

分区扫描路径规划及其对 SLM 成型 件残余应力分布的影响

邓诗诗 杨永强 李 阳 王 迪 王安民 宋长辉

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641

摘要 为了解决激光选区熔化成型零件时扫描线过长导致的层内累积残余应力过大、易发生翘曲变形和裂纹等问题,提出了一种分区扫描策略。采用 S 形正交扫描策略和分区扫描策略分别规划了零件扫描路径,实验验证了分区扫描策略的有效性。实验结果表明,采用分区扫描策略能有效降低边界拉应力,减小平面残余应力波动,提高成型件的力学性能。

关键词 激光技术; 分区扫描; 激光选区熔化; 残余应力分布; 力学性能

中图分类号 TH164; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1202003

Planning of Area-Partition Scanning Path and Its Effect on Residual Stress of SLM Molding Parts

Deng Shishi Yang Yongqiang Li Yang Wang Di Wang Anmin Song Changhui

School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract In order to solve such problems as residual stress accumulated within layers being excessive, and warpage and cracks being easy to occur as a result of the long scanning line when selective laser melting is used to mold parts, one scheme of area-partition scanning is proposed. The S-shaped orthogonal layer cross scanning strategy and area-partition scanning strategy are respectively adopted to plan scanning path and the validity of the latter strategy is experimentally confirmed. The experimental results indicate that, with the area-partition scanning strategy, the tensile stress at rims of molding parts is effectively reduced, the fluctuation of residual stress at surface is weakened, and the mechanical property of molding parts is improved.

Key words laser technique; area-partition scanning; selective laser melting; residual stress distribution; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 150.1135

1 引 言

激光选区熔化(SLM)技术是利用三维模型离散的层轮廓信息控制高能激光束来逐层熔化金属或金属粉末,从而制备金属零件^[1]。SLM 技术相比于传统制造技术,理论上不受任何空间限制,可以成型致密度近乎 100%的任意复杂结构的功能零件^[2-3]。SLM 技术已从原来的概念模具设计扩展到航空航天、生物医疗和汽车等高端领域的模具设计^[4]。

SLM 技术采用的单点高能加载方式使得能量加载和成型时间存在先后顺序,且成型过程中温度梯度

收稿日期: 2016-07-13; **收到修改稿日期:** 2016-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(51275179)、国家自然科学基金科学仪器基础研究专项(81327001)、广东省前沿与关键技术创新专项资金(2014B010131003)

作者简介: 邓诗诗(1991—),女,硕士研究生,主要从事激光选区熔化方面的研究。E-mail: 309261401@qq.com

导师简介: 杨永强(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: meiyqang@scut.edu.cn(通信联系人)

大、冷却速度快,同一层内不同位置金属粉末熔化后的散热速度和受到的冷却收缩约束力均随着扫描路径的不同而不同,导致不同位置熔化金属粉末产生了不均匀的收缩,这在很大程度上增加了控制成型质量的难度。尤其是大尺寸零件成型时扫描线过长、层内累积的残余应力过大,易引起零件发生翘曲变形、裂纹等缺陷,严重时甚至影响铺粉过程,导致零件成型过程的中断。

轮廓偏移扫描和 S 形正交扫描是目前国内快速成型技术最基本的两种扫描方式^[5-6],但这两种扫描方式均无法解决零部件残余应力过大、翘曲变形等问题。国内外研究人员针对快速成型技术不同扫描策略对成型件收缩和应力分布的影响进行了广泛研究。Parry 等^[7]通过建立热力学模型研究了不同扫描策略对 SLM 成型件温度梯度和残余应力分布的影响。陈德宁等^[8]利用有限元方法仿真研究了 S 形扫描策略和岛形扫描策略对 SLM 单层成型的温度场的影响。Senthilkumaran 等^[9]研究了扫描策略对选择性激光烧结成型件尺寸精度的影响。Dai 等^[10]研究了扫描策略对成型件的应力分布和翘曲变形的影响。Matsumoto 等^[11]借用有限元方法分析了激光熔化与粉末凝固时的弹性变形和热传导,得出了翘曲程度与扫描线长度呈正比例关系的结论。

上述国内外学者主要研究了单向的长边扫描、短边扫描和简单的分区扫描,但关于某种特定的分区扫描方式对 SLM 成型较厚实体件的残余应力分布规律影响的研究却鲜有报道。成型大尺寸零件时,扫描线过长及累积应力过大会对成型件质量产生不良影响。因此有必要按区域截断扫描线,减小扫描线长度。本文根据 SLM 成型过程中遇到的实际情况规划了一种斜线分区扫描策略,提出了实现该扫描策略的算法,并通过实验对比了 S 形正交扫描策略和分区扫描策略对成型件残余应力分布规律的影响,为分区扫描策略规划及其对 SLM 成型的影响提供了参考。

2 分区扫描规划

2.1 算法生成过程

算法基本流程如图 1 所示。以图 2(a)所示的层切片截面为例,按分区扫描路径填充截面,其中 A、B、C、D 为扫描线与区域分界线的交点,N 为层数。

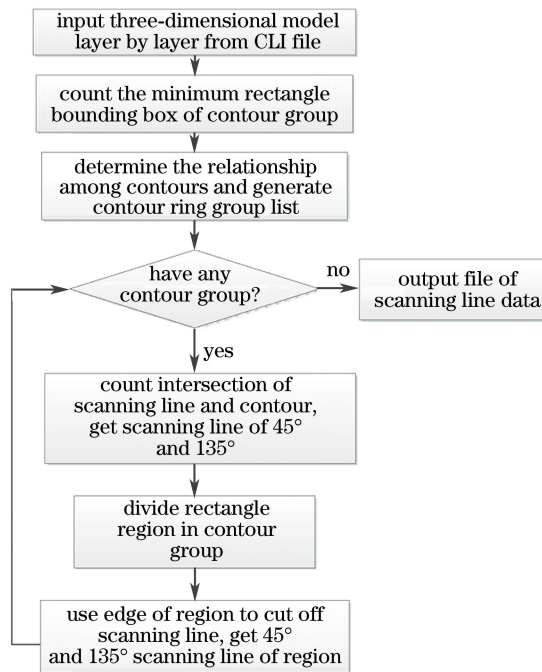


图 1 算法流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flow chart of algorithm

算法生成过程如下。

1) 前期数据处理。目前切片文件多采用 CLI 格式文件,由于 CLI 文件轮廓数据存在重复点和三点共线的现象,因此,为了减少数据数量和方便数据的后续处理,可先处理重复点和三点共线的中间点。

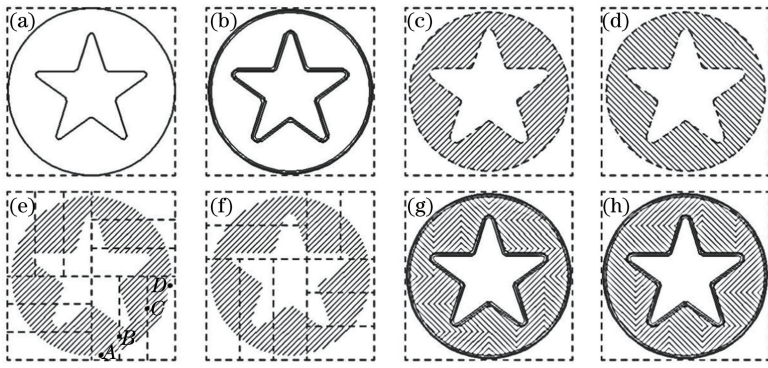


图 2 路径生成过程示意图。(a)生成最小矩形包围盒;(b)内外轮廓偏移;(c)轮廓截面,45°扫描线;(d)轮廓截面,135°扫描线;(e) N 层区域划分;(f) N+1 层区域划分;(g) N 层扫描路径;(h) N+1 层扫描路径

Fig. 2 Schematic diagram of path generation. (a) Minimum rectangle bounding box; (b) outer and inner contour offset; (c) contour section, 45° scanning line; (d) contour section, 135° scanning line; (e) area-partition of N layers; (f) area-partition of N+1 layers; (g) scanning path of N layers; (h) scanning path of N+1 layers

复杂截面的零件可能存在多个轮廓,其中外轮廓是指不被其他轮廓包含或包含它的轮廓个数为偶数的轮廓;内轮廓是指包含它的轮廓个数为奇数的轮廓。外轮廓和它包含的若干内轮廓构成一个轮廓环组。为了组成轮廓环组,需要先确定层截面各个轮廓之间的关系,可以利用各个轮廓环最小矩形包围盒的相互包含关系,轮廓环最小矩形包围盒如图 2(a)中虚线所示。设 m 为每层的轮廓数,定义轮廓关系矩阵^[12]为 \mathbf{R} , \mathbf{R} 的第 i 行 j 列的取值 $\mathbf{R}(i, j)(i, j = 1, 2, \dots, m)$ 为

$$\mathbf{R}(i, j) = \begin{cases} 1, \text{contour } i \text{ include contour } j \\ -1, \text{contour } i \text{ included by contour } j \\ 2, i = j \\ 0, \text{contour } i \text{ and } j \text{ have no inclusion relationship} \end{cases} \quad (1)$$

利用(1)式可确定轮廓环之间的关系。

2)扫描线的生成。分区扫描路径由轮廓偏移扫描线和区域填充线组成,其中轮廓偏移扫描线如图 2(b)中实线所示,区域填充线如图 2(g)、(h)中实线所示。为了得到轮廓偏移扫描线,采用转接矢量法^[13]对内外轮廓进行偏移,其中外轮廓采取向内偏移的正偏移方式,内轮廓采取向外偏移的负偏移方式。首次偏移采取光斑补偿量作为偏移量,之后偏移量均为扫描间距,这样可以在不影响成型件尺寸精度的前提下提高成型件的形状精度。轮廓偏移后需要对轮廓进行干涉检查,避免出现轮廓自相交或互相交的情况。

区域扫描线由斜 45°直线和斜 135°直线组成,可以有效避免某个方向扫描线过长的现象,并减少子区域数量。建立的坐标系参考激光选区熔化设备,以铺粉方向为 x 方向,设备平面内垂直于铺粉方向为 y 方向。以斜 45°扫描线为例,设任意一条扫描线方程为

$$\begin{cases} y = x + b_{\min} + \sqrt{2}rn \\ 0 \leq \sqrt{2}rn \leq b_{\max} - b_{\min} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 n 为扫描线数且 $n = 0, 1, \dots$; r 是扫描间距; b_{\min} 、 b_{\max} 分别是经过该轮廓环组最小矩形包围盒右下角和左上角的扫描线的截距; x 和 y 分别是扫描线任意一点的横坐标与纵坐标。扫描线端点为斜 45°直线或斜 135°直线与外轮廓偏移后的最内层偏移轮廓或内轮廓偏移后的最外层偏移轮廓的交点。以外轮廓偏移后的最内层偏移轮廓为例,设轮廓上任意相邻且 y 不相等的两点 $P(x_1, y_1)$ 、 $Q(x_2, y_2)$, 两点式直线方程为

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad (3)$$

利用(2)式和(3)式组成的方程组,可得到扫描线与轮廓的一个交点,遍历该轮廓环组的所有轮廓的所有节点,即可得到该条扫描线与轮廓环组的所有交点,构成二维交点数组。由于所有轮廓均为闭环轮廓,因此,得到交点的总数必为偶数。

利用冒泡排序算法对交点数组以 x 值为参考进行升序排序。由轮廓环组的特点可知,排序后的数组从首节点开始,两两节点恰好组成一条轮廓环组截面扫描线。

3) 截面的层错分区和扫描线的截断。在每个层的截面分区单独对各个轮廓环组进行分区,分区边界以轮廓环组最小矩形包围盒为参考。考虑到成型零件质量,区域宽度在 $5\sim 7\text{ mm}$ 之间较为合适^[14]。故取原始区域长度为 15 mm ,区域宽度为区域长度的 $1/3$,即 5 mm ,相邻大区域范围内分区方向转置,上下层同一范围分区方向转置。为了保证每层区域搭接处不处于同一个 xz 平面,提高成型件的抗拉强度,每层区域长度比上一层长 3 mm ,直到长度为原始长度的两倍时恢复为原始区域长度;区域宽度始终保持为区域长度的 $1/3$,最大区域宽度为 7 mm 。斜扫描线由区域边界截断为若干线段,如图 2(e) 所示,扫描线 AD 被截成了 AB 、 BC 、 CD 三条线段,当线段完全包含在某区域内,即为该区域填充线之一。 xy 方向分区与斜 45° 和斜 135° 扫描线的结合可以有效保证扫描线长度几乎不受成型件截面形状和分区方式的影响。

4) 扫描路径的输出。为了更有效提高成型件的形状精度,成型扫描时需先扫描截面偏移轮廓,固定截面形状后再进行内部填充,因此输出扫描路径时先依次输出外、内偏移轮廓。区域扫描线的输出严格遵循相邻区域扫描路径正交,上下层同一区域扫描路径正交的原则,同一区域扫描路径呈 S 形,减少激光器空扫行程。最终生成的扫描路径如图 2(g)、(h) 所示。

2.2 分区扫描路径规划实例

图 3 所示是一个复杂截面扫描路线规划实例,从图中可以看出,该算法能正确处理多轮廓的包含关系,正确规划复杂截面的扫描线。

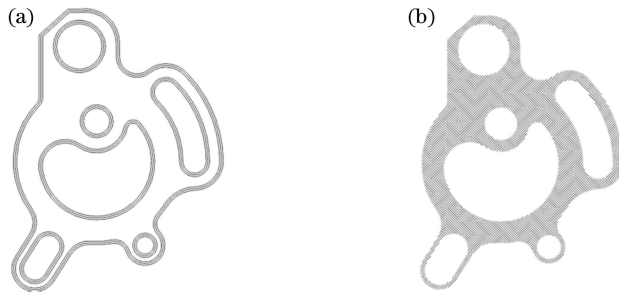


图 3 分区扫描规划实例。(a)轮廓偏移扫描线;(b)区域填充线

Fig. 3 Examples of area-partition scanning scheme. (a) Scanning line with contour offset; (b) filling lines within region

3 实验设备、材料和方法

3.1 实验设备

实验设备采用华南理工大学自主研发的 Dimetal-100 SLM 设备,如图 4 所示。该设备主要由光纤激光器、光路传输调节系统、气体循环系统、成型腔、铺粉机构、冷却系统和主控软件组成。激光由高精度的扫描

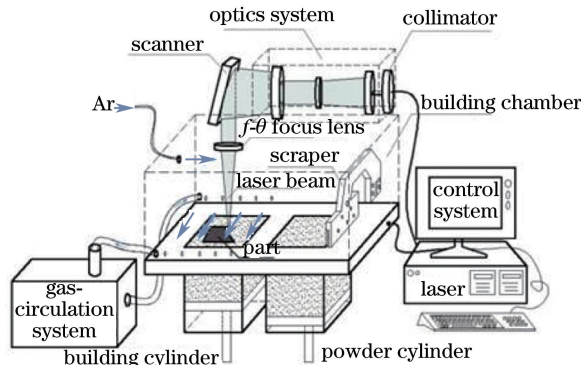


图 4 SLM 成型设备

Fig. 4 Molding setup of SLM

振镜系统导向,经 $f-\theta$ 透镜聚焦(f 为焦距, θ 为入射角),保证光斑在整个工作平面的功率密度基本一致,设备最大成型尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,精度可达 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。气体保护一般采用氮气或氩气保护。

3.2 实验材料

成型材料为 316L 不锈钢球形粉末,粉末最大粒径为 $35\text{ }\mu\text{m}$,平均粒径为 $17.11\text{ }\mu\text{m}$,松装密度为 4.42 g/cm^3 ,粉末化学成分见表 1。

表 1 316L 不锈钢粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 316L stainless steel powder (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	O	Fe
Content	0.03	17.5	12.06	2.06	0.86	0.3	0.09	Bal.

3.3 实验方法

实验中采用 S 形正交扫描策略和分区扫描策略。采用 S 形正交扫描策略可获得组织致密、性能优良的零件^[15]。S 形正交扫描策略如图 5 所示。第 n 层扫描路径方向为 y 方向,如图 5(a)实线所示;第 $n+1$ 层扫描线仍为 y 方向,与上层扫描线层错,位于上层扫描线之间,如图 5(a)虚线所示;第 $n+2$ 层和第 $n+3$ 层扫描线为 x 方向,如图 5(b)所示。分区扫描策略的区域分布和扫描顺序如图 6 所示。实验加工模型是尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 和 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 7.5\text{ mm}$ 的方形零件及图 7 所示的拉伸试件,详细加工参数见表 2。采用德国赛多利斯集团的 BS4425 电子天平、利用排水法测试相对致密度,利用深圳科讯时代有限公司的 KS-M13 万能测试机测试两种扫描策略加工条件下的拉伸试件的拉伸强度,并用邯郸爱思特有限公司的 X-350A 型 X 射线衍射仪测量大面积方块的微观平面残余应力分布。

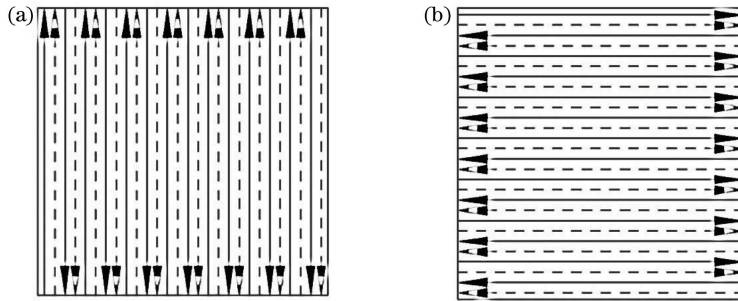


图 5 S 形正交层错扫描路径示意图。(a) y 方向;(b) x 方向

Fig. 5 Schematic diagram of S-shaped orthogonal layer cross scanning path. (a) y direction; (b) x direction

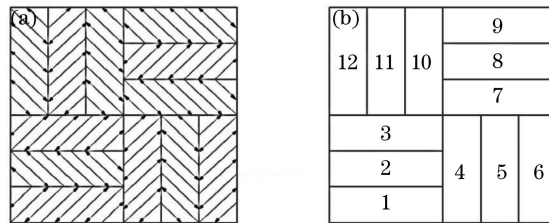


图 6 分区扫描路径示意图。(a) 区域分布;(b) 扫描顺序

Fig. 6 Schematic diagram of area-partition scanning path. (a) Regional distribution; (b) scanning sequence

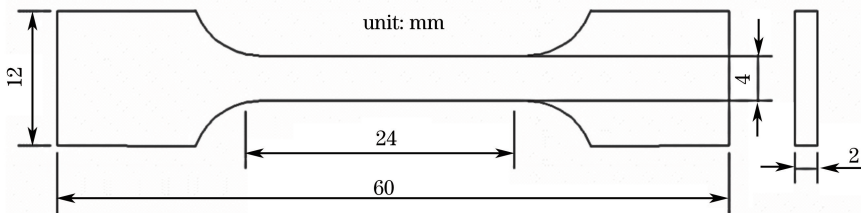


图 7 拉伸试样设计示意图

Fig. 7 Schematic diagram of tensile specimen design

表 2 主要加工参数

Table 2 Main processing parameters

Laser powder /W	Scanning speed /(mm/s)	Layer thickness / μm	Scanning interval /mm	Spot compensation amount /mm	Spot diameter / μm	Volume fraction of oxygen /%
170	750	30	0.07	0.03	80-100	≤ 0.03

4 结果与讨论

4.1 相对致密度和表面质量分析

致密性是 SLM 技术中决定零件力学性能的重要指标^[16]。利用排水法测试成型件的相对致密度 p 的公式为

$$p = \left(\frac{W_{\text{air}} \times P_{\text{H}_2\text{O}}}{W_{\text{air}} - W_{\text{H}_2\text{O}}} \right) / p_0, \quad (4)$$

式中 $p_0 = 7.98 \text{ g/cm}^3$, 是 316L 不锈钢的理论密度值; $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1.00 \text{ g/cm}^3$, 是水的密度; W_{air} 是成型件在空气中的质量; $W_{\text{H}_2\text{O}}$ 是成型件在水中的质量。实验加工 a、b 两组各 3 个 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 方形零件, 分别采用 S 形正交扫描和分区扫描, 测得 a、b 组零件平均相对致密度分别为 98.64% 和 99.28%, 两者结果相差不多, 两种扫描方式均能获得组织致密的成型件。

图 8 为两种扫描方式下加工零件的表面形貌图。可以看出, 两种扫描方式下加工的零件形貌基本一致, 表面熔道都被飞溅氧化颗粒等杂质间断, 无法形成贯穿整个截面的从头至尾的连续熔道。但图 8(b) 中分区扫描下零件表面形成的连续熔道的长度总体上大于图 8(a) 中 S 形正交扫描。

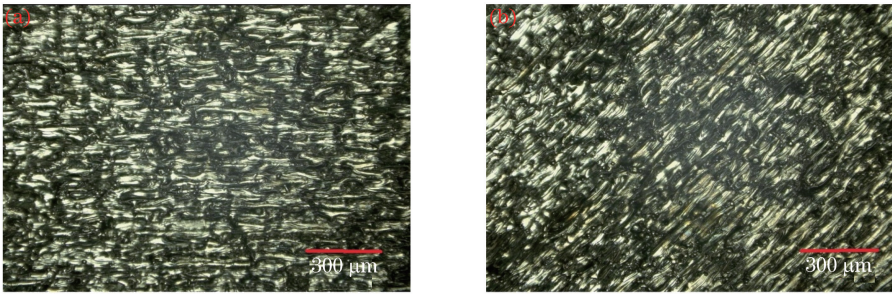


图 8 不同扫描方式下加工试样的表面形貌图。(a)S 正交扫描;(b)分区扫描

Fig. 8 Surface morphologies of processing specimens under different scanning schemes.

(a) S-shaped orthogonal scanning; (b) area-partition scanning

4.2 抗拉强度测试分析

通过 S 形正交层错扫描策略和分区扫描策略分别加工了拉伸件 a1、a2 和 b1、b2, 图 9 所示是拉伸件的应力-应变曲线。从图中可以看出, 拉伸件 b1、b2 的抗拉强度和最大应变均高于拉伸件 a1、a2。断裂发生时,

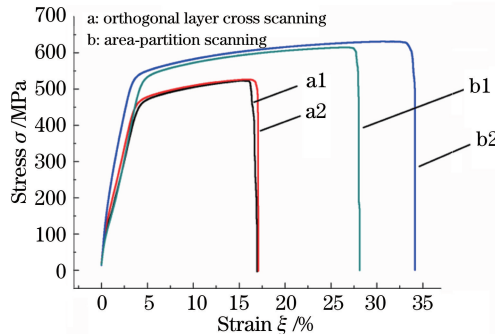


图 9 应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves

a 组拉伸件最大拉伸强度只有 526.73 MPa,最大应变只有 17.07%;而 b 组拉伸件最大拉伸强度高达 631.32 MPa,最大应变达到 34.16%。这是因为分区扫描采取分区层错策略,前一层区域搭接缝与后一层区域搭接缝错开了 3 mm,使得每层截面的区域搭接缝并不在同一垂直面上,可以有效避免区域搭接缝对拉伸件强度的影响。

4.3 上表面沿 x 方向残余应力分布分析

图 10 为测量加工零件上表面 x 方向残余应力时测量点分布示意图,平面上沿 x 向中心线均匀分布 10 个测量点,每个测量点间距是 3 mm。

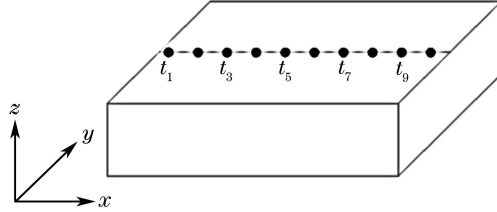


图 10 x 方向残余应力测量点示意图

Fig. 10 Schematic diagram of measurement points of residual stress along x direction

图 11(a)为两种扫描策略下加工零件沿 x 方向的残余应力 σ_x 的测量结果,可见两种扫描策略下 σ_x 遵循类似的分布规律。在零件边缘处均有 20 MPa 左右拉应力;进一步远离边界, σ_x 继续降低至 0 并逐渐转化为压应力。在零件中间部分的 σ_x 分布存在差异,S 形正交层错扫描加工的零件压应力向中心呈逐渐增大的趋势,最大值达 -113 MPa,平面上残余应力总体分布幅值大且波动较大。分区扫描加工零件压应力有向中心增大的趋势,但在位置点 t_3 处压应力逐渐减小,并转化为拉应力,且拉应力数值较小,这是位置 t_5 和 t_6 之间有区域分界线所致,总体上残余应力分布较为均匀。

图 11(b)是沿 x 方向的残余应力 σ_y 分布示意图。可见两种扫描方式下的 σ_y 分布和 σ_x 分布规律类似,但是 S 形正交层错扫描加工零件最后一层是沿 y 方向,S 形扫描导致两端边缘部分的 σ_y 增大至 140 MPa,中间压应力增大至 -135 MPa,增大了整体波动幅度,平面残余应力分布不均匀。分区扫描 σ_y 值在零件边缘部分和区域边界均显示为拉应力状态,除了左边缘区域起始位置出现较大拉应力,其他位置 σ_y 值均较小且分布均匀。

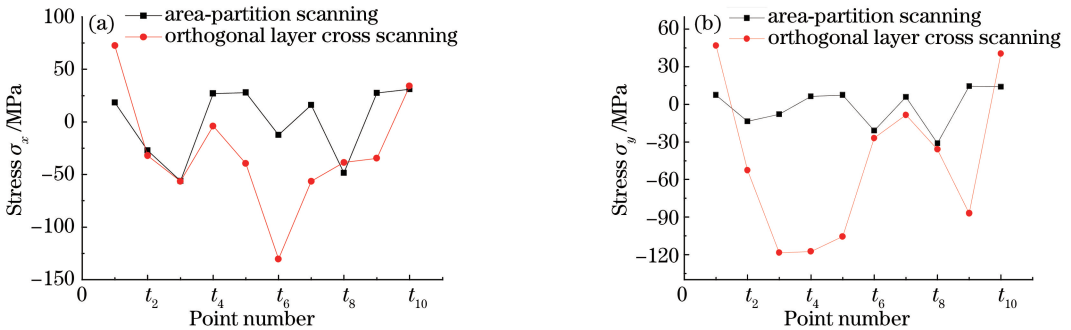


图 11 x 方向残余应力分布图

Fig. 11 Residual stress distribution along x direction

4.4 上表面沿 y 方向残余应力分布分析

图 12 所示为测量加工零件上表面 y 方向残余应力时测量点示意图,平面上沿 y 向中心线均匀分布 10 个测量点,每个测量点间距是 3 mm。

图 13(a)、(b)所示是上表面沿 y 方向残余应力 σ_x 、 σ_y 的测量结果。对于两种扫描策略,零件边缘处的 σ_x 、 σ_y 均为拉应力,但分区扫描的 σ_x 、 σ_y 比 S 形正交层错扫描分别下降了 54 MPa 和 39.5 MPa。在 S 形正交层错扫描方式下,零件远离边界部分的压应力逐渐增大, σ_x 下降至 -130 MPa, σ_y 下降至 -105 MPa,残余应力分布不均匀且波动大。在分区扫描方式下,区域中间部分 σ_x 、 σ_y 均呈压力状态;区域边界处 σ_x 、 σ_y 呈拉

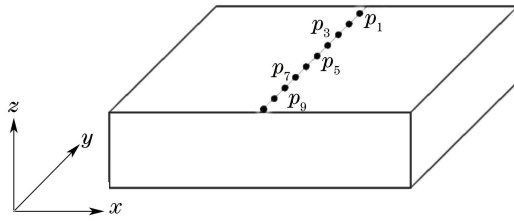


图 12 y 方向残余应力测量点示意图

Fig. 12 Schematic diagram of measurement points of residual stress along y direction

应力状态,但其值较小,只有 20~30 MPa,平面上应力分布均匀。

从 x 方向和 y 方向的 σ_x, σ_y 测量结果可以看出,在两种扫描策略下, σ_x, σ_y 都呈现出类似的分布规律, σ_x, σ_y 在零件边缘处呈较大拉应力状态,但分区扫描策略下的 x 和 y 方向的 σ_x, σ_y 拉应力值均小于 S 形正交扫描策略。在扫描线起始位置,扫描熔道被周围的粉末包围,粉末的导热系数远远低于相应的实体材料,熔道的热量难以扩散使得熔道内产生很大的温度梯度,从而引起较大的热应力。但分区扫描的扫描线比 S 形正交扫描要短,应力积累较少,故分区扫描的拉应力值比 S 形正交扫描要小。S 形正交扫描加工零件的拉应力值随着远离零件边缘逐渐减小,并逐渐转化为较大压应力,应力分布不均匀;分区扫描加工零件的拉应力也逐渐减小,并逐渐转化为压应力,但压应力值较小,且在区域边界处呈现较低拉应力状态。虽然扫描线起始位置处的熔道仍被众多粉末包围,但邻近区域的加工对周围粉末有预热作用,降低了温度,从而能大大减小热应力值。

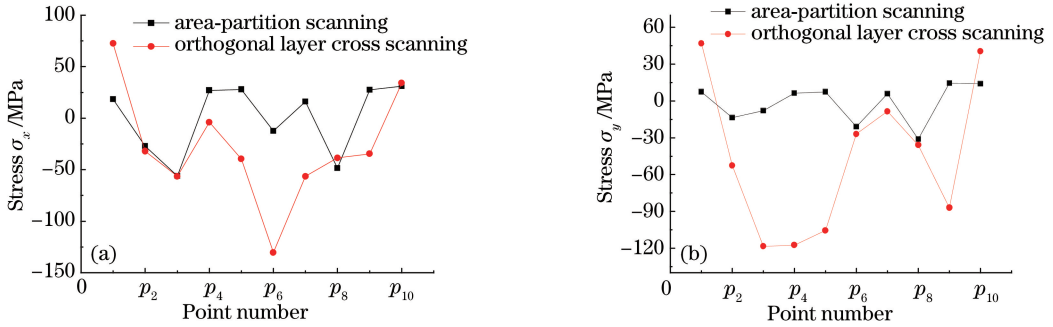


图 13 y 方向残余应力分布图

Fig. 13 Residual stress distribution along y direction

4.5 讨 论

实验结果显示,无论采取 S 形正交层错扫描还是分区扫描,大面积成型零件体内都存在一定量的残余应力,且零件边缘地带呈拉应力状态。随着远离边界,拉应力逐渐减小并转化为压应力,但采取分区扫描能有效降低边界拉应力,使得平面上整体残余应力分布较为均匀。通过拉伸试验对比可以发现,采用分区扫描有利于提高零件整体力学性能。

当然,本次试验存在不足,只是通过实验验证分区扫描的有效性,没有充分考虑其他扫描策略因素对成型质量的影响,例如区域大小和扫描顺序,同时也没有进一步观察零件的微观组织来充分挖掘分区扫描改善成型质量的根本原因。这些有待后续进一步研究。

5 结 论

根据 SLM 成型过程中遇到的实际情况提出了一种分区扫描策略,提出了实现该扫描策略的算法,并通过实验对比了 S 形正交扫描策略和分区扫描策略对成型件残余应力分布规律的影响,得到以下结论。

1) 分区扫描策略采用 x, y 方向分区,斜 45° 和斜 135° 的扫描线相结合可以有效减小扫描线的长度并减少子区域数量,并且几乎可以保证扫描线长度不受轮廓截面形状和扫描线方向的影响。算法可以规划复杂多轮廓截面的扫描线。

2) 分区扫描规划采取层错分区策略,可以有效保证成型件的抗拉强度不受分区成型的影响。在优化工艺参数下成型 316L 不锈钢零件,分区扫描加工的拉伸件抗拉强度和延伸率皆高于 S 形正交层错扫描。

3) 残余应力在零件边缘处和区域搭接处附近呈拉应力状态,但区域搭接处应力值远远小于边界处的值,残余应力在远离区域搭接处呈压应力状态。和 S 形正交扫描相比,分区扫描能有效降低残余应力值,并且改善残余应力分布状态,使整体残余应力分布较均匀,从而提高成型件的力学性能。

参 考 文 献

- Mai Shuzhen, Yang Yongqiang, Wang Di. Study on surface morphology and roughness variation of NiCr alloy curved surface manufactured by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1203004.
麦淑珍, 杨永强, 王 迪. 激光选区熔化成型 NiCr 合金曲面表面形貌及粗糙度变化规律研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203004.
- Song Changhui, Yang Yongqiang, Ye Ziheng, *et al.* Development of freeform design and manufacturing based on selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 58(8): 080026.
宋长辉, 杨永强, 叶梓恒, 等. 基于选区激光熔化快速成型的自由设计与制造进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080026.
- Wehmöller M, Warnke P H, Zilian C, *et al.* Implant design and production-A new approach by selective laser melting [J]. Proceedings of the 19th International Congress and Exhibition, 2005, 1281: 690-695.
- Campbell I, Bourell D, Gibson I. Additive manufacturing: Rapid prototyping comes of age[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(4): 255-258.
- Huang Xiaomao, Ye Chunsheng, Huang Weijun, *et al.* Planning algorithm of regular polygon grid path for laser rapid prototyping[J]. Forging & Stamping Technology, 2013, 38(3): 152-155.
黄小毛, 叶春生, 黄伟军, 等. 激光快速成形正多边形格子扫描路径的生成算法[J]. 锻压技术, 2013, 38(3): 152-155.
- Qian Bo, Zhang Lichao, Huang Shuhuai. Voronoi diagrams algorithm based on polygon and in the rapid prototyping applications[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2008, 36(1): 125-128.
钱 波, 张李超, 黄树槐. 基于平面多边形 Voronoi 图的算法与快速成形应用[J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(1): 125-128.
- Parry L, Ashcroft I, Bracket D, *et al.* Investigation of residual stresses in selective laser melting[J]. Key Engineering Materials, 2015, 627: 129-132.
- Chen Dening, Liu Tingting, Liao Wenhe, *et al.* Temperature field during selective laser melting of metal powder under different scanning strategies[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0403003.
陈德宁, 刘婷婷, 廖文和, 等. 扫描策略对金属粉末选区激光熔化温度场的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403003.
- Senthilkumaran K, Pandey P M, Rao P V M. Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering[J]. Materials & Design, 2009, 30(8): 2946-2954.
- Dai K, Shaw L. Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns[J]. Rapid Prototyping Journal, 2002, 8(5): 270-276.
- Matsumoto M, Shiomi M, Osakada K, *et al.* Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(1): 61-67.
- Chen Hong, Zhang Zhigang, Cheng Jun. Scanning path scheme for SLS RP system[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2001, 9(2): 202-207.
陈 鸿, 张志钢, 程 军. SLS 快速成型工艺激光扫描路径策略研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(2): 202-207.
- Zhang Man. Study on generation and optimization for scanning path in RP[D]. Xi'an: Xi'an University of Science, 2006.
张 曼. RP 中扫描路径的生成与优化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2006.
- Lu Y J, Wu S Q, Gan Y L, *et al.* Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 75: 197-206.
- Wang Di, Yang Yongqiang, Huang Yanlu, *et al.* Density improvement of metal parts directly fabricated via selective laser melting[J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(6): 107-111.
王 迪, 杨永强, 黄延禄, 等. 选区激光熔化直接成型金属零件致密度的改善[J]. 华南理工大学学报, 2010, 38(6): 107-111.
- Zhao Jinyan, Qiu Yi, Liu Furong, *et al.* Research of surface roughness and relative density of SLM medical Co-Cr alloy [J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 524-527.
赵进炎, 仇 毅, 刘富荣, 等. SLM 成型医用钴铬合金的表面粗糙度与致密度研究[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 524-527.