

多光束激光等距随动扫描选区熔化成形策略研究

王化吉¹, 徐浩东^{2*}, 陈文国², 戴玉山¹

(1. 中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333000;

2. 陕西华燕航空仪表有限公司, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对激光选区熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 单激光束作用在零件成形过程中由于内部温度梯度大造成结构致密度不均匀、孔隙率高、残余应力大及表面质量差等问题, 参考目前利用多振镜发散多激光进行选区熔化成形的多光束激光选区熔化 (Multi-beam Selective Laser Melting, MB-SLM) 技术, 提出了一种多光束等距随动扫描选区熔化成形策略。该策略通过多光束按照一定运动轨迹和时间间隔协同作用调控熔池的动力学状态, 即主光束进行熔融扫描时, 各光束相位差一特定值的辅助光束同步随动, 形成时空特性可控的叠加能量分布, 设定辅助光束功率为主光束的 60%。该仿真实验以 TC4 钛合金为研究对象, 通过数值模拟分析不同时间、空间特性下激光路径扫描的热-力耦合结果, 验证了该策略的可行性并预测了在实际成形过程中温度场和应力场的变化及其影响因素。结果表明: 通过控制多光束的扫描路径、相位差、扫描速率等时空特性, 孤立区残余应力下降约 20 MPa, 多光束同步重扫描节点的残余应力高达约 870 MPa, 在改变空间特性扫描策略下的残余应力降低至 760 MPa。因此, 可有效降低金属材料冷却速率, 叠加熔化效应, 填充间隙, 提高结构致密度, 改善表面质量, 降低残余应力。

关键词: 激光选区熔化技术; 多光束激光等距随动扫描; 模拟仿真; 时空特性

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20250301

引用格式: WANG Huaji, XU Haodong, CHEN Wenguo, et al. Research on selective melting forming strategy of multi-beam laser isometric follow-up scanning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(8): 20250301.

王化吉, 徐浩东, 陈文国, 等. 多光束激光等距随动扫描选区熔化成形策略研究[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(8): 20250301.

0 引 言

激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 技术通过激光束逐层熔化金属粉末再堆积的方式实现零件的成形。该技术用于制造金属基零件, 如高性能和复杂几何形状的钢、高熵合金、钛合金、形状记忆合金和复合金属材料等^[1]。在航天、航空、船舶、交通运输、生物医药等领域有着广泛的应用。由于激光集中, 在材料快速熔化和固化过程中, 内部容易产生较大的温度梯度, 导致零件内部残余应力高, 并出现“台阶效应”和熔渣粘附等表面问题^[2]。

针对这一弊端, 多光束激光选区熔化^[3-4] (Multi-

beam Selective Laser Melting, MB-SLM) 利用多振镜发散多激光对分区进行扫描并拼接成形的方式有效改变了热场分布和相互作用等单光束 SLM 的固有难题。然而, MB-SLM 存在与单光束 SLM 相同的孔隙、翘曲等问题^[5-6], 由于对拼接区的多次重复扫描, 其温度和应力变化过程复杂, 易形成较大残余应力。多光束激光等距随动扫描成形作为一种优化手段, 通过控制多光束激光的时空特性, 有望进一步解决成形质量问题。

在多光束激光选区熔化技术研究方面, 国外起步较早, 德国、美国等国家的科研机构和企业取得了一系列成果^[7]。德国通快 (Trumpf) 公司研发的多光束激

收稿日期: 2025-06-05; 修订日期: 2025-07-10

作者简介: 王化吉, 男, 研究员, 硕士, 主要从事直升机航电及电气系统设计方面的研究。

通讯作者: 徐浩东, 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事机电及导航设备方面的研究。

光选区熔化设备,通过优化光束布局和扫描算法,提高了成形效率。美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 研究了多光束激光在不同扫描模式下的能量分布和温度场变化,为工艺优化提供了理论依据。ROBERTS I A^[8] 等利用 ANSYS 有限单元法,模拟仿真钛合金多层热循环过程,得出多层扫描时,层与层之间温度场会相互作用;TAHERI^[9] 等通过优化工艺减少大尺寸飞溅颗粒,在实际实验中有效提高试样的表面质量;HEELING^[10] 等采用激光偏置策略使加热光束后置并合理控制预热光束功率,成形试样表面质量更佳。PANWISAWAS^[11] 等通过建立有限元模型来研究温度场中热液流动和微观结构的演变,结果表明随着粉末层厚度的增加和激光扫描速度的提高,热液流动的速度随之增大;ERIK R^[12] 等建立选区激光熔化的热力学模型,得出新沉积的层所受的拉应力最大,而其下的层所受的压应力最大。

国内众多高校和科研院所也开展了相关研究,郝晓杰^[13] 运用 ADAQUS 软件对选区激光熔化 316 L 进行数值模拟仿真,针对单层扫描过程中温度场的变化进行研究,得出熔池内部温度的变化特点与扫描轨道的次数有关;贾雪^[14] 采用 Fluent 软件研究 Inconel718 合金选区激光熔化微熔池传质问题,得出熔池中心处

温度最高,朝着边缘处温度逐渐降低;林会杰^[15] 等针对悬垂结构进行有限元分析,得出在选区激光熔化的成形过程中,悬垂处的峰值温度要高于其他地方,容易发生翘曲。然而,目前多光束激光选区熔化技术在扫描策略方面仍有待完善,如何实现多光束的高效协同,保证成形过程的稳定性和一致性,仍是研究的重点和难点。

TC4 钛合金具有良好的性能应用于航空航天系统级组件框架、飞行器壳体、传感器组件框架等领域,当前 TC4 钛合金的成形均采用传统的加工方式进行。现阶段的高集成度与高精密度系统及组件内部结构密闭、配合要求高,对内部骨架的要求苛刻,采用传统加工方法的骨架存在加工难、残余应力大、加工效率低的问题。文中结合选区熔化技术,选取 TC4 钛合金成形为研究对象,通过数值模拟与仿真实验对比单光束 SLM 成形与 MB-SLM 方式进行分析,从温度、应力进行预测,对比不同扫描策略下的温度分布、残余应力分布,为实际生产加工提供理论依据。

1 等距随动扫描策略的提出

MB-SLM 过程伴随着非常复杂的温度变化,其原理如图 1 所示。

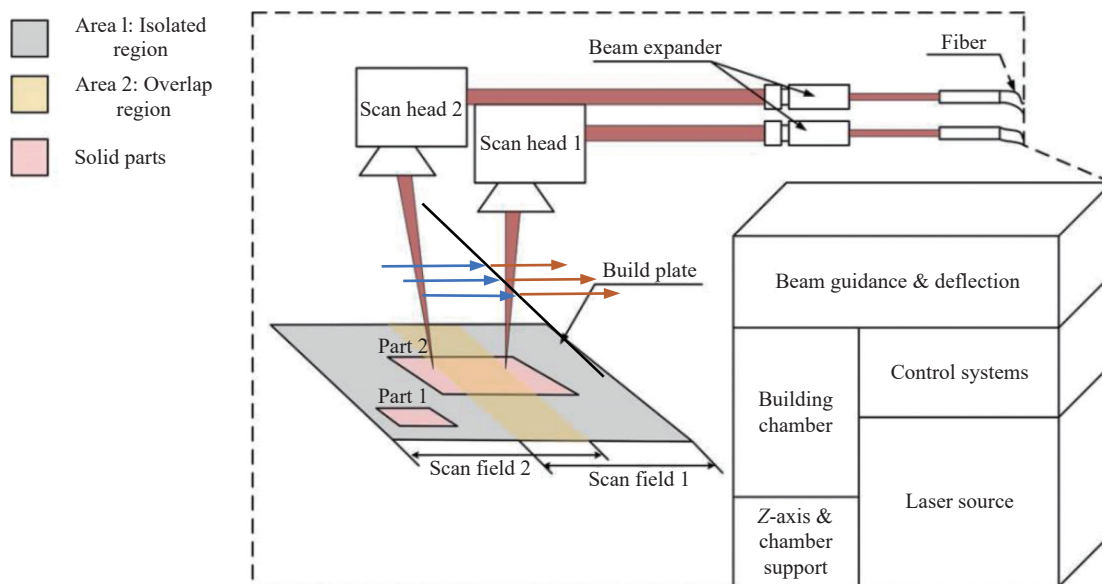


图 1 多光束选区激光熔化系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the multi-beam selective laser melting system

在图 1 所示孤立区域 (Part 1), 选用对应激光可完

成成形, 其成形过程与 SLM 几乎一致。当尺寸如

图 1 中 Part 2 所示时,通过多激光协同成形。根据图 2 所选拼接方式^[16]确定各加工层内扫描策略,将加工层内构件轮廓与扫描策略求交得到具体成形路径。通过多光束协同扫描,可实现大尺寸零件的成形。

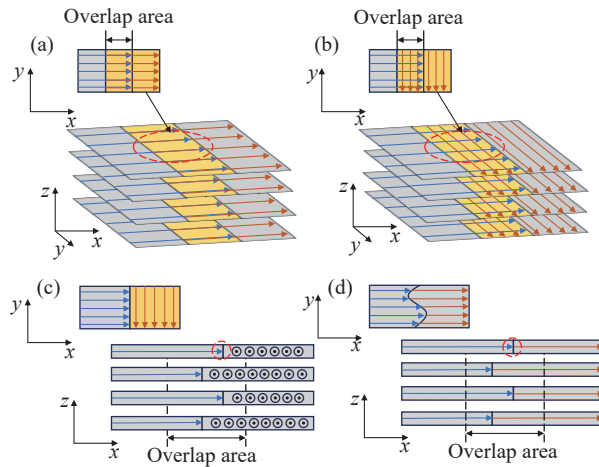


图 2 (a)、(b) 熔池重叠区; (c) 分割线为直线的交错拼接; (d) 分割线为曲线的交错拼接^[16]

Fig.2 (a),(b) Direct overlap; (c) The separation lines is the interleave overlap of straight lines; (d) The separation lines is the interleave overlap of curves^[16]

在此过程中,金属粉末的物相转变,材料的潜热特性等会影响实际结果。同时,这种快热快冷的方式也导致了成形时温度分布不稳定,在高温熔池与周围的区域间形成了极大的温度梯度。由于金属材料的物理以及力学性能也会随着其温度的变化而改变,而引起热影响区内的材料发生不同程度的膨胀,周围的材料为了限制这种变化将在零件内产生热应力,该热应力一部分是来自基板以及周围凝固材料的外部限制,由温度变化引起的体积变化将会受到其周围材料的限制从而产生相反的作用力;另一部分则是来自内部材料的自身约束,MB-SLM 过程实际是一个逐点加工的过程,即激光能量仅作用在相当小的范围内,局部的高温将快速向着周围的低温区域快速传递,从而导致了各部分间的温度差异,由于金属材料的热膨胀系数随着温度而变化,因此各部分间体积变化的程度是不均匀的,而变化缓慢的部分对变化较快的部分自然也会产生一种限制,由此而产生并最终演变为残余应力,而较高的残余应力将导致零件存在翘曲以及

开裂等缺陷,最终影响零件的性能。

多光束激光选区熔化的主要问题是能量分布不均,因此提出等距随动扫描策略。即在扫描过程中,多束激光按照一定的规律保持等距分布,并且根据零件的几何形状和扫描路径,实现各光束的随动控制。通过等距随动扫描策略,能够有效改善粉末床的温度场分布,减少应力集中和变形开裂等缺陷,提高成形质量。

2 扫描策略的数学模型与实现方法

为实现多光束激光等距随动扫描策略,建立相应的数学模型。在扫描过程中,假设各激光光束的位置坐标为 (x_i, y_i) , 保持相邻激光束之间的距离 d 相等, 即:

$$d = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: d 为各光束间距离 (单位: mm)。

依据扫描路径规划,各束激光的扫描速度 v_i 应存在一定的关系才能随动扫描。设扫描路径参数方程为 $x=f(t)$, $y=g(t)$, 则各束激光扫描速度可表示为:

$$v_i = \sqrt{\left(\frac{dx_i}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_i}{dt}\right)^2} \quad (2)$$

主辅激光的时间间隔 Δt 直接决定了热场时空耦合效应的强弱。假设主激光在 t_0 开始扫描,辅助激光在 $(t_0 + \Delta t)$ 启动并补偿主激光的动态误差。假设加速度恒定且延时时间 t_d 很小时,在延时 t_d 后,主激光因速度变化产生位移偏差 $\delta(t)$ 为:

$$\delta(t) = \frac{1}{2} a \cdot (t_d)^2 + v_0 \cdot t_d \quad (3)$$

式中: a 为主激光扫描加速度 (单位: m/s^2); t_d 为系统延时时间 (单位: s); v_0 为初始时刻 t_0 速度 (单位: m/s)。

若主激光加速度 a 恒定,则主辅激光的时间间隔为:

$$\Delta t = t_d + \sqrt{\frac{2\delta_{\max}}{|a|}} \quad (4)$$

式中: t_d 为系统延时时间 (单位: s); $\delta_{\max}$ 为最大允许位置误差; a 为主激光扫描加速度绝对值 (误差与运动方向无关) (单位: m/s^2)。

在实际工程中,由于专用设备的精度等影响,需

要在理论计算的基础上添加一个系数 $k(0 < k < 1)$ 以避免临界风险。

$$\Delta t = k \left(t_d + \sqrt{\frac{2\delta_{\max}}{|a|}} \right) (0 < k < 1) \quad (5)$$

在实际成形过程中,通过专用设备的运动控制卡和扫描振镜,依据数学模型得出各激光束的运动轨迹和运动速率。同时,专用设备上的传感器可实时监测激光束的位置和扫描状态,确保扫描策略的精确执行。

3 数值模拟

采用专用仿真软件建立多光束激光等距随动扫描选区熔化的数值模拟模型,如图 3 所示。模型包括粉末床、基板以及多束激光热源。将粉末床和基板离散为有限元网格,考虑材料的潜热性能随温度的变化。激光热源采用高斯分布热源模型,根据等距随动扫描策略,设置各激光束的位置、扫描速度和功率。根据研究对象钛合金 TC4 的热物性 (熔点 $1668\text{ }^{\circ}\text{C}$, 热导率 $7.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), 激光选区熔化成形钛合金过程所用激光是近红外激光,波长为 1064 nm , 能量分布形式呈高斯正态分布,有效能量的中值是额定功率的 60% , 该额定功率下的辅助光束既能补偿主光束边缘能量衰减,又能确保拼接区晶粒细化。因此,设定辅助光束功率为主光束的 60% , 边界条件设定为:粉末床和基板与周围环境进行热对流和热辐射换热,同时考虑惰性气体保护对热交换的影响。

在模拟过程中,采用生死单元技术模拟粉末的逐层添加和熔化凝固过程,即当激光扫描到某一区域时,该区域的粉末单元被激活并参与热分析,随着温度升高,粉末熔化并与已凝固的部分形成冶金结合,在进行分析时这些粉末单元将不会影响分析结果。

图 4 显示了不同扫描策略下的激光扫描路径,红色和蓝色圆点分别为主激光和辅助激光扫描起点,红色和蓝色方框分别为主激光和辅助激光的扫描终点,箭头表示各激光不同扫描策略。S11、S21 和 S31 采用基本策略,这意味着当多个激光器同步扫描时,每个激光器扫描的起点和终点都在同一扫描通道内; S12、S22 和 S32 采用空间差分扫描策略 (Spatial Difference Scanning Strategies, SDSC), 即主激光和辅助激光扫描的起点在不同的扫描通道中,主激光位于第一扫描道,辅助激光位于最后一个扫描道; S13、

S14、S23、S24、S33 和 S34 采用时间特性扫描策略 (Temporal Difference Scanning Strategies, TDSC), 即主激光器和各辅助激光器在同一扫描信道内异步扫描时,主激光先扫描,各辅助激光保持一定距离再开始扫描,存在一个扫描序列。

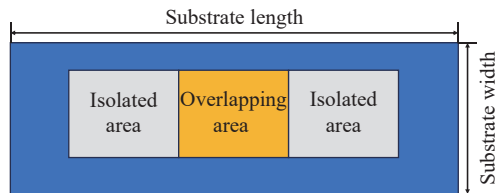


图 3 数值模拟模型及扫描区域示意图

Fig.3 Numerical simulation model and schematic diagram of scanning area

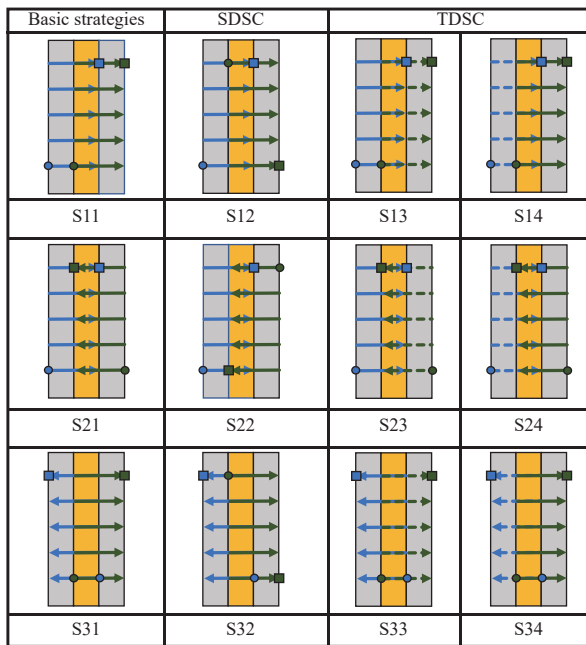


图 4 不同扫描策略下激光扫描路径示意图

Fig.4 laser scanning path under different scanning strategies

4 模拟结果与分析

图 5 所示为多激光刚完成扫描时,不同扫描策略下的温度分布。其中黄色虚线部分为拼接区,黑色虚线部分由于温度高 (超过了 1923 K), 在此区域形成熔池,其中熔池宽度约为 $420\text{ }\mu\text{m}$ (标尺 $500\text{ }\mu\text{m}$)。图中结果表明,不同的扫描策略造成了两侧孤立区以及拼接区温度分布间的差异。除了 SDSC 外,加工区域内激光的热影响区都主要集中在最后一个加工道内 (温度

模拟值达 3 068.5 K), 这种差异是由拼接区内激光间的相对位置所导致的。在 SDSC 下多个激光先接近再逐渐远离, 在远离的过程中两个熔池内的高温沿着已经凝固的部分逐渐向外传递, 从而形成了更宽的热影响区。当激光的起始点位于拼接区时, 会在扫描道内形成更长的热影响区。导致该现象的原因是熔池内的热量快速传递至已扫描的拼接区内, 从而形成更长的热影响区。

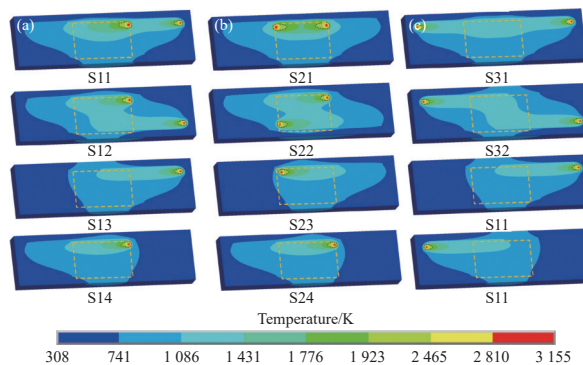


图 5 (a) 基本扫描策略的温度分布; (b) SDSC 下的温度分布; (c) TDSC 下的温度分布

Fig.5 (a) Temperature distribution of basic scanning strategy; (b) Temperature distribution under SDSC; (c) Temperature distribution under TDSC

从图 5 可以看出, TDSC 扫描策略中粉末床的温度分布具有高度对称性。在所有扫描策略中, 温度变化经历三个过程: 预热、熔化和后加热。在 TDSC 的驱动下, 激光加热到最高温度的时间不同。由于多次激光重复扫描的影响, 在同一方向等距扫描模式和在基本扫描策略和空间特性扫描策略下, 拼接区域在短时间内经历多次激光重复加热过程, 包括激光 $n+1$ 的预热、激光 n 的预热、激光 $n+1$ 熔化、激光 n 熔化、激光 $n+1$ 后加热、激光 n 后加热五个过程^[17], 从而形成大的热熔池, 该区域发生了同步扫描, 节点温度瞬间提升至 3 155 K, 容易在交点处形成缺陷。

在 MB-SLM 过程中, 粉末被激光束快速加热后在熔池周围形成温度梯度, 此时周围材料在加热和后续冷却过程中均存在复杂的变形, 从而在熔池周围的热影响区形成热应力。同时, 由于金属材料在液体状态下的流动性, 其在熔融状态下不产生热应力和塑性变形。当熔池温度降低、材料凝固收缩时, 材料间互

相抑制, 导致应力产生, 最终形成残余应力^[18]。

图 6 显示了不同扫描策略下的残余应力分布 (标尺 2 mm 扫描路径长度)。在 S11 和 S12 策略中, 拼接区域中的材料由多个激光器扫描。在反复扫描过程中, 周围的材料被加热并膨胀。周围的约束防止膨胀在材料中产生压应力, 从而抵消了第一次熔化后温度降低所形成的应力, 并缓解了熔池周围材料的应力。因此, 在拼接区域内形成低应力区。对于 S21 和 S31 策略, 在拼接区域激光同步重复扫描期间的高温会导致严重的材料膨胀, 在激光移开后, 由于温度的快速损失而收缩, 这受到约束条件的强烈抑制。因此, 在这一点附近仍然存在一个高应力区。但在改变空间特性后, 多个激光器只同步重新扫描一次, 此时拼接区域已经固化, 热量可以均匀地分布到周围区域, 最终在该点附近形成适度的应力。其他区域由于激光重新扫描而获得较低的残余应力。相比基本扫描策略, 孤立区域残余应力下降约 20 MPa。

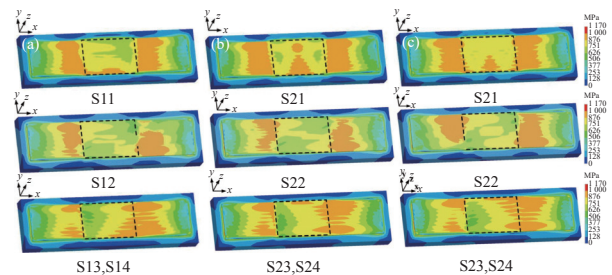


图 6 (a) 基本扫描策略的残余应力分布; (b) SDSC 的残余应力分布; (c) TDSC 的残余应力分布

Fig.6 (a) Residual stress distribution of basic scanning strategy; (b) Residual stress distribution of SDSC; (c) Residual stress distribution of TDSC

除了基本的扫描策略外, TDSC 和 SDSC 的接合区域两侧存在高应力区域, 多光束同步重扫描节点的残余应力高达约 870 MPa, 在改变了空间特性扫描策略下的残余应力降低至 760 MPa。由于后期扫描区域的热影响, 第一扫描区域中的高应力区域将得到缓解。这也是残余应力模拟分布结果中后期扫描隔离区残余应力高于第一扫描隔离区的主要原因。

数值模拟得出采用不同扫描方式情况下, 粉末床的温度场和应力场分布。其中温度场结果表明, 等距跟踪扫描方式下粉末床温度场分布比较均匀, 最高温

度与最低温度的差值明显减小。这是由于激光光斑的等距分布可以使热量均匀输入而不出现局部过热或过冷;而应力场结果表明等距跟踪扫描方式可以减小应力集中,使粉末床的应力分布均匀。由于温度场分布的均匀,可以减少材料堆积和凝固过程中收缩不均引起的变形和应力产生。仿真结果表明:多光束激光等距跟踪扫描方式可以有效改善成形温度场和应力场分布,可以提高成形零件质量性能。等距随动扫描策略能够有效改善多光束激光选区熔化过程中粉末床的温度场和应力场分布,降低温度梯度,从根本上降低了构件因残余应力导致的变形累积,有效提高了增材制造的结构精度和表面精度。

5 结 论

本研究提出的多光束激光等距随动扫描选区熔化成形策略,通过理论分析和数值模拟,取得以下结论:

1) 等距随动扫描策略能够有效改善多光束激光选区熔化过程中粉末床的温度场和应力场分布,使能量均匀输入,减少应力集中和变形开裂等缺陷。

2) 数值模拟结果表明,改变时空和空间特性的扫描策略后温度场和应力场更均匀,为工艺优化提供了理论依据。

3) 通过优化各激光束之间的时空特性,可进一步优化成形策略,消除缺陷。

未来研究中可从以下几个方面展开:

1) 进一步优化多光束激光等距随动扫描策略的工艺参数,如同时改变激光的时间特性和空间特性。针对不同材料和零件结构,建立精准完善的工艺参数数据库。

2) 研究涉及的仿真预测没有得到实际工程应用的验证,可在后续研究中针对实际应用进一步研究。

3) 可进一步研究多光束激光扫描时与材料粉末相互作用的微观机制,深入理解能量传输和物质转化过程,为扫描策略的改进提供更坚实的理论基础。

4) 结合在线监测技术和工业摄像技术,实时反馈熔池状态和温度梯度变化等,实现扫描策略的自适应调整,进一步提高成形质量的稳定性。

参考文献:

[1] ZOU S, XIAO H, YE F, et al. Numerical analysis of the effect of

the scan strategy on the residual stress in the multi-laser selective laser melting [J]. *Elsevier BV*, 2020, 16: 103005.

[2] YANG Yongqiang, CHEN Jie, SONG Changhui, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 11401. (in Chinese)

[3] CHEN Changpeng, YIN Jie, ZHU Haihong, et al. Effect of overlap rate and pattern on residual stress in selective laser melting [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 145: 103433.

[4] COOK P, MURPHY A. Simulation of melt pool behaviour during additive manufacturing: Underlying physics and progress [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100909.

[5] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J, et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties [J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92: 112-224.

[6] SEFENE E M. State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 63: 250-274.

[7] 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.

[8] ANDANI M T, DEHGHANI R, KARAMOOZ-RAVARI M R, et al. Spatter formation in selective laser melting process using multi-laser technology [J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 460-469.

[9] THORSTEN H, KONRAD W. The effect of multi-beam strategies on selective laser melting of stainless steel 316L [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 334-342.

[10] PANWISAWAS C, QIU C, ANDERSON M J, et al. Mesoscale modelling of selective laser melting: Thermal fluid dynamics and microstructural evolution [J]. *Computational Materials Science*, 2017, 126: 479-490.

[11] ERIK, R, DENLINGER, et al. Effect of stress relaxation on distortion in additive manufacturing process modeling-science direct [J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 51-59.

[12] HAO Xiaojie. Study on temperature field of selective laser melting 316L[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)

[13] JIA Xue. Research on the flow field and mass transfer of tiny molten pool during selective laser melting of inconel 718[D].

- Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] LIN Huijie, SHEN Lida, JIANG Jinhui, et al. Simulation analysis of features of overhanging structure fabricated by selective laser melting [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(7): 239-247. (in Chinese)
- [15] YIN Jie, WANG Dengzhi, WEI Huiliang, et al. Dual-beam laser-matter interaction at overlap region during multi-laser powder bed fusion manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 46: 102178.
- [16] ZHANG Siyuan, WANG Meng, WANG Chun, et al. The effect of overlap methods on forming qualities of TC4 alloy fabricated by multi-beam selective laser melting technique [J]. *Applied Laser*, 2019, 39(4): 544-549.
- [17] LI C, LIU J F, FANG X Y, et al. Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 17: 157-168.
- [18] 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.

Research on selective melting forming strategy of multi-beam laser isometric follow-up scanning

WANG Huaji¹, XU Haodong^{2*}, CHEN Wenguo², DAI Yushan¹

(1. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333000, China;

2. Shaanxi Huayan Aviation Instrument Co., Ltd, Xi'an 710100, China)

Abstract:

Objective Laser selective melting technology is widely used in various fields such as aerospace, aviation, ships, transportation, biomedicine, etc. due to its advantages of large forming freedom, high forming accuracy, and controllable surface roughness in the solid part forming process. Due to the large internal temperature gradient caused by the rapid melting and solidification process of materials under the action of the single laser beam, it is easy to result in uneven structural density, high porosity, high residual stress and poor surface quality of the formed parts. Therefore, referring to the current multi-beam laser selective melting technology that uses multiple mirrors to diverge multiple lasers for selective melting and forming, a multi-beam selective laser isometric follow-up scanning melting and forming strategy is proposed. This strategy regulates the dynamic state of the molten pool through the coordinated action of multiple beams along a certain motion trajectory and time interval. When the main beam performs melting scanning, auxiliary beams with a specific phase difference of each beam synchronize and follow, forming a controllable temporal and spatial superimposed energy distribution. The power of the auxiliary beam is set to 60% of that of the main beam. This simulation experiment takes TC4 titanium alloy as the research object and analyzes the thermal mechanical coupling results of laser path scanning under different time and space characteristics through numerical simulation. The feasibility of this strategy is verified and the changes in temperature field and stress field and their influencing factors in the actual forming process are predicted. The results showed that by controlling the space-time characteristics such as scanning path, phase difference and scanning rate of multiple beams, the residual stress in the isolated region decreased by about 20 MPa and the residual stress in the multi-beam synchronous re-scan node reached about 870 MPa. Under the change of spatial characteristic scanning strategy, the residual stress decreased to 760 MPa. Therefore, it can effectively reduce the cooling rate of metal materials, superimpose melting effects, fill gaps, improve structural density, improve surface quality and reduce residual stress.

Methods A multi-beam laser isometric follow-up scanning selective melting forming strategy is proposed. Based on the multi-beam selective laser melting technology (Fig.1), TC4 titanium alloy was selected as the

research object and a finite element model is established(Fig.3). The selective laser melting forming and multi-beam Selective Laser melting forming methods are compared through numerical simulation and simulation experiments for analysis.(Fig.4) Temperature (Fig.5) and stress (Fig.6) were predicted, and the temperature field distribution and residual stress distribution in the joint area and isolated area under different forming strategies are compared. The residual stress and deformation in the joint area are controlled by optimizing the scanning strategy.

Results and Discussions Due to multiple laser re-scans in the splicing area, the forming quality of the splicing area is poor. The cooling rate and temperature gradient of nodes within the isolated zone are not significantly affected by the scanning strategy. For the splicing area, compared with the basic scanning strategy, the cooling rate and temperature gradient are significantly reduced. In the same direction isometric follow-up scanning mode, using the spatial characteristic scanning strategy results in a larger space for heat transfer in the Y direction of the melt pool, leading to an increase in the cooling rate of the joint area. On the basis of temperature field analysis, the influence mechanism of stress evolution process in multi-beam laser melting forming under the scanning strategy of time and space characteristics was established and a method for controlling residual stress was proposed. Compared with the basic scanning strategy, in the inward (outward) symmetric equidistant follow-up scanning mode, the residual stress of the multi-beam synchronous re-scan node is as high as about 870 MPa. When using the spatial characteristic scanning strategy, the residual stress in the isolated area decreases by about 20 MPa(Fig.6). In the same direction isometric follow-up scanning mode, changing the spatial and temporal characteristics separately does not have a significant effect on the residual stress changes in the joint area.

Conclusions By controlling the space-time characteristics such as scanning path, phase difference, and scanning rate of multiple beams, the residual stress in the isolated region decreased by about 20 MPa. Under changing the spatial characteristic scanning strategy, the residual stress decreased to 760 MPa. On the basis of using mature process parameters, the quality of the formed parts can be improved by optimizing the scanning strategy. By selecting the space-time characteristic scanning strategy between multiple beams, the residual stress in the joint area can be reduced while controlling the residual stress in the isolated area within a certain range.

Key words: selective laser melting technology; multi-beam laser isometric follow-up scanning; simulation; space-time characteristics