

# 扫描路径对选区激光熔化温度场的影响

王稳, 谢志江\*, 赵增亚, 张生永

重庆大学机械工程学院, 重庆 400044

**摘要** 对平行于长边和平行于短边的两种“Z”形扫描路径进行有限元仿真。综合考虑热传导、热对流、热辐射效应和温度对合金粉末材料热物性参数和相变潜热的影响,建立瞬态选区激光熔化(SLM)温度场有限元模型并与实验测得的残余应力数据和金相图进行对比。结果表明:在 SLM 过程中,短边扫描形成的温度场更均匀,温度标准差和温度梯度更小,成形件的残余应力和孔隙更小;在扫描过程中,扫描区域边界点的温度梯度大于扫描区域中点的温度梯度,残余应力峰值出现在成形件边界处;通过预热基板,可以使温度场更均匀,减少温度标准差和温度梯度,达到减小成形件残余应力和孔隙的目的,提高成形质量。研究扫描路径对温度场的影响,可为提高 SLM 技术水平提供参考。

**关键词** 激光技术; 选区激光熔化; 扫描路径; 有限元仿真; 温度标准差; 温度梯度; 残余应力

**中图分类号** TN249; TF124

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.051401

## Influence of Scanning Path on the Temperature Field in Selective Laser Melting

Wang Wen, Xie Zhijiang\*, Zhao Zengya, Zhang Shengyong

College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** The finite element simulation is used to investigate two different Z-shaped scanning paths parallel to the long and short sides. Considering the effects of heat conduction, heat convection, heat radiation, and temperature on the thermal properties of alloy powder materials, the finite element model of the transient selective laser melting (SLM) temperature field is established. Then, the established model is compared with the experimentally measured residual stress data and metallographic diagram. It is determined that in the SLM process, the temperature field formed by short-side scanning is more uniform; the temperature standard deviation, the temperature gradient, the residual stress, and the porosity of the formed part are smaller than those in the long-side scanning. During the scanning process, the temperature gradient at the boundary point of the scanning region is greater than that of the scanning region, and the residual stress peak appears at the boundary of the formed part. By preheating the substrate, the temperature field can be more uniform, and both the standard deviation and the gradient of the temperature field can be reduced. Therefore, the residual stress and the porosity of the formed part are reduced, and the forming quality is improved. The investigation of the influence of scanning path on the temperature field provides the reference for the improvement of the SLM technique.

**Key words** laser technique; selective laser melting; scanning path; finite element simulation; temperature standard deviation; temperature gradient; residual stress

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390

## 1 引言

增材制造(AM)技术是一种通过材料逐层累加直接制造实体零件的技术<sup>[1]</sup>,融合了计算机辅助设

计、材料加工与成形技术,可以将三维软件中设计好的实体三维模型直接打印成形。21 世纪以来,AM 技术发展迅速,已经广泛应用于航空航天、汽车、模具、医疗等领域。与传统加工工艺相比,AM 生产效

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2019-08-09; 录用日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(U1530138)

\* E-mail: xie@cqu.edu.cn

率高,基本不需要后续再加工,可缩短加工周期,避免材料浪费,减少模具浪费<sup>[2-3]</sup>。

选区激光熔化(SLM)技术是金属 AM 领域的重要技术之一<sup>[4-5]</sup>,1995 年由德国 Fraunhofer 激光研究所最早提出,具体过程为:在计算机上利用 SolidWorks、CATIA、UG 等三维建模软件设计出零件的实体模型,然后通过 Cura、SliceCrafter 等三维切片软件将实体模型切片,进而得到每个截面的轮廓数据,系统会根据轮廓数据生成扫描路径,设备控制激光束按照扫描路径逐渐熔化每层金属粉末材料,逐层堆叠成三维金属零件。

在 SLM 过程中,激光能量瞬时集中输入,容易导致 SLM 温度场不均匀,且材料本身的物理属性随着温度变化而产生非线性变化,进而导致成形件残余应力过大,成形质量差。李佳桂等<sup>[6]</sup>通过有限元仿真对 SLM 成形瞬态温度场数值变化进行研究;马英怡等<sup>[7]</sup>对 SLM 中扫描速度对成形缺陷及性能的影响进行研究,发现通过调整扫描速度可以有效减少部分缺陷的产生;葛亚楠等<sup>[8]</sup>研究了扫描策略对钛合金成形精度的影响,发现螺旋线扫描策略成形件的外形结构精度更高;Li 等<sup>[9]</sup>通过实验研究了激光功率对 SLM 成形过程的影响;万乐等<sup>[10]</sup>通过实验对分区扫描的 SLM 钛合金的成形质量进行研究;马涛等<sup>[11]</sup>对 SLM 成形 Ti6Al4V 疲劳性能进行研究,发现对疲劳试样进行抛光处理,可消除表面粘粉现象,减少疲劳源数目,提高疲劳寿命。

关于扫描路径对成形件温度场的影响鲜有报道,这主要是因为目前很难通过实验手段对瞬态温度场进行精确测量。与实验相比,有限元仿真可以获得任何时刻、任何位置的温度场变化,可以提供更加全面的信息并且降低成本。本文通过有限元仿真分析平行于长边和平行于短边的两种不同“Z”形扫描路径对成形件温度场的影响,提出可以通过基板预热的方式减小成形过程的温度标准差和温度梯度,使温度场更均匀,并测量了成形件表面残余应力,将其与有限元仿真结果进行对比,为 SLM 打印成形件提供参考依据。

## 2 SLM 温度场模拟基本理论

### 2.1 热传导方程

在 SLM 过程中,激光直接辐照在金属粉末表面,随着激光的移动,金属粉末温度迅速升高并熔化,当激光移动后,已经熔化的粉末会凝固为实体,此过程属于非线性瞬态热传导过程,其控制方程满

足经典的傅里叶热方程<sup>[12-13]</sup>,即

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad (1)$$

式中: $\rho$  为材料的密度; $c$  为材料比热容; $T$  为温度场的分布函数; $t$  为传热时间; $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的导热系数; $Q$  为内热源。

本模型中,假设材料为各向同性的均质材料,所以 3 个方向的材料导热系数相同,控制方程就可以转变为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q, \quad (2)$$

式中: $k$  为导热系数。

### 2.2 初始条件和边界条件

为了求解热传导方程,需要定解条件,对于非线性瞬态的热传导方程,定解条件有两类,即初始温度和边界条件。假设金属粉末初始温度为  $T_0$ ,则初始条件为

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z). \quad (3)$$

激光直接辐照在金属粉末表面,金属粉末表面吸收的热量等于吸收的激光热量、热对流与热辐射散失的热量之和,属于第三类边界条件<sup>[14]</sup>

$$k \frac{\partial T}{\partial n} - Q + h(T - T_0) + \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) = 0, \quad (4)$$

式中: $h$  为对流换热系数; $\sigma$  为斯特藩-玻尔兹曼常量; $\epsilon$  为热辐射系数。

### 2.3 高斯激光能量模型

在 SLM 有限元分析中,使用最广泛的激光热源模型是高斯分布热源模型<sup>[15-16]</sup>,它假设激光最高热量在光斑中心且在传播方向上对称分布,高斯热源模型如图 1 所示,表达式为

$$q = \frac{2AP}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right), \quad (5)$$

式中: $q$  为热流密度; $A$  为金属粉末对激光的吸收率; $P$  为激光功率; $r_b$  为激光光斑半径; $r$  为粉末上任意一点到激光光斑中心的距离。

### 2.4 材料热物性参数

本模型选择 Ti6Al4V 粉末材料,粉末材料的热物性参数有导热系数、比热容、密度和表面辐射率,这些参数随着温度的变化呈现出非线性变化规律,而且粉末的热物性参数与固体热物性参数有着显著的差异,其中导热系数尤为重要。粉末的导热系数很低,接近于零,但达到熔点后迅速上升,有限元分析中必须予以考虑,图 2 所示为 Ti6Al4V 粉末材料

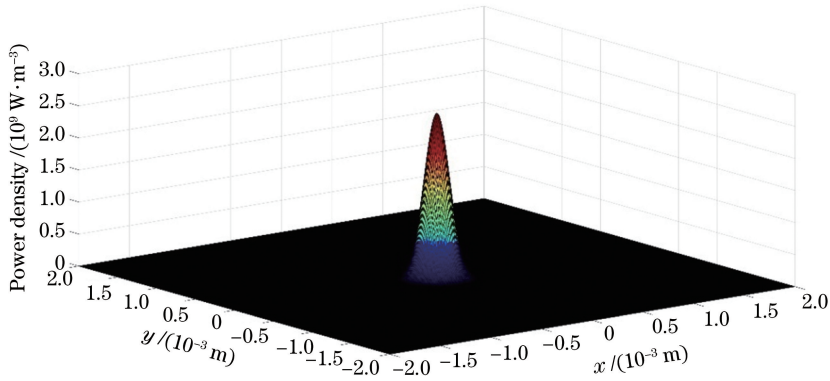


图1 高斯热源模型

Fig. 1 Gaussian heat source model

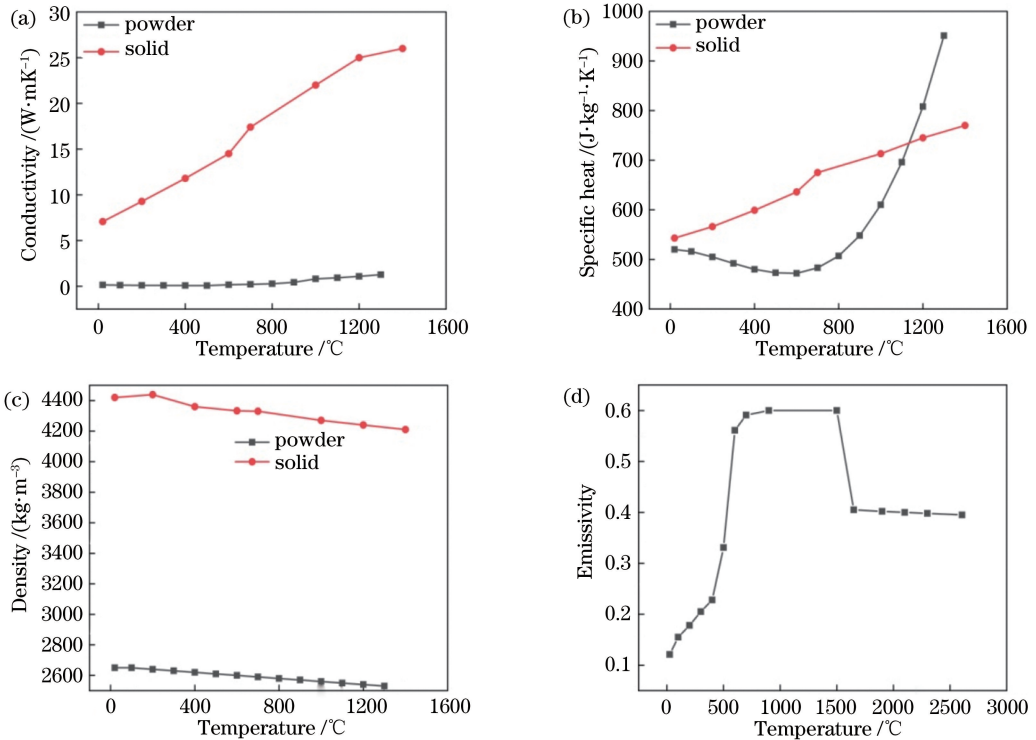


图2 Ti6Al4V 材料的热物性参数。(a)导热系数;(b)比热容;(c)密度;(d)表面辐射率

Fig. 2 Parameters of thermophysical properties for Ti6Al4V at different temperatures.

(a) Conductivity; (b) specific heat; (c) density; (d) emissivity

和固体材料在不同温度下的热物性参数<sup>[17]</sup>。

### 3 数值模型的建立与实现

#### 3.1 有限元模型的定义

利用 COMSOL 软件自带的几何建模功能完成模型的建立,试件尺寸为 70 mm × 20 mm × 0.04 mm,粉末材料为 Ti6Al4V,网格尺寸为 0.1 mm × 0.1 mm × 0.02 mm,扫描区域表面共有 140901 个网格节点;基板尺寸为 90 mm × 20 mm × 10 mm,基板材料为工业纯钛,网格尺寸为 0.5 mm × 0.5 mm,为提高计算效率,采用等比扫略方式生成六面体网格,使得网格的尺寸随着与扫描区域的距离增

大而增大。时间步长设置为激光扫描单个网格所需要的时间,即 10<sup>-4</sup> s,计算总时间为 2.52 s。有限元分析参数如表 1 所示,有限元模型如图 3 所示。

表 1 有限元分析参数表

Table 1 Finite element analysis parameters

Parameter	Value
Laser power $P$ /W	160
Laser velocity $V$ / (m · s <sup>-1</sup> )	1000
Spot size $D$ / μm	200
Hatch spacing $\delta$ / μm	200
Powder layer thickness $\theta$ / μm	40
Powder initial temperature $T_0$ / °C	25

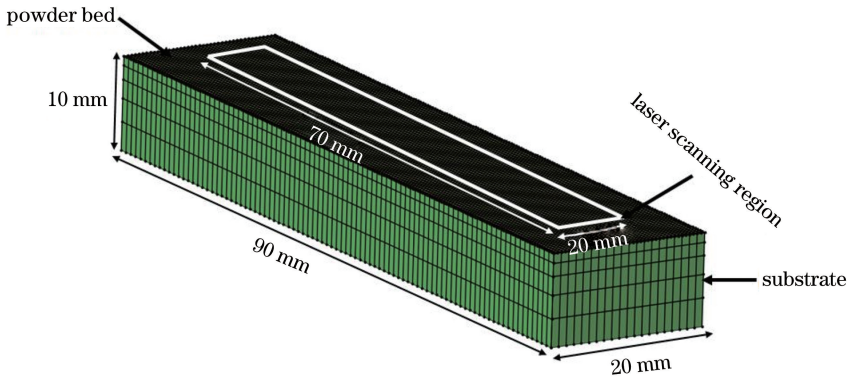


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

激光在金属粉末表面移动,为实现材料属性从粉末态到固体的转化,使用 COMSOL 软件中不可逆转变功能,所有单元原始材料属性为粉末材料属性,当温度超过熔点再降至熔点以下后,该单元的材料属性则变为固体材料属性。在 SLM 过程中,金属粉末经历了熔化到凝固过程,在分析温度场时,相变潜热是不能忽略的因素,在 COMSOL 软件中,相变潜热是通过材料在不同温度下的焓值实现的。焓值定义为密度与比热容的乘积对温度的积分:

$$H = \int \rho c(T) dT. \quad (6)$$

### 3.2 扫描路径的确定

分别选取平行于长边和平行于短边的两种不同“Z”形扫描路径在不预热基板和预热基板的情况下进行有限元仿真。为了方便观察温度的变化规律,取 A、B、C 3 点进行比较,扫描路径如图 4 所示。

### 3.3 不同扫描路径下的温度场分析

#### 3.3.1 基板不预热下的温度场分析

取激光扫描中间时刻即激光光斑到达 B 点时

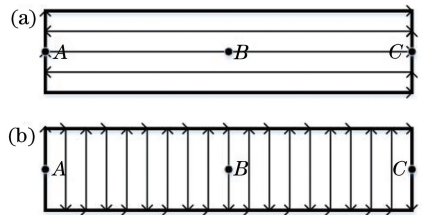


图 4 激光扫描路径。(a)长边扫描;(b)短边扫描

Fig. 4 Laser scanning path. (a) Long-side scanning;

(b) short-side scanning

刻的温度场分布云图,获得长边扫描和短边扫描温度场分布云图,如图 5 所示。此时,长边扫描激光光斑中心温度达到 2280 °C,短边扫描激光光斑中心温度达到 2260 °C,差别不大,且均高于钛合金粉末的熔点,实现了钛合金粉末的熔化,已经完成扫描的区域与未扫描的区域有着明显的温差,但仅从某个时刻的温度场云图分析,无法分析温度分布和温度梯度分布的具体情况。扫描区域共有 140901 个网格节点,取其温度标准差和温度梯度平均值为因变量,观察其在整个扫描过程中的变化情况,结果如图 6 所示。

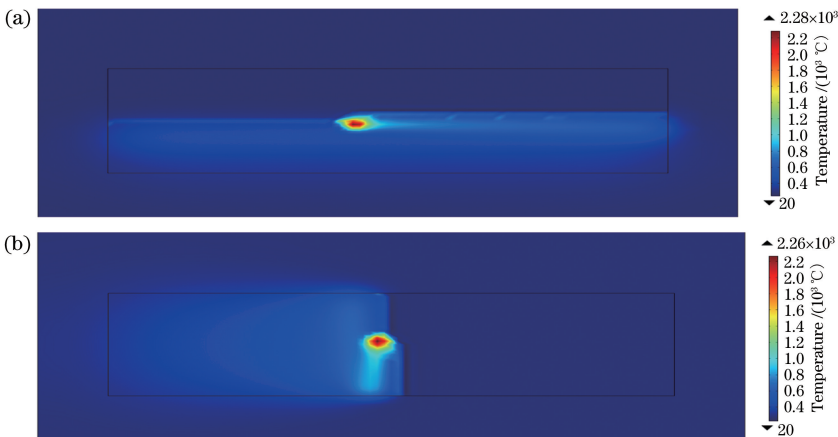


图 5 温度场分布云图。(a)长边扫描;(b)短边扫描

Fig. 5 Distribution of the temperature field. (a) Long-side scanning; (b) short-side scanning

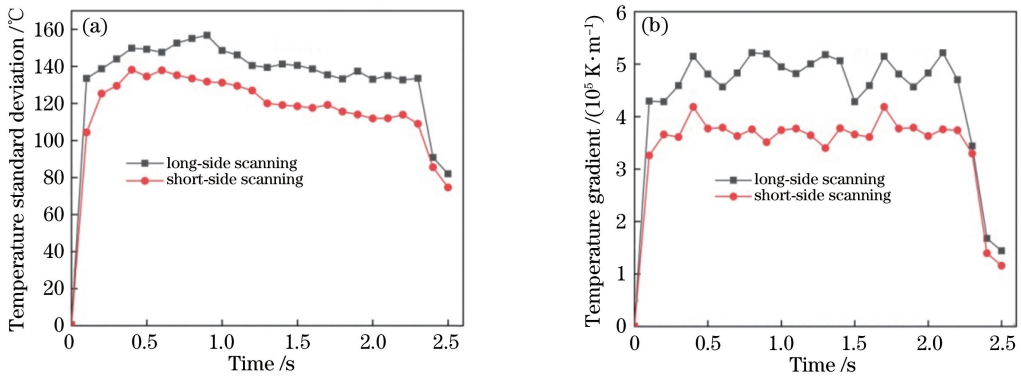


图 6 温度结果对比图。(a)温度标准差;(b)温度梯度

Fig. 6 Comparison of temperature results. (a) Temperature standard deviation; (b) temperature gradient

从图 6(a)可以看出,在激光扫描的整个过程中,长边扫描的温度标准差始终大于短边扫描的温度标准差,短边扫描的温度标准差约为长边扫描的温度标准差的 85%,但较小的温度标准差并不能够完全说明温度场的均匀性,因为温度梯度取决于某一方向的温度变化率。从图 6(b)可以看出,长边扫描的温度梯度始终大于短边扫描的温度梯度,短边扫描的温度梯度约为长边扫描的温度梯度的 78%,

说明相比于长边扫描,短边扫描的温度场分布更加均匀。这是因为在 SLM 过程中,当扫描路径变短时,在扫描速度相同的情况下,单道扫描时间变短,刚被扫描的区域没有充足的时间进行冷却,当激光对相邻路径进行扫描时就不会产生很大的温度波动,所以短边扫描的温度梯度更小,温度场更加均匀。

为了进一步分析温度梯度的变化规律,取图 4 中的 A、B、C 3 点,获得温度梯度-时间曲线,如图 7 所示。

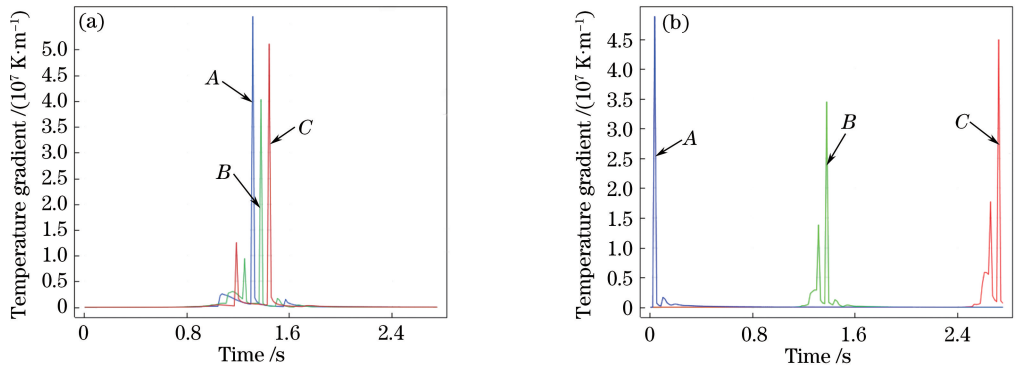


图 7 点 A、B、C 的温度梯度-时间曲线。(a)长边扫描;(b)短边扫描

Fig. 7 Change of temperature gradient with time at points A, B, and C. (a) Long-side scanning; (b) short-side scanning

对比图 7(a)和图 7(b)可以看出,当激光扫描至对应点时,局部能量的输入使该点的温度梯度到达峰值,而且长边扫描峰值大于短边扫描峰值。无论是长边扫描还是短边扫描,扫描区域边界点的温度梯度峰值均大于扫描区域中点的温度梯度峰值。这是因为扫描区域周围被粉末材料覆盖,粉末材料的热传导系数很低,能量需要较长时间才能传递到粉末材料上,导致周围覆盖的粉末材料的温度无法及时升高,从而形成较大的温度梯度。

### 3.3.2 基板预热下的温度场分析

将基板预热至 300 °C,有限元仿真参数和扫描路径与上述仿真一致,取扫描区域网格节点温度标

准差和温度梯度平均值为因变量,与上述仿真结果对比如图 8 所示。

从图 8 可以看出,将基板进行预热,在长边扫描和短边扫描下,温度标准差和温度梯度都不同程度地变小,这是因为通过预热基板,热量可以均匀地传递给粉末,使其导热系数变大,热传导性更好;而且基板的导热系数较大,热量可以通过基板迅速扩散,从而对未扫描区域的粉末进行预热,使热量相对均匀地在粉末中扩散。所以在进行激光扫描前,可以通过预热基板的方式,减小成形过程中的温度标准差和温度梯度,使温度场更加均匀,从而达到减小残余应力、提高成形件质量的目的。

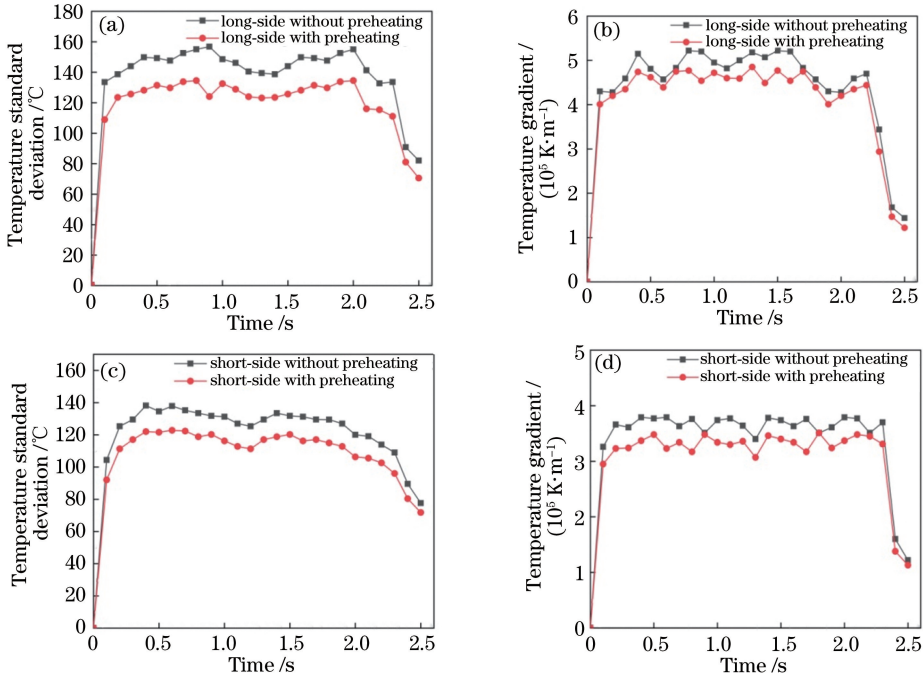


图 8 温度扫描结果对比图。(a)长边扫描温度标准差;(b)长边扫描温度梯度;(c)短边扫描温度标准差;  
(d)短边扫描温度梯度

Fig. 8 Comparison of scanning results of temperature. (a) Temperature standard deviation of long-side scanning;  
(b) temperature gradient of long-side scanning; (c) temperature standard deviation of short-side scanning;  
(d) temperature gradient of short-side scanning

### 4 实验验证

实验设备采用德国 EOS M280 工业级 3D 打印机对 Ti6Al4V 金属粉末进行打印,基板材料为工业纯钛。基板的尺寸为  $90 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,成形件的尺寸为  $70 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。实验参数选取与仿真一致的工艺参数:激光功率为 160 W,激光光斑半径为 200  $\mu\text{m}$ ,扫描间距为 200  $\mu\text{m}$ ,扫描速度为 1000 mm/s,铺粉厚度为 40  $\mu\text{m}$ ,粉末初始温度为 25 °C。为避免金属材料与空气中某些成

分在高温环境下发生反应,实验过程中抽空成形腔内的空气并填充氩气至 1 个标准大气压 ( $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ )。采用平行于长边和平行于短边的两种不同“Z”形扫描路径打印成形件,实验样本如图 9 所示。

实验样本打印实验完成后,使用线切割技术,在基板上取下成形件,使用 X 射线残余应力测量仪测量成形件的表面残余应力,在平行于长边和平行于短边的两种扫描路径下,沿基板长度方向的表面残余应力分布如图 10 所示。

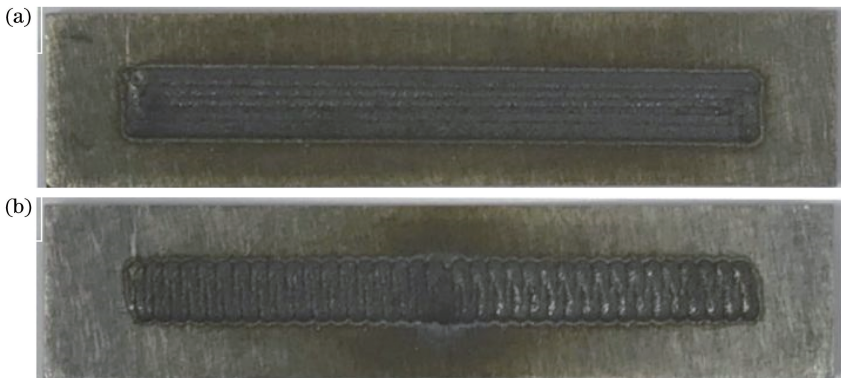


图 9 实验样本图。(a)长边扫描实验样本;(b)短边扫描实验样本

Fig. 9 Experimental samples. (a) Experimental sample of long-side scanning; (b) experimental sample of short-side scanning

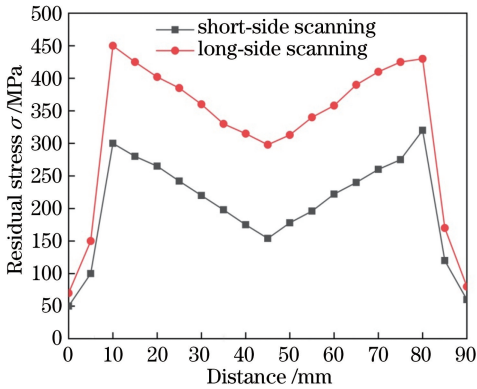


图 10 残余应力分布图

Fig. 10 Distribution of residual stress

从图 10 可以看出,短边扫描产生的残余应力小于长边扫描产生的残余应力,残余应力主要分布在

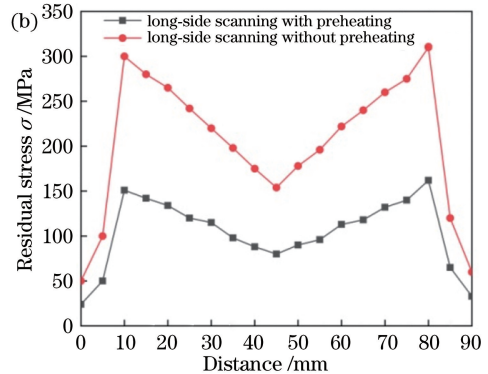
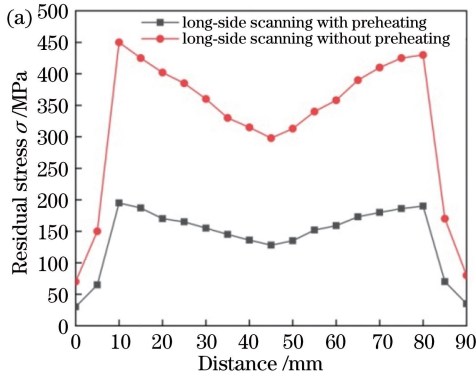


图 11 预热条件下的残余应力值。(a)长边扫描;(b)短边扫描

Fig. 11 Residual stress value under preheating conditions. (a) Long-side scanning; (b) short-side scanning

从图 11 可以看出,通过预热基板,可以减小成形件的残余应力,这是因为通过预热基板,热量在粉末中更加均匀地传递,减小了成形过程中的温度梯度,使温度场更加均匀。相比于基板初始温度为 20 °C 的情况,当基板预热温度为 300 °C 时,长边扫描残余应力值减少了 53.1%,短边扫描残余应力值减少了 50.2%。

为更好验证上述结论,制作不同扫描路径条件下成形件的金相图,如图 12 所示<sup>[18]</sup>。从图 12 可以看出,在采取不预热长边扫描的成形件的金相图中,孔隙较大;在采取短边扫描且预热温度为 300 °C 的成形件的金相图中,孔隙最小。这是因为,采取短边扫描的方式,在扫描速度相同的情况下,相邻两道扫描的时间间隔较短,热量散失较少,当激光对相邻路径进行扫描时,不会产生很大的温度波动,温度梯度更小,温度场更加均匀,熔池的流动性更强;对基板进行预热,可以使热量在粉末中更加均匀地传递,减小成形件和基板之间的温度梯度,使温度场更加均

扫描区域,并且峰值出现在扫描区域的边界上,最小值出现在扫描区域中点附近位置。这是因为温度梯度是残余应力产生的直接原因,通过对温度场的分析得知,在 SLM 过程中,短边扫描的温度场更加均匀,温度梯度更小,并且扫描区域中心温度梯度小于扫描区域边界温度梯度。在基板表面区域内,距离扫描区域越远,残余应力值越小。这是因为距离扫描区域越远,受激光热源的影响也越小,并且扫描区域的热量也难以向其扩散,因此这部分区域的温度变化不明显,温度梯度小,残余应力值小。

实验工艺参数与扫描路径与上述实验相同,将基板预热到 300 °C 进行实验,使用 X 射线残余应力测量仪测量成形件的表面残余应力,沿基板长度方向的表面残余应力结果如图 11 所示。

匀,有利于相邻扫描道之间的金属粉末进行充分熔化。

## 5 结 论

利用有限元仿真研究了在 SLM 过程中采用平行于长边和平行于短边的两种“Z”形扫描路径对成形件温度场的影响,提出了可以通过基板预热的方式减小成形过程中的温度标准差和温度梯度,使温度场更均匀。通过实验测量了成形件表面残余应力分布,制作成形件金相图并与有限元仿真结果进行对比。结果表明:在 SLM 过程中,与长边扫描相比,短边扫描形成的温度场标准差更小,温度梯度更小,温度场更均匀,成形件的残余应力和孔隙均更小;无论是长边扫描还是短边扫描,扫描区域边界点的温度梯度均大于扫描区域中点的温度梯度,残余应力峰值出现在成形件边界处;通过预热基板,可以减少温度标准差和温度梯度,使温度场更均匀,从而可以减小成形件残余应力和孔隙,提高成形质量。

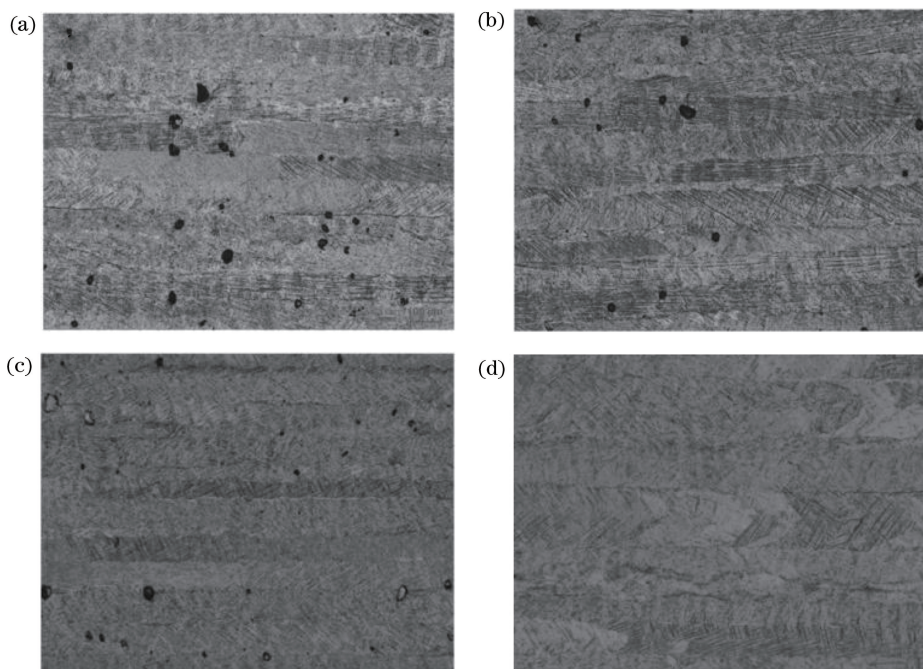


图 12 成形件的金相图。(a)长边扫描,20 °C;(b)长边扫描,300 °C;(c)短边扫描,20 °C;(d)短边扫描,300 °C

Fig. 12 Metallographic diagrams of the formed part. (a) Long-side scanning at 20 °C; (b) long-side scanning at 300 °C; (c) short-side scanning at 20 °C; (d) short-side scanning at 300 °C

将基板预热至300 °C时,长边扫描残余应力值减少了53.1%,短边扫描残余应力值减少了50.2%。

### 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] Yang X W, Yang Y Q, Liu Y, et al. Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0303004.  
杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成形典型几何特征尺寸精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303004.
- [3] Duan M S, Wu F, Liu R X. Application of laser additive manufacturing technology in ophthalmology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011406.  
段沐森, 吴凡, 刘瑞雪. 激光增材制造技术在眼科中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011406.
- [4] 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.
- [5] Wen S F, Ji X T, Zhou Y, et al. Development status and prospect of selective laser melting of mould steels [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011404.  
文世峰, 季宪泰, 周燕, 等. 激光选区熔化成形模具钢的发展现状及前景[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011404.
- [6] Li J G, Shi Y S, Lu Z L, et al. Numerical simulation of transient temperature field in selective laser melting[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(20): 2492-2495.  
李佳桂, 史玉升, 鲁中良, 等. 选区激光熔化成形瞬态温度场数值模拟[J]. 中国机械工程, 2008, 19(20): 2492-2495.
- [7] Ma Y Y, Liu Y D, Shi W T, et al. Effect of scanning speed on forming defects and properties of selective laser melted 316L stainless steel powder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101403.  
马英怡, 刘玉德, 石文天, 等. 扫描速度对选区激光熔化316L不锈钢粉末成形缺陷及性能的影响[J].



激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 101403.

- [8] Ge Y N, Wu M P, Mao Y Y, et al. Effect of scanning strategy on forming precision of titanium alloy by selective laser melting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091403.  
葛亚楠, 武美萍, 冒浴沂, 等. 激光选区熔化扫描策略对钛合金成形精度的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091403.
- [9] Li Y L, Gu D D. Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder: numerical simulation and experimental study [J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1/2/3/4: 99-109.
- [10] Wan L, Wang S Q, Zhang X W, et al. Forming quality of titanium alloys by selective laser melting based on partition scanning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091401.  
万乐, 王思琦, 张晓伟, 等. 基于分区扫描的选区激光熔化钛合金的成形质量[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091401.
- [11] Ma T, Liu T T, Liao W H, et al. Fatigue properties of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1102012.  
马涛, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形 Ti-6Al-4V 疲劳性能研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1102012.
- [12] Hussein A, Hao L, Yan C Z, et al. Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2013, 52: 638-647.
- [13] Shen Y F, Gu D D, Yu C Y, et al. Simulation of temperature field in direct metal laser sintering processes [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(1): 67-73.  
沈以赴, 顾冬冬, 余承业, 等. 直接金属粉末激光烧结成形过程温度场模拟[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(1): 67-73.
- [14] Xiong W P. A research on three-dimensional simulation of temperature fields of laser rapid prototyping and calculation of its strain fields [D]. Changsha: Hunan University, 2004.  
熊文平. 激光快速原型三维温度场仿真及其热应变计算[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
- [15] Song B, Dong S J, Liao H L, et al. Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61: 967-974.
- [16] Roberts I A, Wang C J, Esterlein R, et al. A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(12/13): 916-923.
- [17] 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.
- [18] Liu X P, Wu M P, Wei J F. The influence of scanning path on the quality of selective laser melting forming [J]. *Machine Design & Research*, 2019, 35(1): 133-137.  
刘兴鹏, 武美萍, 魏建锋. 扫描路径对选区激光熔化成形质量的影响[J]. *机械设计与研究*, 2019, 35(1): 133-137.