



表面技术

Surface Technology

ISSN 1001-3660, CN 50-1083/TG

《表面技术》网络首发论文

题目： 基于分形曲线的分区扫描策略对激光熔化沉积基板变形的影响
作者： 姚少科，孙辉磊，李正阳，蒋华臻
网络首发日期： 2022-08-17
引用格式： 姚少科，孙辉磊，李正阳，蒋华臻. 基于分形曲线的分区扫描策略对激光熔化沉积基板变形的影响[J/OL]. 表面技术.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20220817.0911.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于分形曲线的分区扫描策略对激光熔化沉积基板变形的影响

姚少科^{1,2}, 孙辉磊³, 李正阳¹, 蒋华臻¹

(1. 中国科学院力学研究所 宽域飞行工程科学与应用中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 3. 河北科技大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要: **目的** 研究新型扫描策略, 减小激光熔化沉积过程中基材的变形。 **方法** 首先采用分形曲线作为全域扫描策略, 通过激光熔化沉积实验研究了1种传统扫描策略与3种分形扫描策略的基板变形; 其次, 本文提出将分形扫描策略和分区扫描策略相结合, 按照分形曲线的走向扫描各个分区, 形成基于分形曲线的分区扫描策略, 通过激光熔化沉积实验研究了1种传统分区扫描策略与3种基于分形曲线的分区扫描策略的基板变形。 **结果** 无论是全域扫描还是分区扫描, 基板的四条边均发生了竖直向上的翘曲变形。在扫描路径的终点附近, 基板的变形量最大。全域扫描策略下, 基板的最大变形量分别为: 光栅式扫描7.5 mm, Peano曲线3.3 mm, Sierpinski曲线2.5 mm, Lebesgue曲线3.8 mm。分区扫描策略下, 基板的最大变形量分别为: 光栅式顺序7.5 mm, Hilbert曲线顺序3.5 mm, Sierpinski曲线顺序3.2 mm, Lebesgue曲线顺序5.4 mm。 **结论** 基于分形曲线的分区扫描策略可以显著减小基板变形, 还可以灵活的调节扫描线段的方向和数量, 在综合考虑扫描线设计的灵活性和变形量的情况下, 基于Sierpinski曲线的分区扫描策略为最优策略。

关键词: 增材制造; 激光熔化沉积; 扫描策略; 分形曲线; 翘曲变形

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

Effect of Fractal-based Subarea Strategy on Substrate Deformation Produced by Laser Melting Deposition

YAO Shao-ke^{1,2}, SUN Hui-lei³, LI Zheng-yang¹, JIANG Hua-zhen¹

(1. Wide Field Flight Engineering Science and Application Center, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

ABSTRACT: Laser melting deposition is an advanced manufacturing technology that can manufacture complex structures. In laser melting deposition, localized heat source leads to massive residual stresses and pronounced deformations. To reduce the substrate deformation during laser melting deposition and improve the flexibility of processing, a novel scanning strategy based on fractal curve is proposed.

Experiments are carried out with laser experimental platform which consists of a 1 kW fiber laser, a KUKA robot, a coaxial nozzle and a powder feeder. Argon is used as the shield gas. Substrate and powder are 316L stainless steel. The powder size is 50-100 μm . First, whole area scanning strategies are used in laser deposition process. The scanning strategies are raster, Peano curve, Sierpinski curve and Lebesgue curve. The substrate size is 130 mm \times 130 mm \times 5 mm. The deposited area size is 70 mm \times 60 mm. The laser spot diameter is 1.2mm, the laser scanning speed is 5 mm/s, the laser power is 800W, the powder feeding rate is 10.9 g/min. The substrate deformation of one traditional scanning strategy, i.e. the raster, and three scanning strategies with fractal curves is tested with steel ruler. Then, a combination of fractal scanning strategy and subarea scanning strategy is proposed, i.e. fractal-based subarea scanning strategy. Four kinds of subarea scanning strategies are used in the experiment. The deposited area is divided into 64 square subareas. The orders of subareas in different scanning strategies are raster order, Hilbert curve order, Sierpinski curve order and Lebesgue curve order. The substrate size is 130 mm \times 130 mm \times 5 mm. The deposited area size is 72 mm \times 72 mm. The square subarea size is 9 mm \times 9 mm. The laser spot diameter is 1.5 mm, the laser scanning speed is 5 mm/s, the laser power is 900W, the powder feeding rate is 10.9 g/min. The substrate deformation of one traditional subarea scanning strategy, i.e. the raster order, and three subarea scanning strategies with fractal curves is tested with steel ruler.

After the experiment, all four sides of the substrates have warped and deformed vertically upwards. The results show that the

作者简介: 姚少科 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光增材制造。

Biography: YAO Shao-ke (1998—), Male, Master, Research focus: laser additive manufacturing.

通讯作者: 蒋华臻 (1992—), 男, 博士, 主要研究方向为激光增材制造。邮箱: hzjiang6@126.com

Corresponding author: JIANG Hua-zhen(1992—), Male, Doctor, Research focus: laser additive manufacturing. E-mail: hzjiang6@126.com

deformation at the end of laser scanning path is the largest in the case of whole area scanning strategy. Under scanning strategies on whole area, the maximum deformation of the substrate is: 7.5 mm for raster, 3.3 mm for Peano curve, 2.5 mm for Sierpinski curve, 3.8 mm for Lebesgue curve, respectively. The average deformation of the substrate is: 3.6 mm for raster, 1.6 mm for Peano curve, 1.4 mm for Sierpinski curve, 1.9 mm for Lebesgue curve, respectively. Under different subarea scanning strategies, the maximum deformation of the substrate is: 7.5 mm for raster order, 3.5 mm for Hilbert curve order, 3.2 mm for Sierpinski curve order, 5.4 mm for Lebesgue curve order, respectively. The average deformation of the substrate is: 3.7 mm for raster order, 2.1 mm for Hilbert curve order, 2.3 mm for Sierpinski curve order, 2.3 mm for Lebesgue curve order, respectively.

The conclusion is subarea scanning strategy based on fractal curve can significantly reduce substrate deformation and adjust line segments flexibly. The minimum deformation among the subarea scanning strategies is that of Sierpinski curve order, which may be the optimal.

Key words: additive manufacturing, laser melting deposition, scanning strategy, fractal curve, warpage deformation

内应力及其导致的变形是金属增材制造领域的至关重要的问题^[1-3], 它使增材制造金属件容易发生开裂和变形^[4-5], 严重制约了增材制造技术的发展和應用。针对增材制造的内应力和变形问题, 学者们提出了各种解决方案, 包括预热基板^[6]或粉末床^[7], 调整功率、扫描速度等参数^[8], 调整扫描策略^[9], 以及后续机械滚压处理^[10], 热处理^[11]等。

本文将聚焦扫描策略对减少内应力造成的变形问题的研究。近几年, 有关增材制造的扫描策略的研究迅速增加^[12], 其中, 通过调整扫描策略来减小内应力和变形的代表性研究有: Yu等^[13]研究了光栅式扫描、从外向内扫描、从内向外扫描、分形扫描等四种策略所对应的基板变形, 结果表明, 分形扫描策略下基板的变形最小。Ramos等^[14]探索了间歇性扫描策略对SLM工艺的基板变形的影响, 间歇性扫描策略的目的是避免相邻区域的连续扫描, 从而减小热积累, 结果表明, 间歇性扫描策略可以减小变形。Promopattum^[15]等研究了扫描线长度对样品的残余应力的影响, 结果表明, 随着扫描线长度的减小, 样品的残余应力逐渐减小。

上述文献分别代表3类扫描策略: 采用新型扫描图案, 调整扫描次序, 以及减小扫描线长度。其中, Yu等^[13]的研究说明分形曲线具有很好的应用前景, 值得进一步关注, 采用分形曲线作为金属增材制造的扫描策略的研究还有: 刘征宇等^[16]通过有限元方法计算了分形扫描策略和线扫描策略对应的残余应力场, 结果表明, 分形扫描策略能有效减小激光选择性烧结的薄层的残余拉应力。Smith等^[17]采用了Hilbert曲线和Gosper曲线两种分形扫描策略, 结果表明, 与传统扫描策略相比, 采用分形扫描策略可以显著提高样品的密度。事实上, 数学中还有很多种分形曲线可以应用到金属增材制造领域, 例如Peano曲线、Sierpinski曲线、Lebesgue曲线等^[18]。迄今为止, 有关分形曲线用于减少激光增材制造的变形的研究还不充分。

本文采用了Peano曲线、Sierpinski曲线、Lebesgue曲线(以下分别简称为P曲线、S曲线、L曲线)作为扫描策略, 开展了激光熔化沉积实验, 分析了样品的基板变形, 并发现这些扫描策略具有线段方向和数量难以调节的缺点。文献中^[12,19-20]认为, 理想的扫描策略应当具备: 连续扫描, 拐弯次数少, 扫描线段长度易调节, 层间的扫描线段相互交织等特点。本文参考上述特点以及严惠等^[21-22]调整分区扫描顺序的思路, 在全域分形扫描策略的基础上, 提出了基于分形曲线的分区扫描策略: 将全域分割为几个小区域, 然后按照分形曲线的走向依次扫描各个分区。本文研究了3种基于分形曲线的分区扫描策略进行了激光熔化沉积实验, 分析了基板的变形, 结果表明, 基于分形曲线的分区扫描策略不仅能够显著减小基板变形, 还可以灵活的调节扫描线段的数量。本文的研究与分形扫描策略的研究相比, 不仅考虑了扫描策略对应的变形大小, 还关注了扫描线段设计的灵活性。

1 实验

1.1 实验条件

激光熔化沉积实验系统包括1 kW光纤激光器, KUKA机器人, 送粉器, 光内同轴送粉熔覆头, 保护气为氩气。实验所用的基板和粉末均为316L不锈钢, 粉末的粒径为50-100 μm 。

1.2 全域扫描实验

用1种传统扫描策略和3种分形扫描策略进行全域扫描: 光栅式扫描、P曲线、S曲线、L曲线, 如图1所示。

不同扫描策略的激光熔化沉积实验采用的工艺参数相同, 均为: 功率800 W, 扫描速率5 mm/s, 光斑大小1.2 mm, 送粉速率10.9 g/min。实验采用的基板的尺寸为130 mm \times 130 mm \times 5 mm, 沉积层尺寸为70 mm \times 60 mm, 沉积一层。实验过程中将基板平放在实验平台上, 不对基板施加任何约束。

沉积实验结束并待基板冷却至室温后, 将基板平放在平面上, 用钢尺测量基板的四条边的竖直方向的变形量, 每隔10 mm取一个测试点, 钢尺的刻度为0.5mm。

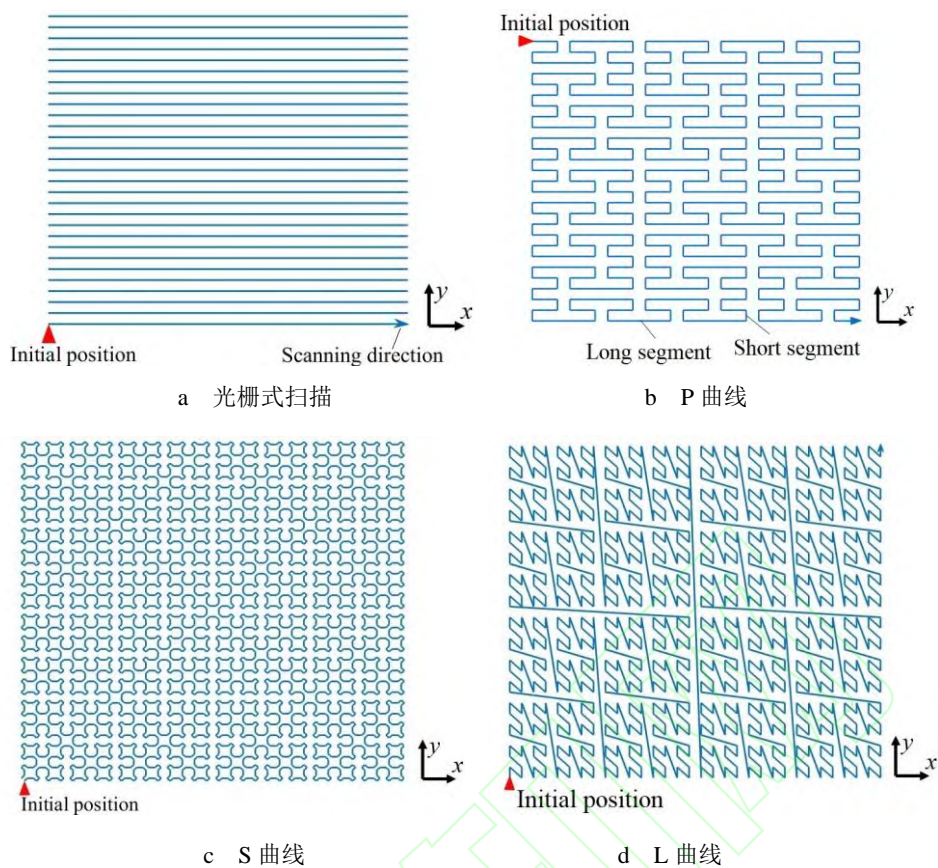


图1 扫描策略

Fig.1 Scanning strategies a) raster b) P curve c) S curve d) L curve

由图1可知，分形曲线是由大量的线段组合而成的特定的图案，以此为扫描策略时，线段总数难以调节，无法保证在样品尺寸不变的情况下调整搭接间距，例如，图2是P曲线中的与x方向平行的线段，搭接间距为 d ，采用该曲线作为扫描策略时，样品在y方向的尺寸只能是 $27d$ ，当样品的尺寸变化时，P曲线就会因为线段总数的限制而难以实现全域扫描。其次，图1(c)(d)所示的S曲线和L曲线还存在疏密不均的问题，这会导致样品在部分区域出现凹陷，另一些部分出现凸起。综上所述，全域分形扫描策略只能在一定的样品尺寸上实施，当样品尺寸变化时，全域分形扫描策略难以实现。

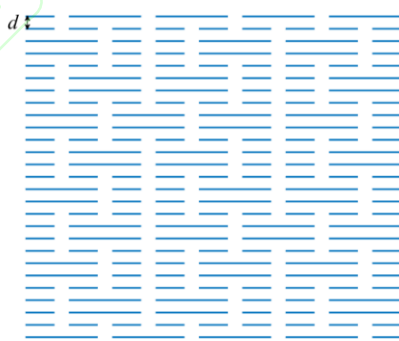


图2 P曲线中的与x方向平行的线段

Fig.2 Line segments parallel to x direction in P curve

1.3 基于分形曲线的分区扫描实验

虽然全域分形扫描策略能够减小基板的变形^[13]，但样品尺寸变化时就难以实施。如果对全域进行分区，在分区内用传统的往复式扫描或光栅式扫描，则扫描线段的数量可以任意设计。因此，本文提出将分形扫描策略和分区扫描策略相结合，按照分形曲线的走向依次扫描各个分区，形成基于分形曲线的分区扫描策略，如图3所示。为了保证沉积时具有连续扫描的特点，本文将分区内部的扫描线段设计为蛇形往复扫描，如图4所示，该设计与图1中的分形曲线相比，更加符合文献中^[12,19-20]提到的拐弯次数少，扫描线

段长度易调节，层间的扫描线段相互交织等特点。

本实验采用了1种传统的分区扫描策略和3种基于分形曲线的分区扫描策略，所有扫描策略对应的扫描线段的布置完全一致，如图4所示，其中，扫描区域被分割为 $8 \times 8 = 64$ 块边长为 9 mm正方形分区，每个正方形分区中采用蛇形往复扫描的策略。不同扫描策略对应的分区的顺序不同，四种顺序分别为：光栅式顺序、Hilbert曲线（以下简称为H曲线）顺序、S曲线顺序、L曲线顺序，如图5所示。

需要说明的是，实验未采用图1(b)所示的P曲线对分区进行顺序编排，这是因为其对应的分区数为 $9 \times 9 = 81$ ，不方便对64块分区进行顺序编排。因此，本文选择了图5(b)所示的H曲线对分区进行顺序编排。

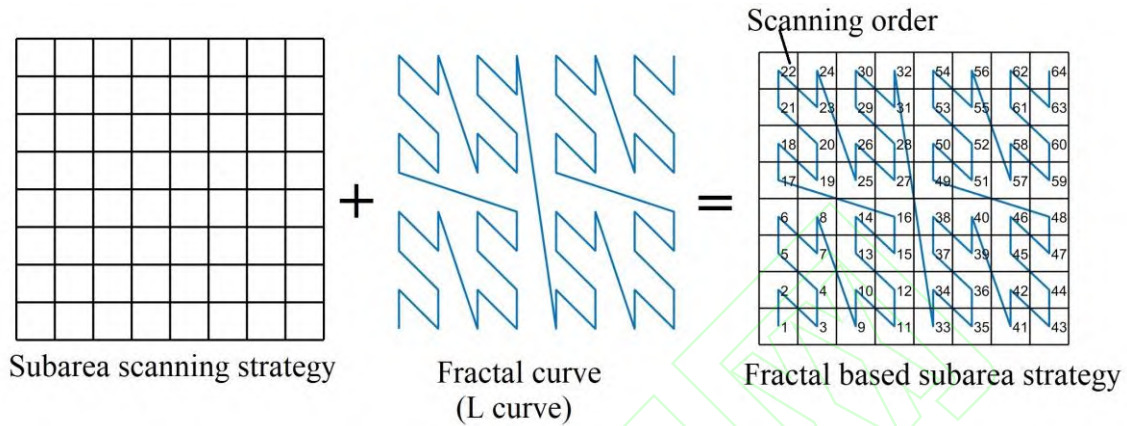


图 3 基于分形曲线的分区扫描策略

Fig.3 Fractal based subarea strategy

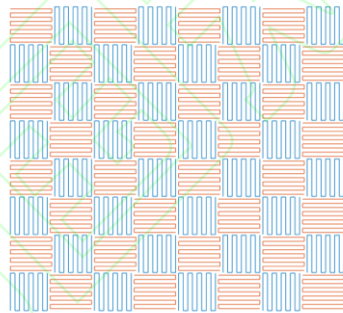
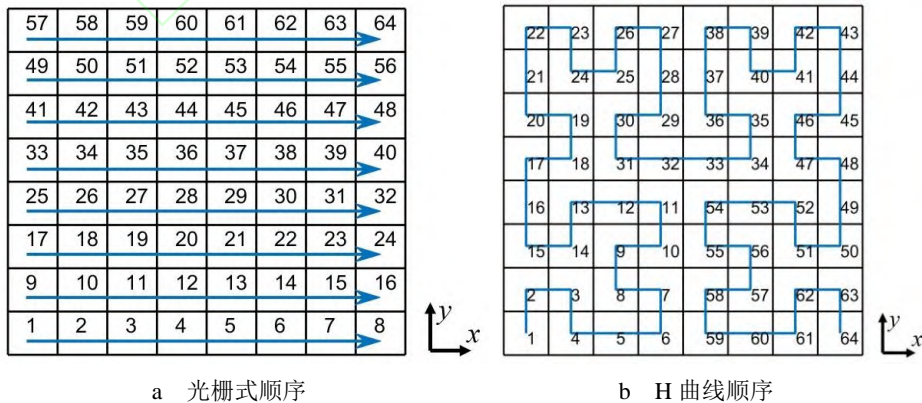


图 4 扫描线段示意图

Fig.4 Schematic diagram of scanning line segments



a 光栅式顺序

b H 曲线顺序

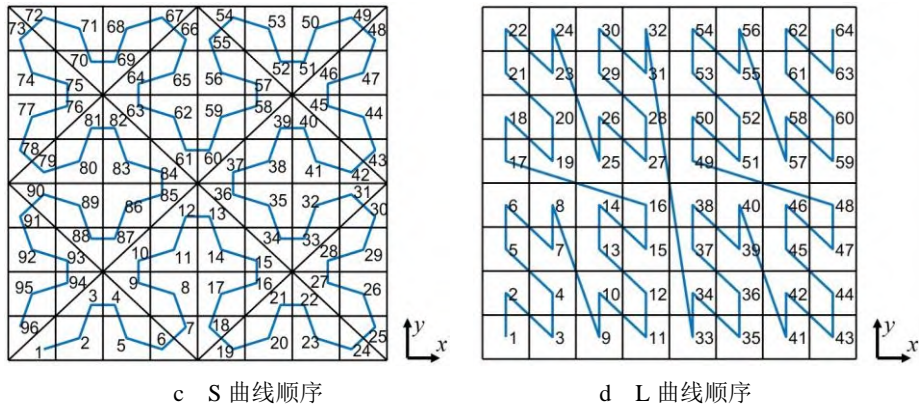


图5 各种分区扫描策略

Fig.5 Subarea scanning strategies a) raster order b) H curve order c) S curve order d) L curve order

不同扫描策略的激光熔化沉积实验采用的工艺参数相同，均为：功率900W，扫描速率5mm/s，光斑大小1.5mm，送粉速率10.9 g/min。实验采用的基板的尺寸为130mm×130mm×5mm，沉积层尺寸为72mm×72mm。实验过程中将基板平放在实验平台上，不对基板施加任何约束。

沉积实验结束并待基板冷却至室温后，将基板平放在平面上，用钢尺测量基板的四条边的竖直方向的变形量，每隔10 mm取一个测试点，钢尺的刻度为0.5mm。

2 结果及分析

2.1 全域扫描策略下的基板变形

1种传统扫描策略和3种分形扫描策略下的激光熔化沉积样品如图6所示。

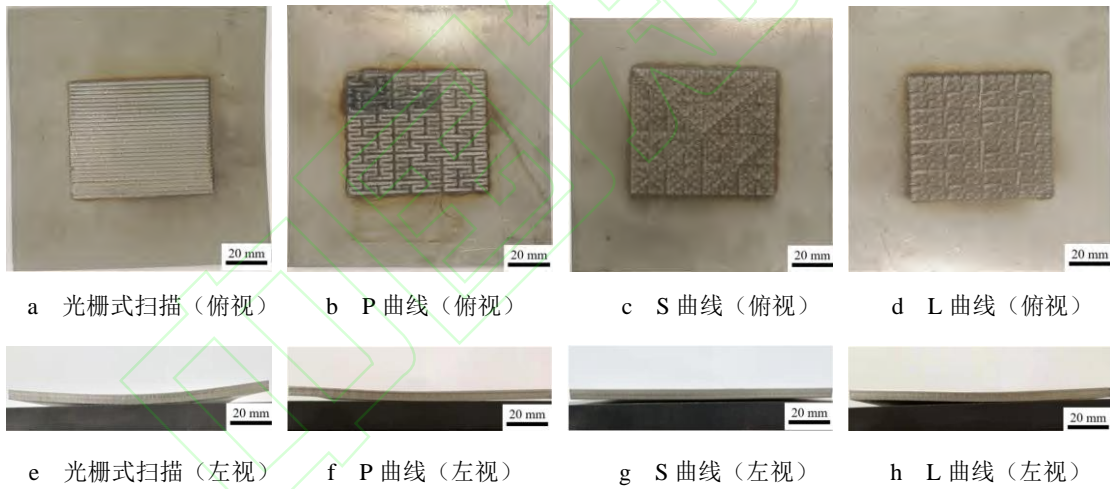
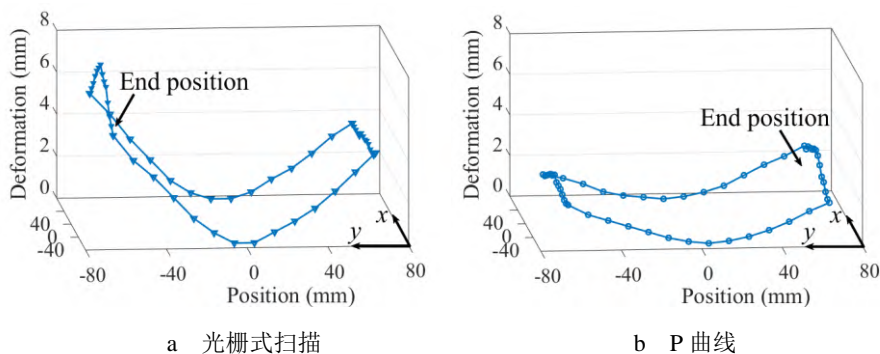


图6 不同扫描策略下的激光熔化沉积样品

Fig.6 Laser deposited specimens by different scanning strategies: a) raster (top view) b) P curve (top view) c) S curve (top view) d) L curve (top view) e) raster (left view) f) P curve (left view) g) S curve (left view) h) L curve (left view)

沉积结束并将基板冷却至室温后，采用钢尺测得的基板四条边的竖直方向变形量如图7所示。



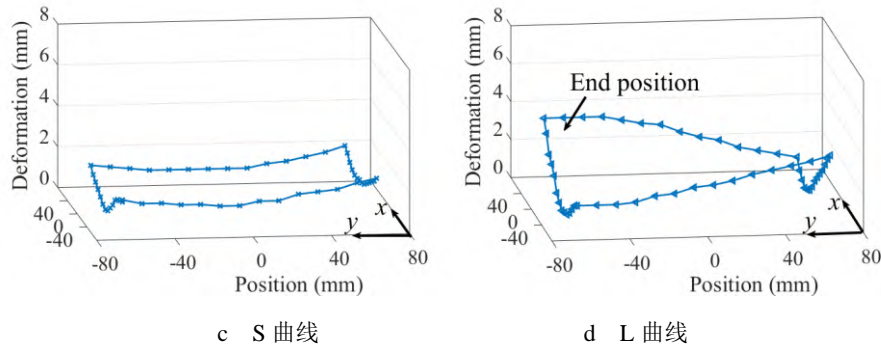


图7 不同扫描策略下的基板变形

Fig.7 Substrate deformations by different scanning strategies a) raster b) P curve c) S curve d) L curve

基板的四条边均发生了竖直向上的翘曲变形，这是因为基板在冷却时，基板顶部会发生剧烈的收缩，从而导致基板向上翘^[23]。

光栅式扫描策略和P曲线扫描策略下，基板的形状与马鞍面类似，对于平行于y轴的边，中部的翘曲变形量小于两端，整条边具有凹向上的特点；对于平行于x轴的边，中部的翘曲变形量大于两端，整条边具有凹向下的特点。平行于x轴的边的平均变形量大约是平行于y轴的边的2.5倍。Dai^[24]等的研究中，基板的变形也具有这样的特点。S曲线的扫描策略下，基板的变形较为均匀，四条边都具有凹向上的特点，平行于y轴的边的平均变形量略大于平行于x轴的边。L曲线的扫描策略下，基板的变形与扭转变形的特点类似，平行于x轴的边具有凹向上的特点，平行于y轴的边大致呈倾斜的直线。

值得注意的是，在激光熔化沉积的终点附近，基板的变形量最大，例如，光栅式扫描策略下，沉积终点附近的边，平均变形量为6.3 mm，而沉积起点附近的边，平均变形量为3.8 mm。P曲线的扫描策略下，沉积终点附近的边，平均变形量为2.6 mm，而沉积起点附近的边，平均变形量为1.9 mm。Nickel等^[25]对激光熔化沉积工艺的研究结果与本文一致，而Sun等^[20]对SLM工艺的研究发现激光扫描起始位置附近基板的变形最大。激光熔化沉积工艺制备不锈钢时，熔池宽度在毫米量级，冷却速率在 10^3 K/s量级，温度梯度在 10^3 K/mm量级，而SLM工艺制备不锈钢时，熔池宽度在微米量级，冷却速率在 10^6 K/s量级，温度梯度在 10^4 K/mm量级^[26]。作者认为熔池尺寸、冷却速率和温度梯度的巨大差异导致了两种工艺下基板变形特点的不同。

对各个基板的所有测点的变形量求平均值和最大值，得到的结果如图8所示。可见分形扫描策略下，基板的平均变形和最大变形均远小于传统扫描策略的变形。无论是平均变形量方面还是最大变形量方面，S曲线都最为优越。

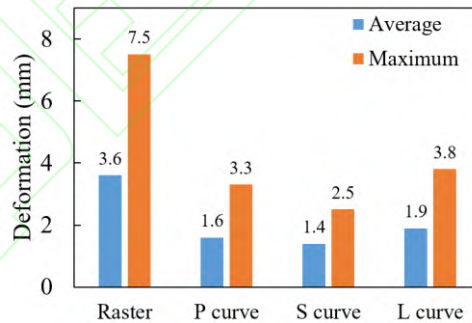
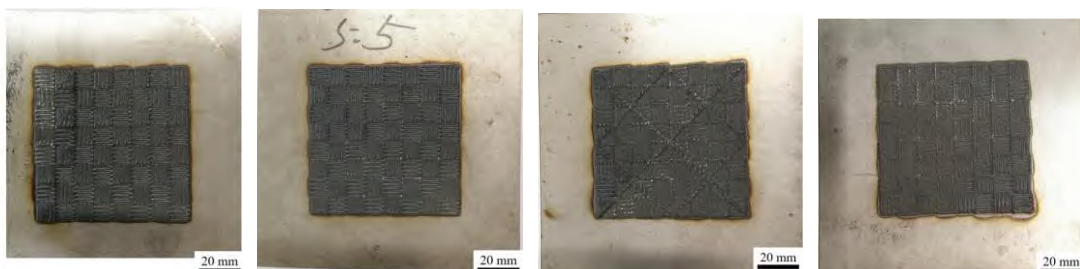


图8 不同扫描策略下基板的平均变形和最大变形

Fig.8 Average deformation and max deformation of substrates by different scanning strategies

2.2 分区扫描策略下的基板变形

1种传统分区扫描策略和3种基于分形曲线的分区扫描策略下的激光熔化沉积样品如图9所示。沉积结束并将基板冷却至室温后，采用钢尺测得的基板四条边的竖直方向变形如图10所示。



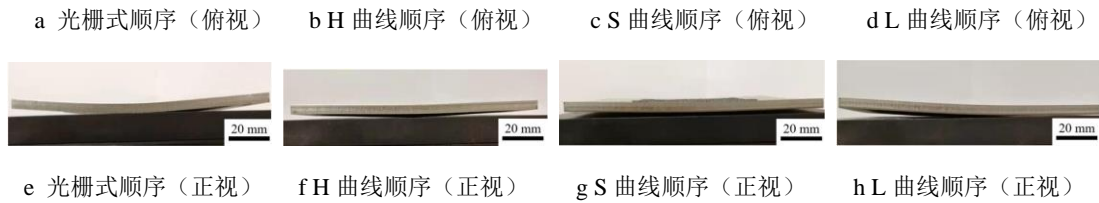


图9 不同扫描策略下的激光熔化沉积样品

Fig.9 Laser deposited specimens by different scanning strategies: a) raster order (top view) b) H curve order (top view) c) S curve order (top view) d) L curve order (top view) e) raster order (front view) f) H curve order (front view) g) S curve order (front view) h) L curve order (front view)

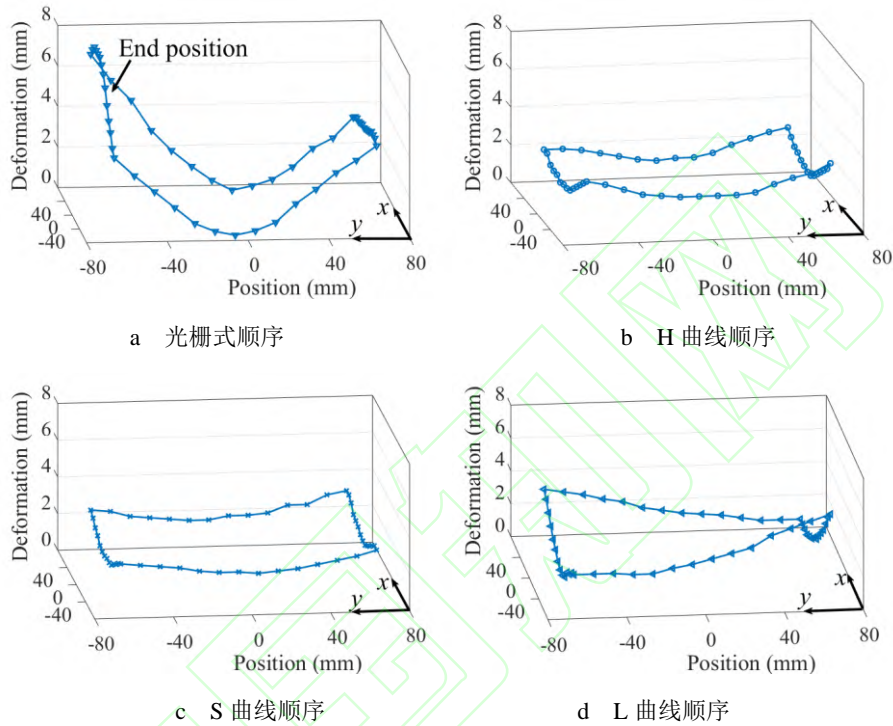


图10 不同分区扫描策略下的基板变形

Fig.10 Substrate deformations by different subarea scanning strategies a) raster order b) H curve order c) S curve order d) L curve order

基于光栅式顺序的分区扫描策略下，基板的形状与马鞍面类似，这与图7(a)所示的基板变形特点相同。基于H曲线和S曲线的分区扫描策略下，基板的变形较为均匀，四条边都具有凹向上的特点，这与图7(c)所示基板变形特点相同。基于L曲线的分区扫描策略下，基板的变形与扭转变形的特点类似，这与图7(d)所示的基板变形特点相同。

对各个基板的所有测点的变形量求平均值和最大值，得到的结果如图11所示。可见基于分形曲线的分区扫描策略下，基板的变形远小于传统的分区扫描策略的变形。从基板变形的平均值来看，采用H曲线的顺序最优越，从基板变形的最大值来看，采用S曲线的顺序最优越。

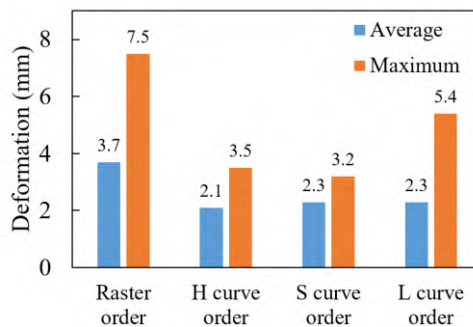


图11 不同分区扫描策略下基板的平均变形和最大变形

Fig.11 Average deformation and max deformation of substrates by different subarea scanning strategies

2.3 变形机理分析

温度梯度机理被广泛用于解释激光热成形^[27-28]（材料未发生熔化）和激光增材制造^[23]（材料发生熔化）中激光加热导致的板材热变形。其主要内容为：在激光的加热下，板材上表面温度会迅速升高，产生很高的温度梯度，而下方材料温度相对较低，上表面的受热膨胀量会大于下方材料，板材会发生背向光源的弯曲，此外，上表面材料的屈服强度会因温度的升高而降低，上表面的膨胀会受到周围的约束而产生压应力，压应力超过屈服强度后，会发生受压的塑性变形。激光辐照结束后，上表面会迅速降温收缩，下方材料会受到上方的传热而继续升温膨胀一段时间再开始降温。冷却至室温时，板材上表面存在受压塑性变形，而下方材料无塑性变形，板材上方的材料体积小于下方，因此，板材最终的变形为朝向光源的弯曲。

为深入理解本文采用的扫描策略减小变形的机理，本文建立了有限元模型，模拟了光栅式扫描和 S 曲线扫描对应的温度场演化过程。模型的温度场通过求解瞬态热传导控制方程获得，方程为：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (1)$$

其中： ρ 是密度， C_p 是比热容， T 是温度变量， t 是时间， k 是导热系数， Q 是单位体积的热生成量。为减小计算量，本文将激光热源简化为沉积层被激光辐照的区域内均匀分布的体热源^[29]。

模拟温度场时考虑了表面对流换热和热辐射散热作用，表达式为：

$$q = h(T - T_e) + \varepsilon_0 \sigma_{SB} (T^4 - T_e^4) \quad (2)$$

式中： q 是材料表面的热通量大小， h 是对流换热系数， T 是材料的温度， T_e 是环境的温度， ε_0 是辐射率， σ_{SB} 是 Stefan-Boltzmann 常数。

此外，模型的几何尺寸和激光熔化沉积工艺参数均与实验相同。模型采用的单元类型为线性六面体单元。模型中材料初始温度和环境温度均为 25°C。

两种扫描策略下，分别选择一个结点做讨论。光栅式扫描策略下，讨论的结点为沉积层的中心点，S 曲线的扫描策略下，讨论的结点相对扫描线的位置如图 12 所示。两个结点的温度历史曲线如图 13 所示。

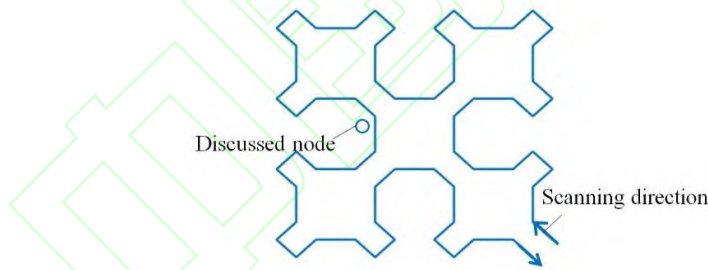


图 12 讨论的结点位置示意图

Fig.12 Schematic of position of discussed node

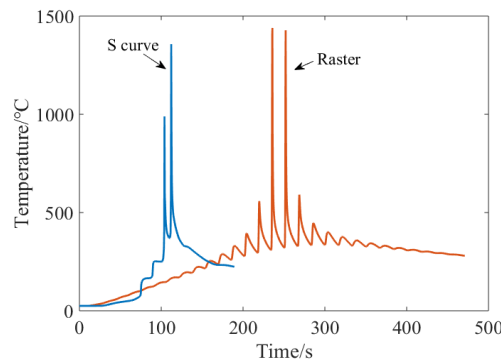


图 13 结点的温度历史

Fig.13 Temperature history of discussed nodes

光栅式扫描策略沉积的总时间大于 S 曲线的扫描策略, 因为光栅式扫描策略存在大量的空行程, 消耗了一定的时间。在光栅式扫描策略下, 温度曲线存在大量的周期性的波动, 因为在每道扫描时, 激光热源先逐渐靠近, 导致结点温度快速上升, 而后逐渐远离, 导致结点温度快速下降。在 S 曲线的扫描策略下, 温度曲线的波动较少, 存在“台阶”段, 该阶段产生的原因是: 在按照图 12 所示的线段沉积过程中, 激光热源先逐渐靠近, 导致结点温度升高, 然后, 在远离一段时间后再次靠近, 导致结点温度的降低较少, 在一段时间内保持稳定。

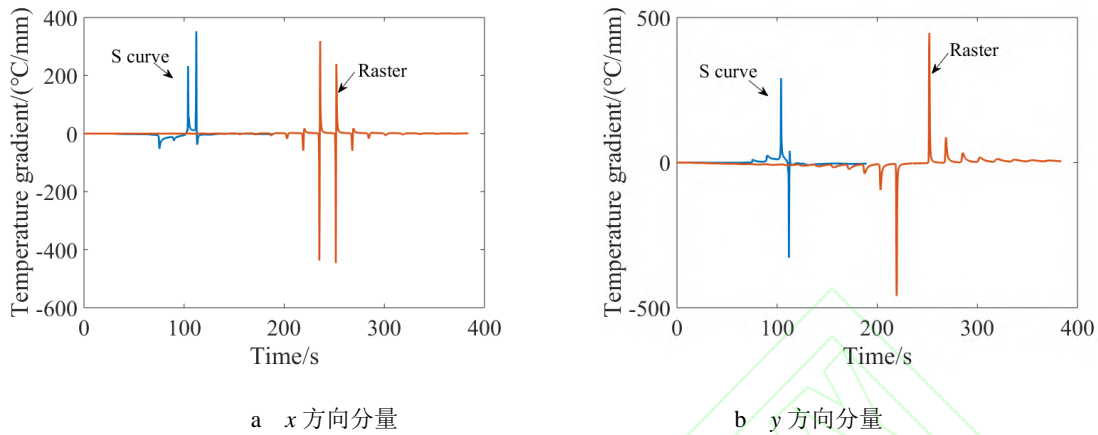


图 14 结点的温度梯度历史

Fig.14 Temperature gradient history of discussed nodes a) x-direction component b) y-direction component

两个结点的温度梯度分量随时间的变化如图 14 所示。在光栅式扫描策略下, 激光沿着 x 正方向扫描, 当激光热源逐渐靠近时, 结点温度梯度的 x 方向分量为负, 当激光热源逐渐远离时, 结点温度梯度的 x 方向分量为正, 负的峰值对应的温度梯度大小更大, 原因: 激光热源逐渐靠近时, 热源的移动和材料的传热共同促进了结点温度的剧烈上升, 而激光热源逐渐远离时, 热源的移动导致结点温度的剧烈下降, 材料的传热作用阻碍了温度的剧烈下降, 温度变化的剧烈程度相对较小。光栅式扫描策略的扫描线关于讨论的结点对称分布, 当激光沉积的位置在结点的不同侧时, 温度梯度的正负不同, 因此, 温度梯度曲线大致呈现反对称的特点。

由图 14 可知, 在 S 曲线的扫描策略下, 温度梯度曲线没有对称性。S 曲线扫描的温度梯度 x 方向分量和 y 方向分量均小于光栅式扫描, 因为在 S 曲线的扫描策略下, 激光热源在经过结点后的一段时间内, 仍然在附近的区域扫描, 这导致沉积层的温度变化较为平缓。S 曲线的扫描策略对应的温度变化相对平缓, 温度梯度的大小相对较小, 因此, 产生的基板变形较小。同理, 在图 1 和图 5 所示的各类分形扫描策略和基于分形曲线的分区扫描策略下, 沉积完一个区域后的一段时间内, 激光热源仍然在附近的区域扫描, 因此, 温度变化较平缓, 温度梯度较小, 对应的基板变形较小。

3 结论

本文提出了将分形扫描策略和分区扫描策略相结合, 按照分形曲线的走向依次扫描各个分区, 形成基于分形曲线的分区扫描策略。该策略可以显著减小基板变形, 还可以灵活的调节扫描线段的方向和数量。通过分析不同扫描策略下的基板变形, 得到的结论如下:

- 1) 在激光熔化沉积的终点位置附近, 基板的变形量最大。基于光栅式顺序的分区扫描策略下, 基板的形状与马鞍面类似, 基于 H 曲线和 S 曲线的分区扫描策略下, 基板的变形较为均匀, 四条边都具有凹向上的特点, 基于 L 曲线的分区扫描策略下, 基板的变形与扭转变形的特点类似。
- 2) 在分形扫描策略与基于分形曲线的分区扫描策略下, 温度变化较平缓, 温度梯度较小, 变形比传统扫描策略小。
- 3) 从基板的最大变形量来看, 在 3 种基于分形曲线的分区扫描策略中, 基于 S 曲线的分区扫描策略最优。

参考文献:

[1] CARPENTER K, TABELI A. On Residual Stress Development, Prevention, and Compensation in Metal Additive Manufacturing[J]. Materials, 2020, 13(2): 255.

[2] FANG Z C, WU Z L, HUANG C G, et al. Review on Residual Stress in Selective Laser Melting Additive Manufacturing of Alloy Parts[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106283.

[3] CHEN W, VOISIN T, ZHANG Y, et al. Microscale Residual Stresses in Additively Manufactured Stainless Steel[J]. Nature

Communications, 2021, 12(1): 6780.

- [4] 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.
- [5] PARRY L, ASHCROFT I A, WILDMAN R D. Understanding the Effect of Laser Scan Strategy on Residual Stress in Selective Laser Melting through Thermo-mechanical Simulation[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 1–15.
- [6] CORBIN D J, NASSAR A R, REUTZEL E W, et al. Effect of Substrate Thickness and Preheating on the Distortion of Laser Deposited Ti-6Al-4V[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2018, 140(6): 061009.
- [7] MALY M, HOLLER C, SKALON M, et al. Effect of Process Parameters and High-temperature Preheating on Residual Stress and Relative Density of Ti-6Al-4V Processed by Selective Laser Melting[J]. Materials, 2019, 12(6): 930.
- [8] VASTOLA G, ZHANG G, PEI Q X, et al. Controlling of Residual Stress in Additive Manufacturing of Ti6Al4V by Finite Element Modeling[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 231-239.
- [9] WU Q, MUKHERJEE T, LIU C, et al. Residual Stresses and Distortion in the Patterned Printing of Titanium and Nickel Alloys[J]. Additive Manufacturing, 2019, 29: 100808.
- [10] COLEGROVE P A, DONOGHUE J, MARTINA F, et al. Application of Bulk Deformation Methods for Microstructural and Material Property Improvement and Residual Stress and Distortion Control in Additively Manufactured Components[J]. Scripta Materialia, 2017, 135: 111–118.
- [11] BAERE D D, CAUWENBERGH P V, BAYAT M, et al. Thermo-mechanical Modelling of Stress Relief Heat Treatments after Laser-based Powder Bed Fusion[J]. Additive Manufacturing, 2021, 38: 101818.
- [12] JIA H, SUN H, WANG H, et al. Scanning Strategy in Selective Laser Melting (SLM): a Review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(9-10): 2413-2435.
- [13] YU J, LIN X, MA L, et al. Influence of Laser Deposition Patterns on Part Distortion, Interior Quality and Mechanical Properties by Laser Solid Forming (LSF)[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528: 1094-1104.
- [14] RAMOS D, BELBLIDIA F, SIENZ J. New Scanning Strategy to Reduce Warpage in Additive Manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 554-564.
- [15] PROMOPATUM P, YAO S C. Influence of Scanning Length and Energy Input on Residual Stress Reduction in Metal Additive Manufacturing: Numerical and Experimental Studies[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 247-259.
- [16] 刘征宇, 宾鸿赞, 张小波, 等. 生长型制造中扫描路径对薄层残余应力场的影响[J]. 中国机械工程, 1999, 10(8): 848-850.
LIU Zheng-yu, BIN Hong-zan, ZHANG Xiao-bo, et al. The Influence of the Fractal Scanning Path on the Residual Stress Field of the Layer in Material Increase Manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(8): 848-850.
- [17] SMITH C S, Aboulkhair N, Parry L, et al. Fractal Scan Strategies for Selective Laser Melting of ‘Unweldable’ Nickel Superalloys[J]. Additive Manufacturing, 2017, 15: 113-122.
- [18] SAGAN H. Space-filling Curves[M]. New York: Springer, 1994: 31-83.
- [19] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. A Tool-path Generation Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1-4): 173-183.
- [20] SUN L, REN X, HE J, et al. Numerical Investigation of a Novel Pattern for Reducing Residual Stress in Metal Additive Manufacturing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 67: 11-22.
- [21] 严惠, 王霄, 梁绘昕, 等. 选区顺序对激光直接制造TC4残余应力及变形的影响[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 0242002.
YAN Hui, WANG Xiao, LIANG Hui-xin, et al. Influence of Scanning Order on Residual Stress and Deformation in Laser Direct Manufacturing of TC4[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 0242002.
- [22] 严惠. 激光熔化沉积分区扫描成形TC4构件应力变形控制及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 37-42.
YAN Hui. Study on the Residual Stress and Deformation Controlling and Mechanical Properties of TC4 Parts by Subarea Scanning Strategy in Laser Melting Deposition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 37-42.
- [23] MERCELIS P, KRUTH J P. Residual Stresses in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(5): 254-265.
- [24] 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.
- [25] NICKEL A H, BARNETT D M, PRINZ F B. Thermal Stresses and Deposition Patterns in Layered Manufacturing[J]. Materials Science

- & Engineering A, 2001, 317(1-2): 59-64.
- [26] ZHANG Y, HUANG W. Comparisons of 304 Austenitic Stainless Steel Manufactured by Laser Metal Deposition and Selective Laser Melting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 324-333.
- [27] 石永军. 激光热变形机理及复杂曲面板材热成形工艺规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 4-6.
SHI Yong-jun. Research on Laser Bending Mechanism and Forming Process Plan for 3D Curved Plates[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 4-6.
- [28] SHI Y, YAO Z, SHEN H, et al. Research on the Mechanisms of Laser Forming for the Metal Plate[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 1689-1697.
- [29] CAO J, GHARGHOURI M A, NASH P. Finite-Element Analysis and Experimental Validation of Thermal Residual Stress and Distortion in Electron Beam Additive Manufactured Ti-6Al-4V Build Plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 409-419.

