引用格式:蒋佳乐,康永旺,罗军,等.基于同步辐射成像技术的金属材料凝固研究进展[J].材料工程,2026,54(1):1-12.
JIANG Jiale,KANG Yongwang,LUO Jun,et al.Research progress in metallic materials solidification based on synchrotron radiation imaging technology[J].Journal of Materials Engineering,2026,54(1):1-12.

基于同步辐射成像技术的金属材料凝固研究进展

蒋佳乐[1,2,3],康永旺[1,4],罗 军[1,2,3],王智茂[5],黎 刚[5],刘昌奎[1,2,3],李 楠[1,2,3*]
(1 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095;2 航空材料检测与评价北京市重点实验室,北京 100095;
3 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室,北京 100095;4 中国航发北京航空材料研究院
先进高温结构材料重点实验室,北京 100095;5 中国科学院高能物理研究所,北京 100049)

摘要:凝固在金属材料制备中至关重要。凝固过程直接决定了金属材料的微观组织和宏观性能。金属从液态转变为固态时,晶粒的形成和生长、凝固速度、温度梯度和合金成分等因素会导致不同的微观结构,影响金属的最终组织结构。这些因素的变化不仅决定了金属的力学性能,还可能引发诸如晶界缺陷、气孔、夹杂物等缺陷,进而影响其整体质量和使用性能。同步辐射由于具有高穿透性和高时空分辨率,能够实时观察和跟踪金属在凝固过程中的微观结构演化,从而深入理解其内在变化机理。本文综述了国内外同步辐射成像技术在金属材料凝固过程研究中的最新进展,重点探讨了该技术在晶体形核与生长、凝固缺陷形成机制以及快速凝固(焊接与增材制造)等方面的应用与研究成果。通过结合相场模拟与机器学习等新方法,研究者在晶粒细化机制、气孔与热撕裂形成规律以及快速凝固模式控制方面取得了重要进展。最后指出,提升同步辐射时间与空间分辨率、开展多尺度耦合表征、融合实验与数值模拟并引入数据驱动的智能分析方法是未来凝固过程原位研究的重要发展方向,这将为先进材料设计与工艺优化提供更坚实的理论基础与技术支撑。

关键词:凝固;晶体形核;晶体生长;凝固缺陷;同步辐射
doi:10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000077 **CSTR**:32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000077
中图分类号:TG115.22;TB31 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-4381(2026)01-0001-12

Research progress in metallic materials solidification based on synchrotron radiation imaging technology

JIANG Jiale[1,2,3],KANG Yongwang[1,4],LUO Jun[1,2,3],WANG Zhimao[5],
LI Gang[5],LIU Changkui[1,2,3],LI Nan[1,2,3*]
(1 AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials,Beijing 100095,China;2 Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation,Beijing 100095,China;3 Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation,Aero Engine Corporation of China,Beijing 100095,China;4 Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory,AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials,Beijing 100095,China;
5 Institute of High Energy Physics,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049,China)

Abstract: Solidification is crucial in the preparation of metal materials. The solidification process directly determines the microstructure and macroscopic properties of metal materials. When a metal is transformed from a liquid to a solid state, factors such as the formation and growth of grains, solidification rate, temperature gradient, and alloy composition lead to different microstructures, ultimately defining the final microstructure of the metal. Variations in these factors not only determine the mechanical properties of the metal but can also cause defects such as grain boundary defects, gas pores, and inclusions, *etc.*, thereby affecting its overall quality and service performance. Due to its high penetration and high spatiotemporal resolution, synchrotron radiation enables the real-time observation and tracking of microstructural evolution during metal solidification, leading to a deeper understanding of the underlying mechanisms. This paper reviews the latest progress of synchrotron radiation imaging technology in the study of the solidification

process of metallic materials at home and abroad, with a focus on its application and research achievements in crystal nucleation and growth, the formation mechanism of solidification defects, and rapid solidification (welding and additive manufacturing). By combining new methods such as phase field simulation and machine learning, researchers have made significant progress in grain refinement mechanisms, the formation laws of pores and hot tearing, and the control of rapid solidification modes. Finally, it is pointed out that improving the temporal and spatial resolution of synchrotron radiation, conducting multi-scale coupling characterization, integrating experiments with numerical simulations, and introducing data-driven intelligent analysis methods are important development directions for *in-situ* studies of the solidification process in the future. This will provide a more solid theoretical basis and technical support for the design of advanced materials and process optimization.

Key words: solidification; crystal nucleation; crystal growth; solidification defect; synchrotron radiation

随着航空、航天和汽车制造等现代高端装备的不断升级，对钛合金、铝合金、镍基高温合金以及特殊用钢等关键金属构件的性能要求日益提升。在工业领域，熔炼与凝固是金属材料生产和制备的核心途径，除了粉末冶金制备的特殊金属制品外，几乎所有金属制品都需经过这一过程。无论是直接成型的铸件，还是通过变形加工得到的各种型材，其性能都受到铸件或铸锭凝固组织的关键性影响。因此，控制凝固过程，保证铸锭或铸件质量，形成合理的凝固组织，对提高工程金属材料的性能以及发挥材料潜力具有重要的意义。

目前研究凝固组织的高温水淬法存在部分组织转变、测温不连续以及误差不可控的问题，无法准确有效地研究凝固机理。而随着大科学装置的发展，同步辐射成像技术的高穿透性、高时间与空间分辨率等优势可以更深层次地探索金属凝固过程，完善凝固机理。近年来，同步辐射在凝固过程中的研究已取得显著进展。国外研究主要集中在金属合金铸造过程中的微观机制，如固液相变[1-2]、结晶行为[3-6]和晶粒生长[7-8]。欧洲同步辐射光源和阿贡国家实验室等机构，利用小角X射线散射和X射线吸收谱揭示了合金结构演化与元素迁移规律。

本文分析了国内外基于同步辐射成像技术在金属凝固过程中的研究现状，首先介绍了同步辐射成像技术的基本原理和特点，然后通过一些代表性研究工作，尤其是在晶体形核与生长、凝固缺陷（如气孔和热撕裂）以及新兴的非平衡金属加工工艺（焊接和增材制造）的研究，重点阐明同步辐射成像技术在金属材料凝固研究中的作用，最后对该领域的研究进行总结和展望。

1 同步辐射成像原理

同步辐射是指高能电子在加速器中被加速至接近光速，并通过弯曲磁场（如弯曲磁铁或四极磁铁）发生加速或方向改变时，释放出强烈的电磁辐射。作为大型科学装置，同步辐射光源相较于常规X射线具备显著优势，包括频谱宽、亮度大、分辨率高、高度准直性，并具备优异的时间分辨能力。其光源亮度是保障测试材料内部微观结构高时空分辨率的重要指标。与常规X射线相比，同步辐射光源亮度可以达到传统光源的几百万到几亿倍；且由于加速器中电子分布不连续，导致产生的同步辐射为脉冲信号，从而具有时间分辨[9]。同步辐射通过多种成像方式获取样品的高分辨率图像，常见成像方法包括吸收成像、相衬成像和X射线层析成像，不同成像方式的优点、缺点、特点及其在材料领域应用场景如表1所示。

2 同步辐射成像在金属凝固过程中的研究应用

2.1 晶体的形核与生长

当合金或金属熔体冷却到其平衡液相线以下，满足结晶形核所需的能量起伏、结构起伏以及成分起伏，晶体开始形核并逐渐生长。结晶后所形成的组织，包括晶粒大小，界面，相的形状、大小和分布以及缺陷等，均会显著影响金属的加工性能和使用性能，因此控制晶体的形成和生长对于控制铸造产品的最终晶粒尺寸、形态和分布及其力学性能具有至关重要的作用[10]。在工业生产中，铸造纯铝或铝合金前，会向其熔体中添加微米级的不溶性晶粒细化颗粒。这些颗粒能有效促进富铝晶体的形核，从而获得细小、均匀的晶粒，并最终对提升材料的力学性能和保证组织一致性产生了有利影响。在过去的一个多世纪里，人们在理解晶体形核和生长方面投入了大量精力，发展并丰富了金属的形核和生长理论[11-15]。目前对于晶体形核和生长的原位研究数量迅速增长，研究方法主

表 1　同步辐射常见的成像方法对比

Table 1　Comparison of common imaging methods of synchrotron radiation

Technology	Benefit	Limitation	Feature	Application
Absorption imaging	Directly reflects density differences, simple setup and intuitive images, effective for high-Z, dense materials	Low sensitivity to light/low-Z elements, resolution limited by X-ray wavelength and detector, contrast depends on absorption differences	Based on X-ray attenuation difference imaging, it relies on the absorption coefficient of materials and provides high spatial resolution images	Analysis of the internal structure of the material, detection of defects and stress, analysis of material phases, *etc*.
Phase-contrast imaging	Directly reflects density differences, simple setup and intuitive images, effective for high-Z, dense materials	Complex setup requiring high coherence and distance, high instrumentation demands, more complex image reconstruction	Sensitive to small density differences, suitable for low-contrast samples, providing contrast and details beyond absorption imaging	Analysis of nanostructures and defects, *etc*.
X-ray tomographic imaging	Enables 3D reconstruction, visualizes complex internal structures, suitable for *in situ* and dynamic observation	Long acquisition time, large data volume and computational cost	Use multiple 2D projections to reconstruct 3D volumes, can integrate absorption data, enables 4D imaging (3D+time)	Additive manufacturing microstructure monitoring internal defects in nanocomposites

要使用X射线吸收成像，即投影成像和断层扫描。而中子衍射由于具有高穿透、对轻元素敏感和可分辨同位素的特点，也被应用于原位研究凝固过程。

2.1.1　α-Al相的异质形核机制研究

之前对于合金凝固的研究，大部分集中在初生α-Al相的晶体生长，包括生长的固/液界面的形态不稳定性[16-17]、柱状到等轴转变[18-20]、枝晶碎裂[21-24]和等轴枝晶的生长速度[25-27]。相比之下，只有少数研究涉及晶体成核或晶体形成的时刻，这主要是由于微小孕育剂和晶体胚胎尺寸极小，传统手段难以对其实现清晰成像与动态跟踪。

近年来，基于同步辐射成像技术的应用显著推动了该领域的发展。Prasad等[28]在Spring-8同步辐射光源上首次采用相衬成像观察到Al-Si合金中等轴α-Al枝晶的“形核波”现象，揭示了晶粒细化剂（如Al-Ti-B）在提高形核频率和强化热-溶质耦合方面的关键作用，从而促进晶粒细化。进一步地，Jia等[29]通过吸收成像手段原位观测到了溶质抑制形核区（solute suppressed nucleation zone，SSNZ）的形成与动态演化，首次在实验层面验证了该理论模型关于溶质分布对形核限制效应的预测。在上述基础上，Liotti等[30]将相衬成像与机器学习方法相结合，系统探讨了晶体形核过冷度与形核速率、溶质浓度之间的耦合关系，首次观察到晶粒在富溶质液体中发生突发形核的现象。研究表明，在较高浓度合金中，直径较小但数量众多的孕育剂颗粒随着冷却过程被迅速激活，导致晶粒密集形核，提高了整体晶粒形核效率。尽管这些成果在实验观测和理论建模方面取得重要进展，当前仍存在若干局限性：未能实现对单个孕育颗粒的成核过程直接成像与轨迹识别；在实际工业环境中，热梯度对形核速率和晶体生长行为影响更显著，但热梯度对形核行为的影响尚未被系统建模。因此，针对α-Al相的成核行为，仍需开展更高分辨率和真实工况下的成像实验，以支撑机制模型的修正与推广。

2.1.2　金属间化合物$Al_{13}Fe_4$的形核研究

目前，研究者也对合金中金属间化合物（intermetallic compounds，IMCs）的形核进行大量的研究，适量、均匀分布的IMCs能够显著提升材料的力学性能和耐高温性能，但不适宜的IMCs分布或尺寸可能导致脆性增加和腐蚀敏感性升高。因此，在实际应用中，优化IMCs的形成与分布，可以进一步提高合金的性能。Feng等[31]在欧洲同步辐射光源（European Synchrotron Radiation Facility，ESRF）通过同步辐射吸收成像技术实时观察IMCs形核和生长动态，揭示了热梯度和冷却速率对过共晶Al-3%（质量分数，下同）Fe合金中IMCs形成行为的影响机制。图1(a)显示了$Al_{13}Fe_4$作为第一主相形成的示例射线照片。通过研究约4500个晶体形成过程，可以发现，在所有凝固条件下，添加TiB_2和TiC孕育剂能够持续促进IMCs的形成。此外，IMCs的数量密度受热梯度影响显著，从等温条件下的(214±24) IMCs/mm^{3}急剧下降到在最高热梯度8 K/mm的(17±3) IMCs/mm^3（图1(b)）。基于对形核前液体中过冷度分布的分析，研究者提出了“形核概率受控于过冷体积与局部过冷度”的形核机制模型，并指出局部过冷结构的形成主要受热梯度与溶质耦合作用。为了进一步验证该模型的适用性与普适性，研究团队选取具有高X射线吸收对比度的Pt富集（能够提供更强的吸收对比度）合金$Al_{24}Pt_9Er_4$作为模型物质，对其形核过程进行观察，并与工业中

常见的$Al_{13}Fe_4$相行为进行类比。结果显示，该体系中的富Fe和富Pt有序化合物表现出与α-Al相类似的形核行为，证实了形核模型在不同IMCs体系中的推广适用性[32]，这项研究不仅提供了直接的实验数据支持，还为优化铝合金凝固工艺（如孕育剂的使用、热梯度控制）提供了重要的理论指导。

尽管已有研究在金属间化合物形核机制方面取得重要进展，但仍存在若干亟待解决的科学问题。首先，目前尚未实现对单颗粒异质形核剂在形核全过程中的实时成像与行为识别，限制了对关键形核事件的直接理解。其次，现有形核模型多构建于理想凝固条件下，难以有效描述快速凝固、高成分梯度等复杂工况下的实际行为，导致其适用范围存在一定局限性。此外，对于局部溶质分布与界面热流之间的耦合机制，目前尚缺乏系统的定量表征与建模手段。未来有必要结合更高分辨率的三维原位成像技术与数据驱动的物理建模方法，进一步深化对复杂凝固体系中IMCs形核过程的理解与描述。

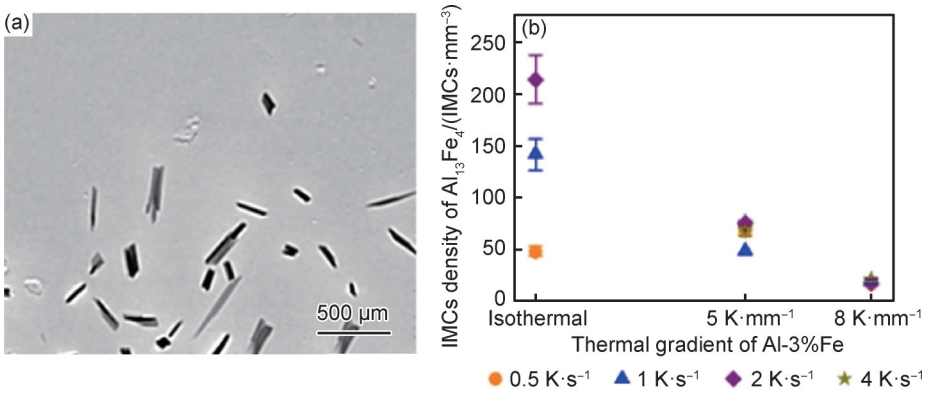


图1 在0.5 K/s和5 K/mm下凝固的Al-3%Fe合金中初生$Al_{13}Fe_4$晶体的射线照片(a)及$Al_{13}Fe_4$最终密度与Al-3%Fe热梯度之间的函数关系(b)[31]

Fig.1 Radiographic image of primary $Al_{13}Fe_4$ crystals in an Al-3%Fe alloy solidified at 0.5 K/s and 5 K/mm(a) and the functional relationship between the final density of $Al_{13}Fe_4$ and the thermal gradient of Al-3%Fe(b)[31]

2.1.3 Sn-Bi合金中枝晶粗化行为的研究

晶体生长行为是金属凝固过程中决定组织形貌与最终性能的关键阶段，其受控因素包括热梯度、冷却速率、成分过冷、界面能及外场作用等。近年来，随着同步辐射成像、中子成像及相场模拟等多种手段的融合，研究者能够以更高的时空分辨率观察凝固过程中的晶体演化行为。尤其是在不同合金体系中，枝晶的形成、粗化机制以及柱状-等轴晶（columnar to equiaxed grain transition，CET）转变等现象成为当前凝固研究的热点问题。

Sn-Bi合金作为一种典型的共晶低熔点合金体系，其凝固过程因枝晶组织的复杂演化而受到广泛关注。Xu等[33]在北京光源采用同步辐射吸收成像技术，动态观察了Sn-Bi合金凝固过程中二次枝晶干粗化行为。如图2所示，在较低冷却速率下，该合金体系表现出明显的枝晶竞争生长行为，随后经历了柱状晶向等轴晶的转变以及枝晶臂的断裂与解离过程。研究表明，在凝固初期，二次枝晶臂之间由于成分与热场的不均匀性，易形成局部熔化与再凝固现象，从而导致粗化行为。Li等[34-35]进一步通过调控热梯度与冷却速率，研究了Sn-13%Bi合金在固态化过程中的晶体粗化机制。他们利用改进的同步辐射层析成像装置，实时捕捉到枝晶臂发生重熔、合并及断裂等微观过程。研究表明，粗化行为主要受到表面张力驱动与扩散过程控制，并表现出典型的“从枝晶尖端到根部的重熔”路径。此外，液相沟槽中的局部固态化现象与晶体碎片的再生长共同作用，导致枝晶臂间距逐渐增加。这些机制为进一步优化合金成分与凝固参数、提升铸件组织均匀性提供了重要的理论依据。

2.1.4 Al-Cu合金中柱状-等轴晶转变机制研究

在高温合金体系中，CET现象广泛存在，直接影响最终铸态组织及后续热处理性能。Mathiesen等[36-39]利用计算机放射成像（computed radiography，CR）在金属凝固微观组织结构二维原位表征研究方面做了大量的研究工作。他们在ESRF利用同步辐射原位成像，深入研究了Al-Cu、Sn-Bi、Sn-Pb、Al-Si等多种合金在不同结晶条件下的枝晶生长行为。通过这一技术，研究人员观察到了一系列复杂的生长模式，包括枝晶的等轴和柱状晶生长、胞状和平面共晶生长以及从柱状生长到等轴生长的转变现象。此外，他们还研究发现了枝晶干断裂后游离至柱状晶生长前沿，引发CET的机制。在此基础上，有学者[40-42]基于

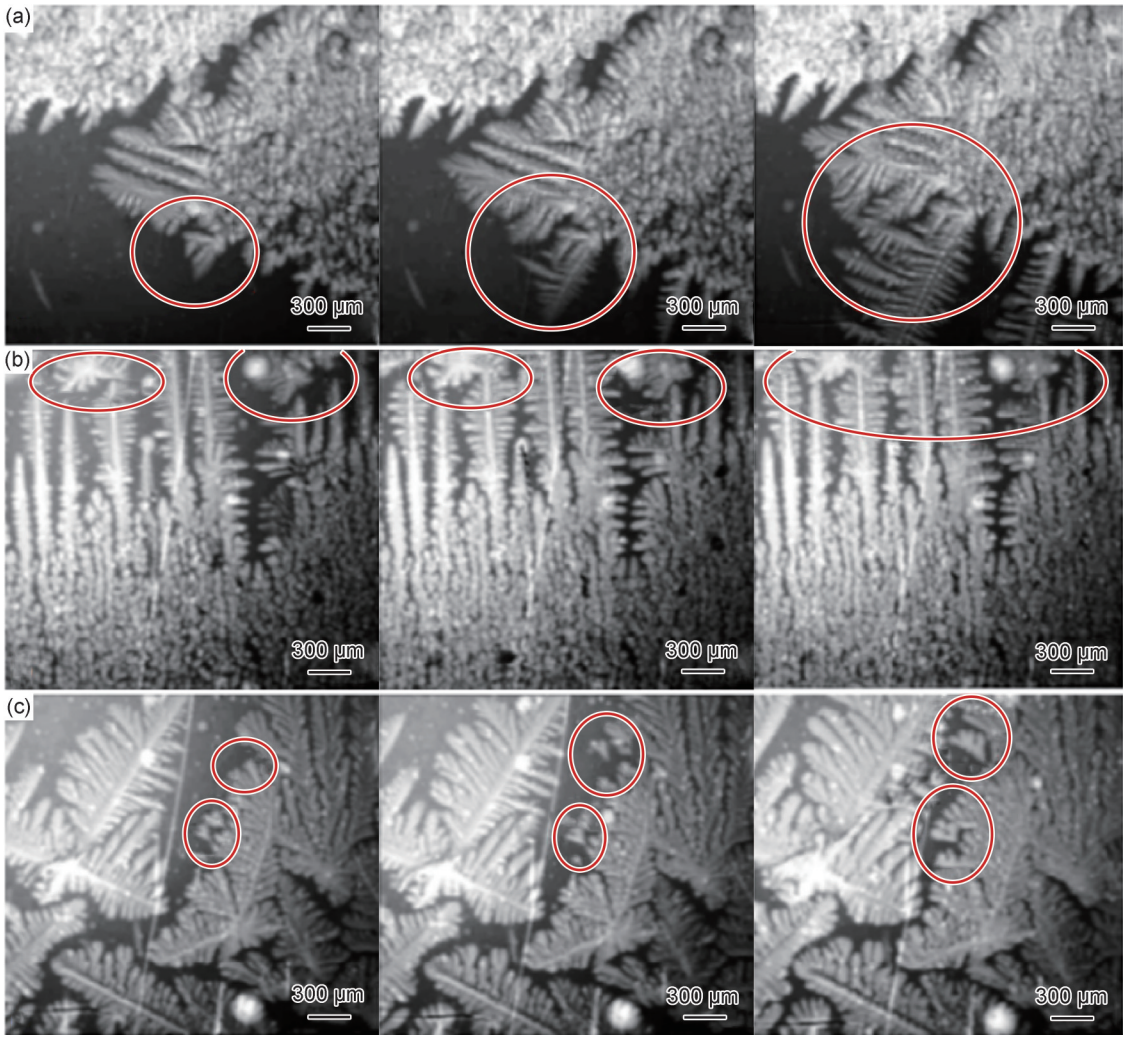


图 2　Sn-Bi 合金生长过程[33]

(a)Sn-Bi 合金枝晶竞争生长;(b)Sn-Bi 合金柱状晶-等轴晶转变;(c)Sn-Bi 合金枝晶臂断裂现象

Fig.2　Growth process of Sn-Bi alloy[33]

(a)Sn-Bi alloy dendrite competitive growth;(b)Sn-Bi alloy columnar-to-equiaxed crystal transition;(c)Sn-Bi alloy dendrite arm fracture phenomenon

ESRF 同步辐射设施与 Bridgman 炉系统,对 Al-20% Cu 合金在不同重力条件下的凝固行为进行了系统研究。结果发现,随冷却速率提高,溶质过冷显著增强,诱发在柱状晶前沿发生等轴晶形核。该过程涉及两种阻塞机制:溶质阻塞(solute blocking)与机械阻塞(mechanical blocking),其中机械阻塞在较高生长速率下起主导作用。该研究在微重力条件下的金属凝固领域具有重要的开创性,为理解重力对 CET 的影响机制提供了宝贵的数据,并为相关理论模型的建立提供了重要的实证数据。然而,仍存在实验时间短、数值模拟建模条件不足和分辨率低等问题。未来可通过优化实验设计、增加数值模拟和提高成像精度来进一步完善研究。

为了进一步揭示 CET 的演化路径,Dong 等[43]与 Li 等[44]通过控制冷却曲线,诱导 Al-15% Cu 合金发生 CET,并利用同步辐射层析成像手段对枝晶碎片化进行实时三维观察。研究表明,当熔体中出现剧烈流动及溶质堆积时,会在柱状晶前沿形成局部液穴,继而诱发枝晶臂颈部熔化并在高应力集中下断裂。这些碎片进入过冷熔体后作为形核点迅速长大,形成等轴晶结构。该研究利用同步辐射层析成像技术,首次以清晰图像展示了 CET 过程中“柱状晶断裂—等轴晶成核—晶粒发展”的动态演化链条,成功提取了凝固过程中的三维空间信息,并结合相场模型进行了数值模拟,揭示了枝晶尖端的稳定性与形态变化规律,但该模型仍存在一定假设与简化,使其尚难全面反映实际系统的复杂性。

2.2　凝固缺陷

合金在凝固过程中难免会出现如偏析、气孔、取向偏离、热撕裂、非金属夹杂和疏松等铸造缺陷,这些

凝固缺陷会降低合金的力学性能(如强度、韧性、疲劳寿命),引发局部腐蚀、应力集中或裂纹扩展,从而影响材料的可靠性和服役寿命。自 20 世纪 90 年代以来,原位X射线成像技术已被广泛应用于研究凝固缺陷的形成机制[45-51]及其与其他微观结构特征之间的相互作用。

2.2.1 气孔

气孔是合金凝固过程中常见的一类缺陷,其形成通常与溶质氢的过饱和析出、气体聚集、界面行为等密切相关。长期以来,气孔的成核与生长机制难以通过常规手段清晰揭示。随着原位X射线成像技术,特别是同步辐射成像技术的发展,为研究其动态演化提供了强有力工具。

Lee 等[52]研究了 Al-Cu 合金在定向凝固过程中孔隙形成的动态行为,通过原位X射线摄影技术和温度梯度实验装置原位观察气孔的成核与生长,并探讨凝固速度、热梯度及合金成分对孔隙形成的影响。研究发现气孔的最终形态由凝固速度和热梯度主导,而氢扩散和枝晶结构起到重要调节作用。气孔的形成与长大主要受氢元素的扩散控制,液体补缩不足的作用较小,然而一旦气孔成核,收缩可能会帮助气孔进一步生长。该研究通过创新的实验技术和定量分析方法,深入探讨了 Al-Cu 合金定向凝固过程中气孔率的形成机制,特别是氢扩散对其生长的控制作用。尽管研究取得了一些重要的成果,但在气孔形核具体机制、固-液界面的动态变化以及工业应用等方面仍存在一些不足。随着同步辐射成像技术的发展,Li 等[53]通过同步辐射X射线摄影技术实现了对 Al-Li 合金中气孔成核和生长过程的实时、原位观测,并结合三维X射线计算机断层扫描(3D-XCT)进行定量分析,揭示了气孔生长机制,提供了详细的统计结果,有助于人们深入解析气孔形成生长演化机制。

基于上述研究,Murphy 等[54]使用同步辐射和实验室微聚焦X射线设备,分别结合定向凝固炉和等温炉,设置不同的实验条件模拟了柱状晶和等轴晶两种凝固模式,原位研究了铝基合金凝固过程中气孔与枝晶组织的相互作用,探讨了其对凝固过程及微观组织的影响。研究表明柱状晶中,气孔在枝晶间隙中形成,并伴随显著的枝晶熔化现象。气孔进一步生长时,导致初生枝晶主干断裂,并生成大量二次碎片。气孔在枝晶区域作为热障,阻碍热量传递,导致局部区域温度升高。气孔引发的局部熔化显著影响晶体生长,破坏结构连续性(如图3所示)。局部熔化使柱状晶生长前沿的稳定性受到影响,可能引发 CET。对于等轴晶,在液固共存区,气孔通常在等轴晶的核化位置附近形成,气孔的膨胀推动等轴晶发生位移,但未引起孔隙形态的明显变化。随着固相分数增加(从约0.13到0.52),枝晶网络变得更加致密。气孔与枝晶的相互作用范围增大,但气孔始终保持接近球形。最终气孔消失,留下大颗粒间隙。气孔主要引发颗粒间的位

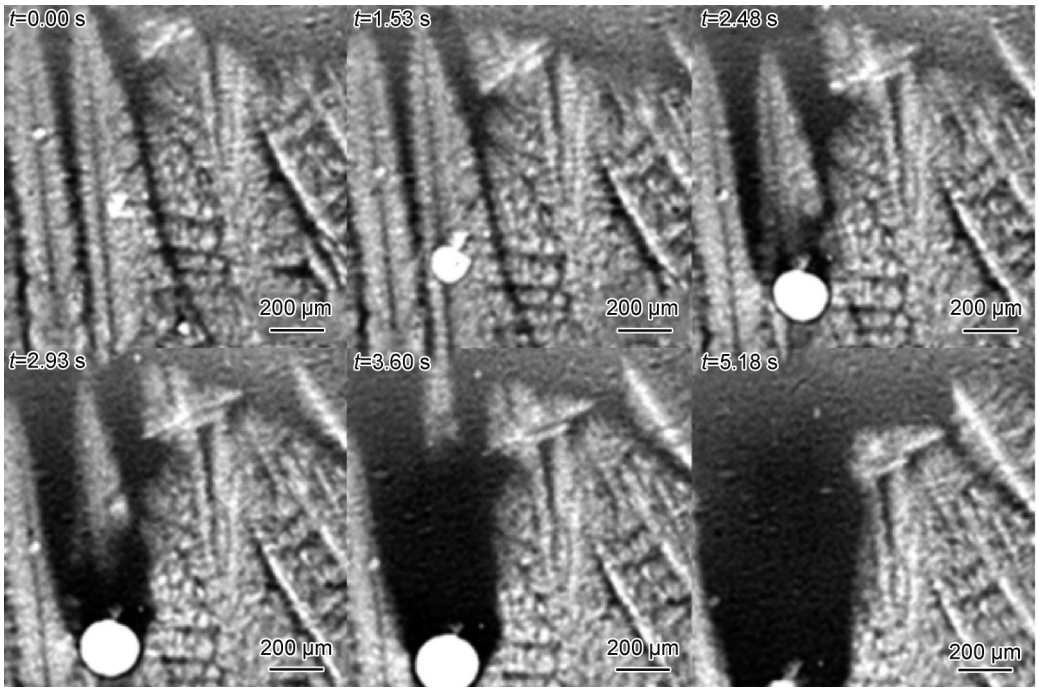


图3 定向凝固的Al-12Ge合金在枝晶间糊状物内显示出孔隙成核,导致枝晶网络的重熔和破坏[54]

Fig.3 Directionally solidified Al-12Ge alloy shows pore nucleation in the interdendrite paste, resulting in remelting and destruction of the dendrite network[54]

移，较少对整体组织产生破坏。该研究通过原位观察了铝基合金凝固过程中气孔与枝晶结构的相互作用，揭示了新的CET机制，这为理解凝固过程提供了新的视角。

上述研究表明，同步辐射成像不仅揭示了气孔的多尺度成核机制与演化特征，还使得原有机制模型得到进一步验证或修正。然而，目前仍存在以下问题亟待解决：气孔形核位置与溶质场、枝晶间距的关联机制尚不明确；气孔与其他凝固缺陷（如偏析、热裂）的协同效应缺乏系统研究；从二维观察到三维行为演化的转化模型尚未建立。未来需要继续依托更高时空分辨率的成像平台，结合相场模拟等手段，建立多物理场耦合下的气孔行为预测模型，实现对工业铸件缺陷形成过程的定量预测与调控。

2.2.2　热撕裂

热撕裂是金属在凝固过程中的一种常见缺陷，通常发生在铸造或焊接中。当金属处于部分凝固状态（即“半固态”或“糊状区”），因热应力或收缩应力超过材料的应变承受能力时，就会产生撕裂。这一过程通常伴随着液相通道的破坏与应力集中形成裂纹。应力的来源包括温度梯度导致的热膨胀不均、外界约束条件以及半固态区的塑性流动受限等因素。热撕裂的存在使材料的强度、疲劳性能和延展性下降，因此研究热撕裂的形成机理，通过优化材料成分、调整铸造工艺和合理设计铸件结构，降低热撕裂的发生概率。这对于提升铸件的力学性能和延长使用寿命具有重要意义。

针对热撕裂形成机制的研究，Puncreobutr等[55]使用同步辐射微层析技术（XCT）首次研究Al-Cu合金在凝固过程中的损伤演化特性，通过高精度实时成像对热撕裂的三维演化进行观察和量化分析，研究表明，液相流动受限是损伤扩展和最终断裂的主要原因，应变的局部化是推动热撕裂演化的关键机制。Sistaninia等[56]采用三维颗粒建模与同步辐射层析成像技术研究了Al-Cu合金在凝固过程中热裂纹形成以及半固态变形机理，研究发现应力集中、液体压力下降及颗粒间流动的局限性是Al-Cu合金热撕裂形成的核心驱动因素。这些研究系统揭示了热应力与热撕裂之间的因果联系，为后续热裂敏感性评估提供了理论依据。

在明确热撕裂与应力之间关系的基础上，研究人员进一步探究了合金成分、金属间化合物以及添加剂对热撕裂敏感性的调控作用。Han等[57]利用同步辐射吸收成像对凝固过程中显微结构变化和热撕裂动力学进行直接观测，研究了Al-Cu合金中热撕裂的形成动力学，重点探讨了铁基金属间化合物的影响。研究发现，IMCs会降低液态金属的渗透性，导致热撕裂更早发生，数量更多且分布更均匀，同时通过撕裂合并形成更大的缺陷。虽然该研究揭示了IMCs对热撕裂行为的影响机制，为优化铸造工艺和合金设计提供了新视角，但是局限于二维薄样品观察，缺乏三维验证。Rees等[58]利用原位同步辐射X射线成像和计算机断层扫描技术，研究了在激光粉末床熔融过程中，TiB_2添加剂和工艺参数对Al-2139合金热裂纹和孔隙率的影响。研究发现，TiB_2的添加可显著减少热裂纹的体积分数（最高减少79%），改善裂纹形态，但会增加孔隙率。该研究虽然利用CT技术进行量化，但还需对更精细的三维裂纹和孔隙结构进一步深化研究。Guo等[59]使用同步辐射断层扫描技术来量化不同钙含量的WE43-xCa合金在约束杆铸造测试中的热撕裂体积，进而评估其热撕裂敏感性。该研究揭示了钙对WE43合金热撕裂行为的重要影响，强调了钙在优化合金性能方面的潜力，同时也指出了Y_2O_3夹杂物对合金热撕裂敏感性的不利作用。

2.3　快速凝固

快速凝固是指材料在远离热力学平衡状态下以极高冷却速率发生相变的过程，通常伴随快速加热、快速冷却或外场（如磁场、电场等）的干预，从而显著改变凝固路径与组织形成机制。这一过程能够抑制传统凝固条件下的元素偏析和粗大晶粒形成，获得细化组织、非平衡相、亚稳态结构等特殊性能，被广泛应用于增材制造、焊接、粉末冶金和高性能磁性材料等先进制造领域，特别适用于航空航天、汽车和医疗器械等对材料性能要求较高的行业。近年来，随着同步辐射成像技术的发展，研究人员得以对快速凝固过程中的微观组织演化与相变行为进行原位、动态观察。相关研究揭示了在极端热条件下材料行为的本质机制，为阐明凝固动力学提供了关键证据，同时也为优化工艺参数、提升材料性能和开发新型材料体系提供了理论依据与技术支撑。此外，微束劳厄衍射等高分辨表征手段的进步，也显著增强了对纳米材料和薄膜材料微观结构的空间解析能力，推动了快速凝固相关材料科学研究的深入发展。

2.3.1　焊接

在焊接过程中，金属以极快的凝固速度实现结合，这一过程中的液-固相变是在远离平衡态的条件下，由质量传递和热传递共同控制实现的。这些非平衡条件不仅决定了凝固前沿微观结构和形态的演变，还影响熔池中可能出现的化学偏析现象。焊接过程从起始到结束的整个动态生长过程，尤其是在不同凝

固区域交汇的关键部位，其演变规律对最终的微观组织与力学性能起着决定性作用。然而，由于焊接过程固有的高冷却速率、瞬时性以及物理过程的复杂性，使得难以直接通过原位实验方法对其进行实时观测与研究。

Yonemura 等[60]通过原位对电弧焊缝微观结构演变进行研究，主要关注凝固后的转变，该研究仅前 2 s 左右的观察结果与过程的实际凝固部分相关。然而，除了一些相当模糊的假设之外，没有对与凝固相对应的观察结果进行更详细的分析，进一步得出单个晶粒生长的结果。同时这些数据还涉及某些特征，例如突出的漫射 X 射线散射，但这些特征尚未得到充分考虑。因此，该研究尚未对实际金属焊缝中的凝固动力学或单个晶粒生长进行详细研究。随后，Mirihanage 等[61]利用同步辐射的高时间分辨特性，首次实现了对焊接凝固过程中晶粒生长和运动的实时观测。研究表明，凝固早期对流在焊接凝固过程中对晶粒运动和生长具有显著影响。这项研究为理解和优化焊接过程中的微观结构演变提供了重要的实验依据和技术手段，但对于对流的具体机制（如驱动因素、流速分布等）并未进行深入探讨。Iyota 等[62]在 SPring-8 利用同步辐射首次详细描述了 Fe-Al 电阻点焊过程中熔池内的对流行为，揭示了对流方向、速度和形态的变化规律。研究表明，熔池内的对流对 IMCs 的形成有重要影响，适当的对流可以减少 IMCs 在焊接界面处的形成，从而提高焊接接头的质量和性能。这项研究为理解 Fe-Al 电阻点焊过程中的微观结构演变提供了关键实验依据，同时为优化该工艺提供了可行的技术手段。然而，未来的研究还需要进一步探索多变量参数的影响、长期性能评估以及该方法在其他材料组合中的适用性。

在焊接和铸造工艺中，由半固态变形引发的凝固裂纹，是一个亟待解决的重要问题。近年来，人们利用高速相机和同步辐射 X 射线照相技术对焊接过程中的凝固行为进行了原位观察，以阐明凝固裂纹机制并评估凝固裂纹的敏感性[63-68]。Nagira 等[69]采用同步辐射吸收成像技术，原位观察 310S 和 316L 不锈钢在钨极氩弧焊（tungsten inert gas welding，TIG）焊接过程中凝固裂纹的形成与扩展，研究裂纹扩展的微观机制和裂纹尖端速度的周期性变化。研究表明裂纹尖端速度的周期性变化与固相分数和应变率的周期性变化有关，在高固相区域，枝晶桥联提高了半固态微观结构的强度，阻碍了裂纹扩展，因此裂纹尖端速度在高固相体积分数（90%）区域显著降低，而在较低固相体积分数（70%）区域显著增加。尽管该研究提到利用数值模拟验证实验结果，但对于裂纹扩展的微观机理和物理模型的解释还不够深入，之后，Osuki 等[70]利用进一步修正后的数值模型预测奥氏体不锈钢焊缝金属的显微组织，并通过同步辐射验证了模型的准确性。研究结果表明，该模型能够有效地预测次级 γ 相或 δ 相的结晶温度以及这些相变对凝固裂纹敏感性的影响。基于此模型，可以进一步优化 δ 铁素体的含量，进而改善焊接性能，降低凝固裂纹的发生率。

2.3.2 增材制造

增材制造由于具有快速设计、能够实现复杂结构的一体化成型、减少材料浪费、设计自由度高等特点，因此逐渐成为金属材料制造的重要技术。然而，由于激光/电子束-粉末相互作用、快速熔化和凝固过程以及微观结构演化的复杂性，增材制造过程中不可避免地会出现各种内部缺陷，如球化、裂纹、残余应力和孔隙等。此外，增材制造的零件往往具有较为复杂的结构，这使得传统检测方法在面对此类零件时存在较大的检测盲区，难以全面评估零件的质量。尤其对于那些结构复杂且对精度有高要求的增材制造零件，传统的破坏性检测手段不仅会损坏样品，而且可能无法提供足够的信息来确保零件的可靠性。因此，为了有效检测这些零件并保证其性能，采用先进的无损检测技术显得尤为重要。近年来，同步辐射技术成为研究增材制造材料微观结构和应力分布的关键工具。同步辐射具有高亮度和高时间分辨率，可用于实时观察增材制造过程中熔池行为、枝晶生长及相变动力学，为优化增材制造工艺、提升材料性能提供了重要支持。

增材制造过程中的高冷却速率和大热梯度对金属凝固模式具有重要影响，并且显著影响最终的显微组织和材料性能。Pettersson 等[71]利用同步辐射吸收成像技术，探究了凝固速度和热梯度对热作工具钢凝固模式的影响。该研究首次实现了对激光粉末床熔化过程中凝固模式的实时观测，并验证了 KGT 模型的预测能力。研究结果表明，在较低冷却速率（$\approx 2.12\times10^4$ K/s）下，材料以初生 δ-铁素体为主的凝固模式发生；而在较高冷却速率（$\approx 1.5\times10^6$ K/s）下，δ-铁素体的形成被抑制，转而形成初生奥氏体。这种由 δ 向 γ 的凝固模式转变反映了在非平衡快速凝固条件下，界面热力学与动力学参数的显著变化。该研究揭示了冷却速率对凝固模式的决定性影响，特别是在高凝固速度下 δ-铁素体的抑制现象。然而，研究也存在一定局限性，仅仅关注了冷却速率和热梯度两个因素对凝固模式的影响，尚未系统考虑成分、熔池扰动等其他因素对凝固行为的作用。对于激光增材制造过程中的相变机制，Xiong 等[72]通过同步辐射吸收成

像技术研究单层激光打印304L不锈钢的过共晶相变发现，在快速凝固下，FCC相可沿液/BCC界面与BCC相耦合生长，伴随局部重熔与有效溶质混合，呈现典型的等温转变特征。两相界面推进速率相近（达到0.14 m/s），显示协同生长趋势，同时解释了最终组织中残余δ相的成因。这些新发现有助于改善对过共晶凝固的理解，能够更准确地预测相转变动力学，从而实现对金属增材制造中固化相结构的精细控制。

增材制造过程通常受到诸多因素的影响，例如激光能量输入和扫描速度、扫描策略、粉末材料、粉末尺寸和形貌。上述因素可能导致形成气孔、未熔合孔、裂纹、杂质等缺陷。这些缺陷不利于制品的力学和物理性能，进而限制了制品的使用。Hu等[73]利用同步辐射断层扫描技术对增材制造部件内部缺陷的演化进行观测，并基于此建立了一个概率损伤模型，以预测材料在单轴拉伸条件下的力学行为。该研究通过分析不同加载条件下空洞的数量和尺寸变化，揭示了空洞形核、生长和聚结的机制，并整合缺陷演化和弹塑性行为，建立了描述增材制造Ti-6Al-4V材料本构行为的新概率损伤模型。Marussi等[74]通过同步辐射吸收成像技术，详细研究了激光增材制造过程中熔池动力学和缺陷形成的物理机制。该研究通过改变激光功率和扫描速度，控制线能量密度，原位观察不同条件下的熔池行为和缺陷形成，结果表明，随着线能量密度的降低，熔池轨迹从连续的半圆柱形转变为不连续的珠状，激光功率的增加改善了熔池的润湿性。这些发现为优化激光增材制造工艺提供了重要的理论和实验依据。

3　总结与展望

在过去的研究中，研究人员借助同步辐射光源对材料的凝固过程进行了深入研究，并取得了显著进展。这些研究不仅在实验设计和构建凝固实验装置方面有所创新，还在同步辐射的表征技术、物理模型的搭建、数据处理方面实现了多项突破。对于晶体形核与生长过程，研究人员能够实时追踪晶体内部结构的变化及其生长动力学特性，利用同步辐射可以精确捕捉到晶体形核初期的微观结构演变，并分析不同条件下（如温度、孕育剂的添加、冷却速率、重力等）对晶体形核和生长的速度与形态的影响；对于凝固过程中的缺陷，研究人员可以对气孔的形成与生长过程、热撕裂的形成与扩展进行原位观察，并进行模型构建，进一步分析其形成与生长机理；对于目前备受关注的增材制造，同步辐射能够实时、无损地探测材料内部结构的演变。通过高分辨率成像和衍射技术，研究人员可以精确观察到熔池动态、晶体生长及微观结构形成过程。这为优化增材制造工艺参数、提升材料性能提供了重要依据，并有助于阐明快速凝固条件下的晶体生长机制。

这些研究揭示了材料凝固过程中微观结构变化与缺陷演化机制，积累了丰富的原创性成果，使人们对凝固理论有了更深入的了解，但仍有许多科学问题亟待解决。例如，目前对于凝固过程中多场信息耦合的原位研究（包括温度场、溶质场、枝晶的生长等）相对较少。后续在进行凝固过程的原位研究时，应着重加强多种分析方法的综合应用，以更全面地捕获凝固过程中多种信息，并对其进行综合分析，使人们对于凝固过程各种因素相互作用形成的最终组织具有整体性认知，进而搭建、完善材料凝固物理模型，进一步深化凝固理论。

同步辐射技术在凝固过程研究中表现出巨大的潜力，其应用前景广阔，亟待进一步深入探索。首先，未来应着重提升同步辐射的时间和空间分辨率，特别是将时间分辨率提高到纳秒级，从而实现对凝固过程的实时、动态观测。这将有助于捕获快速凝固过程中的瞬态现象，如界面形貌变化、晶粒生长与溶质分布等，揭示材料内部微观结构的瞬态演化机制；此外，将同步辐射与其他先进技术相结合，开展多尺度凝固过程研究，亦是未来发展的重要方向。例如，借助电子显微镜、高速摄像等技术，研究从纳米到宏观尺度的凝固行为，以全面揭示不同尺度下的耦合效应。这种多尺度、多维度的综合研究方法，能够深入揭示材料凝固过程中微观结构与宏观性能之间的内在联系，为材料科学领域提供新的视角。

在新材料开发的背景下，同步辐射技术为金属、合金、陶瓷等材料的微观结构演化研究提供了前所未有的机遇。它能够实时监测金属凝固过程中枝晶的生长、相变与析出等关键现象，从而深入揭示不同材料的凝固机制，推动先进材料的设计与优化。这一研究不仅有助于开发高性能的新材料，还可用于优化现有材料的工艺参数，为工业应用提供可靠的科学依据。未来的研究可从以下方面进一步拓展：(1)随着计算能力的不断提升，同步辐射实验与数值模拟的深度融合将成为凝固研究的重要发展方向。通过将实验数据与计算流体力学、有限元分析等数值方法相结合，可以更全面、更准确地揭示凝固过程中复杂的热力学与动力学特征，从而实现更高精度的过程预测与实验优化；(2)基于数据驱动的研究范式将成为凝固过程研究的核心趋势。借助机器学习、深度学习等人

工智能技术，有望在海量实验数据的基础上建立高精度的预测模型，实现凝固过程的智能化控制与优化，显著提升材料研发效率，推动材料科学从经验驱动向数据驱动的转型；(3)实验观测、数值模拟与数据智能的有机融合将进一步促进凝固科学与工程的协同发展，为高性能材料设计与工艺优化提供系统化的理论与技术支撑，开辟凝固研究的新路径。

参考文献

[1] CHAO P, ARAMANDA S K, XIAO X, et al. From irregular to regular eutectic growth in the Al-Al_3Ni system: *in situ* observations during directional solidification[J]. Acta Materialia, 2024, 280: 120314.

[2] ANZELLINI S, HERLIHY A, DOMINIJANNI S, et al. Phase diagram of ruthenium characterized *in situ* by synchrotron X-ray diffraction and *Ab initio* simulations[J]. Results in Physics, 2024, 65: 107961.

[3] MO H U, KIM M W, LEE C H, et al. An *in situ* visualization system using synchrotron white X-rays to investigate the solidification behaviors of metallic materials[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2025, 32(4): 1028-1035.

[4] FURUTA S, MINAGAWA A, MURAKAMI Y, et al. Heterogeneous nucleation behavior of solidified α-Al phase on agglomerated TiB_2 particles in aluminum-copper alloy: study by synchrotron radiation multiscale tomography[J]. Materialia, 2023, 28: 101763.

[5] YE J, XIAO J, GAO M, et al. Nucleation and growth behavior of primary $Al_{11}Ce_3$ intermetallic compounds during solidification in a hypereutectic Al-Ce alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 667-672.

[6] ONODERA Y, TAKIMOTO Y, HIJIYA H, et al. Formation of a zirconium oxide crystal nucleus in the initial nucleation stage in aluminosilicate glass investigated by X-ray multiscale analysis[J]. NPG Asia Materials, 2024, 16: 22.

[7] WANG K L, SU Z H, LOU Y H, et al. Rapid nucleation and slow crystal growth of $CsPbI_3$ films aided by solvent molecular sieve for perovskite photovoltaics[J]. Advanced Energy Materials, 2022, 12(31): 2201274.

[8] FURUTA S, MINAGAWA A, MATSUI I, et al. Direct observations of nucleant TiB_2 particles in cast aluminum by synchrotron radiation multiscale tomography[J]. Materialia, 2020, 10: 100663.

[9] 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.

[10] 崔忠圻，覃耀春. 金属学与热处理[M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2020：12-15.
CUI Z Q, QIN Y C. Metallography and heat treatment[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2020: 12-15.

[11] FISHER J C, HOLLOMON J H, TURNBULL D. Nucleation[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(8): 775-784.

[12] RAPPAZ M, THÉVOZ P H. Solute diffusion model for equiaxed dendritic growth: analytical solution[J]. Acta Metallurgica, 1987, 35(12): 2929-2933.

[13] STEINBACH I, DIEPERS H J, BECKERMANN C. Transient growth and interaction of equiaxed dendrites[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 275(3/4): 624-638.

[14] SHU D, SUN B, MI J, et al. A quantitative study of solute diffusion field effects on heterogeneous nucleation and the grain size of alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(5): 2135-2144.

[15] STJOHN D H, QIAN M, EASTON M A, et al. The interdependence theory: the relationship between grain formation and nucleant selection[J]. Acta Materialia, 2011, 59(12): 4907-4921.

[16] BUFFET A, NGUYEN-THI H, BOGNO A, et al. Measurement of solute profiles by means of synchrotron X-ray radiography during directional solidification of Al-4 wt% Cu alloys[J]. Materials Science Forum, 2010, 649: 331-336.

[17] BOGNO A, NGUYEN-THI H, BUFFET A, et al. Analysis by synchrotron X-ray radiography of convection effects on the dynamic evolution of the solid-liquid interface and on solute distribution during the initial transient of solidification[J]. Acta Materialia, 2011, 59(11): 4356-4365.

[18] REINHART G, MANGELINCK-NOËL N, NGUYEN-THI H, et al. Investigation of columnar-equiaxed transition and equiaxed growth of aluminium based alloys by X-ray radiography[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 413: 384-388.

[19] LIU P, WANG Z, XIAO Y, et al. Insight into the mechanisms of columnar to equiaxed grain transition during metallic additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 26: 22-29.

[20] WANG Y B, MA B Q, WANG J X, et al. Quantitative analysis of columnar-to-equiaxed transition in Mg-Gd-Zn alloys[J]. China Foundry, 2025, 22(3): 239-251.

[21] RAFIQUE M, IQBAL U, AFZAL N, et al. Influence of gas environment on structure, morphology and corrosion rate of laser irradiated vanadium[J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2024, 11(4): 853-867.

[22] LIOTTI E, LUI A, VINCENT R, et al. A synchrotron X-ray radiography study of dendrite fragmentation induced by a pulsed electromagnetic field in an Al-15Cu alloy[J]. Acta Materialia, 2014, 70: 228-239.

[23] LIOTTI E, LUI A, KUMAR S, et al. The spatial and temporal distribution of dendrite fragmentation in solidifying Al-Cu alloys under different conditions[J]. Acta Materialia, 2016, 121: 384-395.

[24] NELSON T, CAI B, WARNKEN N, et al. Gravity effect on thermal-solutal convection during solidification revealed by four-dimensional synchrotron imaging with compositional mapping[J]. Scripta Materialia, 2020, 180: 29-33.

[25] BOGNO A, NGUYEN-THI H, REINHART G, et al. Growth and interaction of dendritic equiaxed grains: *in situ* characterization by synchrotron X-ray radiography[J]. Acta Materialia, 2013, 61(4): 1303-1315.

[26] MURPHY A G, MIRIHANAGE W U, BROWNE D J, et al. Equiaxed dendritic solidification and grain refiner potency characterised through *in situ* X-radiography[J]. Acta Materialia, 2015, 95: 83-89.

[27] MURPHY A G, MATHIESEN R H, HOULTZ Y, et al. XRMON-SOL: isothermal equiaxed solidification of a grain refined Al-20wt% Cu alloy[J]. Journal of Crystal Growth, 2016, 440: 38-46.

[28] PRASAD A, MCDONALD S D, YASUDA H, et al. A real-time synchrotron X-ray study of primary phase nucleation and formation in hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 2015, 430: 122-137.

[29] JIA Y, HUANG H, FU Y, et al. An *in situ* investigation of the solute suppressed nucleation zone in an Al-15 wt% Cu alloy inoculated by Al-Ti-B[J]. Scripta Materialia, 2019, 167: 6-10.

[30] LIOTTI E, ARTETA C, ZISSERMAN A, et al. Crystal nucleation in metallic alloys using X-ray radiography and machine learning[J]. Science Advances, 2018, 4(4): eaar4004.

[31] FENG S, LIOTTI E, LUI A, et al. *In-situ* X-ray radiography of primary Fe-rich intermetallic compound formation[J]. Acta Materialia, 2020, 196: 759-769.

[32] FENG S, LIOTTI E, LUI A, et al. Nucleation bursts of primary intermetallic crystals in a liquid Al alloy studied using *in situ* synchrotron X-ray radiography[J]. Acta Materialia, 2021, 221: 117389.

[33] XU J J, WANG T M, ZHU J, et al. *In situ* study on secondary dendrite arm coarsening of Sn-Bi alloy by synchrotron microradiography [J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(2): 156-159.

[34] LI F, ZHANG J, DONG Q, et al. *In situ* synchrotron X-ray studies of the coupled effects of thermal and solutal supercoolings on the instability of dendrite growth[J]. Materials Characterization, 2015, 109: 9-18.

[35] LI B, BRODY H, KAZIMIROV A. Real-time observation of dendrite coarsening in Sn-13%Bi alloy by synchrotron microradiography[J]. Physical Review E, 2004, 70(6): 062602.

[36] MATHIESEN R H, ARNBERG L, BLEUET P, et al. Crystal fragmentation and columnar-to-equiaxed transitions in Al-Cu studied by synchrotron X-ray video microscopy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(8): 2515-2524.

[37] MATHIESEN R H, ARNBERG L. X-ray radiography observations of columnar dendritic growth and constitutional undercooling in an Al-30wt% Cu alloy[J]. Acta Materialia, 2005, 53(4): 947-956.

[38] RUVALCABA D, MATHIESEN R H, ESKIN D G, et al. *In situ* observations of dendritic fragmentation due to local solute-enrichment during directional solidification of an aluminum alloy [J]. Acta Materialia, 2007, 55(13): 4287-4292.

[39] RUVALCABA D, MATHIESEN R H, ESKIN D G, et al. *In-situ* analysis of coarsening during directional solidification experiments in high-solute aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2009, 40(3): 312-316.

[40] NGUYEN-THI H, REINHART G, SALLOUM-ABOU-JAOUDE G, et al. XRMON-GF experiments devoted to the *in situ* X-ray radiographic observation of growth process in microgravity conditions [J]. Microgravity Science and Technology, 2014, 26(1): 37-50.

[41] MURPHY A G, LI J, JANSON O, et al. Microgravity and hypergravity observations of equiaxed solidification of Al-Cu alloys using *in situ* X-radiography recorded in real-time on board a parabolic flight[J]. Materials Science Forum, 2014, 790/791: 52-58.

[42] CHEN C H, TABRIZI A M, GESLIN P A, et al. Dendritic needle network modeling of the columnar-to-equiaxed transition. Part Ⅱ: three dimensional formulation, implementation and comparison with experiments [J]. Acta Materialia, 2021, 202: 463-477.

[43] DONG Q, ZHANG J, DONG J, et al. *In situ* observation of columnar-to-equiaxed transition in directional solidification using synchrotron X-radiation imaging technique[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 530: 271-276.

[44] LI B, BRODY H D, KAZIMIROV A. Real time synchrotron microradiography of dendrite coarsening in Sn-13 wt pct Bi alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38(3): 599-605.

[45] KHALAJZADEH V, GOETTSCH D D, BECKERMANN C. Real-time X-ray radiography and computational modeling of shrinkage porosity formation in aluminum alloy castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(2): 757-771.

[46] SU T C, O'SULLIVAN C, NAGIRA T, et al. Semi-solid deformation of Al-Cu alloys: a quantitative comparison between real-time imaging and coupled LBM-DEM simulations[J]. Acta Materialia, 2019, 163: 208-225.

[47] BHAGAVATH S, GONG Z, WIGGER T, et al. Mechanisms of gas and shrinkage porosity formation in solidifying shear bands [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117338.

[48] NAGIRA T, KITANO H, KIMURA T, et al. *In-situ* observation of solidification behaviors of Fe-Mn-Cr-Ni-Si alloy during TIG melt-run welding using synchrotron radiation X-ray[J]. Materials Characterization, 2024, 214: 114093.

[49] PHILLION A B, LEE P D, MAIRE E, et al. Quantitative assessment of deformation-induced damage in a semisolid aluminum alloy *via* X-ray microtomography[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(10): 2459-2469.

[50] TERZI S, SALVO L, SUÉRY M, et al. *In situ* X-ray tomography observation of inhomogeneous deformation in semi-solid aluminium alloys[J]. Scripta Materialia, 2009, 61(5): 449-452.

[51] PHILLION A B, HAMILTON R W, FULORIA D, et al. *In situ* X-ray observation of semi-solid deformation and failure in Al-Cu alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(4): 1436-1444.

[52] LEE P D, HUNT J D. Hydrogen porosity in directional solidified aluminium-copper alloys: *in situ* observation[J]. Acta Materialia, 1997, 45(10): 4155-4169.

[53] LI X, WANG J, MIAO Y, et al. *In-situ* study on the effect of Li concentration on hydrogen microporosity evolution in Al-Li alloys by synchrotron X-ray radiography[J]. Journal of Alloys and Com-

pounds, 2024, 1008: 176810.
[54] MURPHY A G, BROWNE D J, HOULTZ Y, et al. *In situ* X-ray observations of gas porosity interactions with dendritic microstructures during solidification of Al-based alloys[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 117: 012067.
[55] PUNCREOBUTR C, LEE P D, HAMILTON R W, et al. Synchrotron tomographic characterization of damage evolution during aluminum alloy solidification [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(12): 5389-5395.
[56] SISTANINIA M, TERZI S, PHILLION A B, et al. 3-D granular modeling and *in situ* X-ray tomographic imaging: a comparative study of hot tearing formation and semi-solid deformation in Al-Cu alloys[J]. Acta Materialia, 2013, 61(10): 3831-3841.
[57] HAN I, FENG S, WILDE F, et al. Revealing hot tear formation dynamics in Al-Cu alloys with X-ray radiography[J]. Acta Materialia, 2024, 262: 119421.
[58] REES D T, LEUNG C L A, ELAMBASSERIL J, et al. *In situ* X-ray imaging of hot cracking and porosity during LPBF of Al-2139 with TiB_2 additions and varied process parameters[J]. Materials & Design, 2023, 231: 112031.
[59] GUO X, ZHAO H, SONG J, et al. Effect of Ca on hot tearing susceptibility of WE43 alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1002: 175451.
[60] YONEMURA M, OSUKI T, TERASAKI H, et al. *In-situ* observation for weld solidification in stainless steels using time-resolved X-ray diffraction[J]. Materials Transactions, 2006, 47(2): 310-316.
[61] MIRIHANAGE W U, DI MICHIEL M, REITEN A, et al. Time-resolved X-ray diffraction studies of solidification microstructure evolution in welding[J]. Acta Materialia, 2014, 68: 159-168.
[62] IYOTA M, MATSUDA T, SANO T, et al. A study on convection in molten zone of aluminum alloy during Fe/Al resistance spot welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 424-434.
[63] SHINOZAKI K, MOTOMICHI Y, PENG W, et al. Prediction of occurrence of solidification cracking in weld metal[J]. Welding International, 2010, 24(12): 942-948.
[64] KADOI K, FUJINAGA A, YAMAMOTO M, et al. The effect of welding conditions on solidification cracking susceptibility of type 310S stainless steel during laser welding using an *in-situ* observation technique[J]. Welding in the World, 2013, 57(3): 383-390.
[65] AVESON J W, REINHART G, BILLIA B, et al. Observation of the initiation and propagation of solidification cracks by means of *in situ* synchrotron X-ray radiography[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2012, 33: 012040.
[66] AUCOTT L, HUANG D, DONG H B, et al. Initiation and growth kinetics of solidification cracking during welding of steel [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40255.
[67] BAKIR N, GUMENYUK A, RETHMEIER M. Investigation of solidification cracking susceptibility during laser beam welding using an *in-situ* observation technique[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(3): 234-240.
[68] ABE D, MATSUZAKA F, MURAKAMI Y, et al. Determining the BTR by conducting a Trans-Varestraint test using a high-speed camera and two-color pyrometry [J]. Welding in the World, 2018, 62(6): 1237-1246.
[69] NAGIRA T, YAMASHITA D, KAMAI M, et al. *In situ* observation of solidification crack propagation for type 310S and 316L stainless steels during TIG welding using synchrotron X-ray imaging [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(17): 10653-10663.
[70] OSUKI T, YONEMURA M, OGAWA K, et al. Verification of numerical model to predict microstructure of austenitic stainless steel weld metal using synchrotron radiation and trans varestraint testing [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(1): 33-42.
[71] 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.
[72] XIONG L, ZHANG S, ZHAO C, et al. Revealing *in-situ* phase transition during laser additive manufacturing *via* high-speed synchrotron X-ray diffraction and imaging [J]. Materials Research Letters, 2024, 12(12): 939-946.
[73] HU D, PAN J, MAO J, et al. Mechanical behavior prediction of additively manufactured components based on defect evolution observation by synchrotron radiation X-ray tomography[J]. Materials & Design, 2021, 198: 109353.
[74] 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.

基金项目:稳定支持项目(2019-363)
收稿日期:2025-02-17;**录用日期**:2025-08-18
通讯作者:李楠(1983—),女,高级工程师,博士,研究方向为材料检测与评价,联系地址:北京市81信箱4分箱(100095),E-mail:nanli6@126.com

(本文责编:寇凤梅)