



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.01

激光粉末床熔融航空金属构件成形效率与工艺稳定性研究进展

冯元, 邓伯孟*, 韩林, 张雨琦, 雷舒畅

中航成飞民用飞机有限责任公司, 四川 成都 610031

摘要: 激光粉末床熔融 (LPBF) 增材制造技术可实现复杂结构的一体化成形, 显著提升材料利用率并缩短工艺路线, 为高性能航空金属构件的设计与制造提供了新途径。然而, LPBF 技术面临着成形效率低、工艺-质量稳定性差及构件性能难以突破锻造、铸造等传统工艺的关键挑战, 本文阐述了近年来国内外在复杂构件成形装备技术 (大幅面多激光协同加工、成形基板高温预热、双激光追随打印)、工艺-质量稳定性控制方法 (熔池多物理参量的在线监测、数据驱动的智能机器学习、辐照热源光束整形及其复合使用) 及数值模拟预测手段 (熔池温度场-速度场预测、晶粒形核-长大预测、构件应力应变预测) 的研究进展。此外, 针对 LPBF 在航空领域的工程应用瓶颈, 提出了多激光工艺参数自适应调控、迁移学习驱动的跨材料工艺推广、多传感融合原位缺陷消除三个未来研究方向。

关键词: 航空金属构件; 激光粉末床熔融; 多激光协同; 工艺稳定; 数值模拟

中图分类号: TG402, TP311 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0001-19

Research Progress on Forming Efficiency and Process Stability of Laser Powder Bed Fusion for Aviation Metal Components

FENG Yuan, DENG Bomeng*, HAN Lin, ZHANG Yuqi, LEI Shuchang

AVIC Chengfei Civil Aircraft Co., Ltd., Chengdu 610031, China

Abstract: Laser powder bed fusion (LPBF) additive manufacturing technology enables the integrated forming of complex structures, significantly improving material utilization and shortening process routes, thus providing a new approach for the design and manufacturing of high-performance aviation metal components. However, LPBF technology faces critical challenges including low forming efficiency, poor process-quality stability, and difficulties in surpassing the mechanical performance of conventional processes such as forging and casting. This paper reviews recent domestic and international research progress in three aspects: forming equipment technology for complex components (large-area multi-laser collaborative processing, high-temperature preheating of build substrates, and dual-laser following printing), process-quality stability control methods (online monitoring of multi-physical parameters of the melt pool, data-driven intelligent machine learning, and beam shaping of irradiation heat sources and their combined application), and numerical simulation prediction methods (prediction of melt pool temperature and velocity fields, grain nucleation and growth prediction, and component stress-strain prediction). Furthermore, addressing the engineering application bottlenecks of LPBF in the aviation field, three future research

收稿日期: 2025-06-17 修回日期: 2025-10-27

作者简介: 冯元 (1995—), 男, 硕士, 主要从事激光增材制造研究。E-mail: 1494017997@qq.com。

通讯作者: 邓伯孟, E-mail: cral1983@126.com。

directions are proposed: adaptive regulation of multi-laser process parameters, transfer learning-driven cross-material process transfer, and multi-sensor fusion in-situ defect elimination.

Keywords: aviation metal components; LPBF; multi-laser collaboration; process stability; numerical simulation

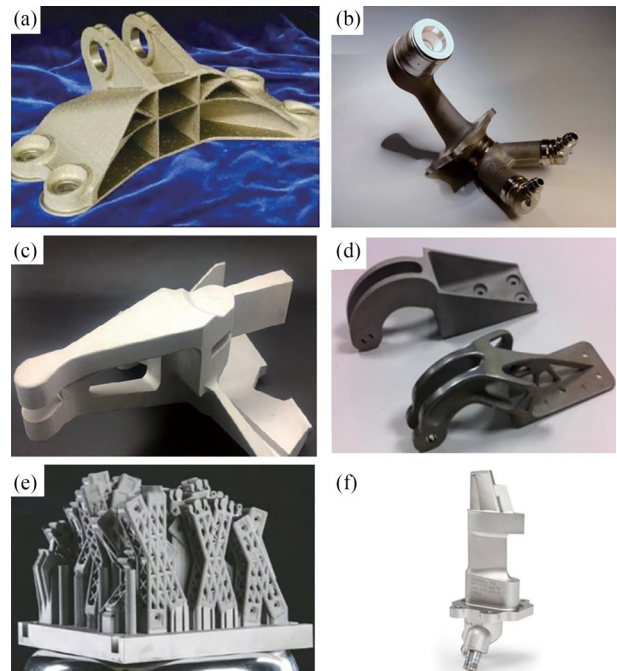
引用格式:冯元,邓伯孟,韩林,等. 激光粉末床熔融航空金属构件成形效率与工艺稳定性研究进展[J]. 电焊机,2026,56(6):1-19.

Citation:FENG Yuan, DENG Bomeng, HAN Lin, et al. Research Progress on Forming Efficiency and Process Stability of Laser Powder Bed Fusion for Aviation Metal Components[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 1-19.

0 引言

在国际军事航空装备竞争加剧、国内低空经济万亿级市场崛起及高端民用航空装备国产化进程提速的三重驱动下,新一代航空装备制造正面临多维度的技术革新,其中包括长航时、高可靠性、长服役寿命及低成本,因而对焊接、锻造等传统制造工艺提出了巨大挑战^[1]。航空装备的服役性能很大程度上取决于金属构件的性能,而高性能航空金属构件的设计与制造需考虑:轻量化设计以降低燃料消耗,确保结构强度以满足高承载能力,复杂几何形状的高精度成形以适应航空器多样化设计,优异的耐疲劳性与耐高温性能以确保在极端工况下的安全稳定,智能传感与自适应能力的集成应用以赋予构件实时感知外部环境变化并快速决策的能力^[2-3]。以上综合性需求与技术挑战,突显了高端航空装备对高性能航空金属构件制造的迫切需求。

近年来,激光粉末床熔融(Laser Powder Bed Fusion, LPBF)以逐层粉末熔融的方式实现材料-结构-性能一体化成形,突破了传统工艺对几何复杂度和材料利用率的约束,为高性能航空金属构件制造提供了全新途径,已在GE燃油喷嘴、空客仿生隔板等典型构件上获得验证,如图1所示^[4-9]。然而,LPBF成形的航空金属构件目前仍以大量验证为主,作为批量交付的主-次承力构件十分有限,其技术潜力尚未完全发挥且大规模工程应用仍面临诸多挑战,包括成形效率提升、工艺-质量稳定性控制、构件性能突破^[10]。为此,研发LPBF成形复杂构件装备与复合工艺-成形质量稳定性控制技术并建立综合性能评估考核方法尤为关键。图2为LPBF成形复杂金属构件装备技术、LPBF稳定性控制技术及LPBF多物理场预测仿真技术的发展趋势。本文围绕上述技术梳理LPBF成形航空金属构件的国



(a)轻量化喷气发动机支架^[4]; (b)GE航空发动机燃油喷嘴^[5]; (c)GE发动机电动门支架^[6]; (d)机舱铰链^[7]; (e)空客机舱仿生隔板零部件^[8]; (f)GE发动机T25传感器壳体^[9]

图1 LPBF成形航空金属构件

Fig. 1 Typical aerospace metal components fabricated by LPBF

内外研究进展,总结当前技术瓶颈,并提出未来发展方向。

1 复杂金属构件激光粉末床熔融装备技术

1.1 大幅面多激光一体成形技术

铸造、焊接等传统工艺在成形航空装备中具有大尺寸、复杂形状的轻量化点阵、进气道格栅等非承力构件或具有复杂内部通道的液压歧管等承力构件时,面临着模具制造复杂、成形效率低及连接处力学性能薄弱等问题^[13]。LPBF可实现材料、结

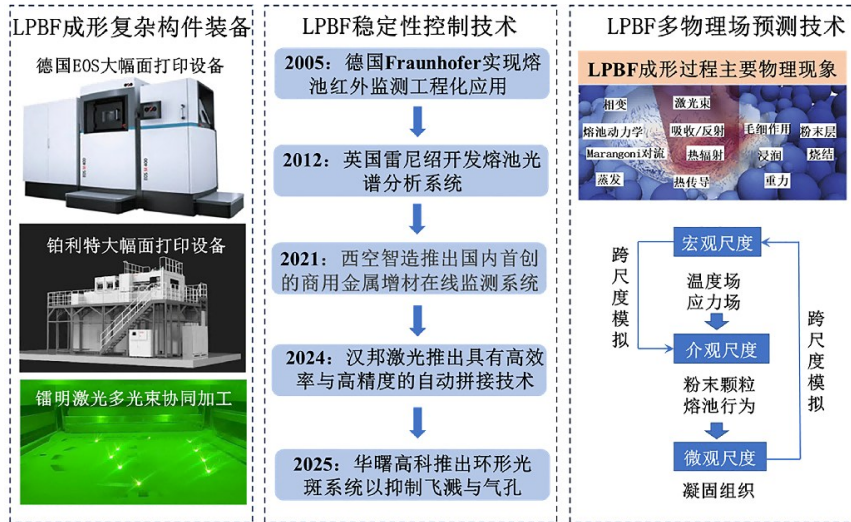


图2 LPBF成形复杂金属构件装备技术、LPBF稳定性控制技术及LPBF多物理场预测技术的发展趋势^[11-12]

Fig. 2 Development trends of LPBF equipment technology for forming complex metal components, LPBF stability control technology, and LPBF multiphysics prediction technology^[11-12]

构与性能一体化成形进而提高了航空金属构件的设计自由度与服役性能。然而,受到光学元件的限制,传统单激光粉末床熔融(Single Laser-Powder Bed Fusion, SL-PBF)成形大尺寸金属构件常通过提高扫描速度、扩大光斑直径或增加粉末层厚度等手段,但可能诱发更多冶金缺陷进而影响构件的成形精度及力学性能^[14]。针对以上问题,大幅面多激光粉末床熔融(Multi Laser-Powder Bed Fusion, ML-PBF)采用多激光束协同加工方法,可显著提升大尺寸航空金属构件制造效率,但仍面临若干挑战,其中包括:多激光协同加工如何实现精准拼接、扫描策略的优化设计、多熔池应力协同调控及风场合理设置以减少烟尘^[15]。

1.1.1 多激光拼接区的质量缺陷

为减少多激光拼接区的质量缺陷,谢寅等^[16]分别使用单激光、双激光及四激光成形GH3536高温合金,发现随着激光束数量增加,试样表面的不规则颗粒和球状凸起进一步减少,表面质量改善;但拼接区重熔导致部分晶粒再结晶,沿<001>取向择优生长更加显著(见图3)。Yin等^[18]利用高速成形监测技术显示,拼接区熔池间的碰撞与相互作用会改变液态金属流动模式并诱发大尺寸液滴飞溅,液态金属与飞溅物的碰撞堆积行为是导致试样表面形貌恶化与内部缺陷形成的主要原因(见图4)。

1.1.2 扫描策略对成形质量的影响

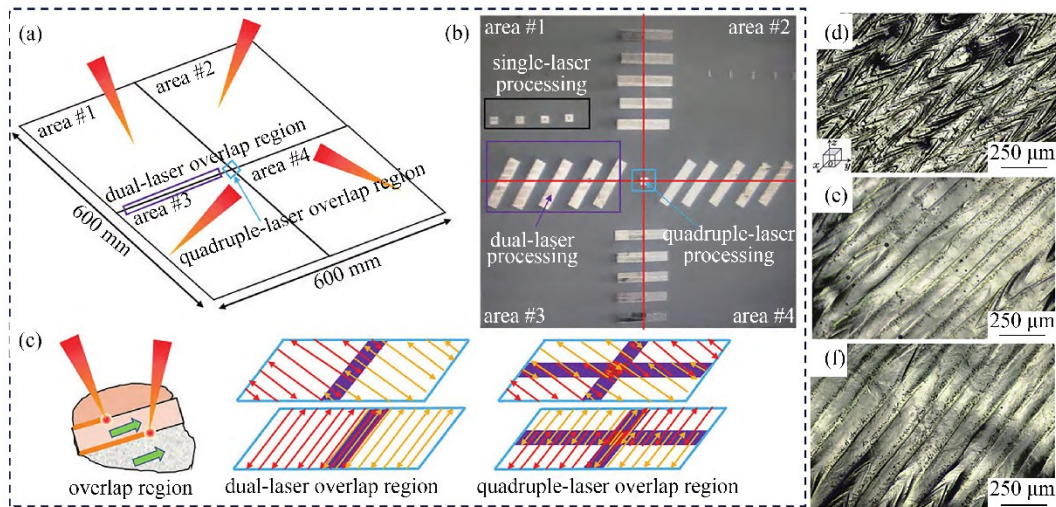
多激光较高的热输入使得扫描策略对构件的表面形貌、尺寸精度及微观组织会产生显著影响。张思远等^[17]分别采用重熔扫描和交错扫描进行ML-PBF成形TC4钛合金,发现交错扫描能有效改善构件的尺寸精度、减少表面起伏与内部缺陷。

1.1.3 多激光热应力分布特征

热应力是构件产生裂纹与翘曲的关键因素。Chang等^[19]通过建立分块数值模型发现,当激光数从1增加到4时,试样表面残余应力减小,而底部中心的残余应力显著增加。这一结果说明ML-PBF虽可以分散单激光的局部热集中,但成形过程中,多热源叠加反而使构件底部应力累积加剧,需在扫描策略中兼顾表面与内部应力分布。

1.1.4 保护气流场优化

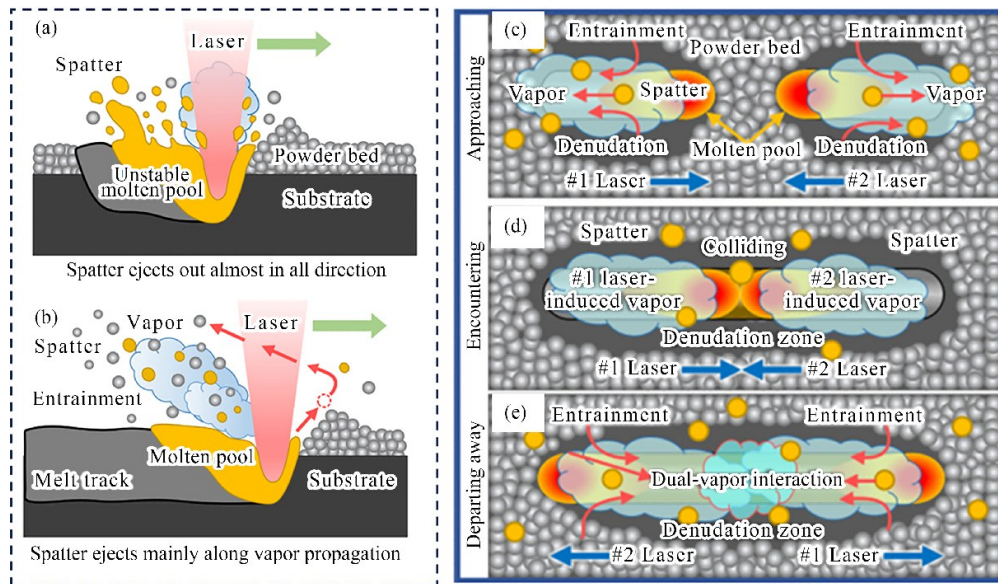
ML-PBF成形过程中,多激光同时作用粉末床会产生大量粉尘与飞溅物,通入惰性保护气既可防止构件氧化,又能清除飞溅颗粒并促进粉末床表面颗粒迁移。Qing等^[20]在不同流速条件下LPBF成形316不锈钢,发现低流速易导致飞溅颗粒堆积与气孔缺陷,表面质量较差、氧含量较高;高流速则可有效清除飞溅颗粒,获得最佳表面质量与最低氧含量。气流分布均匀性同样关键,影响粉尘的定向排出和熔池保护效果。刘森林等^[21]设计了一种波形进风道新型进风结构,对风道和成形舱的风场进行



(a)四激光LPBF成形过程;(b)LPBF成形试样;(c)单激光成形区域及拼接区示意;试样表面OM:(d)单激光成形区域;(e)双激光成形区域;(f)四激光成形区域

图3 试样成形示意^[16]

Fig. 3 Schematic diagram of specimen fabrication^[16]



(a、b)单激光作用粉末表面形成液滴飞溅;(c、d、e)多激光作用粉末表面形成液滴飞溅

图4 单激光与多激光飞溅形成机制示意^[18]

Fig. 4 Schematic of the formation mechanism for droplet ejection by single and multiple lasers^[18]

数值仿真并实际测试其风速,优化后在出风口速度最大分布差值小于0.5 m/s,且相邻速度差值小于0.4 m/s,实现了均匀出风进而提高了风场稳定性。

1.2 成形基板高温预热

LPBF成形过程中,高能激光束扫描粉末形成的熔池局部瞬时温度可超过1 000 °C,而周围粉末或凝固层仍处于低温状态,强烈的温度梯度使高温熔池凝固收缩时受到周围低温粉末或凝固层的约

束,进而产生数百兆帕的热应力^[22]。因此,基板预热是LPBF加工过程中控制变形和抑制开裂的关键工艺,通过电阻加热、感应加热、激光加热等方式主动提高基板温度,降低凝固层与基板间的温度梯度,从而抑制热应力产生,减少裂纹与翘曲等缺陷^[23-24]。

1.2.1 应力抑制与变形控制

基板预热对应力与变形的抑制效果已在多种

材料上得到验证。Müller等^[25]在不同基板预热温度下LPBF成形纯W,预热温度由200℃增至1000℃时,纯W试样表面裂纹密度明显降低,虽无法完全消除裂纹,但降低温度梯度可有减小裂纹倾向,如图5所示。钱学海等^[26]通过多相流方法模拟熔池形

态演变行为,发现当基板温度由300 K增至478 K时,熔池长度与深度逐渐增加,且熔池边界处的温度梯度显著高于熔池内部区域;适当提高基板初始温度可有效降低该温度梯度,进而减小热应力,如图6所示。

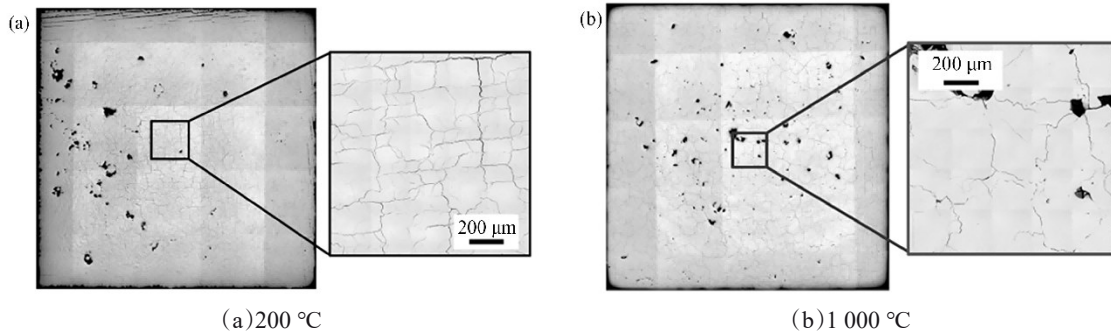
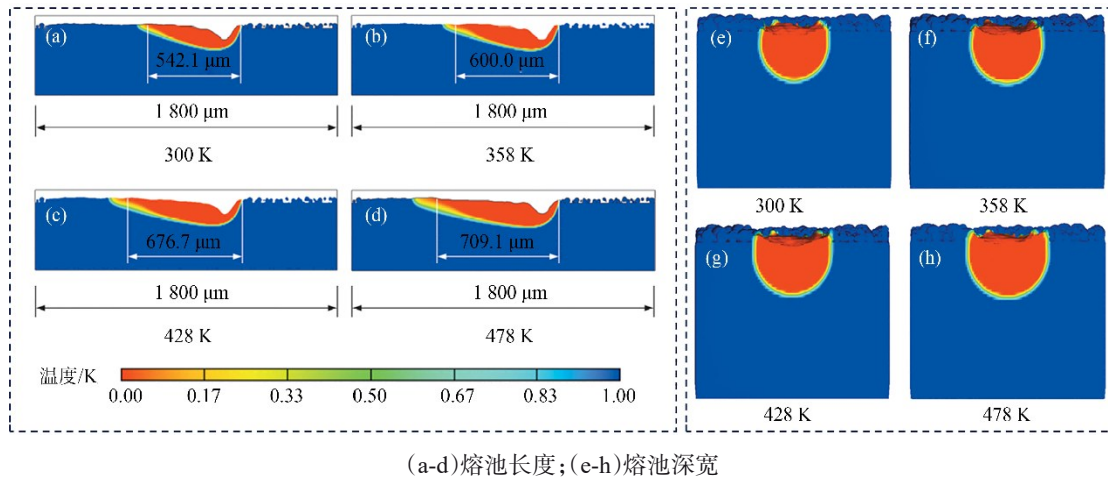


图5 不同基板预热温度下LPBF成形纯W试样横截面形貌^[25]

Fig. 5 Cross-sectional morphology of as-fabricated pure tungsten specimens by LPBF at substrate preheating temperatures^[25]



(a-d)熔池长度;(e-h)熔池深宽

图6 不同基板预热温度下熔池特征对比^[26]

Fig. 6 Melt pool characteristics comparison under varying substrate preheating temperatures^[26]

1.2.2 微观组织与相组成调控

除抑制应力外,基板预热还可通过调控熔池的热力学行为优化凝固参数、相组成、晶粒形态,从而实现构件性能提升^[27]。以TiAl合金为例,其相组成对力学性能至关重要,而基板预热通过降低冷却速率改变凝固路径,进而影响微观结构。Li等^[28]在不同基板预热温度下LPBF成形Ti-45Al-2Cr-5Nb合金,发现当基板温度由25℃增至400℃时, α_2 相减少而 γ 、 B_2 相增多,且在较高预热温度下获得的TiAl合金的纳米硬度明显高于传统铸造。类似地,基板预热温度对Ti合金的缺陷抑制与强韧化行为也具有重要作用。Zhou^[29]等在25℃、100℃、200℃基

板温度下LPBF成形Ti-15Mo合金,发现随着预热温度升高,微裂纹和小孔倾向降低、塑性改善,但晶粒粗化与位错密度降低导致强度下降(见图7),表明基板预热温度的选取需在缺陷抑制与强度保持之间平衡。

1.3 双激光追随打印

如前所述,ML-PBF通过多激光分区拼接提升成形效率(1.1节),基板预热通过降低温度梯度抑制裂纹萌生(1.2节),但二者均未从熔池凝固角度直接调控热应力。双激光追随粉末床熔融(Dual-Laser Tracking Powder Bed Fusion, DL-TPBF)是一种区别于单激光重熔与双激光分区扫描-拼接的全新工

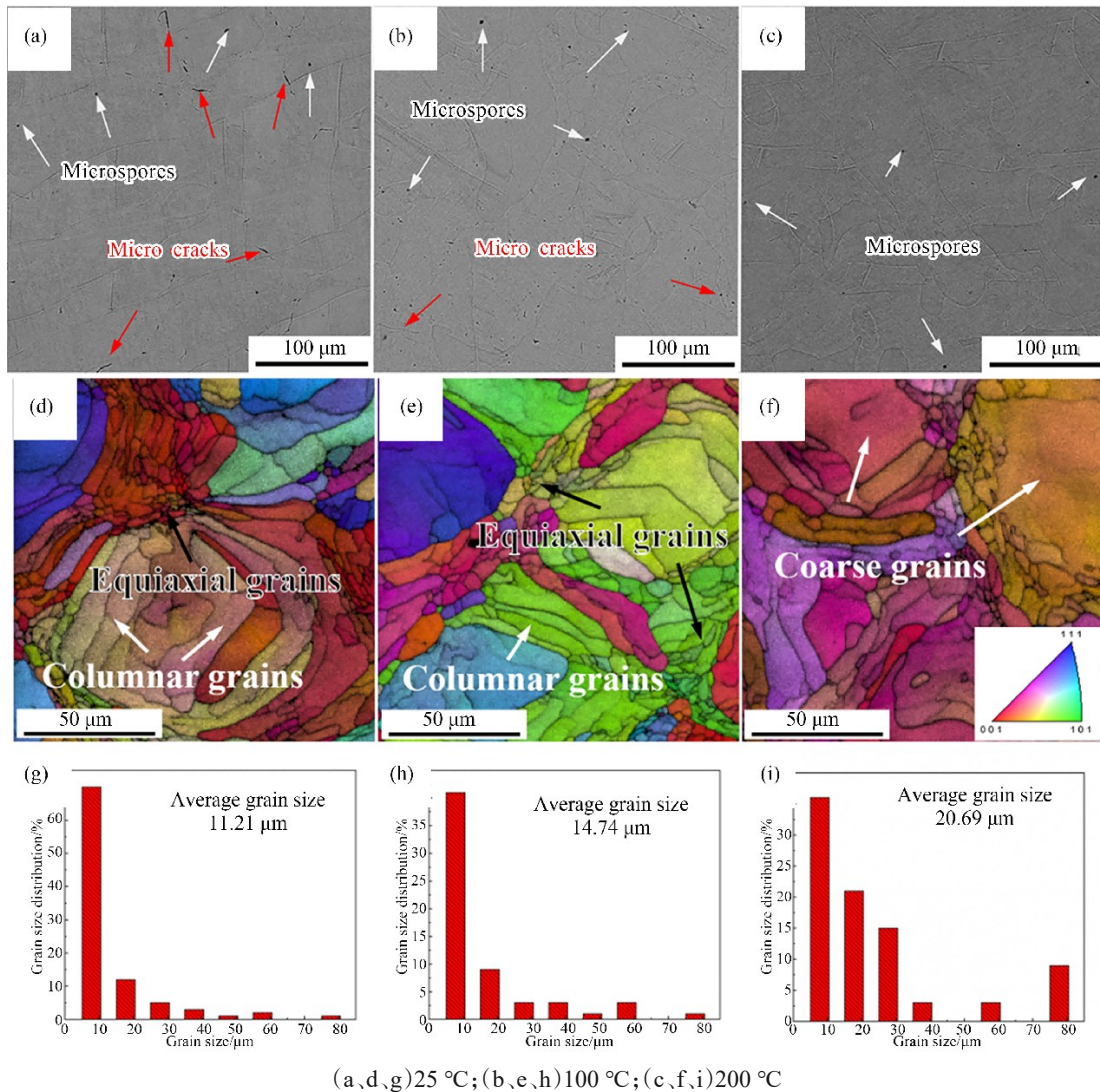


图7 不同基板温度下LPBF成形Ti-15Mo合金试样沿堆积方向SEM、试样顶面反极图及晶粒尺寸统计^[29]

Fig. 7 SEM images along build direction, top-surface inverse pole figures, and grain size statistics of LPBF-formed Ti-15Mo alloy at different substrate temperatures^[29]

艺,其成形设备采用双振镜协同控制系统,通过两套独立振镜实现激光束的同步动态跟踪与路径优化且双束激光由主激光与辅助激光组成:主激光用于熔化金属粉末,辅助激光在极短间隔时间后沿相同轨迹再次扫描主激光已熔化区域,通过延长熔池凝固时间来降低温度梯度,从而减少热应力诱发的裂纹^[30]。

DL-TPBF的核心在于主-辅激光束的能量重新分配。传统SL-PBF采用单束高能激光辐照粉末层,易形成不稳定熔池并产生剧烈温度梯度;DL-TPBF将部分能量转移至辅助激光,使主激光可在较低功率下实现稳定熔化,辅助激光则对凝固前沿

提供热补偿,二者协同调控成形过程中的热应力分布。该工艺尤其适用于钨合金等难加工材料——钨的熔点高达3 422 °C,且具有优异高温强度,在航空发动机燃烧室衬里、涡轮叶片等关键高温部件中不可替代^[31],但其在LPBF成形中因韧脆转变温度高、凝固温度梯度大而极易产生裂纹,DL-TPBF为该类材料的高质量成形提供了有效途径。

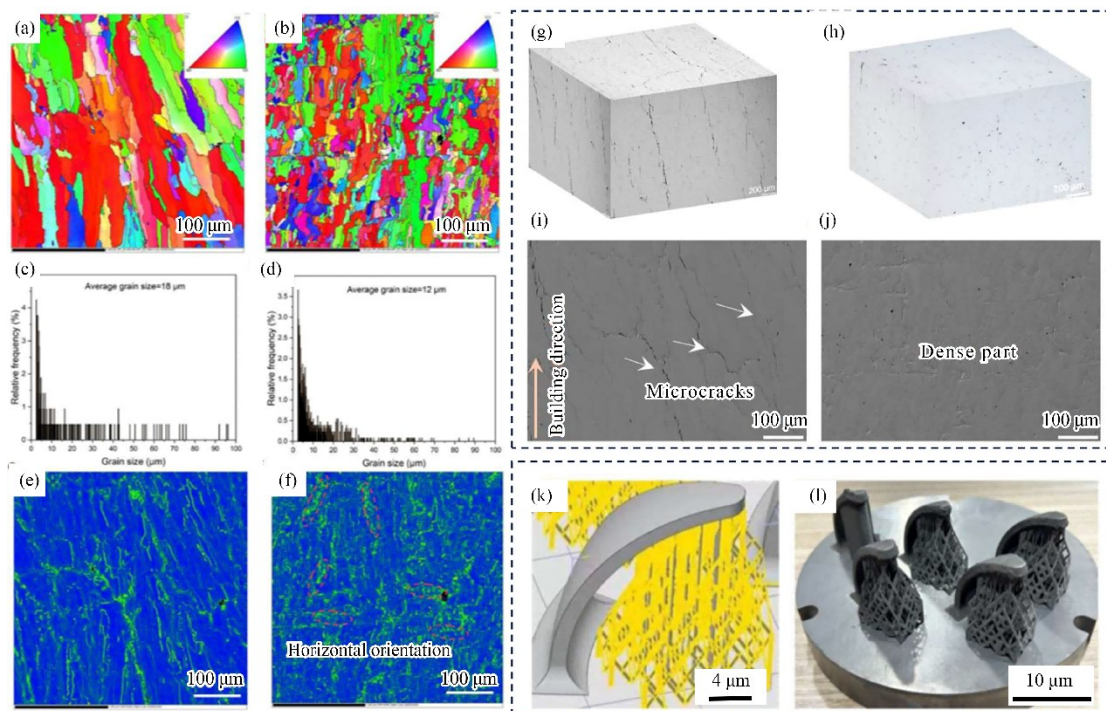
DL-TPBF工艺中,主-辅激光间隔时间是决定辅助激光热补偿效果的关键参数,间隔过短则熔化层能量过于集中,间隔过长则辅助激光无法有效补偿热量散失。为攻克SL-PBF成形大尺寸高比重钨合金构件时面临的高裂纹倾向与力学性能差等难

题, Dai等^[32]通过数值模拟与实验发现, 当间隔时间为100 ms时, 高比重钨合金的凝固温度仍高于其韧脆转变温度, 有利于降低裂纹倾向; 与SL-PBF成形试样内的柱状晶相比, DL-TPBF成形试样内形成的等轴晶可有效抑制微裂纹沿柱状晶扩展, 抗压强度提升至2 510 MPa, 并成功制备了高度40 mm、壁厚3 mm的极低缺陷的薄壁悬垂结构, 如图8所示。Liu等^[33]采用DL-TPBF成形316L不锈钢, 发现较短间隔时间(2 ms)可获得较高的表面质量($R_a=5.876 \mu\text{m}$, $Str=0.633$)与相对密度(99.28%), 但能量过于集中会增大孔隙率与晶粒尺寸, 导致其抗拉强度与延伸率(667.19 MPa, 49.3%)低于5 ms间隔时

间的结果(703.55 MPa, 50.4%)。

为进一步明确DL-TPBF成形过程中主-辅激光束的协同调控机制, Promopattum等^[34]通过三维热力耦合模型仿真发现, DL-TPBF工艺可使冷却速率和残余应力分别降低约70%和30%, 且冷却速率和应力幅值主要受辅助激光调控, 而主激光的扫描长度主导了应力各向异性。

综上, DL-TPBF通过主-辅激光能量分配与间隔时间的协同调控, 为难加工材料(如钨合金)和高精度构件成形提供了有效路径, 但间隔时间对表面质量与力学性能的影响仍需针对不同材料体系建立优化准则。



(a, c, e)SL-PBF成形试样EBSD; (b, d, f)DL-TPBF成形试样EBSD; (g, i)SL-PBF成形试样表面形貌; (h, j)DL-TPBF试样表面形貌; (k, l)DL-TPBF成形大尺寸薄壁悬垂构件三维模型及实物

图8 SL-PBF与DL-TPBF成形试样晶粒形态与表面形貌对比及DL-TPBF成形大尺寸薄壁悬垂构件^[32]

Fig. 8 Comparison of grain morphology and surface topography between SL-PBF and DL-TPBF formed specimens, and large-scale thin-wall overhanging structures fabricated by DL-TPBF^[32]

2 激光粉末床熔融稳定性控制技术

2.1 熔池多物理参数的在线监测

LPBF成形大尺寸航空金属构件时, 长时间打印易导致热积累, 使构件出现翘曲变形、裂纹等缺陷, 严重翘曲会损坏铺粉装置并导致打印终止^[35]。

在线监测熔池温度、形貌及熔体飞溅等物理参量, 并据此自适应调控工艺参数, 对提高大尺寸航空金属构件打印成功率与成形质量至关重要。

2.1.1 熔池温度监测

熔池温度是影响构件成形质量的关键因素之一, 熔池温度过低难以完全熔化粉末, 层间结合较

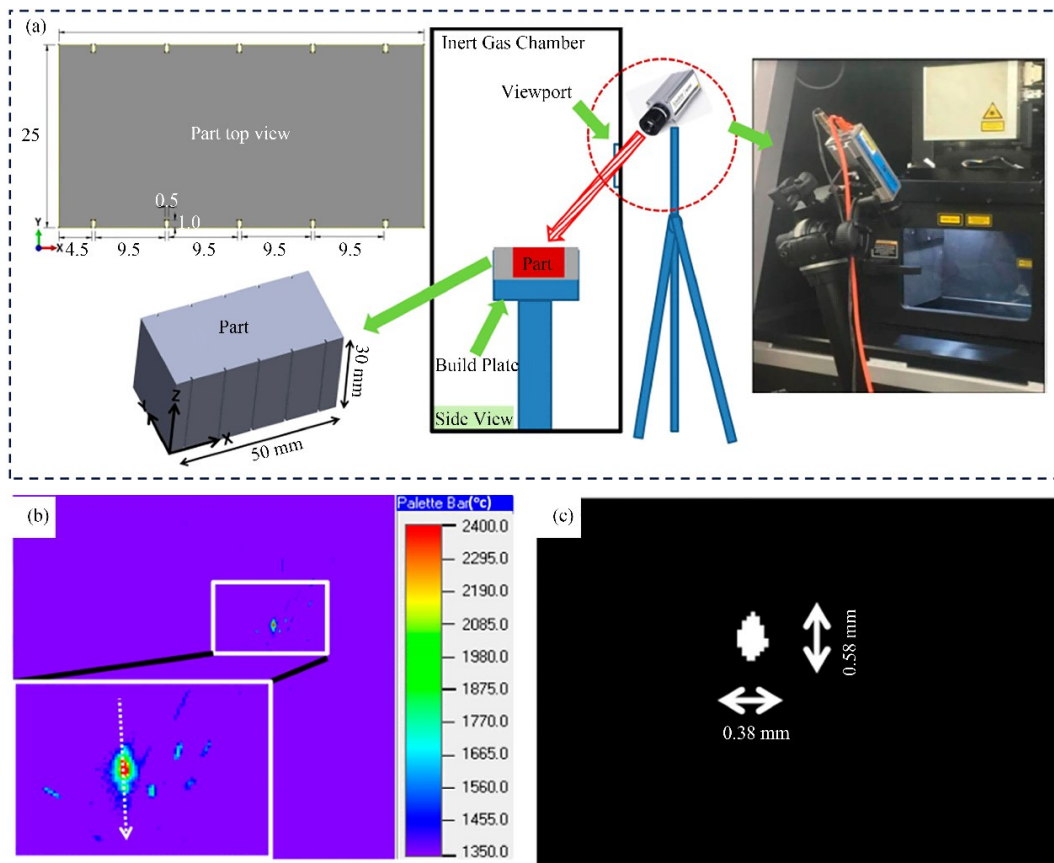
差并形成较多未熔合孔隙,降低构件致密度;熔池温度过高则引发粉末过度熔化甚至汽化,产生蒸汽反冲压力,造成熔体飞溅和气孔,同时晶粒粗化削弱构件的强度与韧性^[36]。熔池温度监测按光路布置分为旁轴与同轴两种方式。旁轴监测是利用非共轴的光学路径采集熔池信息,通常将传感器(如红外热成像仪、光电二极管或高速相机)安装在光路侧面,结构简单但受观测角度限制;同轴监测是将传感器集成于激光主光路中,通过分光镜或二向色镜实现光信号的同轴采集^[37],空间分辨率更高。

在旁轴监测方面,Cheng等^[38]使用热成像仪监测LPBF成形镍基合金的粉层表面辐射温度分布,由此估算不同堆积高度处的熔池尺寸,如图9所示。在同轴监测方面,Heng等^[39]基于双波长测温法开发了一种适用于LPBF的单相机同轴熔池测温系统,通过亚像素精度的双波段图像匹配方法与全局参数校准优化策略,将测温误差控制在1%以内,同时

捕获了熔池温度分布、形貌轮廓、温度梯度及冷却速率,如图10所示。

2.1.2 缺陷形成机理的原位监测

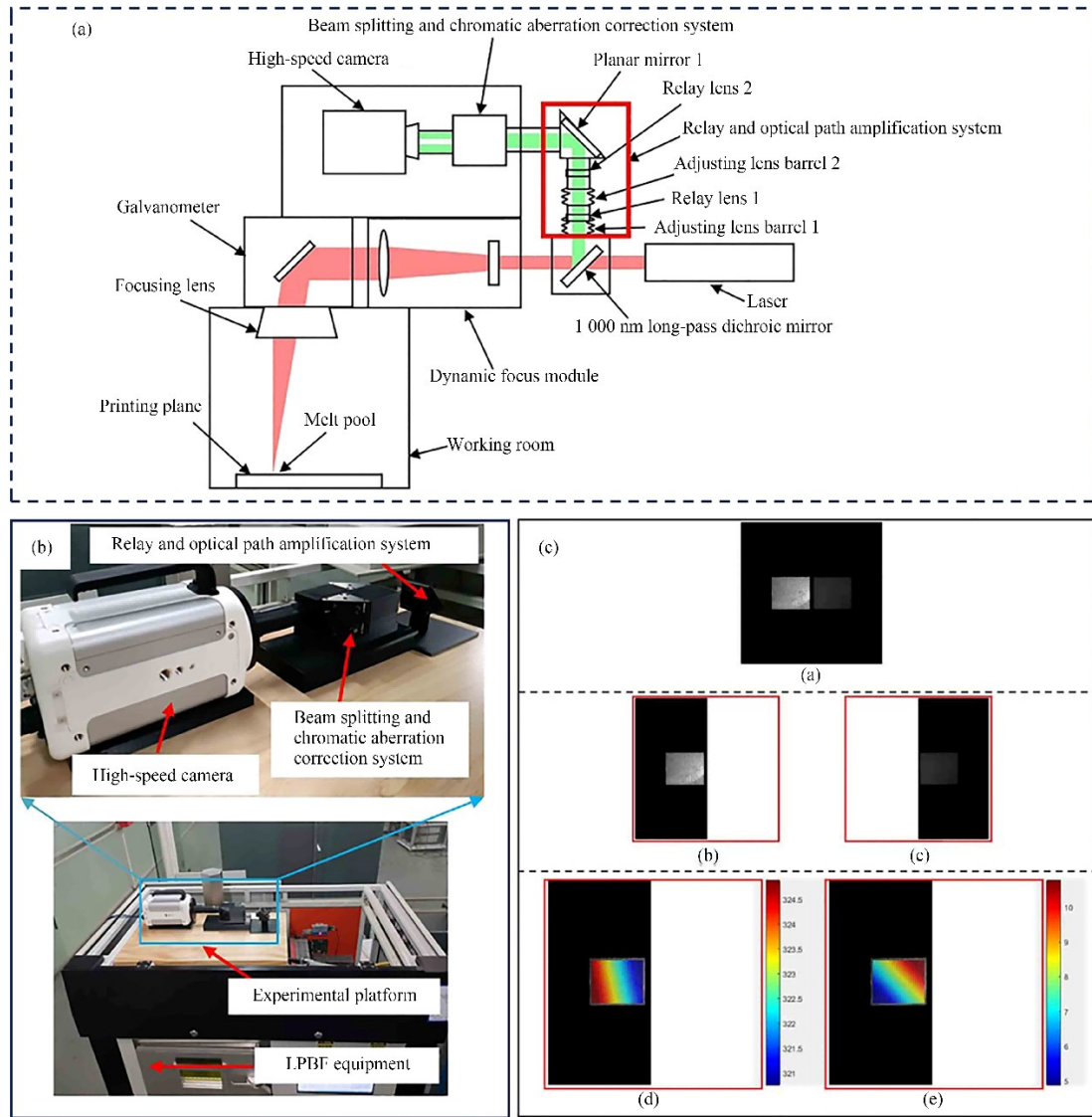
温度监测可获取熔池宏观热状态,但缺陷的萌生与扩展涉及熔池内部动力学过程,需借助更高级的时间-空间分辨率的手段加以揭示。X射线同步辐射成像技术可在微秒尺度上原位捕捉熔池内部动态演变。Yuze等^[40]利用该技术首次动态量化了匙孔波动、塌陷及气泡生长-收缩的演变行为,研究发现:其一,匙孔不仅出现于不稳定状态,高激光功率-速度组合诱导的过渡匙孔状态同样会形成匙孔,且过渡态匙孔塌陷并非随机发生,而是优先出现在熔池后壁的中部区域;其二,匙孔塌陷后气泡会经历压力平衡驱动的急速膨胀与金属蒸气凝结主导的收缩过程。Yan等^[41]利用原位X射线成像技术实时监测LPBF成形大层厚316L粉末在不同工艺参数下的熔化过程,发现球化起源于熔质供给不



(a)热成像监测系统组成及试样尺寸;(b)粉层表面辐射温度采集;(c)熔池尺寸估算

图9 熔池温度旁轴监测系统^[38]

Fig. 9 Off-axis melt pool temperature monitoring system^[38]



(a)用于LPBF熔池高速测温的单相机同轴测温系统原理;(b)熔池测温设备;(c)双波段图像匹配方法

图10 单相机同轴熔池测温系统^[39]

Fig. 10 Single-camera coaxial melt pool temperature measurement system^[39]

足时熔池拖尾区张力主导的液态金属回缩,且大层厚条件下球化倾向随扫描速度降低而加剧。

2.2 机器学习辅助工艺优化与质量控制

LPBF成形航空金属构件时,材料成分设计与工艺开发面临庞大的参数组合,传统试错法获取工艺窗口需耗费大量时间与研发成本^[42-43]。机器学习通过数据驱动的方式建立工艺参数与成形质量的映射关系,为缩短工艺开发周期、实现缺陷智能识别与闭环控制提供了新途径。

2.2.1 材料成分设计与工艺参数优化

为解决LPBF成形镍基高温合金的裂纹问题,

Lian等^[44]利用机器学习结合多层筛选技术设计了高 γ' 分数(>45.0%)和低裂纹敏感性的新型高温合金,实验验证其工艺窗口较宽,在体积能量密度60~117 J/mm³范围内可获得相对密度大于99.0%的高致密试样,最佳工艺参数下可获得无裂纹试样(见图11)。为快速获取LPBF成形高致密马氏体不锈钢的优化工艺参数,Wu等^[45]建立多种机器学习模型预测了最佳工艺参数和相应的致密粉末条件,经实验验证,梯度提升决策树(Gradient Boosting Decision Tree, GBDT)模型对相对密度的预测准确率达到98.30%。

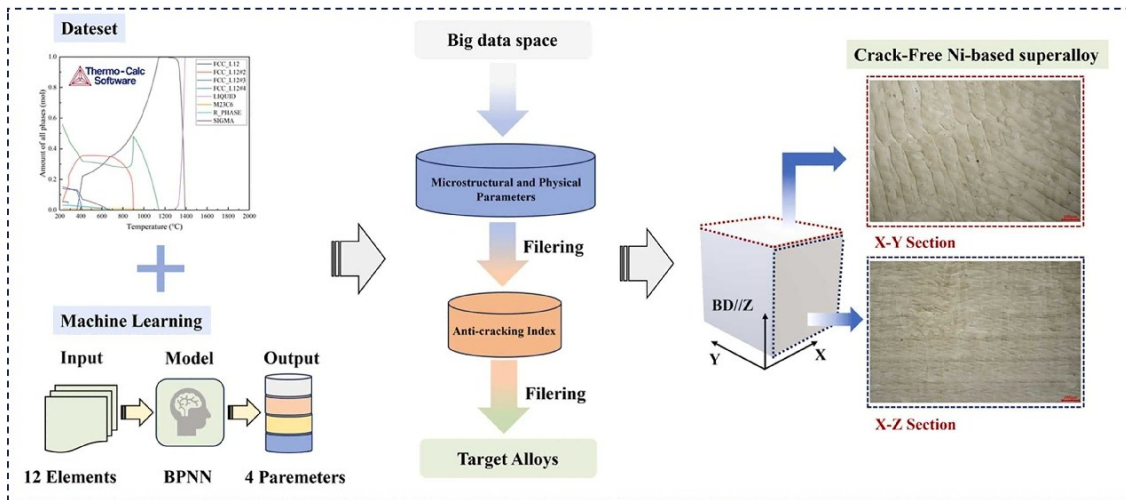


图 11 机器学习和多层筛选技术应用于 LPBF 成形无裂纹镍基超合金流程^[44]

Fig. 11 Flowchart of machine learning and multi-layer screening technology applied to LPBF fabrication of crack-free nickel-based superalloys^[44]

2.2.2 性能预测与强韧化调控

机器学习在性能预测方面具有应用潜力。Cao 等^[46]采用基于非支配排序遗传算法 II 的 CIRM 模型

优化 LPBF 成形 Ti6Al4V 合金的工艺参数,通过调整马氏体的晶粒尺寸分布,实现了强度-塑性协同提升(见图 12)。

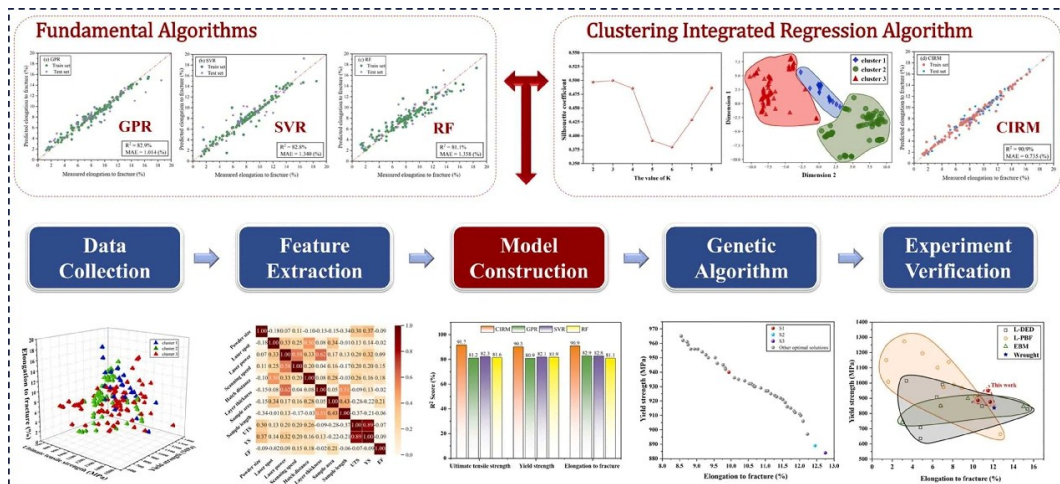


图 12 机器学习应用于 LPBF 成形 Ti6Al4V 合金实现强塑性协同提升流程^[46]

Fig. 12 Flowchart of machine learning applied to LPBF fabrication of Ti6Al4V alloy for achieving synergistic enhancement of strength and ductility^[46]

2.2.3 缺陷识别与闭环控制

上述应用均为离线优化,而 LPBF 成形过程中缺陷的实时识别与消除更具工程价值。Gunasegaram 等^[47]提出机器学习辅助闭环控制方法,利用在线机器学习模型处理现场原位监测数据并根据诊断结果动态决策,可快速消除或抑制缺陷,为 LPBF 从“开环打印”向“自适应调控”转变提供了初步的探索。

2.3 辐照热源光束整形及其复合使用

LPBF 成形金属构件常采用高斯光束作为热

源,其光斑中心能量密度极高,导致熔池中心与边缘区域温度梯度过大,促使柱状晶外延生长,进而形成粗大晶粒;同时熔池过度受热引发元素蒸发和反冲压力积累,造成匙孔和飞溅^[48]。光束整形通过改变高斯热源的能量分布模式来优化熔池动力学和热力学行为,是从热源层面提高熔池稳定性的主动手段。当前研究主要涉及椭圆光束、平顶光束与环形光束三种整形方式。

2.3.1 整形光束的调控效果

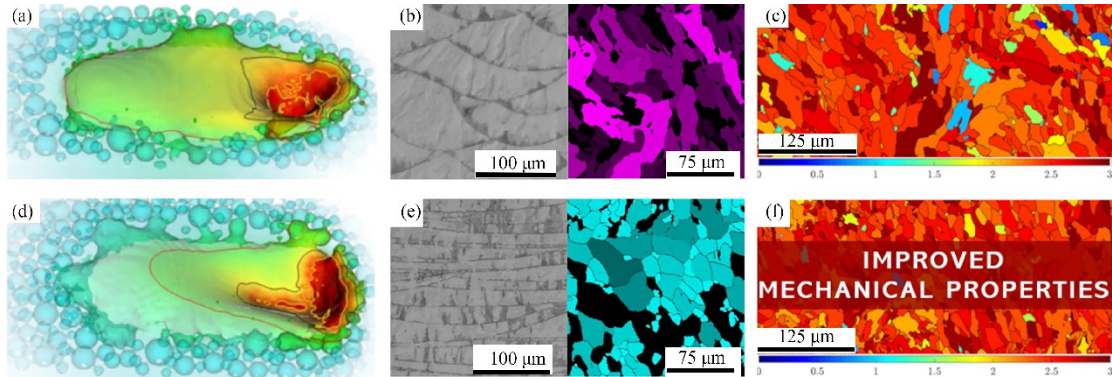
Roehling 等^[49]对比高斯光束与椭圆光束 LPBF

成形 316L 不锈钢的微观组织,发现椭圆光束可明显细化柱状晶与等轴晶,等轴晶体积分数大幅提升且织构强度更低(见图 13)。Wang 等^[50]使用平顶光束 LPBF 成形 Ti-6Al-4 合金,该光束显著降低了匙孔形成倾向并扩大了工艺窗口,高热输入诱导的原位热处理促使马氏体分解,试样疲劳裂纹扩展(FCG)阈值提升至约 $3.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 。Yuan 等^[51]基于环形光

束与粉末动态交互的原位监测,揭示了环形光束能有效消除匙孔尖端不稳定空腔形成、增强匙孔稳定性,并减少液滴破碎与液滴碰撞诱发的大尺寸飞溅(见图 14)。

2.3.2 多光斑复合策略

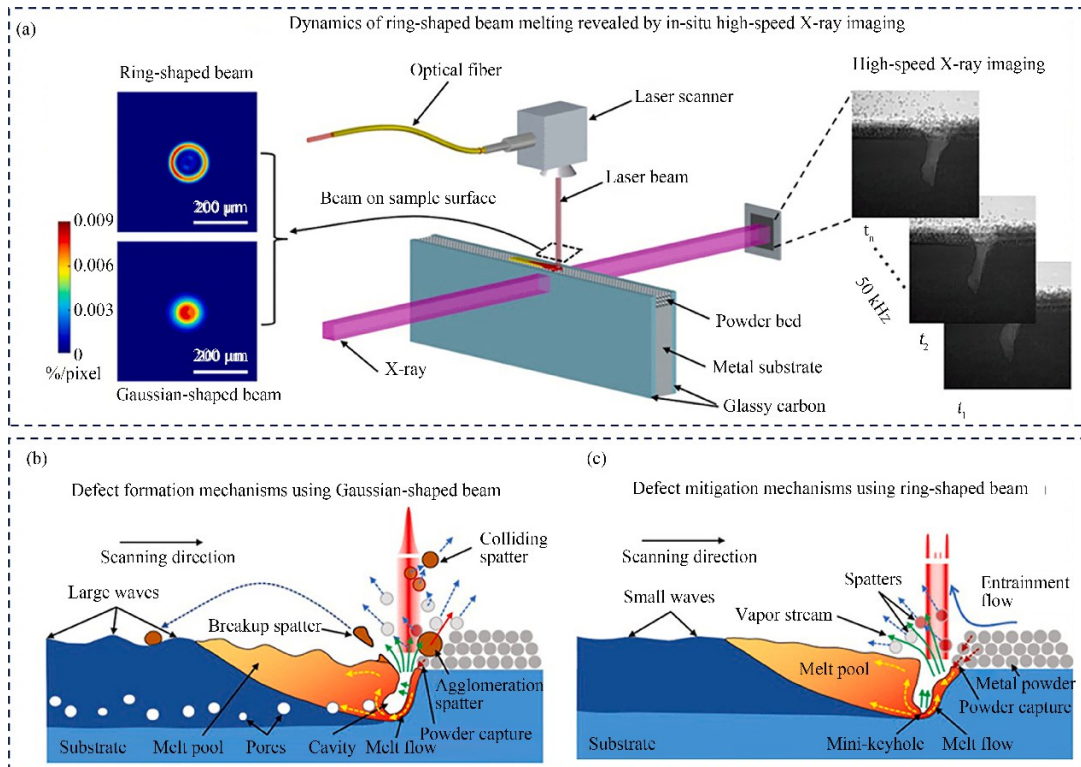
不同光束在成形复杂航空金属构件时各有优势。高斯光束的光斑小、聚焦性强,适合薄壁等精



(a、b、c)依次为高斯光束熔池表面形貌、试样横截面熔池分布及晶粒尺寸、试样织构强度；
(d、e、f)依次为椭圆光束熔池表面形貌、试样横截面熔池分布及晶粒尺寸、试样织构强度

图 13 高斯光束与椭圆光束成形 316 不锈钢熔池形貌及微观组织对比^[49]

Fig. 13 Comparison of melt pool morphology and microstructure in 316 stainless steel formed by Gaussian beam versus elliptical beam^[49]



(a)高速 X 射线原位监测设备组成; (b)高斯光束的熔池示意; (c)环形光束的熔池示意

图 14 高速 X 射线原位监测环形光束、高斯光束与粉末交互过程^[51]

Fig. 14 In-situ high-speed X-ray monitoring of the interaction process between annular beam, Gaussian beam, and powder^[51]

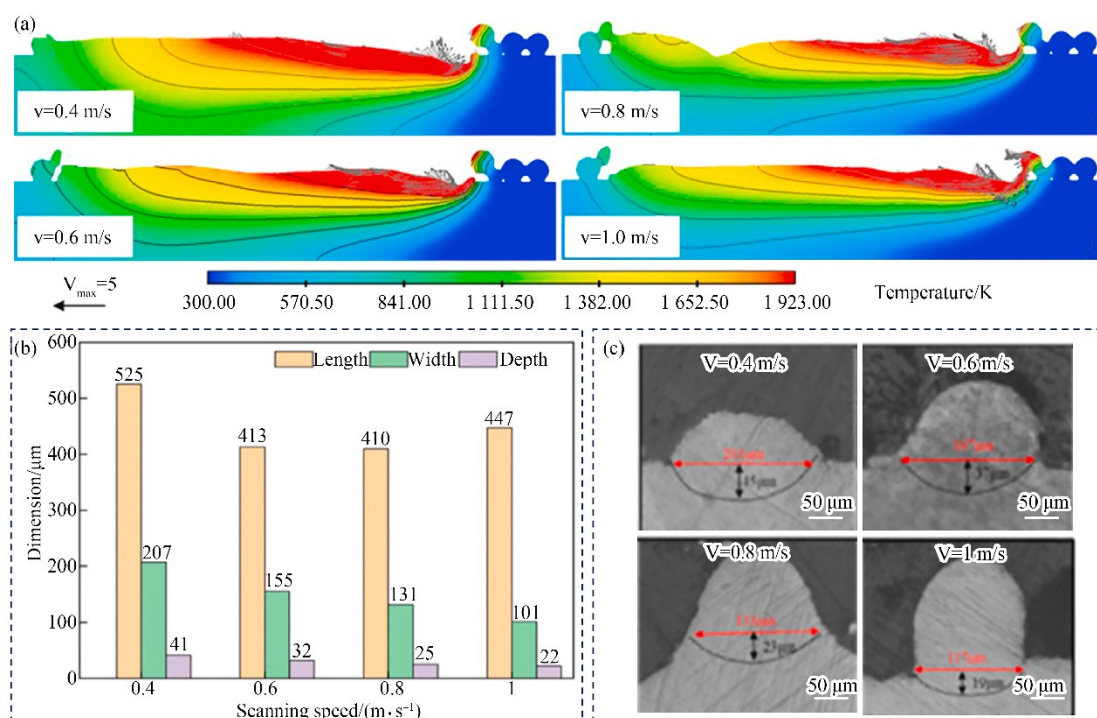
细结构的高精度成形;环形光束外围能量高、穿透能力强,适用于厚壁结构高效率成形^[52]。因此,可通过多种激光斑点复合来满足航空金属构件内不同复杂结构的成形需求。汉邦激光^[53]已推出可在同一台LPBF成形设备上实现高斯光束与点环光束的任意切换及独立调控工艺参数的成形方法,批量化生产精密小尺寸金属构件可固定为高斯模式,而大尺寸金属构件高效率与高质量成形可采用高斯光束与点环光束复合。

3 激光粉末床熔融熔池多物理场预测仿真技术

LPBF成形航空金属构件涉及从熔池尺度到构件尺度的多物理场,现有物理检测手段难以精确获取熔池内部瞬态温度场、速度场及凝固组织演变信息,数值模拟成为研究熔池行为的有效途径。本节从熔池温度场-速度场预测、晶粒形核与长大预测、构件应力应变预测三个层次,按“热力学边界→微观组织→宏观性能”的递进逻辑梳理相关研究进展。

3.1 熔池温度场-速度场预测仿真技术

熔池温度场和速度场的动态耦合直接影响LPBF成形过程中的熔道形貌、缺陷生成及组织演变,是工艺稳定性与成形质量的关键影响因素^[54]。赵一霖等^[55]采用数值模拟方法研究了LPBF成形NiTi合金单道扫描过程中熔池温度场与速度场的演变规律,发现温度峰值位置相对光斑中心沿扫描反方向偏移,反映了熔池热积累的滞后效应;当激光熔化粉末产生的熔质不足时,熔池的过渡区和拖尾区收缩,熔质堆积从过渡区转向拖尾区,拖尾区起主导作用的张力会引发熔质表面球化。Chen等^[56]使用FLOW-3D软件建立了LPBF成形Ti6Al4V三维瞬态热流场数值模型,发现当扫描速度从0.4 m/s增至0.8 m/s时,熔池长度由524 μm 缩减至410 μm ,线能量密度降低导致粉末熔化量减少,熔融态金属润湿性与流动性变差,如图15所示。上述研究聚焦纯金属与合金体系,而金属基体中添加的陶瓷颗粒会与熔池发生复杂的物理交互作用,进一步增加了温度场-速度场预测的复杂度。Ni等^[57]通过数值模拟揭示了TiCN陶瓷颗粒对LPBF



(a)不同扫描速度下的熔池热流场;(b)数值模拟不同扫描速度下的熔池尺寸;(c)成形试样熔池横截面形貌

图15 数值模拟LPBF成形Ti6Al4V合金的熔池热流场分布^[56]

Fig. 15 Numerical simulation of thermal-fluid field distribution in the melt pool during LPBF of Ti6Al4V alloy^[56]

成形 AlSi10Mg 基体的热力学影响机制,发现 TiCN 陶瓷颗粒使熔池内局部峰值温度从 1 831.2 K 升高至 2 020.3 K,凝固过程亦随之缩短;同时 TiCN 颗粒降低了熔池尾部区域的流动动能,提高了熔池整体流动的均匀性和稳定性。上述研究均基于单道扫描模型,而 LPBF 实际成形是多层多道叠加过程,层间重熔与多道搭接区的热累积效应对温度场与速度场的影响尚需进一步研究。温度场与速度场的准确预测为后续凝固组织演变分析提供了热力学边界条件。

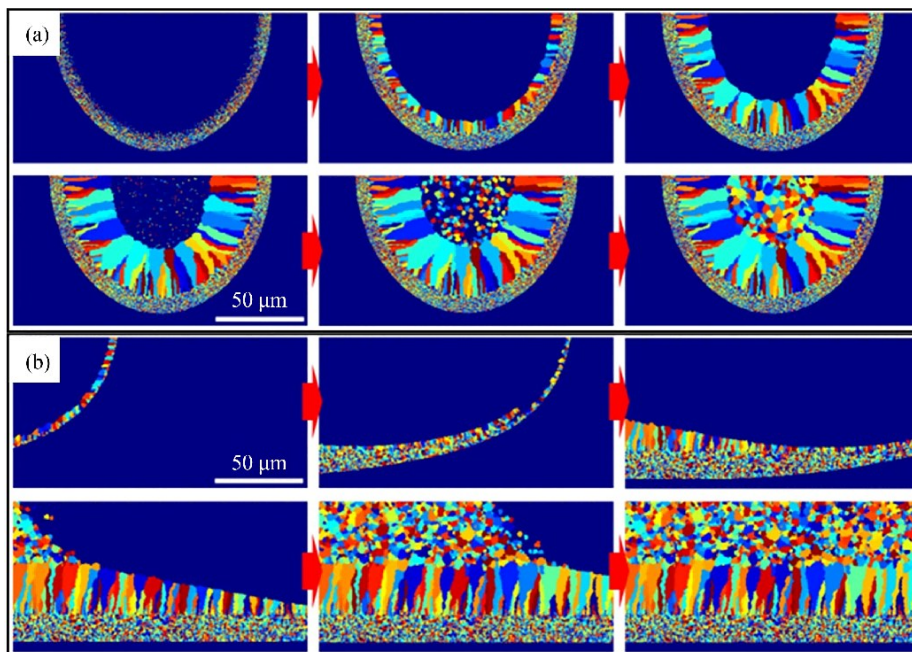
3.2 非平衡凝固过程晶粒形核与长大预测技术

非平衡凝固过程中的晶粒形核与长大预测技术,通过多尺度建模与多物理场协同仿真,有助于实现精准调控 LPBF 成形构件的晶粒形貌与取向分布^[58],进而提升构件的抗拉强度、疲劳寿命等性能并缩短研发周期,为单晶涡轮叶片、机匣等航空金属构件的高效制备提供有效参考。当前,晶粒尺度预测主要采用元胞自动机(CA)和相场(PFM)两类方法:CA方法计算效率较高,适合介观尺度的晶粒形貌与取向预测;PFM方法可精细描述固/液界面演变,但计算量较大,更适合微观尺度的枝晶形态模拟。在CA方法方面,Hasanabadi等^[59]提出一种结

合新型混合体积热源的数值传热模型,预测了 LPBF 成形亚稳 β 型钛合金的晶粒形貌及枝晶尺寸。Huang等^[60]使用温度场驱动力的高保真CA算法模拟了 LPBF 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金中粗晶区与细晶区共存的双峰晶粒演变过程,揭示了双熔池边界快速过冷和大量 Al₃(Sc/Zr)颗粒的析出可为晶粒提供充足的形核位点,熔池温度梯度和冷却速度诱导晶粒按最优取向生长,而熔池固/液界面处的晶粒则通过外延生长在温度梯度方向上优先呈现柱状晶形态(见图16)。在PFM方法方面,Yi等^[61]采用PFM耦合有限元方法,实现了对 LPBF 成形 IN718 高温合金熔池内晶粒形核、外延生长及枝晶竞争生长等微观结构演变的全过程模拟,揭示了枝晶竞争生长同时受温度梯度与晶体学取向双重调控,取向偏差角大于 22.5°的非择优取向晶粒将被择优取向晶粒竞争淘汰。相比CA方法,PFM可更精细地刻画枝晶尖端竞争生长行为,但计算代价显著更高。在实际工程应用中需根据预测尺度与精度要求选择合适方法。微观组织的准确预测为宏观应力应变分析中的材料本构关系提供了输入。

3.3 成形构件应力应变预测技术

在 LPBF 成形过程中,热循环和热积累导致的



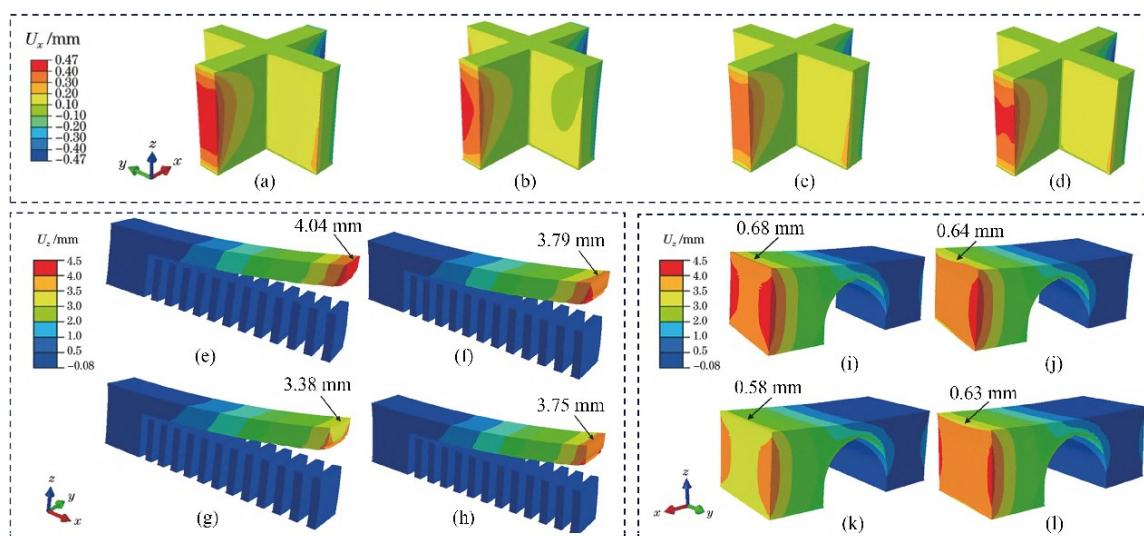
(a)熔池 Y-Z 截面的微观组织演变图(晶粒形核到完全凝固);(b)熔池 X-Z 截面的微观组织演变图(晶粒形核到完全凝固)

图 16 熔池凝固过程数值模拟的微观结构演变示意^[60]

Fig. 16 Schematic diagram of microstructure evolution during melt pool solidification by numerical simulation^[60]

残余应力和变形是制约复杂航空金属构件(如薄壁构件、悬垂结构、点阵结构)成形精度与打印质量的关键挑战^[62]。采用数值模拟等方法高精度预测成形过程中构件应力应变集中区,可为模型结构优化、支撑添加、工艺参数设置提供可靠参考。LPBF应力应变预测主要有三类方法:热弹塑性有限元法逐层计算应力演化,精度高但计算量大;固有应变法将逐层热应力等效为固有应变施加于整体模型,

计算效率高但精度依赖于应变参数标定;过程层积法介于二者之间,通过逐层激活单元模拟增材过程,兼顾效率与精度。尹清远等^[63]针对固有应变理论精度不足而热弹塑性法效率偏低的问题,基于改进固有应变理论并结合热弹塑性模型,分析了不同扫描策略下薄壁、悬臂梁及悬垂圆孔结构的残余应力与变形,发现三类结构在扫描方向沿短边时变形最小(见图17)。



(a、e、i)层间无旋转沿 0° 方向扫描;(b、f、j)层间无旋转沿 45° 方向扫描;(c)层间无旋转沿壁厚方向扫描;(g、k)层间无旋转沿 90° 方向扫描;(d、h、l)层间旋转 90° 扫描

图17 四种扫描策略下,十字薄壁结构沿x方向的变形、有支撑悬臂梁的支撑切割后的翘曲变形及从基板切割下悬垂圆孔后自由端相对于基板的翘曲变形^[63]

Fig. 17 Deformation of cross-shaped thin-wall structures along the x-direction, warping deformation of supported cantilevers after support removal, and warping displacement of overhanging circular holes relative to substrate after separation from baseplate under four scanning strategies^[63]

陈昌棚等^[64]通过建立LPBF成形TC4钛合金大尺寸热-结构间接耦合有限元数值模型,预测了薄板、倾斜板、方块、圆柱和三棱柱等典型结构的变形趋势,发现以上结构均出现内凹变形且最大内凹变形量位于构件侧边中部位置,模型预测与试验结果偏差值小于 $20\ \mu\text{m}$ 。Mohanraj等^[65]使用MSC Simufact软件对LPBF成形Ti-6Al-4V微型拉伸试样进行数值模拟,预测了不同倾斜角度(0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90°)及基板位置的变形与残余应力分布,发现靠近粉末收集器与气体入口的试样残余应力最小, 45° 方向试样标距段残余应力低于其他方位,而 0° 方向试样因高度最小呈现出轻微的变形趋势。上述研究主要针对小尺寸简单几何体,针对大尺寸航空金属构件的应力应变预测仍面临计算效率低这一

首要瓶颈,模型精度不足及工艺适应性有限次之。

4 总结与展望

4.1 总结

本文围绕LPBF成形航空金属构件的成形效率与工艺稳定性问题,从装备技术、稳定性控制技术和数值模拟预测技术三个维度梳理了国内外研究进展。

在装备技术方面,多激光协同加工可显著提升大尺寸构件成形效率,但拼接区的飞溅碰撞与热应力叠加仍制约构件服役性能;基板高温预热通过降低温度梯度有效抑制高脆性材料裂纹,但预热温度的选取需在缺陷抑制与强度保持之间平衡;双激光

追随打印通过主-辅激光能量分配可改善难加工材料成形质量,但间隔时间的优化准则尚需针对不同材料体系建立。

在稳定性控制技术方面,熔池多物理参量在线监测是缺陷识别的数据基础,其中X射线同步辐射成像技术可在微秒尺度原位揭示匙孔塌陷与气孔形成机制;机器学习辅助材料设计与工艺优化缩短了研发周期,但当前模型多用于单一环节且泛化能力有限;光束整形通过调控激光能量分布直接提升熔池稳定性,多光斑复合策略可适配复杂构件的差异化成形要求。

在数值模拟预测技术方面,熔池温度场-速度场预测揭示了工艺参数对熔池行为的影响规律,但现有研究多基于单道扫描模型,多层多道热累积效应尚待深入;晶粒形核与长大预测为微观组织调控提供了理论依据,其中CA方法适合介观尺度预测而PFM方法可精细刻画枝晶竞争生长但计算代价高;应力应变预测可辅助构件变形控制,但针对大尺寸构件仍以计算效率为首要瓶颈。

上述技术从成形前预测、成形中监测到成形后评估形成了初步的技术衔接,但各环节间的数据协同与优化仍显不足。

4.2 展望

目前,针对LPBF成形高性能金属构件的装备技术研究主要有以下趋势:

(1)基于时空差异特性的多激光工艺参数自适应调控技术。多激光协同加工大尺寸航空金属构件时,拼接区域的成形质量决定着构件的服役性能。由于粉末床表面温度分布随时间与位置变化而变化,而多激光使用相同工艺参数易造成拼接区域热应力集中,进而引发裂纹等冶金缺陷。因此,在线监测多熔池形态及温度分布并根据各区域成形质量独立调控各激光的工艺参数是ML-PBF装备技术发展的重要方向。

(2)基于机器学习的全过程辅助LPBF成形高性能金属构件方法。当前机器学习多用于材料辅助设计、工艺窗口预测及在线监测等单一环节,且建立的数据分析模型难以拓展至其他材料或构件成形。通过数据-材料-工艺-设备的深度耦合并利用迁移学习提高模型泛化能力,才能实现多种高性能

金属构件设计-制造-服役的协同调控。随着多模态感知、数字孪生和自主决策系统的进一步发展,机器学习将显著提升LPBF的智能化水平。

(3)基于多传感融合的在线监测及缺陷原位消除技术。目前,针对多传感融合监测技术研究较少,而全方位采集LPBF成形过程的多种信号(声、光、电、热)能避免单一传感器监测精度低造成错误决策,并缩短缺陷原位消除的窗口时间。在成形大尺寸金属构件时,严重热积累引发的翘曲变形可通过激光或刀具切削缓解或消除进而保证构件完整成形,而在线精确识别裂纹、气孔等缺陷并原位消除是未来提高LPBF成形质量的潜在技术。

(4)多尺度模拟的高效耦合与工程化应用。当前数值模拟在熔池尺度、晶粒尺度和构件尺度上的研究相对独立,跨尺度信息传递尚未贯通。未来需发展高效的多尺度耦合方法,将熔池热力学预测与晶粒组织演变、构件应力分布进行级联计算,兼顾预测精度与计算效率,使数值模拟从实验室研究工具走向工艺开发与构件设计的工程应用。

参考文献:

- [1] 巩水利,锁红波,李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术,2013(13):66-71. GONG S L, SUO H B, LI H X. Development and application of metal additive manufacturing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013 (13): 66-71.
- [2] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光,2020,47(05):32-55. GU D D, ZHANG H M, CHEN H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5):32-55.
- [3] 林鑫,黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学:信息科学,2015,45(09):1111-1126. LIN X, HUANG W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2015, 45(9): 1111-1126.
- [4] 曲波. 基于SLM的铝合金支架结构优化设计及工艺性研究[D]. 北京:北京工业大学,2017. BO Q. Optimal design and process research of aluminium alloy bracket based on SLM fabricating [D].

- Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [5] 王晓燕. 金属加工领域的3D打印产业发展情况[J]. 金属加工(热加工), 2020(07): 11-15.
WANG X Y. The development of 3D printing industry in the field of metal processing [J]. MW Metal Forming, 2020(07): 11-15.
- [6] 中国航空报. GE公司3D打印航空发动机支架获FAA认证[N]. [2025-02-05]. <http://www.cannews.com.cn/2018/11/15/99185216.html>.
- [7] Altair Company. EADS使用OptiStruct软件对空客A320的机舱铰链进行优化[EB/OL]. (2015-09-07) [2024-02-20]. <https://24maker.com/thread-17982-1-1.html>.
- [8] Airbus Company. Pioneering bionic 3D printing [EB/OL]. (2016-03-03) [2020-02-28]. <http://www.Airbus.com/newsroom/news/en/2016/03/Pioneering-bionic-3D-Printing.html>.
- [9] 雷力明, 侯慧鹏, 何艳丽, 等. 金属增材制造技术在民用航空领域的应用与挑战[J]. 航空制造技术, 2019, 62(21): 22-30.
LEI L M, HOU H P, HE Y L, et al. Application and challenges of metal additive manufacturing in civil aviation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(21): 22-30.
- [10] 苏亚东, 吴斌, 王向明. 增材制造技术在航空装备深化应用中的研究[J]. 航空制造技术, 2016(12): 42-48.
SU Y D, WU B, WANG X M. Research on further application of additive manufacturing technology on aviation equipment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(12): 42-48.
- [11] 程锦泽, 关凯, 杨书业, 等. 大型激光粉末床熔融金属增材制造装备研究与探讨[J]. 材料开发与应用, 2024, 39(02): 28-36.
CHENG J Z, GUAN K, YANG S Y, et al. Research and discussion on large-scale laser powder bed fusion metal additive manufacturing equipment [J]. Development and Application of Materials, 2024, 39(2): 28-36.
- [12] 王岩, 刘雨萌, 刘江伟, 等. 金属增材制造数值模拟研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(02): 179-192.
WANG Y, LIU Y M, LIU J W, et al. Research progress on numerical simulation of metal additive manufacturing process [J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(2): 179-192.
- [13] 许世娇, 权纯逸, 杨堃, 等. 金属增材制造技术在航空领域的应用现状及前景展望[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(03): 9-17.
XU S J, QUAN C Y, YANG K, et al. Application and prospect of metal additive manufacturing technology in aviation field [J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(3): 9-17.
- [14] 杨胶溪, 田育金, 郭东海, 等. 大幅面多激光粉末床增材制造研究进展与展望[J]. 中国激光, 2025, 52(20): 112-126.
YANG J X, TIAN Y J, GUO D H, et al. Research progress and prospect of large-format multi-laser powder bed additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Laser, 2025, 52(20): 112-126.
- [15] 曾庆鹏, 傅广, 任治好, 等. 多光束激光选区熔化研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(03): 1-19.
ZENG Q P, FU G, REN Z H, et al. Research progress in multi-beam selective laser melting [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(03): 1-19.
- [16] 谢寅, 滕庆, 沈沐宇, 等. 多激光粉末床熔融成形GH3536合金搭接区域组织与性能特征研究[J]. 中国激光, 2023, 50(08): 188-198.
XIE Y, TENG Q, SHEN M Y, et al. Study on microstructure and properties of overlap region of GH3536 alloy processed by multi-laser powder bed fusion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(8): 188-198.
- [17] 张思远, 王猛, 王冲, 等. 拼接方式对多光束SLM成形TC4成形特性的影响[J]. 应用激光, 2019, 39(04): 544-549.
ZHANG S Y, WANG M, WANG C, et al. The effect of overlap methods on forming qualities of TC4 alloy fabricated by multi-beam selective laser melting technique [J]. Appl Laser, 2019, 39(04): 544-549.
- [18] Yin J, Wang D, Wei H, et al. Dual-beam laser-matter interaction at overlap region during multi-laser powder bed fusion manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102178.
- [19] Chen C, Xiao Z, Zhu H, et al. Distribution and evolution of thermal stress during multi-laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 284: 116726.
- [20] Qingpeng C, Jiachen Y, Xiangyu L, et al. Effect of laser powder bed fusion gas flow rate on microstructure and mechanical properties of 316 L stainless steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 132: 850-862.
- [21] 刘森林, 邢飞, 卞宏友, 等. 激光选区熔化波形进风道结构设计仿真及实验研究[J]. 现代制造工程, 2024(05): 138-144.

- LIU S L, XING F, BIAN H Y, et al. Design simulation and experimental research on the structure of the wave-form air inlet duct in selective laser melting [J]. *Modern manufacturing*, 2024(05): 138–144.
- [22] 陈勇, 陈辉, 姜亦帅, 等. 高性能金属材料激光增材制造应力变形调控研究现状 [J]. *材料工程*, 2019, 47(11): 1–10.
- CHEN Y, CHEN H, JIANG Y S, et al. Research progress in stress and deformation control in laser additive manufacturing for high-performance metals [J]. *J. Mater. Eng.*, 2019, 47: 1–10.
- [23] Xie X, Zhang F, Peng C, et al. Effect of scan strategy and substrate preheating on crack formation in IN738LC Ni-based superalloy during laser powder bed fusion [J]. *Materials Characterization*, 2025, 221: 114722.
- [24] 高月华, 段景体, 刘其鹏, 等. 同轴送粉激光增材中扫描速度和基板预热对残余应力的影响 [J]. *塑性工程学报*, 2023, 30(01): 77–85.
- GAO Y H, DUAN J T, LIU Q P, et al. Effects of scanning speed and substrate preheating on residual stress in coaxial powder feeding laser additive manufacturing [J]. *Journal of Plastic Engineering*, 2023, 30(01): 77–85.
- [25] Müller A, Schlick G, Neu R, et al. Additive manufacturing of pure tungsten by means of selective laser beam melting with substrate preheating temperatures up to 1000 °C [J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2019, 19: 184–188.
- [26] 钱学海, 赵吕, 李振环. 基板温度对激光增材制造熔池特征影响的数值模拟研究 [J]. *计算力学学报*, 2024, 41(05): 822–829.
- QIAN X H, ZHAO L, LI Z H, et al. Numerical study of influence of substrate temperature on melt pool behavior in laser additive manufacturing [J]. *Journal of Computational Mechanics*, 2024, 41(05): 822–829.
- [27] Pedrazzini S, Pek M E, Ackerman A K, et al. Effect of substrate bed temperature on solute segregation and mechanical properties in Ti-6Al-4V produced by laser powder bed fusion [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2023, 54(8): 3069–3085.
- [28] Li W, Liu J, Zhou Y, et al. Effect of substrate preheating on the texture, phase and nanohardness of a Ti-45Al-2Cr-5Nb alloy processed by selective laser melting [J]. *Scripta Materialia*, 2016, 118: 13–18.
- [29] Zhou L, Sun J, Chen J, et al. Study of substrate preheating on the microstructure and mechanical performance of Ti-15Mo alloy processed by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 928: 167130.
- [30] Heeling T, Wegener K. The effect of multi-beam strategies on selective laser melting of stainless steel 316L [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 334–342.
- [31] 郑欣, 白润, 王东辉, 等. 航天航空用难熔金属材料的研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(10): 1871–1875.
- ZHENG X, BAI R, WANG D H, et al. Research development of refractory metal materials used in the field of aerospace [J]. *Rare Met. Mater. Eng.*, 2011, 40: 1871–1875.
- [32] Dai D, Wang L, Chen T, et al. Dual-laser powder bed fusion of difficult-to-process tungsten heavy-alloy: Inhibition of inferior defects and integrated fabrication of thin-walled overhanging structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 208: 112827.
- [33] Liu Z, Song C, Han X, et al. Effect of dual-laser powder bed fusion on surface quality, internal defects and properties of 316L stainless steel [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 5681–5691.
- [34] Promopattum P. Dual-laser powder bed fusion additive manufacturing: computational study of the effect of process strategies on thermal and residual stress formations [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(1): 1337–1351.
- [35] 陈香媛, 韦辉亮, 刘婷婷, 等. 基于熔池光信号的激光粉末床熔融沉积缺陷在线监测与诊断 [J]. *中国激光*, 2024, 51(10): 146–159.
- CHEN X Y, WEI H L, LIU T T, et al. In-situ monitoring and diagnostics for deposition defects in laser powder bed fusion process based on optical signals of melt pool (Invited) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(10): 1002308.
- [36] 谭志俊, 高双, 何博. 激光增材制造金属零部件变形的研究现状 [J]. *机械工程材料*, 2020, 44(09): 11–16.
- TAN Z J, GAO S, HE B. Research Status on the Deformation of Metal Components by Laser Additive Manufacturing [J]. *Materials For Mechanical Engineering*, 2020, 44(9): 11–16.
- [37] 白云, 董泽西, 李忠华, 等. 激光熔覆视觉监测与熔池图像处理研究综述 [J]. *热加工工艺*, 2024, 53(20): 1–8.
- BAI Y, DONG Z X, LI Z H, et al. Review on Laser Cladding Visual Monitoring and Molten Pool Image

- Processing [J]. Hot Working Technology, 2024, 53 (20):1-8.
- [38] Cheng B, Lydon J, Cooper K, et al. Infrared thermal imaging for melt pool analysis in SLM: a feasibility investigation [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018, 13(1):8-13.
- [39] Ma H, Mao Z, Feng W, et al. Online in-situ monitoring of melt pool characteristic based on a single high-speed camera in laser powder bed fusion process [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118515.
- [40] Huang Y, Fleming T G, Clark S J, et al. Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. Nature communications, 2022, 13(1):1170.
- [41] Yan Z, Liu S, Sun Z, et al. In situ X-ray imaging and quantitative analysis of balling during laser powder bed fusion of 316L at high layer thickness [J]. Materials & Design, 2024, 248: 113442.
- [42] 李翔, 张亮, 李京伟. 机器学习的发展现状及其在激光增材制造中的应用 [J]. 上海金属, 2024(02):1-13.
LI X, ZHANG L, LI Jing, et al. Analysis on development status quo of machine learning and its application in laser additive manufacturing [J]. Shanghai Metal, 2024(02):1-13.
- [43] 刘志远, 丁卯, 王沛, 等. 机器学习在金属增材制造中的应用现状和前景展望 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 (Z2):14-28.
LIU Z Y, DING M, WANG P, et al. Current Situation and Future Prospect of Machine Learning in Metal Additive Manufacturing [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2022, 65(Z2):14-28.
- [44] Lian L, Bao Z, Xiong Q, et al. Intelligent design of crack-resistant nickel-based superalloys for additive manufacturing by machine learning and multilayer filtering strategy [J]. Materials Today Communications, 2025, 46: 112387.
- [45] Wu L, Zhang C, Jiang X, et al. Optimizing additive manufacturing parameters for martensitic stainless steel via machine learning [J]. Materials Today Communications, 2024, 41: 110290.
- [46] Cao Y, Chen C, Xu S, et al. Machine learning assisted prediction and optimization of mechanical properties for laser powder bed fusion of Ti6Al4V alloy [J]. Additive Manufacturing, 2024, 91: 104341.
- [47] Gunasegaram D R, Barnard A S, Matthews M J, et al. Machine learning-assisted in-situ adaptive strategies for the control of defects and anomalies in metal additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2024, 81: 104013.
- [48] 昌思怡. 激光增材制造光场调控技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
CHANG S Y. Study on the light field control in the field of laser additive manufacturing [D]. Wuhan: Huazhong university of science and technology, 2021.
- [49] Roehling T T, Shi R, Khairallah S A, et al. Controlling grain nucleation and morphology by laser beam shaping in metal additive manufacturing [J]. Materials & Design, 2020, 195: 109071.
- [50] Wang K, Xie D, Lv F, et al. On the role of flat-top beam in pore elimination and fatigue performance of Ti-6Al-4V fabricated by laser powder bed fusion [J]. International Journal of Fatigue, 2024, 186: 108354.
- [51] Yuan J, Guo Q, Clark S J, et al. Revealing mechanisms of processing defect mitigation in laser powder bed fusion via shaped beams using high-speed X-ray imaging [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2025, 204: 104232.
- [52] Markowski F, Löber L. Methods of Laser Beam Shaping and Its Advantages in Metal Laser Additive Manufacturing: A Review [C]//PhD Seminar of the Faculty of Mechanical and Systems Engineering, Esslingen University. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 133-147.
- [53] 南极熊3D打印. 金属3D打印技术进步: 高斯光、点环光模式无缝切换, 汉邦激光推出光驰II型技术 [EB/OL] (2025-03-15) [2025-06-06]. <http://www.nanjixiong.com/thread-175170-1-1.html>.
- [54] 张兆栋. 高能束增材制造熔池演化过程的数值模拟研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
ZHANG Z D. Numerical simulation of molten pool evolution in high energy beam additive manufacturing [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [55] 赵一霖. NiTi合金选区激光熔化宏观数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
ZHAO Y L. Numerical simulation of selective laser melting of NiTi alloy at macroscopic and mesoscopic scales [D]. Harbin: Harbin engineering university, 2022.
- [56] Chen D, Li G, Wang P, et al. Numerical simulation of melt pool size and flow evolution for laser powder bed fusion of powder grade Ti6Al4V [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2023, 223: 103971.
- [57] Ni X, Hu Z, Wang A, et al. Advanced thermodynamic

- analysis of molten pool evolution in laser powder bed fusion of TiCN-reinforced AlSi10Mg composites: unveiling process mechanisms for enhanced additive manufacturing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 188: 112932.
- [58] 陈泽坤, 李晓雁. 金属增材制造过程中材料微观组织演化的模拟研究[J]. *力学进展*, 2022, 52(2): 397-409. CHEN Z K, LI X Y. Numerical simulations for microstructure evolution during metal additive manufacturing [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(2): 397-409.
- [59] Hasanabadi M, Shahabadi S I, Keshavarzkermani A, et al. A numerical modelling for laser Powder-bed fusion of Ti-alloy with a hybrid heat Source: An investigation on solidification and microstructure formation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174: 110647.
- [60] Huang G, Shen T, Li B. Microstructural evolution modelling and low-stress fatigue performance of bimodal-structured Al-Mg-Sc-Zr alloy produced by laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2024, 19(1): e2346287.
- [61] Yi Q I U, Li Y, Feng X, et al. Numerical simulation of microstructure evolution in molten pool of nickel-based superalloy during selective laser melting [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34(2): 560-575.
- [62] Xie D, Lv F, Yang Y, et al. A review on distortion and residual stress in additive manufacturing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, 1(3): 100039.
- [63] 尹清远, 韦辉亮, 张昌春, 等. 基于固有应变法的激光增材制造特征结构应力与变形高效预测[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 151-165. YIN Q Y, WEI H L, ZHANG C C, et al. Effect prediction of stress and deformation for laser additive manufacturing of characteristic structure based on inherent strain method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 151-165.
- [64] 陈昌棚, 雷杨, 陈冰清, 等. 激光选区熔化增材制造 TC4 钛合金典型结构变形的数值模拟研究[J]. *应用激光*, 2021, 41(4): 814-821. CHEN C P, LEI Y, CHEN B Q, et al. Numerical simulation of deformation of typical parts in selective laser melting additive manufacturing [J]. *Applied Laser*, 2021, 41(4): 814-821.
- [65] Mohanraj J, Sahu J. Numerical prediction of residual stress and distortion for laser powder bed fusion (LPBF) AM process of Ti-6Al-4V [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2025, 140: 103094.