

金属粉末激光成形扫描方式*

尚晓峰 刘伟军 王天然

(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

王志坚

(沈阳航空工业学院机械学院 沈阳 110034)

摘要: 将扫描线断面轮廓形状近似看作一段圆弧、以相邻扫描线重叠面积与凹沟面积相等为原则确定扫描线间距。对分区扫描和环形扫描两种扫描方式进行分析 and 比较, 环形扫描方式明显减少激光光闸开关次数、系统稳定性和零件成形精度提高, 但是相邻扫描线间浸润性差、沟壑较深, 而分区扫描方式扫描间距稳定单一、浸润性好、沟壑较浅, 但是激光光闸开关频繁、空跳次数较多。改进扫描方式, 将变向分区扫描方式与环形扫描方式相结合加工出无缺陷、全密度金属功能零件。

关键词: 快速成形 金属粉末激光成形 扫描方式 金属功能零件

中图分类号: TB115 TH15 TP13

0 前言

金属粉末激光成形(Metal powder laser shaping, MPLS)工艺由中国科学院沈阳自动化研究所快速成形实验室提出, 该工艺将传统快速成形技术和激光熔覆技术相结合, 研究具有任意复杂形状或复杂材料组分金属材料零件/模具快速制造技术。

该技术既保持快速成形技术诸多优点, 更具有传统快速成形技术所无法比拟的特点: 可直接制造形状结构复杂金属功能零件; 可加工金属或合金材料范围广泛并能实现异质材料零件制造; 金属或合金材料冶金过程和材料成形过程相统一; 可方便地加工一些熔点高、难加工的材料。

在 MPLS 工艺中, 金属功能零件是在工作台做大量扫描运动基础上, 金属粉末在激光熔覆作用下, 由点到线、由线到面、由二维到三维逐层累积过程中成形的, 因此扫描方式规划是一项关键技术, 合理选择扫描方式可提高金属功能零件精度和强度、提高成形效率、便于程序实现。

1 现有扫描方式

快速原型(RP)制造技术自 20 世纪 80 年代发展至今, 已经形成多种工艺形式。各种工艺尽管成型材料各不相同、成形设备系统千差万别, 可是绝大

多数工艺形式都要涉及到扫描方式规划问题, 因此扫描方式规划一直是人们研究的热点^[1]。

按照扫描目的分类, RP 扫描目的可分为去除扫描和填充扫描。去除扫描以 LOM 工艺为典型代表, 其目的是将成形截面内不需要部分切碎以利于去除, 一般采用十字网格扫描方式; 填充扫描目的是为截面轮廓内部成形, 包括 SLA、FDM、SLS 以及这里所提出的 MPLS 等工艺, 其扫描方式主要有光栅扫描、分区扫描和环形扫描^[2]。

光栅扫描方式如图 1a 所示, 图 1 中实线为激光扫描路径, 虚线为空跳路径, 箭头代表运动路径方向。光栅扫描路径为一系列平行线段组, 这是最简单易行的扫描方式。但是由于扫描路径频繁穿越孔洞、激光光闸频繁开关, 因此该方式对加工效率和加工精度均有较大影响。目前许多 RP 工艺都不采用光栅扫描方式, 而是采用分区扫描方式, 如图 1b 所示。该方式对层面分区域依次进行扫描, 扫描线避开孔洞和凹槽区域, 空跳路径明显减少, 从而大幅度提高加工效率、改善加工精度、保证较高的固化率, 但软件编制相对复杂。环形扫描是近年来发展起来的新的扫描方式, 如图 1c 所示, 扫描路径是一条完

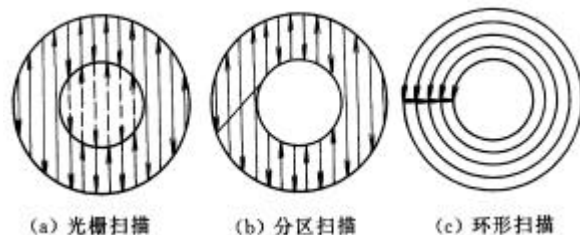


图 1 扫描方式示意图

* 国家 863 高科技资助项目(2002AA420060)。20040706 收到初稿, 20041125 收到修改稿

整封闭线,这样就使得成形零件表面比较光滑、各向同性、具有较好的力学性能。另外环形扫描方式遵循成形时热传递变化规律,削弱零件在温度降低过程中产生的内部残余应力,从而提高成形件的物理性能。但是环形扫描软件编制十分复杂,特别是对于孔洞和凹槽区域较多的零件,有时甚至无法实现^[3,4]。

2 扫描线间距的确定

2.1 重叠系数

在 MPLS 工艺中,激光作平面扫描时,不论采用哪种扫描方式,确定合理的扫描线间距都至关重要。扫描线间距过大致使两条相邻烧结线没有连接或者粘接不牢,线与线之间不能连成平滑稳定的扫描平面;扫描线间距过窄导致成形效率降低并会引起严重的表面不平度。衡量扫描线间距一般采用重叠系数 Y ,即重叠部分宽度 b_w 占扫描线宽度 b 的百分比,如式(1)所示

$$Y = \frac{b_w}{b} \times 100\% \quad (1)$$

2.2 扫描线断面形状

扫描线断面形状是通过理论分析确定重叠系数 Y 的重要依据,衡量断面形状的参数包括断面宽度 b 、断面高度 h 和断面边界曲线方程。影响扫描线断面形状的因素很多,主要包括激光焦点直径、激光功率、粉末送给量、扫描速度以及粉末材料与基材的熔合性能等。优良的扫描线断面形状取决于合理的工艺参数,其边界应该是一条均匀光滑无毛刺曲线。扫描线是金属粉末在激光作用下经历熔融——凝固后成形的,由于液体表面张力促使液体表面积趋于最小,如果将扫描线看作柱体,则扫描线的表面在熔融金属表面张力作用下凝固后应该是圆柱的一部分。图 2 是一张扫描线断面形状照片,忽略液态金属固化应力、重力等因素造成的形变影响,其边界可近似看作圆的一段弧。圆半径 R 可由式(2)获得

$$R = \frac{b^2/4 + h^2}{2h} \quad (2)$$

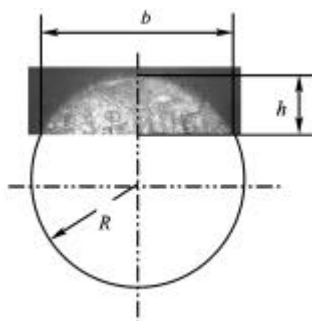


图 2 扫描线断面形状

2.3 扫描线间距的确定办法

图 3 是两条相邻扫描线断面形状及其间距示意图。两个相邻断面边界分别以圆 C_1 和圆 C_2 表示,面积 A_1 代表扫描线断面间的凹沟,面积 A_2 代表扫描线断面重叠部分,扫描线间距 L 则是 MPLS 工艺的重要参数之一。由图 3 可见,当面积 A_1 、 A_2 相等时,重叠部分面积 A_2 正好填补到凹沟面积 A_1 上,此时烧结表面平整光滑,扫描线间距正好合适。

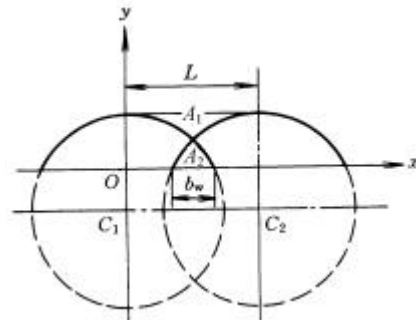


图 3 扫描线间距示意图

计算面积 A_1 、 A_2 采用辛卜生公式,如式(3)所示,式中 $f(x)$ 是圆方程, n 为区间内等分小区间数且为偶数。调整扫描线间距 L 值,直至使 $A_1 = A_2$,此时 L 值即是扫描线间距。此时,重叠系数 Y 计算公式可改写成式(4)的形式

$$A = \int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{3n} [(y_0 + y_n) + 2(y_2 + y_4 + L + y_{n-2}) + 4(y_1 + y_3 + L + y_{n-1})] \quad (3)$$

$$Y = \frac{b-L}{b} \times 100\% \quad (4)$$

在 MPLS 工艺中,取激光功率 650 W、激光焦点直径 3 mm、扫描速度 4 mm/s、送粉量 5 g/min 时,测得扫描线断面宽度为 2.5 mm、断面高度为 0.2 mm。依式(3)可得,当扫描间距为 1.55 mm 时, $A_1 = A_2$ 。此时 Y 为 38%。

根据成形参数确定合理扫描线间距和分层厚度(即断面高度)后,采用分层软件进行分区扫描和环形扫描两种扫描方式规划并且生成相应通用层片接口(Common layer interface, CLI)文件,最后读取 CLI 文件进行两种扫描路径对比试验和结果分析。

3 金属粉末激光成形扫描方式试验及其结果分析

3.1 试验条件及其方法

扫描方式对比试验在金属粉末激光成形(MPLS)系统上完成,该系统包括激光器(横流、管板式、多模二氧化碳激光器,波长 10.2 μm ,最大输出功率 2 kW)及其光路、数控系统(工业控制计算机、EPCIO

- 605 控制卡、I/O 控制卡 PCI - 1750、精密 X/Y/Z 三维工作台)和送粉系统(转鼓式送粉器和同轴粉末喷嘴)；试验材料采用镍基合金粉末，粒度为 200 筛号；基体材料为 A3 钢。

将 A3 钢加工制成 80 mm × 80 mm × 15 mm 基板并对其进行表面磷化处理以增加激光吸收率。扫描试验中激光功率 650 W、扫描速度 4 mm/s、送粉电动机转速 0.12 r/s(粉末流量 5 g/min)。试验过程中用氩气氛围保护，无预热保温装置。

首先在计算机上采用 CAD 软件设计一个待加工零件—轮盘的 CAD 实体模型，如图 4 所示；然后将该实体模型离散化生成 STL 格式文件；再利用切片软件读取 STL 格式文件，将离散的实体模型切成一系列薄层，并分别以分区扫描和环形扫描两种扫描方式生成每一层的扫描轨迹，将这些数据以 CLI 格式输出到文件，图 5 是两种扫描方式下某一层扫描线的扫描轨迹；最后在 MPLS 系统上根据两种扫描方式的 CLI 格式数据文件进行加工成形试验并对试验结果进行分析。

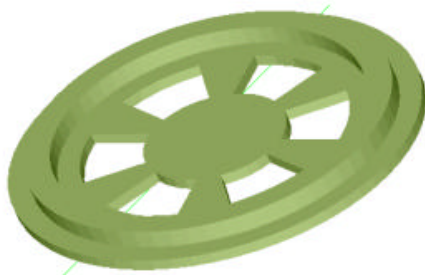


图 4 轮盘 CAD 实体模型

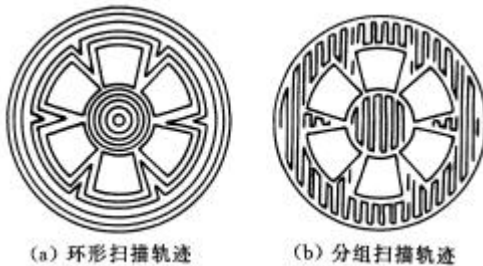
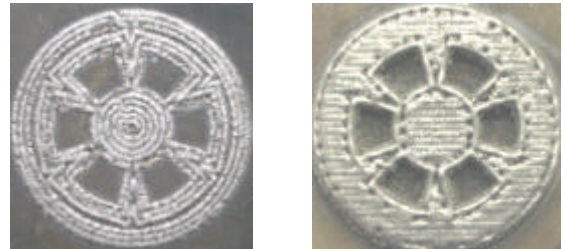


图 5 扫描线轨迹图

3.2 试验结果与分析

图 6 是读取 CLI 文件进行环形扫描和分区扫描的平面轨迹照片，从实物比较和照片对比可以发现，环形扫描轨迹线连续性明显好于分区扫描轨迹线，因此加工过程中环形扫描光闸开关次数明显少于分区扫描，空跳次数也相对较少。在 MPLS 系统中采用的是气动式激光光闸，此类光闸运动振动较大，反映灵敏度也相对不高，因此激光光闸开关次数的减小可大幅度提高系统稳定性和零件成形精度。

环形扫描相邻扫描线间的相互浸润性远不如分区扫描。图 6a 中相邻扫描线间浸润性差、沟壑较深，而图 6b 中相邻扫描线间浸润性好、过渡比较平缓、沟壑相对较浅。相邻扫描线间相互浸润性除受到扫描线间距影响之外，还决定于激光光斑提供的能量是否能够将上一条扫描线重叠部分熔化并与本条扫描线熔合。在激光功率一定的情况下，上一条扫描线的残存温度则对扫描线浸润性起到关键作用。对于图 6a 中的环形扫描，激光要经过一个圆周的扫描运动才能回到上一条相邻扫描线附近，这时上一条扫描线的温度已经有了大幅度降低，因此扫描线间浸润性减低；而对于图 6b 中的分区扫描，激光扫描路径是平行线，激光扫描回到上一条相邻扫描线附近只需要相对很短的时间，上一条扫描线还残存有较高的温度，因此扫描线间浸润性大大提高。



(a) 环形扫描轨迹照片 (b) 分组扫描轨迹照片

图 6 扫描线轨迹照片

以环形扫描方式进行轨迹扫描时一般总有一些过渡位置不能保证稳定单一扫描间距，特别是零件包含较多不规则孔洞时，这是环形扫描本身不足所致。在图 6a 中明显有一圈沟壑更深，从图 5a 轨迹图中也可以清楚看到，这些位置扫描间距显然大于分层时给定的扫描间距值；而分区扫描因为是做平行线扫描则可以保证稳定单一扫描间距。

对于同样的扫描面积和同样的扫描线间距，无论采用何种扫描方式，扫描线总长度几乎相同，因此在同样扫描速度下纯扫描时间也几乎相同。对于不同扫描方式，空跳次数与空跳路径总长度有很大差别，但是当空跳速度较大时(本试验中空跳速度为 16 mm/s，是加工速度的 4 倍)，对于环形扫描和分区扫描，单层加工总耗时相差无几。

下表是单层成形加工时记录的环形扫描与分区扫描若干测量值对比结果。由表可见，环形扫描与分区扫描的扫描线总长度几乎相同，而环形扫描空跳线总长几乎比分区扫描空跳线总长少一倍；环形扫描时光闸开关次数还不到分区扫描的一半，而环形扫描方式下总耗时则比分区扫描方式下总耗时略少一点。

表 环形扫描与分区扫描若干测量值对比

扫描方式	扫描线总长 L/mm	空跳线总长 l/mm	单层成形 时间 t/s	光闸开关 次数 n/次
环形扫描	1 637.64	228.49	424	10
分区扫描	1 651.03	416.55	439	26

3.3 扫描方式改进分析

由于分区扫描在烧结时对层面分区域依次进行扫描,扫描线可避开孔洞区域并使空跳路径总长度明显减少,并且分区扫描在软件实现上也相对简单,因此目前在各种 RP 工艺中大都采用分区扫描方式。

为避免分区扫描相邻层面局部烧结缺陷不至于重合,使工件内部的组织结构更趋于合理、力学性能更优,采用优化的变向分区扫描方式,即在完成一个层面分区填充扫描后,下一层扫描线方向旋转 90° 。

为遵循成形时热传递变化规律,削弱零件在温度降低过程中产生的内部残余应力,改进提高成形件的物理性能,降低光闸频繁开关造成系统不稳定因素、提高零件成形精度,本 MPLS 系统将变向分区扫描方式与环形扫描方式相结合进行成形加工试验,并取得非常好的加工效果。图 7 是加工成形的金属功能近形零件,图 8 则是经过后处理的零件,该零件无缺陷、全密度,完全可以作为功能零件进行应用。



图 7 MPLS 工艺成形的金属功能近形零件

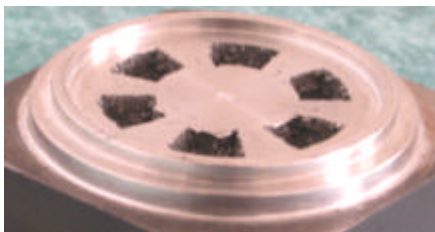


图 8 经后处理的金属功能零件

4 结论

(1) 将扫描线断面轮廓形状近似看作一段圆弧、以相邻扫描线重叠面积与凹沟面积相等为原则确定扫描线间距。

(2) 环形扫描方式明显减少激光光闸开关次数、提高系统稳定性和零件成形精度,但是相邻扫描线间浸润性差、沟壑较深;分区扫描方式扫描间距稳定单一、浸润性好、沟壑较浅,但是激光光闸

开关频繁、空跳次数较多。

(3) 改进扫描方式,将变向分区扫描方式与环形扫描方式相结合加工出无缺陷、全密度金属功能零件。

参 考 文 献

- 1 朱力群,高立群,黄因慧,等.激光选区烧结(SLS)的激光扫描控制.航空精密制造技术,1997,33(2):10~13
- 2 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.机械工程学报,2002,38(2):35~39
- 3 张人佶,单忠德,隋光华,等.粉末材料的 SLS 工艺激光扫描过程研究.应用激光,1999,10(5):299~302
- 4 蔡道生,史玉升,陈功举,等.SLS 快速成形系统扫描路径优化方法的研究.锻压机械,2002,25(2):18~20

SCANNING MODE OF THE METAL POWDER LASER SHAPING

Shang Xiaofeng Liu Weijun Wang Tianran
(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Wang Zhijian
(School of Mechanical Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034)

Abstract : Regarding the scanning line section outline as an arc of circle and according to the principle of the adjacent scanning line overlap area equals to the groove area, the scanning line spacing is determined. The subarea-scanning mode and the loop-scanning mode are analyzed and compared. In the loop-scanning mode the laser light gate on-off frequency is obviously reduced and the system stability and the part shape precision are improved but the adjacent scanning line infiltration is badly and the gully is deep. In the subarea-scanning mode the scanning line spacing is stable and single and the infiltration is better and the gully is shallow but the light gate moving is frequent and the skip time is more. The scanning mode is improved. Through combining the subarea-scanning and loop-scanning a flawless and full density metal function part is fabricated.

Key words : Rapid prototyping Metal powder laser shaping Scanning mode Metal function part

作者简介:尚晓峰,男,1972 年出生,博士研究生,讲师。主要从事金属直接快速成形技术研究,发表论文 10 篇,申请专利 3 项。

E-mail : xfshang@ sia.cn