的扫描间距来设定，将待扫描距离与优化确定的扫描间距的比值向上取整得到扫描线数 n ，即可实现在极值点处增加一条扫描线，并结合下面所述扫描线设置，保证待扫描区域的全覆盖扫描，避免因扫描间距误差引起成形层面轮廓局部边界缺损而造成工件无加工余量缺陷。

扫描线布置：由于扫描线宽的存在，且因扫描线宽大于扫描间距，在 y 值最小的极值点加半个扫描间距的位置布置第一条水平扫描线，根据设定平行于 x 坐标轴方向扫描的扫描间距，沿 y 轴方向依次递增一个扫描间距布置扫描线。

为避免扫描线与极值点重合现象，结合轮廓顶点坐标值精度可取 0.01 即可满足扫描精度要求的实际情况，采用 y 值向上微摄动法来确定扫描线的 y 坐标值，即 $y_m = y_{\min} + md + 0.5d + 0.01 (m=0, 1, \dots, n)$ 。

(5) 扫描线与轮廓求交。扫描线与轮廓求交：除末条扫描线外，求出每条扫描线与轮廓线的交点，存储在相应的扫描线链表中；将每条扫描线的交点按照 x 坐标从小到大进行排序。

末条扫描线求交处理：因为扫描线数是采用向上取整的原则，为避免末条扫描线与轮廓没有交点的情况，如果末条扫描线的 y 坐标值(y_n)大于 $y_{\max}$ 时，采用 y 值向下微摄动法(即 $y_{n1} = y_{\max} - 0.01$)作为末条扫描线的名义求交扫描线的 y 坐标值，与轮廓计算出交点；但当轮廓组极大值点仅仅为一个平凡极值点时，对应的填充线段距离太小，实际扫描无意义，此时依据扫描线宽总比扫描间距大的规律，取 $y_{n1} = y_{\max} - 0.5d$ ，与轮廓计算出交点。

交点的过滤：取每条扫描线的相邻的两个交点的 x 坐标，判断两点坐标差值，如差值小于设定光斑直径时，对应的填充线段或是两条填充线段起终点距离太小，实际扫描无意义，直接删除这两点。

(6) 扫描线分组。填充矢量的生成：取每条扫描线上相邻的两个交点的 x 坐标，与该扫描线的 y 坐标合成填充矢量，构成了扫描线上的一条填充线段。将第偶数条扫描线上的填充矢量的起点和终点

位置互换，倒置矢量的方向。

扫描线分组：为避免分组扫描 1(图 2a)的不适当的填充矢量连接。采用分组扫描 2 的扫描线分组原则，即根据扫描线上填充线段的段数变化与否来将扫描线分组。

(7) 填充矢量优化分组。基于位置判断的填充矢量初次分组：采用分组扫描 2 的填充矢量分组规则，对同一组扫描线，根据填充矢量在所属扫描线上所处位置的不同，将扫描线组内所有填充矢量进行初次分组。此时如将各分组内的填充矢量顺次连接生成的扫描路径实例如图 3 所示。

图 3 分组扫描 2 的扫描路径示例

基于极值点与过渡扫描线位置关系判断的填充矢量优化分组：对初次划分的任一填充矢量组，为避免分组扫描 2(图 3)的不当的填充矢量连接，本文提出基于极值点与过渡扫描线位置关系判断的填充矢量优化分组方法。即先搜索判断填充矢量组内扫描区域内是否存在极值点，找到极值点及其上下相邻的两条填充矢量，相邻的两条填充矢量之间构成过渡扫描线；然后判断极值点在过渡扫描线的左右位置关系，根据实体内部总在轮廓线的左侧的特点，换言之，则是扫描线扫描成形零件内部实体，轮廓极值点应在扫描线的右侧；如极值点在过渡扫描线左侧，则两填充矢量不可连，即该填充矢量分组以此极值点为界，极值点之上或之下的填充矢量再各自划分为一组。

对任一填充矢量组，将组内的填充矢量顺次进行连接，形成连续扫描，不同组间进行空跳。

(8) 扫描路径文件输出。输出 CLI 和 G 代码格式的扫描路径文件，所有相关的扫描速度、送粉速度、激光功率等工艺参数同时输出。

3 扫描试验与分析

上述的优化分组平行扫描路径生成方法已在 VC6.0 中编程实现，图 4 所示是扫描路径生成实例，并在激光沉积成形系统中进行了试验应用，扫描轨迹照片如图 5 所示。

图4 优化分组平行扫描路径实例

图5 优化分组平行扫描轨迹

4 结论

(1) 提出的基于内部平行填充扫描的扫描路径规划, 避免了现有扫描方式中轮廓扫描加内部平行填充扫描不可避免出现的轮廓极值点处的过熔覆或欠熔覆现象; 并提出基于外偏置轮廓的极值点处增线式平行扫描路径生成算法, 避免了因扫描间距误差引起成形层面轮廓局部边界缺损而造成工件无加工余量缺陷, 保证成形零件具有一致稳定的加工余量。

(2) 提出的基于极值点与过渡扫描线位置关系判断的填充矢量优化分组连接方法, 避免了因扫描填充线的不当连接而产生的层面局部过熔覆现象。

采用本文提出的优化分组平行扫描路径生成方法来规划金属零件激光沉积成形扫描路径, 可有效提高成形层面的平整度, 保障成形加工的顺利进行, 并可提高成形质量。

参 考 文 献

- [1] 左铁钊, 陈虹, 张冬云, 等. 激光制造技术在航空领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2008(21): 32-34.
ZUO Tiechuan, CHEN Hong, ZHANG Dongyun, et al. Application of laser manufacturing technology in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(21): 32-34.
- [2] 陈光霞, 曾晓燕. DLF 与 SLM 激光快速成型方法的比较研究[J]. 现代制造工程, 2010(5): 72-75.
CHEN Guangxia, ZENG Xiaoyan. Comparative research on direct laser fabrication and selective laser melting[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(5): 72-75.
- [3] 陈济轮. 激光快速制造技术在我国航天制造领域的应

用展望[J]. 航天制造技术, 2010(6): 1-3.

- CHEN Jilun. Application prospect of laser rapid fabrication technology in aerospace manufacturing field of our country [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010(6): 1-3.
- [4] GRIFFITH M L, SCHLIENGER M E, HARWELL L D, et al. Understanding thermal behavior in the LENS process[J]. Materials and Design, 1999, 20: 107-113.
- [5] ARCELLA F G, FROES F H. Producing titanium aerospace components using laser forming[J]. Journal of Metals, 2000, 52(5): 28-30.
- [6] 杨健, 黄卫东, 骆兴正, 等. 激光快速成形飞机金属零件[J]. 飞机工程, 2004(4): 55-59.
YANG Jian, HUANG Weidong, LUO Xingzheng, et al. Laser rapid forming airplane metal part[J]. Aircraft Engineering, 2004(4): 55-59.
- [7] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.
WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3204-3209.
- [8] 杨光. 钛基功能梯度材料激光快速成形技术研究[D]. 沈阳: 沈阳自动化研究所, 2010.
YANG Guang. Fabrication of Ti matrix FGM using laser metal deposition technique[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, 2010.
- [9] 龙日升, 刘伟军, 卞宏友, 等. 扫描方式对激光金属沉积成形过程热应力的影响[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 74-81.
LONG Risheng, LIU Weijun, BIAN Hongyou, et al. Effects of scanning methods on thermal stress during laser metal deposition shaping[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 74-81.
- [10] 赵毅, 李占利, 卢秉恒. 激光快速成形中激光扫描路径的快速生成算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1998, 10(3): 260-265.
ZHAO Yi, LI Zhanli, LU Bingheng. A fast laser scanning path generating algorithm in rapid prototyping machines[J]. CAD & CG, 1998, 10(3): 260-265.
- [11] 史玉升, 钟庆, 陈学彬, 等. 选择性激光烧结新型扫描方式的研究及实现[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 35-39.
SHI Yusheng, ZHONG Qing, CHEN Xuebin, et al. Research and implement of a new kind of scanning mode

- for selective laser sintering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2): 35-39.
- [12] 程艳阶, 史玉升, 蔡道生, 等. 选择性激光烧结复合扫描路径的规划与实现[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(9): 1072-1075.
- CHENG Yanjie, SHI Yusheng, CAI Daosheng, et al. Programming and realization of a compound scanpath in selective laser sintering[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(9): 1072-1075.
- [13] 卞宏友, 刘伟军, 王天然, 等. 激光金属沉积成形的扫描方式[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 170-175.
- BIAN Hongyou, LIU Weijun, WANG Tianran, et al. Scanning mode for laser metal deposition shapling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10): 170-175.
- [14] 卞宏友, 刘伟军, 王天然. 快速成形自适应扫描路径的研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增 1): 486-488.
- BIAN Hongyou, LIU Weijun, WANG Tianran. Research and implement of scanning path with adaptive scan space in rapid prototyping manufacture[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Suppl. 1): 486-488.

作者简介: 卞宏友, 男, 1975 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为金属零件激光快速制造技术和复杂曲面数控加工技术。
E-mail: bianhongyou@sau.edu.cn