引用格式：王瀚，张东升，杨倩，等. 增材制造原位表征：同步辐射超快X射线成像与衍射技术应用[J]. 材料工程，2026，54(1)：13-29.
WANG Han, ZHANG Dongsheng, YANG Qian, et al. *In situ* characterization for additive manufacturing: applications of synchrotron-based ultrafast X-ray imaging and diffraction techniques[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(1): 13-29.

增材制造原位表征：同步辐射超快X射线成像与衍射技术应用

王　瀚[1]，张东升[2]，杨　倩[1]，陈　森[3]，李宇宵[2]，张兵兵[2]，刘　伟[1*]
（1 中国航发北京航空材料研究院 3D打印研究与工程技术中心，北京 100095；2 中国科学院高能物理研究所，北京 100049；3 中国工程物理研究院 流体物理研究所，四川 绵阳 621900）

摘要：同步辐射技术作为揭示增材制造过程中多尺度物理冶金行为的“超级显微镜”，为破解增材制造“黑箱”过程提供了革命性的研究手段。本文系统综述了同步辐射在增材制造原位表征领域的应用进展：在成像方面，高时空分辨超快X射线成像技术实现了增材制造熔池、缺陷及凝固过程动态演化行为的原位观测，揭示了匙孔波动诱导气孔、马兰戈尼(Marangoni)力驱动缺陷消除等关键机理；在衍射方面，超快X射线衍射技术定量解析了增材制造快速凝固过程中的相变动力学与残余应力演变规律。进一步，本文探讨了同步辐射原位表征技术与人工智能、多物理场模拟联用的未来发展方向，并展望了其在增材制造工艺优化、缺陷智能检测及新材料开发中的应用潜力，指出该技术为推动增材制造从经验试错向机理驱动转型提供了理论基础与技术途径。

关键词：增材制造；同步辐射；原位表征；超快X射线成像；超快X射线衍射
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000500　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000500
中图分类号：O434.1；TG14　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)01-0013-17

In situ characterization for additive manufacturing: applications of synchrotron-based ultrafast X-ray imaging and diffraction techniques

WANG Han[1], ZHANG Dongsheng[2], YANG Qian[1], CHEN Sen[3], LI Yuxiao[2], ZHANG Bingbing[2], LIU Wei[1*]
(1 3D Printing Research & Engineering Technology Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Synchrotron radiation technology serves as a “super microscope” for unveiling multi-scale physical metallurgy behaviors during additive manufacturing (AM), providing groundbreaking research tools to decode the “black box” challenges inherent in AM processes. This paper review systematically summarizes recent advances in synchrotron radiation applications for AM: in imaging, ultrafast X-ray imaging with high spatiotemporal resolution enables *in situ* observation of melt pool dynamics, defect formation mechanisms, and solidification behavior, revealing key phenomena such as keyhole fluctuation-induced porosity and Marangoni force-driven defect suppression; in diffraction, ultrafast X-ray diffraction quantitatively resolves phase transformation kinetics and residual stress evolution during rapid solidification. Furthermore, this work explores emerging trends in integrating synchrotron technology with deep learning and multiphysics simulations, while envisioning its potential for AM process optimization, intelligent defect detection, and novel material development. It is pointed out that such technology establishes a theoretical foundation and technical pathway for transitioning AM from empirical trial-and-error to mechanism-driven

methodologies.

Key words: additive manufacturing; synchrotron radiation; *in situ* characterization; ultrafast X-ray imaging; ultrafast X-ray diffraction

增材制造(additive manufacturing, AM)作为21世纪最具变革性的制造技术之一,基于数字模型驱动,通过“离散-堆积”成形原理,彻底深刻革新了传统的制造理念[1]。这种数字化的制造模式不仅突破了传统技术在复杂结构成形方面的技术壁垒,更推动了制造范式从“传统制造”向“数字制造”的跃迁。目前,增材制造技术已在航空航天复杂构件、新能源汽车关键部件、生物医学定制植入体等战略新兴领域展现出显著的优势[2],其突出的“近净成形”特征与快速迭代能力,正在重塑高端制造的产业格局。

增材制造本质上是多物理场耦合下的极端非平衡冶金过程,涉及高能束(激光、电子束、电弧等)-材料(粉末、基材等)的复杂交互作用、微小熔池在超高温度梯度下的快速凝固行为、逐层堆积过程中内部缺陷的形成/组织演化/内应力累积的热力耦合行为[3]。该过程蕴含若干关键基础科学问题:(1)高能束/金属交互作用行为及能量吸收与有效利用机制;(2)内部冶金缺陷形成机制;(3)移动熔池约束凝固行为及晶粒形态演化规律;(4)非稳态瞬时循环固态相变行为及显微组织形成规律;(5)内应力演化规律及变形开裂行为[4-5]。对上述基础科学问题的深入理解,不仅是解决“热应力控制和变形开裂预防”及制件“内部质量和力学性能控制”等长期制约增材制造发展和应用“瓶颈”问题的前提,也是推动该技术走向规模化工程应用的理论基础。

然而,增材制造过程具有典型的跨尺度、快动态、不可逆特征,其在空间上跨越微观(晶体缺陷、显微组织)[6]、介观(马兰戈尼(Marangoni)对流、匙孔波动、飞溅)、宏观(温度梯度、应力变形)[7]等多个层次,时间上则涵盖纳秒至毫秒级的瞬态演化[8]。传统表征技术(如金相、SEM、EBSD等)及常规在线光电检测(如可见光高速成像、热成像等)受限于穿透深度、时空分辨率或探测模式,难以实现对增材制造过程中材料内部瞬态变化的直接原位观测,无法捕获增材制造熔凝过程中显微组织和缺陷等的动态演化信息,致使增材制造过程仍处于“黑箱”状态,其组织性能优化长期依赖经验试错[9]。

为解析该“黑箱”过程,多尺度计算模拟成为关键研究工具。在宏观尺度上,热-力耦合有限元模型用于预测温度场与残余应力分布;在介观尺度上,计算流体动力学模型致力于模拟熔池流动、匙孔行为与飞溅动态;在微观尺度上,相场法与元胞自动机模型则用于揭示枝晶生长、固态相变与晶粒结构演化规律。然而,增材制造涉及高度复杂的多物理场耦合行为(如热-流-固耦合、相变、界面效应等),构建能够完整复现实际过程的高保真数值模型极具挑战,其预测准确性严重依赖于本构关系与关键参数(如高温物性、界面特性、相变动力学数据)的可靠性,而传统实验手段难以提供模型校验所必需的瞬态、定量、原位数据[10]。

同步辐射(synchrotron radiation)光源的X射线凭借宽频谱、高亮度、高准直与脉冲结构等独特优势,成为实现材料内部微观结构实时、动态、无损及高分辨表征的“超级显微镜”。结合时间分辨X射线探测技术,可实现增材制造熔凝过程中微观结构演化的高速可视化动态观测,为解析增材制造缺陷形成机制与组织演变行为提供了革命性的研究平台[11]。该技术并非简单的观测工具,而是直接针对并解决计算模拟中的核心瓶颈:利用超快X射线成像技术,可原位捕捉介观尺度下匙孔波动、气孔迁移、飞溅轨迹及裂纹扩展等动态过程,为CFD模型提供无可替代的验证数据;利用超快X射线衍射技术,则可定量解析微观尺度下的相变序列、冷却速率、晶格应变及织构演变,为相场模型和宏观应力分析模型提供关键的动力学与物性参数。综上所述,同步辐射原位表征与多尺度计算模拟共同构成了一个“实验-模拟”研究闭环。表征为模拟提供精准的输入与验证,推动模型从“经验拟合”走向“机理驱动”;而经过验证的模型则能有效预测工艺结果并揭示物理细节。二者的深度融合,有望共同推动增材制造从经验试错向机理驱动的数字化、智能化制造转变。

本文系统综述了同步辐射技术在增材制造研究中的前沿应用与最新进展。重点阐述了同步辐射原位成像在解析熔池形貌、飞溅行为和缺陷演化等方面的革命性作用,以及同步辐射原位衍射在揭示相变过程、内应力演化和织构演变机制中的关键贡献,如图1所示。首先,概述了国内外主要同步辐射光源及其增材制造原位表征平台。其次,在成像方面,着重介绍了同步辐射超快X射线技术在熔池动态边界追踪、凝固缺陷监测和裂纹扩展可视化等方面的突破;在衍射方面,评述了高能X射线衍射在量化相变动力学、重构

三维残余应力场和揭示织构演化机制中的不可替代作用。进一步，展望了第四代高能同步辐射光源所引领的技术变革，包括飞秒级瞬态过程捕捉、多物理场耦合原位实验平台以及基于人工智能的海量数据解析等前沿方向。最后，探讨了同步辐射技术在推动增材制造跨尺度集成表征与智能预测模型构建方面的未来发展趋势。

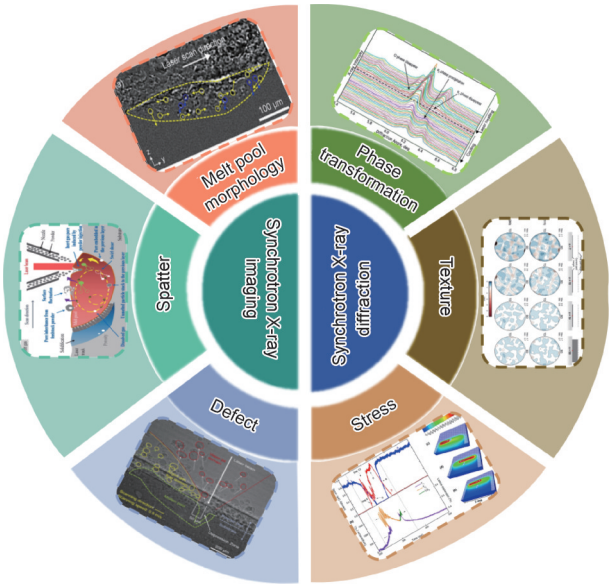


图1　同步辐射原位表征技术在增材制造研究中的应用

Fig.1　Application of synchrotron radiation *in situ* characterization techniques in additive manufacturing research

1　基于同步辐射光源的增材制造原位表征平台

利用同步辐射X射线对金属增材制造过程进行原位表征，需满足以下两个核心条件：(1)高能、高通量的光源与线站。高能X射线可确保对金属材料具有足够的穿透能力(X射线能量、材料密度与穿透深度之间的关系遵循朗伯-比尔指数衰减定律)；高通量光子流则为增材制造中非平衡凝固的瞬态过程提供了必需的时空分辨能力。(2)增材制造原位实验系统。需研制适用于同步辐射X射线原位诊断的增材制造装置，并发展超快时间分辨的X射线探测方法，从而实现对增材制造瞬态过程的动态解析与定量表征。

1.1　同步辐射光源

同步辐射作为继1895年伦琴发现X射线、1912年劳厄实现晶体衍射之后最重要的光源革命，是相对论性带电粒子(通常为电子或正电子)在强磁场约束下做曲线运动时，沿运动轨迹切线方向发射的宽谱电磁辐射(覆盖紫外到100 keV的X射线)。相较于常规旋转阳极X光机，其X射线亮度提升达6～10个数量级(最高达10^{20} ph/s/mm^2/mrad^2)，且具备宽能谱连续可调(0.1～100 keV)、高准直性(发散角＜0.1 mrad)和脉冲时间结构(脉宽ps级)等独特优势[12]。

同步辐射X射线为增材制造过程的原位探测带来了两大核心能力的跃升：(1)超高亮度使时间分辨率突破至飞秒量级(10^{-15} s)，可解析增材制造中熔池匙孔振荡等超快动力学过程；(2)硬X射线波段(＞20 keV)的强穿透性(钛合金穿透深度＞5 mm)结合相位衬度成像技术(灵敏度$\Delta\rho/\rho\approx10^{-7}$)，可实现对高密度材料内部微观结构演变的原位观测(如熔池固液界面波动±8 μm的精准捕捉)。

目前，国际上主流的同步辐射装置有：美国的先进光子源(advanced photon source，APS)、法国的欧洲同步辐射光源(european synchrotron radiation facility，ESRF)、英国的钻石光源(diamond light source，DLS)、德国的PETRA Ⅲ(deutsches elektronen synchrotron，DESY)、瑞士的瑞士光源(swiss light source，SLS)和日本的SPring 8。这些装置平均每年产出超过1 PB级的高价值科学数据，推动人类对物质微观世界的认知进入亚原子尺度(空间分辨率达0.1 nm)与阿秒时域(时间分辨率达10^{-18} s)[13-15]。

我国同步辐射光源体系涵盖多代装置，包括北京同步辐射装置(BSRF，第一代)、合肥光源(HLS-Ⅱ，第二代)、上海光源(SSRF，第三代)以及建设中的高能同步辐射光源(HEPS，第四代)；其中BSRF依托高能物理对撞机兼用运行并持续升级，HLS-Ⅱ专用于真空紫外和软X射线能区的研究，SSRF作为性能优异的中能第三代光源提供最广泛使用的硬X射线。HEPS则是我国自主研发的第四代光源，坐落于北京怀柔科学城，其电子束能量达6 GeV，采用低发射度(＜60 pm·rad)的七弯铁消色散结构实现接近衍射极限的发射度，并产生亮度较第三代光源高千倍、相干性更强的X射线(最高300 keV)，可支撑纳米分辨率三维成像、高温高压深地环境模拟、材料实时演化等前沿研究，首期建设14条光束线站，为材料科学、生命科学、能源环境等领域提供革命性研究工具。

1.2　增材制造原位表征平台

增材制造原位表征装置主要由同步辐射原位增材制造装备和超快时间分辨X射线探测系统构成。该装备需根据具体研究目标进行定制化开发，以精确复现增材制造工艺过程。其设计面临多项特殊难点：腔体不仅需具备保护气氛下的良好密封性，还须合理布

置X射线、可见光与红外等多种探测窗口，以支持多模态联合观测；控制系统方面，由于增材制造属于快速不可逆过程，为准确捕捉关键现象，必须实现X射线探测系统与制造设备间的高精度时序同步；同时，受同步辐射线站实验空间与辐射安全规范的限制，整套设备需高度小型化；此外，样品夹持也需特殊设计——为避免遮挡X射线路径并保证稳定性，通常将样品制成薄壁结构并采用专用夹持装置，例如粉末床熔融工艺中广泛采用的玻璃碳夹持薄壁样品的“三明治”结构。目前，安装于各大光源的该类装置主要包括激光粉末床熔融（LPBF）[16]、电子束选区熔化（EBM）[17]及直接能量沉积（DED）[18]等类型，如图2所示。

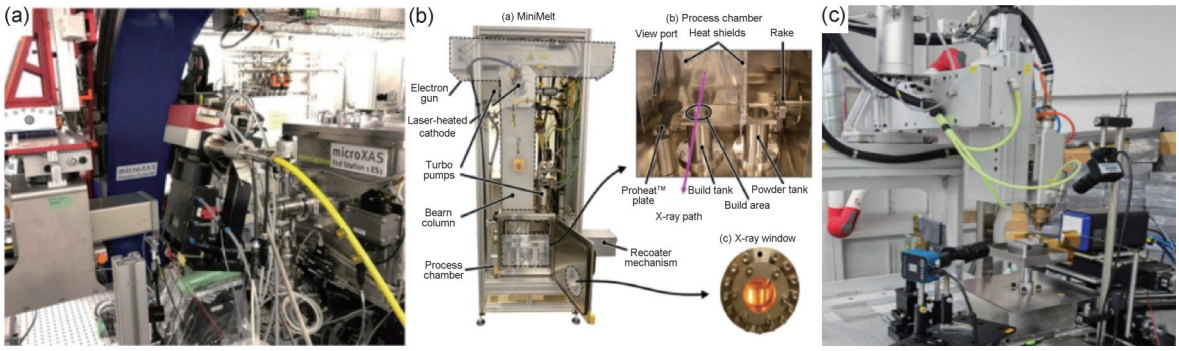


图2 基于同步辐射光源的增材制造原位表征平台

（a）SLS的激光粉末床熔融（LPBF）装置[16]；（b）DESY的电子束选区熔化（EBM）装置[17]；（c）BSRF的直接能量沉积（DED）装置[18]

Fig.2 Synchrotron-based *in situ* characterization platforms for additive manufacturing

(a)laser powder bed fusion (LPBF) system at SLS[16]; (b)electron beam melting (EBM) system at DESY[17]; (c)direct energy deposition (DED) system at BSRF[18]

目前，增材制造同步辐射原位表征方法主要基于同步辐射超快X射线成像和衍射技术提供高空间和时间分辨率的实时监测，深入揭示增材制造过程中的微观机制。同步辐射超快X射线成像包括吸收对比和相位对比两种模式，前者用于显示吸收差异，后者则提升低对比度区域的分辨率，适用于复杂三维结构。超快X射线原位衍射技术包括透射模式和反射模式，透射模式用于分析材料晶体结构的动态演变，反射模式则捕捉瞬态过程中的微结构变化，适合实时表征快速变化的过程。增材制造同步辐射原位表征技术广泛应用于熔池形貌、凝固过程、缺陷演化及相变行为等关键科学问题研究，具体应用见表1。

表1 增材制造同步辐射原位表征技术及其应用

Table 1 *In situ* synchrotron characterization techniques and their applications in additive manufacturing

Synchrotron radiation technique	Detection mode	Process insights in additive manufacturing
Ultrafast X-ray imaging	Absorption contrast imaging	Micron-scale crack propagation, pore evolution, *etc.*
	Phase contrast imaging	Solid-liquid interface morphology of molten pool, subsurface pore migration, *etc.*
Ultrafast X-ray diffraction	Transmission mode	Dynamic recrystallization, metastable phase transformation, *etc.*
	Reflection mode	Residual stress, texture evolution, *etc.*

同步辐射超快原位成像实验在保证X射线源相干性的前提下，通过调节成像系统与样品的距离，可实现吸收对比成像与相位对比成像两种互补的表征模式。吸收衬度成像基于材料对X射线的吸收能力差异，高原子序数元素因具有更强的X射线反应截面，可在图像中呈现显著的灰度差异。该模式凭借亚微米级空间分辨率及高信噪比特性，可精准捕捉增材制造过程中微米级裂纹扩展、孔隙演化等缺陷行为[19]。相位衬度成像则利用材料对X射线折射率实部差异，将样品内部界面（如固-液、液-气界面）引起的波前相位扰动转化为可观测的强度调制。在熔池动力学研究中，该技术可清晰分辨固液界面形貌、亚表面气泡迁移等传统吸收成像难以观测的瞬态现象。通过多对比度信息融合，可获得材料缺陷从萌生到扩展的全周期演化规律[20-21]。

同步辐射超快原位衍射实验可以分为透射模式和反射模式。透射模式下，探测器置于样品后方记录德拜-谢尔衍射环，可实现晶体结构的原位解析。通过Rietveld精修，可获得1×10^{-4}量级的晶格应变分辨率和0.1°的织构取向精度。该模式特别适用于监测熔凝

过程中以及熔池热影响区的动态再结晶、亚稳态相变等体相演化过程[22]。反射模式采用掠入射(入射角0.5°～5°),通过探测深度与入射角的定量关系,实现对表面/近表面(深度约10 μm)的择优探测。尽管该模式受限于倒易空间采样不完整,但其对表面残余应力(精度±20 MPa)和表层织构演变的高度敏感性,为研究熔池-基板界面反应机制提供了独特的研究手段。此外,结合能散衍射技术(EDXRD),可在毫秒时间尺度上追踪亚稳态相的生成和消熔动力学[23]。

2　增材制造同步辐射成像表征

同步辐射光源具备极高亮度、高时间分辨率以及硬X射线波段的强穿透性,可实现对高密度材料内部微观结构演变的原位成像观测。同步辐射原位成像表征技术已被成功应用于解析熔池动力学行为(包括形貌、熔体流动、粉末行为及外场影响)、飞溅的产生与抑制机制,以及各类缺陷(如匙孔、气孔、裂纹)的动态演化等增材制造核心动力学过程,具体应用情况见表2[23-53]。

表2　同步辐射原位成像表征在增材制造过程解析中的应用

Table 2　Application of synchrotron *in situ* imaging characterization in process analysis of additive manufacturing

Scientific issue	Research object		Dynamical process characterized by synchrotron imaging	Light source	Material system	Ref.
Molten pool dynamics and morphology evolution	Molten pool morphology		Dynamic evolution of melt pool geometry with varying energy input. Transient morphology fluctuation and its correlation with melt pool instability and keyhole oscillation	DLS	Ti6242, CP-Ti, SS316L	[24-25]
				APS	AlSi10Mg, Ti6Al4V	[26-27]
	Molten pool flow	Marangoni effect	Surface-tension-gradient-driven recirculation structures and validation of the thermo-fluid coupling model	APS	AlSi10Mg, Al-6061	[28]
				DLS	Invar 36	[29]
				ESRF	Ti6Al4V	[30]
		Powder feedstock	Effects of powder composition, size distribution, and morphology on melt pool wettability and spreading dynamics	DLS	Steel, Ti6Al4V, Inconel 718	[31-33]
				APS	Al6061	[34]
		External energy field	Influence of ultrasonic or magnetic fields on melt flow and solidification interface behavior	DLS	High γ′ nickel-based superalloys	[35]
				APS	AlSi10Mg	[36]
Spattering behavior and control	Spatter generation mechanism		Powder ejection trajectories induced by metal vapor jet and shielding gas interaction	APS	AlSi10Mg, Ti6Al4V, Inconel 718, 316L	[37-38]
				ESRF	8A61	[39]
	Spatter suppression strategy		Influence of process parameters and atmosphere on spatter mitigation	DLS	SS316L, 13-93 bioglass	[40]
					316L	[41]
				APS	Ti6Al4V	[42]
				SSRL	Ti6Al4V	[43]
Defect formation and mitigation	Keyhole morphology		Quantitative relationship between keyhole depth fluctuation and pore entrapment frequency	APS	7A77, pure Al, Ti6Al4V	[44-47]
				DLS	Inconel 625	[48]
					316L	[23]
	Pore formation and evolution		Tracking the origin of pores (entrapped gas pores, dissolved gas precipitation)	ESRF	Cantor alloy	[49]
				APS	AlSi10Mg, Ti6Al4V	[50]
				DLS	Invar 36	[51]
	Crack initiation and propagation		Micro-crack initiation and propagation induced by thermal stress concentration	DLS	Invar 36	[29]
				APS	NiMoAl alloy	[52]
				DESY	AA6061	[53]

2.1　熔池形貌及流动行为

增材制造熔池是高能束(激光、电子束、电弧等)与物质相互作用的直接产物,作为能量和物质传递的核心载体,熔池的熔体流动行为决定了增材制造过程中的传热传质过程,对冶金缺陷、凝固组织起着关键的作用。深入理解增材制造熔体流动行为对预测显

微组织、实现过程控制并最终优化制件性能至关重要。

Marangoni效应是增材制造熔池中占据主导地位的流动机制之一。研究人员通过同步辐射成像技术结合示踪剂追踪的方法对Marangoni效应进行了深入研究，利用在粉末床两侧分别架设X射线测量装置可实现AlSi10Mg和Al-6061两种铝合金增材制造过程中熔池的流动行为的原位、全场、定量化分析[28]。结果表明，在激光传导熔化模式下，熔体的流动主要受到Marangoni驱动力的作用，熔体从较热区域流向较冷区域流动形成两个闭合回路，如图3(a)所示[28]；在匙孔熔化模式下，热源能量极高，引发剧烈汽化，产生作用于熔池的反冲压力，形成凹陷区即匙孔。与传导模式相比，匙孔模式下的熔池尺寸更大，内部流动结构更为复杂多变，如图3(b)所示[28]。与此同时，借助同步辐射成像技术，也可以研究合金中微量元素对增材制造熔池内部流动行为的影响。例如，利用钨(W)和钽(Ta)颗粒作为示踪剂，原位观测并阐明了硫是通过改变表面张力温度系数主导熔池形态与流动模式(图3(c)，(d)[31])。低硫钢熔池浅而宽，流动呈表面向外、底部向内的环流；高硫钢熔池深而窄，流动方向逆转，呈表面向内、底部向外的环流，且流速显著提高，易引发表面湍流，导致氧化物被卷入熔池并包裹于凝固金属中形成夹杂缺陷。该研究不仅验证了表面张力梯度(Marangoni力)的主导作用，更直接为通过精确控制表面活性元素含量来优化熔池流动、抑制氧化物夹杂、提升工艺质量与可靠性提供了实验依据和调控思路。同样，Zabler等[54]和Leung等[29]分别利用原位微射线照相技术，观测了半固态铝合金中的颗粒/液体运动以及粉末激光增材制造中的缺陷和熔池行为，并证实Marangoni效应在其中扮演关键角色。Chen等[30]还观察到了增材制造过程中的熔池分离现象(图3(e))，即在激光作用下，熔池前端形成孤立熔滴，随后该熔滴通过Marangoni对流和熔体润湿作用与原熔池重新合并。

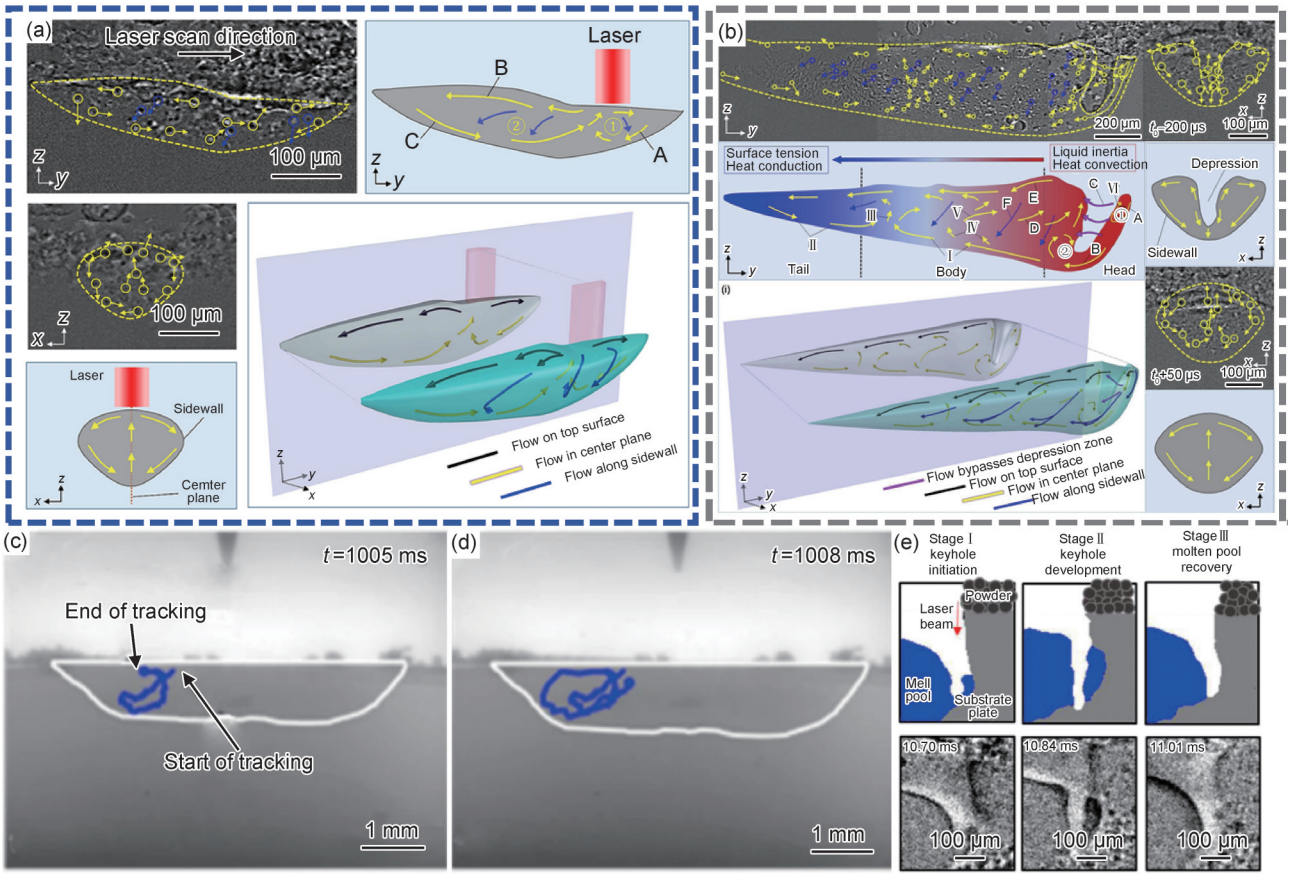


图3 同步辐射原位成像表征增材制造熔池流动行为

(a)传导模式下的熔池流动[28]；(b)匙孔模式下的熔池流动[28]；(c)低硫钢熔池内流动轨迹[31]；(d)高硫钢熔池内流动轨迹[31]；(e)熔池分离现象[30]

Fig.3 *In-situ* imaging characterization of additive manufacturing melt flow by synchrotron radiation

(a)molten pool flow in conduction mode; (b)molten pool flow in spoon mode [28]; (c)flow trajectory in molten pool of low sulfur steel[31]; (d)flow trajectory in molten pool of high sulfur steel[31]; (e)separation of the molten pool[30]

除Marangoni效应，粉末特性、外场辅助及颗粒掺杂对增材制造的熔池流动行为及其最终组织形态也具有显著影响，同步辐射技术在此领域的相关研究中也呈现出独特的优势。英国DLS的原位观察发现，经氧化处理的Ti-6Al-4V合金粉末可增大熔池黏度，进而减缓熔体流动，从而改善熔体的喷溅[32]。此外在DED沉积Ti6242合金粉末时，激光功率会影响粉末被熔池捕捉熔化的效率[24]。并且研究表明，当较冷的粉末进入熔池后[33]，会产生局部淬火效应，增加了熔池流动的复杂性。对比不同激光功率和扫描速度条件，当熔化状态从传导模式转变为过渡模式和匙孔模式时，熔池体积呈现三个数量级的增长，如图4(a)所示，这一显著变化不仅与能量耗散率有关，还受到激光功率和扫描速度在凹陷区形成过程中对能量吸收的影响[26]。特别是同步辐射成像结合原位积分球辐射测量也可分析不同激光功率及扫描速度下的Ti-6Al-4V合金在激光熔化过程中的熔池几何形状、热历史及邻近未熔化区域的固态相变行为(图4(b))[27]。借助同步辐射技术，Qu等[34]揭示了TiC纳米颗粒对Al6061激光熔化能效提高的机理是由于TiC纳米颗粒增加吸收率、降低热导率以及在较低激光功率下促进蒸气抑制和多重反射。此外，通过同步辐射原位观察可以建立熔池特征与宏观形貌的对应关系，例如SS316L合金在DED过程中不同沉积层数的熔体流动变化及工艺参数对最终表面粗糙度具有重要影响[25]。

外场辅助是改变增材制造过程中流体流动行为的重要手段，Fan等[35-36]发现外加磁场诱导的热电磁流体动力学(TEMHD)效应可扰乱DED熔池流动，导致颗粒偏析，并进一步利用示踪标记法阐明了LPBF成形过程中外加磁场的作用。对于塞贝克系数较大的合金，熔池演化中热电磁力克服电磁阻尼占据主导，有效降低了匙孔激荡强度，并且匙孔震荡的激烈程度与扫描方向以及磁场方向有着密切的关系(图4(c)，(d)[36])，为提高构件质量提供了新的思路。增材制造中的纳米粒子掺杂是改善材料性能的重要手段，但是纳米粒子与熔池的交互作用过程仍然不清晰。

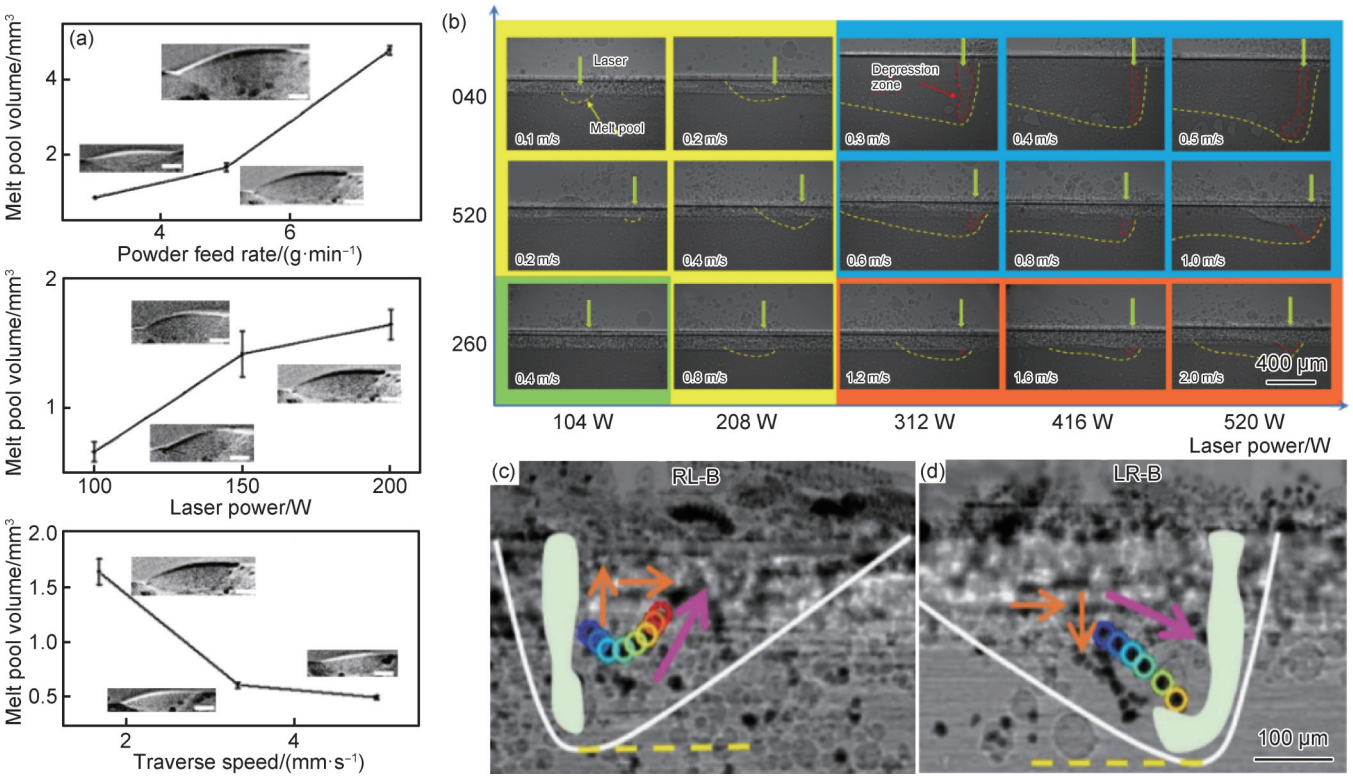


图4　同步辐射原位成像表征工艺参数及外加能场对增材制造熔池的影响

(a)工艺参数对熔池体积的影响[26]；(b)不同激光功率及扫描速度下的熔池形貌[27]；(c)，(d)磁场作用下溶体流动[36]

Fig.4　Synchrotron *in situ* imaging characterization of influence of process parameters and external energy fields on molten pool in additive manufacturing

(a)effect of process parameters on molten pool volume[26]; (b)molten pool morphology under different laser powers and scanning speeds[27]; (c), (d)molten flow under influence of magnetic field[36]

由上可见，增材制造熔池流动行为受Marangoni效应、粉末状态、热输入、外场作用及添加剂等多因素共同影响。同步辐射原位成像技术为揭示这些复杂动态过程提供了直接、有效的表征手段，未来研究还

可拓展至更多材料体系，并有望深入揭示增材制造过程中多种影响因素的耦合机制。

2.2 飞溅行为

增材制造过程中的飞溅现象源于激光-粉末-熔体之间的复杂相互作用。高能激光束照射粉末床导致局部高温，引发熔池表面汽化，产生高压蒸气射流。在激光作用区域，高速蒸气流将周围粉末直接喷出，形成粉末飞溅；同时，蒸气流所产生的低压区会诱发保护气体向内流动，卷起粉末颗粒，形成夹带飞溅。高温还会使粉末表面发生熔融和聚结，被气流携带形成尺寸较大、形状不规则的颗粒飞溅。此外，常规液滴飞溅则是由反冲压力分布不均引起熔池波动所致：当蒸气压力超过熔体表面张力时，会导致液滴破裂并飞散。

目前的研究大多采用高速光学成像、红外热成像或 Schlieren 成像等技术，捕捉增材制造过程中的蒸气射流与飞溅行为，难以同时实现高时间分辨率与高空间分辨率。同步辐射 X 射线成像技术凭借其极高的时间分辨率和优异的空间分辨能力，成为解析增材制造飞溅高速动态行为的关键手段。

Parab 等[37]依托 APS 以 10 MHz 帧率捕获了增材制造过程中的粉末飞溅（图 5(a)），这种飞溅被认为主要由金属蒸气射流和保护气流共同驱动（图 5(b)）[38]。并且 Ti6Al4V 合金熔池恢复阶段的反冲压力也可能引发粉末团聚与液滴飞溅（图 5(c)）[33]。利用同步辐射成像技术还在 LPBF 成形铝合金的过程中首次发现后缘液滴飞溅机制，即匙孔模式下，Marangoni 对流将底部熔体推向表面，而匙孔后壁的金属蒸气压力与气-液界面 Kelvin-Helmholtz 不稳定性共同作用，形成液态突起[39]；持续作用的蒸气流使突起颈部过热，表面张力降低，当蒸气压力突破颈部张力时，大液滴脱离形成飞溅，如图 5(d)所示[39]。

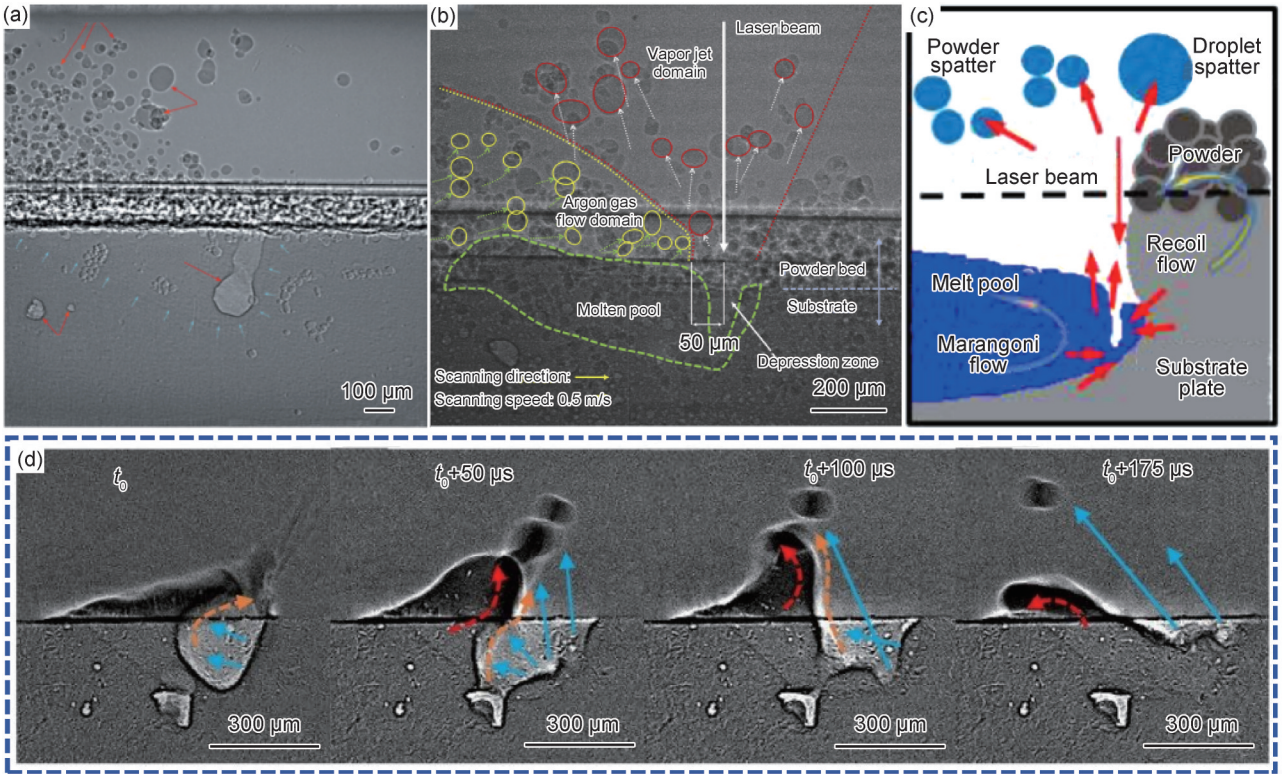


图 5 同步辐射原位成像表征 LPBF 中的飞溅动力学过程与形成机制

(a)粉末飞溅现象[37]；(b)金属蒸气射流和保护气流产生的飞溅[38]；(c)反冲压力引发粉末团聚与液滴飞溅示意图[33]；(d)后缘液滴飞溅的形成机制[39]

Fig.5 Synchrotron *in situ* imaging characterization of spatter dynamics and formation mechanisms in LPBF

(a)powder spatter phenomenon[37]; (b)spatter generated by metal vapor jet and shielding gas flow[38]; (c)schematic of powder agglomeration and droplet spatter caused by recoil pressure[33]; (d)formation mechanism of trailing edge droplet spattering[39]

同步辐射技术还有助于建立增材制造飞溅的形态和运动行为与材料特性与工艺参数联系。通过对比 SS316L 和 13-93 生物玻璃的 LPBF 成形过程，发现低黏度材料（SS316L）因熔池润湿形成大尺寸飞溅，而高黏度材料（13-93 生物玻璃）通过抑制 Marangoni 对流显著减少飞溅[40]。使用原位微焦点 X 射线成像系

统直接观察316L粉末在大层厚(400 μm)下的熔化过程时发现飞溅的聚结现象进一步加剧了成球缺陷的形成，其聚结率高达73.04%，显著影响了表面粗糙度和粉末沉积的均匀性[41]。

同步辐射技术的应用不仅揭示了飞溅的瞬态动力学行为，还为飞溅抑制策略的优化提供了重要依据。Khairallah等[42]结合同步辐射超快X射线成像技术和高保真多物理场数值模拟技术，捕获了激光扫描偏转点的复杂瞬态动力学过程，并揭示了一种新的飞溅诱导气孔的形成机制。当激光与粉末床中的颗粒团聚体相互作用时，高功率激光能够迅速蒸发团聚体表面，产生蒸气反冲压力，从而将飞溅物加速喷出。相反，若激光功率较低，飞溅物可能无法被有效排出，进而影响熔池稳定性及最终材料的力学性能。此外，研究还指出，在激光扫描转折点处因激光减速或加速而形成深窄匙孔，该匙孔易失稳坍塌生成气泡，这些气泡在黏性拖曳力的作用下远离匙孔，最终形成气孔缺陷。此外，通过将高帧速率X射线成像与多模态诊断传感器结合[43]，实现了对飞溅行为的原位检测与精确关联，为工艺优化提供了技术手段。

受限于目前高速成像技术时间或空间分辨率的限制，对于LPBF过程中动态飞溅的理解和认知仍存在局限。高能同步辐射光源(如HEPS)为突破现有时空分辨率限制，实现增材制造飞溅行为的定量分析，为LPBF飞溅最小化以及表面质量最优化提供关键实验基础。

2.3　缺陷的形成与演化

内部缺陷是制约增材制造工艺发展的瓶颈之一。增材制造基于逐点扫描熔化、逐线扫描搭接、逐层累积成形的技术原理，金属材料在高能束作用下历经复杂的热力学行为，在加热熔化、熔池流动、冷却凝固的循环往复过程中，受热源参数、扫描参数、粉体材料、温度等诸多条件的影响，一旦成形参数选择不合理，制件中不可避免会产生各种冶金缺陷，影响其使用性能。深入认识增材制造过程中不同缺陷的形成及演变行为，对于缺陷抑制，制件质量评定等具有重要意义。

2.3.1　气孔

气孔是增材制造过程中最常见的固有缺陷之一，对构件的力学性能及服役稳定性具有决定性影响。因此，系统研究气孔的形成机制，并发展其有效控制方法，对于提升增材制造产品质量具有重要科学意义与工程价值。

在增材制造过程中，匙孔的形成及其动态行为是影响熔池稳定性和缺陷生成的关键因素之一。研究人员通过同步辐射高时空分辨率成像与多物理场模拟，匙孔的形成机制及其与气孔缺陷的关联得到了深入揭示。Zhao等[44]依托APS首次直接观察到激光增材制造的匙孔形貌，系统研究了其动态演化行为。通过定量图像分析，明确区分了三种激光加热模式：传导、过渡、匙孔模式，并定义了其对应的P-V(功率-速度)区间和形貌特征(图6(a))。研究指出，在当前金属LPBF工艺中，几乎所有激光加热条件均会引发匙孔现象，区别主要在于匙孔形貌的差异，匙孔缺陷的产生存在明确的阈值条件，并强调匙孔本身与缺陷形成并无必然关联。但是，Huang等[45]发现匙孔的形成主要与高激光功率和低扫描速度条件下的金属蒸气压降密切相关，在LPBF过程中，匙孔的波动频率可达2.5～10 kHz，其快速径向波动和后壁的塌陷是孔隙生成的主要来源。其他研究也证实匙孔在熔池中的快速振荡和塌陷行为是增材制造制件气孔的主要来源[26]。此外匙孔尖端的临界不稳定性不仅会引发声波效应，还会驱动孔隙远离匙孔并被凝固前沿捕获，从而形成缺陷，这也为优化激光功率和扫描速度以抑制匙孔缺陷提供了重要指导[46]。将同步辐射超快X射线成像与积分球辐射测量相结合的方法直接观察到匙孔形成与激光吸收之间的动态关系，证明匙孔波动对能量吸收具有周期性影响，这对于预测孔隙率和缺陷形成提供了重要的依据[47]。也有研究发现匙孔的形成会显著增加激光能量的吸收率，其面积和深度与能量吸收率呈正相关[18]。此外，匙孔的不稳定性还会引发熔池表面Kelvin-Helmholtz不稳定性，导致熔道表面波纹和驼峰的形成[48]。

除匙孔引发气孔外，增材制造构件的中气孔的形成也受到多种因素的影响，包括激光诱导的气体/蒸气射流、Marangoni流、粉末氧化以及粉末颗粒之间的相互作用等。例如，利用DED方法成形Cantor合金的过程中，原位观察的结果揭示了一种独特的气孔消除机制——反Marangoni熔体流动。该机制可有效延长气孔存在时间，促进其聚结与消除，如图6(b)所示[49]，图中以黄色标记和深蓝色圆圈表示气孔的形成与循环，紫色标记表示气孔消除，浅绿色标记表示气孔聚结。与此同时，Invar 36合金在增材制造过程中出现的粉末氧化会逆转熔池内的Marangoni流动方向，进而显著促进气孔的形成。如图6(c)，(d)所示[51]，粉末氧化不仅加剧了飞溅和裂纹的产生，更关键的是为气孔的生成提供了条件。该研究为理解氧化诱发气孔的形成机制及控制裂纹缺陷提供了新的方向[51]。同步辐射原位技术还可以在消除增材气孔方面发挥作用，Hojjatzadeh等[50]通过原位观察熔池内气孔的运动

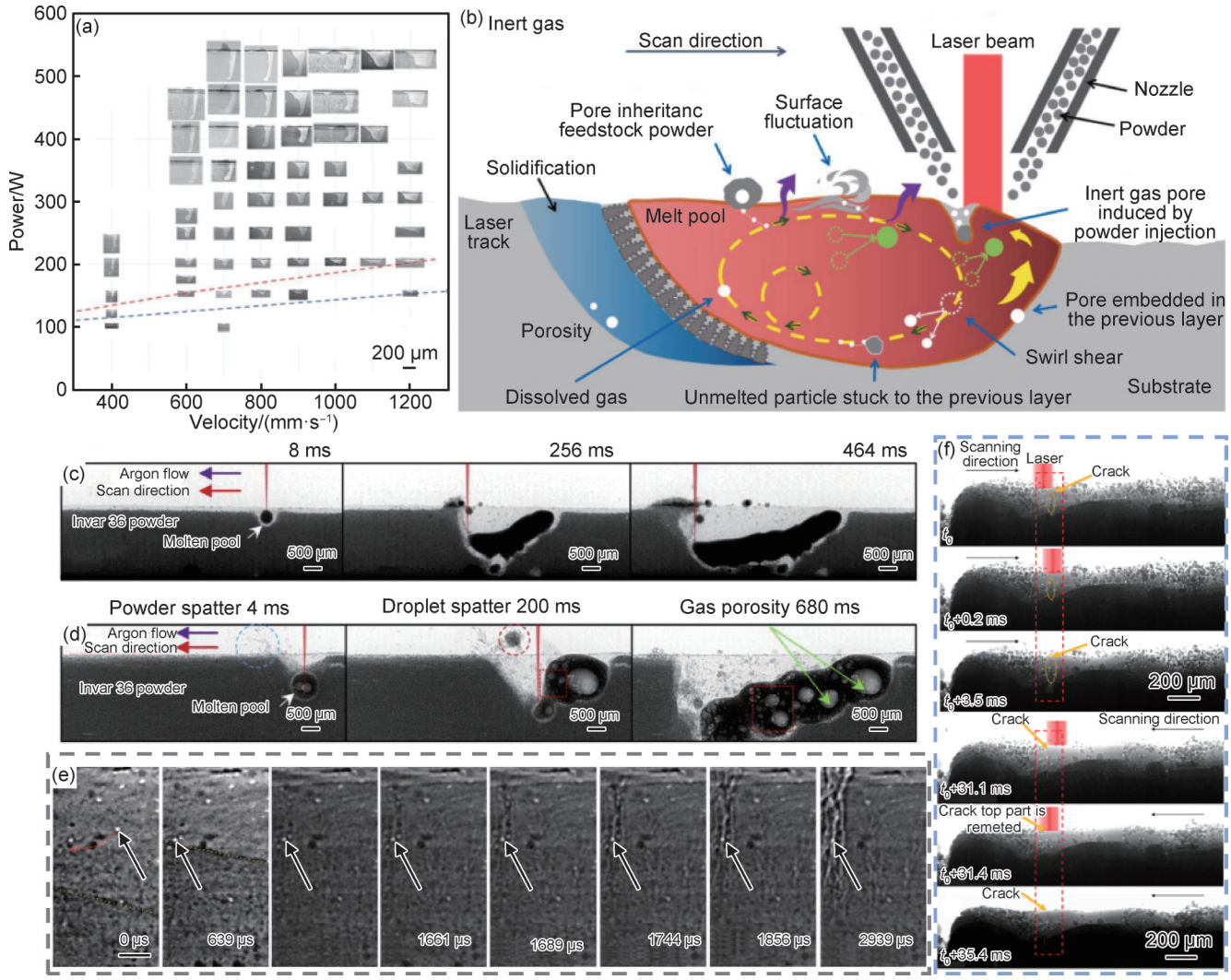


图6 同步辐射原位成像表征增材制造气孔的形成与演化行为

(a)激光功率与扫描速度对于匙孔形貌的影响[44];(b)熔池中气孔的形成与消除机制示意图[49];(c),(d)原始粉末与氧化粉末的熔融特征[51];(e)气孔的移动及气孔引发的裂纹[53];(f)裂纹演变过程[52]

Fig.6 Synchrotron *in situ* imaging characterization of pore formation and evolution behavior in additive manufacturing

(a)effect of laser power and scanning speed on keyhole morphology[44];(b)schematic of pore formation and elimination mechanisms in the melt pool[49];(c),(d)melting characteristics of raw and oxidized powder[51];(e)pore movement and porosity-induced cracks[53];(f)crack evolution process[52]

行为提出,增材制造过程中气孔消除的主要驱动力是Marangoni流,而非传统认为的浮力。熔池内的流动阻力通常比浮力高几个数量级,因此位于过渡区与循环区中的气孔往往随熔体流动迁移,难以自行逃逸;仅当气孔尺寸达到毫米级时,浮力才可能成为主导的消除机制,此时熔池中较大的温度梯度导致Marangoni流远大于流动阻力。

目前,研究人员已对LPBF中匙孔模式下气孔的形成机制有了一定的理解,但在DED等其他增材制造工艺中,气孔的产生与消除机制仍需进一步探索。系统比较不同增材技术中气孔形成与演化行为的差异,对于提高气孔形成机理的理解和提升增材制造材料性能具有重要意义。

2.3.2 裂纹

裂纹是增材制造过程中最具危害性的缺陷之一,其形成源于材料物理性能与残余应力的共同作用。增材制造过程中的裂纹扩展速度极快,难以通过常规手段捕捉。近年来,借助同步辐射光源开展的原位研究在揭示裂纹形成与扩展机制方面已取得初步进展,同时气孔等缺陷与裂纹之间的相互作用也得到了更深入的探讨。

Kouraytem等[53]在APS原位观察到了由特定气孔在增材过程中引发产生裂纹的过程(图6(e)),证明裂纹与孔隙之间的直接联系。熔池动力学与裂纹形

成的也具有密不可分的关系。激光增材制造中熔池中的Marangoni流和激光再熔化可促进孔隙的迁移、溶解和分散,从而影响裂纹的形成[34]。Lamb等[52]利用APS的同步辐射X射线成像和计算流体动力学(CFD)模拟,量化了NiMoAl合金在激光熔化过程中的熔池动力学和微观结构演化(图6(f)),揭示了熔池凝固过程中几何必要位错(GND)密度的变化及其对裂纹形成的影响。原位X射线衍射结合数值模拟发现CM247LC镍基高温合金在LPBF过程中的裂纹动态形成的三个主要影响因素是晶界处富溶质液态膜、凝固收缩引起的拉伸残余应力以及温度梯度[55]。

受限于同步辐射技术的时间分辨率与穿透能力,当前关于增材制造中裂纹形成与扩展的研究仍集中于有限种类的材料。将研究范围拓展至更广泛的材料体系,特别是高脆性、低韧性材料中裂纹的生成与演化机制,对于推进新材料在增材制造中的应用具有关键意义。

3　增材制造同步辐射衍射表征

同步辐射原位衍射技术能够定量解析增材制造过程中材料内部的相变动力学、残余应力演化与晶体织构演变等关键科学问题。表3[33,44,51,56-70]汇总了同步辐射原位衍射表征在增材制造过程解析中的应用。如表3所示,利用同步辐射原位衍射表征,为增材制造物相演变路径、应力形成机制及微观组织动态响应提供了直接的实验证据,极大地深化了对增材制造过程微观物理机制的理解,为工艺优化提供了理论基础。

表3　同步辐射原位衍射表征在增材制造过程解析中的应用

Table 3　Application of synchrotron *in situ* diffraction characterization in process analysis of additive manufacturing

Scientific issue	Research object	Dynamical process characterized by synchrotron diffraction	Light source	Material system	Ref.
Phase transformation and microstructure control	Phase transformation kinetics	Correlation between phase transformation kinetics and process parameters	DESY	γ-TiAl,X40CrMoV5-1	[56-57]
		Quantitative analysis of cooling rate effects on phase sequence	APS	Ti-6Al-4V	[44]
	Microstructure evolution	*In-situ* tracking of dissolution and precipitation kinetics of metastable phases (*e.g.*, austenite in hypoeutectoid steels)	SSRF	316L,H13,P20,18Ni300	[58]
			SLS&APS	Martensitic tool steel	[59]
			ESRF	Ti-185	[60]
		Study of thermal cycling effects on grain size evolution	APS	316L,TiC	[61]
			SB RAS	Ti-6Al-4V	[62]
			SSRL	Ti-6Al-4V	[63]
			BSRF	TiAl,Ti_2AlNb	[64]
	Crystal solidification behavior	Preferred-growth behavior of crystals during solidification	BSRF	DD5	[65]
Stress evolution and deformation control	Formation and evolution of internal stress	Quantification of thermal-stress accumulation and relaxation during layer-by-layer deposition	PETRA Ⅲ	Inconel 625	[66]
			SLS	Ti-6Al-4V	[67]
		Establishment of scanning strategy-stress distribution relationships	SSRL	Ti-6Al-4V	[68]
			SPring-8	Hastelloy X	[69]
	Internal stress characterization and measurement	High-spatial-resolution mapping of three-dimensional stress fields in complex components	DESY	Inconel 718	[70]
			DLS	Ti-6Al-4V	[33]
Crystal texture and anisotropy	Crystal orientation evolution	Texture formation process dominated by epitaxial growth mechanisms	SSRL	Ti-6Al-4V	[64]
			SLS&APS	Martensitic tool steel	[51]
			DESY	Inconel 625	[66]

3.1　相变行为

增材制造过程中,材料经历高能量密度输入与循环热作用,导致其微观组织显著区别于传统铸件。因此,原位监测增材制造过程中的物相演变,对于深入理解其工艺本质至关重要。

在相变行为研究方面,同步辐射原位观察揭示了不同冷却速率对316L、H13、P20和18Ni300钢中马氏体与奥氏体形成的影响,证明了高冷却速率促进钢中

的马氏体产生[58]。热作模具钢在增材制造中从初生δ铁素体向初生γ奥氏体的转变过程的研究验证了Kurz-Giovanola-Trivedi（KGT）模型预测的准确性[59,71]。依托同步辐射原位衍射，使得复杂合金体系在增材制造过程中的相变与微观组织演化的研究亦取得了一定的进展。通过原位X射线衍射，研究人员研究了增材制造过程中316L不锈钢、Ti64合金等合金与TiC、硼纤维/颗粒的复杂相反应过程，揭示了TiC的不完全溶解和分层沉淀以及TiB和TiB_2等化合物的形成过程，并进一步阐明了对材料性能的改善机理[61-62]。笔者所在研究团队[64]在BSRF捕捉了TiAl/Ti_2AlNb双合金过渡区在增材热循环条件下的动态相变过程（图7(a)），解析了过渡区从β/B2相到α_2相、O相的有序转变过程，为深入理解复杂双合金体系在增材制造热循环下的相变机制、预测相变路径、优化显微组织及设计轻质耐热双合金构件提供了关键实验依据和理论支撑。该技术也可分析微区内快速冷却过程中的相演化和晶格收缩[63]，以及合金粉末的原位合金化等过程[60]。

在相变动力学研究方面，Graf等[56]在DESY通过原位高能X射线衍射研究了γ-TiAl合金在激光熔化过程中的快速凝固行为，观察到了β-Ti(Al)相的初级凝固，验证了该技术对追踪相变的适用性。类似研究也涵盖钢和钛合金的体系，通过原位X射线衍射分析了X40CrMoV5-1钢在DED过程中的循环相变，揭示了马氏体自回火效应及碳含量变化对硬度的影响[57]。采用同步辐射X射线超快衍射，实时监测了Ti-6Al-4V合金LPBF过程中的相变，并估算了钛合金激光定点加热后冷却过程中的柱状枝晶生长速率约为0.4～0.5 m/s、相变过程的平均冷却速率约为10^5 K/s、β→α′无扩散固态相变的转化速率约为10^4 μm/s[44]。

此外，同步辐射技术在单晶高温合金晶体生长行为的研究中也展现出独特优势。笔者所在研究团队[65]利用BSRF的3W1束线超导扭摆器所提供的高通量、宽能谱的X射线“白光”的优势，基于时间分辨Laue衍射技术，开展了镍基单晶激光重熔过程的原位研究。捕捉了DD5二代单晶外延生长过程中的实时晶格转向行为以及杂晶的形成过程，如图7(b)所示，揭示了高斯激光束不均匀加热导致的局域变形与晶体转向及杂晶形核之间的内在联系，为航空发动机单晶叶片激光增材修复过程中晶体取向控制提供了重要的理论依据。

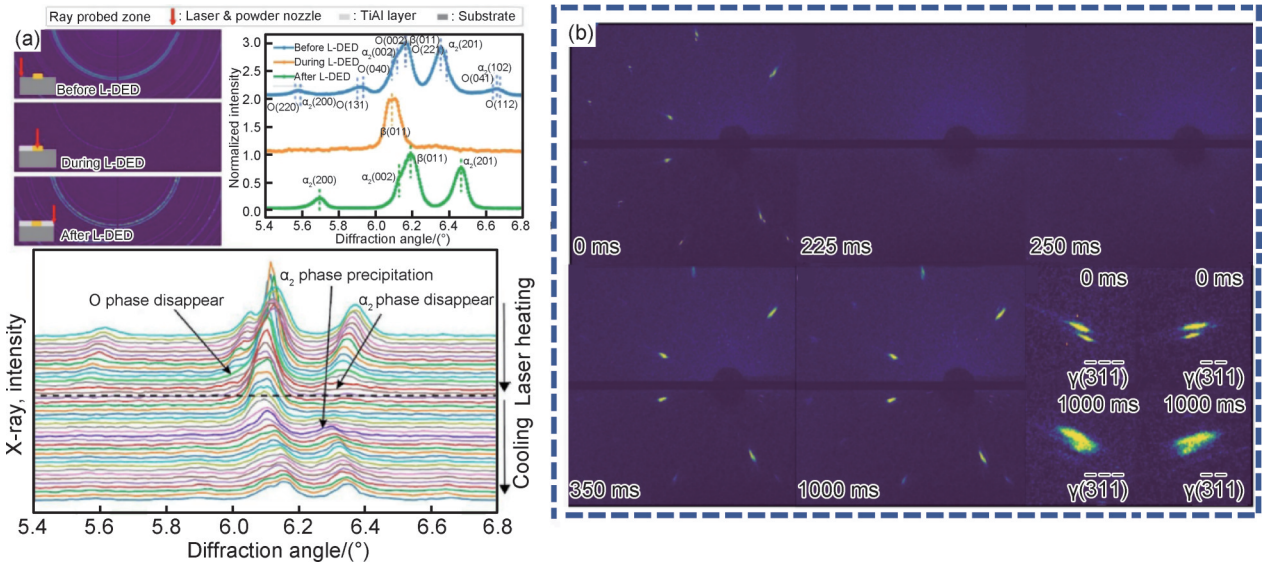


图7 同步辐射原位衍射表征增材制造过程中的相变行为

(a)增材制造TiAl/Ti_2AlNb双合金过渡区的动态相变过程[64]；(b)DD5单晶外延生长过程中的实时晶格转向行为[65]

Fig.7 Synchrotron *in situ* diffraction characterization of phase transformation behavior during additive manufacturing

(a)dynamic phase transformation process of TiAl/Ti_2AlNb dual alloy transition zone in additive manufacturing[64];

(b)real-time lattice rotation behavior during epitaxial growth process of DD5 single crystal[65]

3.2 内应力的形成与演化

内应力的形成与控制是影响增材制造构件性能与可靠性的关键科学问题。增材制造快速加热与冷却行为导致材料内部产生较大的温度梯度场，进而形成复杂的残余应力场，引发微观组织畸变和宏观尺寸失稳。这些残余应力场不仅影响构件的力学性能和尺寸精度，还可能引发开裂甚至失效，严重制约了增材制造技术的应用。

借助同步辐射X射线衍射技术可实现材料内部应力的高分辨率、无损测量，并原位监测其动态演化过程。此外，结合显微成像和三维断层扫描等多尺度表征手段，同步辐射技术能够系统揭示残余应力与微观组织演变、缺陷形成之间的耦合机制，为理解增材制造中的内应力起源及其影响提供全面的实验依据。

在内应力形成与演化方面，Uhlmann 等[66]在 PETRA Ⅲ开展的 Inconel 625 的 LPBF 原位研究，发现熔池表层在冷却过程中受冷基材约束发生塑性压缩，并在后续冷却阶段因收缩受限转化为沿扫描方向的高幅值拉伸残余应力。研究还表明，由于泊松收缩效应的差异，扫描方向与生长方向呈现显著的各向异性应力分布。对于 Ti-6Al-4V 合金，β 相残余应力的形成与扫描策略密切相关，如图 8(a)所示。Thampy 等[67]进一步量化了 Ti-6Al-4V 合金熔体再凝固后的亚表面冷却速率，发现 β-Ti 相中的残余应变水平与冷却速率呈非线性关系：较低的冷却速率导致 β-Ti 相的衍射峰展宽和晶格收缩，表明冷却速率对残余应力和微观结构具有显著影响。通过对比增材制造与锻造镍基高温合金的位错特性，发现增材构件中高位错密度和以螺位错为主的分布特征，这可能是残余应力积累的一个重要机制[68]。

在内应力测量方面，Aminforoughi 等[69]开发了一种基于线性回归的热传导模式测量技术，并通过原位拉伸实验验证了该方法在复杂微观结构中的可靠性。基于 Ti-6Al-4V 合金的 DED 成形过程的原位监测，实现了熔池动力学、相变行为与应力演变之间的时空关联分析，并建立了热梯度-枝晶结构-应力状态之间的定量耦合模型[33]。

3.3　织构演变

织构是指材料微观结构中晶体取向呈现择优排列的现象，对材料的各向异性行为具有决定性影响。当材料中存在织构时，其X射线衍射图谱通常会表现出某些衍射斑点或德拜环强度分布不均，反映出特定晶面的择优取向。增材制造凭借其逐层累积成形的特点及独特的热梯度，极易在合金中形成织构。同步辐射X射线衍射技术已成为揭示增材制造中织构形成与演化机制的关键实验手段。

Thampy 等[67]在 SSRL 利用原位衍射技术研究了 Ti-6Al-4V 合金在 LPBF 中 β→α′相变的取向演变过程：激光作用瞬间仅探测到 β-(110)衍射峰，随后 30 ms 内，α 相的(100)、(002)和(101)衍射峰迅速出现，至 100 ms 后，衍射峰位与强度趋于稳定，但未出现明显的择优取向增强，表明快速冷却有效抑制了织构的形成。对于 Inconel 625，在高线激光能量密度下形成的深熔池抑制了晶粒的取向选择性，未呈现明显择优取向；而在低线激光能量密度下，由于熔池较浅，促进了晶粒沿构建方向(BD)的外延生长，从而形成强烈的〈200〉丝织构。进一步研究发现，重复激光扫描会引发动态再结晶，导致织构强度显著降低，如图 8(b)所示[70]，随着打印层数增加，初始存在的〈200〉//BD 与〈111〉//TD 双模态丝织构逐渐弱化，至第 14 层后仅残留微弱的〈200〉取向。该现象归因于激光热循环所引起的位错重排与晶界迁移，证实增材制造过程可视为一种有效的原位热处理方式，为通过工艺参数主动调控织构提供了直接实验依据[70]。

受限于单色同步辐射X射线光子通量及像素阵列探测器帧频的限制，尚不足以有效捕捉增材制造快速

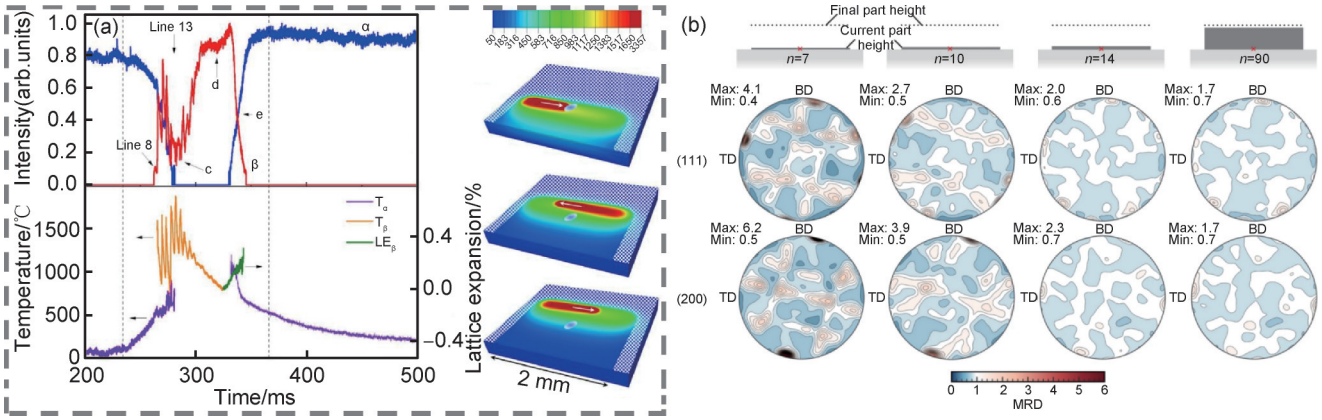


图 8　同步辐射原位衍射表征增材制造内应力及织构演变

(a)Ti6Al4V 增材制造过程衍射强度、晶格畸变以及对应温度场的变化[66]；(b)Inconel 625 增材制造过程中织构演化[70]

Fig.8　Synchrotron radiation *in situ* diffraction characterization of internal stress and texture evolution during additive manufacturing

(a)changes in diffraction intensity, lattice distortion, and thermodynamic field during additive manufacturing of Ti6Al4V [66];

(b)Inconel 625 texture evolution during additive manufacturing[70]

熔凝过程中的相变等瞬态现象，导致相比熔池、匙孔及微观缺陷的同步辐射超快X射线成像研究，当前采用同步辐射衍射技术对增材制造过程中晶体结构与相组织的原位实时监测仍处于初步探索阶段。值得关注的是，第四代高能同步辐射光源（如HEPS、APS-U等）的发展正为上述瓶颈带来革命性突破。其极高的亮度与通量可显著提升单色光模式下的光子通量，并结合新一代高速像素阵列探测器，有望将衍射采集帧频提升至hHz、kHz甚至MHz级别。这将极大推动增材制造中相变动力学、晶粒演变和应力演化等超快过程的研究，实现从“观测”到“解析”的跨越，为深入理解增材制造的材料行为提供前所未有的时空分辨率与数据质量。

4 同步辐射技术在增材制造过程研究中的应用：挑战与机遇

4.1 挑战

相较于传统表征技术，同步辐射技术凭借其原位检测能力以及高亮度、高频率和高分辨率等优势，已在增材制造研究中取得诸多重要发现。然而，其在未来的发展中仍面临以下几方面挑战：

（1）数据采集与处理的高要求：同步辐射原位表征技术所生成的数据具有高速率、高分辨率与高容量的典型特征，对采集、存储与后续分析环节提出了极为严苛的要求。以同步辐射超快X射线成像为例，其帧率可高达10 MHz，产生连续的海量数据流，传统处理方法难以实现实时解析与响应。因此，亟需开发高效的计算架构与智能分析算法，以应对超高通量数据的处理压力。可行的解决方案包括构建统一的数据流管理系统，集成基于人工智能的图像识别技术，例如，依托卷积神经网络（CNN），可在毫秒级时间内完成熔池内部孔隙、裂纹等缺陷的动态提取与演化追踪。未来还需进一步优化算法效率，提升信噪比，并探索边缘计算等在实时处理中的应用潜力。

（2）多尺度、多物理场耦合的复杂性：增材制造涵盖从熔池微观动力学、匙孔行为至缺陷形成的多尺度耦合过程，伴随热-力-流-等离子体等多物理场交互作用，其机理极为复杂。尽管同步辐射成像基于材料内部相位及吸收率的变化，能够以较高的时空分辨率捕获材料内部组织演变，但仍难以直接获取关键物理参量如温度场分布及等离子体喷发射等信息。这种信息维度的缺失，限制了与多物理场数值模型之间的实时数据融合与验证。为了更全面还原制造过程的物理本质，建议将同步辐射技术与辅助传感手段（如高速红外热成像、声发射检测等）进行多模态集成，构建协同表征平台。通过融合多源信息，不仅有望实现对温度、羽辉等关键场量的间接反演，还可推动建立更精准的跨尺度实时仿真模型，最终为工艺优化与缺陷控制提供坚实的实验基础。

（3）实验装置与样品环境的适配性限制：同步辐射实验环境对增材制造设备的集成提出较高要求，包括空间布局、辐射防护、光束路径规划等。当前，适用于同步辐射线站的增材制造原型机仍较为有限，且难以完全复现实际工艺条件。此外，高温、金属蒸气、飞溅等极端环境也对探测器的抗干扰能力和使用寿命构成挑战。推动专用原位装备研发、优化样品环境设计与光束线兼容性，是提升实验可行性与数据质量的重要方向。未来需面向特定线站开发“紧凑型”原位装备。例如：采用钨-铅复合局部屏蔽、可拆式合金薄膜窗口和陶瓷隔热层，兼顾X射线透过与热-渣防护；在探测器前加装同步触发的高速快门与窄带滤波片，降低蒸气辉光干扰，延长探测器寿命并提升数据质量，从而缩小“同步辐射条件”与“工厂条件”之间的鸿沟。

4.2 机遇

尽管同步辐射技术在增材制造研究中仍面临诸多挑战，但其独特的原位实时监测能力也为增材制造领域带来了巨大的机遇：

（1）智能缺陷检测与质量控制：基于深度学习的图像分割算法可以自动识别熔池中的孔隙、裂纹等缺陷，并结合工艺参数调整实现闭环控制，从而提高构件的质量和可靠性，进而实现增材制造过程中的智能缺陷检测与质量控制。

（2）深化增材制造机理认知：同步辐射技术弥补了传统研究手段对内部结构演化特征的缺位，提供了高速、原位的直接表征手段。通过同步辐射超快X射线成像，揭示了熔池动力学、匙孔波动和缺陷生成的瞬态过程，推动了增材制造机理研究由稳态向动态、平衡态向非平衡态发展。

（3）加速工艺优化与材料数据库构建：同步辐射原位表征具有高速数据采集和多手段探测能力，能够快速获取高通量、多维度的特征参量（如缺陷、应力、相成分等），为工艺窗口的优化提供了高效手段。结合机器学习技术，同步辐射数据可为增材制造材料工艺数据库的开发提供足量的标记样本，加速工艺优化进程。

（4）支持高保真数值模型的开发与验证：同步辐射技术能够实现瞬态极端热力耦合条件下的物性参数（如冷却速率）和结构信息（如熔池及缺陷形态）的

真实测量，为高保真增材制造模型的开发提供了参数校准和实验验证。例如，通过同步辐射成像与多物理场模拟的结合，揭示了匙孔波动与孔隙生成的内在机制，为模型的精确化提供了实验依据。

(5)助力新材料研发与全生命周期管理：同步辐射技术进一步与振动、高低温、冲击、疲劳等加载装置结合，能够实现金属材料从制造过程到极端条件服役全生命周期的诊断。通过同步辐射原位表征，可以揭示材料在极端服役条件下的失效机制，为增材制造专用新材料的研发提供科学依据，推动其在航空航天、生物医疗等高端领域的应用。

参考文献

[1] 张学军，唐思熠，肇恒跃，等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程，2016，44(2)：122-128.
ZHANG X J，TANG S Y，ZHAO H Y，et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. Journal of Materials Engineering，2016，44(2)：122-128.

[2] 王天元，黄帅，周标，等. 航空装备激光增材制造技术发展及路线图[J]. 航空材料学报，2023，43(1)：1-17.
WANG T Y，HUANG S，ZHOU B，et al. Development and roadmap of laser additive manufacturing technology for aviation equipment[J]. Journal of Aeronautical Materials，2023，43(1)：1-17.

[3] 杨平华，高祥熙，梁菁，等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程，2017，45(9)：13-21.
YANG P H，GAO X X，LIANG J，et al. Development tread and NDT progress of metal additive manufacture technique[J]. Journal of Materials Engineering，2017，45(9)：13-21.

[4] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造：若干材料基础问题[J]. 航空学报，2014，35(10)：2690-2698.
WANG H M. Materials′ fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2014，35(10)：2690-2698.

[5] 张楠，王淼辉，张书彦，等. 基于同步辐射和中子衍射分析的金属增材制造关键共性问题研究进展[J]. 稀有金属材料与工程，2022，51(7)：2698-2708.
ZHANG N，WANG M H，ZHANG S Y，et al. Review on key common technologies of metal additive manufacturing based on synchrotron radiation and neutron diffraction analysis[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2022，51(7)：2698-2708.

[6] ARCELLA F G，FROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. JOM，2000，52(5)：28-30.

[7] 王华明，张述泉，王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战(邀请论文)[J]. 中国激光，2009，36(12)：3204-3209.
WANG H M，ZHANG S Q，WANG X M. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components(invited paper)[J]. Chinese Journal of Lasers，2009，36(12)：3204-3209.

[8] REN N，LI J，ZHANG R，et al. Solute trapping and non-equilibrium microstructure during rapid solidification of additive manufacturing[J]. Nature Communications，2023，14：7990.

[9] WANG L，GUO Q，CHEN L，et al. *In-situ* experimental and high-fidelity modeling tools to advance understanding of metal additive manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2023，193：104077.

[10] 王沿东，张哲维，李时磊，等. 同步辐射高能X射线衍射在材料研究中的应用进展[J]. 中国材料进展，2017，36(3)：168-174.
WANG Y D，ZHANG Z W，LI S L，et al. Application of synchrotron-based high-energy X-ray diffraction in materials research[J]. Materials China，2017，36(3)：168-174.

[11] 罗军，李楠，王曦，等. 同步辐射X射线衍射技术在残余应力分析中的应用[J]. 材料工程，2024，52(7)：120-129.
LUO J，LI N，WANG X，et al. Application of synchrotron radiation X-ray diffraction technology in residual stress analysis[J]. Journal of Materials Engineering，2024，52(7)：120-129.

[12] 吴苍生. 同步辐射的特性和应用[J]. 物理，1985，14(1)：1-7.
WU C S. Characteristics and application of synchrotron radiation[J]. Physics，1985，14(1)：1-7.

[13] FLORIAN T，SCHRICKER K，ZENZ C，et al. Combining *in situ* synchrotron X-ray imaging and multiphysics simulation to reveal pore formation dynamics in laser welding of copper[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2025，204：104224.

[14] WU S C，YU X，ZUO R Z，et al. Porosity，element loss，and strength model on softening behavior of hybrid laser arc welded Al-Zn-Mg-Cu alloy with synchrotron radiation analysis[J]. Welding Journal，2013，92(3)：64-71.

[15] JI C，LI B，LUO J，et al. Ultrahigh-pressure crystallographic passage towards metallic hydrogen [J]. Nature，2025，641(8064)：904-909.

[16] HOCINE S，VAN SWYGENHOVEN H，VAN PETEGEM S，et al. Operando X-ray diffraction during laser 3D printing[J]. Materials Today，2020，34：30-40.

[17] KÖNIG H H，SEMJATOV N，SPARTACUS G，et al. MiniMelt：an instrument for real-time tracking of electron beam additive manufacturing using synchrotron X-ray techniques[J]. Review of Scientific Instruments，2023，94(12)：125103.

[18] ALLEN T R，HUANG W，TANNER J R，et al. Energy-coupling mechanisms revealed through simultaneous keyhole depth and absorptance measurements during laser-metal processing[J]. Physical Review Applied，2020，13(6)：064070.

[19] OU X，QIN X，HUANG B，et al. High-resolution X-ray luminescence extension imaging [J]. Nature，2021，590(7846)：410-415.

[20] BACHCHE S，NONOGUCHI M，KATO K，et al. Laboratory-based X-ray phase-imaging scanner using Talbot-Lau interferometer for non-destructive testing[J]. Scientific Reports，2017，7：6711.

[21] SEIFERT M，LUDWIG V，KAEPPLER S，et al. Talbot-Lau X-ray phase-contrast setup for fast scanning of large samples[J]. Scientific Reports，2019，9：4199.

[22] DAILLANT J，GIBAUD A. X-ray and neutron reflectivity：

principles and applications[M]. Berlin: Springer, 2008.
[23] LEVINE J R, COHEN J B, CHUNG Y W, et al. Grazing-incidence small-angle X-ray scattering: new tool for studying thin film growth[J]. Journal of Applied Crystallography, 1989, 22(6): 528-532.
[24] SINCLAIR L, CLARK S J, CHEN Y, et al. Sinter formation during directed energy deposition of titanium alloy powders[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 176: 103887.
[25] CHEN Y, CLARK S J, COLLINS D M, et al. Correlative synchrotron X-ray imaging and diffraction of directed energy deposition additive manufacturing[J]. Acta Materialia, 2021, 209: 116777.
[26] GUO Q, ZHAO C, QU M, et al. *In-situ* characterization and quantification of melt pool variation under constant input energy density in laser powder bed fusion additive manufacturing process[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 600-609.
[27] DERIMOW N, SCHWALBACH E J, BENZING J T, et al. *In situ* absorption synchrotron measurements, predictive modeling, microstructural analysis, and scanning probe measurements of laser melted Ti-6Al-4V single tracks for additive manufacturing applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 900: 163494.
[28] GUO Q, ZHAO C, QU M, et al. *In-situ* full-field mapping of melt flow dynamics in laser metal additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100939.
[29] LEUNG C L A, MARUSSI S, ATWOOD R C, et al. *In situ* X-ray imaging of defect and molten pool dynamics in laser additive manufacturing[J]. Nature Communications, 2018, 9: 1355.
[30] CHEN Y, CLARK S J, LEUNG C L A, et al. *In-situ* synchrotron imaging of keyhole mode multi-layer laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Applied Materials Today, 2020, 20: 100650.
[31] AUCOTT L, DONG H, MIRIHANAGE W, et al. Revealing internal flow behaviour in arc welding and additive manufacturing of metals[J]. Nature Communications, 2018, 9: 5414.
[32] SOUNDARAPANDIYAN G, LEUNG C L A, JOHNSTON C, et al. *In situ* monitoring the effects of Ti6Al4V powder oxidation during laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 190: 104049.
[33] CHEN Y, CLARK S J, HUANG Y, et al. *In situ* X-ray quantification of melt pool behaviour during directed energy depositionadditive manufacturing of stainless steel [J]. Materials Letters, 2021, 286:129205.
[34] QU M, GUO Q, ESCANO L I, et al. Nanoparticle-enabled increase of energy efficiency during laser metal additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2022, 60: 103242.
[35] FAN X, FLEMING T G, REES D T, et al. Thermoelectric magnetohydrodynamic control of melt pool flow during laser directed energy deposition additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2023, 71: 103587.
[36] FAN X, FLEMING T G, CLARK S J, et al. Magnetic modulation of keyhole instability during laser welding and additive manufacturing[J]. Science, 2025, 387(6736): 864-869.
[37] PARAB N D, ZHAO C, CUNNINGHAM R, et al. Ultrafast X-ray imaging of laser-metal additive manufacturing processes [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2018, 25(5): 1467-1477.
[38] GUO Q, ZHAO C, ESCANO L I, et al. Transient dynamics of powder spattering in laser powder bed fusion additive manufacturing process revealed by *in situ* high-speed high-energy X-ray imaging[J]. Acta Materialia, 2018, 151: 169-180.
[39] GUO D, LAMBERT-GARCIA R, HOCINE S, et al. Correlative spatter and vapour depression dynamics during laser powder bed fusion of an Al-Fe-Zr alloy[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(5): 055601.
[40] LEUNG C L A, MARUSSI S, TOWRIE M, et al. Laser-matter interactions in additive manufacturing of stainless steel SS316L and 13-93 bioactive glass revealed by *in situ* X-ray imaging[J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 647-657.
[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] KHAIRALLAH S A, MARTIN A A, LEE J R I, et al. Controlling interdependent meso-nanosecond dynamics and defect generation in metal 3D printing[J]. Science, 2020, 368(6491): 660-665.
[43] MARTIN A A, WANG J, DEPOND P J, et al. A laser powder bed fusion system for operando synchrotron X-ray imaging and correlative diagnostic experiments at the Stanford synchrotron radiation lightsource[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(4): 043702.
[44] ZHAO C, FEZZAA K, CUNNINGHAM R W, et al. Real-time monitoring of laser powder bed fusion process using high-speed X-ray imaging and diffraction[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 3602.
[45] 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.
[46] ZHAO C, PARAB N D, LI X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6520): 1080-1086.
[47] SIMONDS B J, TANNER J, ARTUSIO-GLIMPSE A, et al. Simultaneous high-speed X-ray transmission imaging and absolute dynamic absorptance measurements during high-power laser-metal processing[J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 775-779.
[48] LEUNG C L A, LUCZYNIEC D, GUO E, et al. Quantification of interdependent dynamics during laser additive manufacturing using X-ray imaging informed multi-physics and multiphase simulation[J]. Advanced Science, 2022, 9(36): 2203546.
[49] ZHANG S, YAO C, ZHANG D, et al. Dynamics of pore formation and evolution during multi-layer directed energy deposition additive manufacturing *via in situ* synchrotron X-ray imaging: a case study on high-entropy Cantor alloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 200: 104181.

[50] HOJJATZADEH S M H, PARAB N D, YAN W, et al. Pore elimination mechanisms during 3D printing of metals[J]. Nature Communications, 2019, 10: 3088.
[51] LEUNG C L A, MARUSSI S, TOWRIE M, et al. The effect of powder oxidation on defect formation in laser additive manufacturing[J]. Acta Materialia, 2019, 166: 294-305.
[52] LAMB J, OCHOA R, ERES-CASTELLANOS A, et al. Quantification of melt pool dynamics and microstructure during simulated additive manufacturing[J]. Scripta Materialia, 2024, 245: 116036.
[53] KOURAYTEM N, CHIANG P J, JIANG R, et al. Solidification crack propagation and morphology dependence on processing parameters in AA6061 from ultra-high-speed X-ray visualization [J]. Additive Manufacturing, 2021, 42: 101959.
[54] ZABLER S, ERSHOV A, RACK A, et al. Particle and liquid motion in semi-solid aluminium alloys: a quantitative *in situ* microradioscopy study[J]. Acta Materialia, 2013, 61(4): 1244-1253.
[55] PEGUES J W, MELIA M A, RODRIGUEZ M A, et al. *In situ* synchrotron X-ray imaging and mechanical properties characterization of additively manufactured high-entropy alloy composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 876: 159505.
[56] GRAF G, ROSIGKEIT J, KROHMER E, et al. *In situ* investigation of the rapid solidification behavior of intermetallic γ-TiAl-based alloys using high-energy X-ray diffraction[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(11): 2100557.
[57] EPP J, DONG J, MEYER H, et al. Analysis of cyclic phase transformations during additive manufacturing of hardenable tool steel by *in situ* X-ray diffraction experiments[J]. Scripta Materialia, 2020, 177: 27-31.
[58] YAN J, ZHOU Y, GU R, et al. A comprehensive study of steel powders (316L, H13, P20 and 18Ni300) for their selective laser melting additive manufacturing[J]. Metals, 2019, 9(1): 86.
[59] KÖNIG H H, PETTERSSON N H, DURGA A, et al. Solidification modes during additive manufacturing of steel revealed by high-speed X-ray diffraction[J]. Acta Materialia, 2023, 246: 118713.
[60] AHMED F F, CLARK S J, ALEX LEUNG C L, et al. Achieving homogeneity in a high-Fe β-Ti alloy laser-printed from blended elemental powders[J]. Materials & Design, 2021, 210: 110072.
[61] QU M, YUAN J, NABAA A, et al. Melting and solidification dynamics during laser melting of reaction-based metal matrix composites uncovered by *in situ* synchrotron X-ray diffraction[J]. Acta Materialia, 2024, 271: 119875.
[62] GOLYSHEV A, MALIKOV A, VITOSHKIN I. The use of boron fibers and particles for creating functionally graded material based on Ti64 using the laser additive manufacturing method[J]. Crystals, 2023, 13(7): 1112.
[63] CALTA N P, WANG J, KISS A M, et al. An instrument for *in situ* time-resolved X-ray imaging and diffraction of laser powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(5): 055101.
[64] WU Y, ZHANG D, HOU H, et al. *In situ* synchrotron X-ray diffraction study: phase evolution in transition zone of TiAl/Ti_2AlNb dual alloy fabricated by laser-directed energy deposition [J]. Scripta Materialia, 2025, 255: 116340.
[65] ZHANG D, LIU W, LI Y, et al. *In situ* observation of crystal rotation in Ni-based superalloy during additive manufacturing process[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2961.
[66] UHLMANN E, KROHMER E, SCHMEISER F, et al. A laser powder bed fusion system for *in situ* X-ray diffraction with high-energy synchrotron radiation [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(7): 075104.
[67] THAMPY V, FONG A Y, CALTA N P, et al. Subsurface cooling rates and microstructural response during laser based metal additive manufacturing[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1981.
[68] PRASAD K, HORITA Y, ITO A, et al. *In situ* synchrotron diffraction study of a crack-free additively manufactured Ni base superalloy[J]. Scripta Materialia, 2021, 200: 113896.
[69] AMINFOROUGHI B, DEGENER S, RICHTER J, et al. A novel approach to robustly determine residual stress in additively manufactured microstructures using synchrotron radiation[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(11): 2100184.
[70] SCHMEISER F, KROHMER E, WAGNER C, et al. *In-situ* microstructure analysis of Inconel 625 during laser powder bed fusion[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(21): 9663-9677.
[71] KURZ W, GIOVANOLA B, TRIVEDI R. Theory of microstructural development during rapid solidification[J]. Acta Metallurgica, 1986, 34(5): 823-830.

基金项目:北京市杰出青年基金项目(JQ24014);国家自然科学基金项目(52175369);国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFB3703400)
收稿日期:2025-09-04;**录用日期**:2025-11-04
通讯作者:刘伟(1984—),男,研究员,博士,主要从事航空新材料、新结构增材制造及其原位表征技术研究,联系地址:北京81信箱20分箱(100095),E-mail: liuwei2011621@sina.com

(本文责编:齐书涵)