

## 提升分区搭接质量的激光选区熔化扫描策略

岑伟洪<sup>1,2</sup>, 汤辉亮<sup>1,2</sup>, 张江兆<sup>1,2</sup>, 袁桂鑫<sup>1,2</sup>, 严宏浩<sup>1,2</sup>, 龙雨<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>广西大学机械工程学院, 广西 南宁 530004;

<sup>2</sup>广西大学激光智能制造与精密加工所, 广西 南宁 530004

**摘要** 多激光束并行打印需要对当前打印层进行分区扫描。分区扫描策略对激光选区熔化制造成形件的表面质量、残余应力与变形量、力学性能有着很重要的影响。通过分析传统分区扫描策略的局限性,本文提出一种三角波条带扫描策略,利用实验对比分析了三角波条带扫描策略和传统的条带和棋盘分区扫描策略打印的 316L 不锈钢样品的致密度、残余应力与变形量、拉伸强度、维氏硬度和表面搭接区成形质量。结果表明,三角波条带扫描策略改善了搭接区质量,提高了试样的拉伸强度与维氏硬度,316L 不锈钢样品的致密度达 99.74%。因此,三角波条带扫描策略有利于改善激光选区熔化成形质量,为多激光束并行打印提供了一种新思路。

**关键词** 激光技术;激光选区熔化;路径规划;分区扫描策略;搭接区质量

中图分类号 TH164;TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1802018

### 1 引言

激光选区熔化(SLM)技术是基于零件三维模型的切片数据,利用激光输入能量熔融粉末材料,逐层递增制造,具有简单、灵活的特点,能够用于复杂零件的快速制造,现已被用于医疗、航空等领域<sup>[1-5]</sup>。但在 SLM 制备过程中,激光扫描速度、激光能量、扫描间距、粉末材料尺寸大小、环境等<sup>[6-7]</sup>会影响零件的成形质量,同时,扫描线长度与扫描策略亦被证明是影响制造效率和成形质量的关键因素<sup>[8-10]</sup>。由于光学元件的限制,SLM 无法用于航空航天领域等尺寸超过其成形幅面的零件加工。为满足大尺寸零件的加工需求,提高 SLM 成形效率,多激光束并行的 SLM 技术应运而生。多激光束并行打印采用多个扫描振镜与激光器分区域同时工作,为保证激光束相互之间不干扰以及成形件光束拼接区与其他区域具有相同的组织与性能,需要对分区扫描进行研究。

扫描策略是指通过算法规划出扫描线,用于填充零件二维轮廓切片数据的路径规划方法,不同的扫描策略对 SLM 成形质量的影响有较大差别<sup>[11]</sup>。

扫描策略直接影响粉末的传热、熔化和凝固,最终影响缺陷的位置和分布。不同的扫描顺序会使得温度分布不一致,进而导致残余应力分布不均匀,从而影响零件的机械特性<sup>[12]</sup>。目前,常用的路径扫描策略有直线扫描策略、轮廓偏置扫描策略、螺旋线扫描策略、分区扫描策略、分形扫描策略等<sup>[13-15]</sup>。直线扫描策略在 SLM 技术中应用最普遍,效率最高、填充路径简单、计算速度快,算法成熟可靠。但是,扫描线过长会导致温度梯度大,残余应力分布不均匀,且会影响表面成形质量<sup>[16]</sup>。为避免扫描路径过长,研究人员提出了分区扫描策略。目前常用的分区扫描策略有带状分区、棋盘或岛分区等。邓诗诗等<sup>[14]</sup>对 S 形扫描与棋盘分区扫描进行实验,发现分区扫描能够有效降低边界的应力,获得较均匀的残余应力,减小成形件的翘曲变形,提高零件整体成形质量。Salman 等<sup>[17]</sup>研究了条带和棋盘两种分区扫描策略,发现条带扫描策略的力学性能比较好,且残余应力小。但分区扫描策略中存在搭接区域,该区域的搭接质量对零件的力学性能和表面质量有着至关重要的影响。通常情况下,采用扫描线偏置的方法进行搭接,搭接区域的基材被重新熔化,输入能量更

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-04-26; 录用日期: 2021-05-17

基金项目: 广东省重点领域研发项目(2020B090924001, 2017B090911004)、深圳市基础科研项目(JCYJ20180504165824643, GJHZ20190822095418365)、广西大学引进人才科研启动项目(A3010051006)

通信作者: \*longyu@gxu.edu.cn

高,从而导致局部残余应力过高,进而影响残余应力在加工平面的分布。为改善搭接区质量,张思远等<sup>[18]</sup>针对多光束 SLM 成形工艺设计了重熔与交错拼接两种方式,发现交错拼接能有效控制重熔影响区域,提高成形件表面平整度,提升成形件尺寸精度与成形质量。Wang 等<sup>[19]</sup>通过研究常规棋盘、斜线、分层交错和 S 形正交分区扫描策略,发现采用斜线、分层交错的方式能够使搭接区残余应力维持在较低水平且分布趋于平均;采用直线纵横的搭接方式可有效避免两组扫描线重叠,减少搭接区域微孔与隆起。

针对条带搭接区气孔与飞溅较多,棋盘扫描策略的扫描区域小、能量聚集、热量无法及时散失、温度梯度大的问题,本文提出一种三角波条带分区扫描策略来改善搭接区的搭接质量。

## 2 三角波分区条带扫描算法及实现

所提出的三角波条带扫描策略由三角波和往复直线组成。首先,使用三角波函数产生三角波分区边界;然后,使用直线与分区边界作布尔交运算,得到扫描线;最后,对每条扫描线进行排序,并使用 Dijkstra 算法优化扫描线的始末点,减少路径频繁跳跃与激光器开关次数。与条带扫描策略的扫描线首尾相连的直线外延式搭接方式不同,三角波分区边界的搭接继承了棋盘扫描策略的纵横式搭接方式。在分区上,棋盘扫描策略的扫描区域小,条带分区扫描策略的扫描区域较大,而本文算法的扫描区域大小适中。

### 2.1 生成三角波分区

如图 1(a)所示,模型切片后获得外轮廓 ABC 与内轮廓 DEFG。生成三角波分区边界的目的主要是寻找模型切片轮廓的最小包围盒,并对该包围盒进行分区。首先,遍历外轮廓 ABC 与内轮廓

DEFG 的顶点,寻找该轮廓横纵坐标的最大值  $X_{max}$ 、 $Y_{max}$ ,最小值  $X_{min}$ 、 $Y_{min}$ ,得到切片轮廓的最小包围盒 HIJK。

其次,用直线条带对包围盒 HIJK 进行分区,如图 1(b)虚线所示。使用(1)式函数产生的三角波代替条带分区的直线边界,如图 1(b)虚线与三角波所示。

$$x = \begin{cases} h_1 - \frac{2h_1}{T/2} \times (y - NT) + X_{min} + nW, & 0 < y - NT \leq \frac{T}{2} \\ h_1 + \frac{2h_1}{T/2} \times (y - NT) + X_{min} + nW, & -\frac{T}{2} < y - NT \leq 0 \end{cases}, (1)$$

式中:  $h_1$  表示振幅;  $T$  表示周期;  $N = (Y_{max} - Y_{min}) / T$  表示整周期数;三角波条带边之间的夹角  $\alpha = 2 \arctan[T / (4h_1)]$  可以任意改变,以确定扫描线的倾斜角度; $W = [D_s \times \cos(\alpha/2) - T/2] / [1 - \tan(\alpha/2)/2]$  表示虚线 1 和虚线 2 所构成分区的宽度, $W$  可通过图 1(b)所示的由扫描线长度  $D_s$ 、三角波间距  $W$  和周期  $T$  构成的两个三角形  $a_{11}b_{11}c_{11}$  与  $a_{12}b_{12}c_{12}$  的几何关系确定; $X_{min}$  表示包围盒 X 轴坐标最小值; $n = [(X_{max} - X_{min}) / W] + 1$  表示条带数量。由此可见,当扫描线长度  $D_s$  不变时,周期  $T$  与振幅  $h_1$  影响分区宽度  $W$ ,从而影响增材制造零件的成形质量。

然后,按照逆时针顺序把三角波分区边界点与切片轮廓点连接形成封闭的分区轮廓,即第一个轮廓为 HKabcdefg,第二个轮廓为 omlkjihgfedcba,以此类推到第  $n - 1$  个轮廓,而第  $n$  个轮廓为 pqrstuvwxyzJI,完成分区,如图 1(c)所示。

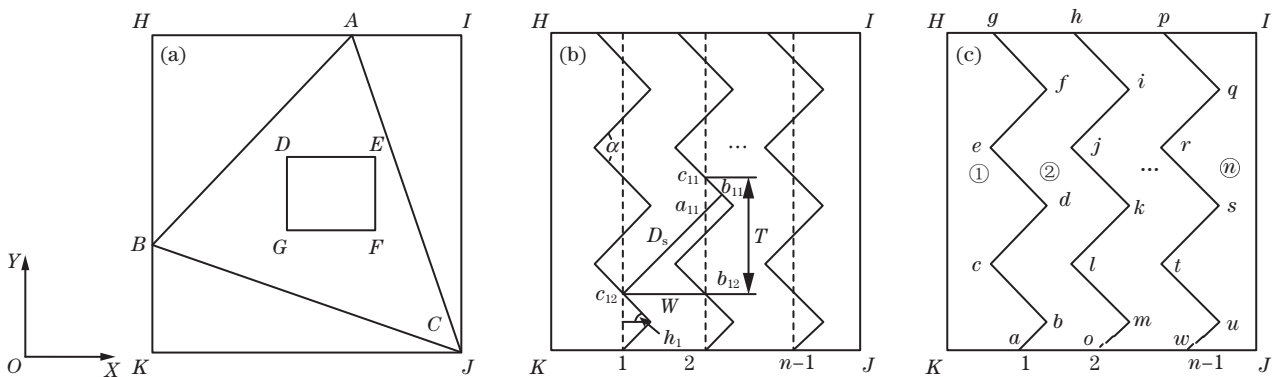


图 1 条带轮廓生成过程示意图。(a)生成最小包围盒;(b)沿 Y 轴条带的生成过程;(c)三角波条带  
Fig. 1 The generation process of stripe contour. (a) Generating the smallest bounding box; (b) generation process along the Y axis; (c) wave\_stride

最后,进行分区合并处理。第一条和最后一条三角波边界线波峰点到包围盒左和右边缘线的最短距离为  $L_1, L_2$ ,若  $L_1, L_2$  均小于设定的阈值  $D_f$ ,则分别以该三角波条带为边界线进行分区合并,如图 2(a)所示,分区①和②合并,分区③和④合并,如图 2(c)所示;若  $L_1, L_2$  均大于设定的阈值  $D_f$ ,则分区不合并,如图 2(b)所示。

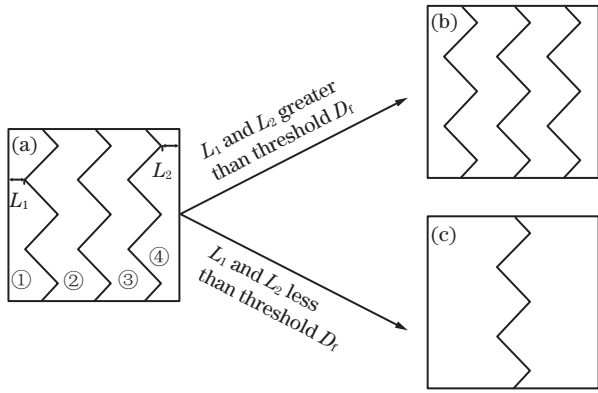


图 2 分区合并示意图。(a)初始分区;(b) $L_1$  和  $L_2$  大于阈值  $D_f$  时的分区;(c) $L_1$  和  $L_2$  小于阈值  $D_f$  时的分区

Fig. 2 Schematic of partition merging. (a) Initial partition; (b) partitions with  $L_1$  and  $L_2$  greater than the threshold  $D_f$ ; (c) partitions with  $L_1$  and  $L_2$  less than the threshold  $D_f$

针对模切片分区的变量定义如下: $i$  为第  $i$  层切片,  $R_i$  为第  $i$  层的最小包围盒的纵横坐标最大值  $X_{\max}, Y_{\max}$ , 最小值  $X_{\min}, Y_{\min}$  的数组,  $A_{PW-i}$  为存放的第  $i$  层三角波条带分区的轮廓数组,  $A_{PG-i}$  为第  $i$  层的内外轮廓数组。具体算法步骤如下:

步骤 1: 遍历  $PG$ , 寻找该轮廓纵横坐标最大值  $X_{\max}, Y_{\max}$ , 最小值  $X_{\min}, Y_{\min}$ , 以及最小包围盒  $HIJK$ , 存放于  $R$  中, 如图 1(a) 所示。

步骤 2: 通过横坐标最大值  $X_{\max}$  与最小值  $X_{\min}$  之差与设定的条带间距  $W$  的比值, 确定该包围盒内的条带数量  $n$ 。

步骤 3: 使用直线条带分区算法对包围盒  $HIJK$  分区, 得到初步分区的直线边界, 如图 1(b) 虚线所示。

步骤 4: 输入振幅为  $h_1$ , 整周期数为  $N$ , 使用 (1) 式在步骤 3 中的分区直线边界的基础上生成三角波边界, 以代替分区的直线边界, 如图 1(b) 虚线与三角波实线所示。

步骤 5: 按照逆时针顺序把三角波分区边界点与切片轮廓点连接形成封闭的分区轮廓, 即第一个轮廓为  $HKabcdefg$ , 第二个轮廓为  $omlkjihgfedcba$ , 以此

类推到第  $n - 1$  个轮廓, 而第  $n$  个轮廓为  $pqrstuvwJI$ , 按顺序存放于  $A_{PW-i}$  中, 完成分区, 如图 1(c) 的①、②等序号所示。

步骤 6: 计算  $L_1, L_2$ , 且  $L_1, L_2$  分别与阈值  $D_f$  进行比较, 并根据比较结果确定是否进行分区合并处理。

步骤 7: 跳到第  $i + 1$  层, 重复步骤 1~6, 直到完成所有模型切片轮廓分区。

## 2.2 生成分区的区域内扫描线

分区内扫描一般有直线、轮廓偏置、希尔伯特曲线、螺旋线等方法, 由于直线路径生成简单, 且加工效率高, 因此选择直线作为扫描线。将 2.1 节中获得的分区边界与模型切片轮廓进行布尔交运算, 得到切片轮廓的分区, 如图 3(a)、(b) 所示。根据包围盒三角波条带分区存储的排序数奇偶性确定扫描线斜率的正负, 按照图 1(c) 的①, ②, ..., ⑦进行存储排序。若存放的序号为奇数序号(如①、③等), 则该三角波条带分区内的扫描线斜率为正; 反之, 扫描线的斜率为负。因三角波条带分区远小于某层模型切片轮廓的最小包围盒  $HIJK$ , 在某层模型切片轮廓的最小包围盒  $HIJK$  内, 由 (2) 式生成的大量扫描线与三角波条带分区不相交, 导致布尔交运算的运算量过大。为了减少布尔交运算的运算量, 本实验通过获取每个三角波条带分区轮廓的最小包围盒, 如图 3(c) 的粗实线矩形所示, 在该包围盒内使用 (2) 式生成扫描线。若扫描线的斜率为正, 则求其扫描线方程在包围盒的右下角的最小截距  $b_{\min}$  与其在包围盒的左上角的最大截距  $b_{\max}$ ; 反之, 求其在包围盒的左下角的最小截距  $b_{\min}$  与其在包围盒的右上角的最大截距  $b_{\max}$ 。在截距范围内由扫描间距偏置得到一系列扫描线<sup>[14]</sup>, 再与该条带分区的轮廓进行布尔交运算, 即联合扫描线 (2) 式和轮廓两点间线段 (3) 式进行求解, 得到扫描线填充该分区的策略, 如图 3(d) 所示。若扫描线的间距为  $d$ , 扫描线的数学表达式表示为

$$y = kx + b_{\min} + dm / |\cos(\alpha/2)|, \\ 0 \leq dm / |\cos(\alpha/2)| \leq (b_{\max} - b_{\min}), \quad (2)$$

式中:  $k = \tan(\alpha/2) = T / (4h_1)$  表示扫描线的斜率, 即  $k$  随周期  $T$  与  $4h_1$  变化;  $m$  表示扫描线的数量。

二维切片轮廓与扫描线的交点即为通过轮廓线段两点的直线方程的交点。轮廓相邻两个点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  的直线方程为

$$\begin{cases} \frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, & x_1 \neq x_2 \\ y = y_1 = y_2, & x_1 = x_2 \end{cases} \quad (3)$$

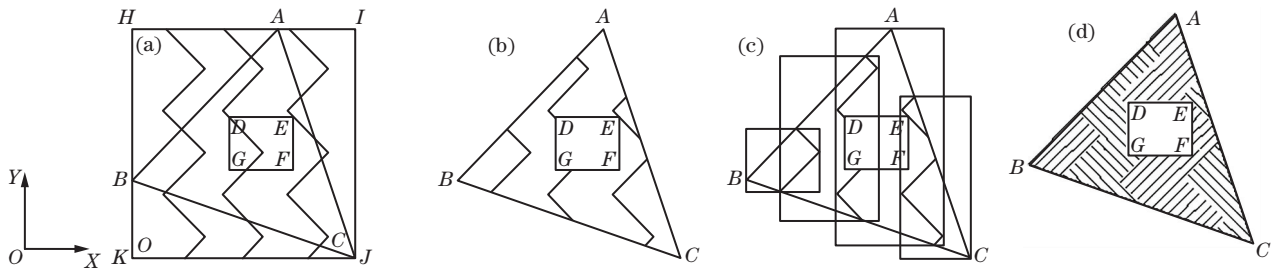


图 3 扫描线生成与各区域填充。(a)切片轮廓与三角波条带作布尔交运算的示意图;(b)求交后得到三角波条带轮廓;(c)每个三角波条带轮廓的最小包围盒;(d)扫描线填充示意图

Fig. 3 Scanning line generation and area filling. (a) Intersection of slice profile and wave\_stripe; (b) wave\_stripe profile after the intersection; (c) the smallest bounding box of each wave\_stripe; (d) schematic of filling the scanning line

三角波条带扫描方法的数据变量定义如下:  
 $A_{PW-i}$  为存放第  $i$  层的三角波条带分区的轮廓数组,  
 $A_{PG-i}$  为第  $i$  层轮廓数组, $A_{PS-i}$  为存放第  $i$  层的三角波条带分区的轮廓与该层模型切片轮廓进行布尔交运算后该层模型切片轮廓分区的数组, $A_{Rt-i}$  ( $i=0, 1, 2, \dots, n-1$ ) 为  $A_{PS-i}$  最小包围盒的横纵坐标最大值  $X_{max}$ 、 $Y_{max}$ , 最小值  $X_{min}$ 、 $Y_{min}$  的数组, $A_{line}$  储存同一条扫描线与分区的轮廓作布尔交运算得到的扫描线段 [如图 4(b)所示, 一条扫描线经布尔交运算后得到扫描线段 9、23],  $A_{lines}$  为每个分区扫描线的数组。具体步骤如下:

步骤 1: 输入  $A_{PW-i}$  与  $A_{PG-i}$ , 然后两者作布尔交运算, 如图 3(a)所示。将三角波条带分区的轮廓与该层模型切片轮廓的布尔交运算结果存放到该层模型切片轮廓  $A_{PS-i}$  中, 完成该层模型切片轮廓分区, 如图 3(a)所示。

步骤 2: 获取  $A_{PS-0}$  到  $A_{PS-n-1}$  的最小包围盒的横纵坐标最大值  $X_{max}$ 、 $Y_{max}$ , 以及最小值  $X_{min}$ 、 $Y_{min}$ , 按照序号 [图 1(c)中的 ①, ②, ..., ⑩] 分别存放于  $A_{Rt-i}$  ( $i=0, 1, 2, \dots, n-1$ )。

步骤 3: 按照序号 [如图 1(c)的 ①, ②, ..., ⑩] 的

奇偶性, 确定该分区的扫描线斜率, 若序号为奇数, 则  $k = \tan(\alpha/2)$ , 反之,  $k = \tan(\alpha/2) = -\tan(\alpha/2)$ 。

步骤 4: 结合扫描线斜率  $k$  的正负与该分区的包围盒, 求扫描线的最大截距  $b_{max}$  与最小截距  $b_{min}$ , 根据 (2) 式求取扫描线。

步骤 5: 扫描线与该分区的轮廓作布尔交运算, 即联合 (2) 式与 (3) 式求解, 得到若干交点  $(x, y)$ 。若交点数量为奇数, 则去除轮廓的顶点, 再按  $x$  值从小到大排序, 两两组成一条扫描线; 若交点数量为偶数, 则直接按  $x$  值从小到大排序, 两两组成一条扫描线段, 并将扫描线段存放于数组  $A_{line}$  中。

步骤 6: 把数组  $A_{line}$  存放于  $A_{lines}$  中。

步骤 7: 重复步骤 3~6, 直到该层模型切片轮廓的分区完成扫描线填充。

### 2.3 连接扫描线生成扫描路径, 并优化路径始末点顺序

若分区中存在中空区域 [图 4(a) 中内轮廓 DEFG 所在区域], 则扫描线间断不连续, 致使激光器频繁地关闭、开启。因此, 需要对得到的扫描线进行排序, 使激光获得合适的运动扫描顺序, 且减少激光光源开与关的次数。

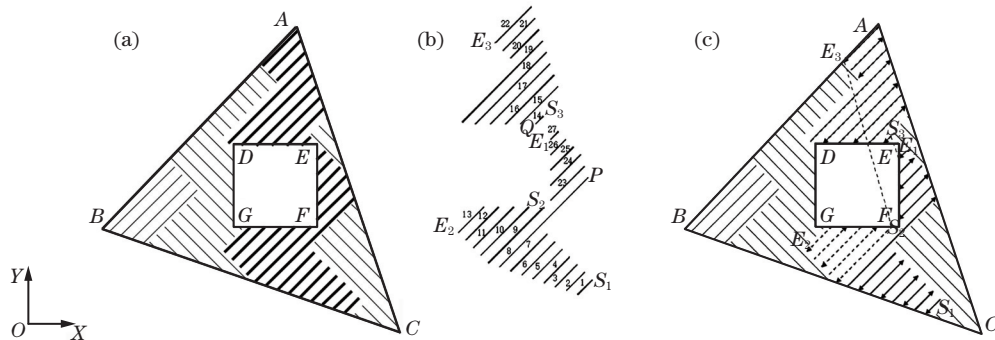


图 4 扫描路径生成与扫描路径始末点顺序优化。(a)路径生成示意图;(b)扫描路径始末点顺序优化;(c)三角波条带分区扫描路径生成与扫描路径始末点顺序优化结果

Fig. 4 The schematic of generating scanning paths and optimizing beginning and end points of scanning paths. (a) Generating scanning paths; (b) optimizing beginning and end points of scanning paths; (c) the result of scanning paths and beginning and end points of scanning paths in wave\_stripe

分析图 4(a) 中三角波条带扫描线段(粗线)连接成的扫描路径原理,结果如图 4(b)所示。首先,沿着 Y 轴正方向把扫描线段 1~22 搜索出来;其次,使用直线往复扫描算法,把扫描线段 1~22 连接成扫描路径。设定距离阈值为  $D_1$ ,若两条扫描线段端点间距离  $D$  大于阈值  $D_1$ ,则扫描线段连接结束,得到一条扫描路径。在图 4(b)中,假设  $S_1$ 、 $P$  两点的距离大于阈值  $D_1$ ,则扫描线段 1~8 连接成一条扫描路径,同理,扫描线段 9~13、14~22 分别连接成两条扫描路径。然后,返回扫描线截距  $b_{\min}$ ,开始搜索未被使用的扫描线段 23~27,并将其连接成扫描路径。为了减少空行程数量、提高打印效率,以及降低飞溅物对未打印区域零件成形质量的影响,对扫描线段的扫描路径始末点进行规划,得到合理的扫描顺序。本着沿 Y 轴正方向扫描的原则,使用 Dijkstra 算法寻找每条扫描路径的始末点。若两条扫描路径的起始点与末尾点的距离小于阈值  $D_1$ ,则将它们合并成一条扫描路径。假设  $P$ 、 $Q$  两点的距离小于阈值  $D_1$ ,则扫描线段 1~8 所在的扫描路径与扫描线段 23~27 所在的扫描路径合并,最后生成  $S_1-E_1$ 、 $S_2-E_2$ 、 $S_3-E_3$  三条扫描路径,得到  $S_1 \rightarrow E_1 \rightarrow S_3 \rightarrow E_3 \rightarrow S_2 \rightarrow E_2$  的扫描顺序。

$(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$  两点的距离公式为

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4)$$

扫描路径生成与路径始末点顺序优化算法的变量定义如下: $A_{\text{line}}$  储存同一条扫描线与分区的轮廓作布尔交运算得到的扫描线段[如图 4(a)所示,一条扫描线经布尔交运算后得到扫描线段 10、24], $A_{\text{lines}}$  为存储  $n$  个扫描线段  $A_{\text{line}}$  数组的数组,两点间的距离阈值为  $D_1$ ,两条扫描线端点或扫描路径起始点与末尾点的最短距离为  $D$ 。具体步骤如下:

步骤 1:输入  $A_{\text{lines}}$  数组。

步骤 2:按照  $A_{\text{lines}}[0]$  到  $A_{\text{lines}}[n-1]$  的顺序进行搜索,即沿着图 4(a)的 Y 轴方向搜索。每次只搜索  $A_{\text{lines}}[0]$  的  $A_{\text{line}}$  中的一条扫描线段。同理,在  $A_{\text{lines}}[0]$  的  $A_{\text{line}}$  到  $A_{\text{lines}}[n-1]$  的  $A_{\text{line}}$  中搜索扫描线段,得到扫描线段 1~22。

步骤 3:使用直线往复扫描算法,把扫描线段 1~22 连接成扫描路径。若两条扫描线段端点的距离  $D$  大于阈值  $D_1$ ,则扫描线段连接结束,生成扫描路径,如图 4(b)所示。以此类推,直到遍历所有的线段,最后把剩余的扫描线段连接成扫描路径。到此,完成扫描线段连接,生成扫描路径。

步骤 4:搜索在  $A_{\text{lines}}[0]$  的  $A_{\text{line}}$  到  $A_{\text{lines}}[n-1]$

的  $A_{\text{line}}$  中未被使用的扫描线段,若有未使用的扫描线段,则返回步骤 3,否则进行下一步。

步骤 5:若两条扫描路径起始点与末尾点的距离  $D$  小于阈值  $D_1$ ,则合并成一条扫描路径。然后遵循沿 Y 轴正方向扫描的原则,使用 Dijkstra 算法寻找每条扫描路径的始末点,优化扫描路径的扫描顺序。

## 3 实 验

### 3.1 SLM 打印实验

使用大族激光 3D 打印设备 HANS-M-100,光斑直径为  $25 \mu\text{m}$ 。采用 3DXpert 软件规划棋盘扫描、条带分区扫描和三角波扫描策略,进行 SLM 成形质量实验研究。各扫描策略搭接区宽度均为  $0.05 \text{ mm}$ ,搭接方式如图 5(d)~(f)所示。设置层间扫描线旋转角度为  $45^\circ$ <sup>[14]</sup>,以形成层间交错,如图 5 所示。考虑到扫描线对温度梯度与残余应力有很大影响,分区大小一般设置为  $5 \sim 7 \text{ mm}$ <sup>[10, 20]</sup>,本实验使用的分区大小为  $5 \text{ mm}$ 。三角波扫描策略的周期  $T$  为  $4 \text{ mm}$ ,振幅  $h_1$  为  $1 \text{ mm}$ ,扫描线长度  $D_s$  设为  $5 \text{ mm}$ ,其阈值  $D_f$  为  $0.5 \text{ mm}$ 。使用北京中航迈特粉冶科技有限公司生产的直径为  $15 \sim 20 \mu\text{m}$  的 316L 粉末,分别按照三种扫描策略打印  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的小方块拉伸件(图 6)和变形件(图 7)样品,分析不同扫描策略的性能。激光功率为  $70 \text{ W}$ ,扫描速度为  $700 \text{ mm/s}$ ,扫描间距为  $50 \mu\text{m}$ ,基板预热温度为  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,层厚  $20 \mu\text{m}$ ,保护气氮气的体积分数为  $99.99\%$ 。成形舱内含氧量(体积分数)稳定在  $10^{-4}$  以下,基板预热温度在  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  以上,打开激光器进行打印。

### 3.2 样品测试分析方法

所有样品经工业酒精浸泡  $1 \text{ h}$ ,用华煜众信 HYZX-30MW 金相显微镜观察表面搭接区特征。经抛光处理后,使用金相显微镜观察亚表面孔隙状况。变形件样品[图 7(b)]的变形翘曲是残余应力大小的宏观表现<sup>[21]</sup>,因此,本实验利用翘曲变形量评估样品内的残余应力大小。测量应力的方法有变形量测量法、扭矩消去测量法、钻孔测量法等<sup>[22]</sup>,本实验采用支撑悬臂梁的变形量测量法。在变形件经线切割支撑后,测其变形挠度。使用 Meilen DS-29 电子天平,基于阿基米德排水法测量不同扫描策略打印样品的致密度。使用万能拉伸试验机(岛津),以  $1 \text{ mm/min}$  的速度对样品进行拉伸试验,直到拉伸件断开,得到其最大拉伸强度。使用华煜众信 HVS-100 显微维氏硬度计在  $9.8 \text{ N}$  力作用下保压

7 s 进行硬度测试,并对每个样品的 5 个不同位置进行测试,最后取其硬度平均值。

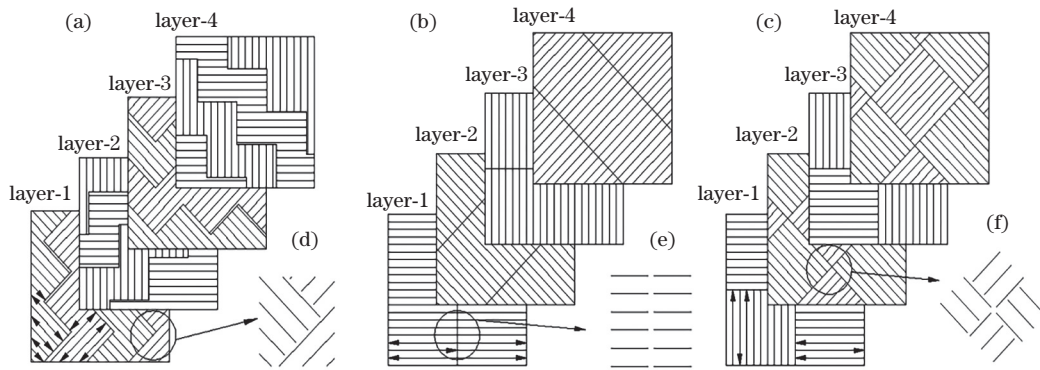


图 5 三种扫描策略及其搭接方式示意图。(a)三角波条带扫描;(b)条带扫描;(c)棋盘扫描;(e)三角波条带搭接;(f)条带搭接;(g)棋盘搭接

Fig. 5 The schematic of three scanning strategies and their overlap ways. (a) Wave\_stripe scanning; (b) stripe scanning; (c) chessboard scanning; (e) the overlap of wave\_stripe; (f) the overlap of stripe; (g) the overlap of chessboard

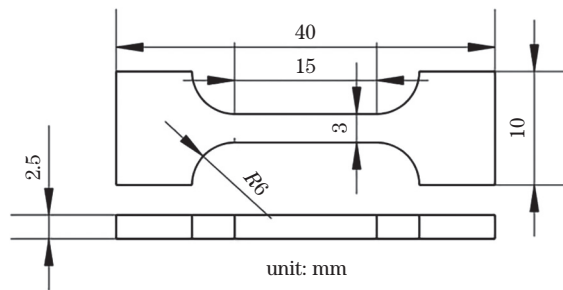


图 6 拉伸试件示意图

Fig. 6 Schematic of tensile specimen

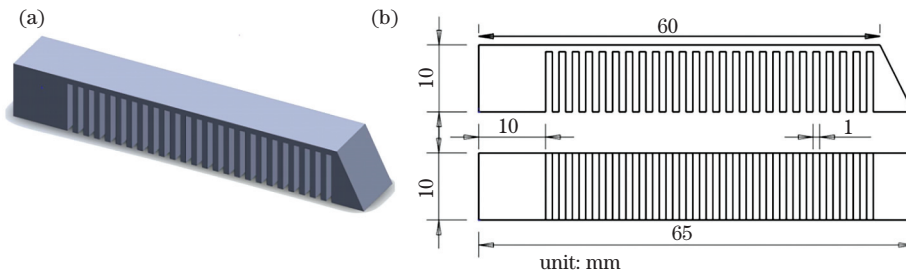


图 7 悬臂结构示意图。(a)悬臂试样;(b)试样设计

Fig. 7 Schematic of overhanging cantilever. (a) Overhanging cantilever specimen; (b) specimen design

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 搭接区表面形貌

使用金相显微镜获取不同扫描策略打印样品的搭接区表面形貌,结果如图 8 所示。在搭接区,三角波条带、棋盘扫描策略的搭接区扫描线以纵横方式搭接,表面飞溅较少,如图 8(a)、(c)的圆圈与箭头所示;条带扫描策略的搭接区扫描线则以直线重叠方式搭接,表面飞溅较多,如图 8(b)的圆圈与箭头所示。此外,图 8(b)与图 8(d)所示的搭接区出现扫描单道间断、能量输

入不足的现象,这是因为在条带搭接区内热影响区的面积较大,有许多已经融化与未融化的粉末颗粒吸附在已经固化的单道表面<sup>[23-25]</sup>,搭接区再次融化时,输入能量不足以完全融化表面吸附的飞溅颗粒与粉末,从而出现单道间断,球化效应会更加明显<sup>[26]</sup>,影响零件的力学性能。纵横搭接方式相对较好,避免了多分区搭接,减少了类似图 8(d)中的缺陷。图 9 为亚表面孔隙形貌图,三角波条带扫描策略所得样品的孔隙数量较少且孔隙尺寸有所减小,因此,推断该扫描方法可以提高样品的致密度。

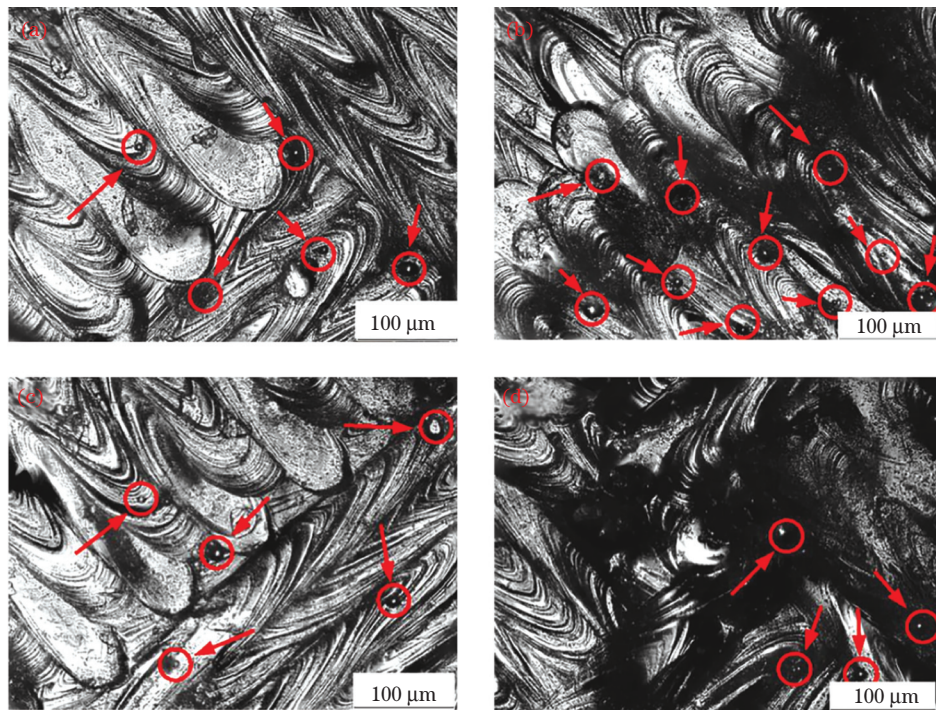


图 8 搭接区表面形貌图。(a)三角波条带扫描策略;(b)条带扫描策略;(c)棋盘扫描策略中两个分区搭接;  
(d)棋盘扫描策略中四个分区交汇处

Fig. 8 Surface morphology of sample overlap area. (a) Wave\_stripe scanning strategy; (b) stripe scanning strategy;  
(c) two overlap area in the chessboard scanning strategy; (d) four overlap area in the chessboard scanning strategy

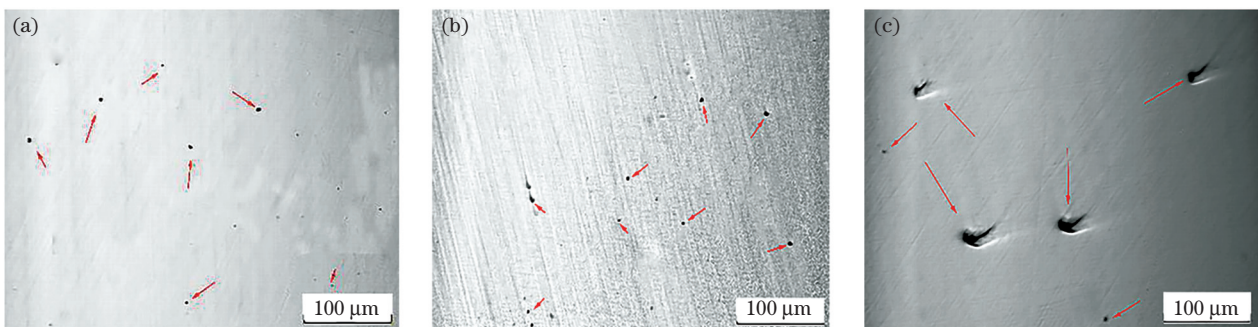


图 9 不同扫描策略所得样品的亚表面内部孔隙形貌。(a)三角波条带扫描;(b)条带扫描;(c)棋盘扫描

Fig. 9 Subsurface morphology of pores by different scanning strategies. (a) Wave\_stripe scanning;  
(b) stripe scanning; (c) chessboard scanning

#### 4.2 残余应力

通过测量悬臂梁的最大挠度评估零件的残余应力。较低的挠度表明其残余应力、打印过程中温度梯度较小。采用不同扫描策略打印的试件的变形量存在一定差异,三角波、条带、棋盘三种分区扫描策略的变形量分别为 0.54 mm、0.55 mm、0.91 mm,如图 10 所示,其中棋盘扫描策略打印的样品变形量最大,即其残余应力最大,而三角波条带扫描策略的变形量最小,且其变形量与传统条带扫描策略的变形量的测量误差小于 0.05 mm,可以认为三角波条带扫描策略继承了条带扫描策略残余应力小的特性。

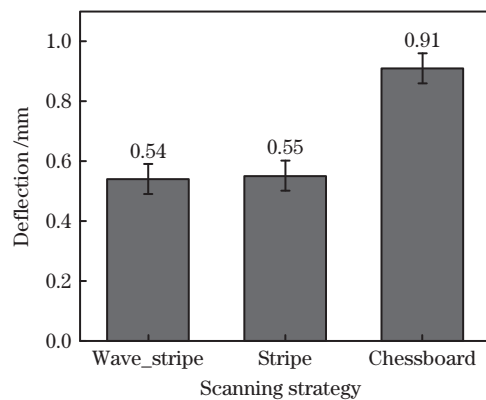


图 10 不同分区扫描策略的样品变形量  
Fig. 10 Sample deflection with different scanning strategies

### 4.3 致密度

致密度是衡量增材制造技术零件成形质量的重要指标之一。本实验采用阿基米德排水法测量样品的致密度,计算公式如下

$$\rho = \left( \frac{m_{\text{air}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{air}} - m_{\text{H}_2\text{O}}} \right) / \rho_{316\text{L}}, \quad (5)$$

式中: $m_{\text{air}}$  为样品在空气中的质量; $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  表示水的密度,为  $1.00 \text{ g/cm}^3$ ;  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  为样品在水中的质量; $\rho_{316\text{L}}$  表示 316L 不锈钢的理论密度,为  $7.98 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho$  为样品的致密度。如图 11 所示,三角波条带、条带、棋盘三种扫描策略的样品致密度分别为  $99.74\%$ 、 $98.78\%$ 、 $96.52\%$ ,由此可见,三角波条带策略可提高样品的致密度。有研究指出条带策略样品的致密度比棋盘策略样品的致密度高<sup>[27]</sup>,而三角波条带策略的样品致密度比两者都要高,其原因可能是三角波条带策略减少了飞溅物与孔隙数量,改善了搭接区域的成形质量。同时,图 9 所示的亚表面孔隙形貌也表明三角波条带扫描策略可以提高样品的致密度。

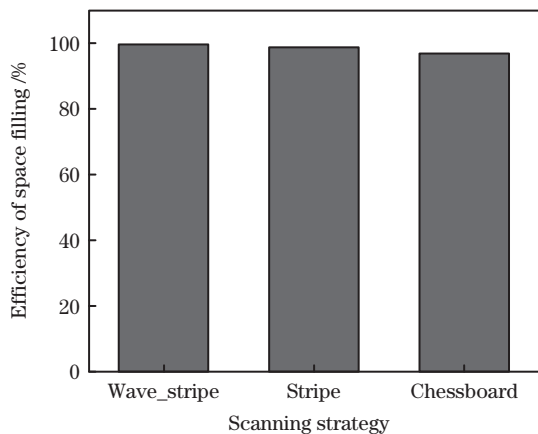


图 11 不同扫描策略样品的致密度对比

Fig. 11 Comparison of efficiency of space filling for samples fabricated by different scanning strategies

### 4.4 拉伸力学性能

分别对三种扫描策略打印得到的样品进行拉伸测试,每种扫描策略做 3 组测试,得到三角波条带扫描策略、条带扫描策略和棋盘扫描策略的平均最大拉伸应力分别为  $596 \text{ MPa}$ 、 $553 \text{ MPa}$ 、 $532 \text{ MPa}$ ,拉伸曲线如图 12 所示。可以看到,三角波条带扫描策略的样品拉伸强度较其他两种扫描策略高,其原因可能是该策略的搭接区缺陷数量减少了,致密度提高了,从而拉伸强度也提高了。

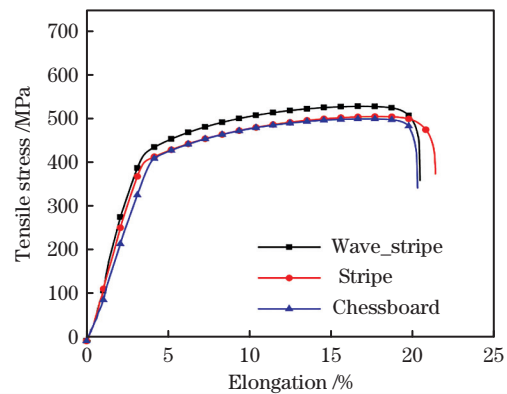


图 12 不同分区扫描策略样品拉伸应力随伸长率变化对比  
Fig. 12 Comparison of tensile stresses of samples changed with elongation using different scanning strategies

### 4.5 硬度

使用华煜众信 HVS-100 显微维氏硬度计在  $9.8 \text{ N}$  力作用下保压  $7 \text{ s}$  进行硬度测试。三角波条带扫描策略、条带扫描策略和棋盘扫描策略的维氏硬度值分别为  $206.57 \text{ HV}$ 、 $204.23 \text{ HV}$  和  $199.96 \text{ HV}$ ,如图 13 所示。在三种扫描策略的硬度测试中,三角波条带扫描策略样品的硬度最高,这是因为样品的孔隙数量减少、尺寸变小,致密度增大,有利于提高维氏硬度。

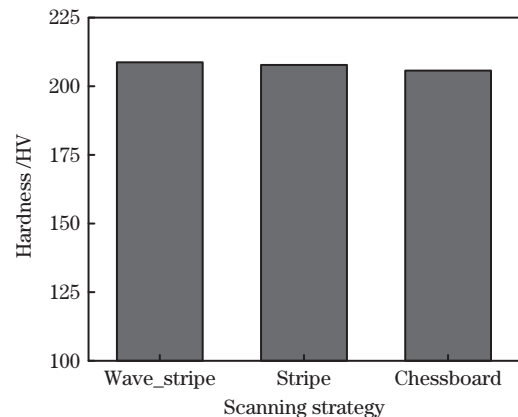


图 13 不同分区扫描策略样品的硬度对比  
Fig. 13 Comparison of hardness of samples with different scanning strategies

## 5 结 论

为了改善分区的搭接质量,提出一种新的三角波条带分区扫描策略。该扫描策略继承了条带扫描策略分区数量少、棋盘扫描策略搭接区直线纵横式搭接的优势。三种扫描策略所得样品的搭接区形貌、残余应力、致密度、拉伸性能以及硬度的实验对比结果表明,相对于商业软件 3DXpert 生成的两种分区路径,三角波条带扫描策略有利于改善搭接区



的搭接质量,成形件孔隙较少,其致密度、维氏硬度、拉伸强度等均有所提高。

在未来的研究中,将进一步针对所提出的三角波条带扫描策略与条带扫描策略和棋盘扫描策略,研究扫描参数及分区策略的优化方法,分析搭接区的温度场以及微观组织结构,争取阐明多激光 SLM 的成形机理,优化扫描路径的规划方法。

### 参 考 文 献

- [1] Mostafaei A, Toman J, Stevens E L, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of differently heat-treated binder jet printed samples from gas- and water-atomized alloy 625 powders[J]. *Acta Materialia*, 2017, 124: 280-289.
- [2] Prashanth K G, Shahabi H S, Attar H, et al. Production of high strength  $Al_{85}Nd_8Ni_5Co_2$  alloy by selective laser melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 6: 1-5.
- [3] Yin B Z, Qin Y, Wen P, et al. Laser powder bed fusion for fabrication of metal orthopedic implants [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47 (11): 1100001.  
尹滨兆, 秦瑜, 温鹏, 等. 激光粉末床熔融制备金属骨植入物[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1100001.
- [4] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.  
顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
- [5] Yang Y Q, Wu S B, Zhang Y, et al. Application progress and prospect of fiber laser in metal additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500012.  
杨永强, 吴世彪, 张越, 等. 光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500012.
- [6] Suryawanshi J, Prashanth K G, Scudino S, et al. Simultaneous enhancements of strength and toughness in an Al-12Si alloy synthesized using selective laser melting [J]. *Acta Materialia*, 2016, 115: 285-294.
- [7] Prashanth K G, Scudino S, Eckert J. Defining the tensile properties of Al-12Si parts produced by selective laser melting [J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 25-35.
- [8] Ren K, Chew Y, Fuh J Y H, et al. Thermo-mechanical analyses for optimized path planning in laser aided additive manufacturing processes [J]. *Materials & Design*, 2019, 162: 80-93.
- [9] 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.
- [10] Thijs L, Verhaeghe F, Craeghs T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(9): 3303-3312.
- [11] Wang Y C, Lei L M, Shi L, et al. Scanning strategy dependent tensile properties of selective laser melted GH4169[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 788: 139616.
- [12] Ali H, Ghadbeigi H, Mumtaz K. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 712: 175-187.
- [13] Cheng B, Shrestha S, Chou K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 240-251.
- [14] Deng S S, Yang Y Q, Li Y, et al. Planning of area-partition scanning path and its effect on residual stress of SLM molding parts[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202003.  
邓诗诗, 杨永强, 李阳, 等. 分区扫描路径规划及其对 SLM 成型件残余应力分布的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202003.
- [15] Qian B, Shi Y S, Wei Q S, et al. The helix scan strategy applied to the selective laser melting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(5/6/7/8): 631-640.
- [16] Foroozmehr E, Kovacevic R. Effect of path planning on the laser powder deposition process: thermal and structural evaluation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51(5/6/7/8): 659-669.
- [17] Salman O O, Brenne F, Niendorf T, et al. Impact of the scanning strategy on the mechanical behavior of 316L steel synthesized by selective laser melting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 255-261.
- [18] Zhang S Y, Wang M, Wang C, et al. The effect of overlap methods on forming qualities of TC4 alloy fabricated by multi-beam selective laser melting technique[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(4): 544-549.  
张思远, 王猛, 王冲, 等. 拼接方式对多光束 SLM 成形 TC4 成形特性的影响[J]. *应用激光*, 2019, 39(4): 544-549.
- [19] Wang D, Wu S B, Yang Y Q, et al. The effect of a

- scanning strategy on the residual stress of 316L steel parts fabricated by selective laser melting (SLM)[J]. *Materials*, 2018, 11(10): E1821.
- [20] 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.
- [21] Song X, Feih S, Zhai W, et al. Advances in additive manufacturing process simulation: residual stresses and distortion predictions in complex metallic components[J]. *Materials & Design*, 2020, 193: 108779.
- [22] Robinson J, Ashton I, Fox P, et al. Determination of the effect of scan strategy on residual stress in laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 13-24.
- [23] Guo W Q, Sun Z, Yang Y, et al. Study on the junction zone of NiTi shape memory alloy produced by selective laser melting via a stripe scanning strategy[J]. *Intermetallics*, 2020, 126: 106947.
- [24] Yu W H, Sing S L, Chua C K, et al. Influence of re-melting on surface roughness and porosity of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 574-581.
- [25] Sing S L, Wiria F E, Yeong W Y. Selective laser melting of titanium alloy with 50 wt% tantalum: effect of laser process parameters on part quality[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 77: 120-127.
- [26] Dursun G, Ibekwe S, Li G Q, et al. Influence of laser processing parameters on the surface characteristics of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 387-393.
- [27] Song Y N, Sun Q D, Guo K, et al. Effect of scanning strategies on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 793: 139879.

## Scanning Strategy to Improve the Overlapping Quality of Partition in Selective Laser Melting

Cen Weihong<sup>1,2</sup>, Tang Huiliang<sup>1,2</sup>, Zhang Jiangzhao<sup>1,2</sup>, Yuan Guixin<sup>1,2</sup>,  
Yan Honghao<sup>1,2</sup>, Long Yu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> *School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;*

<sup>2</sup> *Institute of Laser Intelligent Manufacturing and Precision Processing, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China*

### Abstract

**Objective** Selective laser melting (SLM) is widely used to manufacture complex parts in many fields, such as the biomedical and aerospace industries. However, due to the limited range of a single optical scanner, SLM cannot be used to manufacture large parts that exceed its building size. Therefore, SLM with parallel multilaser beams is attracting the attention of researchers. For the partition scanning strategy required in multilaser beam SLM, there are inevitably overlap areas, and the quality control of these areas has an important influence on the mechanical properties and surface quality of the part. Currently, the stripe scanning strategy with the overlap in parallel lines extension and chessboard scanning strategy with the overlap in vertical and horizontal lines are commonly used. The chessboard scanning strategy has a good controlling defect, alleviating the phenomenon of micropores and bulging in the overlap zones. However, the stripe scanning strategy has better heat dissipation and a smaller temperature gradient, resulting in better mechanical properties. Therefore, a new scanning strategy named “wave\_stripe” is proposed to improve the quality of the overlap zones by taking advantage of the existing scanning strategies.

**Methods** The scanning path generation principle of the wave\_stripe partition scanning strategy proposed in this paper is as follows. First, we use the triangular wave as partition boundary of the bounding box of the sliced contour; it is divided into  $n$  regions (Fig. 1). Second, these regions experience merge processing into wave\_stripe partitions (Fig. 2). Third, the intersection operation is performed between slice contours and wave\_stripe partitions to get zones filled with scanning lines within its bounding box (Fig. 3). Finally, the scanning lines in each partition are arranged and connected into scanning paths. Moreover, the Dijkstra algorithm is used to optimize the beginning and end points of the scanning paths to reduce frequent path jumps and laser switching times (Fig. 4). In the

experiment, the wave\_stripe scanning strategy with the period  $T=4$  mm, amplitude  $h_1=1$  mm, the length of the scanning line  $D_s=5$  mm, and threshold value  $D_t=0.5$  mm, stripe scanning strategy, and chessboard scanning strategy with a partition width of 5 mm is used to manufacture 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm cube specimens, tensile specimens (Fig. 6), and cantilever (Fig. 7) with the condition of scanning speed of 700 mm/s, scanning hatch of 50  $\mu$ m, preheat temperature of 80  $^{\circ}$ C of the substrate, layer thickness of 20  $\mu$ m, 99.99%  $N_2$  as protective gas, and oxygen under  $10^{-4}$  in the chamber. The surfaces of overlap and pores of subsurfaces are examined using a metallurgical microscope. The residual stress is evaluated through the deformation amplitude of the cantilever. The density of specimens is measured using the Archimedes method. The tensile test is performed at the speed of 1 mm/min. The hardness of specimens is analyzed by the average value of the hardness at five different positions using the HVS-100 Vickers hardness machine under 9.8 N pressure for 7 s.

**Results and Discussions** The specimens fabricated by the proposed scanning strategy have fewer spatters on the surface and sufficient energy phenomenon (Fig. 8), showing better overlap quality and metallic color compared with stripe and chessboard scanning strategies. Owing to the large heat-effect zone in the overlap zone, partially melted and unmelted powder particles were stuck on the solidified single track, leading to quality issues, such as discontinuous single tracks, spheroidization, and pores in the subsurface (Fig. 9). Based on the test results, it proves that the proposed scanning strategy performs better in terms of the density, reaching 99.74% (Fig. 11), and has similar deformation as that in stripe scanning strategy, but does better than chessboard scanning strategy, and has higher tensile strength (Fig. 12) due to better quality in the overlap areas, and slightly improves Vickers hardness due to fewer pores (Fig. 13).

**Conclusions** In this study, the wave\_stripe scanning strategy is showed to improve the quality of the junction zone, inheriting the advantages of a small number of partitions of the stripe scanning strategy and vertical and horizontal lines in the overlapping zone of the chessboard scanning strategy. Based on experiment results of the surface morphology of overlapping zone, residual stress, efficiency of space filling, tensile stress, and hardness, the wave\_stripe scanning strategy achieves the quality of overlapping zone with fewer spatters and reduces the porosity of specimens, considerably improving the tensile strength, efficiency of space filling, and Vickers hardness when compared with chessboard and stripe scanning strategies. In the future, to discover a path planning method to optimize print quality of large parts in SLM using parallel multilaser beams, further study will be performed to optimize the parameters of the partition scanning strategy and to analyze the temperature field, microstructure, and its formation mechanism in the overlap zones.

**Key words** laser technique; selective laser melting; path planning; partition scanning strategy; the quality of the overlapping zone

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 150.1135