

金属材料激光增材制造路径规划研究现状与展望

柴媛欣¹, 邢飞^{1,2,✉}, 李殿起^{1,✉}, 史建军², 苗立国¹, 卞宏友¹, 闫成鑫¹

1 沈阳工业大学机械工程学院, 沈阳 110870

2 南京中科煜宸激光技术有限公司, 南京 210038

激光增材制造技术可成形任意复杂形状零件, 广泛应用于航空航天、汽车、船舶、医疗器具等领域。激光增材制造技术根据粉末提供方式的差异可分为粉末床预置铺粉的选区激光熔化技术和送粉器同步送粉的激光定向能量沉积技术。路径规划是激光增材制造过程中的重要步骤, 当采用不同的路径策略时, 即使硬件设备和工艺参数保持一致, 零件的成形质量以及力学性能也会存在较大差异。目前, 众多学者针对不同目标的路径规划策略展开了广泛的研究。本文总结了激光增材制造技术路径规划的研究现状, 分析了两类目标的路径规划策略, 即提高成形质量以及力学性能。最后对未来激光增材制造路径规划的研究进行了展望, 为其进一步研究提供了方向。

关键词 激光增材制造 路径规划 成形质量 力学性能

中图分类号: TG14; TH162 文献标识码: A

Status and Prospect of Research on Laser Additive Manufacturing Path Planning for Metallic Materials

CHAI Yuanxin¹, XING Fei^{1,2,✉}, LI Dianqi^{1,✉}, SHI Jianjun², MIAO Ligu¹, BIAN Hongyou¹, YAN Chengxin¹

1 School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China

2 Nanjing Zhongke Raycham Laser Technology Co., Ltd., Nanjing 210038, China

Laser additive manufacturing technology can shape arbitrarily complex parts and is widely used in aerospace, automotive, marine, medical apparatus, and other fields. Depending on the powder delivery method, laser additive manufacturing technology can be divided into selective laser melting technology with pre-positioned powder lay down in the powder bed and laser directed energy deposition technology with simultaneous powder delivery in the powder feeder. Path planning is an essential step in the laser additive manufacturing process. When different path strategies are used, the part forming quality and the mechanical properties can vary greatly, even if the hardware equipment and process parameters remain consistent. Many scholars have conducted extensive research on path planning strategies for different targets. This paper summarizes the current research status of laser additive manufacturing path planning. It compares and analyzes the path planning strategies for two goals: improving the forming quality and mechanical properties. Finally, future research on laser additive manufacturing path planning is prospected to provide a direction for further research.

Key words laser additive manufacturing, path planning, forming quality, mechanical property

0 引言

激光增材制造 (Laser additive manufacturing, LAM) 起源于 20 世纪 90 年代, 是一种利用高能激光束熔化金属粉末的先进快速成形制造技术^[1-6], 具有无需模具、材料消耗少、生产周期短、成形质量优异等特点, 尤其适用于结构复杂化、轻量化和高性能化的零件成形^[7-13]。LAM 技术按照粉末提供方式的差异主要分为粉末床预置铺粉的选区激光熔化 (Selective laser melting, SLM) 技术和送粉器同步送粉的激光定向能量沉积 (Laser directed energy deposition, LDED) 技术^[14-19]。

SLM 技术的成形原理如图 1 所示。向成形舱内充入惰性保护气体 (如氩气或氮气), 降低密闭空间内氧气含量, 通过刮刀将粉料缸中的金属粉末均匀铺敷在基板上。数控系统根据激光扫描信息控制振镜的偏转, 对每一层的金属粉末进行有选择性的熔融。在激光作用下, 激光束按照预先设定的路径策略成形一层后, 成形缸下降、粉料缸上升一个层厚

距离, 而后刮刀根据设定的层厚自动刮粉铺置粉末进行下一层的成形。成形过程不断循环, 直至零件加工完成。

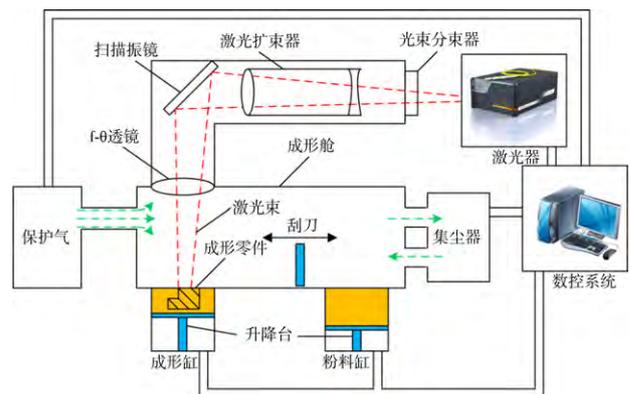


图 1 选区激光熔化技术成形原理

Fig. 1 Schematic diagram of SLM technology

LDED 技术的成形原理如图 2 所示。高能激光束通过光路系统聚焦于基体表面形成熔池, 金属粉末由加工头送粉

基金项目: 国家科技重大专项 (2019-VII-0004-0144); 辽宁“百千万人才工程”资助项目 (LNBQW 2020B0050)

This work was financially supported by the National Science and Technology Major Project (2019-VII-0004-0144) and the Liaoning BaiQianWan Talents Program (LNBQW 2020B0050).

✉ xingfei@raycham.com; dianqi@126.com

喷嘴射出汇聚至熔池,并在惰性气体(如氩气)的保护下进行熔化,随着激光光斑的移动,送入熔池的金属粉末重复熔凝与基板冶金结合形成沉积层。成形过程中,根据数控系统规划的路径完成单层沉积后,加工头提升相应的高度沉积下一层,逐层重复实现单层到多层的冶金结合,进而实现从零件的三维模型到实体金属成形件的直接制造。

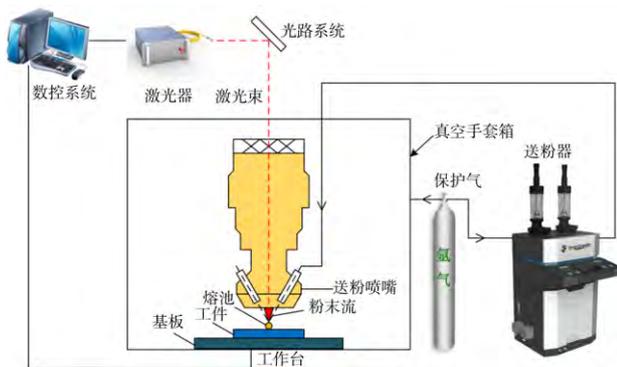


图2 激光定向能量沉积技术成形原理
Fig. 2 Schematic diagram of LDED technology

LAM 具有逐点、逐线、逐层的成形特性,路径规划是 LAM 过程中的关键步骤,国内外学者对其展开了广泛深入的研究^[20-24]。图3为采用两种典型路径策略(Zig-Zag 扫描方式、轮廓偏置扫描方式)的成形示例。由图3可以看出,在不同的路径策略下 LAM 成形样件的表面质量以及填充质量会有明显不同,当扫描路径之间存在间隙时(Zig-Zag 扫描方式),零件的加工边缘会出现塌陷影响成形质量,随着缺陷累积会出现不能继续加工,甚至零件报废的情况。路径规划的合理性显著影响成形件的表面粗糙度、成形精度、耐磨耐蚀性能以及翘曲变形程度,也可归纳为成形质量以及力学性能的改变^[25-27]。本文从成形质量和力学性能两方面综述了路径规划策略并展望其未来潜在的研究方向。

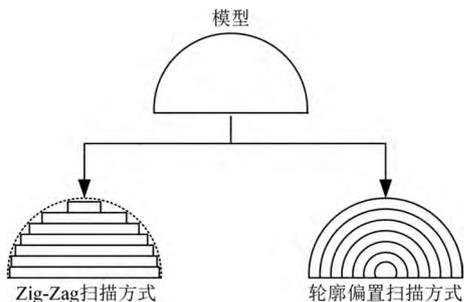


图3 路径策略对成形质量的影响
Fig. 3 Illustration of path strategies influencing forming quality

1 提高成形质量

LAM 技术按照设定的路径策略成形零件时,受散热条件限制会不可避免地产生热量累积现象,这种热积累会引起熔池特征动态变化,最终导致成形样件的表面凹凸不平,影响表面质量^[28-30]。Zhao 等^[31]提出了一种优化的 Zig-Zag 分区扫描路径。将复杂的截面轮廓划分为多个简单的非孔洞子区域,每个子区域的扫描路径是连续的,优化子区域中极值点处的扫描路径。图4为优化前后 Zig-Zag 分区扫描策略 LDED 成形对比试验。对比传统的 Zig-Zag 分区扫描策略,路

径优化后的成形零件表面光滑,粉末粘附减少,成形质量显著提升。

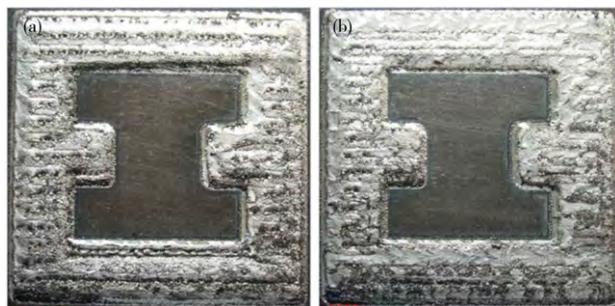


图4 (a)传统扫描策略成形样件;(b)优化扫描策略成形样件^[31]
Fig. 4 (a) Forming sample by original scanning strategy; (b) forming sample by optimized scanning strategy^[31]

Zhang 等^[32]提出了一种适用于 SLM 技术、可调整扫描线长度的双向线子区域扫描策略,他们分别采用双向线子区域策略和传统的轮廓偏置策略进行单道、多道成形试验。基板冷却时间随着轮廓偏置策略扫描线长度的增加而延长,会导致金属粉末熔化不完全,成形轨迹凹凸不平。由于双向线子区域策略的扫描线长度可实时调整,升高了子区域的温度,保证金属粉末有效熔融,成形轨迹光滑平整。

卞宏友等^[33]提出了一种基于层面温度分区的路径策略,通过红外热像仪实时采集 LDED 过程中的熔池温度,提取不同子区域轮廓并消除局部尖角,针对不同子区域采用自适应间距的路径策略,实现动态路径规划。图5为分别采用基于层面温度分区策略与传统分组平行策略的成形样件。通过对比图5a中标注的1、2、3处与图5b中标注的4、5、6处样件表面形貌可知,基于层面温度分区路径策略的成形样件的表面较为光滑平整,零件的成形质量显著提高。

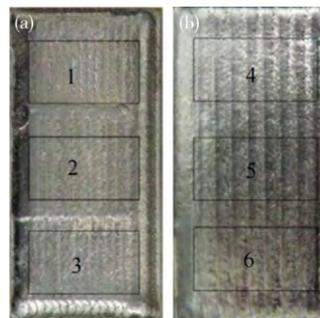


图5 (a)分区策略成形样件;(b)分组平行策略成形样件^[33]
Fig. 5 (a) Forming sample by partitioning strategy; (b) forming sample by grouping parallel strategy^[33]

Yeung 等^[34]提出了一种适用于 SLM 技术的连续同心扫描策略,分别采用连续同心策略、连续直线策略和恒定扫描速度策略进行成形试验。如图6中的红色和紫色箭头所示,采用恒定扫描速度策略会分别在打印起始位置产生凸起,在打印停止位置产生孔洞。连续直线策略有效消除了孔洞现象,凸起程度也有一定降低,但由于相邻扫描线之间存在急转弯使局部区域产生热力累积,凸起难以消除。连续同心策略避免了路径急转弯(中心除外)的产生,试件表面质量最佳。

Zhang 等^[35]提出了一种重熔扫描策略,分别采用重熔扫描策略、平行扫描策略、Zig-Zag 扫描策略以及分区扫描

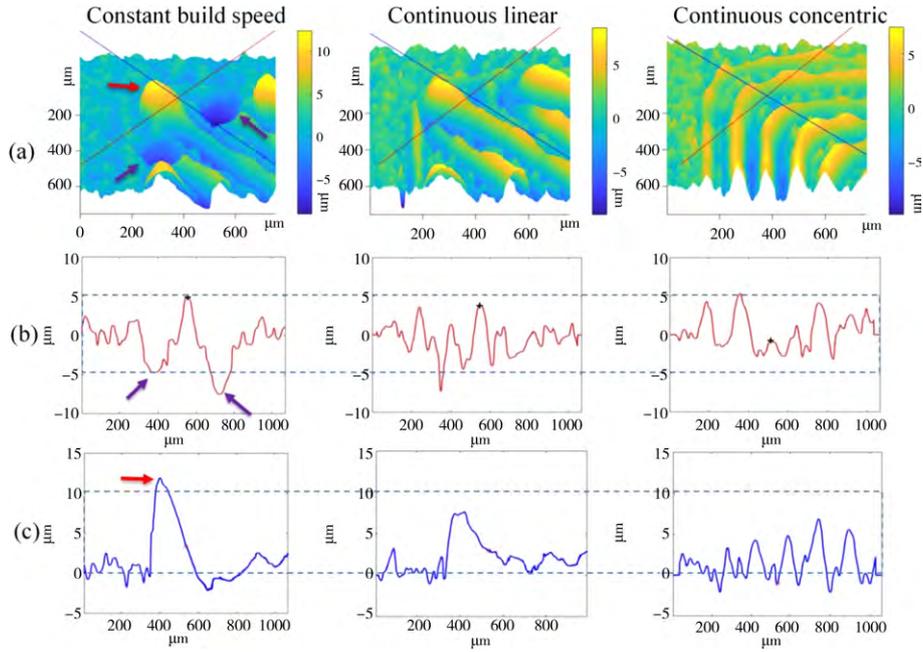


图6 (a) 沉积表面形貌;(b)红色曲线的高度剖面;(c)蓝色曲线的高度剖面^[34] (电子版为彩图)

Fig. 6 (a) Deposited surface topographies; (b) height profile along the red curve; (c) height profile along the blue curve^[34]

策略进行 SLM 成形试验。图 7 为不同路径策略成形样件的表面形貌及实验测量的表面粗糙度值。平行扫描策略成形样件表面存在明显凸起,表面粗糙度为 $(13.8 \pm 1.3) \mu\text{m}$; Zig-Zag 扫描策略成形样件表面存在球化缺陷,表面粗糙度为

$(11.4 \pm 1.1) \mu\text{m}$;分区扫描策略成形样件边界存在明显凸起,表面粗糙度为 $(15.4 \pm 2.1) \mu\text{m}$;重熔扫描策略成形样件表面相对光滑,无球化缺陷,表面粗糙度为 $(10.2 \pm 0.9) \mu\text{m}$ 。

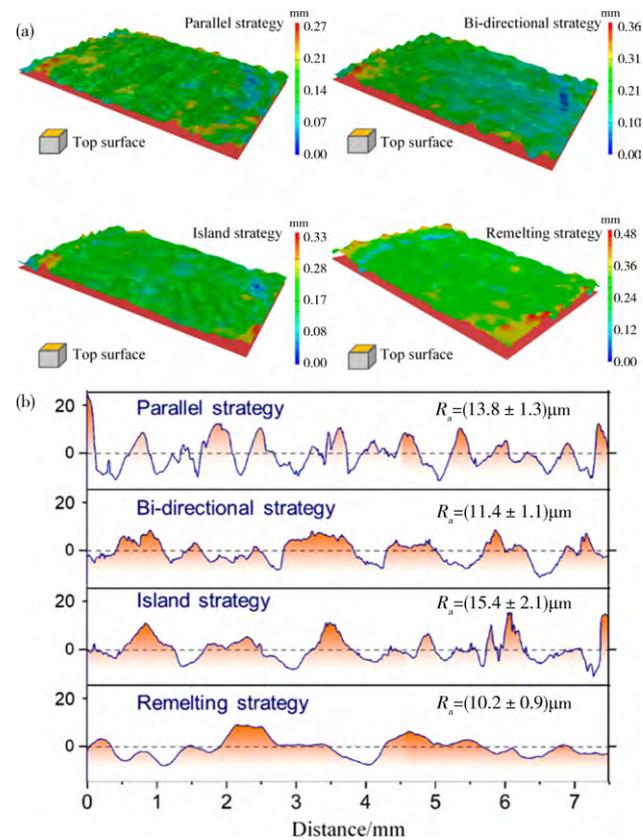


图7 不同路径策略成形样件:(a)表面形貌;(b)表面粗糙度^[35] (电子版为彩图)

Fig. 7 Forming samples by different path strategies: (a) surface topographies; (b) surface roughness^[35]

LAM 技术采用传统平行扫描路径成形零件时,在轮廓边缘经常出现局部凸起的过填充现象或局部凹陷的填充不足现象,影响零件的成形质量^[36-39]。为解决成形过程中因路径策略导致的过填充或填充不足问题,卞宏友等^[40]提出了一种基于轮廓极值点识别判断的优化分组平行扫描路径,采用极值点处增线式填充策略生成了外偏置轮廓扫描路径,避免了因扫描间距存在误差引起的填充不足问题;采用极值点与过渡扫描线位置关系判定策略生成了分组扫描路径,避免了因扫描线连接不当引起的过填充问题。图 8 为生成的优化分组平行扫描路径 LDED 成形试验实例。结果表明,优化分组平行扫描路径可避免成形过程中的过填充或填充不足现象,提高了零件表面的平整度,保证了零件的成形质量。

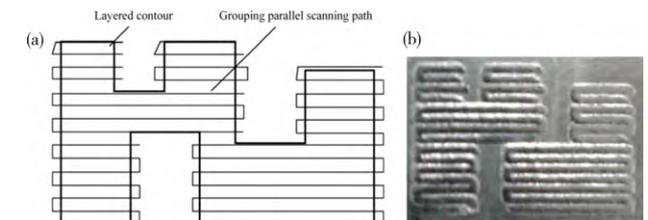


图8 (a) 分组平行扫描路径;(b)成形样件^[40]

Fig. 8 (a) Grouping parallel scanning path; (b) forming sample^[40]

2 提高力学性能

大量研究表明,不同路径策略成形的样件在力学性能方面具有显著差异^[41-45]。Mohanty 等^[46]提出了一种蜂窝扫描策略,将 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的样块划分为 25 个 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的蜂窝,生成用于处理蜂窝的随机序列,并采用遗传算法从六种扫描策略(内螺旋、外螺旋、反向平行、平行、平行

交错、反向平行交错)中确定每个蜂窝的填充路径,从而确保较均匀的温度梯度。与传统的六种策略单独成形相比,通过SLM技术成形的零件的蜂窝扫描策略减小了零件的翘曲变形程度。

通过LAM技术成形大型零件时,连续扫描路径会导致成形过程中的温度场分布不均衡,产生成形热应力,进而引起零件翘曲变形^[47-51]。针对此类缺陷,王伟等^[52]提出了一种基于矩形分区的区间合并和区域排序的路径策略。对形状复杂的二维截面矩形分区后进行区间合并与区域排序,确保温度场分布均衡,从而减小成形零件的热变形。图9分别为采用传统连续扫描策略和分区扫描策略成形的样件,连续扫描成形的样件最大变形量约为14.2 mm,而采用分区扫描成形的样件最大变形量约为4.0 mm。结果表明,分区扫描较连续扫描成形的样件翘曲变形量明显减小,成形效果更好。

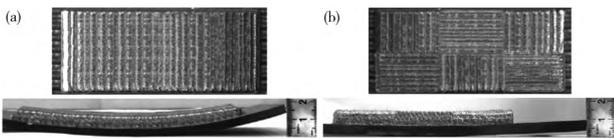


图9 (a)连续扫描成形样件;(b)分区扫描成形样件^[52]
Fig. 9 (a) Forming sample by continuous scanning; (b) forming sample by partitioning scanning^[52]

Li等^[53]分别采用单向扫描路径和交错扫描路径成形了316L不锈钢试样,探究了路径策略对LDED技术成形样件抗拉强度和伸长率的影响,并与锻造的316L不锈钢试样的性能指标进行对比,如表1所示。结果表明,两种路径策略成形的316L试样的抗拉强度均远高于锻造试样,尤其是交错扫描路径试样(平行)的抗拉强度比锻造试样高约82%。然而,与锻造试样相比,两种路径策略成形试样的伸长率明显较低。导致这种现象出现的可能原因为:LDED成形过程中,快速凝固导致晶粒细化,与传统锻件相比,其成形性能更高,但成形过程中不可避免地产生内应力和微孔,导致其延展性降低。

表1 沉积样件、锻造样件的抗拉强度和伸长率^[53]
Table 1 Tensile strength and elongation of deposited samples and forged samples^[53]

| 成形方式 | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% |
|--------------|----------|-------|
| 单向扫描拉伸试样(垂直) | 812.4 | 14.7 |
| 单向扫描拉伸试样(平行) | 900.6 | 9.3 |
| 交错扫描拉伸试样(平行) | 956.3 | 18.9 |
| 交错扫描拉伸试样(垂直) | 941.7 | 19.4 |
| 锻造拉伸试样 | 526.4 | 43.2 |

Zhang等^[54]提出了一种改进的中轴路径策略,以降低SLM过程中的残余应力和变形。该策略通过连续改变扫描区域边界曲线的扫描方向来降低残余应力,从而减小零件的翘曲量。基于有限元仿真,他们分析了中轴路径、平行扫描路径和分区扫描路径成形试样的应力场分布和翘曲量。如图10所示,平行扫描、分区扫描和改进的中轴路径的最大残余应力分别为10 600 MPa、10 900 MPa、6 710 MPa,最大翘曲变形量分别为156 mm、160 mm、89 mm。改进后中轴路径策

略的残余应力和翘曲变形量明显小于其他两种策略,应力场分布更均匀,翘曲变形更小。

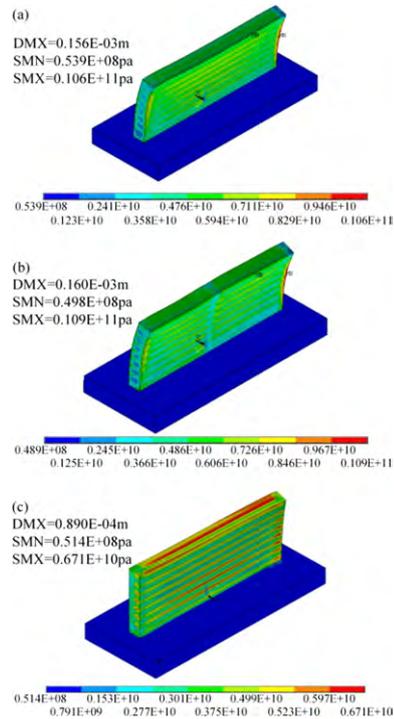


图10 应力场分布和翘曲变形:(a)平行扫描;(b)分区扫描;(c)改进的中轴路径^[54](电子版为彩图)

Fig. 10 Stress field distribution and warping deformation: (a) parallel scanning; (b) partition scanning; (c) medial axis path^[54]

Wang等^[55]提出了一种适用于SLM技术的螺旋分区扫描策略,分别采用三种分区扫描策略(传统分区、斜线交错分区、螺旋分区)和一种S形正交扫描策略成形316L零件。结果表明,螺旋分区策略成形样件在x方向和y方向的最小残余应力分别为204 MPa和103 MPa,有效地降低了残余应力,减小了零件的变形程度。

Sun等^[56]提出了一种适用于SLM技术、层间旋转角为47°的矩形分区平行扫描策略。该策略通过变换层间旋转角度破坏晶粒的柱状生长,从而达到晶粒细化的效果,如图11所示。图11a—d均采用矩形分区,图11e采用六边形分区。

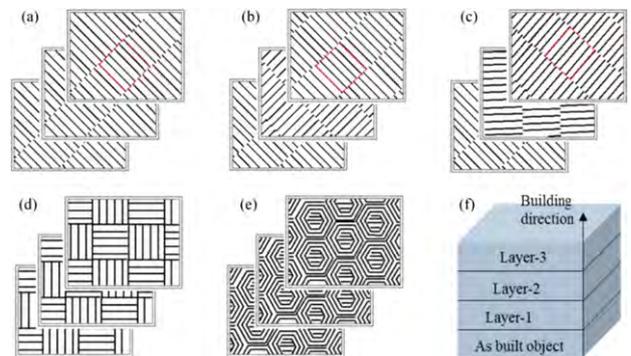


图11 (a)矩形分区平行扫描(0°);(b)矩形分区平行扫描(90°);(c)矩形分区平行扫描(47°);(d)矩形分区交错扫描;(e)六边形分区螺旋扫描;(f)成形方向^[56]

Fig. 11 (a) Parallel scanning of rectangular partition (0°); (b) parallel scanning of rectangular partition (90°); (c) parallel scanning of rectangular partition (47°); (d) interleaved scanning of rectangular partition; (e) spiral scanning of hexagonal partition; (f) building direction^[56]

图 11a—c 连续层之间具有不同的旋转角度(0°、90°、47°)。结果表明,图 11c 成形的样件具有最高的抗拉强度和延展性。与其他几种基于分区扫描的策略相比,层间旋转角为 47°的矩形分区平行扫描策略能够显著提高零件的力学性能。

采用 SLM 技术成形薄壁件过程中,产生的残余应力容易导致零件变形开裂。为了解决残余应力引起的成形缺陷问题,邓洋洋等^[57]提出了一种基于中轴变换的分区扫描路径策略,对分层实体区域进行中轴变换,将待填充区域划分为主区域和连接区域。主区域采用正弦曲线扫描填充,连接区域采用正三角网格扫描填充。图 12 为生成扫描路径的完整流程,图 12b 中黑色虚线内为连接区域,其余为主区域。在成形过程中,零件局部会出现重熔现象,可一定程度减小内部残余应力。

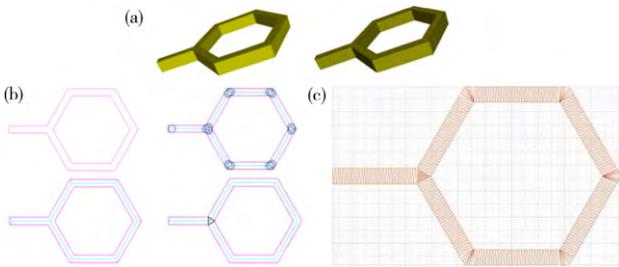


图 12 (a) 实体分层;(b) 中轴变换及裁剪;(c) 扫描路径^[57]
Fig. 12 (a) Slicing the sample; (b) medial axis transformation and cropping; (c) scanning path^[57]

表 2 总结了上述文献中基于不同成形目标的路径规划策略,未来可根据实际需求进行参考。例如,当成形件的力学性能是优先考虑的目标,可以重点参考表 2“力学性能”中列出的七种路径策略。七种策略没有普适的优劣评价准则,因为不同的策略适用的 LAM 技术以及零件类型不同。此外,当针对特定目标选用相应的路径策略时,成形零件的其他属性可能会恶化。例如,以提高零件的力学性能为目标优化路径时,零件的表面粗糙度或成形精度可能被改变,这些互相干扰的因素需要在优化路径策略时综合考虑。

表 2 文献中的路径规划策略

Table 2 Path planning strategies in the literature

| 目标 | 路径规划策略 | 适用的激光增材制造技术 |
|------|--|-------------|
| 成形质量 | 优化的 Zig-Zag 分区扫描策略 ^[31] | LDDED |
| | 可调整扫描线长度的双向线子区域扫描策略 ^[32] | SLM |
| | 基于层面温度分区的扫描策略 ^[33] | LDDED |
| | 连续同心扫描策略 ^[34] | SLM |
| | 重熔扫描策略 ^[35] | SLM |
| | 基于轮廓极值点识别判断的优化分组平行扫描策略 ^[40] | LDDED |
| | 蜂窝扫描策略 ^[46] | SLM |
| 力学性能 | 基于矩形分区的区间合并和区域排序的扫描策略 ^[52] | LDDED |
| | 交错扫描策略 ^[53] | LDDED |
| | 改进的中轴路径策略 ^[54] | SLM |
| | 螺旋分区扫描策略 ^[55] | SLM |
| | 层间旋转角为 47°的矩形分区平行扫描策略 ^[56] | SLM |
| | 基于中轴变换的分区扫描策略 ^[57] | SLM |

3 总结与展望

随着生物医疗、机械电子和航空航天等领域的迅速发展,LAM 技术具有广阔的应用空间和发展前景。路径策略是影响金属零件成形质量以及力学性能的关键因素,在未来对路径规划的研究中,以下几个方面可能会成为重点的探索方向:

(1) 众多学者针对提高成形质量以及力学性能为目标的路径规划策略进行了深入探索。然而,很少有研究考虑不同路径规划策略下的能量消耗情况。在保证成形目标的基础上,可探究减少能量消耗的新型路径规划策略,促进 LAM 技术的绿色环保、可持续性发展。

(2) 基于表 2 中不同成形目标的路径策略,可研究多目标(成形质量、力学性能等)优化路径策略。例如,同时考虑成形零件的表面粗糙度和力学性能,则可以综合两种路径策略(一种提高表面粗糙度、一种提高力学性能),并改进为新的策略,以实现多目标优化。

(3) 目前,单一的路径策略并不能适用于所有的几何特征。复杂构件的路径规划问题仍是制约该技术工程化应用的难点之一。可建立考虑全部必要特征(例如尖角特征、薄壁特征等)的基准模型,基于数据驱动的方法构建几何特征与路径策略间的最优匹配关系,提出对应的路径切换算法。

参考文献

- Adeyemi A, Akinlabi E T, Mahmood R M. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(9), 18510.
- Ling W, Wang X, Wang L, et al. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157, 108648.
- Lu H, Zhang X, Liu J, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 925, 166720.
- Pang X, Xiong Z, Liu S, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 857, 144104.
- Wang Q Z, Lin X, Kang N, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 840, 142950.
- Xiao H, Chen C, Zhang M. *Materials Research Express*, 2019, 6(11), 116574.
- Mahmood R M, Akinlabi E T. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 99(5), 1545.
- Paul S, Singh R, Yan W, et al. *Scientific Reports*, 2018, 8(1), 1.
- Tan C, Zhou K, Ma W, et al. *Acta Metall Sin*, 2019, 56(1), 36.
- Shiva S, Yadaiah N, Palani I A, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 48, 98.
- Tang M, Lin X, Huang W. *Materials Technology*, 2016, 31(2), 90.
- Zhang H, Zhao Y, Cai J, et al. *Materials & Design*, 2021, 201, 109462.
- Doñate-Buendia C, Kürnsteiner P, Stern F, et al. *Acta Materialia*, 2021, 206, 116566.
- Zhou L, Sun J, Chen J, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 928, 167130.
- Peng J, Li J, Liu B, et al. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 133, 12.
- Seede R, Shoukr D, Zhang B, et al. *Acta Materialia*, 2020, 186, 199.
- Su Y, Wang Y, Shi J. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 857, 144075.
- Hespeler S, Dehghan-Niri E, Juhasz M, et al. *Applied Sciences*, 2022, 12(18), 8974.
- Kim H, Lee K K, Ahn D G, et al. *Materials*, 2021, 14(7), 1794.

- 20 Cheng Y, Cao C, Yang X, et al. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 290, 126617.
- 21 Al-Musaibeli H, Ahmad R. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 122(3), 1259.
- 22 Zhang X, Cui W, Li W, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(5), 1607.
- 23 Ren K, Chew Y, Fuh J Y H, et al. *Materials & Design*, 2019, 162, 80.
- 24 Haibo H, Wenlei S, Guan Z, et al. *China Surface Engineering*, 2018, 31(5), 175.
- 25 Xiang Z, Yan R, Wu X, et al. *Optik*, 2020, 206, 164316.
- 26 Wang X, Sun W, Chen Y, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(5), 2397.
- 27 Tao P, Li H, Huang B, et al. *China Foundry*, 2018, 15(4), 243.
- 28 Liu W, Saleheen K M, Tang Z, et al. *Optical Engineering*, 2021, 60(7), 070901.
- 29 Tang Q, Yin S, Zhang Y, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(5), 1671.
- 30 Tang X, Luo K, Lu J. *Materials Research Express*, 2021, 8(2), 026523.
- 31 Zhao J, Liu W, Xia R, et al. In: 2007 International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, 2007, pp. 587.
- 32 Zhang W, Shi Y, Liu B, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 41(7), 706.
- 33 Bian H Y, Fan Q C, Li Y, et al. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(24), 57 (in Chinese).
卞宏友, 范钦春, 李英, 等. *机械工程学报*, 2015, 51(24), 57.
- 34 Yeung H, Lane B, Fox J, et al. In: 2017 International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 2017, pp. 1423.
- 35 Zhang H, Gu D, Dai D. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 17(2), 308.
- 36 Buser M, Onuseit V, Graf T. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 138, 106412.
- 37 Jia H, Sun H, Wang H, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(9), 2413.
- 38 Chen C, Yin J, Zhu H, et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 145, 103433.
- 39 Foroozmehr E, Kovacevic R. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51(5), 659.
- 40 Bian H Y, Yang G, Li Y, et al. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(11), 171 (in Chinese).
卞宏友, 杨光, 李英, 等. *机械工程学报*, 2013, 49(11), 171.
- 41 Kudzal A, McWilliams B, Hofmeister C, et al. *Materials & Design*, 2017, 133, 205.
- 42 Rashid R, Masood S H, Ruan D, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249, 502.
- 43 Javidrad H R, Ghanbari M, Javidrad F. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 12, 989.
- 44 Biegler M, Wang J, Kaiser L, et al. *Steel Research International*, 2020, 91(11), 2000017.
- 45 Bian H Y, Yang G, Wang G, et al. In: Applied Mechanics and Materials. Wuhan, 2012, pp. 79.
- 46 Mohanty S, Tutum C C, Hattel J H. In: Laser-based Micro-and Nanopackaging and Assembly VII. San Francisco, 2013, pp. 115.
- 47 Lu Y, Wu S, Gan Y, et al. *Optics & Laser Technology*, 2015, 75, 197.
- 48 Tolosa I, Garciaandía F, Zubiri F, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51(5), 639.
- 49 Cheng B, Shrestha S, Chou K. *Additive Manufacturing*, 2016, 12, 240.
- 50 Zhang K, Shang X F. In: Applied Mechanics and Materials. Shanghai, 2011, pp. 2640.
- 51 Ren Z, Tian Y L, Zhou M Y, et al. In: Advanced Materials Research. Guillin, 2012, pp. 1538.
- 52 Wang W, He Y, Qin L Y, et al. *Applied Laser*, 2016, 36(4), 373 (in Chinese).
王伟, 何妍, 钦兰云, 等. *应用激光*, 2016, 36(4), 373.
- 53 Li J, Deng D, Hou X, et al. *Materials Science and Technology*, 2016, 32(12), 1223.
- 54 Zhang L, Ding L, Ullah S, et al. *Rapid Prototyping Journal*, 2020, 26(10), 1751.
- 55 Wang D, Wu S, Yang Y, et al. *Materials*, 2018, 11(10), 1821.
- 56 Sun Q, Guo K, Wang X, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 793, 139879.
- 57 Deng Y Y, Li W S. *Journal of Graphics*, 2022, 43(1), 149 (in Chinese).
邓洋洋, 李维诗. *图学学报*, 2022, 43(1), 149.

(责任编辑 谢欢)



柴媛欣, 2017年6月、2020年6月分别于辽宁工业大学获得工学学士学位和硕士学位。现为沈阳工业大学机械工程学院博士研究生, 在李殿起教授与邢飞教授的指导下进行研究。目前主要研究领域为激光关键技术开发与应用。



邢飞, 通信作者, 沈阳工业大学机械工程学院教授、博士研究生导师。2003年东北大学机械电子工程专业本科毕业, 2005年中国科学院沈阳自动化研究所机械电子工程专业硕士毕业, 2009年中国科学院沈阳自动化研究所机械电子工程专业博士毕业。目前主要从事智能制造、高端装备制造等方面的研究工作。中组部第二批“万人计划”入选者、科技部“领军型创新创业人才计划”入选者、江苏省双创团队领军人才、辽宁省攀登学者、中国激光加工学会学术委员会委员、中国增材制造产业联盟副理事长、十三五增材制造与激光制造重点研发计划评审组组长。获省部级一等奖1项、二等奖1项。先后主持和参与国家级、省部级科技计划项目30余项, 申请专利100余项, 发表学术论文40余篇, 出版专著2部。



李殿起, 通信作者, 沈阳工业大学机械工程学院教授、博士研究生导师。1990年吉林工业大学农业机械设计专业本科毕业, 2002年东北大学固体力学专业硕士毕业后到沈阳工业大学工作至今, 2007年东北大学模式识别与智能系统专业博士毕业。目前主要从事智能制造、机器视觉等方面的研究工作。先后主持和参与国家级、省市级项目20余项, 发表学术论文40余篇。