

基于同步辐射技术的稀土镁合金凝固组织调控研究

王永彪¹ 徐建林¹ 蒋军杰¹ 张乃方¹ 贾晶晶¹ 崔弘阳¹ 马作坡² 刘梦瑶¹ 杨初斌³

(1. 郑州轻工业大学机电工程学院, 郑州 450002; 2. 河南德威科技股份有限公司, 长葛 461507; 3. 赣南师范大学江西省镁合金材料工程技术研究中心, 赣州 341000)

摘要 系统综述了通过同步辐射技术研究Mg-RE合金凝固组织的进展。在枝晶生长动力学方面,同步辐射技术能够定量揭示合金成分与工艺参数对枝晶生长的影响以及三维重构枝晶形貌;在长周期堆垛有序(LPSO)相研究方面,该技术可以解析不同类型LPSO相的晶体结构、形成条件与形貌;在缺陷行为研究方面,同步辐射技术实现了对凝固过程中缺陷的精确表征,并且能够实时追踪缺陷的演化。最后对未来发展趋势进行了展望。

关键词 稀土镁合金;凝固组织调控;同步辐射技术;LPSO相

中图分类号 TG146.22;TG111.4 **文献标志码** A **DOI**:10.15980/j.tzzz.Z20250015

Solidified Structure Control of Mg-RE Alloy Based on Synchrotron Radiation Technology

WANG Yongbiao¹, XU Jianlin¹, JIANG Junjie¹, ZHANG Naifang¹, JIA Jingjing¹, CUI Hongyang¹,
MA Zuopo², LIU Mengyao¹, YANG Chubin³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002;
2. Henan Dewei Technology Co., Ltd., Changge 461507; 3. Jiangxi Magnesium Alloy Materials Engineering Technology Research Center, Gannan Normal University, Ganzhou 341000)

Abstract: The research progress in solidification structure of Mg-RE alloy through synchrotron radiation technology was systematically reviewed. In terms of dendrite growth kinetics, synchrotron radiation technology can quantitatively reveal the effects of alloy composition and process parameters on dendrite growth, and achieve 3D reconstruction of dendrite morphology. In aspect of long-period stacking ordered (LPSO) phase, the technology can analyze the crystal structure, formation conditions and morphology of different types of LPSO phases. With regard to defect behavior, synchrotron radiation technology can accurately characterize the defects during solidification process, and track the evolution of defects in real time. Finally, the future development trend was prospected.

Key Words: Mg-RE Alloy, Solidification Structure Control, Synchrotron Radiation Technology, LPSO Phase

随着全球资源与能源的日益紧张,国际社会对装备轻量化和节能减排的重视程度不断提高^[1]。镁合金是目前工程应用中密度最低的金属结构材料,其具有较高的比强度、良好的阻尼抗震性以及优异的机械加工性能,对实现交通运输、航空航天等领域的轻量化减重具有不可替代的作用^[2-5]。然而,纯镁及传统镁合金存在室温塑性差、高温强度低等缺陷,限制了其在承载结构件中的广泛应用^[6]。

研究发现,引入稀土元素(RE,如Gd、Y、Nd和Sm等)是解决镁合金性能瓶颈的重要策略。RE的添加可显著细化镁合金的显微组织,产生显著的析出强化和固溶强化效果,并大幅提升其高温抗蠕变性和耐腐蚀

性,使Mg-RE系合金成为极具潜力的轻质高强材料体系。凭借以上优势,Mg-RE系合金可在交通运输、航空航天等关键工程领域中用作轻量化承载构件,为相关装备的性能提升提供支撑,其兼顾低密度与强服役稳定性的特点,也为该类合金在更多高端装备制造场景中的应用奠定基础^[7-10]。

尽管Mg-RE合金性能优势显著,但其工业化应用仍面临凝固组织调控难题,而稀土镁合金的性能在很大程度上取决于其液态金属凝固时形成的微观组织,包括 α -Mg晶粒、第二相析出以及热裂、气孔等缺陷的形成^[11]。这些行为不仅直接影响其铸态性能,更会对后续热处理工艺响应及最终性能产生遗传性影响。因

收稿日期:2025-10-07;修订日期:2025-12-08

基金项目:河南省科技攻关资助项目(252102220101,252102221029,262102231028);河南省重点研发资助项目(261111230100)

第一作者:王永彪,男,1984年出生,副教授,E-mail:wsbiaoyongwang@163.com

引用格式:王永彪,徐建林,蒋军杰,等.基于同步辐射技术的稀土镁合金凝固组织调控研究[J].特种铸造及有色合金,2026,46(4):481-495.

WANG Y B, XU J L, JIANG J J, et al. Solidified structure control of Mg-RE alloy based on synchrotron radiation technology[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 481-495.

此,深入理解 Mg-RE 合金的凝固行为,并发展有效的组织调控技术,是开发高性能 Mg-RE 合金材料体系的关键。当前研究中,光学显微镜、扫描电镜等传统表征技术是分析合金凝固微观组织的主要手段,已为 Mg-RE 合金的凝固组织研究提供了静态、定性的认识,但是这些方法因自身局限性无法对合金凝固微观组织进行实时、动态、定量和准确的描述。同步辐射技术具有穿透力强、分辨率高、无破坏性等特点,成为表征合金凝固过程中微观组织变化的有力工具^[12]。该技术能够原位观察凝固过程中的枝晶生长、漂移、碰撞以及旋转等动态行为,同时可清晰捕捉 LPSO 相的形核历程以及凝固过程中缺陷的产生与发展,为理解镁合金凝固机制提供了前所未有的视角。目前,虽然同步辐射技术已被广泛应用于 Al 合金、Mg 合金、高熵合金等多种金属材料的凝固机理研究^[13-15],但是对于稀土镁合金的相关研究仍处于起步阶段。

本综述旨在系统梳理和评述近年来利用同步辐射技术研究稀土镁合金凝固过程与组织调控的进展,重点讨论枝晶生长的动态演化与调控机制,不同类型长周期堆垛有序(LPSO)相的形成规律与力学行为以及凝固缺陷的静态表征与动态演化。最后,基于现有成果,总结当前研究面临的挑战,并对未来技术发展多学科交叉融合的研究方向进行展望。

1 稀土镁合金的凝固特性与传统表征技术

1.1 稀土镁合金的凝固特性

稀土镁合金的凝固过程受稀土元素的理化性质及合金体系相图调控,呈现出与传统镁合金显著不同的特性,核心表现为枝晶生长模式复杂、第二相析出规律多样及凝固缺陷演化机制独特。从相图角度看,多数稀土元素(如 Gd、Y、Nd)与镁形成的二元相图中,稀土在镁中的固溶度随温度降低而显著减少,这种温度依赖性导致稀土镁合金在凝固过程中极易发生溶质再分配,当固液界面前沿的溶质富集达到液相线成分时,便会引发成分过冷,成为枝晶生长的主要驱动力^[16]。与 Mg-Al 合金中典型的柱状枝晶生长不同,稀土元素的加入可通过降低固液界面能、抑制晶界迁移等方式,促进等轴枝晶的形成^[17]。此外,稀土镁合金凝固过程中会析出多种金属间化合物,其类型与稀土元素的原子序数密切相关,轻稀土(如 La、Ce、Nd)倾向于形成体心立方结构的相如 $Mg_{12}RE$ 型相,而重稀土(如 Gd、Y、Dy)则易形成面心立方结构的相如 $Mg_{24}RE_5$ 型相^[18],这些第二相在凝固过程中的形核位置与生长形态对

合金性能影响显著。同时,稀土元素的高原子序数使其对 X 射线具有较强的吸收能力,这为后续同步辐射技术捕捉第二相的动态演化提供了天然的“衬度优势”。这些第二相在凝固过程中的形核位置、生长形态,以及稀土元素因高原子序数带来的特性,也会间接作用于凝固缺陷的演化,如稀土易促使晶界析出高熔点第二相或降低液相流动性,叠加凝固收缩应力易诱发热裂,其原子固溶或第二相还会阻碍位错滑移,导致凝固过程中位错局部堆积,此外还存在缩松、气孔等其他凝固缺陷。

1.2 传统表征技术

(1)光学显微镜(OM) 光学显微镜(OM)作为最基础的表征手段,能够反映合金的凝固微观组织特征,如晶粒尺寸、形态及分布。MANSOOR A 等^[19]利用光学显微镜成功捕捉到铸态 Mg-RE 合金的核心微观组织,清晰呈现出 Mg 基体、长方体相及枝晶状共晶相的分布形态,明确了共晶相主要弥散分布于晶界的关键特征,并辅助揭示了共晶相含量随稀土添加量增加而增加的规律。OM 技术为观察稀土合金的凝固组织提供了直观的表征,但 OM 分析仅能提供二维的形貌信息,且无法精确揭示元素分布、相结构等细节,无法进一步对凝固机理进行深入理解。

(2)扫描电镜(SEM) 扫描电镜(SEM)是研究稀土镁合金凝固微观组织时常用且有效的工具,当与能量色散谱(EDS)等表征技术联用时,可深入同步分析元素成分分布与晶体取向,更精准地建立凝固组织特征与调控机制的内在联系。WANG S F 等^[20]研究了激光表面重熔(LSR)后 Mg-4Y-3Nd-0.5Zr 合金的快速凝固组织,通过 SEM 发现 α -Mg 枝晶呈等轴晶结构且无显著分支,晶粒尺寸随扫描速度增加略有粗化,同时揭示了 Y、Nd 在晶界处富集而 Zr 在晶内富集的微偏析模式。CHEN H 等^[21]借助 SEM-EDS 研究电磁搅拌(EMS)制备的 Mg-6Gd-3Y-xZn-0.6Zr 合金,清晰观察到不同相的形态与分布,明确了 Zn 含量增加会使 LPSO 相从层状转变成块状为主,稀土元素更多富集于 LPSO 相而减少 β' 相析出,为合金组织优化与性能调控提供了试验支撑。然而,该技术仍存在一定局限性,如难以实现纳米尺度相的精确识别、无法提供晶体结构直接证据,以及对成分梯度的定量分析能力有限。

(3)X 射线衍射(XRD) XRD 是一种广泛应用于物相识别和晶体结构分析的技术,能够确定合金中的相组成和晶体结构,尤其适用于宏观相分析。YANG Y 等^[22]采用实验室级 XRD 分析了不同 Gd、Y 质量比对铸态 Mg-Zn-RE 合金相组成的影响,通过 XRD 图谱确认

了所有合金中均存在二十面体准晶相,并在高Gd、Y质量比合金中额外检测到W相和Mg-Zn二元相,而低Gd、Y质量比合金则以I相和Mg-RE相为主,明确了相组成随Gd、Y比变化的规律。

XRD技术为厘清稀土镁合金中的相组成提供了关键手段,其在物相鉴定方面的有效性也得到了验证,但在研究稀土镁合金凝固这类动态、非平衡、多相耦合的复杂过程时,其实实验室配置存在时间分辨率低、光源亮度有限、穿透能力与空间分辨率不足等显著瓶颈,要深入理解凝固这一动态过程,亟须借助更强大的技术。

(4)透射电镜(TEM) TEM可直接观察合金中晶粒的分布状态、第二相的尺寸大小与空间位置,清晰呈现凝固组织的微观形貌特征。在此基础上,TEM还可以与选区电子衍射(SAED)等技术联用,进一步解析凝固组织中各物相的晶体结构及相之间的取向关系,识别凝固过程中析出相的类型,弥补单一形貌观察的信息局限。YANG W P等^[23]通过TEM结合SAED系统表征了快速凝固Mg-6Zn-1Y-1Ce合金中不同区域的析出相分布与晶体结构,指出近辊面区域颗粒密度最高,并明确了T相与 α -Mg基体之间的取向关系。TONG X等^[24]通过TEM观察了不同工艺下Mg-7Gd合金的凝固组织,发现Gd偏析导致高Gd区域形成多种第二相,结合SAED、EDS分析后确认了第二相的晶体结构和成分,证实了感应加热与机械搅拌可显著抑制偏析,减少第二相形成,促进组织均匀化,明确了工艺对最终凝固组织的影响。

TEM技术能揭示稀土镁合金中复杂析出相的晶体结构、分布及其与基体的取向关系,但多侧重于静态、局部的结构表征,难以全面捕捉凝固过程中相的动态演化信息。此外,对于成分复杂、尺寸细小的早期析出相或界面处的精细原子结构,传统TEM的表征能力仍显不足。

4种表征技术的特性总结见表1。可以看出,以OM、SEM、XRD和TEM为代表的传统表征技术在稀土镁合金凝固组织研究中发挥了不可或缺的作用,从不同尺度对组织特征与演变规律提供了关键信息。但这些技术均存在各自的局限性,限制了对稀土镁合金凝固组织调控过程中枝晶演变、相变及缺陷行为等关键问题的深入探索。因此,发展能够实现原位、动态、三维、高分辨率的新型表征技术至关重要。基于高强度同步辐射光源的同步辐射技术,凭借其独特的优势,正逐渐成为揭示稀土镁合金凝固机理的强大工具。

表1 传统表征技术

Tab.1 Traditional characterization technologies

表征技术	优势	局限	应用场景
光学显微镜	操作简单,成本低,视野大,快速直观	分辨率低,无法分析成分与晶体结构	观察晶粒尺寸、形貌与分布,评估第二相宏观分布,检查凝固缺陷
扫描电镜	分辨率高,景深大,可配合EDS获得成分信息	无晶体结构信息,试样需导电,仅限表面形貌分析	分析第二相形貌、尺寸与分布,结合EDS分析第二相成分、元素偏析,界面分析,断口分析
透射电镜	分辨率极高,可同时获得形貌、成分和结构	制样困难,操作复杂,观测区域小,成本高	纳米析出相研究,晶体结构精确测定,研究相与基体取向关系,微观缺陷分析
X射线衍射	快速物相定性,可定量分析相含量与晶粒应变,非破坏性	无法观察形貌,对低含量相灵敏度低	物相分析、半定量分析相含量变化

2 同步辐射技术

同步辐射是带电粒子在磁场中以接近光速作曲线运动时沿切线方向发出的电磁辐射,其产生的X射线具有亮度高、频谱宽、准直性好、偏振性强且具有时间结构等一系列优异特性。同步辐射X射线源的出现提供了能够穿透不透明介质、以高时空分辨率原位研究动态过程的强大能力,革命性地推动了凝固学从静态、间接推论向动态、原位、定量研究的范式转变^[25]。

2.1 基本原理

同步辐射技术是以相对论性带电粒子的加速辐射为核心,通过精准调控实现X射线等关键波段利用的先进技术体系。首先,电子枪产生的初态电子经直线加速器加速至intermediate能量后,注入储存环;在储存环内,高频射频腔持续为电子补充能量,使其达到接近光速的相对论速度。随后,储存环中的弯转磁铁或插入件产生强磁场,对高速电子施加洛伦兹力,迫使电子做匀速圆周运动,运动方向的持续改变使电子处于加速状态,加速的带电粒子会向外辐射电磁波,即同步辐射^[26]。当电子能量 ≥ 1 GeV时,同步辐射频谱可覆盖至X射线波段,这些X射线需经光束线系统进一步调控,通过单色器提取单色X射线,借助聚焦镜优化光斑尺寸、准直器控制光束发散角,最终形成高亮度、高准直性、可适配不同试验需求的X射线束^[27]。基于这些X射线束,同步辐射技术发展出多种核心应用手段,如利用X射线吸收特性的照相成像、多视角重建的断层扫描,以及依托散射效应的X射线衍射(XRD)、小角X射线散射(SAXS)技术,可分别实现材料结构的可视化观测与微观结构参数的精准分析。

2.2 主要表征技术

(1) X射线照相成像技术(2D成像) X射线照相成像技术是同步辐射研究快速动态过程最直接的技术,其通过将试样置于单色或白光的平行X射线光束中,利用高速探测器记录透射X射线的二维强度分布,从而实现对凝固过程如同“拍摄电影”般的原位观测,图1为X射线照相成像的示意图。该技术主要依赖于吸收衬度,图像中的明暗变化直接反映了试样内部不同区域对X射线吸收能力的差异。在合金凝固研究中,照相成像技术的强大之处在于其优异的时间分辨率,使研究者能够直观地定量研究枝晶的形核、生长动力学、枝晶臂溶断与粗化、糊状区演变以及溶质输运等微观组织变化^[28]。

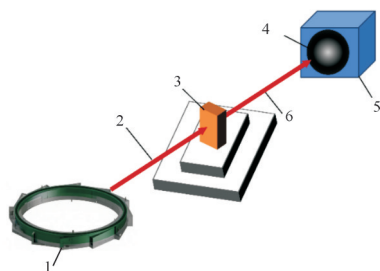


图1 X射线照相成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of X-ray imaging

1. 电子存储环 2. 入射X射线 3. 试样 4. 投影图像
5. CCD(探测器) 6. 透射X射线

(2) 断层扫描成像技术(3D成像) 断层扫描成像将二维投影信息扩展至三维空间,实现了对试样内部结构的无损、定量表征。其基本原理是让试样在光束中旋转180°或360°,并在成百上千个投影角度下采集二维投影图像,随后通过计算机重构算法计算出试样内部完整的三维密度分布^[29]。图2为断层扫描成像示意图。在凝固研究领域,断层扫描的应用可分为静态三维分析和动态四维分析两大类。静态三维分析能够精确量化凝固组织如枝晶的三维形貌、枝晶臂间距、孔隙的尺寸分布与连通性以及第二相(特别是高密度稀土相)的空间分布,信息量远超传统的二维金相分析。更具革命性的四维断层扫描(4D-CT)则将快速CT扫描与凝固过程相结合,能够在不同的凝固时间点捕获完整的三维结构,从而动态、定量地揭示枝晶网络的三维演化、相竞争生长以及缺陷的形成机制,为验证和发展凝固理论模型提供了重要试验数据。

(3) X射线衍射技术(XRD) 同步辐射X射线衍射技术并非对传统实验室XRD的简单强化,而是依托同步辐射光源优势,衍生出的一系列面向动态、原位、多维度结构解析的先进衍射技术。利用同步辐射的高

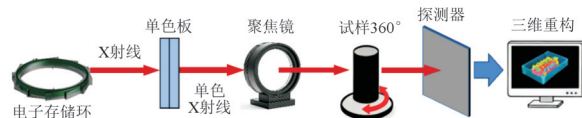


图2 断层扫描成像示意图

Fig.2 Schematic diagram of tomography imaging

通量,可实现秒级乃至毫秒级时间分辨率的原位XRD试验。该技术能够连续采集衍射图谱,精确测定不同相的形核顺序、生长速率等变化,定量揭示凝固路径与非平衡相变动力学,图3为X射线衍射示意图。同步辐射的高准直性光束可聚焦至微米甚至亚微米尺度,形成高分辨率XRD,结合试样扫描,可在凝固组织的特定微区进行衍射分析,用于绘制微观应变场、鉴定纳米析出相、研究相与基体的取向关系,揭示局部结构与性能的关联。三维同步辐射XRD及其动态版本(4D,时间维度),能够对嵌入试样内部的多个晶粒进行非破坏性的三维取向、形状及应力状态表征,并跟踪其在凝固过程中的演变历史,为了解凝固过程中晶粒的形核、竞争生长、择优取向的形成以及晶间应力的发展提供全视野、量化的观测手段^[30]。

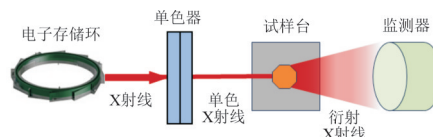


图3 X射线衍射示意图

Fig.3 Schematic diagram of X-ray diffraction

(4) 小角X射线散射(SAXS) 小角X射线散射测量的是X射线在极小的散射角范围内的相干散射强度,其对试样中尺度在纳米到亚微米范围内的电子密度起伏极为敏感,从而统计性地表征纳米析出相的尺寸、形貌、分布和数量密度^[31],图4为SAXS示意图。对于稀土镁合金,该技术能够无损、统计性地定量表征长周期堆垛有序相(LPSO相)在形成过程中的结构参数,包括其层状周期的长度、尺寸分布、体积分数以及形成动力学。通过原位SAXS试验,可以精确追踪在凝固过程后续的热处理或缓慢冷却中LPSO相从初始形成到稳定化的动态演变轨迹,揭示稀土元素种类、含量及工艺条件对其纳米结构特征的调控规律,为理解LPSO相带来的强化与阻尼性能提升机制提供最直接的试验证据。4种模式的特性见表2。

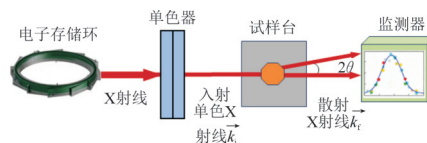


图4 小角X射线散射示意图

Fig.4 Schematic diagram of small angle X-ray scattering

表2 同步辐射主要表征技术在凝固研究中的特性对比

Tab.2 Comparison of main characterization technologies of synchrotron radiation in solidification research

成像模式	空间分辨率	时间分辨率	数据维度	应用场景
照相成像	微米级	毫秒-微秒	二维	动态观测凝固微观组织变化
断层扫描成像	亚微米级	分钟-小时	三维	获取内部三维结构演化
衍射成像	微米级	秒-分钟	三维	测定晶体结构及取向变化
小角散射	纳米级	秒-毫秒	一维散射曲线	表征纳米尺度微观结构

3 同步辐射技术在稀土镁合金凝固组织调控中的应用

同步辐射技术可实现从原子尺度到宏观尺度的凝固过程动态追踪,已成为揭示稀土镁合金凝固微观机理的“超级显微镜”。

3.1 枝晶生长动力学研究

枝晶形态是镁合金凝固组织的核心特征,其结构与演化直接决定合金力学性能,具有密排六方结构(hcp)的稀土镁合金枝晶表征长期受限于传统方法的低分辨率与静态性,而同步辐射技术突破了传统表征的局限,成为解析枝晶微观机制的关键工具^[32-34]。

3.1.1 合金成分调控枝晶生长

同步辐射X射线衍射、断层扫描等技术为解析合金成分-相演化-枝晶生长的内在关联提供了有力支撑。MENDIS C L等^[35]首次使用原位X射线衍射技术追踪到了不同Gd含量(质量分数,下同)对相演化的影响,发现随着Gd添加量增加,枝晶间金属间化合物含量增

多,分布从稀疏到双相分布,对枝晶边界的约束作用逐步增强,且Gd超固溶会诱导新相形成以强化枝晶生长限制。随后BUZOLIN R H等^[36]将原位同步辐射衍射与多种表征手段结合,探究了Gd、Nd添加对ZK40合金的影响,发现稀土元素对枝晶生长具有显著调控作用,Nd有效促进了枝晶的形核与生长,其金属间相虽同样沿晶界半连续分布,但变形过程中化合物易断裂,对枝晶边界的约束作用弱于Gd添加组,体现Nd对枝晶生长动力学的独特调控效应。GAVRAS S等^[37]使用SEM、EDS、TEM结合XRD研究了非稀土元素Zn对Mg-4Nd基合金的调控作用,发现Zn与Nd形成的准二元Mg₃(Zn,Nd)相和三元Mg₅₀Nd₈Zn₄₂相是调控微观组织与力学性能的核心。DU J L等^[38]通过同步辐射断层扫描技术与EBSD联用,研究了单一元素比例调整对枝晶各向异性的影响,发现取向相关的表面能与结晶各向异性是调控枝晶生长的核心,Gd和Y因与Mg同为hcp结构且结晶各向异性弱,使 α -Mg枝晶呈现18主枝形态,此研究为理解hcp镁合金枝晶形成规律提供了支撑。上述研究成果总结见表3。

综上,同步辐射技术为探究稀土镁合金中元素添加对枝晶生长的调控机制提供了强有力的手段,清晰表明了不同元素在成分、添加量上的差异,会从枝晶形核生长、相演化、各向异性及晶界约束等多维度产生显著调控效应,这不仅深化了对HCP结构镁合金枝晶形成规律的理解,也为通过成分设计优化稀土镁合金微观组织与力学性能提供了理论支撑与研究思路,凸显了同步辐射原位表征技术在材料成分-组织-性能关联研究中的独特价值,为后续高性能稀土镁合金的研发奠定基础。

表3 元素添加对稀土镁合金枝晶的调控效应^[35-38]

Tab.3 Regulation effect of element addition on dendrite of Mg-RE alloy^[35-38]

合金	添加元素	w _B /%	枝晶调控效应
Mg-4Nd	Nd	4.20	通过同步辐射XRD物相鉴定,确认Nd添加主要形成Mg ₁₂ Nd相,沿枝晶界连续分布,易导致裂纹沿枝晶界扩展,晶粒较粗大。
ZK40-2.35Nd		2.35	组织铸态呈显著树枝状结构,通过同步辐射XRD分析,确认Nd添加促进了枝晶的形核与生长,金属间相沿晶界半连续分布,对枝晶边界约束弱于添加Gd。
Mg-4Nd-8Zn	Zn	8.00	通过高分辨同步辐射XRD定性分析,确认Zn添加使枝晶间相从连续相转为半连续相+层状共晶相,显著细化晶粒。
ZK40-1.7Gd	Gd	1.70	铸态呈胞状结构,通过同步辐射XRD实时监测与分析,确认Gd添加未促进枝晶形成,但形成强晶界钉扎相,显著抑制晶界迁移。
Mg-10Ca-5Gd		5.00	同步辐射XRD连续监测凝固路径,发现枝晶间仅形成Mg ₂ Ca单一化合物,枝晶中化合物含量较低,对枝晶边界约束弱。
Mg-10Ca-10Gd		9.5	同步辐射XRD未检测到新相,Gd固溶于Mg ₂ Ca和 α -Mg相,枝晶中化合物量略增,对枝晶边界约束增强。
Mg-10Ca-20Gd		21.00	通过同步辐射XRD确认枝晶间形成Mg ₂ Ca+Mg ₃ Gd双化合物,枝晶中化合物量显著增多;冷却速率降低Mg ₃ Gd相变温度。
Mg-Gd(二元)		1.56	通过同步辐射断层扫描三维表征枝晶的18主枝3D形态,从晶体各向异性角度揭示Gd降低合金表面能,但不改变枝晶择优取向的调控本质。
Mg-Y(二元)	Y	1.56	通过同步辐射断层扫描三维表征确认与Mg-Gd系类似的枝晶形貌特征,晶体各向异性弱,证实Y元素对hcp-Mg枝晶基本形态无显著影响。

3.1.2 工艺参数调控枝晶生长

原位X射线成像、断层扫描技术的发展使得工艺参数对枝晶生长的动态影响可被实时捕捉。许多研究以同步辐射原位表征为核心手段,围绕冷却速率、抽拉速率、温度梯度、铸件截面几何及热处理等工艺参数,揭示其对镁合金枝晶形貌、间距和生长方向的调控规律,为工业生产中枝晶组织的精准控制提供技术路径。

冷却速率作为最基础的工艺参数,其对枝晶的调控机制通过同步辐射技术得以清晰解析。WANG Y B等^[39]对Mg-6Gd合金进行了原位X射线成像研究,见图5,实时捕捉了不同冷却速率下枝晶演变,直观展示出等轴晶、“蝴蝶状”枝晶及等轴晶向柱状晶的转变等关键形貌,定量揭示了Gd成分调控的溶质偏聚与枝晶形态的关联,为hcp结构合金凝固调控提供关键试验依

据。在此基础上,进行了针对低冷速的Mg-Gd合金研究^[40],将原位同步辐射X射线照相与相场模拟进行了结合,可以看出,随着冷却速率的提升,枝晶间距逐渐减小,枝晶取向向温度梯度偏转,且固液界面速度与固相率提升,同步辐射技术为相场模拟提供了精准试验数据,二者协同量化出枝晶间距与冷却速率的对数线性关系,揭示了Gd的溶质扩散特性对枝晶溶质分布的主导作用,填补了低冷速下枝晶形貌演化规律的空白。赵雪婷等^[41]利用X射线断层扫描观察Mg-6Gd-3Y-0.5Zr合金时发现,随着冷却速率的提高,网状共晶组织更密集连续,第二相尺寸减小且分布更均匀,通过同步辐射断层扫描的3D量化能力,拟合出第二相体积分数与共晶体积分数随冷却速率的变化方程,明确了冷速对枝晶尺寸的影响。

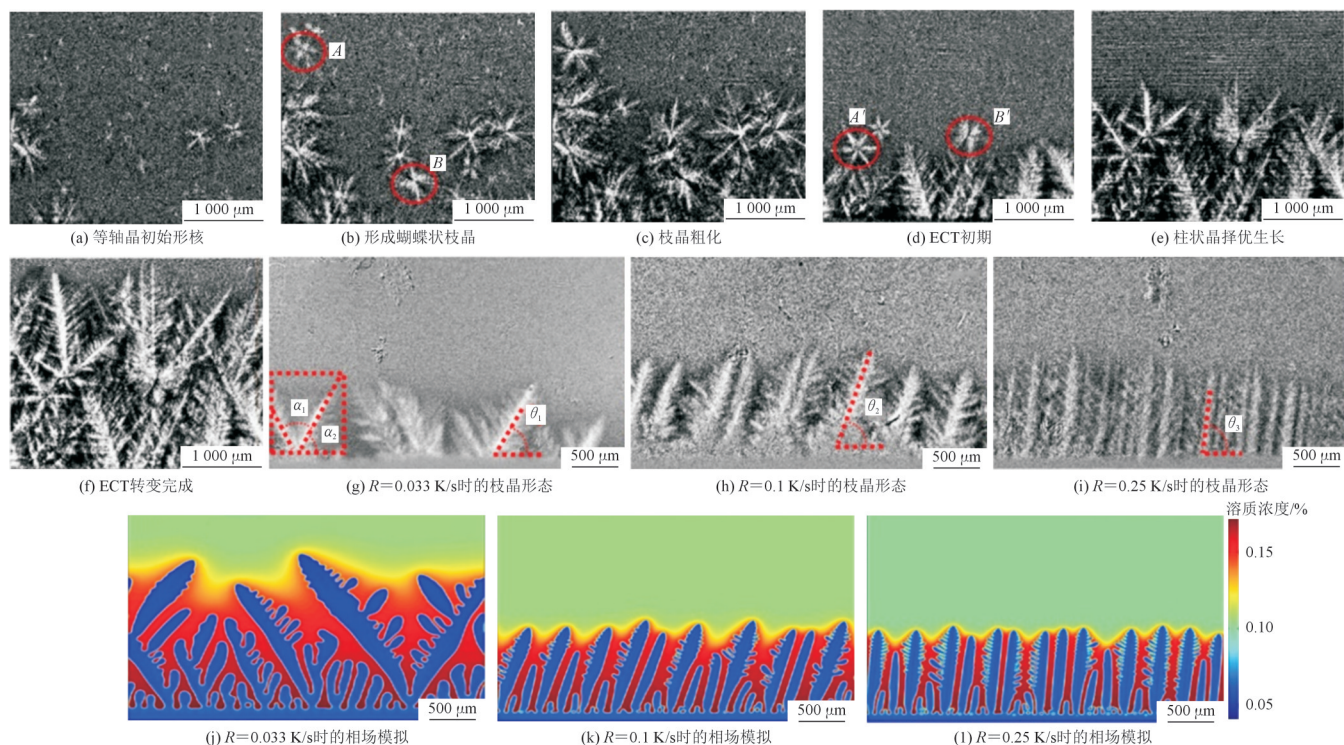


图5 Mg-6Gd合金枝晶形态的演变^[39-40]

Fig.5 Dendritic morphology evolution of Mg-6Gd alloy^[39-40]

不同凝固方式对枝晶生长的调控机制同样可以采用同步辐射技术精准揭示。罗时峰^[42]采用原位同步辐射X射线成像观察Mg-Gd合金的凝固过程,在等轴凝固中,观察到枝晶呈六重对称,但溶质重力流动抑制下部枝晶臂生长,形成“自我中毒”,调控枝晶臂长度均匀性;在定向凝固中,捕捉到偏离温度梯度的枝晶与相邻枝晶形成高溶质液池,溶断高次枝晶臂,表明温度梯度与溶质富集的协同作用是定向凝固细化枝晶的核心逻辑。GUBICZA J等^[43]针对快速凝固后的热调控,通过同步辐射XRD监测到了退火过程中基体与Mg₂Ca相的热膨胀差异及相溶解行为,发现凝固后温度场变化

仍会通过相演变与热应力影响枝晶稳定性,填补了凝固后处理对枝晶调控机制的认知空白。可见,同步辐射技术明确了不同凝固方式通过温度场、溶质场调控枝晶形貌与结构的核心路径,为稀土镁合金枝晶精准调控提供了依据。

实际铸造中的工艺因素如铸件截面产生的几何尺寸效应等对凝固组织的影响作用也可以通过同步辐射技术来实现微观机制解析。LIU X T等^[44]通过原位X射线照相研究了铸件截面几何形状对Mg-Gd合金枝晶的影响,见图6,可见截面几何的变化带来的尺寸效应会改变局部温度梯度与溶质浓度梯度分布,进而影响

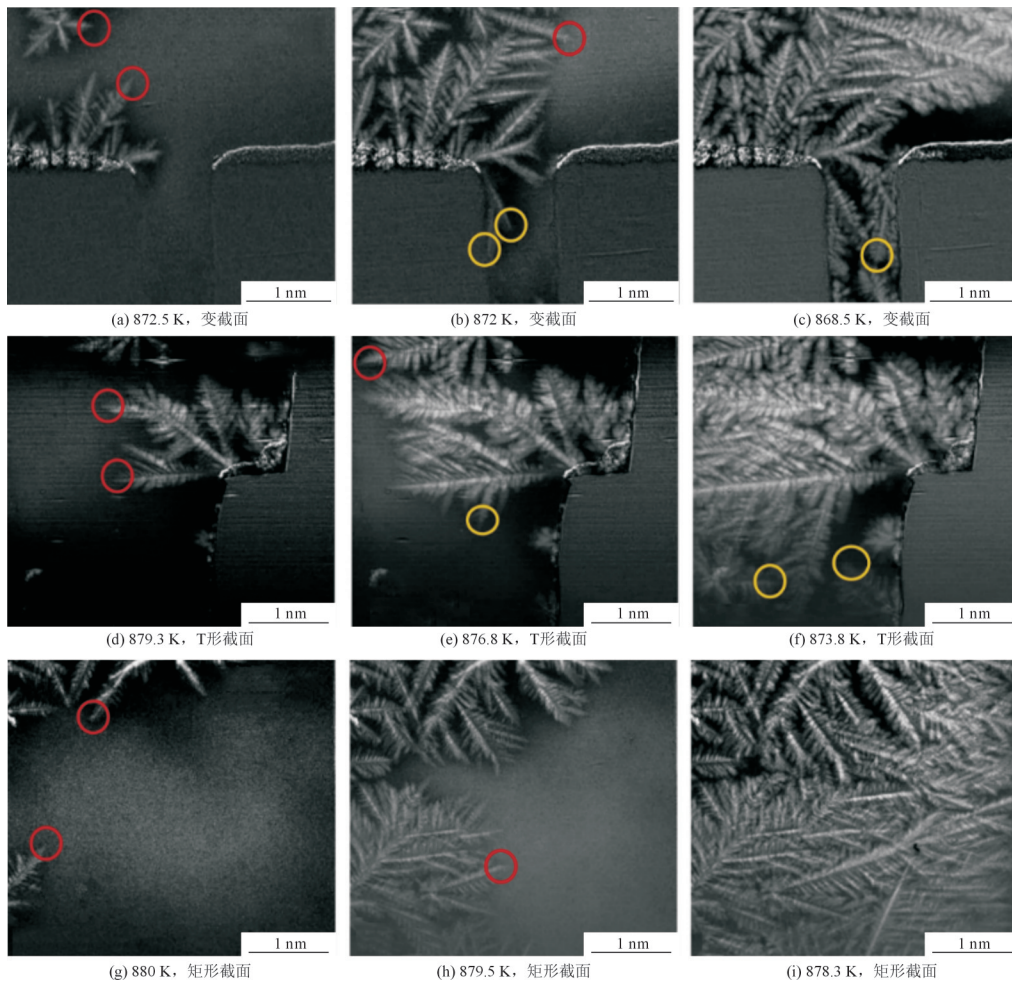


图6 不同工艺条件下的稀土镁合金的微观组织^[44]

Fig.6 Microstructure of Mg-RE alloy under different process conditions^[44]

枝晶生长行为,在不同截面结构区域均可以观察到等轴晶向柱状晶的转变,且生长方向相反的枝晶会因溶质富集效应受到抑制。这揭示了截面几何形状通过热溶质场调控枝晶演化的内在机制,为铸件结构优化提供了微观层面的理论参考。

同步辐射技术可有效解析工艺因素对镁合金凝固组织的微观作用机制,既为铸件结构优化提供了微观层面理论支撑,也实现了对合金微观结构演变的精准表征与量化分析。

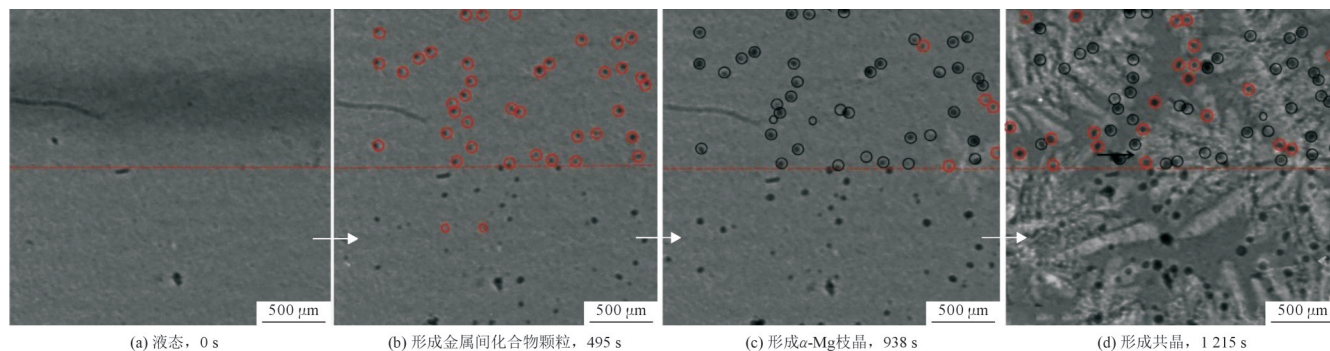
3.1.3 枝晶三维表征与相演化

同步辐射技术凭借高时空分辨率、高穿透性及多模态表征能力,已成为镁合金枝晶形态研究的核心支撑手段,克服了传统金相分析无法动态追踪、难以实现3D量化的局限,系统揭示了镁合金凝固过程中枝晶的动态演化、3D结构及相态关联,为枝晶形成机制提供直接试验证据。

同步辐射技术与多表征联用为修正相图、明确凝固路径提供技术支撑。SZAKACS G等^[45]首次利用原

位同步辐射衍射技术追踪 Mg-15Gd 合金的凝固过程,发现其并非遵循平衡相图的简单共晶凝固,而是先形成亚稳相 $GdMg_3$,后转化为稳定相 $GdMg_5$,且高冷却速率下 $GdMg_3$ 更显著,为 Mg-Gd 体系相演化及热力学数据库完善提供了创新性试验依据。WONG C等^[46]发现 Mg-3Al-14La 合金的凝固行为与现有热力学描述存在显著差异,研究通过同步辐射成像技术揭示了其完整凝固序列,见图7。证实该合金实际为过共晶合金,修正了 Mg-Al-La 相图富镁角的凝固路径,阐明了现有相图预测与原位成像试验中实际观察到的枝晶形核与生长行为之间的偏差及原因。

在稀土镁合金枝晶三维表征方面,YANG M等^[47]首先通过X射线断层扫描精准重构 Mg-Gd 合金 α -Mg 枝晶 18 主枝 3D 形态,又结合相场模拟为 hcp 合金枝晶研究提供了关键技术理论与理论支撑。有研究者通过原位同步辐射 X 射线断层获得了 Mg-RE 合金凝固过程中微观结构的三维演变见图8。DOMONKOS T等^[48]通过断层扫描技术实现了 Elektron 21 合金凝固过程中 α -Mg 枝晶的 3D 动态演变,见图8,弥补了传统技术难



(a) 液态, 0 s (b) 形成金属间化合物颗粒, 495 s (c) 形成 α -Mg枝晶, 938 s (d) 形成共晶, 1 215 s

图7 Mg-3Al-14La合金凝固组织的原位同步辐射成像^[46]

Fig.7 In situ synchrotron radiation imaging of solidification microstructure of Mg-3Al-14La alloy^[46]

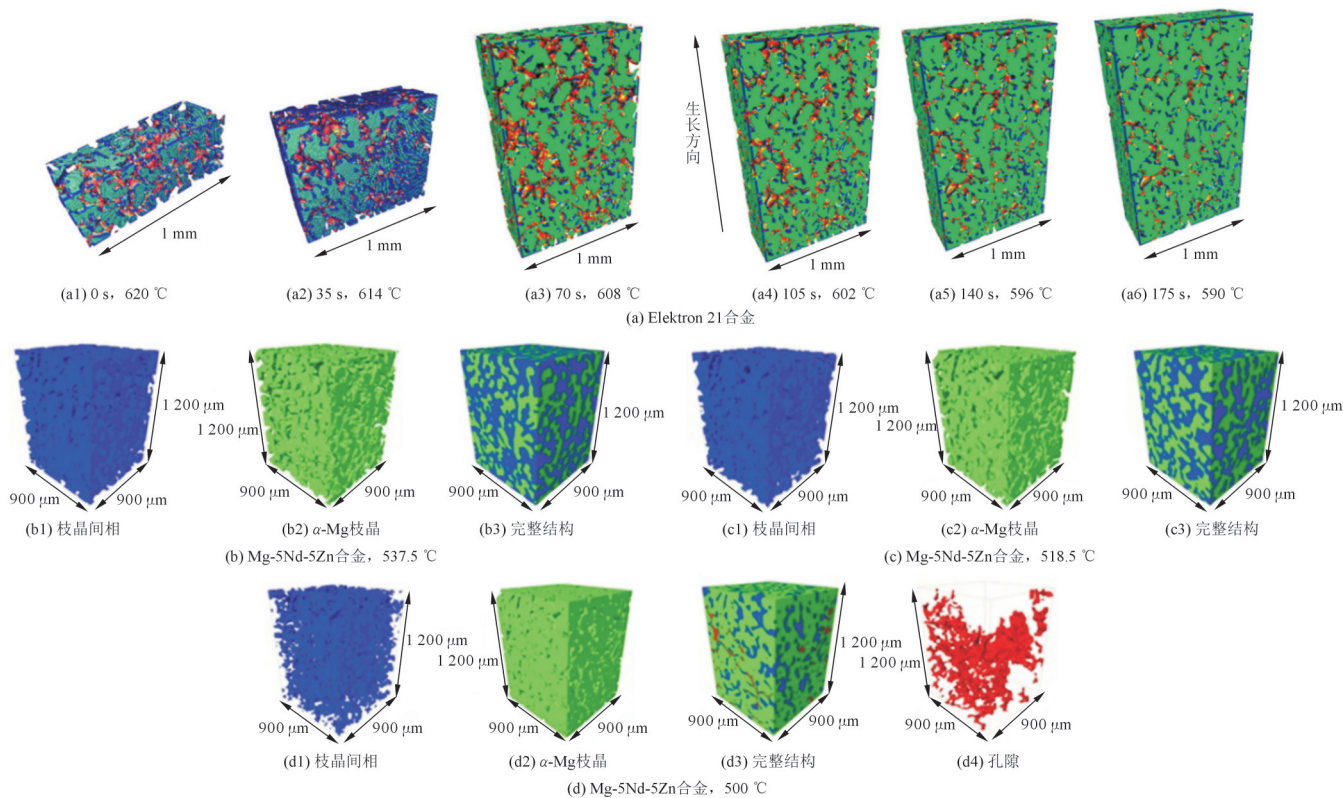


图8 原位同步辐射X射线断层扫描获得的Mg-RE合金凝固过程中微观结构的三维演变^[48-49]

Fig.8 3D microstructure evolution of Mg-RE alloy during solidification obtained by in situ synchrotron radiation X-ray tomography^[48-49]

以捕捉连续微观变化的局限;其次,通过断层扫描数据分析得到了生长速度与间距的线性关系,为解析合金凝固微观机制、建立生长动力学模型提供了直接试验数据支撑。SUBROTO T等^[49]通过断层扫描技术捕捉到了Mg-5Nd-5Zn合金凝固过程中的3D微观结构演化,见图8b~图8d,可见 α -Mg枝晶呈树枝状交织,枝晶间相填充于枝晶间隙,孔隙仅在凝固终期形成。对比传统2D表征,3D重构更能清晰展示 α -Mg枝晶的空间连通性,修正了枝晶连通性的低估问题,同时通过非破坏原位实验还原了结构真实状态,精准量化枝晶体积分数、表面积及曲率分布,为微观结构演变提供了可视化证据。

综上,同步辐射技术不仅能够将合金成分、工艺参

数与微观结构、相组成定量地关联起来,而且可以清晰展现枝晶的三维复杂形貌与相演化序列,为理解凝固机理和优化组织调控提供了直接的试验证据,彻底打破了传统表征“静态观察”、“二维局限”、“低分辨率”的瓶颈。同步辐射技术让枝晶生长的微观机制从“黑箱”变为“透明”,深化了研究者对hcp结构镁合金凝固规律的认识,更为高性能稀土镁合金的成分优化、工艺设计与性能预测提供了坚实的技术支撑。未来该技术若能与机器学习等计算方法更深度地融合,有望实现对镁合金枝晶生长的精准预测与主动设计,从而加速高性能镁合金的开发进程。

3.2 长周期堆垛有序相(LPSO)研究

LPSO相是稀土镁合金中的特色强化相,其可显著

提升合金的室温强度、高温强度及抗蠕变性能,因此成为稀土镁合金组织调控研究的核心关注点之一,其结构类型、分布特征及演化规律的解析,对开发高性能稀土镁合金具有重要的参考意义^[50-51]。

3.2.1 18R型LPSO相的同步辐射研究

18R型是稀土镁合金中最常见且研究最深入的LPSO相类型,其特征为沿hcp-Mg基体c轴方向每18层原子形成周期性堆叠层错,并伴随RE(Y、Gd)与过渡金属(Zn、Ni)原子的层间富集。同步辐射技术为18R型LPSO相研究提供了高空间、时间分辨率的表征手段。

针对Mg-Y-Zn合金体系中的18R型LPSO相,多项研究借助同步辐射先进表征技术逐步揭示了其微观机理。GARCES G等^[52]利用同步辐射高能XRD技术实时追踪快速凝固Mg₈₈Y₈Zn₄合金中18R相的衍射峰强度,发现凝固方式显著影响18R相在凝固组织中的分布与占比,阐明了18R相从堆垛层错演变的过程,揭示了其在快速凝固组织中通过层错形核和扩散控制的生长机制。KIMURA S等^[53]从变形机制的角度入手,通过结合同步辐射微劳厄衍射与晶界成像技术(GILP),精准捕捉了定向凝固Mg₈₅Zn₆Y₉合金在压缩过程中的晶界演变与18R相曲折行为,见图9,实现了EBSD无法观测的内部晶界可视化,证实了曲折是18R相的主要塑性变形机制,为小尺寸试样中18R型LPSO相的变形机制提供了原位动态证据。然而,关于18R结构有序化的微观本质及对稳定性的影响仍有待深入。OKUDA H等^[54]进一步通过同步辐射SAXS实现了18R纳米尺度的结构解析,发现Mg₈₅Y₉Zn₆铸态凝固组织初始即共存10H与18R型LPSO相,明确了其结构本质,证实了18R相中L12型纳米簇的面内排列有序化过程。GUBICZA J等^[55]采用同步辐射原位XRD精准捕捉RSRC工艺Mg-Y-Zn-Al合金相演变,不仅发现其凝固组织中次生相中18R与14H相的共存现象,更揭示了18R相长程有序化机制,为18R相高温热稳定性评估提供了试验支撑。

18R型相作为LPSO相的核心代表,其研究充分彰显了同步辐射技术的独特价值。同步辐射技术的应用不仅阐明了凝固工艺对18R相的调控作用及“层错形核-扩散生长”的形成本质,揭示了其以曲折为主导的塑性变形机制,更将研究深入至纳米尺度,明确了L12型有序团簇的排列与长程有序化过程,从而解释了18R相的结构本质与高热稳定性来源,实现了从宏观现象到微观机理的深刻揭示。

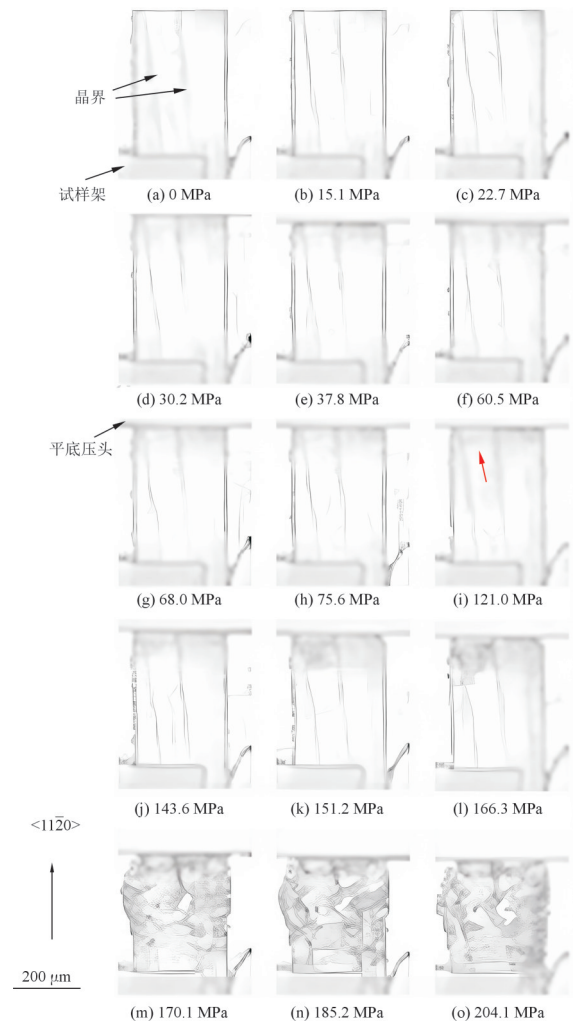


图9 定向凝固Mg₈₅Zn₆Y₉合金衍射微观成像^[53]

Fig.9 Diffraction microscopic imaging of directionally solidified Mg₈₅Zn₆Y₉ alloy^[53]

3.2.2 10H型与14H型LPSO相的同步辐射研究

10H型与14H型LPSO相是稀土镁合金中另一类重要的长周期结构,其堆叠周期分别为10层与14层原子,通常与18R相共存或在特定成分中单独存在,且主要出现在凝固阶段之后的热处理和变形加工时期,同步辐射SAXS技术因其对长周期结构的敏感性,成为研究这两类相稳定性与相变规律的重要手段。

OKUDA H等^[56-57]通过同步辐射SAXS对Mg-RE-Zn合金进行了一系列研究,结果见图10。发现14H相的形成与转变具有合金成分依赖性,见图10a和图10e。在Mg₈₅Gd₉Zn₆合金中,证实温度是HCP向14H型LPSO转变的关键,而非簇尺寸或密度,为II型LPSO合金相变机制提供了直接试验证据,推动对Mg-RE-Zn系相转变规律的认知;在铸态Mg₉₇Y₂Zn₁合金中,14H相优先在18R相内部形核且无共格关系,见图10f~图10h,证实了14H是该合金长时退火后的稳定相,L12团簇稳定性是维持14H结构的核心,且其热稳定性与18R相当。

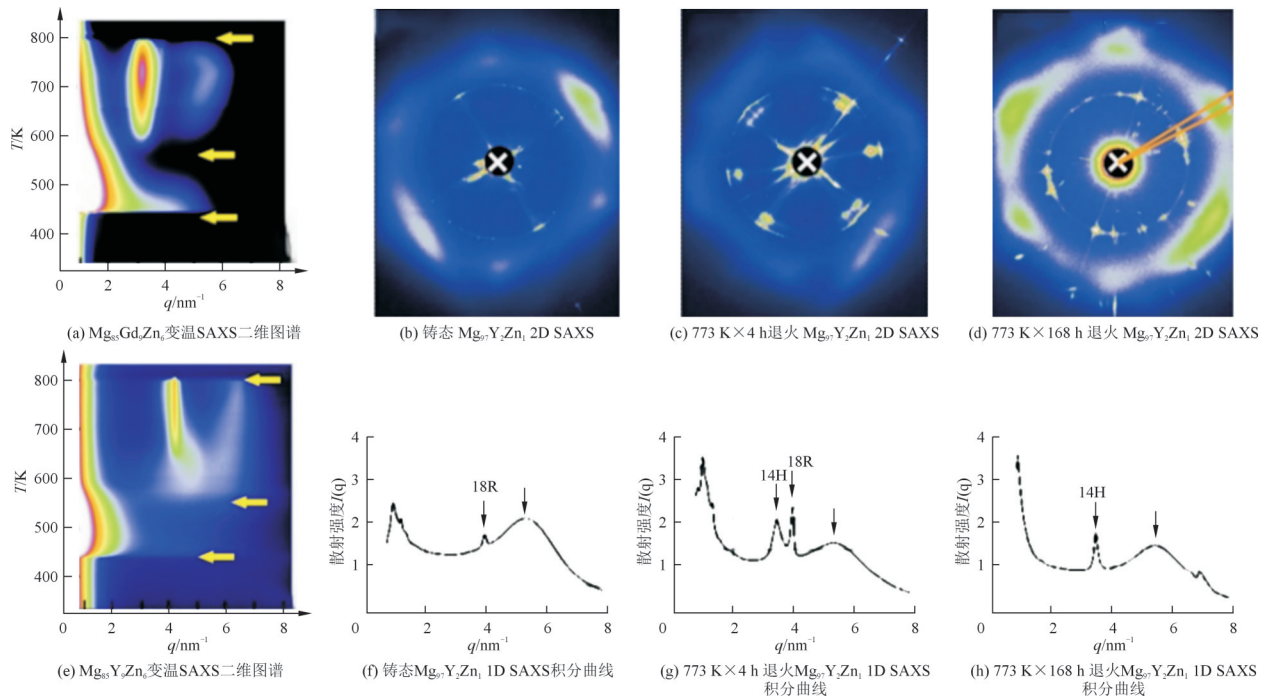


图10 二维SAXS图谱^[56-57]

Fig.10 Two dimensional SAXS spectra^[56-57]

10H型LPSO相的稳定性显著低于18R型,同步辐射SAXS可精准捕捉其在加热及退火过程中的分解、向18R相的转变及面内有序化域的演变规律。OKUDA H等^[58-59]通过同步辐射SAXS研究了Mg₈₅Y₉Zn₆合金10H与18R相的演化,见图11,发现10H型LPSO相在铸态Mg₈₅Y₉Zn₆合金中始终处于非主导稳

定状态:加热时,其比18R相更早失去结构稳定性,是合金热失效前先分解的相;退火时,其又会向更稳定的18R相转化,且面内有序性远不及后者。SAXS印证了10H相的转变行为与合金体系相稳定性、面内有序化演变密切相关,为理解LPSO相竞争生长与温度响应机制提供了理论支撑。

同步辐射SAXS技术展现出了对10H与14H型LPSO相长周期结构演变的独特追踪能力,厘清了这些相与18R相之间的竞争与转化关系,明确了其形成对成分与温度的依赖性,并证实了L12团簇的稳定性是维持14H结构的关键。这些研究系统揭示了不同LPSO相的相对稳定性序列,为理解合金体系的相平衡与相变路径提供了试验依据。

3.2.3 不同微观形貌LPSO相的同步辐射研究

稀土镁合金中LPSO相的微观形貌主要分为块状与层片状等,同步辐射技术不仅能区分不同形态的LPSO相,还能揭示LPSO相中L12团簇的有序化过程,为理解LPSO相的形成机制提供关键信息。在块状LPSO相研究方面,XU C等^[60]对具有双峰组织的Mg-Gd-Y-Zn-Zr合金进行同步辐射X射线断层扫描三维重建,见图12,发现块状LPSO相呈拱形分布于晶粒间,优化块状LPSO相形态可以缓解应力集中,进一步提升合金综合性能,揭示了块状LPSO相与晶粒的变形不协调是裂纹形核与扩展的主因。

在层片状LPSO相研究方面,OKUDA H等^[61]通过多色同步辐射SAXS等技术对Mg-Zn-Y合金中的

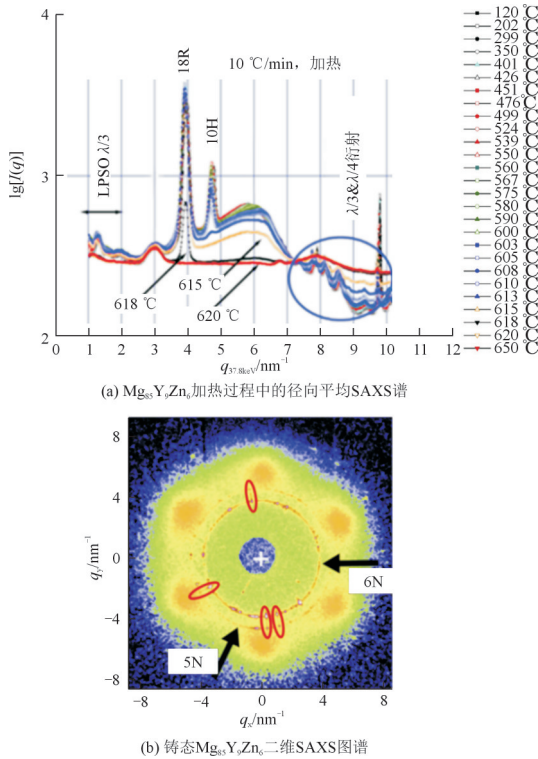


图11 SAXS图谱^[58-59]

Fig.11 SAXS spectra^[58-59]

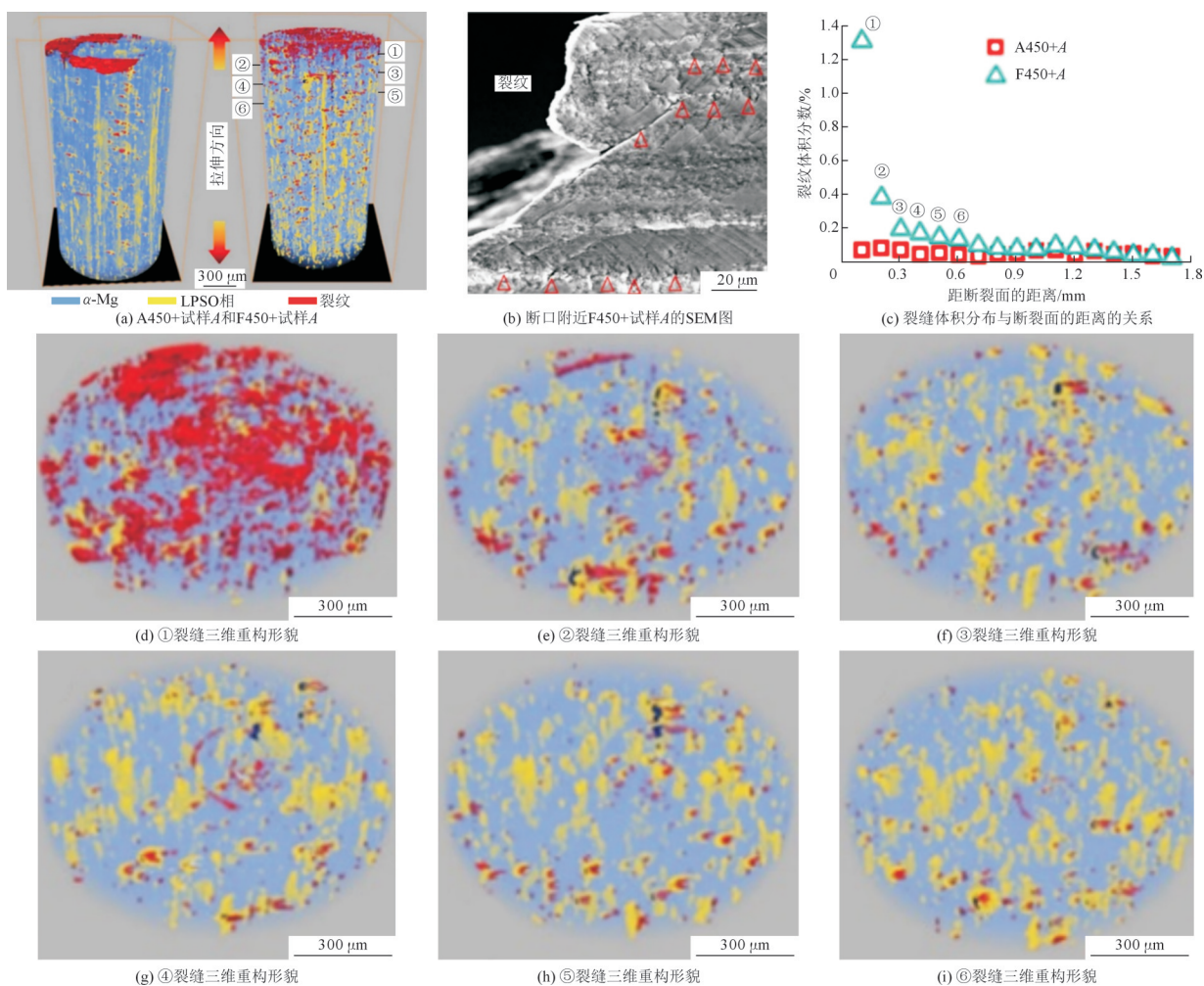


图 12 拉伸断裂的 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的 X 射线断层扫描三维重建^[60]

Fig.12 3D reconstruction of tensile fractured Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy by X-ray tomography^[60]

LPSO 相展开了系统研究,明晰了层片状 LPSO 相的高温行为规律,加热时层片状相与液相共存部分熔融、冷却时层片状相形成过冷,见图 13a~图 13b,层片状 18R 结构的溶解与 L12 簇面内有序消失同步发生,也证实了 L12 团簇是维持层片完整性的关键。在此基础上,该团队进而明确了“纳米团簇优先”的分层自组装路径^[62],见图 13c~图 13d, SAXS 追踪到纳米团簇从无规则分布到二维有序排列,完整再现了层片状 18R 结构的形成动态,最终组装成层片状结构,明确了 L12 团簇尺寸稳定及堆叠层错对层片状形貌的关键作用。

同步辐射研究通过对不同形貌 LPSO 相的解析,揭示了一个核心共性,其宏观形貌与力学性能取决于微观尺度上 L12 有序团簇的排列状态与演化过程。块状与层片状等形貌差异,实质上是内部纳米团簇在不同热力学和动力学条件下有序组装路径的空间外显。这一发现将形貌特征与形成机制及最终力学行为统一于“纳米团簇有序化”框架之下,为理解 LPSO 相的结构-性能关联及实现形貌的定向调控提供了理论基础。

显而易见, XRD、SAXS 等同步辐射技术以其对 LPSO 结构的敏锐探测能力,成为解锁稀土镁合金

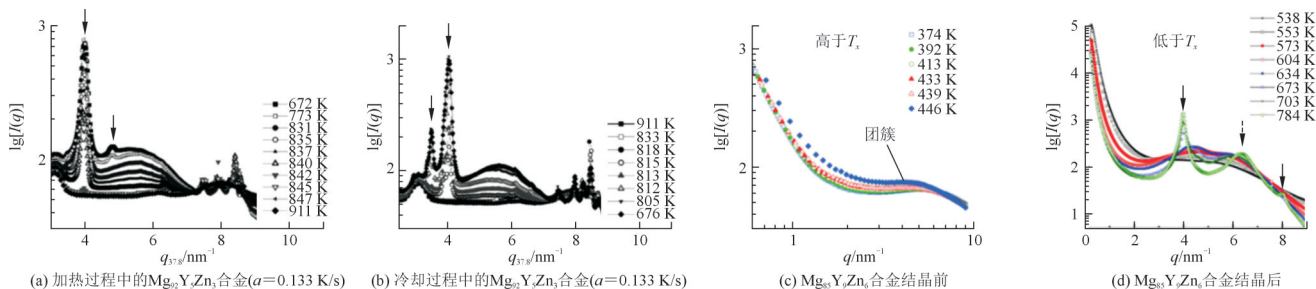


图 13 SWAXS 图谱^[61-62]

Fig.13 SWAXS spectra^[61-62]

LPSO相奥秘的“核心钥匙”,实现了从静态结构表征到动态演化追踪的全方位覆盖,突破了传统表征技术的局限,如实现EBSD无法观测的内部晶界可视化。这种“穿透式”的研究能力,使得研究者能够建立起LPSO相“结构-形成条件-力学性能”的关联,为定向调控LPSO相的类型、分布及形貌提供了坚实的试验依据。可以说,同步辐射技术的应用,推动稀土镁合金LPSO相研究从现象描述迈入机制解析的新阶段,为高性能稀土镁合金的精准设计与开发提供了新的技术路径,其在未来复杂合金体系微观结构研究中的价值将愈发凸显。

3.3 缺陷行为研究

3.3.1 热裂

热裂是稀土镁合金凝固过程中因枝晶粗化、液态金属补缩不足等原因引发的致命缺陷,直接破坏构件结构完整性,限制其工程应用^[63]。目前已有大量对Mg-RE系合金热裂行为的研究,EASTON M A等^[64]创新性提出镁稀土合金的热裂倾向因所用稀土元素不

同差异显著,核心原因是凝固范围的差异。Mg-Nd基合金热裂敏感性最高、Mg-Ce基合金次之、Mg-La基合金几乎无热裂。王志等^[65]发现Ca和Y元素添加能降低Mg-1.5Zn合金热裂敏感性,且Y效果更优。YOU S H等^[66]也发现适量Y添加能提升Mg-xY-0.5Zr合金的高温稳定性、减少热裂风险。LENG F等^[67]研究表明,Mg-4Zn-xSn-0.6Zr合金热裂敏感性随Sn添加量先降后升。但是传统研究中所用的表征方法及测试装置在量化缺陷与实时捕捉缺陷演化方面存在固有局限,这也制约了对热裂形成机制的更深入理解。

同步辐射技术则解决了这一难题,TOLNAI D等^[68]采用原位同步辐射衍射与断层扫描技术实时捕捉Mg-Nd-Zn合金凝固过程,明确了合金的凝固序列,阐明了热裂的诱因是Zn元素导致枝晶粗化,阻碍熔体补缩、破坏补缩通道。SONG J F等^[69]通过同步辐射断层扫描技术对二元合金热撕裂体积进行精确三维量化,建立了其热裂敏感性的排序,见图14,发现热膨胀系数与半固态力学性能是Mg-0.9Y和Mg-2Gd等合金热裂异常的关键因素。

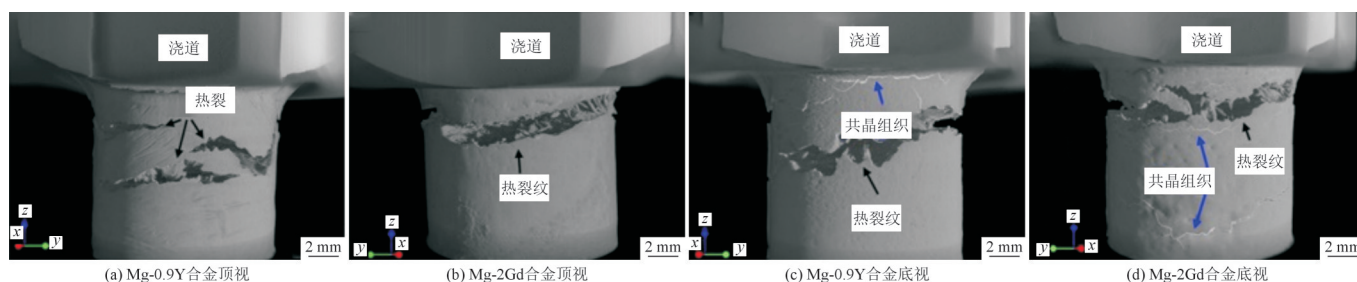


图14 同步辐射断层扫描3D重构图^[69]

Fig.14 3D reconstruction of synchrotron radiation tomography^[69]

3.3.2 孔隙

孔隙会削弱有效承载面积,显著劣化合金的力学性能。GASTALDI J等^[70]通过同步辐射X射线成像技术量化Zn-Mg-RE合金孔隙,发现Zn-Mg-RE准晶中仅存在少量孔隙空洞,与普遍存在多面体孔隙的Al-Pd-Mn准晶存在差异。LI Z X等^[71]用XCT表征EA42合金的孔隙缺陷,精准展现了不同位置及合金间的孔隙分布差异,揭示了Al₁₁Ce₃相潜热释放等凝固特

性对孔隙分布差异的主导机制,提出的Z-Propagation法突破传统局限,精准预测拉伸性能,为镁合金孔隙率与力学性能定量关联提供了高效方案。MA C S等^[72]对压铸AE44合金孔隙进行3D重建,发现孔隙形成与ESC_s密切相关,明确了4种孔隙类型,见图15。研究精准解析了加压和射速等HPDC参数对孔隙的调控机制,揭示了预结晶(ESC_s)与收缩孔隙的紧密耦合关系,同步辐射X射线断层扫描技术为量化孔隙三维形态、分布提供了直接支撑,证实了低速射料速度调控ESC_s

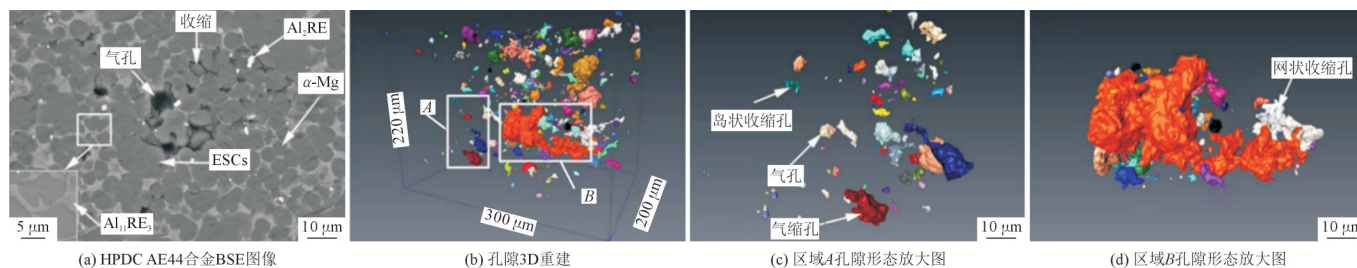


图15 HPDC AE44合金孔隙2D、3D表征图^[72]

Fig.15 2D and 3D characterization of pores in HPDC AE44 alloy^[72]

生长、凝固压力优化补缩,是降低孔隙率、提升力学性能的关键。在此基础上,ZHANG T T等^[73]研究了不同压铸参数的影响,发现了浇口附近因熔体湍流导致孔隙富集且形态更圆整的规律,通过同步辐射技术清晰呈现了孔隙与ESC的空间关联,证实加压可聚集孔隙并减小尺寸、提升低慢射速可抑制ESC生长,为阐明铸造过程中工艺与缺陷的内在联系提供了有效支撑。

综上,同步辐射技术凭借实时动态观测与精准三维表征的核心优势,在稀土镁合金热裂与孔隙缺陷研究中展现出重要价值。其弥补了传统方法的不足,既实现了热裂动态演化实时追踪与体积精准量化,明确热裂与枝晶粗化、合金组织的关联,又揭示了孔隙类型、分布及形成根源,厘清孔隙与工艺参数、第二相的依存关系。该技术为缺陷调控提供定量依据,对深化缺陷机制认知、推动稀土镁合金工程应用具有积极意义。

4 总结与展望

系统综述了同步辐射技术在稀土镁合金凝固组织调控研究中的进展。在枝晶生长方面,同步辐射原位成像与断层扫描技术实现了对 α -Mg枝晶三维形貌的动态、定量表征,揭示了不同合金成分及冷却速率、尺寸效应等工艺参数对枝晶形貌与演变的调控机制,为优化凝固工艺提供了关键依据。在LPSO相研究方面,小角X射线散射及衍射技术揭示了LPSO相从溶质团簇到有序结构的形成路径、热稳定性及其变形行为,明确了LPSO相在提升合金强度与协调塑性变形中的关键作用。在缺陷行为研究方面,同步辐射断层扫描与原位成像技术实现了对热裂、孔隙等缺陷的三维量化表征与动态演化追踪,揭示了缺陷与枝晶、第二相之间的空间关联,为缺陷抑制与合金可靠性提升提供了微观机制支撑。

尽管同步辐射技术已在稀土镁合金凝固研究中取得显著成果,但仍面临以下挑战与发展机遇。

(1)多模态联用 进一步发展多模态同步辐射试验平台,实现在同一凝固过程中同时进行成像、衍射与散射测量,全面捕捉组织结构、晶体学与成分演化的耦合关系。

(2)时空分辨率的协同提升 目前时间分辨率与空间分辨率之间仍需平衡。开发更高亮度光源与更快探测器,推动毫秒级动态过程与亚微米级结构特征的同步解析,将是重要发展方向。

(3)多尺度建模与数据驱动 结合相场模拟、晶体塑性有限元与机器学习方法,构建从原子堆垛到宏观

性能的多尺度预测模型,实现对凝固组织与性能的主动设计与精准调控。

(4)绿色合金开发 面向低碳冶金与材料再生需求,利用同步辐射技术研究稀土元素循环利用、低稀土高强镁合金等新型材料体系的凝固行为,推动镁合金的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] DINESH K, KUMAR R P, LALIT T. A review on environment friendly and lightweight magnesium-based metal matrix composites and alloys[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38: 359-364.
- [2] YOU S H, HUANG Y D, KAINER U K, et al. Recent research and developments on wrought magnesium alloys[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2017, 5(3): 239-253.
- [3] SONG J F, SHE J, CHEN D L, et al. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(1): 1-41.
- [4] WANG G G, WEILER J P. Recent developments in high-pressure die-cast magnesium alloys for automotive and future applications[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(1): 78-87.
- [5] 丁文江,付彭怀,彭立明,等.先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J].*航天器环境工程*,2011,28(2):103-109.
- [6] ZHANG J H, LIU S J, WU R Z, et al. Recent developments in high-strength Mg-RE-based alloys: Focusing on Mg-Gd and Mg-Y systems [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, 6(3): 277-291.
- [7] 胡文鑫,姜佳鑫,吴俊子.稀土元素在镁合金及铝合金中的作用及应用[J].*稀土信息*,2016(7):27-30.
- [8] YU F, CHEN L, HAI H, et al. Effect of ageing treatment on microstructures, mechanical properties and corrosion behavior of Mg-Zn-RE-Zr alloy micro-alloyed with Ca and Sr[J].*China Foundry*, 2021,18(2):131-140.
- [9] MO N, MCCARROLL I, TAN Q Y, et al. Understanding solid solution strengthening at elevated temperatures in a creep-resistant Mg-Gd-Ca alloy[J]. *Acta Materialia*, 2019, 181: 185-199.
- [10] LI Y F, ZHANG A, LI C M, et al. Recent advances of high strength Mg-RE alloys: Alloy development, forming and application [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 2919-2940.
- [11] FENG S K, ENZO L, GRANT P S. X-ray imaging of alloy solidification: Crystal formation, growth, instability and defects [J]. *Materials*, 2022, 15(4): 1319.
- [12] GUO E Y, PHILLION A B, CAI B, et al. Dendritic evolution during coarsening of Mg-Zn alloys via 4D synchrotron tomography[J]. *Acta Materialia*, 2017, 123: 373-382.
- [13] SPUNCREOBUTR C, LEE P D, HAMILTON R W, et al. Synchrotron tomographic characterization of damage evolution during aluminum alloy solidification[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, A44(12): 5389-5395.
- [14] WANG M Y, WILLIAMS J J, JIANG L, et al. Dendritic morphology of α -Mg during the solidification of Mg-based alloys: 3D experimental characterization by X-ray synchrotron tomography and phase-field simulations[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(10): 855-858.

- [15] 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: 159-505.
- [16] 李华成,冯志军,占亮,等. 稀土元素在铸造镁合金中的应用及研究进展[J]. *铸造*, 2023, 72(4): 359-364.
- [17] RZYCHON T, KIELBUS A. Effect of rare earth elements on the microstructure of Mg-Al alloys [J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, 17 (1-2) : 149-152.
- [18] LUO Q, GUO Y L, LIU B, et al. Thermodynamics and kinetics of phase transformation in rare earth-magnesium alloys: A critical review [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 44: 171-190.
- [19] MANSOOR A, ZULFIQAR M, ISHTIAQ M, et al. Tuning the microstructure and strength of Mg-RE alloys through the rare-earth elements [J]. *Journal of Materials Science*, 2025, 60 (10) : 4 808-4 819.
- [20] WANG S F, LIU D R, WANG L, et al. 3D prediction of microstructure formation during solidification of Mg-RE alloy processed by laser surface remelting [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2024, 18(2): 1 329-1 347.
- [21] CHEN H, CHEN H M, LI H, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of rare-earth magnesium alloys cast by electromagnetic stirring with different Zn contents [J/OL]. *International Journal of Metalcasting*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40962-025-01735-z>.
- [22] YANG Y, ZHANG K, MA M L. Microstructure and phase compositions of as-cast Mg-3.9Zn-0.6RE (Gd, Y) alloy with different Gd/Y ratios [J]. *Rare Metals*, 2015, 34(3): 160-163.
- [23] YANG W P, GUO X F, LU Z X. TEM microstructure of rapidly solidified Mg-6Zn-1Y-1Ce alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(4): 786-792.
- [24] TONG X, YOU G Q, YAO F J, et al. Segregation behavior and its regulating process in as-cast magnesium alloy containing heavy rare earth [J]. *Journal of Rare Earths*, 2022, 40(8): 1 291-1 304.
- [25] NGUYEN T H, SALVO L, MATHIESEN R H, et al. On the interest of synchrotron X-ray imaging for the study of solidification in metallic alloys [J]. *Comptes Rendus. Physique*, 2012, 13 (3) : 237-245.
- [26] MARGARITONDO G, RAFELSKI J. The relativistic foundations of synchrotron radiation [J]. *Synchrotron Radiation*, 2017, 24(4): 898-901.
- [27] ZHANG C, LIU H G, WANG C P, et al. Automatic feedback system for X-ray flux at BL08U1A soft X-ray spectromicroscopy beamline of shanghai synchrotron radiation facility [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5 456.
- [28] FENG S K, INSUNG I, ANDREW L, et al. Investigating metal solidification with X-ray imaging [J]. *Metals*, 2022, 12(3): 395.
- [29] MAIRE E, WITHERS P J. Quantitative X-ray tomography [J]. *International Materials Reviews*, 2014, 59(1): 1-43.
- [30] FETOSOV G V. X-ray diffraction methods for structural diagnostics of materials: Progress and achievements [J]. *Physics-Uspeski*, 2020, 63(1): 2-32.
- [31] LI Z H, WU Z H, MO G, et al. A small-angle X-ray scattering station at Beijing synchrotron radiation facility [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2014, 42(2): 128-141.
- [32] 吴孟武,田冰辉,杨满红,等. 镁合金枝晶生长的试验表征及模拟仿真研究进展 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(1): 1-10.
- [33] WANG Y N, SHUAI S S, HUANG C L, et al. Revealing the diversity of dendritic morphology evolution during solidification of magnesium alloys using synchrotron X-ray imaging: A review [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35(2): 177-200.
- [34] WANG M Y, XU Y J, ZHENG Q W, et al. Dendritic growth in Mg-based alloys: Phase-field simulations and experimental verification by X-ray synchrotron tomography [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2014, A45(5): 2 562-2 574.
- [35] MENDIS C L, TOLNAI D, STARK A, et al. In situ investigation of microstructure evolution during solidification of Mg-10Ca-xGd (x= 5, 10, 20) alloys [J]. *Acta Physica Polonica*, 2015, A128 (4): 606-610.
- [36] BUZOLIN R H, TOLNAI D, MENDIS C L, et al. In situ synchrotron radiation diffraction study of the role of Gd, Nd on the elevated temperature compression behavior of ZK40 [J]. *Materials Science and Engineering*, 2015, A640: 129-136.
- [37] GAVRAS S, SUBROTO T, BUZOLIN H R, et al. The role of Zn additions on the microstructure and mechanical properties of Mg-Nd-Zn alloys [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2018, 12 (3): 428-433.
- [38] DU J L, ZHANG A, GUO Z P, et al. Effect of additional solute elements (X= Al, Ca, Y, Ba, Sn, Gd and Zn) on crystallographic anisotropy during the dendritic growth of magnesium alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 775: 322-329.
- [39] WANG Y B, PENG L M, JI Y Z, et al. Effect of cooling rates on the dendritic morphology transition of Mg-6Gd alloy by in situ X-ray radiography [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34 (7): 1 142-1 148.
- [40] WANG Y B, JIA S S, WEI M G, et al. Coupling in situ synchrotron X-ray radiography and phase-field simulation to study the effect of low cooling rates on dendrite morphology during directional solidification in Mg-Gd alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 815: 152-385.
- [41] 赵雪婷,张天向,李少翔,等. Mg-Gd-Y-Zr合金可控冷却速率实验方法及凝固组织的X射线断层扫描表征 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(7): 1 911-1 923.
- [42] 罗时峰. Mg-Gd系合金凝固特性、微观组织与力学性能研究 [D]. 西安:西北工业大学, 2020.
- [43] GUBICZA J, MATHIS K, NAGY P, et al. In situ diffraction study on the annealing performance of a rapidly solidified ribbon consolidated Mg-Ca-Y-Zn-Mn alloy [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2025, 13(4): 1 771-1 783.
- [44] LIU X T, SUN Y Q, WANG Y B, et al. The effect of cross-section geometry of castings on dendrite evolution in Mg-Gd alloys by in situ X-ray radiography [J]. *Materials Characterization*, 2022, 186: 111-751.
- [45] SZAKACS G, MENDIS C L, TOLNAI D, et al. In Situ Synchrotron Radiation Diffraction During Solidification of Mg15Gd: Effect of Cooling Rate [C]//Cham: Springer International Publishing,

- 2015.
- [46] WONG C, NOGITA K, STYLES M J, et al. Solidification path and microstructure evolution of Mg-3Al-14La alloy: Implications for the Mg-rich corner of the Mg-Al-La phase diagram[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 784: 527-534.
- [47] YANG M, XIONG S M, GUO Z. Characterisation of the 3D dendrite morphology of magnesium alloys using synchrotron X-ray tomography and 3D phase-field modelling [J]. *Acta Materialia*, 2015, 92: 8-17.
- [48] DOMONKOS T, SARKIS G, FABIAN W, et al. In situ synchrotron tomography of the solidification of an Elektron 21 Mg alloy[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(11): 2 100 383.
- [49] SUBROTO T, MENDIS C L, FRANCESCO D, et al. 3D Microstructural Evolution on Solidifying Mg-5Nd-5Zn alloy Observed via In Situ Synchrotron Tomography [C]//Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [50] ZHANG M L, ZENG J, CHEN X Y, et al. Machine learning-based phase design of Mg-Re alloy LPSO phase [J]. *Journal of Materials Science*, 2025, 60(26): 10 573-10 589.
- [51] XU D K, HAN E H, XU Y B. Effect of long-period stacking ordered phase on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of Mg alloys: A review[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2016, 26(2): 117-128.
- [52] GARCES G, REQUENA G, TOLNAI D, et al. Formation of an 18R long-period stacking ordered structure in rapidly solidified $Mg_{88}Y_8Zn_4$ alloy [J]. *Materials Characterization*, 2016, 118: 514-518.
- [53] KIMURA S, KAJIWARA K, SHIMURA T, et al. Development of a compact compression test stage for synchrotron radiation micro-Laue diffraction measurements of long-period stacking-ordered phases in Mg-Zn-Y alloys[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(3): 38 002.
- [54] OKUDA H, KINTSU K, KUROKAWA S, et al. Nanoclusters in stacking faults in Mg-Y-Zn alloys examined by small-angle X-ray scattering and extended X-ray absorption fine structure analysis[J]. *Acta Materialia*, 2023, 253: 118 963.
- [55] GUBICZA J, MATHIS K, NAGY P, et al. Annealing behavior of a Mg-Y-Zn-Al alloy processed by rapidly solidified ribbon consolidation[J]. *Materials*, 2024, 17(18): 4 511.
- [56] OKUDA H, YAMASAKI M, KAWAMURA Y. Transition to long period stacking ordered structures in $Mg_{85}Gd_9Zn_6$ alloys from amorphous ribbons examined by synchrotron radiation scattering: Comparison with $Mg_{85}Y_9Zn_6$ alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 139: 26-29.
- [57] OKUDA H, HORIUCHI T, HIFUMI S, et al. Microstructural evolution of long-period stacking ordered structures in $Mg_{97}Y_2Zn_1$ alloys examined by in-situ small-angle X-ray scattering [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2014, A45(11): 4 780-4 785.
- [58] OKUDA H, HORIUCHI T, YAMASAKI M, et al. In situ measurements on stability of long-period stacking-ordered structures in $Mg_{85}Y_9Zn_6$ alloys during heating examined by multicolor synchrotron radiation small-angle scattering [J]. *Scripta Materialia*, 2014, 75: 66-69.
- [59] OKUDA H, HORIUCHI T, TSUKAMOTO T. Evolution of long-period stacking order structures on annealing as-cast $Mg_{85}Y_9Zn_6$ alloy ingot observed by synchrotron radiation small-angle scattering[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(8): 575-578.
- [60] XU C, FAN G H, NAKATA T, et al. Deformation behavior of ultra-strong and ductile Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy with bimodal microstructure [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2018, A49(5): 1 931-1 947.
- [61] OKUDA H, HORIUCHI T, TANAKA H, et al. Stability of long-period stacking ordered structures at elevated temperatures examined by multicolor synchrotron radiation X-ray scattering/diffraction measurements[J]. *Materials Transactions*, 2015, 56(7): 906-909.
- [62] OKUDA H, MICHIAKI Y, YOSHIHITO K, et al. Nanoclusters first: A hierarchical phase transformation in a novel Mg alloy [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 14 186.
- [63] LI B, ZHANG J, DONG Q, et al. Revealing the role of minor Zn and Zr element addition in hot tearing susceptibility of Mg-Gd-Y alloy [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2025, 19(3): 1 481-1 492.
- [64] EASTON M A, GIBSON M A, ZHU S, et al. An a priori hot-tearing indicator applied to die-cast magnesium-rare earth alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2014, A45(8): 3 586-3 595.
- [65] 王志, 周野, 周乐, 等. Ca和Y对Mg-1.5Zn合金热裂行为的影响 [J]. *材料研究学报*, 2017, 31(8): 561-568.
- [66] YOU S H, HUANG Y D, DIERINGA H, et al. Effects of Y additions on the microstructures and mechanical behaviours of as cast Mg-xY-0.5Zr alloys [J]. *Advanced engineering materials*, 2022, 24(4): 2 101 033.
- [67] LENG F, WANG F, WANG Z, et al. Hot tearing behavior of Mg-4Zn-xSn-0.6Zr alloys [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2021, 15(1): 292-305.
- [68] TOLNAI D, SOSRO T, GAVRAS S, et al. In-situ synchrotron investigation of the phases-and their morphology-development in Mg-Nd-Zn alloys [J]. *International Journal of Materials Research*, 2020, 111(1): 4-10.
- [69] SONG J F, ZHAO H, LIAO J, et al. Comparison on hot tearing behavior of binary Mg-Al, Mg-Y, Mg-Gd, Mg-Zn, and Mg-Ca alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2022, A53(8): 2 986-3 001.
- [70] GASTALDI J, AGLIOZZO S, LETOUBLON A, et al. Degree of structural perfection of icosahedral quasicrystalline grains investigated by synchrotron X-ray diffractometry and imaging techniques [J]. *Philosophical Magazine*, 2003, 83(1): 1-29.
- [71] LI Z X, LI D J, ZHOU W K, et al. Characterization on the formation of porosity and tensile properties prediction in die casting Mg alloys [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(7): 1 857-1 867.
- [72] MA C S, YU W B, ZHANG T T, et al. The effect of slow shot speed and casting pressure on the 3D microstructure of high pressure die casting AE44 magnesium alloy [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(2): 753-761.
- [73] ZHANG T T, YU W B, MA C S, et al. The effect of different high pressure die casting parameters on 3D microstructure and mechanical properties of AE44 magnesium alloy [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(9): 3 141-3 150.

(编辑:彭瑾)