

激光选区熔化扫描策略对钛合金成形精度的影响

葛亚楠^{1*}, 武美萍^{1**}, 冒浴沂², 韩基泰¹

¹江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

²国家增材制造产品质量监督检验中心(江苏), 江苏 无锡 214101

摘要 通过不同的扫描策略激光选区熔化(SLM)成形了钛合金样件,分析了扫描策略对成形精度的影响。结果表明,成形件侧表面的粗糙度受扫描策略的影响较大,单向和Z型扫描策略成形件平行于扫描方向的侧表面粗糙度小于垂直于扫描方向的;螺旋线扫描策略成形件的整体翘曲偏差范围较小,外形结构较精准;三种扫描策略成形件的外形长宽尺寸比设计模型减小了1~2 mm,而其他特征结构尺寸与设计模型相近。螺旋线扫描策略成形件的整体成形精度优于单向和Z型扫描策略。

关键词 激光技术; 激光选区熔化(SLM); 钛合金; 成形精度; 扫描策略

中图分类号 TG146.23

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091403

Effect of Scanning Strategy on Forming Precision of Titanium Alloy by Selective Laser Melting

Ge Yanan^{1*}, Wu Meiping^{1**}, Mao Yuyi², Han Jitai¹

¹ School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

² National Center of Supervision and Inspection on Additive Manufacturing Products Quality (Jiangsu), Wuxi, Jiangsu 214101, China

Abstract The titanium alloy samples are formed by selective laser melting (SLM) based on different scanning strategies, and the effect of scanning strategy on forming precision is analyzed. The results show that the roughness on lateral surface of forming part is strongly affected by the scanning strategy. The roughness on lateral surface of forming part by one-way scanning or Z-scanning strategies parallel to the scanning direction is better than that on the lateral surface perpendicular to the scanning direction. The degree of bending curvature of forming part by the spiral scanning strategy is relatively small and its shape structure is relatively accurate. Compared with the design model, the length and width of forming part by these three scanning strategies are reduced by 1-2 mm, while the other sizes are close. The whole forming precision of forming part by spiral scanning strategy is better than those by one-way scanning and Z-scanning strategies.

Key words laser technique; selective laser melting (SLM); titanium alloy; forming accuracy; scanning strategy

OCIS codes 140.3590; 350.3390; 160.3900

1 引言

激光选区熔化(SLM)是一种新型的快速制造技术^[1-3],该技术无需特殊的夹具或模具,能成形任意形状构件并且加工工艺简单^[4-5]。然而,目前SLM成形实体的精度达不到工业应用的要求。因此,提高SLM成形精度具有重要意义。

目前,SLM扫描策略的研究主要集中在扫描策略对成形件力学性能及熔池、温度场分布的影响。Thijs等^[6]研究发现,SLM扫描策略影响TC4合金细长晶粒的方向。Wang等^[7]采用层间交错扫描策略,成形得到的316 L不锈钢构件的抗拉强度和硬度大于相同材料的铸件。Geiger等^[8]研究了扫描策略对成形件力学性能的影响。邓诗诗等^[9]采用S形正交扫描策略和分区

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-03-25; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 装备预研教育部联合基金(6141A0221)

* E-mail: gyjjiangnan@hotmail.com; ** E-mail: wmp169@jiangnan.edu.cn

扫描策略,分别规划了零件扫描路径,有效减小了边界拉应力,提高了成形件的力学性能。刘楠等^[10]采用等间距顺序扫描策略,有效减小了加工过程中的温度梯度,减少了零件变形。陈德宁等^[11]研究发现,分区扫描对岛屿边界影响较为明显,相邻的岛屿间搭接质量较差。程慧^[12]研究发现,往复扫描能改善熔池的形貌特征,可以实现不同光斑的能量分布对熔池形貌的调控,并且熔覆层形貌分布更加均匀。

然而,关于扫描策略对样件成形精度的影响鲜有报道。本文研究了单向扫描、Z型扫描以及螺旋线扫描对样件成形精度的影响,测量了成形件上表面和侧表面的粗糙度、平面度、圆柱度、垂直度以及几何特征结构的尺寸精度,为 SLM 成形打印件的应用提供了实验依据。

2 实验材料和方法

2.1 实验材料

选择 Ti-6Al-4V (TC4) 粉末作为实验材料,其化学成分见表 1。

表 1 TC4 粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of TC4 powder (mass fraction, %)

Element	C	Al	V	Fe	O	N	H	Ti
Content	0.012	5.73	3.78	0.08	0.072	0.017	0.0019	Bal.

2.2 实验方法

采用西安铂力特增材技术股份有限公司生产的 BLT-S200 打印设备进行实验,主要工艺参数为:激光功率 200 W,扫描速度 $275 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,扫描间距 0.13 mm,铺粉厚度 $30 \mu\text{m}$,光斑直径 $87 \mu\text{m}$ 。三种扫描策略示意图如图 1 所示。单向扫描、Z型扫描和螺旋线扫描打印出的成形件分别标记为试样 1、试样 2 和试样 3。

采用日本三丰株式会社生产的 SV-C3200S4 型粗糙度轮廓仪测量成形件上表面及侧表面的粗糙度 (R_a),每个面测量 5 次,测量长度为 2.5 mm,测量间隔为 $1 \mu\text{m}$ 。使用的过滤器类型为高斯滤波器,加速和减速部分长度均为 1.25 mm。采用三维表面形貌仪观察样件平行和垂直于扫描方向的三维形貌。

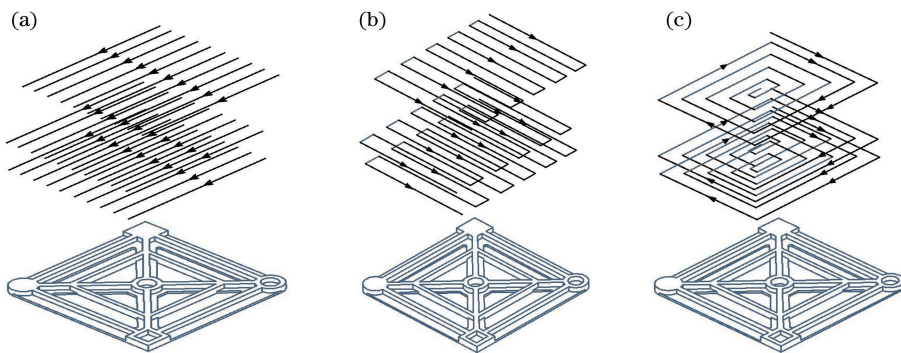


图 1 三种扫描策略示意图。(a)单向扫描;(b)Z型扫描;(c)螺旋线扫描

Fig. 1 Schematic of three scanning strategies. (a) One-way scanning; (b) Z-scanning; (c) spiral scanning

成形件扫描模型和拟合图如图 2 所示。使用美国海克斯康测量技术有限公司生产的 RA-7525SEI-4 型便携式三坐标测量仪扫描成形件并收集表面几

何特征结构的尺寸误差。模型,该软件根据选取的特征点自动拟合得到拟合图,从而测量成形件的平面度、圆柱度、垂直度以及几何特征结构的尺寸误差。

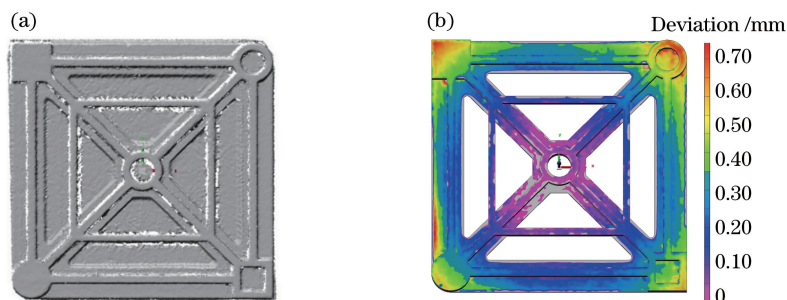


图 2 成形件。(a)扫描模型;(b)拟合图

Fig. 2 Forming parts. (a) Scanning model; (b) fitting figure

3 实验结果与分析

3.1 表面粗糙度检测结果与分析

成形件上表面和侧表面的粗糙度测量位置如图3所示,测量结果如图4所示。

从图4可以看出,三个成形件上表面的粗糙度值均小于侧表面的。试样1和试样2平行于扫描方向的侧表面粗糙度小于垂直于扫描方向的,粗糙度曲线呈锯齿形;试样3相邻侧表面的粗糙度相近,并且整体表面粗糙度均小于试样1和试样2。这表明扫描策略对成形件的粗糙度影响较大,尤其是对侧

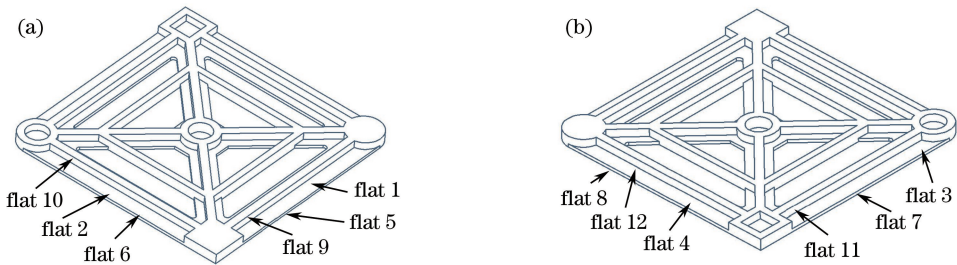


图3 成形件表面粗糙度的测量位置

Fig. 3 Measurement position of surface roughness of forming parts

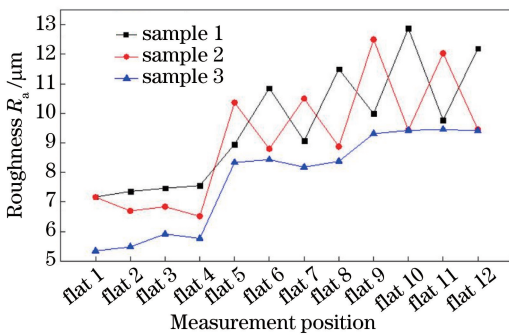


图4 成形件上表面和侧表面的粗糙度曲线

Fig. 4 Roughness curves on upper and lateral surfaces of forming parts

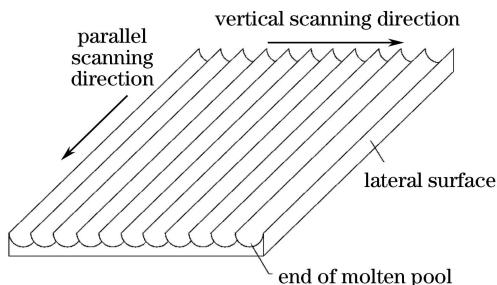


图5 单向扫描和Z型扫描成形加工示意图

Fig. 5 Schematic of processing by one-way scanning and Z-scanning strategies

表面粗糙度的影响。单向扫描和Z型扫描成形加工示意图如图5所示。激光沿着规划的路径依次熔融金属粉末,逐层累积成形件。在平行于扫描方向的侧表面打印过程中,激光持续前行熔融粉末,使得成形表面连续平整;垂直于扫描方向的侧表面位于熔池的端部,而熔池的截面形状为半圆形,各熔池相互搭接导致其平面凹凸不平,精度较差,并且激光行进到熔池端部时稍作停留,使得端部粉末熔融的时间比熔池中部的更长,造成粉末吸附,严重影响侧表面的成形精度。

当激光照射到TC4粉末上时,粉末会吸收激光

未发生熔化,然后凝固成形。当物体内部有温度差异时,能量从热量较大的部分传递到热量较小的部分,最终达到平衡状态。热传导遵循傅里叶定律^[13]:

$$q^* = -k_m \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (1)$$

式中 q^* 为热流密度; k_m 为导热系数; $\partial T/\partial n$ 为温度梯度;负号表示热量向温度减小的方向流动。

上表面的粉末经激光垂直照射而熔融成形;侧表面的粉末通过热传导的方式熔融,能量在传递过程中逐渐减小,部分粉末未能完全熔融,同时侧表面吸附了不规则的粉末,因此,侧表面的成形精度比上表面的差。

成形件侧表面的三维形貌如图6所示。可以看出,单向和Z型扫描成形件垂直于扫描方向的侧表面凹凸不平,有明显的“毛刺”,而平行于扫描方向的侧表面则较为平整。试样3侧表面的精度大于试样1和试样2。

3.2 平面度、圆柱度、垂直度以及几何特征结构尺寸误差的检测结果与分析

成形件的测量尺寸与位置如图7所示,成形件的平面度、圆柱度、外侧垂直度和几何特征尺寸误差分别如图8~11所示。

辐射出的能量并转化为热能,激光照射范围内的粉

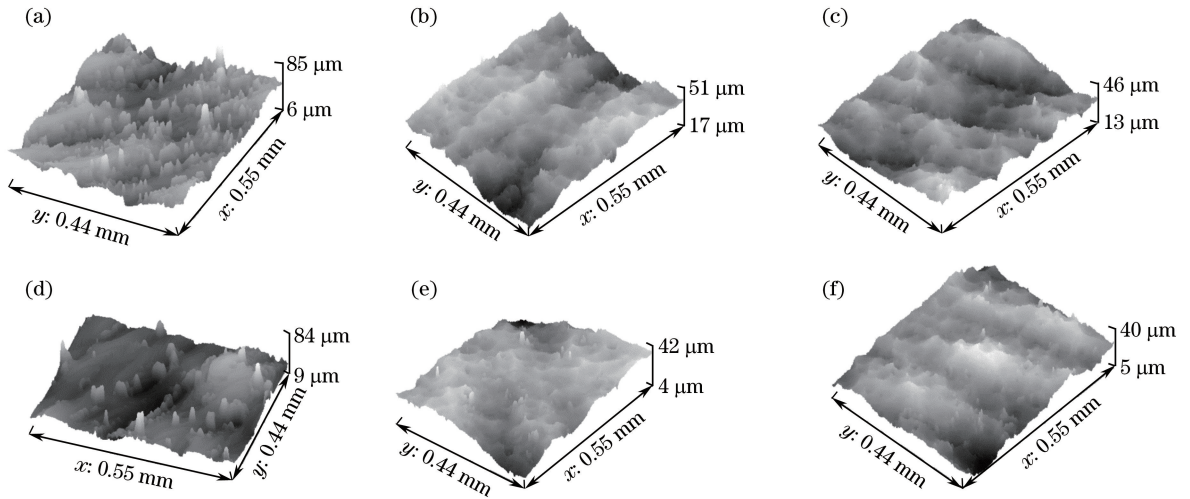


图 6 成形件侧表面的三维形貌。(a)单向扫描策略,垂直于扫描方向;(b)单向扫描策略,平行于扫描方向;(c) Z型扫描策略,平行于扫描方向;(d) Z型扫描策略,垂直于扫描方向;(e)(f)螺旋线扫描策略,相邻侧表面
Fig. 6 3D topographies on lateral surface of forming part. (a) One-way scanning strategy, perpendicular to scanning direction; (b) one-way scanning strategy, parallel to scanning direction; (c) Z-scanning strategy, parallel to scanning direction; (d) Z-scanning strategy, perpendicular to scanning direction; (e)(f) spiral scanning strategy, adjacent lateral surfaces

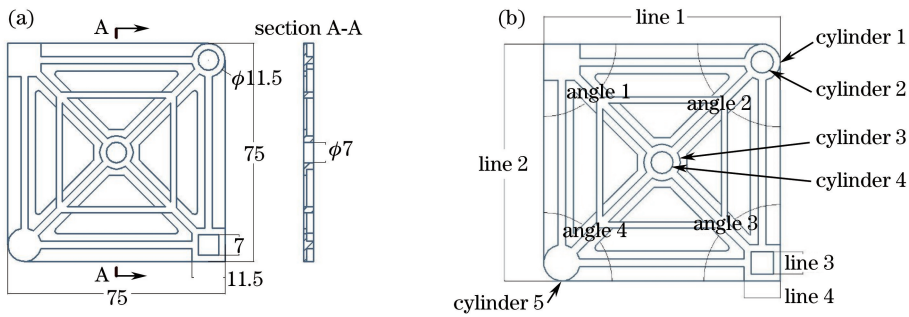


图 7 成形件。(a)测量尺寸;(b)测量位置

Fig. 7 Forming part. (a) Measurement size; (b) measurement position

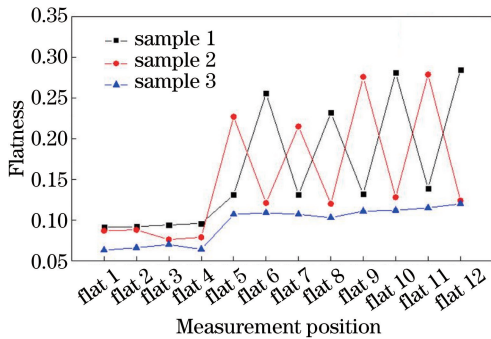


图 8 成形件上表面和侧表面的平面度

Fig. 8 Flatnesses of upper and lateral surfaces of forming parts

从图 8 可以看出,三个成形件上表面的平面度均小于侧表面,试样 3 的整体平面度小于试样 1 和试样 2,试样 1 和试样 2 平行于扫描方向的侧表面平面度均小于垂直于扫描方向的,两条平面度曲线

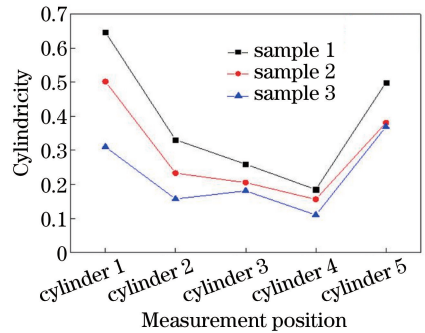


图 9 成形件的圆柱度

Fig. 9 Cylindricities of of forming parts

呈锯齿形,这表明扫描策略对成形件平面度的影响较大,尤其是侧表面的平面度。从图 9 可以看出,三个试样的圆柱度由小到大的排序为试样 3、试样 2、试样 1,并且中心圆柱的圆柱度均小于外侧对角。从图 10 可以看出,试样 3 的四个外侧直角的成形角

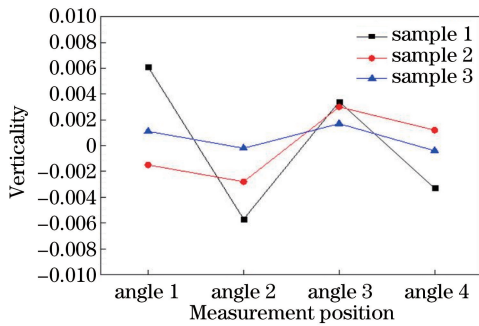


图 10 成形件的外侧垂直度

Fig. 10 Outside verticalities of forming parts

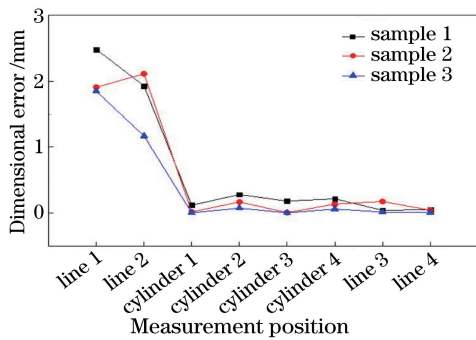


图 11 成形件几何特征结构的尺寸误差

Fig. 11 Dimensional errors of geometrical characteristic structure of forming parts

度误差小于试样 1 和试样 2, 这表明螺旋线扫描策略打印的成形件拥有更精准的外形结构。从图 11 可以看出, 三个试样的几何特征结构的整体尺寸精度相近, 但是长和宽小于设计模型尺寸。这是因为三种扫描策略成形件的翘曲程度不同。螺旋线扫描策略成形件的翘曲程度较小, 上表面更为平整, 侧边的凸起更小, 使得平面度更小, 几何特征结构的成形精度更高。扫描策略对成形件的翘曲程度存在以下的影响: 当激光照射到粉末层时, TC4 粉末颗粒受热后温度升高至熔点, 形成熔池; 熔池的热

膨胀使得受热部分受拉应力作用, 而熔池的边界部分与周围粉末产生温度梯度, 受压应力作用; 另外, 激光能量随着透射深度的增大而逐渐减小, 因此, 成形件上层吸收的能量大于下层, 导致熔融程度不一致。上层新熔融层与下层已熔融层的成形冷却存在时间差, 导致各层之间存在温度差异, 造成表面不均匀收缩。新熔融层上表面介质为气体, 下表面介质为已熔融区域, 在收缩的过程中, 上表面自由收缩, 而下表面的收缩受到制件的阻力, 从而导致层上表面的收缩量大于下表面^[14], 成形件易形成周凸中凹的翘曲现象。单向和 Z 型扫描策略在每个熔融层上的扫描方向平行, 导致收缩方向一致, 成形件更易发生翘曲变形。

成形件拟合图如图 12 所示。试样 1 与试样 2 的上下偏差均为 0.7 mm, 大于试样 3 的 0.1 mm; 且试样 1 的最小偏差为 0.2 mm, 大于试样 2。同时可以看出, 试样 1 和试样 2 呈现四周翘曲, 中间凹陷的形状, 从而试样 3 相比于试样 1 和试样 2 较为平整, 成形更为精准。当激光照射到粉末时, 材料瞬间升温, 与周围的粉末产生温度梯度, 先熔融的区域将能量传递给相邻未熔融区域, 产生热累积效应。三种扫描策略能量传递方向示意图如图 13 所示。当采用单向和 Z 型扫描策略成形时, 热量从已熔融区域单向传递给未熔融粉末区域, 而当采取螺旋线扫描策略成形时, 扫描路径从外围四周逐渐向内行进, 已熔融区域会将能量从四周向内传递给内部粉末, 对未熔融区域进行预热, 随着扫描路径向内推进, 整个粉末层的温度梯度逐渐减小, 从而使得激光能量能较为均匀地分布在整個熔融层上, 减小了成形过程中的应力及冷却过程中的残余应力, 成形件的翘曲变形减小。因此, 采用螺旋线扫描策略成形件的精度更高。

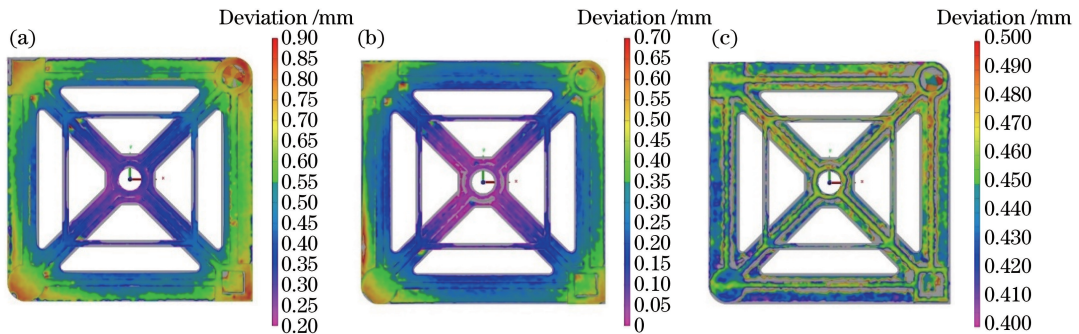


图 12 成形件的扫描模型与设计模型的拟合对比。(a) 试样 1; (b) 试样 2; (c) 试样 3

Fig. 12 Fitting comparison between scanning model and design model of forming parts.

(a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

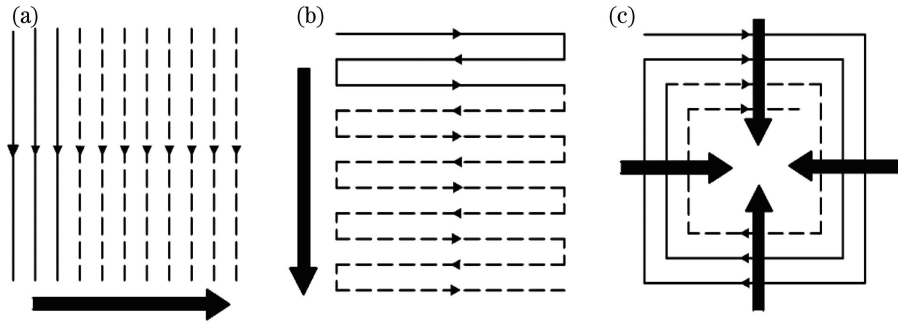


图 13 三种扫描策略的能量传递方向示意图。(a)单向扫描;(b)Z型扫描;(c)螺旋线扫描

Fig. 13 Schematics of energy transfer directions of three scanning strategies. (a) One-way scanning; (b) Z-scanning; (c) spiral scanning

4 结 论

通过 SLM 成形了钛合金构件,研究了不同扫描策略对成形件精度的影响,得到以下结论。

1) 不同扫描策略成形件的侧表面粗糙度大于上表面;螺旋线扫描策略成形件的整体表面粗糙度值优于单向和 Z 型扫描策略。

2) 螺旋线扫描策略成形过程的能量比单向和 Z 型扫描成形过程中的能量单向传递更均匀,温度梯度小,残余应力减小,导致翘曲程度小,侧表面的凸起更小,平面度值更小。

3) 三种扫描策略成形件的几何特征结构的尺寸精度相近。螺旋线扫描策略成形件拥有更好四周成形直角,成形件外形结构精度更高。

参 考 文 献

- [1] Yang Y Q, Chen J, Song C H, *et al.* Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011401.
杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011401.
- [2] Li J F, Wei Z Y, Lu B H. Research progress on technology of selective laser melting of titanium and titanium alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011403.
李俊峰, 魏正英, 卢秉恒. 钛及钛合金激光选区熔化技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011403.
- [3] Yang J, Guo H G, Tan J B. Status and development trend of selective laser melting forming technology [J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2017, 34(4): 300-305.

杨佳, 郭洪钢, 谭建波. 选择性激光熔化技术研究现状及发展趋势[J]. *河北工业科技*, 2017, 34(4): 300-305.

- [4] Li L Q, Wang J D, Wu C C, *et al.* Temperature field of molten pool and microstructure property in laser melting depositions of Ti6Al4V [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0302009.
李俐群, 王建东, 吴潮潮, 等. Ti6Al4V 激光熔化沉积熔池温度场与微观组织特性[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0302009.
- [5] Wang X, Zhou J Z, Huang S, *et al.* Effect of laser peening on hydrogen embrittlement resistance of TC4 titanium alloys[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0914006.
王祥, 周建忠, 黄舒, 等. 激光喷丸对 TC4 钛合金抗氢脆性能的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0914006.
- [6] 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.
- [7] Wang D, Yang Y Q, Su X B, *et al.* Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58: 1189-1199.
- [8] Geiger F, Kunze K, Etter T. Tailoring the texture of IN738LC processed by selective laser melting (SLM) by specific scanning strategies[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 661: 240-246.
- [9] 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.
- [10] Liu N, Jia L, Yang G Y, *et al.* Effect of scan strategy and beam parameters on EBM process for TC4 alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(12): 47-49.
刘楠, 贾亮, 杨广宇, 等. 扫描策略及束流参数对 TC4 合金电子束快速成形过程的影响[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(12): 47-49.
- [11] Chen D N, Liu T T, Liao W H, *et al.* Temperature field during selective laser melting of metal powder under different scanning strategies [J]. *Chinese Journal of 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.
- [12] Cheng H. Research on reciprocating scanning technology of selective laser melting[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
程慧. 选区激光熔化成形往复扫描工艺研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [13] Hu R X, Kang S T, Zhu Y L, *et al.* ANSYS15.0 thermodynamics finite element analysis from the beginning to master [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
胡仁喜, 康士廷, 朱玉莲, 等. ANSYS15.0 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [14] Fu C A, Chen P H. Research of curl distortion and raster scanning way of selective laser sintering [J]. *China Foundry*, 2008, 57(12): 1237-1240.
傅蔡安, 陈佩胡. 选择性激光烧结的翘曲变形与扫描方式的研究[J]. *铸造*, 2008, 57(12): 1237-1240.