

激光粉末床熔融数值模拟研究进展

潘露^{1, 2}, 张恒华¹, 刘桐³, 张成林⁴, 孙晓云³, 张梅¹

1. 上海大学材料科学与工程学院 上海 200444

2. 芜湖市金属基复合材料激光增材制造工程技术研究中心 安徽芜湖 241000

3. 安徽工程大学材料科学与工程学院 安徽芜湖 241000

4. 中国科学技术大学工程科学学院 安徽合肥 230026

摘要: 激光粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 是金属增材制造的一种成熟技术, 具有成形精度高、零件致密度接近100%等优势, 适用于制备复杂结构、小尺寸和高精度零件, 已应用于航空航天、汽车、模具和医疗等领域。LPBF成形过程集成了从纳米、微米到宏观尺度下的复杂多物理与化学现象, 属于极速冷却、微熔池的非平衡凝固行为, 在成形过程中, 温度、熔池尺寸等难以通过试验手段分析与测量, 因此数值模拟是研究LPBF成形机理的重要手段。首先, 总结了LPBF铺粉、打印和后处理过程中传热、传质、碰撞等典型物理和化学现象; 其次, 综述了LPBF成形过程中宏观力学数值模拟、粉末床离散元数值模拟、风场数值模拟、熔池介观数值模拟、微观组织数值模拟, 以及结构优化数值模拟技术的研究现状及发展趋势。

关键词: 宏观模拟; 离散元模拟; 介观模拟; 拓扑优化; 粉末床熔融

Research progress of numerical simulation of laser powder bed fusion

PAN Lu^{1, 2}, ZHANG Henghua¹, LIU Tong³, ZHANG Chenglin⁴, SUN Xiaoyun³, ZHANG Mei¹

1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

2. Wuhu City Metal Matrix Composite Materials Laser Additive Manufacturing Engineering Technology Research Center, Wuhu 241000, Anhui, China

3. School of Materials Science and Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China

4. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract: Laser Powder Bed Fusion (LPBF) is a mature technology of metal additive manufacturing, with the advantages of high forming accuracy, parts density close to 100%, which is suitable for complex structure, small size and high precision parts. LPBF technology has been used in aerospace, automotive, mold and medical and other fields. LPBF forming process integrates complex multiple physical and chemical phenomena from nano and micrometer to micro scale. LPBF is the non-equilibrium freezing behavior of extreme speed cooling and micro melting pool. It is difficult to analyze and measure the temperature and melting pool size by experimental means during the forming process. The physical and chemical phenomena of heat transfer, mass transfer, and collision of LPBF process were introduced firstly. In additionally, the development trend of macroscopic mechanics, powder bed dispersion element, wind field, melting pool, microscopic organization and structure optimization in LPBF forming

基金项目: 芜湖市重点研发与成果转化项目 (20123yf106)。

通信作者: 张梅, 教授, 博士生导师, 主要从事先进金属材料研究, E-mail: zhangmei3721@mail.shu.edu.cn。

张恒华, 教授, 博士生导师, 主要从事先进铝合金研究, E-mail: hhzhang@shu.edu.cn。

process were reviewed in this article.

Keywords: macroscopic simulation; discrete element simulation; mesoscopic simulation; topological optimization; laser powder bed fusion

1 序言

激光粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 是金属增材制造的一种成熟技术, 高能激光通过对粉末床上的金属粉末按预定路径扫描, 粉末吸收激光能量后发生熔化和凝固, 激光逐层扫描形成三维实体零件, 成形过程在保护气氛中进行, 以防止粉末和熔化金属氧化^[1]。在LPBF成形过程中, 激光扫描速度达到5000mm/s, 金属粉末在吸收激光能量后, 发生升温并熔化现象, 激光移动后, 随后熔融的微熔池温度急剧下降并在几毫秒内凝固, 升温 and 冷却速度达到 10^7K/s , 兼具极速升温 and 极速冷却的极端制造特征, 属于典型动态非平衡凝固。LPBF技术适用于制备微结构、小尺寸和高精度零件, 致密度接近100%, 最小成形直径 $<0.3\text{mm}$, 尺寸精度达 $20\mu\text{m}$, 表面粗糙度 $<10\mu\text{m}$ ^[2-4]。LPBF成形工艺如图1所示。

LPBF成形过程既涉及宏观的机械、结构优化尺度, 以及介观熔池尺度和微观组织尺度等多尺度问题, 又包含传热、熔化、相变、蒸发和传质等多物理场耦合作用。由于参数众多、成本过高、粉末冷却与熔化速度快, 试验研究手段有限, 采用试验手段在线观测工艺过程十分困难, 并且周期长、成本高, 因此数值模拟方法已成为研究LPBF成形微观组织、介观熔池和宏观成形质量的重要手段^[5-7]。

本文首先总结了激光粉末床熔融工艺过程传热、传质、碰撞等物理和化学现象, 包括铺粉、打印和后处理三个阶段; 其次, 在此基础上, 介绍了LPBF工艺过程中宏观数值模拟、粉末床离散元数值模拟、风场数值模拟、熔池介观数值仿真、组织微观数值模拟和零件结构优化数值模拟技术的研究现状; 最后, 展望了数值模拟应用于LPBF技术的发展趋势。

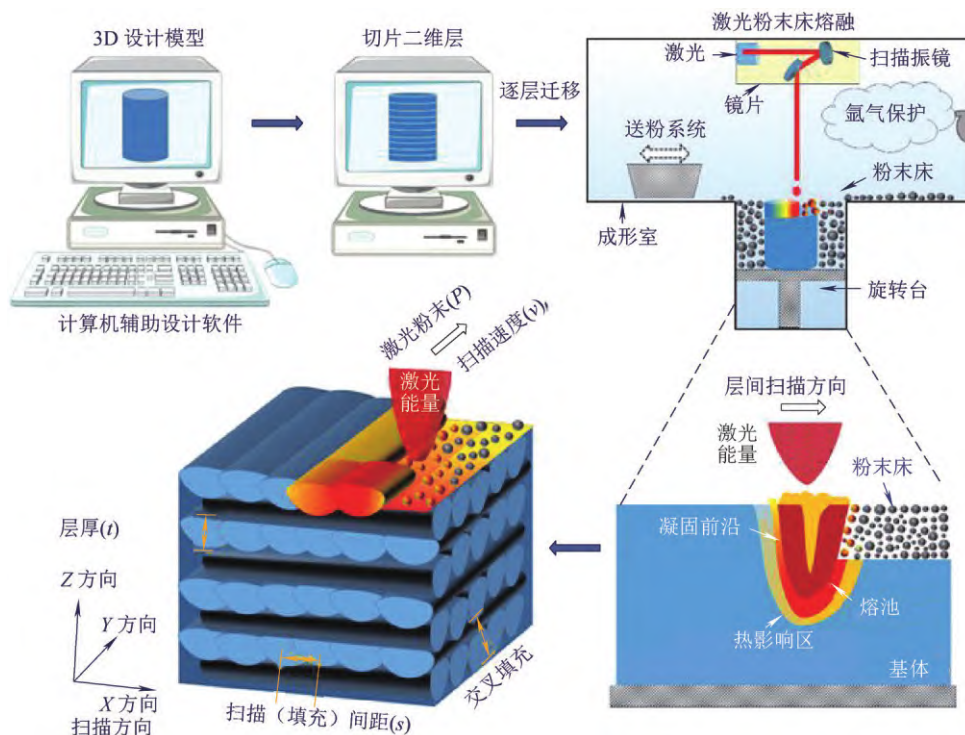


图1 LPBF成形工艺

2 激光粉末床熔融技术的物理与化学现象

LPBF技术通过高功率激光束选择性地熔化金属粉末层，通过逐层扫描构建三维零件，成形过程激光、粉末和基板之间等相互作用，涉及复杂的物理和化学现象，对最终零件的质量和性能有着决定性的影响。在成形过程中所发生的物理与化学现象可以归纳为：金属粉末的流动、金属的固-液相变（熔化和凝固）、热量传递和散失（传导、对流和辐射）、汽化和反冲行为，以及熔融金属的流动等。此外，在微观层面，熔池中还会发生晶体形核长大、固态相变等过程。在成形之后，大部分物理现象消失，但仍然存在热量的传递过程。总体而言，在LPBF工艺中呈现的物理和化学现象是多尺度、高度动态、非平衡并相互耦合，共同影响着最终打印件的尺寸、外观、结构和性能。

2.1 铺粉过程的物理与化学现象

激光粉末床熔融打印零件之前的关键是在基板上铺粉形成粉末床。一般而言，均匀、致密的粉末床有助于获得致密度更高、表面质量更好的打印件。图2所示为铺粉过程典型缺陷。铺粉过程粉末形态、粒径、粉末流动性、铺粉速度和刮刀类型等参数均对铺展后的粉末床质量产生影响，从而直接或间接地影响最终成形件的质量。在激光对粉末的熔

化过程中，均匀性好且致密度高的粉末床具有较好的吸收率，有助于减少成形件中的孔隙，降低表面粗糙度值，提高零件的力学性能。铺粉过程的物理与化学现象主要包括以下两个方面。

(1) 粉末之间的碰撞与黏结 粉末颗粒在铺粉过程中会相互碰撞，这种碰撞可以是弹性的，也可以是非弹性的，一方面，会导致颗粒间的位置重新排列，或者局部空洞等铺粉缺陷。另一方面，粉末颗粒之间可能会发生黏结，这可能是由于粉末表面之间的分子间力（如范德华力）或者在某些高温过程中发生的化学反应。

(2) 粉末与刮刀之间的挤压 刮刀在铺粉过程中对粉末施加压力和推力，使粉末铺展至基板上方，并被压实和平整。这种挤压作用，一方面，可以导致粉末颗粒间的接触面积增加，从而提高粉末床的密度和均匀性。另一方面，在相互作用过程，粉末颗粒可能会因机械力的作用而发生局部的塑性变形，这可能影响粉末的微观结构和后续的熔化特性。

2.2 打印过程的物理与化学现象

粉末床完成铺展后，激光开始扫描粉末。在激光扫描成形过程中，金属粉末与激光的相互作用是一个复杂的动态非平衡过程，集传热、熔化、相

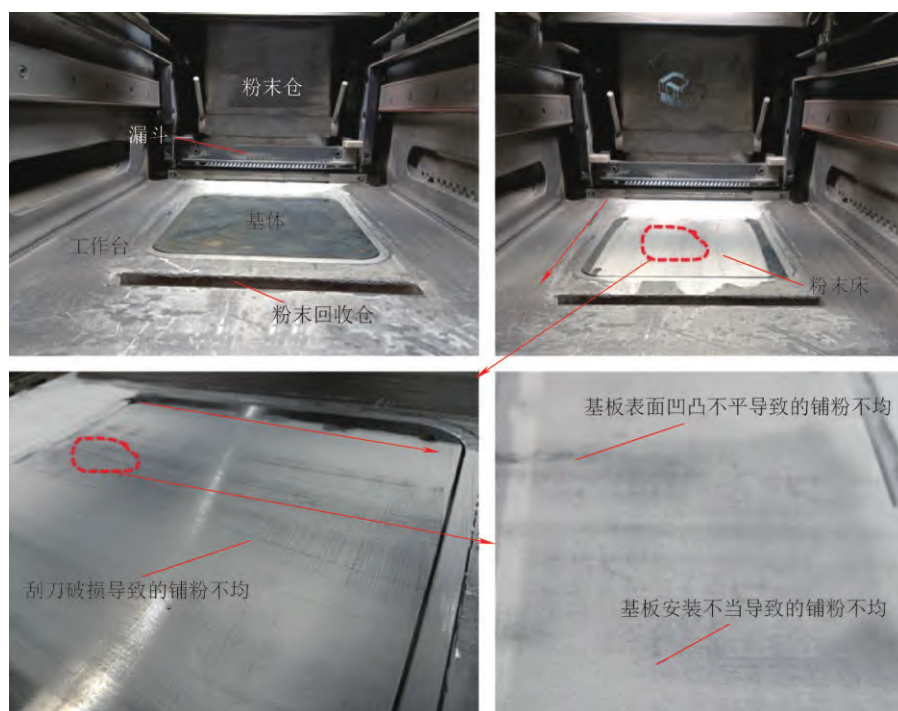


图2 铺粉过程典型缺陷^[8]

变、蒸发和传质于一体^[9, 10]。图3所示为LPBF成形过程中激光-粉末的多种物理和化学现象。

打印过程的物理与化学现象主要包括以下几点。

(1) 激光行为 在打印过程中,一方面,由于光能转化为热能,粉末颗粒通过激光束提供的热量完全熔化而形成熔池,如图4所示。

另一方面,由于熔池局部受热不均匀导致金属蒸汽从熔池中高速喷发,形成内部涡流,导致粉末

床中的离散颗粒形成复杂的流-固耦合运动,形成打印过程的飞溅。

(2) 风场行为 惰性气体保护风场对于去除加工过程中产生的黑烟和防止金属高温氧化至关重要,实现了风场与粉末、风场与黑灰杂质的相互作用。风场分布会对成形试件的力学性能和可重复性产生显著影响。若在成形仓基板面上的惰性气体风场分布不均匀,则会导致成形仓内黑烟残留问题。图5所示为某型号打印机风场运动轨迹^[12]。

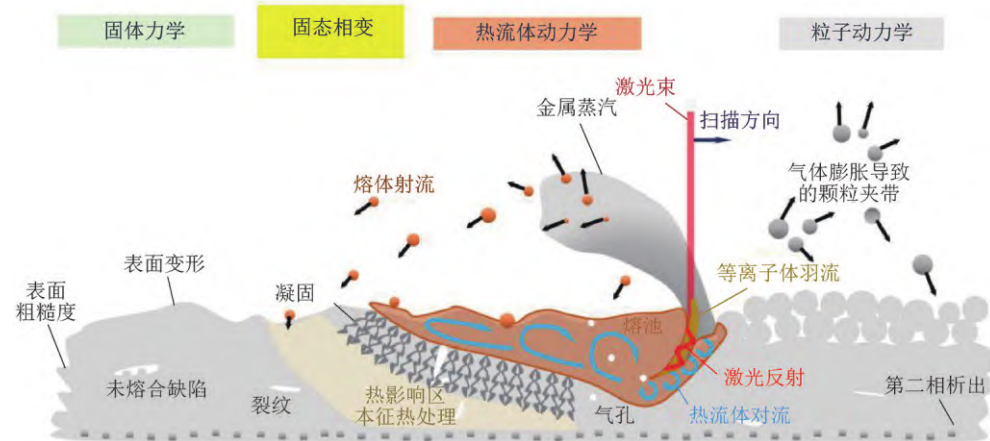


图3 激光粉末床熔融成形激光-粉末的多种物理和化学现象^[9]

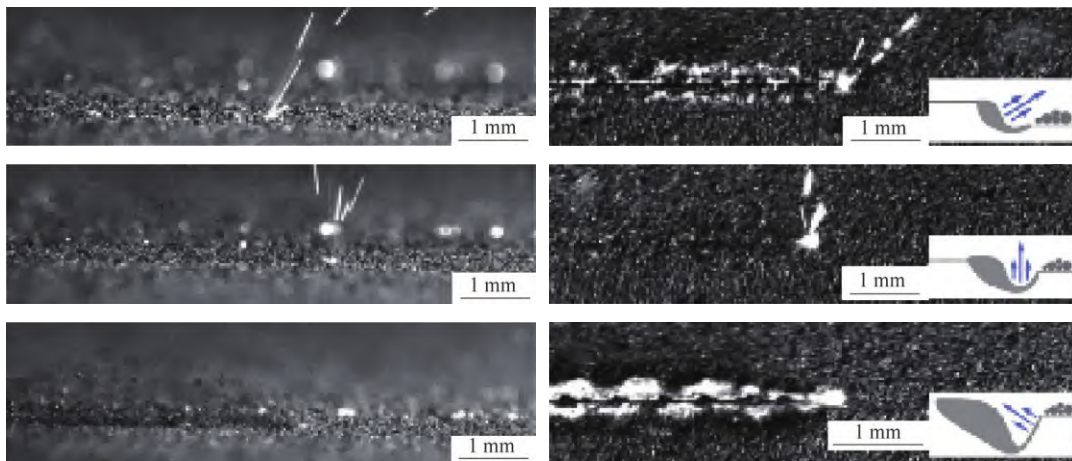


图4 激光扫描过程形成的飞溅^[11]

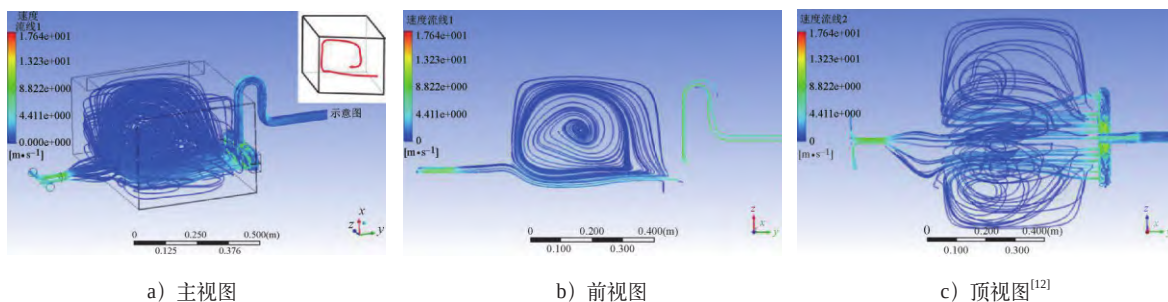


图5 风场流速及流线

(3) 传热传质行为 在传热过程中, 激光与粉末、粉末与粉末、粉末与风场、粉末与已凝固打印层, 存在热辐射、热对流及热传导等热交换形式, 进而发生熔化、凝固和相变行为。其中, 熔池动力

学行为是主要呈现形式, 熔池的形成过程为建立非平衡冶金现象, 如细化微观结构、固溶体硬化和亚稳相的生成, 这可以改善生产零件的力学性能。图6所示为LPBF成形过程的凝固行为。

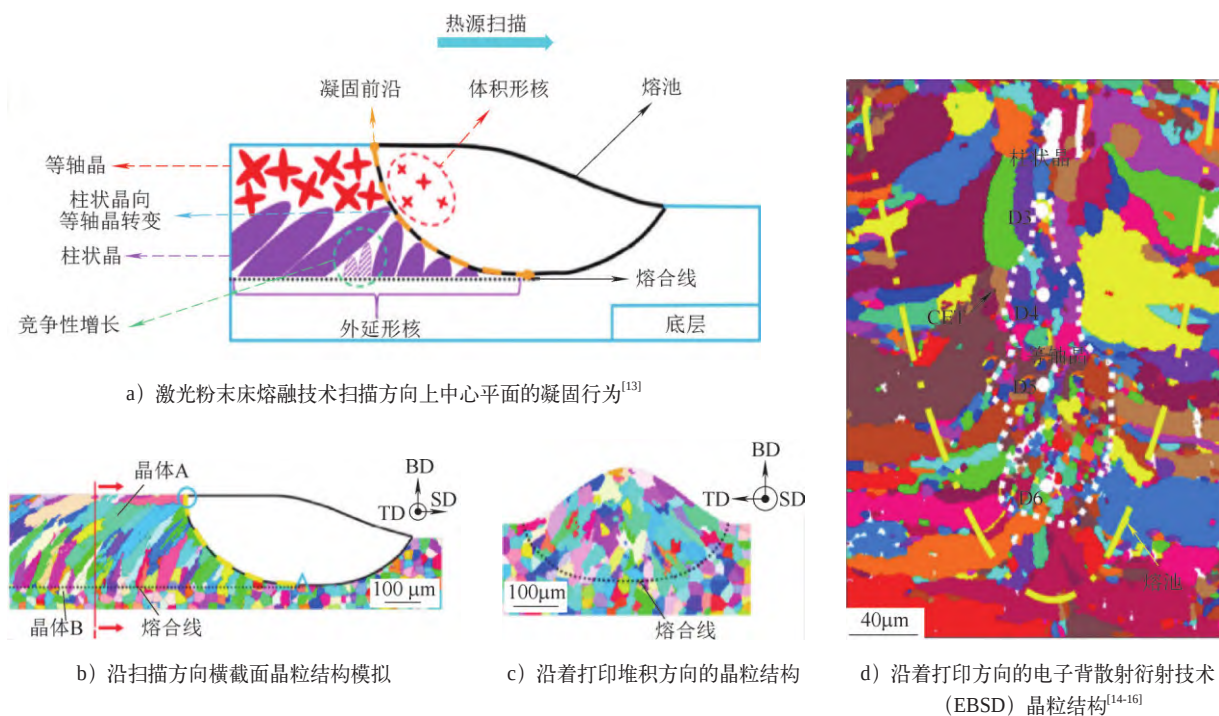


图6 LPBF成形过程的凝固行为

2.3 后处理过程的物理与化学现象

在LPBF技术中, 打印零件从基板上通过线切割或人工操作取出零件后, 一般需要进行去支撑、喷砂及清洗等后处理, 以去除表面或内部残留的粉末, 从而提高零件表面、尺寸和性能。后处理过程的主要物理与化学现象主要包括以下几点。

(1) 去支撑行为 对于通过LPBF技术生产的金属零件, 去除支撑结构是一个耗时费力的过程, 并需要改善表面状况^[17]。对于LPBF工艺制备的打印件, 一般采用剪钳将零件多余的支撑 (见图7) 人工去除。



图7 带支撑的航空支架

(2) 热处理行为 一方面, 由于LPBF过程中的快速加热和冷却, 因此部件会产生较大的残余应力, 热处理是消除LPBF技术成形零件残余应力和调节力学性能的一种必要方法^[18]。

另一方面, 热处理可以均质化、固溶处理、等静压热处理等^[19-21], 使微观结构均匀, 并使增材工艺典型的细长树枝晶转变为等轴晶粒, 有助于提高材料的力学性能。

3 LPBF数值仿真技术研究进展

LPBF成形过程是一个集成了从纳米、微米到宏观尺度下的复杂多物理与化学现象的加工过程, 成形过程温度、熔池尺寸等无法通过传统试验手段进行分析与测量。因此, 数值模拟是研究成形区域缺陷的重要手段, 能更好地与试验相结合来解释激光选区熔化成形过程中的复杂物理现象。

基于金属增材制造工艺的创新设计与工艺仿真降低了材料、研发试错等成本。GU等^[3]2021年在Science杂志发表了题为“材料-结构-性能-一体

化增材制造”的文章，指出最终目标为将“适宜材料打印至适宜位置”和“独特结构打印成独特功能”。图8所示为材料-结构-性能-一体化增材制造跨尺度的协调与实现方法。

1) 在纳米或微米尺度上^[22-26]，实现材料的微观结构均质化、多种打印材料之间的界面兼容性，以及打印材料对特定结构和功能的适用性。

2) 在介观尺度上^[27, 28]，控制整个激光AM金属粉末的工艺增强，包括粉末的激光吸收行为、粉末熔化与凝固行为、熔池的形成机制，以及熔池的凝

固行为。

3) 从宏观结构和性能控制方法^[29, 30]，包括协同3D打印机的多工序打印、多工艺符合加工、结构优化和多结构测试等。

3.1 力学性能宏观数值仿真技术

宏观的LPBF工艺仿真主要用于预测和消除制造过程中的变形和缺陷，提高制造效率和产品质量，获得打印过程中应力场、应变场、温度场（见图9）等关键参数^[31-37]，进而分析成形零件中的残余应力，预测打印过程裂纹、变形、断裂等微观缺陷和

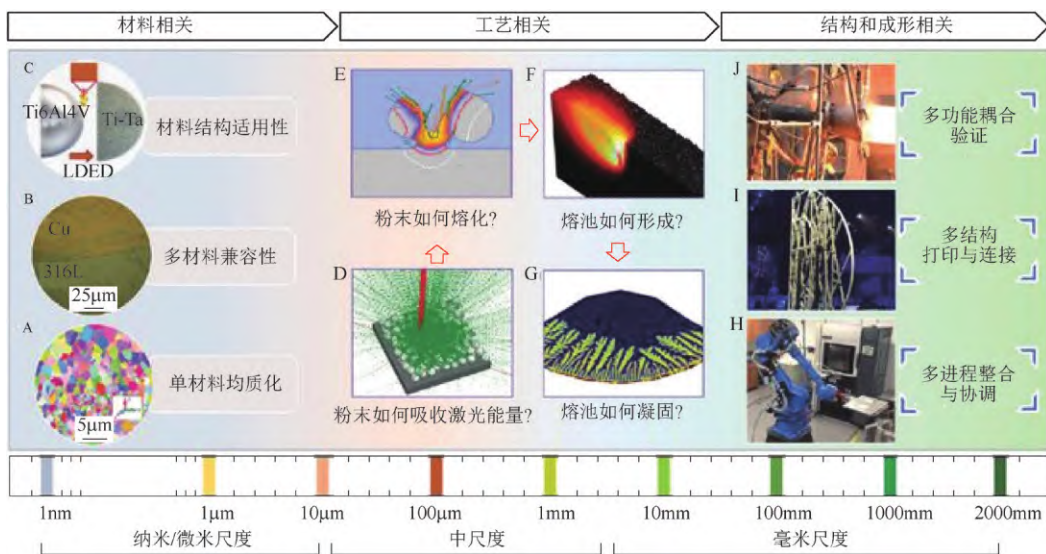


图8 材料-结构-性能-一体化增材制造跨尺度的协调与实现方法^[3]

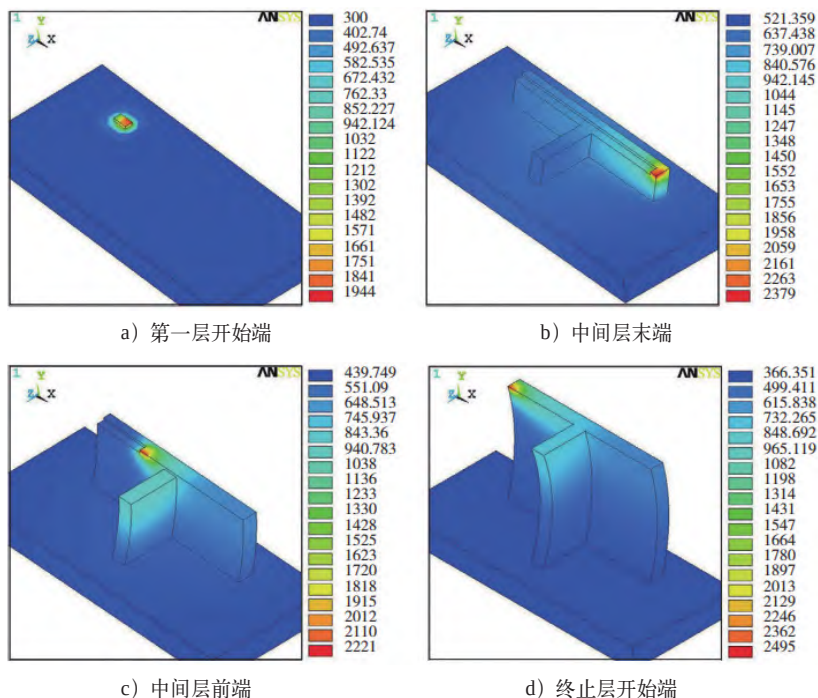


图9 钛合金缘条的LPBF工艺宏观有限元模拟-温度场演化过程^[2]

宏观失效。

LPBF工艺的宏观仿真技术多采用传统热-力耦合的有限元算法,使用有限元法(Finite Element Method, FEM)并且将离散金属粉末等效成均匀连续块体,建立单线、单层或多层的有限元模型,以成形工艺参数为变量,可以获得 LPBF过程中的温度梯度、冷却速度、熔池形貌及热循环曲线等,LPBF的宏观有限元仿真技术已经在众多成熟的商业软件中应用,如通用有限元软件 ANSYS、ABAQUS、COMSOL multi-physics等,以及专用增材制造仿真软件,包括Altair 公司的Inspire Print 3D、AUTODESK 公司的NETFABB、MSC公司的Simufact Additive,以及ANSYS 公司的Additive 软件等。

姚化山、龚丞、张肖晓等^[32-34]利用ANSYS的参数化设计语言加载了LPBF工艺的激光高斯热源,模拟了LPBF成形过程的三维瞬态温度场的分布,研究了激光功率与扫描速度对LPBF成形NiTi单层多道热行为的影响。王美婷、门正兴等^[38, 39]采用Simufact-additive 软件对AlSi10Mg合金的SLM成形过程进行数值模拟,研究了扫描速度、扫描间距、基板温度与激光功率对AlSi10Mg合金变形行为及制件与基板结合面残余应力的影响。

3.2 铺粉离散元仿真技术

在LPBF工艺中,粉末床上金属粉末的粒度分布、粉末扩散层厚度及粉末扩散速度等会影响粉末床的特性,进而影响最终的成形件质量。然而,试验很难获得颗粒积累、粉末扩散和颗粒碰撞运动等信息,离散元法(DEM)为探索增材制造粉末扩散过程中颗粒的动态行为提供了可靠的数值模拟^[30-49],并在介观尺度上预测粉末行为,揭示了粉扩散质量的影响机制。

常用的部分LPBF仿真软件见表1。

南文光、HAERI等^[41, 46-49]比较了刮板和辊粉扩散装置,并用DEM对颗粒速度、轨迹和粉末剥离质量进行了研究。图10所示为基于金属粉末中离散颗粒的真实物理和力学参数,采用离散元方法对刮刀铺粉过程进行了模拟和分析。结果显示,粉层中颗粒总体积与铺粉间隙 δ 呈线性关系,且临界铺粉间隙为基于颗粒数量的D90。廖福义等^[43]采用离散元研究了粉末扩散厚度对粉末流动、缺陷形成和粉末质量的影响。CHEN等^[44]建立了考虑粒子间接触力和内聚力的数值模型来预测宏观变化。

PAN等^[8]采用离散元法和粉末扩散试验,研究了粉末扩散过程中粉末之间的相互作用和运动,包括粉末堵塞、回弹、飞溅、涡流和空粉区等,如图

表1 常用的部分LPBF仿真软件

序号	软件名称	主要功能	备注
1	ANSYS/ABAQUS/COMSOL multi-physics	通过APDL、UDF等编程方式,可实现包括微观晶粒尺寸预测、介观熔池、热处理、宏观工艺仿真和力学性能预测	适用于各类工艺,但是操作繁琐,需要编程实现
2	ANSYS Additive	CAD建模;拓扑优化等轻量化技术;工艺仿真(粉末床熔融技术、金属烧结、定向能量沉积);晶粒形态预测;熔池与孔隙率预测;结构和热分析等	包含了增材制造设计(DfAM)、工艺仿真、材料分析功能
3	Flow-3D AM	工艺仿真:分析熔池形态和锁孔,可映射并预测缺陷设计空间和熔池几何形状 铺粉工艺模拟:通过分析粉末扩散和压实参数,可优化滚筒移动速度与方向等	仅适用于工艺仿真,无法进行结构优化设计、点阵设计、建模等操作
4	Altair EDEM	仅适用于粉末铺粉工艺仿真,为介观模拟提供粉末床模型	与Fluent等软件开展风场联合仿真
5	Altair Inspire	实体建模、曲面建模;拓扑优化等轻量化设计;工艺仿真(粉末床熔融技术;黏结剂喷射)	包含了增材制造设计(DfAM)、工艺仿真、静力学分析、多体运动、渲染等功能
6	Simufact Additive	工艺仿真:分析不同的激光工艺参数对宏观性能的影响 热处理:包括热处理和热等静压模拟轻量化设计	适用于工艺仿真,无法进行结构优化设计、点阵设计、建模等操作
7	nTop	工艺仿真:分析不同的激光工艺参数对宏观性能的影响	增材制造设计(DfAM)功能强大,特别是点阵设计

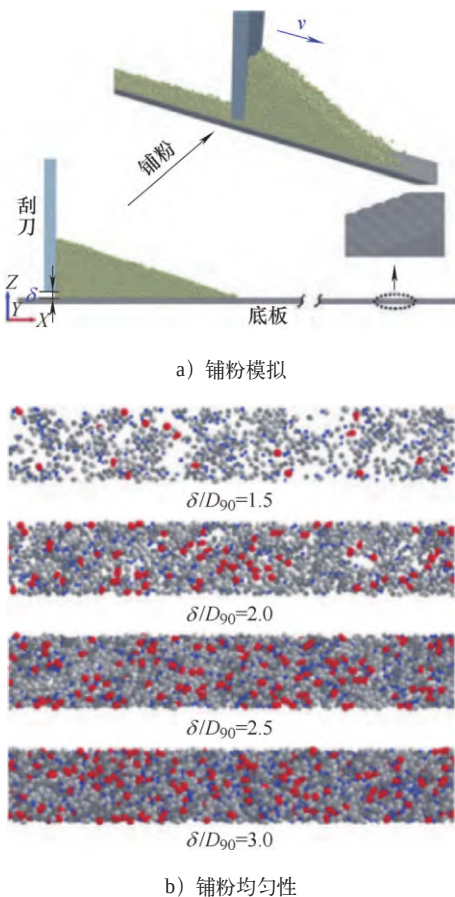


图10 刮刀铺粉过程模拟及铺粉均匀性研究^[42]

11所示。此外，探索设计了三夹板刀片单向往复新工艺，改变铺粉的“推粉”向“持粉”的运动状态。通过将叶片与工作平台的距离增加0~20μm，使基板上表面与工作平台的距离增加50μm，粉末飞溅、空粉等缺陷减少。采用三夹板叶片结构单向往复工艺，实现了铝合金粉末均匀粉末床铺展。

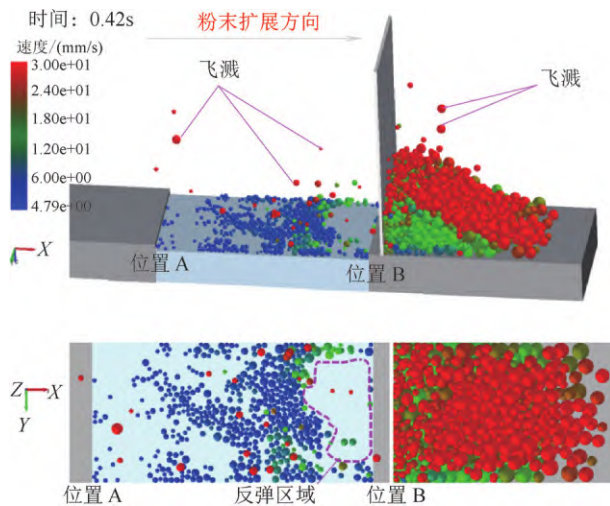


图11 粉末的反弹和飞溅^[9]

3.3 风场数值仿真技术

在LPBF成形过程中，由于激光束和金属粉末的特性，粉末不可避免地会因局部过烧而产生黑渣烟尘（见图12），若不及时消除，则烟雾颗粒会进入到清洁粉末中，导致下一层打印形成内部夹杂，降低成形件的密度和力学性能，并污染成形仓库。此外，黑渣烟尘还会使激光束在空气中扩散，影响激光束的特性（能量、光斑直径或强度分布）。

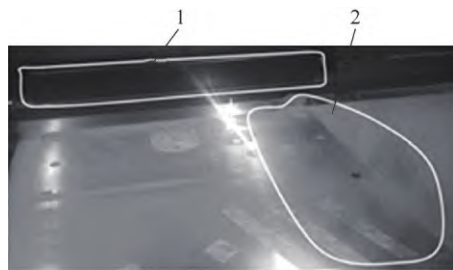


图12 成形缸粉床面黑烟残留情况

1—出风口 2—基板上的黑灰

目前，LPBF打印机成形仓内需要设置风场除灰系统，以便将黑渣等杂质从基板上刮走，进入集渣箱。因此，如何更高效、快捷地利用风场清理黑渣等杂质，对LPBF技术的应用具有重要意义。大多数LPBF设备配备简单的吸入过滤器。目前，关于LPBF风场轨迹的研究、设计优化，以及对除灰系统的影响的报道较少。风场的运动轨迹无法通过试验获得，涡旋型风场运动轨迹将导致成形仓内烟尘等杂质的混入，严重影响了LPBF的成形质量。理想的抛物线形风场轨迹如图13所示。由于气压差烟尘从基板上浮至成形仓上方，避免烟尘混入下一层的粉末床，并进一步通过抛物线形运动轨迹，使烟尘降落并直接进入烟尘收集箱，完成烟尘的收集工作。

针对激光选区熔化技术成形零件时产生的烟尘、黑渣和熔液飞溅等工艺副产物对产品质量的影响，设计一套均匀稳定的风场结构是解决此问题的有效手段。梁平华等^[50]利用ASYS ICEM CFD、ANSYS FLUENT 等软件对保护气供气流道截面与成形仓黑烟产生区域的截面进行仿真模拟，并根据仿真结果对保护气供气流道进行结构优化。结果表明，成形仓粉床面的黑烟残留问题是由激光扫描区域风场分布不均匀造成的。李忠利等^[51]利用Fluent软件对激光选区熔化设备保护气体流道进行有限元仿真，通过优化风场流道结构、设计整流器等

方法,对设备风场流动进行结构优化改进。GAO等^[12]设计并优化了LPBF风场循环系统结构,利用ANSYS FLUENT 得到理想的抛物线形风场循环轨

道,优化后的抛物线循环轨迹降低了飘落在样品表面的烟尘,减少了由杂质引起的裂纹缺陷,优化后的抛物线形风场循环轨迹如图14所示。

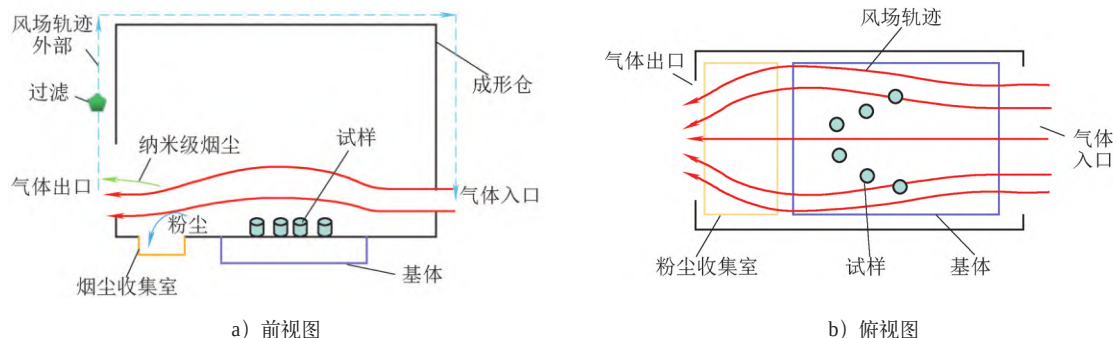


图13 理想的风场运动轨道

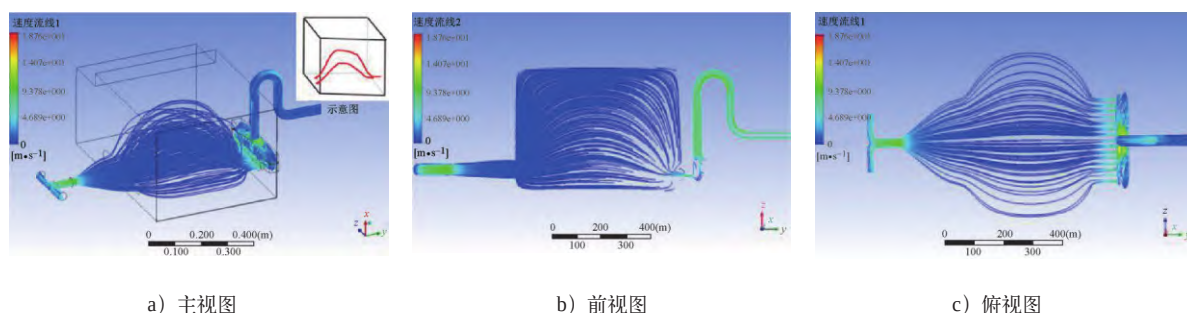


图14 优化后的风场运动流线^[12]

3.4 熔池介观数值仿真技术

为了获得成形精度高、内部无缺陷,以及凝固微观组织控制优良的构件,需要对金属增材制造的热过程和熔池内部传输以及凝固微观组织进行深入研究^[52, 53]。然而,由于LPBF过程中的瞬态特性,温度流、速度流等信息难以通过试验捕获,因此数值模拟称为研究LPBF熔池演化规律的一种重要而有效的方法。KÖRNER等^[54]自主开发了模拟程序来考虑熔化-凝固过程中的传热问题,通过求解耦合传热和流动的物理方程,模拟了TC4合金LPBF过程中缺陷的形成和机理。顾冬冬等^[55]研究了铝基合金(AlSi10Mg)、镍基高温合金(Inconel 718),以及陶瓷颗粒增强铝基和镍基复合材料的LPBF多尺度建模和协调控制,在微观尺度上研究了氮化铝(AlN)颗粒在LPBF制备铝基纳米复合材料中的迁移和分布机制,以及LPBF制备WC/Inconel 718复合材料中增强体与基体之间梯度界面的原位形成。KHAIRALLAH等^[56]利用计算流体力学研究了反冲压力和马兰戈尼对流对316L不锈钢激光粉末床熔融的显著影响,揭示了孔隙、飞溅(见图15)和剥蚀

带缺陷的形成原因。

PAN等^[57, 58]采用数值模拟和试验的方法,对LPBF制备AlCu5MnCdVA合金的熔池结构、温度流动和速度场进行了研究。结果显示,熔池结构呈现不同形式(深凹结构、双凹结构、平面结构、突出结构、理想平面结构(见图16),熔池大小约为 $132\mu\text{m} \times 107\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$,熔池内的金属流动主要受激光冲击力、金属液体重力等因素的驱动。

3.5 组织结构微观数值仿真技术

当前,研究人员普遍使用的计算方法是基于枝晶间和晶粒级两种方法来模拟材料的微观结构。与枝晶级模型不同^[59-65],基于晶粒级结构的微观组织模型仅考虑了晶粒形貌的增长,而未考虑枝晶形貌,因此计算量小、计算效率高。目前,在增材制造凝固组织数值仿真技术中,使用最多的是元胞自动机(Cellular Automata, CA)法、相场(Phase Field, PF)法和蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)法。PF模型具有计算精度高,以及能够模拟树枝状组织、粗化等形态特征的优点,但由于计算量大,因此只能对有限的树枝状组织进行数值模拟,且只

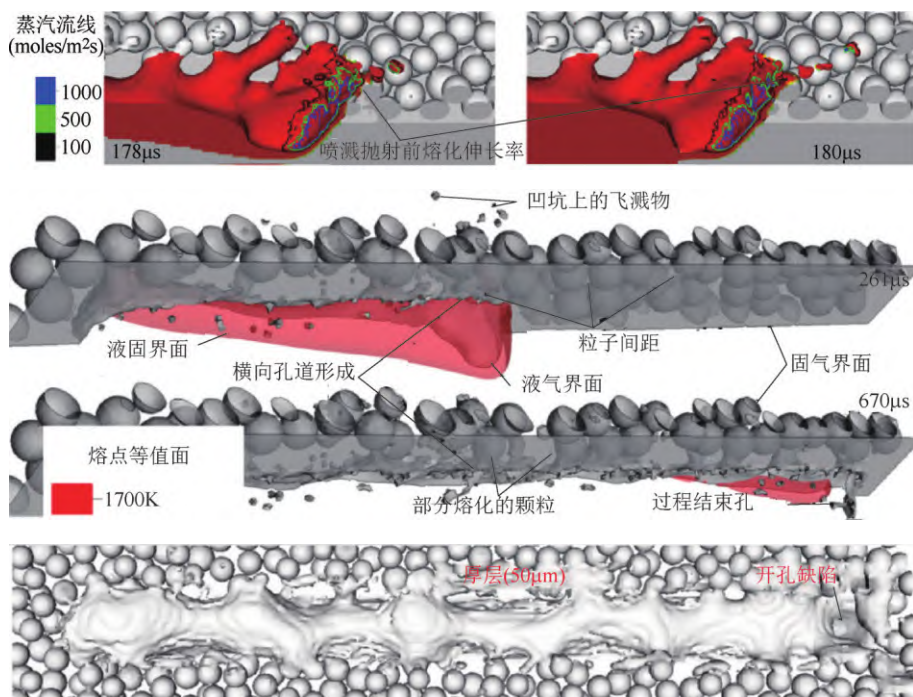


图15 LPBF工艺飞溅和气孔的形成过程^[56]

能对二维问题进行数值模拟，无法对树枝状生长的物理机理进行深入研究。相对于PF法，CA法可以在保持较高计算效率的同时更好地模拟晶粒的形貌增长，可以在介观尺度上对熔池内部区域晶粒的外延生长、成核与长大等过程进行数值模拟（见图17），进一步获得整体熔池的微观组织形态以及晶粒晶向信息。与CA法又不同的是，MC法在模拟晶粒生长行为，特别是再结晶行为方面简单高效，但只能提供大量的“试错”后的结果。

YAN等^[66]利用整合的计算流体动力学模型、元胞自动机模型和自治聚类分析（Self-consistent Clustering Analysis, SCA）方法研究了Ti-6Al-4V合金增材制造过程中工艺-结构-性能之间的关系。耦合的热CFD和CA模型可以用来分析粉末床的熔融和凝固过程，以及凝固过程中B晶粒结构演变（见图18）。

3.6 结构优化数值仿真技术

通常来说，结构优化可分为尺寸优化、形状优化和拓扑优化（见图19）3类问题。

1) 尺寸优化：优化变量为杆件的横截面尺寸，或板壳的厚度分布。

2) 形状优化：优化变量为杆系结构的节点坐标或表示连续体结构外形的变量。

3) 拓扑优化：优化变量为杆系结构的节点布局、节点间的连接关系，或连续体结构的开孔数量和位置等拓扑信息。与尺寸优化和形状优化相比，结构拓扑优化可根据载荷在零件内部的传递路径，对零件的材料进行再分布，获得最优的材料布局。

与其他增材技术类似，LPBF技术克服了传统加工方法带来的零件设计限制，颠覆了传统产品面向制造工艺的设计方法，提高了产品的“设计自由度”，使零件设计不再局限于面向制造、面向装配等基于减材制造的传统设计方法。拓扑优化（Topology Optimization, TO）是结构优化方法中的一种，通过拓扑优化算法可在给定的设计区域实现材料最优分布。拓扑优化与激光粉末床熔融完美组合，提供了面向性能、结构和制造工艺的增材制造设计方案^[67-69]。

将LPBF“自由”的先进制造方式与拓扑优化等结构优化设计相结合，极大地扩展了金属增材制造的应用场景，在产品轻量化、一体化和功能化设计与制造方面应用前景巨大。拓扑优化的概念已提出100多年了，拓扑优化得到的结构通常比较复杂，无法通过传统加工工艺制造，直到近20年来才得到迅速发展，主要是得益于增材制造特别是LPBF先进制造工艺，拓扑优化获得的复杂轻量化零件结构可

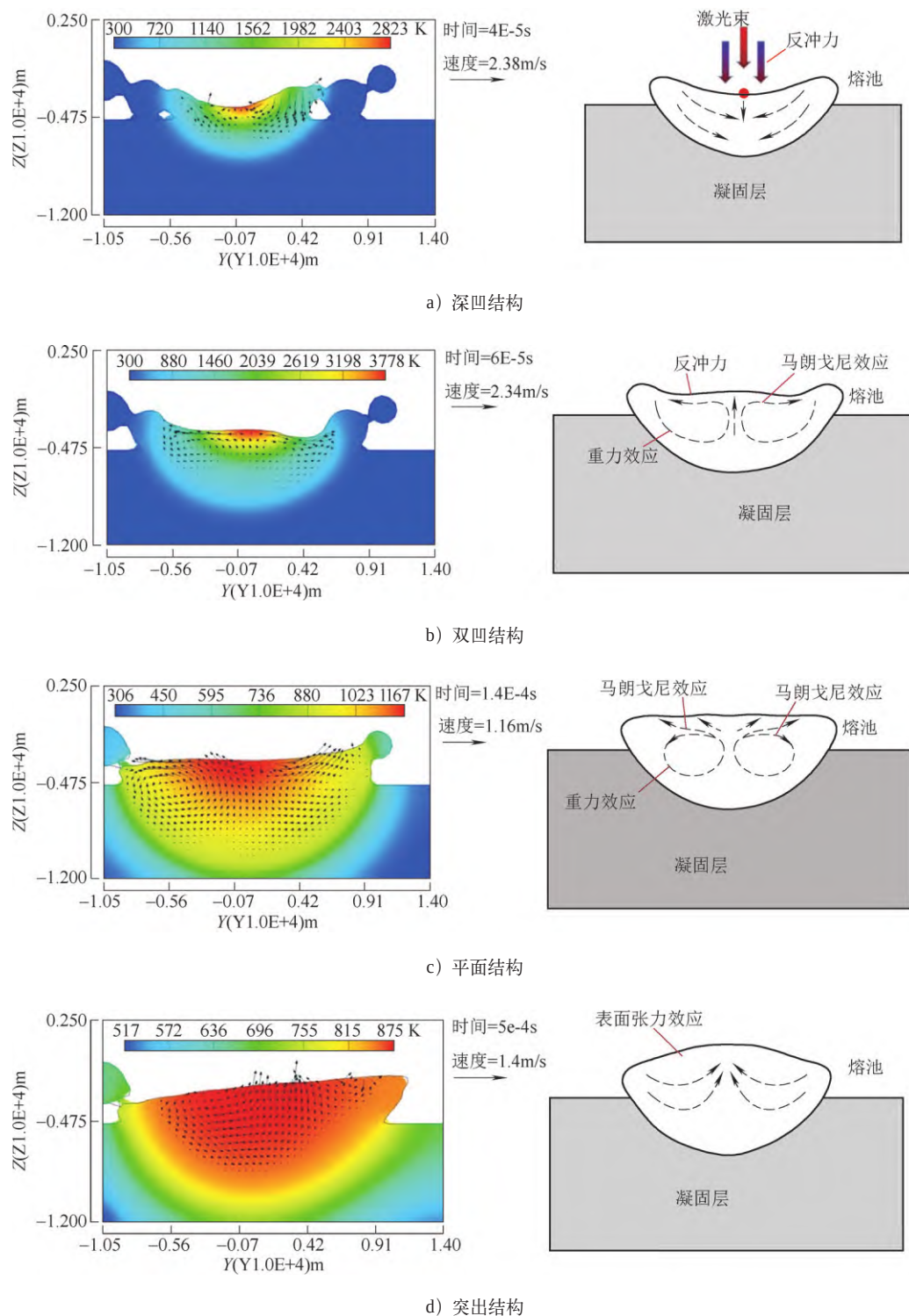


图16 LPBF成形不同阶段的熔池二维截面^[57]

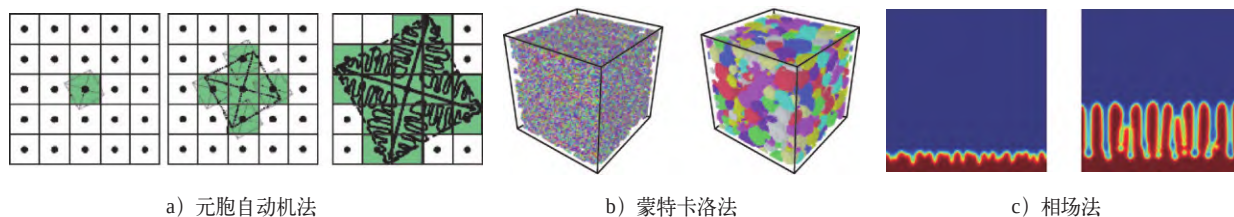
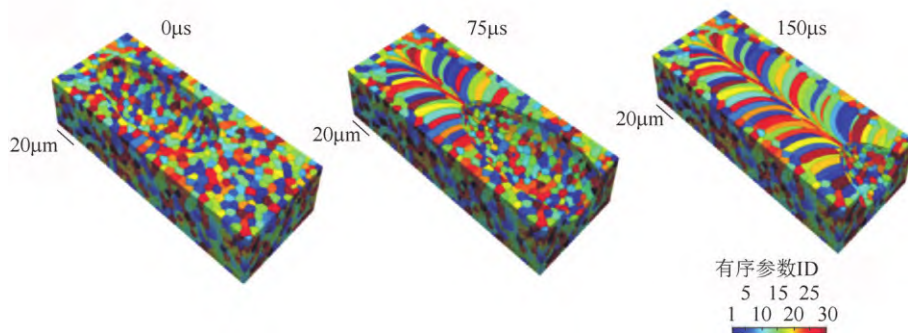
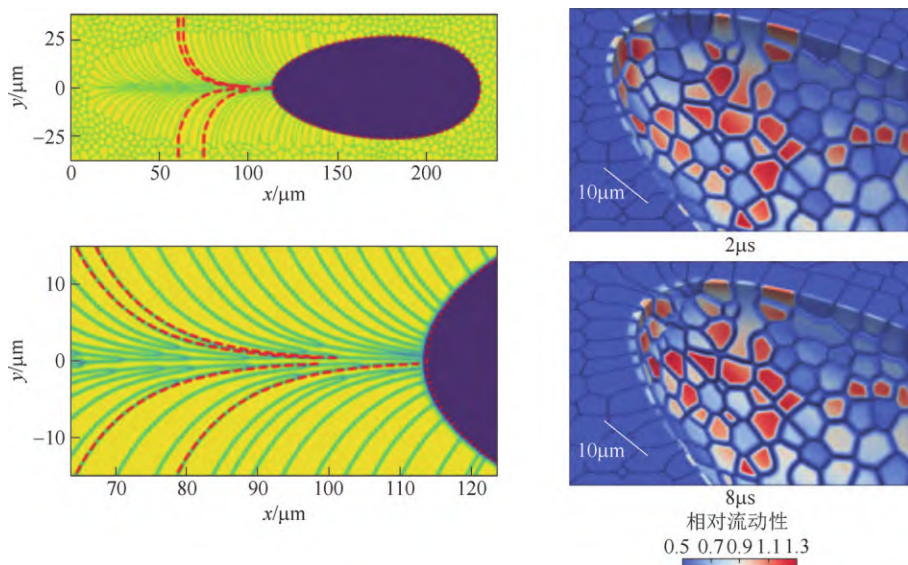


图17 晶粒生长示意^[64, 65]



a) 不同时间段的熔池晶粒演变



b) 典型位置熔池晶粒及局部放大图

图18 相场模拟的316L不锈钢金属增材制造过程中晶粒形貌与熔池表面动力学参数的演变^[66]

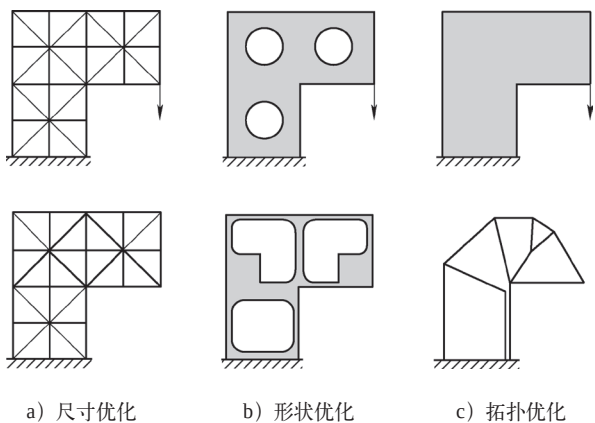


图19 结构优化三类问题

以制造并用于机械、航空航天、海洋工程及船舶制造等领域。王瑞显等^[70]针对小卫星薄壁式铸钛一体化星敏支架减重需求,采用拓扑优化方法设计了一种面向LPBF制造的一体化星敏支架(见图20),利用

LPBF制备了 Ti6Al4V样件,拓扑优化的一体化星敏支架重量相比薄壁式结构铸钛一体化星敏支架减重达 80%。北京航天东方红卫星有限公司^[71]通过LPBF和拓扑结构优化设计的卫星斜装动量轮支架(见图21),产品强度和精度满足卫星产品研制的各项标准,并且减重效果明显,成功实现减重50%,节省了卫星发射成本。王迪等^[67]借助选区激光熔化和拓扑优化重新设计与制造了金属打印机门把手功能零件,并经过尺寸精度、力学性能及质量等方面的测试,获得减重52.5%轻量化效果。潘露等^[72]利用拓扑优化与LPBF相结合,实现仿人形机器人减重63.8%,小腿由分体装配式结构重新设计为一体化结构(见图22),零件由11个减少为1个,避免了由于装配导致的精度误差。

与合金的粉末床熔融工艺仿真相比,颗粒增强

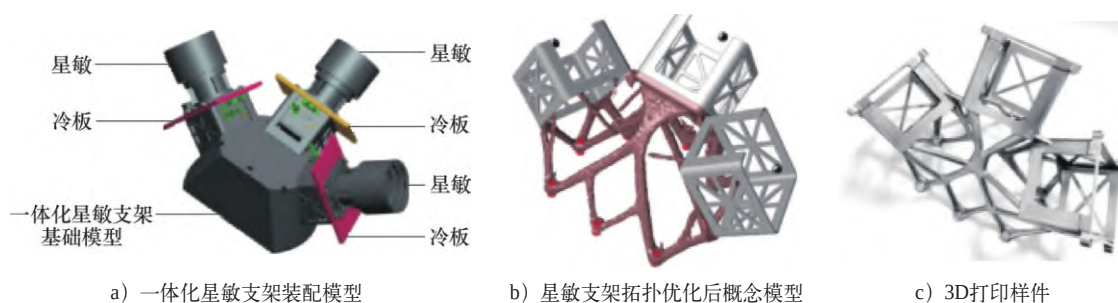


图20 小卫星一体化星敏支架拓扑优化^[70]

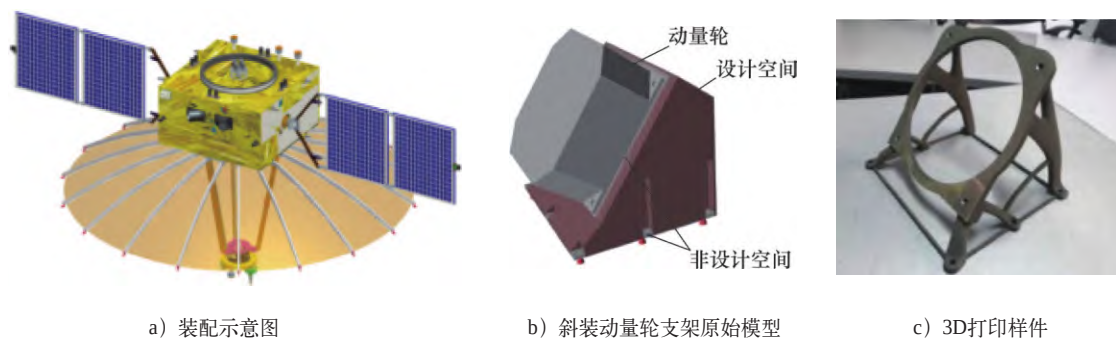


图21 嫦娥四号中继卫星斜装动量轮支架优化设计^[71]



图22 仿人形机器人小腿试验打印装配^[72]

复合材料和异质材料是粉末床熔融工艺仿真的难点之一，主要是由于纳米级颗粒/异质与金属粉末粒径或性能相差较大，特别是纳米级颗粒划分网格时有限元数量达百万级以上，导致仿真计算量过大。为了解决这一问题，目前国内外研究的思路主要包含以下3个。

1) 提高计算机能力：通过提高服务器计算能力来满足仿真需求，特别是百万级网格的模拟需求。

2) 简化材料模型：仿真模型中剔除纳米级颗粒模型，而将纳米级颗粒的作用简化为金属粉末的性能，如提高金属粉末的激光粉末吸收率、调整金属粉末的导热系数等。

3) 优化网格划分：单独开展纳米级颗粒的网格划分和金属粉末的网格划分，在此基础上，将两种网格导入到仿真软件。

SHI、葛庆等^[73, 74]通过直接将TiC纳米级与TC4金属粉末划分网格，开展复合材料的粉末床工艺仿真，获得了成形过程熔池结构、温度场等流场动力学行为，钛基复材选区激光熔化过程物理模型与几何模型如图23所示。

刘长根^[75]利用ABAQUS软件构建有限元模型，将陶瓷颗粒粒径设定为 $5\sim 8\mu\text{m}$ ，设置最小单元格尺寸为 $2\mu\text{m}$ ，网格数量在80万~100万个，建立了具有

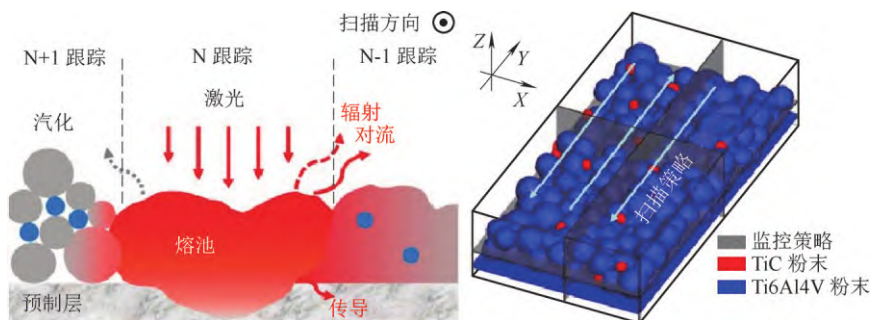


图23 钛基复材选区激光熔化过程物理模型与几何模型示意^[74]

温度/位移耦合特性的三维多层仿真模型,对粉末床熔融工艺成形过程中激光功率、扫描速率和扫描间

距对热行为、熔池结构形成和层间黏结效果进行了模拟分析,如图24所示。

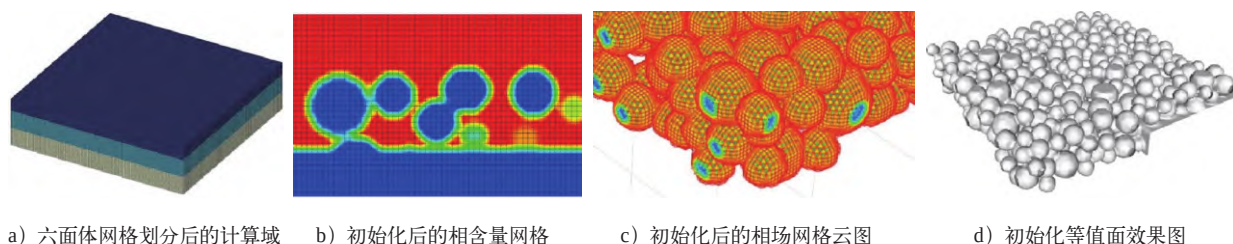


图24 网格划分及初始化效果^[75]

4 结束语

目前,LPBF技术已成为学术和工业领域的热点之一。本文总结了LPBF成形过程涉及的宏观、介观、微观等多尺度下的物理和化学现象,综述了LPBF工艺过程中铺粉行为、风场行为、熔池行为及结构优化等关键步骤的多尺寸数值模拟仿真技术,包括宏观尺度下的温度场、应力场、应变场与结构优化技术;介观尺度下的粉末碰撞与堆积、熔池动力学行为;微观尺度下的凝固现象。与传统试验手段分析与测量相比,数值模拟技术节约了时间和成本,有助于多角度、多维度认识LPBF成形过程及机理。

然而,应用于LPBF工艺的从粉末特性、激光工艺参数、零件特征、力学性能、微观组织、熔池到结构优化设计的数值仿真链,必然需要多物理场耦合与多条件数据传递的需求,而且影响LPBF成形质量因素既多又相互交叉,导致数字模拟建模和边界条件的高度复杂性,数值模拟过程不可避免地需要简化与优化,从而导致试验与数值模拟结果存在差距。

LPBF数值模拟技术的未来发展趋势将集中在提高模拟精度与速度、简化数据传输流程、在线试验测量数据反馈,以及人工智能与机器学习技术进行更高效的数据处理和预测。

1) 高精度、高计算速度的高保真多物理场计算模型。通过全面的材料性能参数、全面的多物理场模型和高速的计算能力,模拟粉末床熔融工艺多尺度的物理与化学现象,包括晶粒结构、流场动力学和力学性能。

2) 实时监测与模拟数据反馈。通过模拟与X射线等检测系统对接,捕捉在线检测数据作为实时调

整模拟参数的依据,实现模拟仿真技术的高精度预测。

3) 人工智能与机器学习技术。AI技术的发展为仿真技术提供了全新的思路,通过AI与机器学习模型,训练历史数据和试验结果,预测打印工艺参数、晶粒尺寸和成形性能等,以获得理想的成形质量和性能。

参考文献:

- [1] 卢秉恒. 增材制造技术—现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31 (1): 19-23.
- [2] 魏雷, 林鑫, 王猛, 等. 金属激光增材制造过程数值模拟[J]. 航空制造技术, 2017 (13): 16-25.
- [3] GU D D, SHI X Y, POPRAW E R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372: 1487.
- [4] 李子澈, 吉辰, 黄焕杰, 等. 镁合金激光粉末床熔融技术研究进展[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (8): 1-16.
- [5] 刘鹏伟. 基于物理模型和数据驱动的金属增材制造数值模拟方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [6] VI L V, HONG C T, YI J L, et al. Numerical and experimental analysis of effects of processing conditions on melt pool stability of CuCr1Zr parts produced by laser powder bed fusion (L-PBF) [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181: 111801.
- [7] JIA Y B, SAADLAOUI Y, FEULVARCH E, et al. An efficient local moving thermal-fluid framework for accelerating heat and mass transfer simulation during welding and additive manufacturing processes[J]. Comput Methods Appl. Mech. Eng., 2024, 419: 116673.
- [8] PAN L, ZHANG C L, LIU T, et al. Powder

- movement rules of laser powder bed fusion additive manufacturing aluminum alloy based on discrete element method[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2024, 16 (7) .
- [9] PANWISAWAS C, TANG Y T, REED R C. Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys[J]. *Nat Commun*, 2020, 11 (1) : 2327.
- [10] 张璨. 特种不锈钢激光粉末床熔融过程热-力场数值模拟及求解效率优化[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [11] 刘琦, 杨光, 殷俊, 等. SLM过程中飞溅形成机制和控制方法综述[J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53 (7) : 2094-2108.
- [12] GAO Y, ZHANG C L, LIU J L, et al. Optimizing the performance of wind field circulating track in laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 124 (11-12) : 3963-3972.
- [13] WANG P, ECKERT J, PRASHANTH K G, et al. A review of particulate-reinforced aluminum matrix composites fabricated by selective laser melting[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30 (8) : 2001-2034.
- [14] CHEN S J, GUILLEMOT G, GANDIN CHARLES A. Three-dimensional cellular automaton-finite element modeling of solidification grain structures for arc-welding processes [J]. *Acta Materialia*, 2016, 115: 448-467.
- [15] LIU S W, ZHU H H, PENG G Y, et al. Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis [J]. *Materials & Design*, 2018, 142: 319-328.
- [16] LI X X, TAN W D. Numerical investigation of effects of nucleation mechanisms on grain structure in metal additive manufacturing [J]. *Computational Materials Science*, 2018, 153: 159-169.
- [17] DIMOPOULOS A, SALIMI M, GAN T H, et al. Support structures optimization for high-quality metal additive manufacturing with laser powder bed fusion: A numerical simulation study[J]. *Materials*, 2023, 16: 7164.
- [18] 赵雨薇. TC4激光选区熔化多尺度数值模拟[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [19] 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 (2) : 179-192.
- [20] 王同鹤. 选区激光熔化成型件后处理问题研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [21] 陈嘉伟, 熊飞宇, 黄辰阳, 等. 金属增材制造数值模拟[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50 (9) : 104-128.
- [22] 郭鑫鑫, 陈哲涵. 激光增材制造过程数值仿真技术综述[J]. *航空学报*, 2021, 42 (10) : 234-246.
- [23] MARTIN J, YAHATA B, HUNDLEY J, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. *Nature*, 2017, 549: 365-369.
- [24] LIU Z H, ZHANG D Q, SING S L, et al. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: Metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy[J]. *Mater. Charact.*, 2014, 94: 116-125.
- [25] MITRA I, BOSE S, DERNELL W S, et al. 3D Printing in alloy design to improve biocompatibility in metallic implants[J]. *Mater. Today*, 2021, 45: 20-34.
- [26] GU D D, YANG Y, XI L, et al. Laser absorption behavior of randomly packed powder-bed during selective laser melting of SiC and TiB₂ reinforced Al matrix composites[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2019, 119: 105600.
- [27] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zone[J]. *Acta Mater.*, 2016, 108: 36-45.
- [28] BAYAT M, THANKI A, MOHANTY S, et al. Keyhole-induced porosities in Laser-based Powder Bed Fusion (L-PBF) of Ti6Al4V: High-fidelity modelling and experimental validation[J]. *Addit. Manuf.*, 2019, 30: 100835.
- [29] MacDONALD E, WICKER R. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality[J]. *Science*, 2016, 353: 2093.

- [30] 程汉, 陈万超, 张恒华. 微合金钢中Mo对 α -Fe/NbC界面影响的第一性原理研究[J]. 上海金属, 2020, 42 (5): 94-100.
- [31] 秦飞, 周敏, 王武荣, 等. 大旋比V形带轮旋压三维成形仿真与验证[J]. 上海金属, 2021, 43 (3): 112-118.
- [32] 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 (6): 456-460.
- [33] 龚丞, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 激光增材制造316L不锈钢熔覆层残余应力的数值模拟研究[J]. 应用激光, 2018, 38 (3): 402-408.
- [34] 张肖晓, 陈旋, 李晓成, 等. 大截面SDP1塑料模具钢多向锻造过程中微观组织演变的数值研究[J]. 上海金属, 2020, 42 (2): 57-62.
- [35] 张灵晓, 乔常鑫, 郑永涛, 等. 基于ABAQUS模拟淬火对6061-T6铝合金铸件残余应力的影响[J]. 上海金属, 2023, 45 (5): 75-80, 87.
- [36] 曾杰, 杨任一, 王万林, 等. 薄带连铸亚快速凝固行为热模拟研究的现状[J]. 上海金属, 2023, 45 (6): 1-11.
- [37] 王晓晨, 罗志俊, 徐士新. 斯太尔摩线风道结构影响风冷的数值模拟[J]. 上海金属, 2019, 41 (6): 90-96, 102.
- [38] 王美婷, 郑黎, 何亮, 等. SLM成形AlSi10Mg合金的变形行为与残余应力数值模拟[J]. 应用激光, 2022, 42 (10): 67-75.
- [39] 门正兴, 张学睿, 包有宇, 等. 基于Simufact Additive的激光选区熔化成形过程有限元分析[J]. 锻造与冲压, 2021 (21): 28-30.
- [40] DIA B, NAME A, SZ A, et al. Influence of particle size distribution and morphology on the properties of the powder feedstock as well as of AlSi10Mg parts produced by laser powder bed fusion (LPBF) [J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101286.
- [41] 南文光, 顾益青. 基于离散元方法的金属粉末铺粉动力学研究[J]. 过程工程学报, 2020, 20 (11): 1313-1320.
- [42] 南文光, 顾益青, MOJTABA G. 增材制造中金属粉末卡塞动力学离散元模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43 (5): 1260-1266.
- [43] 廖福义. 基于选区激光熔化技术的粉末床铺展过程研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [44] CHEN H, WEI Q, WEN S, et al. Flow behavior of powder particles in layering process of selective laser melting: Numerical modeling and experimental verification based on discrete element method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2017, 123: 146-159.
- [45] 孙远远, 江五贵, 徐高贵, 等. 选区激光熔化成形区粗糙表面对铺粉质量的影响: 离散元模拟[J]. 力学学报, 2021, 53 (12): 3217-3227.
- [46] NAN W, GHADIRI M. Numerical simulation of powder flow during spreading in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2018, 342: 801-807.
- [47] NAN W, PASHA M, GHADIRI M. Numerical simulation of particle flow and segregation during roller spreading process in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2020, 364: 811-821.
- [48] NAN W, MEHRDAD P, TINA B, et al. Jamming during particle spreading in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2018, 338: 253-262.
- [49] HAERI S. Optimization of blade type spreaders for powder bed preparation in additive manufacturing using DEM simulations[J]. Powder Technology, 2017, 321: 94-104.
- [50] 梁平华, 唐倩, 余志强, 等. 激光选区熔化的风场仿真与流道结构优化[J]. 中国机械工程, 2019, 30 (7): 858-863.
- [51] 李忠利, 徐化文, 杨茗潇, 等. 基于Fluent的激光选区熔化设备风场流道仿真与结构优化[J]. 大型铸锻件, 2024 (2): 23-28.
- [52] TANG D, HU Y, YANG L, et al. Melt pool simulation technology of laser powder bed fusion: A review[J]. JOM, 2024, 76 (3): 1238-1256.
- [53] JIA Y, NACEUR H, SAADLAOUI Y, et al. A comprehensive comparison of modeling strategies and simulation techniques applied in powder-based metallic additive manufacturing processes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 110: 1-29.
- [54] KÖRNER C, ATTAR E, HEINL P. Mesoscopic

- simulation of selective beam melting processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (6) : 978-987.
- [55] 顾冬冬, 马成龙, 夏木建, 等. 激光增材制造的热力学和动力学多尺度理解[J]. Engineering, 2017, 3 (5) : 220-239.
- [56] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones[J]. Acta Mater., 2016, 108: 36-45.
- [57] PAN L, ZHANG C L, LIU T, et al. Molten pool structure and temperature flow behavior of green-laser powder bed fusion pure copper[J]. Materials Research Express, 2022, 9: 016504.
- [58] PAN L, ZHANG C L, WANG L, et al. Molten pool structure, temperature and velocity flow in selective laser melting AlCu5MnCdVA alloy[J]. Materials Research Express, 2020, 7: 086516.
- [59] 张波, 陈伟, 吴广新. 新型铝合金的组织与耐磨性能研究[J]. 上海金属, 2020, 42 (1) : 50-54.
- [60] 王亚超, 赵定国, 陈洋, 等. 微熔池凝固组织的数值模拟研究[J]. 上海金属, 2022, 44 (3) : 83-89.
- [61] ZINOVIEV A, ZINOVIEVA O, PLOSHIKHIN V, et al. Evolution of grain structure during laser additive manufacturing: Simulation by a cellular automata method[J]. Materials & Design, 2016, 106: 321-329.
- [62] 彭霞林, 肖红, 李伟红, 等. 基于相场法模拟对流作用下Ni-Cu合金枝晶形貌[J]. 上海金属, 2021, 43 (4) : 69-76.
- [63] 王永彪, 谢新源, 刘新田, 等. 相场法模拟强迫流场对Mg-Gd系合金中海藻晶及其晶型转变的影响[J]. 上海金属, 2024, 46 (5) : 81-88, 94.
- [64] ZHANG Y, XIAOX H, ZHANG J. Kinetic monte carlo simulation of sintering behavior of additively manufactured stainless steel powder particles using reconstructed micro-structures from synchrotron X-ray micro tomography[J]. Results in Physics, 2019, 13: 102336.
- [65] ZHANG J, WU L M, ZHANG Y, et al. Phase field simulation of dendrite microstructure in additively manufactured titanium alloy[J]. Metal Powder Report, 2019, 74 (1) : 20-24.
- [66] YAN W, LIAN Y, YU C, et al. An integrated process-structure-property modeling framework for additive manufacturing[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 339: 184-204.
- [67] 王迪, 陈晓敏, 杨永强, 等. 基于激光粉末床熔融的功能零件结构设计优化及制造关键技术研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54 (17) : 165-172.
- [68] WANG J C, ZHU R, LIU Y J, et al. Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single and multi-track melt pools for process optimization[J]. Adv. Powder Mater., 2023 (2) : 100137.
- [69] 刘博宇, 王向明, 杨光, 等. 面向金属增材制造的拓扑优化设计研究进展[J]. 中国激光, 2023, 50 (12) : 196-211.
- [70] 王瑞显, 冯振伟, 马灵犀, 等. 小卫星一体化星敏支架拓扑优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53 (S1) : 67-70.
- [71] 刘质加. 面向增材制造的嫦娥四号中继卫星—斜装动量轮支架优化设计[OL]. 2019. https://www.sohu.com/a/286605393_722157.
- [72] 潘露, 张恒华, 刘桐, 等. 仿人机器人小腿的拓扑优化和激光增材制造[J]. 应用激光, 2023, 43 (2) : 47-55.
- [73] SHI Q M, GU D D, XIA M J, et al. Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites[J]. Opt. Laser Technology, 2016, 84: 9-22.
- [74] 葛庆. 选区激光熔化钛基复材介观热力学行为与工艺优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [75] 刘长根. 选区激光熔化成形 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) 颗粒混杂增强铝基复合材料的数值模拟与组织性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

(收稿日期: 20250107)