

扫描策略对金属粉末选区激光熔化温度场的影响

陈德宁 刘婷婷* 廖文和 张长东 张 凯

南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094

摘要 针对岛式扫描策略进行三维有限元仿真,并采用蛇形扫描方式进行对比。综合考虑热传导、热辐射和热对流效应,合金材料热物理性能参数与温度的非线性关系及相变潜热的影响,建立了三维瞬态金属选区激光熔化(SLM)有限元模型。分析结果表明,SLM成形过程中,熔池呈水滴状,前端温度等值线比后端细密。与蛇形扫描方式相比,岛式扫描方式下岛屿边缘会出现温度二次升高现象,试件整体温度场分布均匀,有利于减小应力集中。温度场特点直接影响 β 相柱状晶的大小,岛式扫描方式更易形成较粗的 β 相柱状晶。分区扫描对岛屿边界影响较为明显,与岛屿内部相比,相邻的岛屿间搭接质量较差。

关键词 激光技术;选区激光熔化;温度场;有限元模拟;扫描策略;显微组织

中图分类号 TF124 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0403003

Temperature Field During Selective Laser Melting of Metal Powder Under Different Scanning Strategies

Chen Dening Liu Tingting Liao Wenhe Zhang Changdong Zhang Kai

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Three-dimensional finite element simulation is used to investigate the temperature field with the island scanning strategy paralleled with the S-shaped scanning strategy. Considering the influence of heat conduction, heat radiation and heat convection, nonlinear relationship between thermophysical properties of metal material and temperature, and enthalpy processing utilizing latent heat of phase change, a finite element model of metal selective laser melting (SLM) is established. It is found that the molten pool is in the shape of a water droplet, and the temperature contour at front-end is denser than that at back-end. Compared with the S-shaped scanning strategy, island scanning has the phenomenon of secondary temperature elevation at the island edge. The whole temperature field of the model is uniform, which is beneficial to reducing the stress concentration. It was observed that the average width of the β phase in the samples built with the island scanning strategy is significantly larger than that with the S-shaped scanning strategy. The influence of the island scanning on the boundary of the islands is quality of overlapping areas, and the overlap between adjacent islands is poor.

Key words laser technique; selective laser melting; temperature field; finite element simulation; scanning strategy; microstructure

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 140.6810

1 引 言

选区激光熔化(SLM)^[1-2]技术作为增材制造技术的重要分支,1995年由德国Fraunhofer激光研究所提出,利用高能量激光选择性辐照并熔化粉末,从单一熔道逐渐填充成单层截面,再层层粘结堆积,使熔化层固化

收稿日期: 2015-10-30; 收到修改稿日期: 2015-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(51375242)、江苏省优势学科资助项目

作者简介: 陈德宁(1989—),男,硕士研究生,主要从事选择性激光熔融方面的研究。E-mail: re.mark@163.com

导师简介: 廖文和(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事数字化设计制造、增材制造等方面的研究。

E-mail: cnwho@njust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: liutingting@mail.njust.edu.cn

叠加生成复杂零件^[3]。由于在SLM过程中热输入集中,瞬时集中输入的激光能量易造成SLM温度场的不均匀与不稳定,粉末温度随着时间产生高度非线性变化,且材料本身的物理属性也随温度变化呈高度非线性变化^[4],继而使零件在成形过程中应力增大,产生翘曲变形甚至开裂等缺陷^[5]。为了直观地从热力学角度分析SLM过程,研究人员利用有限元方法进行分析,得到成形过程温度和热应力场的分布情况,并对影响成形温度、应力的参数进行了广泛研究。

Kolossov等^[6]建立SLM熔化Ti粉的三维有限元模型,考虑了粉末转变为实体过程中导热系数和比热随温度的非线性变化,将模拟结果与试验中的数据相比较,能较好地反映粉末熔化过程中的温度变化趋势。Krol等^[7]通过有限元数值模拟和中子衍射仪试验结果对照,认为在不同支撑结构和不同温度下,在结构件的建造方向会产生不同的拉应力。Krauss等^[8]就SLM过程中影响薄壁结构的主要工艺参数进行了有限元分析和试验观察,分析了单道多层温度场分布和成形质量。杨永强等^[9]分析了翘曲变形的原因,同时通过试验验证分区扫描策略可以减小各处温差并且有效地消除翘曲变形。但关于SLM成形过程中岛式扫描策略中瞬态温度场的研究国内目前还少有报道。

岛式扫描是Concept Laser公司的一项专利技术,在熔化的过程中利用随机曝光的策略,激光在每一工作层面上被分段,即所谓的岛型,并连续作用^[10]。这项专利技术有效地降低了元件在生产过程中应力的产生,特别是针对大体积零件更具有优势。本文针对SLM成形过程,对岛式扫描策略进行有限元仿真,并采用蛇形扫描方式进行对比,预测SLM成形过程温度场分布,提取温度变化曲线,直观反映成形过程中的激光热对零件的作用,揭示岛式扫描方式温度场特征及其对SLM成形性能的影响。

2 数学模型的建立

2.1 初始条件和边界条件

为了求解热传递平衡方程,需要设定初始条件和边界条件。假设初始温度为 T_0 ,初始条件为

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z). \quad (1)$$

粉末的表面对周围环境的能量传递方式为热对流和热辐射,属第三类边界条件:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = Q - h(T_a - T_s) - \sigma \varepsilon (T_a^4 - T_s^4), \quad (2)$$

式中 Q 为热流率, T_a 为粉床预热温度, T_s 为空间环境温度, h 为对流换热系数, ε 为热辐射系数, σ 为Stefan-Boltzman常数($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)。

由于粉末颗粒相对于粉床非常小,因此可以将粉床近似地看成一个半无限大体,则在粉床底面无热量损失,即

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=\infty} = 0. \quad (3)$$

2.2 移动的高斯激光模型处理与实现

激光热源的热流分布符合高斯模型函数,可表示为

$$I(r) = \frac{2AP}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right), \quad (4)$$

式中 ω 为激光光斑半径,即热流密度降为光斑中心热流密度 $1/e^2$ 处与光斑中心的距离; A 为粉床对激光束的吸收率; P 为激光功率; r 为粉床上任意一点到光斑中心的距离^[11]。

SLM温度场属于瞬时非线性温度场,热源的移动模拟利用APDL语言建立热源载荷的矩阵表格将空间域离散到时间域上。由于在计算过程中要反复调用这个高斯热源矩阵,因此将这一段频繁使用的ANSYS命令流封装成一个宏文件。热源移动的算法描述为:在第一次求解过程中假设模型具有统一的边界条件和初始温度,在后续循环中首先除去上一道的热源输入,在新的位置上提供热源,并将上一次计算温度作为本次的初始条件来计算热传导矩阵和比热矩阵,按照指定坐标和时间步长依次循环移动直到熔道全部完成^[11]。

3 数值模拟

3.1 有限元模型的建立

有限元模型如图1所示,为能够准确体现粉末温度场分布规律,需要较小的网格尺寸,而完成整体扫描又要花费大量时间,因此为了保证计算精度并提升计算效率,选取小尺寸试件并针对基板和试件采取不同的网格。选取 ANSYS 中的 Solid70 热单元进行网格划分,试件尺寸为 $4\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.05\text{ mm}$,粉末材料为 Ti6Al4V,采用较细的网格尺寸 $0.05\text{ mm} \times 0.05\text{ mm} \times 0.05\text{ mm}$;基板材料为国产牌号 TC4,尺寸为 $4.8\text{ mm} \times 2.4\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$,将基板分为上下两部分,下部采用比较大的网格,网格尺寸为 0.4 mm ,以节约计算时间,上部采用自由网格实现不同尺寸的六面体过渡^[12]。

由于 Solid70 只支持一个自由度上的载荷施加,而粉床表面存在对流、辐射和热流密度三种载荷,采用表面效应单元 Surf152,在施加热流密度载荷的同时,在粉床表面建立热效应单元来施加热辐射,并建立空间节点吸收粉床表面散发的热量,以保证能量守恒。整个模型总计含有 11000 个节点和 35993 个单元。

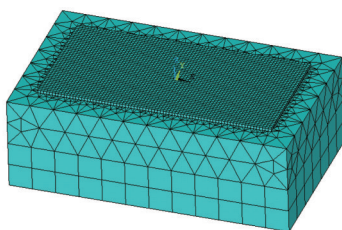


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

SLM 加工过程中高能量激光产生的热冲击很大,在空间域内大的温度梯度导致严重非线性,造成求解过程收敛困难和解的不稳定性。为了获得收敛的解,考虑:

- 1) 将载荷步按照 $5 \times 10^{-4}\text{ s}$ 步长施加,以保证获得收敛的解;
- 2) 采用完全 Newton-Raphson 方法进行平衡迭代,并激活自适应下降因子;
- 3) 打开线性搜索功能;
- 4) 调整收敛准则,选择雅可比求解器进行求解。

3.2 扫描路径的确定

选取蛇形扫描和岛式扫描两种方式进行有限元仿真。蛇形扫描方式是一种常用的 SLM 扫描方式,扫描线起于同侧,且所有的扫描线都相互平行,如图 2(a)所示。

岛式扫描方式将粉床平均分成若干方块,每个方块内按照蛇形扫描方式完成扫描,相邻块中扫描方向相互垂直;完成一个方块扫描后,在对角线方向进行下一个方块的扫描,以缓解激光能量在某个区域内的集中,以此循环直到熔道全部完成,如图 2(b)所示。

为了观察岛屿间的相互作用关系,取左上角岛屿边界上 A、B、C、D、E 5 个点用于比较,同时也在蛇形扫描路径上取相同的点。A、B、C 沿 Y 路径分布,三点距离岛屿边界为 0.1 mm ,D、E 两点沿 X 路径分布,并且与 B 点位于同一水平线上,如图 2 所示。

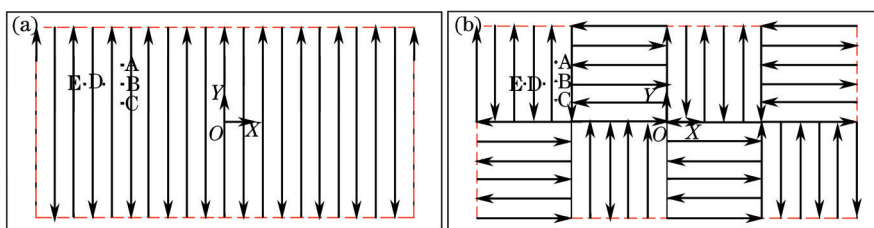


图2 热源扫描路径。(a) 蛇形扫描;(b) 岛式扫描

Fig.2 Laser scanning path. (a) S-shaped scanning strategy; (b) island scanning strategy

3.3 计算结果及分析

在有限元分析中选取德国 Concept Laser M2 金属激光熔融系统中内置的加工参数,模拟计算的工艺参

数如表 1 所示。

表 1 模拟计算的工艺参数

Table 1 Process parameters of simulation

Parameter	Value
Laser power P/W	180
Laser velocity $V/(m/s)$	1
Spot size $D/\mu m$	200
Weld width $H/\mu m$	200
Powder layer thickness T/mm	0.05
Thermal analysis element	Solid70

3.3.1 温度云图分析

图 3 为岛式扫描和蛇形扫描都到达粉床左上角时的熔池剖视图。可以看出,岛式扫描与蛇形扫描熔池形态基本一致,光斑周边区域发生了明显的温度集中,熔池呈椭球形,具体表现为熔池前端温度等值线比后端细密,熔池前端能量集中更突出。这是由粉床温度扩散和光源移动相互叠加造成的。

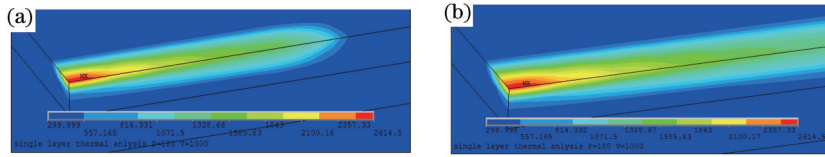


图 3 熔池温度场剖切云图。(a) 岛式扫描; (b) 蛇形扫描

Fig.3 Sectional view of pool temperature field distribution. (a) Island scanning strategy; (b) S-shaped scanning strategy

取模型仿真 8×10^{-3} s 时温度场的分布云图,获得岛式扫描和蛇形扫描温度分布云图(图 4)。此时,岛式扫描激光已经完成 4 块区域的扫描,并处于左下角的方块内向 X 正方向移动。激光光斑中心温度达到 2788 K,高于钛粉熔点,实现了钛粉的熔化,产生了液相。在熔化过程中基板在靠近光斑位置的温度达到了 1300 K,正在扫描的区域内产生热积聚,且温度梯度较大,热量向着已经冷却的相邻岛屿扩散。这是因为岛式扫描为短矢径扫描,相邻扫描线之间温度衰减慢,在局部地区会产生较高的能量分布。由于岛屿之间的热传导,已经扫描的区域内温度随着时间逐渐降低,且热量向未扫描的区域扩散。同时已扫描并发生冷却的区域会再次与相邻岛屿发生热量传递,温度分布更为广泛。

蛇形扫描方式中,激光向 Y 正方向移动。由图 4(b)可知,激光光斑中心温度达到 2768 K,略低于岛式扫描的最高温度。蛇形扫描的熔道向 X 正方向移动,在未扫描部分温度为室温,云图明显地出现左右部分温度差异较大的现象。对比温度云图发现,与蛇形扫描方式相比,岛式扫描方式在整个加工面内温度具有较好的对称性和平衡性。

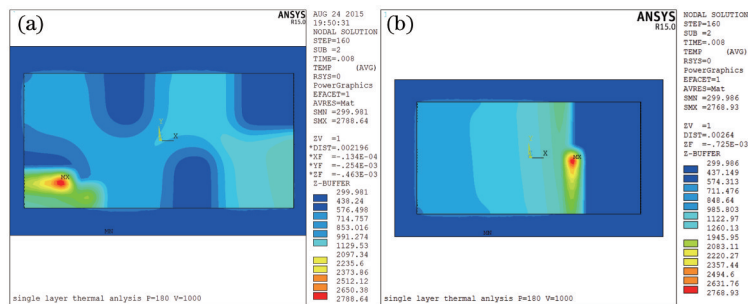


图 4 8×10^{-3} s 时温度场的分布云图。(a) 岛式扫描; (b) 蛇形扫描

Fig.4 Distribution of temperature field at 8×10^{-3} s. (a) Island scanning strategy; (b) S-shaped scanning strategy

3.3.2 典型温度曲线分析

在温度云图分析基础上,抽取岛屿边界 A、B、C 三点,获得温度-时间曲线,如图 5(a)所示。

岛式扫描方式下,三点温度变化规律大致相同:由于邻道激光扫描的热量累积效应,A 点温度逐渐升高达到第一个峰值 1750 K。之后激光扫描到 A 点,此时温度急剧上升达到 2300 K,激光离开后温度又急剧下降。最后,光斑跳转到相邻区域,在光斑离开后又出现了温度升高的现象,这是未扫描部分通过热传导等方

式重新加热已扫描部分,可以逐步减小温度梯度,提高温度分布的均匀性。而且,考虑到热力耦合的机理,岛式扫描在相邻岛屿之间可以产生相互退火的效果,大大降低了激光扫描过程中内应力的产生,从而降低了最终生产部件的大变形风险^[13]。

对比图 5(a)和图 5(b)可以看出,图 5(b)蛇形扫描中并没有温度二次升高的现象,这不利于能量的再分布及内应力的消除。

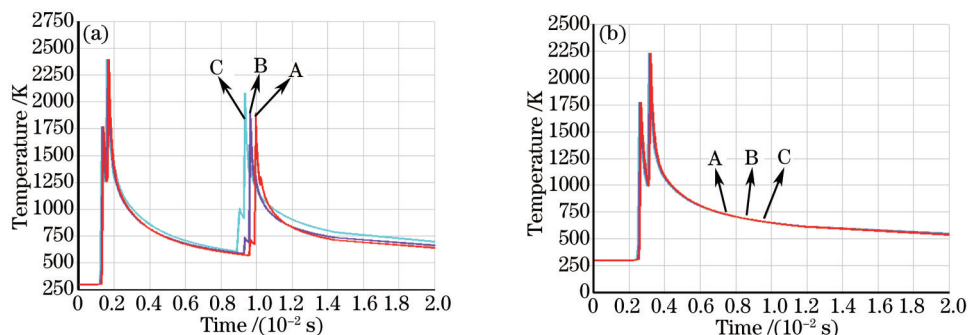


图 5 定点 A、B、C 的温度-时间曲线。(a) 岛式扫描; (b) 蛇形扫描

Fig.5 Temperature-time curves of points A, B, C. (a) Island scanning strategy; (b) S-shaped scanning strategy

进一步抽取垂直岛屿边界的 B、D、E 三点进行温度曲线分析,获得图 6 所示温度曲线。岛式扫描方式中, B、D、E 三点在小于 8×10^{-3} s 时出现的峰值规律基本一致,达到了 2300 K。在 8×10^{-3} s 时, B 点出现了较高的峰值,达到了 1800 K。分析认为由于 B 点更为靠近岛屿边界,相邻岛屿的热量扩散到 B 点,使得 B 点温度升高。同时观察 D 点和 E 点温度曲线,大于 8×10^{-3} s 之后, D 点的温度曲线出现了小幅升高的现象,升高约 30 K; 而 E 点曲线并没有出现此温度拐点。这是因为相邻岛屿扫描后的能量扩散只能够对其附近的岛屿边界产生明显的影响,向岛屿内部的能量扩散能力有限。蛇形扫描方式中,三点温度曲线具有一致性, D 点的最高温度略低于 B、E 两点最高温度。这是由于,相对于 B、E 两点, D 点在达到第一个较小的峰值时,经历较长时间,冷却光斑再次影响到 D 点,因此 D 点峰值温度略低于 B、E 两点峰值温度。

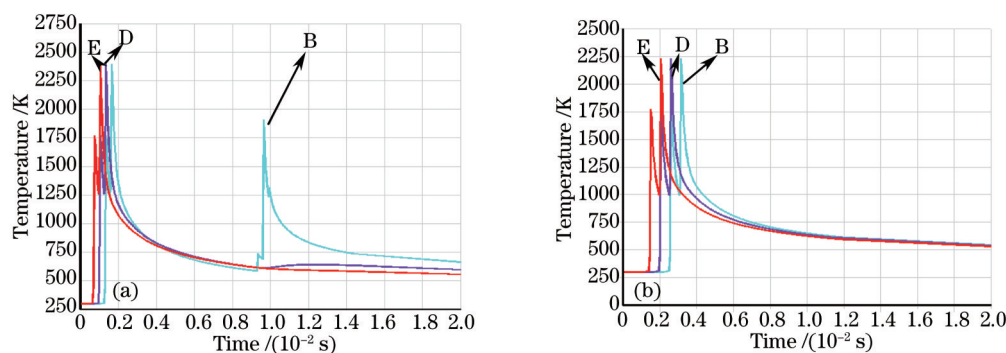


图 6 定点 B、D、E 的温度-时间曲线。(a) 岛式扫描; (b) 蛇形扫描

Fig.6 Temperature-time curves of points B, D, E. (a) Island scanning strategy; (b) S-shaped scanning strategy

3.3.3 温度场分析

图 7(a)为岛式扫描完成 0.2 s 后的温度场分布,最高温度为 347 K,最低温度为 339 K,温差为 8 K;图 7(b)为蛇形扫描完成后的温度场分布,最高温度为 351 K,最低温度为 331 K,温差为 20 K。可以看出岛式扫描结束后温度云图分布更为均匀,整体沿 YOZ 平面和 XOZ 平面都呈对称分布。相对于图 7(a),图 7(b)的整体分布向 X 正方向发生了偏移,分布略微不均。

4 试验验证

试验采用德国 Concept Laser M2 金属激光熔融系统,选取与表 1 一致的工艺参数,采用 Ti6Al4V 粉末,分别进行岛式扫描和蛇形扫描加工,获得试件。使用 FEI Quanta 250FEG 场发射扫描电镜(SEM)获得 SLM 成形顶部 SEM 微观形貌的照片,如图 8 所示。

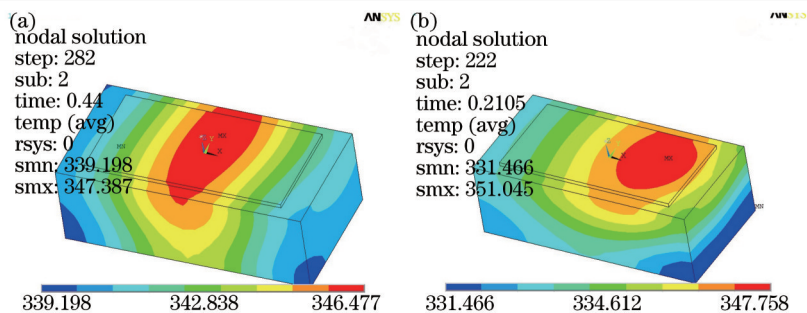


图7 扫描完成后的温度场分布。(a) 岛式扫描; (b) 蛇形扫描

Fig.7 Distribution of temperature field after scanning. (a) Island scanning strategy; (b) S-shaped scanning strategy

由图 8(a)可见,岛屿内部相邻熔道之间有部分重合,且完全熔接,结构平整,成形质量好,但相邻岛屿之间的搭接质量较差,这是因为岛式扫描是一种随机选择岛屿并扫描的策略,虽然有利于避免较大的应力集中,但是由于相邻岛屿之间没有顺序扫描,先扫描的岛屿会将能量传递给未扫描的区域,产生能量扩散使得本区域温度下降,特别是岛屿边缘,能量没有持续累积,岛屿内部温度远高于岛屿搭接边界的温度[图 4(a)],造成了岛屿之间搭接效果不及岛屿内部相邻熔道之间的搭接效果。这与有限元模拟所得到的结果相吻合。由图 8(b)可以看出,蛇形扫描的熔池形貌类似于岛式扫描岛型内部填充效果。

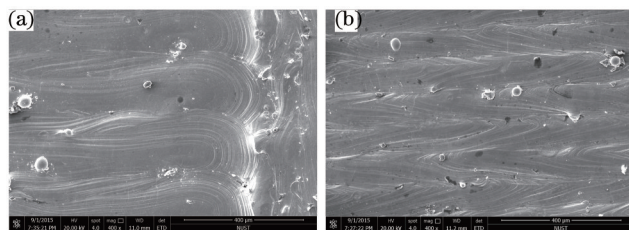


图8 选区激光熔化试件顶面SEM微观形貌。(a) 岛式扫描; (b) 蛇形扫描

Fig.8 SEM images of the top surface of test specimen manufactured by SLM. (a) Island scanning strategy; (b) S-shaped scanning strategy

为进一步分析,用金相砂纸打磨试件侧面至 800#,机械抛光,使样件表面达到镜面效果,用 Kroll 腐蚀剂 (HF、HNO₃、H₂O 体积比为 1:2:7) 腐蚀试件 15 s,使用 CMM-20E 金相显微镜进行观察,获得试件侧面显微照片,如图 9 所示。在 SLM 急热急冷过程中产生了清晰可见的魏氏组织,在加热过程中出现了粗大的原始β相(柱状晶);在快速冷却过程中,出现了针状α相的析出。对比发现图 9(a)岛式扫描试件生长出现的柱状晶平均宽度为 185 μm,图 9(b)蛇形扫描试件生长出现的柱状晶平均宽度为 75 μm。这是因为柱状晶的生长方向是沿着热流的反方向进行的,激光能量主要传递方向是沿着已成形的基体方向(负 Z),次要传递方向是沿着粉床平面方向(XOY),所以柱状晶呈竖直分布。从图 4 中可以看出岛式扫描的温度场分布相对于蛇形扫描在 XOY 方向上更为广泛和开阔,当温度下降之后又会出现温度二次升高的情况,使得温度保持稳定,β相有较长的时间变粗^[14],基于上述原因,图 9(a)柱状晶的尺寸大于图 9(b)。

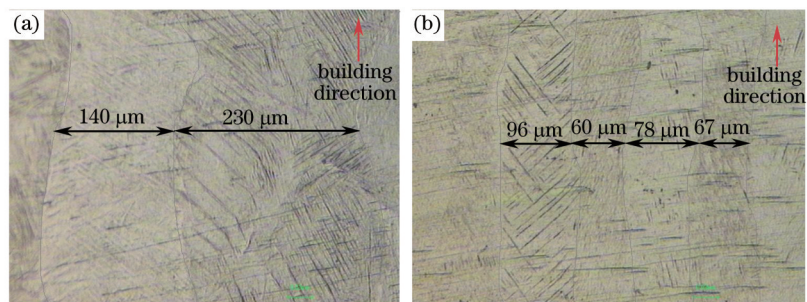


图9 断面光学显微组织。(a) 岛式扫描; (b) 蛇形扫描

Fig.9 Side image of the optical microstructures. (a) Island scanning strategy; (b) S-shaped scanning strategy

5 结 论

SLM成形过程中,随着激光束的快速移动,熔池呈水滴状,前端温度等值线比后端细密。在岛式扫描机制下,已扫描的岛屿会向相邻岛屿传递热量,达到预热的效果;已扫描的岛屿边缘受到相邻岛屿的影响会存在再次升温的现象。扫描结束后整体温度场分布与蛇形扫描相比更为均匀对称,有利于减小应力集中。分区扫描对岛屿边界的影响较为明显,与岛屿内部相比,相邻的岛屿之间的搭接质量较差;岛式扫描温度梯度较小的温度场造成了试件柱状晶更为粗大。通过该有限元模型可以掌握岛式扫描SLM温度场的动态分布及激光熔池的加热和冷却规律,为选区激光熔化温度场的理解提供了一种有效的方法,同时也为将来控制金相定向生长和SLM工艺的进一步优化提供参考。

参 考 文 献

- 1 Kruth J P, Vandenbroucke B, Vaerenbergh J, *et al.*. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques [C]. Proceedings of the International Conference on Polymers & Moulds Innovations, 2005: 1-7.
- 2 Kruth J P, Mercelis P, Van Vaerenbergh J, *et al.*. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26-36.
- 3 Yang Yongqiang, Wang Di, Wu Weihui. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601007.
杨永强,王迪,吴伟辉.金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J].中国激光,2011,38(6):0601007.
- 4 Mercelis P, Kruth J P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(5): 254-265.
- 5 Zhang Kai, Liu Tingting, Zhang Changdong, *et al.*. Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903007.
张凯,刘婷婷,张长东,等.基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J].中国激光,2015,42(9):0903007.
- 6 Kolossov S, Boillat E, Glardon R, *et al.*. 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(2): 117-123.
- 7 Krol T A, Seidel C, Schilp J, *et al.*. Verification of structural simulation results of metal-based additive manufacturing by means of neutron diffraction[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 849-857.
- 8 Krauss H, Zaeh M F. Investigations on manufacturability and process reliability of selective laser melting[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 815-822.
- 9 Wang Chilin, Yang Yongqiang, Wu Weihui. Experimental study on rapid prototyping of Ti-Ni alloy by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(s1): 190-195.
王池林,杨永强,吴伟辉.Ti-Ni合金选区激光熔化快速成型基础实验研究[J].中国激光,2007,34(s1):190-195.
- 10 Bechmann F, Henzler J. Production and quality control of aeronautical parts manufactured by LaserCUSING®[C]. Eucomas Conference, 2009.
- 11 Hussein A, Hao L, Yan C, *et al.*. Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting[J]. Materials and Design, 2013, 52: 638-647.
- 12 Yao Huashan, Shi Yusheng, Zhang Wenxian, *et al.*. Numerical simulation of the temperature field in selective laser melting[J]. Applied Laser, 2007, 27(6): 456-460.
姚化山,史玉升,章文献,等.金属粉末选区激光熔化成形过程温度场模拟[J].应用激光,2007,27(6):456-460.
- 13 Simonelli M. Microstructure evolution and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V[D]. Loughborough: Loughborough University, 2014: 152-153.
- 14 Zaeh M F, Branner G. Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting[J]. Production Engineering, 2010, 4(1): 35-45.

栏目编辑:张浩佳