

激光与光电子学进展

扫描路径对选区激光熔化热力演变的影响

边培莹^{1*}, 徐可为¹, 尹恩怀², 叶芳霞¹, 张永建¹¹西安文理学院机械与材料工程学院, 陕西省表面工程与再制造重点实验室, 西安市智能增材制造重点实验室, 陕西 西安 710065;²中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西 西安 710068

摘要 选区激光熔化(SLM)是增材制造成形的主要工艺方式,其应用越来越广泛。影响其成形性能的主要因素是工艺参数组合方案,而扫描方式是其中的一个关键参数。本文以两种最常用的扫描路径为研究对象,深刻揭示其热力影响规律。首先建立符合 SLM 工艺特点的热力耦合仿真模型,并基于有限元软件进行二次开发,实现不同路径的仿真模拟;然后以一组工艺参数为例进行了仿真,结果表明,条纹式扫描轨迹的熔池几何和热应力均大于棋盘式;最后,通过熔道形貌与残余应力测试等多组试验数据均验证了仿真结果的正确性。该研究探明了扫描轨迹对 SLM 成形热力的影响关系,并为工程实践应用提供了一种高效的工艺仿真方法,从而便于进行 SLM 成形质量预判分析。

关键词 激光技术; 选区激光熔化; 扫描路径; 热力仿真; 熔道形貌; 残余应力

中图分类号 TH164

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212790

Effect of Scanning Strategy on Thermodynamics Evolution of Selective Laser Melting

Bian Peiying^{1*}, Xu Kewei¹, Yin Enhuai², Ye Fangxia¹, Zhang Yongjian¹¹*Xi'an Key Laboratory of Intelligent Additive Manufacturing Technologies, Shaanxi Key Laboratory of Surface Engineering and Remanufacturing, School of Mechanical and Material Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;*²*The 20th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710068, Shaanxi, China*

Abstract Selective laser melting (SLM), the main additive manufacturing process, has been extensively used in manufacturing. The scanning strategy is one of the key parameters that affects the forming performance. In this study, two of the most popular scanning pathways were selected as the research objects to show their effect on thermodynamic laws. First, a thermodynamic coupling simulation model conforming to the characteristics of the SLM process was established, and a secondary development was performed based on finite element software to realize the simulation development of different paths. Then, a set of process parameters was used as a simulation example. The results show that the weld pool geometry and thermal stress of the striped scanning path are bigger than those of the chessboard pattern. Finally, several experimental datasets, including molten pool morphology and residual stress tests, confirmed that the simulation results were accurate. This study shows how the scanning trajectory affected the thermodynamics of SLM forming and provided an effective process simulation technique for engineering practice, which is convenient for SLM forming quality prediction analysis.

Key words laser optics; selective laser melting; scanning strategy; thermodynamic simulation; molten pool morphology; residual stress

1 引言

金属激光成形制造经历了二十余年的发展,其技

术优势在行业领域有越来越多的应用需求,但目前仍有较多的工艺机理尚未揭示清楚,严重影响了该技术的产业化应用。选区激光熔化(SLM)作为增材制造

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2022-01-26; 录用日期: 2022-03-03; 网络首发日期: 2022-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(11902250)、陕西省自然科学基金(2019JQ-891)、西安市科技计划项目(21XJZZ0061)、“陕西高校青年创新团队”资助项目

通信作者: banry3@163.com

的一种主要方案,虽有相关工艺参数研究案例,但其工艺应用仍不稳定,多数工艺参数影响机理及其规律并不明确,影响其成形质量。目前,激光功率、扫描速度、扫描路径、搭接方式等常作为 SLM 关键工艺参数的研究对象,其中对扫描路径的研究近几年开始受到极大关注^[1]。研究发现,扫描路径会对激光热源受热、传热以及热应力应变分布产生非常大的影响,通过调整扫描策略对成形质量的综合影响几乎是最明显的^[2]。

国内外学者对扫描策略做了一些前期研究。国内学者较为注重扫描策略对组织和性能的影响,通过扫描分区变向研究得到,较小分区能够提高成形致密度、减小其表面粗糙度^[3],同时分区短线扫描成形可以大大减少成形零件内部的气孔缺陷^[4],还可以有效改善应力分布,控制零件的变形程度^[5]。另外对扫描策略与 SLM 制件的微观结构、晶体形貌与力学性能也进行了关联,相关研究表明,扫描策略如条形扫描、平面扫描和棋盘扫描对孔隙率、晶粒长大、晶粒尺寸及力学性能均有显著影响^[6],采用连续层间旋转角度的扫描策略,可以形成细小的等轴晶粒,提高 SLM 试样的抗拉强度和延展性^[7]。国外学者更加关注扫描策略对残余应力的影响,从试验上探索其相互影响关系^[8],以及扫描策略参数和热处理分析对 SLM 零件组织和硬度的影响^[9],并初步探索随着工艺参数的变化和扫描策略的变化零件的应力变化^[10],以及扫描策略对 SLM 制件残余应力及其变形的主要影响^[11]。

近年来,基于仿真开发的应用促进了扫描方式研究的深入。该研究以温度场或应力场为有限元模拟对象,但受限于有限元计算的规模,通常是一层多道或多层一道的仿真,结合不同扫描方式如长边扫描、短边扫描,以及交错扫描、岛式扫描和蛇形扫描^[12]等。模拟结果得到岛式扫描制件其整体温度场分布均匀,这有利于减小残余应力分布,但是岛屿间搭接质量较差。还有一些模拟研究了扫描策略对零件温度、应力和变形的影响^[13],以及扫描路径对制件表面质量、翘曲变形的影响^[14]等,基本验证了扫描路径的长短对成形件的致密度有重要影响,并且预热可有效减少温度梯度及残余应力。目前,仿真研究初步结合试验验证的方式开始引起学界重视,但两者工艺参数和试样级别还未有匹配对应,仅有初步结论:长单向扫描方式下基板的变形量最大^[15]、热集效应显著^[16],而短往复扫描方式下几何变形、残余应力和孔隙更小。

可见,激光扫描路径的相关因素对激光熔化成形具有直接影响,鉴于目前试验研究工艺参量有限,对其影响机理还未有深刻揭示。热力建模仿真方法及计算误差较大,仿真规模较小,仿真结果也缺乏相同试验验证,具有实践价值的仿真算法仍需精确开发。但当前研究已经明确 SLM 成形中的扫描策略是影响激光能量输入的重要因素,甚至可以直接影响金属的微观/微观结构和力学行为,通过高效仿真的方法进行扫描策

略的有效分析计算,可以提高产品成形的预判,大大提高 SLM 制件的成功性。基于此,本文采用动态热源技术,开发一种激光随扫描路径的动态仿真方法,以便实现 SLM 成形过程的热力耦合过程。并对两种典型的、对比性强的两种扫描策略分别建模仿真,以揭示其热力演变过程及应力形成机制,并设计进行两种扫描策略的实际工艺参数与相同试验试样验证仿真算法的可靠性。

2 仿真分析

首先根据选区激光熔化工艺特点进行了热源定义、弹塑性热力耦合建模、激光移动扫描路径设置等,其仿真设计及结果分析如下。

2.1 物理模型

2.1.1 激光热源的定义

本文主要以选区激光熔化工艺为主要仿真对象,采用光纤激光器,其热源定义为高斯模型,即最大热流密度从中心向外以指数倍衰减^[17],可以描述为

$$q_{(r)} = \frac{2AP}{\pi\omega^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right), \quad (1)$$

式中: q 是热流密度($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); P 是激光功率(W); r 是从中心向外的辐射距离; ω 是光束半径; A 是成形材料的激光吸收率。

2.1.2 传热模型

一般意义上的热流密度通常定义为物质单位面积通过的热量温度差,则

$$q_r = k \frac{\Delta T}{d_r}, \quad (2)$$

式中: k 是热导率($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); ΔT 是物体从高温到低温处的温度差(K); d_r 是当前传热层的材料厚度(m)。

进一步,设计层间循环传热方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \nabla_i (-K \Delta T_i), \quad (3)$$

式中: ρ 是材料密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); c 是当前状态比热容($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); t 是接触时间或传热时间。

根据其向三个方向自由传热,热平衡方程可采用一般三维热传导方程^[17]表示为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad (4)$$

式中: $Q = q(st) | (x, y, z, t)$ 是单位体积热量值($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)。

2.1.3 热力耦合模型

物体受热由于膨胀而产生的热应变^[17]一般表示为

$$\epsilon^{\text{th}} = \alpha_e T, \quad (5)$$

式中: α_e 是热膨胀系数。则总应变可由受力应变和热应变之和构成

$$\{\epsilon_{ii}\} = \{\epsilon^f\} + \{\epsilon^{th}\}。 \quad (6)$$

2.1.4 初始条件与边界条件

模拟模型的边界条件为 $T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma, \epsilon, \tau, \gamma|_{t_{20}}=0$, $u, v, w|_{t_{20}}=0$ 。主要是考虑空气的自然对流和周围辐射^[18], 其边界处的热通量等于边界单元处的激光热通量。

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w = q_{(r)w}, \quad (7)$$

式中: n 为模型表面法线方向; w 为模型边界。

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w = h(T_w - T_f) + \epsilon\sigma(T_w^4 - T_f^4), \quad (8)$$

式中: h 为模型表面的传热系数; T_w 为模型表面温度; T_f 为周围气体的温度; ϵ 是黑体的辐射系数; σ 是斯特藩-玻耳兹曼常数。

然后, 输入 P, r, A, v 等激光参数, 同时, 输入随温度的其他性能参数特性曲线或表格, 比如 $k, c, \rho, \alpha, E, \mu$ 和 G , 这些材料性能系数随温度升高其值呈一定的非线性变化, 参考文献[19]的材料性能参数曲线, 即可

进行 SLM 弹塑性温度场与应力场有限元计算。为了实现多层多道的激光选区熔化过程, 采用了基于焊接动态热源的热力耦合仿真方法。在焊接软件环境下, 可以给上述定义的热源赋予运动路径, 即可实现动态热源效果, 下面分析其路径规划方法。

2.2 路径规划

仿真模型采用圆柱 $\Phi 5 \times 2\text{ mm}$, 其他工艺参数设定为激光功率为 160 W、扫描速度为 500 mm/s、成形层厚为 50 μm 、激光束搭接率 20%, 316L 不锈钢粉末吸收率设置为 0.7, 初始温度为常温态。根据激光选区熔化工艺常用路径, 目前主要采用条纹式与棋盘式两种扫描方式。

2.2.1 条纹式扫描路径

根据一般条纹式成形特点, 其轨迹为逐层以角度偏转的方式进行扫描, 偏转角可设置以 30° 为梯度, 则各层偏转角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 0^\circ, \dots$, 即每隔 6 层一个扫描循环周期。其条纹式扫描轨迹如图 1 所示。

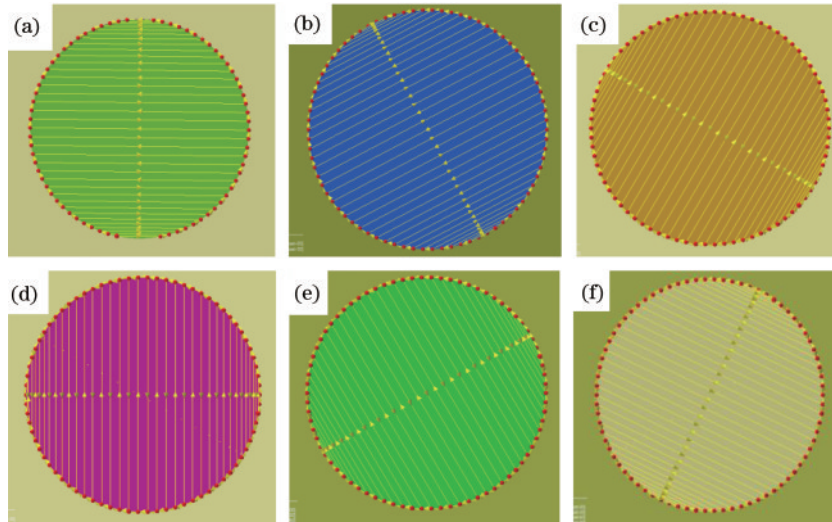


图 1 条纹式扫描轨迹图。(a) 条纹式 0° ; (b) 条纹式 30° ; (c) 条纹式 60° ; (d) 条纹式 90° ; (e) 条纹式 120° ; (f) 条纹式 150°

Fig. 1 Trajectory chart of the stripe scanning. (a) Stripe scanning at 0° ; (b) stripe scanning at 30° ; (c) stripe scanning at 60° ; (d) stripe scanning at 90° ; (e) stripe scanning at 120° ; (f) stripe scanning at 150°

2.2.2 棋盘式扫描路径

另一种常用的扫描方式为棋盘式, 也称岛式, 其棋盘的栅格尺寸可根据实际成形件工艺要求设计, 在此设置栅格分区大小为 2.5 mm, 为了符合实际设备工作原理, 仿真轨迹采用了逐层偏转的布局方式, 每隔四层一个扫描循环周期。其逐层变化设计效果如图 2 所示。

2.3 仿真结果及机理分析

基于 Simufact Welding 软件, 按照以上热力耦合计算关系及软件的热源沿扫描路径的运动轨迹开发, 实现了成形过程动态仿真, 以条纹式模型成形过程运行中的温度场与有效应力场分布为例, 截取其不同时刻时的成形状态如图 3 所示。在 25、50、100 s 处的动

态热源移动形成的熔池温度场如图 3(a)~(c)所示, 对应应力分布如图 3(d)~(f)所示。并在 100 s 仿真完成后, 模型 40 层完全成形并冷却到室温, 整体模型的内部应力状态保留下来, 而此时的热应力随之演变为残余应力。

其分层统计数据如图 4 所示, 图 4(a)为仿真模型间隔 0.5 mm 厚度取仿真试样中心点处几层关键点的温度数据统计, 从仿真开始, 沿时间轴其采集点处的温度曲线周期交变。首先当前层被激光源加热, 后以 10^{-6} K/s 的速率迅速降温^[20]。然后下一层被加热, 由于热传导作用, 该层继续被加热, 属于传导受热但其幅度小于之前。以此循环, 经历后续几层的循环后, 该层温度逐渐降低至室温。后面几处采集值同样的规律循

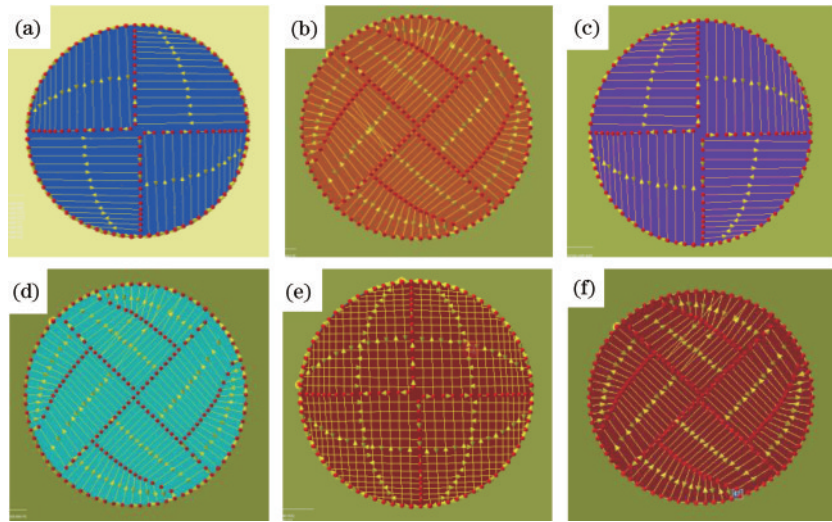


图 2 棋盘式扫描轨迹图。(a) 棋盘式 0° ; (b) 棋盘式 45° ; (c) 棋盘式 90° ; (d) 棋盘式 135° ; (e) 棋盘式 180° ; (f) 棋盘式 225°

Fig. 2 Trajectory chart of the checkboard scanning. (a) Checkboard scanning at 0° ; (b) checkboard scanning at 45° ; (c) checkboard scanning at 90° ; (d) checkboard scanning at 135° ; (e) checkboard scanning at 180° ; (f) checkboard scanning at 225°

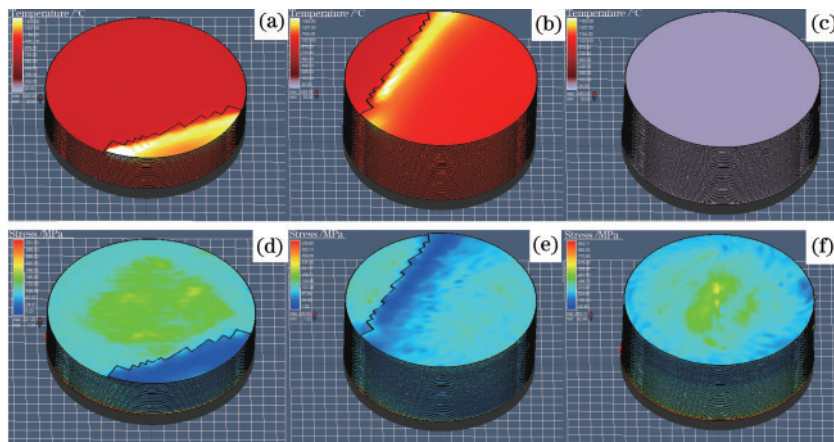


图 3 温度场与应力场状态模拟图(条纹式扫描为例)。(a) 25 s 时温度场; (b) 50 s 时温度场; (c) 100 s 时温度场; (d) 25 s 时应力场; (e) 50 s 时应力场; (f) 100 s 时应力场

Fig. 3 Distribution diagram of temperature field and effective stress field (take a stripe scanning as an example). (a) Temperature field at 25 s; (b) temperature field at 50 s; (c) temperature field at 100 s; (d) stress field at 25 s; (e) stress field at 50 s; (f) stress field at 100 s

环,直至仿真完后整个零件冷却。图 4(b)为对应取点处的热应力演变曲线,与图 4(a)温度场对应分析可知,在某一当前层温度下降时,其热应力迅速升高,当后续成形层在该层上方往复加热、冷却时,其热应力也反复为拉压变化,最终冷却到室温后,当前点的热应力转化为残余应力。由图 4(b)可知,数据跟踪采集为靠近中心处,其冷却后的残余应力表现为拉应力,结合图 3 的云图可以看出,在其中心向外呈拉压变化,形成稳定的平面应力拉压交错分布状态。进一步对冷却后的试样逐层分析了其残余应力的变化趋势,由图 4(c)可知,残余应力最大值出现在靠近基板的底层,随着试样高度增加,底层值增大。由图 4 的温度场演变结合应力分布曲线可对比建立 SLM 成形的温度场与应力场关系,证实其热力耦合关系及其热力演变机理。

同样的方法下,还对棋盘式模型进行了相同模型大小、相同激光工艺参数的仿真,其仿真过程不再赘述。仿真模型冷却至室温后,进行了残余应力统计,两种轨迹的残余应力对比如图 5 所示。可见,棋盘式扫描策略的残余应力在各层处测值均小于条纹式,且仿真计算可得到其大概的预估值(小 15% 左右)。从而可通过仿真的方法对成形质量进行预判,如果仿真值超过材料许用应力则可判定此工艺策略需改进。

该基于动态热源的仿真方法工作效率高,相比较于 ANSYS 静态传热-应力分析更加符合 SLM 实际成形过程^[17-18],相较于单层或单道的仿真也大幅提高了仿真实效^[17,19],可进行几十层的试样级别零件仿真求解。

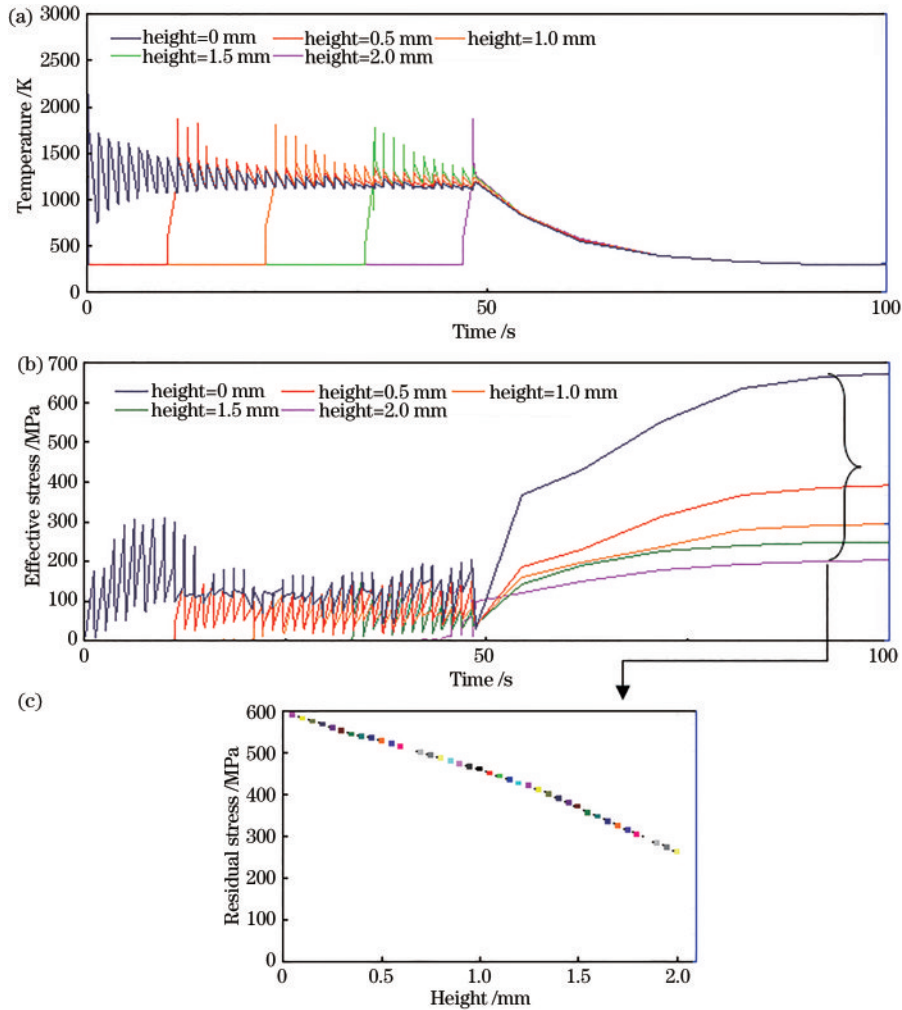


图 4 模型某点的温度场与应力场分布曲线。(a) 温度曲线; (b) 有效应力曲线; (c) 应力沿层高的分布

Fig. 4 Distribution curves of temperature field and stress field at a point of simulation model. (a) Temperature curve; (b) effective stress curve; (c) stress distribution along height

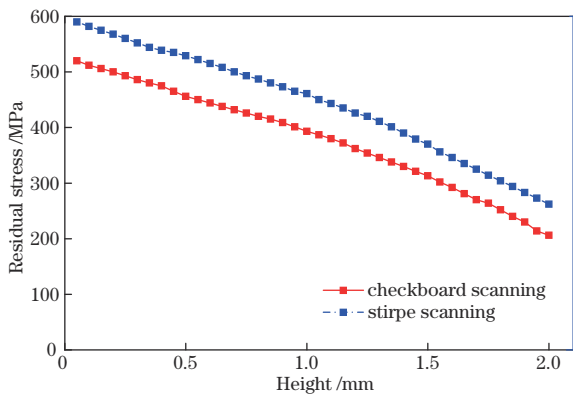


图 5 两种轨迹仿真模型冷却后的残余应力对比图

Fig. 5 Comparison of residual stress after cooling of two trajectory simulation models

3 试验测试与验证

3.1 试验方法

试样制备采用 SLM 公司 280 SLM 成形设备, 激光器光斑大小约为 0.1 mm, 原料为颗粒度约为 40~

50 μm 的 316L 不锈钢粉末, 试验的三个主要工艺控制参数为激光功率、扫描速度、扫描方式, 共计 6 组试验参数组合。其他参数与仿真工艺完全统一: 层厚为 50 μm, 激光束搭接率为 20%, 粉末吸收率为 0.7, 基板初始室温。试验也主要考察两种扫描方式的成形试验, 如表 1 所示。每一组工艺参数的试样分别制作三个试样, 成形后 1 号进行显微组织观察, 2、3 号进行残余应力剥层测试, 可保证试验测量结果的可靠性。试样大小也采用 Φ5×2 mm。

3.2 试验测试

微观形貌观察试验采用 HIROX KH-1300 3D 光学显微镜, 分别对图 6 试样的表面 (图 6 中 XOY 平面) 熔道扫描轨迹图进行采集, 并对其抛光后的截面熔道形貌采集 (图 6 中 XOZ 平面)。XSTRESS 3000 X 射线残余应力分析仪用来无损检测试样表面残余应力, 为了避免移除基板的残余应力额外释放与变化, 试样成形后直接连同基板测试。图 7 为 XRD 测试平台, 侧头搭配 Mn 靶, 测试偏转角为 20°~160°。为了进行残余应力沿深度测量, 试样共剥离 6 层, 采用饱和盐水电

表 1 试样主要工艺参数
Table 1 Main parameters of the samples

Sample	Power /W	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Scanning trajectory	Serial No.
1	160	400	Stripe scanning (deflection 30° layer by layer)	11,12,13
2	160	500	Stripe scanning (deflection 30° layer by layer)	21,22,23
3	160	400	Checkboard scanning (grid size is 2.5 mm)	31,32,33
4	160	500	Checkboard scanning (grid size is 2.5 mm)	41,42,43

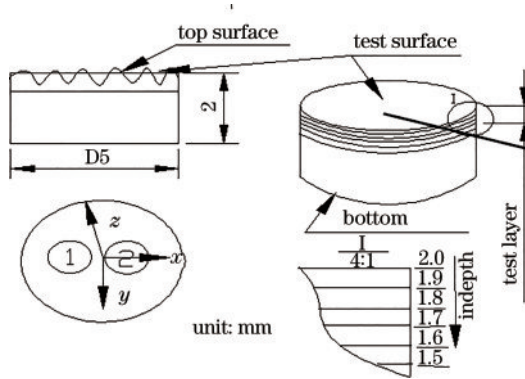


图 6 试样测试示意图
Fig. 6 Sample test diagram

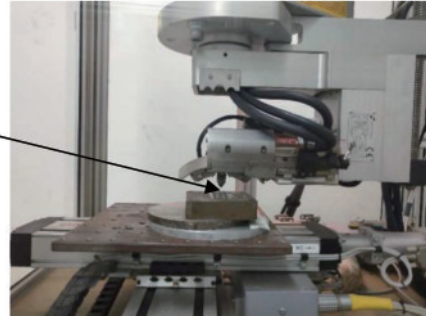


图 7 成形试样应力检测平台
Fig. 7 Forming sample stress testing platform

学腐蚀逐层剥层法,层厚间隔 0.1 mm,即试样从上表面向下共计 6 次剥层测量(如图 6 中 XOY 平面)。如图 6 试样测试图所示标记,每一层的残余应力在试样靠近中心处进行测试(①、②处测试 2 次取平均值)。根据文献[21]统计,同一测点其 0° (X 向)与 90° (Y 向)值差异不大,因此以 0° 方向应力为主测量值,作为本文多点剥层测值的统计对象。

3.3 试验结果及讨论

3.3.1 扫描轨迹

对两种扫描方式直接取试样在光镜下观察其上表面,其扫描轨迹清晰可见,图 8(a)~(d)为试样 1 条纹

式扫描轨迹,随层变化可见其倾斜角度,为逐层偏转 30° 的条纹式。而且沿着激光的移动方向,形成了随光源移动其熔道的先后凝固对应的逐道鳞片式轨迹图^[22]。图 8(e)和(f)为试样 3 棋盘式扫描轨迹图,在显微结构下 2.5 mm 的栅格尺寸交界位置清晰可见,其扫描轨迹相对条纹式短 50%。

3.3.2 熔道截面

通过截面制样在光镜下观察其凝固后的熔道截面,如图 9 所示,在同样面积的扫描区域,分析其熔道的宽度和高度,条纹式扫描方式比棋盘式熔道截面面积略大,说明扫描轨迹长度增加 1 倍时,对应的熔池之

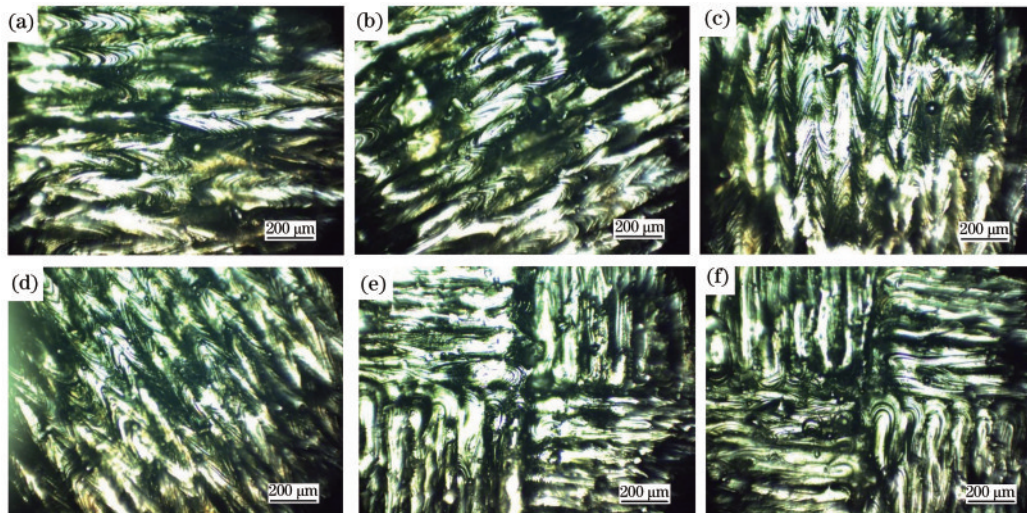


图 8 成形后熔道轨迹图。(a) 条纹式 0° ; (b) 条纹式 30° ; (c) 条纹式 90° ; (d) 条纹式 120° ; (e) 棋盘式 0° ; (f) 棋盘式 90°
Fig. 8 Forming trajectory diagram. (a) Stripe scanning at 0° ; (b) stripe scanning at 30° ; (c) stripe scanning at 90° ; (d) stripe scanning at 120° ; (e) checkboard scanning at 0° ; (f) checkboard scanning at 90°

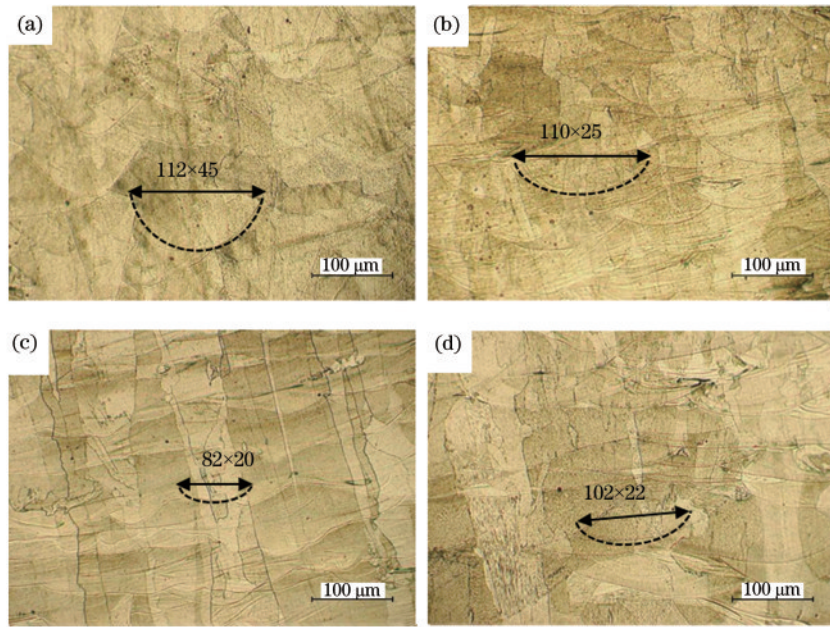


图 9 成形后熔道截面图。(a) $P=160\text{ W}$, $V=400\text{ mm/s}$, 条纹式; (b) $P=160\text{ W}$, $V=500\text{ mm/s}$, 条纹式; (c) $P=160\text{ W}$, $V=400\text{ mm/s}$, checkboard; (d) $P=160\text{ W}$, $V=500\text{ mm/s}$, checkboard

间热作用时间增长,热流传热区间增大,图 9 中熔道宽度增加 25% 左右。根据式(5)结合图 9 测值可知,其温度升高值大,即温度梯度大对应熔道面积大,由此导致热应变增大。

3.3.3 残余应力

通过四组残余应力的逐层剥离测试,统计其测量平均值,并进行不同扫描方式结果的对比,如图 10 所

示。在两组不同的扫描速度下,由曲线统计值可知,其条纹式试样的残余应力值均大于棋盘式试样测值。结合两种扫描路径的微观结果可知,在扫描路径长度增加 1 倍时,其熔池熔道宽度增大 25%,平均残余应力增大 16%。由此,根据工艺参数对应的微观组织与残余应力结果,得到了激光熔融时熔池大对应的残余应力显著增大的试验结论。

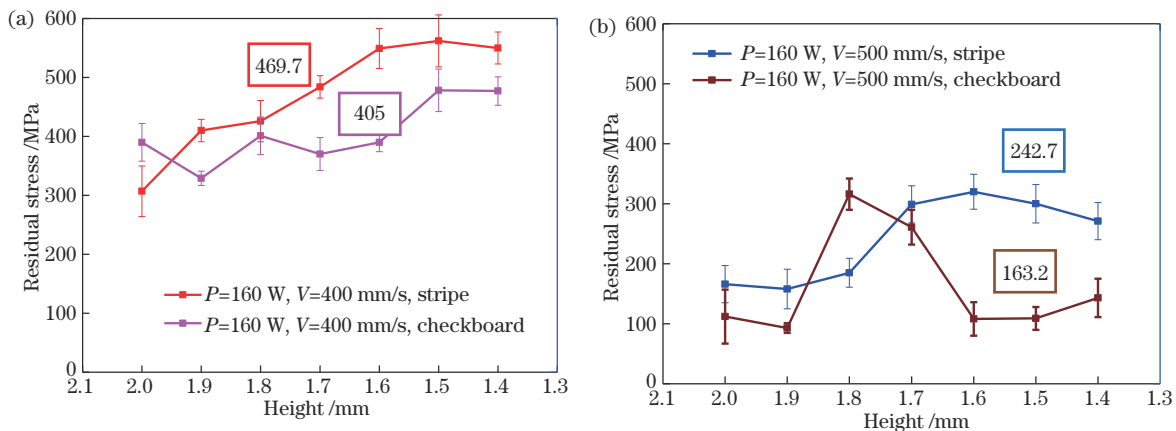


图 10 残余应力测试值对比
Fig. 10 Comparison of residual stress test value

4 试验与仿真对比

对应表 1 的四组试验参数,采用前述的有限元仿真模型,四组工艺参数的仿真也顺利完成,将其仿真结束后的残余应力分层统计,取其分层位置与试验测试位置基本接近(0.1 mm 间隔取值),四组参数的仿真结果

与试验对比见图 11。其四组参数两两对比,仿真与试验结论较为一致。因试验测值存在一定误差,其中化学腐蚀剥层对残余应力的影响不容忽视,而仿真数值属于数值解其应力值近似程线性变化,导致试验与仿真对比值在个别位置存在一定偏差,但数据总体趋势及均值较为一致,由此可以证明所开发仿真算法的有

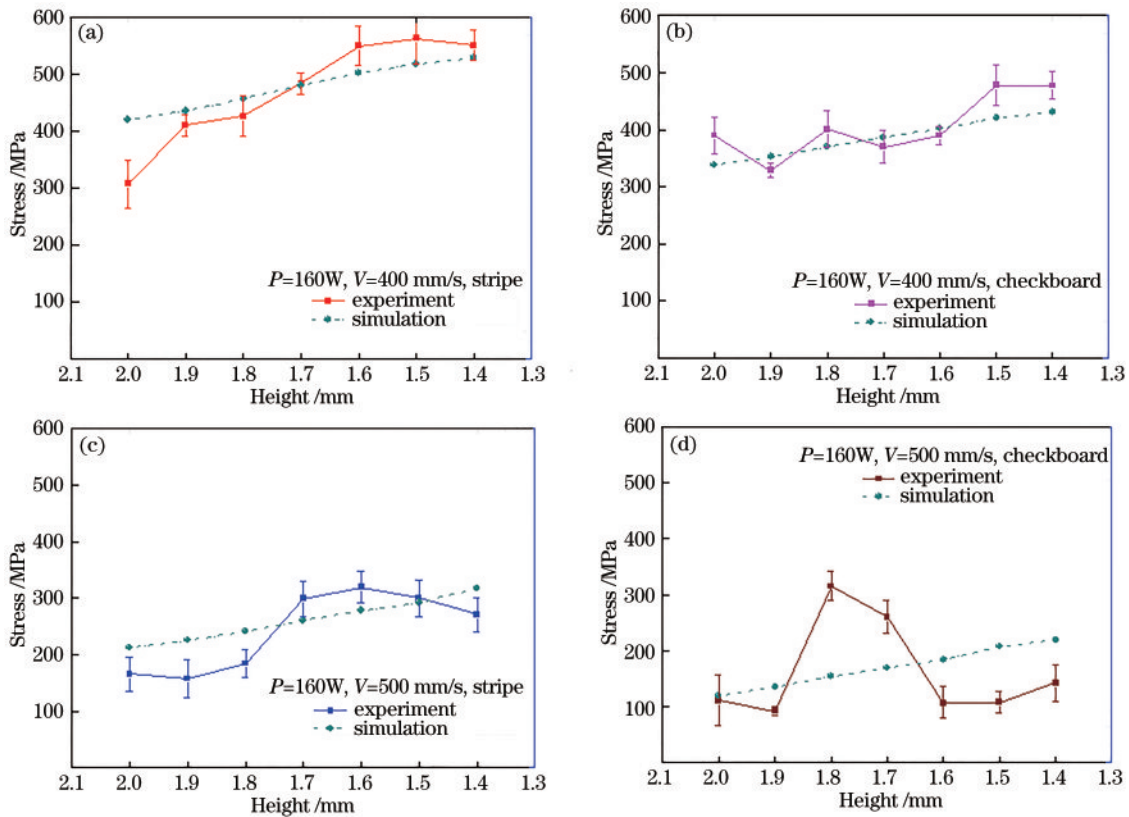


图 11 相同工艺参数的仿真与试验结果对比图

Fig. 11 Comparison of simulation and experimental results of the same process parameters

效性。

由此也证明了前述仿真中对热力耦合过程温度场分布、热应力形成、热力演化、冷却形成残余应力,以及对应力分布趋势分析的准确性。从热力演变过程也看到,扫描轨迹对其工艺参数的热作用影响最为直观,恰当的扫描轨迹直接反映了激光工艺参数匹配的实际效果。结合相同工艺参数时的仿真与试验测试结果可知:当扫描轨迹较长时,其传热时间增长,而试验测得熔池体积增大,其对应的仿真中温度梯度大、热应力大,从而在试验和理论上都可验证其导致残余应力较大的结果。因此在 SLM 成形时,如果工艺参数,甚至扫描轨迹设计不合理,则极易使成形件残余应力过大。并且由于热应力的累积作用,起始层的应力受后续成形应力叠加,在其基板结合处容易形成分裂翘曲。

5 结 论

本文通过相同工艺参数的 SLM 成形仿真与实际成形试验测试,分析了激光扫描路径对熔道截面形貌及成形残余应力的影响。基于焊接动态热源发展了一种不同扫描轨迹的 SLM 成形热力耦合仿真算法及模型构建,并实现了对试样多层多道成形的高效仿真。基于 SLM 高效动态仿真实现了温度场与应力场仿真,得到仿真中的逐层逐点的数据分析结果,包括:两种扫描轨迹下靠近基板的底层应力较大,随着向上接近表

面层越来越小;对比两种轨迹的热应力统计值,其棋盘式的热应力值小于长轨迹的条纹式扫描路径的值。结合仿真参数进一步进行了相同工艺参数的试验验证,由试样的扫描轨迹、熔道截面、残余应力测试,验证了仿真算法的有效性,也证实了长扫描轨迹的热作用时间长导致熔道较宽、温度梯度大、残余应力相应较大的结论。

参 考 文 献

- [1] Jia H L, Sun H, Wang H Z, et al. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(9): 2413-2435.
- [2] Gu D D, Guo M, Zhang H M, et al. Effects of laser scanning strategies on selective laser melting of pure tungsten[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(2): 92-104.
- [3] 尹燕,蔡伟军,肖梦智,等.扫描方式对激光选区熔化成形 316L 组织和性能的影响[J].应用激光,2018,38(3):339-344.
Yin Y, Cai W J, Xiao M Z, et al. Effect of scanning method on microstructure and properties of 316L by selective laser melting[J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 339-344.
- [4] 赵雪,贺可太,李怀学.扫描策略对选区激光熔化零件微观组织的影响[J].航空制造技术,2019,62(S1):64-71.

- Zhao X, He K T, Li H X. Microstructure of selective laser melting parts under different scanning strategies[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(S1): 64-71.
- [5] Wang D, Wu S B, Yang Y Q, et al. The effect of a scanning strategy on the residual stress of 316L steel parts fabricated by selective laser melting (SLM) [J]. *Materials*, 2018, 11(10): 1821.
- [6] 高明香, 王建宏, 任杰, 等. 扫描策略对选区激光熔化钴铬合金组织和性能的影响[J]. *激光杂志*, 2020, 41(1): 133-136.
- Gao M X, Wang J H, Ren J, et al. Effects of scanning strategies on microstructure and properties of selective laser melted cobalt-chromium alloy[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(1): 133-136.
- [7] Song Y N, Sun Q D, Guo K, et al. Effect of scanning strategies on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 793: 139879.
- [8] Ali H, Ghadbeigi H, Mumtaz K. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti₆Al₄V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 712: 175-187.
- [9] Giganto S, Zapico P, Castro-Sastre M Á, et al. Influence of the scanning strategy parameters upon the quality of the SLM parts[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 41: 698-705.
- [10] Hajnys J, Pagáč M, Měsíček J, et al. Influence of scanning strategy parameters on residual stress in the SLM process according to the bridge curvature method for AISI 316L stainless steel[J]. *Materials*, 2020, 13(7): 1659.
- [11] Rivalta F, Ceschini L, Jarfors A E W, et al. Effect of scanning strategy in the SLM process of 18Ni300 maraging steel[J]. *Materials & Design*, 2021:109608.
- [12] 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.
- 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.
- [13] Cheng B, Shrestha S, Chou K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 240-251.
- [14] 刘兴鹏, 武美萍, 魏建锋. 扫描路径对选择性激光熔化成形质量的影响[J]. *机械设计与研究*, 2019, 35(1): 133-137.
- 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.
- [15] 鹿旭飞, 林鑫, 马良, 等. 扫描路径对激光立体成形 TC4 构件热-力场的影响[J]. *材料工程*, 2019, 47(12): 55-62.
- Lu X F, Lin X, Ma L, et al. Effect of scanning path on thermo-mechanical field of laser solid forming TC4 part [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(12): 55-62.
- [16] Miao X J, Liu X, Lu P P, et al. Influence of scanning strategy on the performances of GO-reinforced Ti₆Al₄V nanocomposites manufactured by SLM[J]. *Metals*, 2020, 10(10): 1379.
- [17] 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.
- [18] Yang Z L, Li Q H, Ruan F X, et al. FDTD for plasmonics: applications in enhanced Raman spectroscopy [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(24): 2635-2642.
- [19] Foroozmehr A, Badrossamay M, Foroozmehr E, et al. Finite element simulation of selective laser melting process considering optical penetration depth of laser in powder bed[J]. *Materials & Design*, 2016, 89: 255-263.
- [20] Zhong Y, Liu L F, Wikman S, et al. Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2016, 470: 170-178.
- [21] Bian P Y, Shi J, Shao X D, et al. Evolution of cyclic thermal stress in selective laser melting of 316L stainless steel: a realistic numerical study with experimental verification[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(9): 3867-3882.
- [22] Zavala-Arredondo M, Ali H, Groom K M, et al. Investigating the melt pool properties and thermal effects of multi-laser diode area melting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(1): 1383-1396.