

铸造技术在功能材料中的应用与优化

——第75届世界铸造会议功能材料论坛评述

王重贺¹, 李 谦¹, 王云霞^{2, 3}

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 中国机械工程学会铸造分会, 辽宁沈阳 110022;
3. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 第75届世界铸造会议功能材料论坛聚焦铸造技术在功能材料中的应用与优化的探索。铸造技术如今已成为实现功能材料性能优化的一种重要手段, 特别是在储能、隔热和中子屏蔽材料等领域。本次论坛学者分享了计算材料科学在铸造技术中的应用、轻质功能材料的成分调控与工艺改进、多主元素合金在储氢与储能领域的开发以及铸造与凝固应用于功能材料等领域的前沿工作。论坛分享的研究成果为铸造技术在功能材料领域的创新应用奠定了理论基础和实践依据, 并结合高通量计算和人工智能技术的迅速发展, 为绿色制造和智能化铸造技术的未来发展开辟了新路径, 进一步助力材料科学的持续创新与突破。

关键词: 铸造技术; 功能材料; 计算材料科学; 微观结构调控; 工艺优化

作者简介:

王重贺 (1992-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为铝合金功能材料的设计与工艺优化。E-mail: wzh4986@cqu.edu.cn

通信作者:

李谦, 男, 教授。E-mail: cquliqian@cqu.edu.cn;
王云霞, 女, 副高, E-mail: wangyunxia@foundry-nations.com

中图分类号: TG13

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)08-1038-07

基金项目:

国家自然科学基金 (U23A20128; U2102212)。

收稿日期:

2025-01-09 收到初稿,
2025-04-15 收到修订稿。

第75届世界铸造会议于2024年10月25—30日在中国四川德阳圆满举行。本次大会以“发展中的铸造业”为主题, 汇聚了来自全球30多个国家的约1 500名铸造领域的知名专家、资深学者和行业精英, 共同探讨行业前沿发展动态。大会设立了18个分论坛, 来自26个国家的238位优秀行业代表分享了他们的研究成果与实践经验, 其中功能材料论坛共发表报告16篇, 为铸造功能材料的创新与应用提供了重要交流平台。铸造技术作为现代工业中重要的成形方法, 以高效生产形状复杂和尺寸精确的大批量金属铸件而闻名。尽管铸造工艺传统上主要应用于机械、汽车和航空航天等结构材料领域, 但随着技术的不断发展和革新, 逐步拓展至功能材料等领域, 如储能材料、隔热材料和中子屏蔽材料等^[1-4]。

功能材料通常需要具备特定的物理化学性能, 例如高比能量、快速离子迁移、优异的储氢能力和良好的隔热性能等。这些性能在很大程度上取决于材料的微观结构, 包括晶粒尺寸、相结构和缺陷分布等, 而这些微观结构又受到铸造工艺参数的显著影响。因此, 通过优化铸造工艺以精确调控微观结构, 从而提升材料性能, 已成为现代铸造技术的重要研究方向。

1 铸造技术在功能材料中的应用

1.1 铸造材料模拟与微观结构优化

传统试验方法往往难以对铸造过程中复杂的相变和扩散行为进行实时监测、控制和优化, 随着计算材料科学的迅猛发展, 数值模拟技术为预测材料相结构、微观结构演化及缺陷控制等提供了强有力的支持^[5-8]。对于多相共存的复杂结构, 其铸造过程的相变过程通常极为复杂, 而不同相的体积分布和界面特性对功能材料的最终性能具有关键影响。

1.1.1 CALPHAD方法的应用

通过CALPHAD (计算相图) 方法, 可以对不同元素的热力学性质进行精确建

模,从而预测多相结构在铸造工艺中的演变路径。这一方法在优化再生铝和多主元素合金的铸造过程中得到了广泛应用,特别是在抑制脆性相生成和提升合金延展性等方面表现出了显著成效^[9]。CALPHAD的应用不仅为深入理解多相材料的相变机制提供了理论依据,还为铸造工艺的设计与优化开辟了新的路径,进一步推动了功能材料性能的提升和可靠性改进。

基于CALPHAD指导抑制再生铝中铁有害相的优化策略。CompuTherm公司的张传博士在论坛上分享了利用CALPHAD方法优化铝合金成分的研究成果。研究表明,通过快速冷却工艺,可以在Al-9Si-0.8Fe-0.4Mn合金中将脆性 β 相有效转化为稳定的 α -Al₁₅(Mn, Fe)₃Si₂相。当Mn含量提高至0.27 wt.%以上时, β 相逐渐向 α 相转变,显著改善了合金的微观结构性能。结合Scheil模拟法和微观结构分析的进一步验证,发现Mn的掺杂不仅成功抑制了脆性相的生成,还大幅提升了铸件的韧性和抗拉强度。这一研究为再生铝的回收利用与性能优化提供了重要的理论依据,同时为铝合金的可持续发展 and 性能提升指明了新方向。

中南大学张利军团队在论坛上详细介绍了锂电池正极材料Li-X-O (X=Co, Ni, Mn)的原子迁移行为研究。他们利用CALPHAD相图计算方法,结合各向异性扩散模型和电化学势梯度下的扩散模拟,并辅以一性原理计算,系统模拟了锂电池正极材料在充放电过程中的相变行为,为正极材料的设计与优化提供了理论指导。试验表明,在O3层状Li-Co-O正极材料中,当充电电流在7.5~12.5 mA范围内变化时,电池性能在晶体取向角 θ 接近零时表现最佳。此外,针对Ni基正极材料的扩散行为模拟研究发现,通过控制充电电流密度在4.5~15 A/m²范围内,可以有效抑制H1-3相的形成,从而避免容量衰减。这一研究为锂电池正极材料在扩散特性和电化学性能优化方面提供了重要理论依据和实践参考,为开发更高效和更稳定的锂电池正极材料奠定了基础。

1.1.2 相场模拟的应用

相场模拟作为一种模拟相变过程的数值方法,在功能材料铸造优化中发挥了重要作用。它能够预测铸造冷却过程中微观结构的演化,从而优化材料的相分布和晶界特性^[10]。

高通量相场模拟优化K_{1-x}Na_xNbO₃薄膜中平面畴与畴壁间的储能性能。中北大学赵宇宏教授团队利用相场模拟,针对KNN (K_{1-x}Na_xNbO₃)薄膜材料构建了微观尺度的扩散和相变模型,成功模拟了铸造冷却过程中的晶粒生长、相结构演化及缺陷生成过程。通过调控Na比例和失配应变,该团队优化了薄膜的畴结构和

畴壁特性,从而显著提升了材料的能量存储密度。

Ni-Y稳定氧化锆电极中的Ni粗化:三维定量相场模拟支持的非原位叠层纳米断层扫描。丹麦技术大学陈铭教授团队利用三维相场模拟,深入研究了Ni-Yttria稳定氧化锆(YSZ)电极中Ni颗粒的粗化行为。结合不同退火时间下的试验与模拟对比,分析了Ni颗粒的粗化过程及其微观结构演变规律。研究表明,三维相场模拟在预测Ni-YSZ电极TPB (Triple Phase Boundary)密度和微观结构参数方面具有极高的准确性,为电极材料的设计和寿命预测提供了重要理论依据。这项研究有助于提升固体氧化物燃料电池的整体性能和耐久性。

数值模拟方法能够以较高的准确性预测材料性能,并为材料成分设计和工艺调控提供有力指导,从而有效节约重复试验的时间,减少试错工作量。这种试验与数值模拟相结合的方法,为推动功能材料的高效开发和性能优化提供了强大的支持。然而,数值模拟的基础来源于已有的试验数据和结果,因此为了开发出性能更优异的功能材料,探索性和验证性试验仍然是必不可少。

1.2 铝基功能材料

铸造技术凭借灵活的成形能力和较低的成本,已成为功能材料制备的重要手段之一,特别在铝基和镁基功能材料的制备中展现出显著优势。铝基合金因其轻质、高强度和耐腐蚀性,广泛应用于航空、汽车和建筑等工业。特别是Al-Si和Al-Si-Cu合金,因其高流动性和良好的铸造性能,被广泛用于发动机气缸体和轮毂等部件^[11]。然而,铝合金在铸造过程中易生成脆性相,如 β -AlFeSi相,显著降低材料的延展性和韧性^[12-13]。

1.2.1 铸造工艺

随着先进制造技术的不断发展,铸造工艺逐渐从传统的成形技术向高性能和功能化方向演变。在满足复杂结构制造需求的同时,铸造工艺开始注重材料微观组织和性能的优化。特别是在新能源行业和热管理部件制造领域,铸造技术的精细化与创新性应用显得尤为重要。通过引入复合工艺与材料设计方法,铸造技术不仅显著提升了部件的生产效率,还推动了其应用性能的全面提升^[14-15]。

高性能铸造铝合金在热管理部件中的开发与应用:可钎焊铸件。新能源行业迅猛发展,使电动汽车、储能设备及光伏系统对高效和低成本热管理部件的需求显著增加。针对这一背景,美国铝业/帅翼驰联合研发中心的胡斌博士提出了一种基于铸造与钎焊工

艺结合的创新策略。这一方法不仅能够满足复杂几何结构部件的制造需求，还能够进一步优化材料性能，在高性能铝基热管理部件的应用中展现了突出的协同效应。通过将铸造与钎焊工艺有机结合，不仅有效降低了复杂热管理部件的生产成本，同时显著提升了其力学性能和热管理效率。在液冷系统部件、冷却板及换热器的制造领域，该技术组合已成为推动热管理技术发展的关键路径。铸造工艺通过与钎焊工艺的深度融合，从传统的成形技术逐步发展为以性能优化为导向的综合制造平台，标志着铸造技术在新时代迈向高效化、智能化及多功能化的新阶段。

1.2.2 冷却速率

冷却速率对功能材料的性能影响显著。快速冷却可细化晶粒，抑制偏析，提高强度与均匀性，甚至形成非晶结构；慢速冷却则易导致粗大晶粒和偏析，影响材料性能^[16]。此外，冷却速率还影响相变行为、力学性能及热电性能等。深入探究合金铸造过程中的冷却过程，探究缺陷形成机制，提供优化冷却速率的依据是提升材料性能的重要途径。

AC4B铝合金复杂结构铸件的裂纹萌生机制。重庆科技大学戴庆伟教授团队深入研究了AC4B铝合金在复杂结构铸件中的裂纹起始机制，重点探讨了热撕裂缺陷的形成原因。利用光学显微镜和扫描电子显微镜（SEM）观察，结合有限差分法（FDM）进行数值模拟，研究发现，铸件不同位置冷却速率的差异导致凝固顺序的不一致，阻碍了金属液的充分补缩，从而引发热裂缺陷。同时，裂纹表面检测到Fe含量较高的脆性相，表明Fe相关相的生成在裂纹起始中发挥了关键作用。研究表明，通过调控冷却速率和优化凝固顺序，可有效减少裂纹产生，为复杂结构铝合金铸件的质量提升提供了重要参考。

1.2.3 成分调控

铸造工艺中的成分调控直接影响功能材料的性能。合金元素的添加与调整可改变材料的组织结构、相组成及界面特性，从而优化强度、韧性、导电性、导热性及耐腐蚀性等^[17-18]。同时，成分调控能促进特定功能相的生成或抑制有害相析出。精准调控是提升材料性能和开发新型功能材料的关键。

Mg对新型铝基热中子屏蔽复合材料微观结构和力学性能的影响。西安交通大学刘志伟教授团队研究了Mg元素对新型铝基复合材料的微观结构和力学性能的影响及其在热中子屏蔽应用中的表现。含5 wt.% B₄C和4.5 wt.% Gd的铝基复合材料通过添加Mg显著提升了性能，屈服强度提高61.7%，抗拉强度提升42.9%。研究

表明，Mg的加入改变了 τ -Al₃Cu₄Gd相的形态，从层状结构转变为块状结构，并在热轧后进一步细化颗粒，增强了材料的强度和延展性。同时，Mg的固溶强化作用和对中子屏蔽性能的积极影响，使该材料在中子辐射防护和高强度复合结构应用中具有重要潜力。

高性能Al-Cu-Mg基复合材料开发的最新进展。莱奥本大学李杰华教授团队开发了一种高性能Al-Cu-Mg基复合材料，通过添加3 wt.% TiB₂将晶粒细化至50 μm以下，显著减少了热撕裂和偏析现象，并探讨了增材制造技术的应用可行性。利用HAADF-STEM和APT分析，发现了Mg-Ag富集层及其对合金性能的影响。试验显示，传统重力铸造样品存在Mg-Ag聚集，而增材制造样品在热处理后形成了稳定的Al-Cu（ θ ）相和Al-Cu-Mg-Ag（ Ω ）相析出物。该研究为高强度铝基复合材料的设计与应用提供了新思路。

1.3 镁基功能材料

镁基合金以其高储氢容量、轻质和低成本，在储氢材料领域具有广泛的应用前景^[19]。然而，其在铸造和使用过程中易氧化，生成的氧化物膜会阻碍氢的扩散^[20]。

1.3.1 掺杂元素的影响

在镁基功能材料中，掺杂元素可显著改善其性能。掺杂可细化晶粒、提高强度和耐腐蚀性，减少镁的氧化倾向；同时调整相组成，抑制有害相生成，增强材料的热稳定性和导电性。特定掺杂元素如稀土元素还能赋予材料更优异的耐热性和高温性能，广泛应用于轻量化和高性能领域^[21-22]。

Mg-Ca合金水解制氢技术。在本次论坛中，四川大学陈云贵教授和吴朝玲教授团队分享了基于Mg-Ca合金的水解氢气生成技术，展示了其在低成本条件下实现高效且安全的氢气生成、存储与运输的潜力。

团队开发了含Ca₄Mg₃H₁₄相的Mg-Ca基水解材料，该材料的水解性能优于纯Mg或MgH₂，得益于Ca₄Mg₃H₁₄更易水解，以及Ca(OH)₂副产物较高的溶解性，能够促进水分渗透到颗粒内部，显著提升反应效率。通过调控Ca含量和添加剂（如盐类和石墨）可优化材料的水解效率。试验表明，含30 wt.% Ca的Mg-Ca合金在70 °C下的转化率达95%。此外，在NH₄Cl溶液中，该材料在低温（-20 °C至10 °C）条件下表现出优异的氢气生成效率，尤其在0 °C时转化率达到89%。该研究为Mg-Ca基水解材料的工程化应用奠定了基础。

Y掺杂优化镁基储氢合金的首次氢化反应。哈尔滨工业大学陈瑞润教授团队的研究表明，通过在镁基储氢合金Mg₉₇Ni_{2-x}Y_x（ $x=0, 0.25, 0.5, 1$ ）中掺杂Y元素

素,可以显著提升储氢效率。Y元素的引入有效降低了Mg-H键的结合能,从而使首次氢化时间从未掺杂样品的13 700 s显著缩短至8 554 s。此外,Y元素的掺杂进一步增加了合金表面和晶界的活性位点,促进了氢在晶界的扩散过程,从而显著提升了材料的储氢容量。这一研究为镁基储氢材料的性能优化提供了思路和理论支持。

1.3.2 微观结构控制

铸造工艺中微观结构控制对镁基功能材料性能至关重要。通过调控冷却速率、合金成分及热处理工艺,可细化晶粒,优化晶界分布,增强强度、韧性和耐腐蚀性,同时抑制有害相生成,提升热稳定性和导电性。精确的微观结构控制还能实现性能的定向调控,使镁基材料适应轻量化、高强度和多功能需求^[23-24]。

Mg-Al-Zn和Mg-Li-Al-Zn合金在空气电池中的放电行为研究。重庆大学潘复生院士科研团队的吴量教授在论坛中介绍了镁-铝-锌(Mg-Al-Zn)和镁-锂-铝-锌(Mg-Li-Al-Zn)合金在镁空气电池中放电行为的研究。镁空气电池因具有高理论电压(3.09 V)和高比容量密度(2 230 Ah/kg)而备受关注,但其实际应用受限于阳极效率低和实际放电电压远低于理论值。

团队研究发现,放电过程中生成的Mg(OH)₂产物会附着在镁阳极表面,阻碍进一步反应。为解决这一问题,研究团队选用Mg-Al-Zn和Mg-Li-Al-Zn合金作为阳极材料,通过调控合金的微观结构(包括织构、晶粒尺寸和析出产物等)来优化其放电性能。这项研究为镁空气电池的性能改进提供了思路。

1.4 多主元素合金(MPEAs)

多主元素合金由多种元素以接近等摩尔比例组成,具有晶格畸变效应、优异的耐腐蚀性、抗氧化性和力学性能,其相结构和性能依赖成分分配比与铸造工艺控制,广泛应用于储氢和储能领域^[3]。通过优化铸造工艺改善其微观结构,可显著提升能量存储性能,为储能技术发展提供新方向^[25-26]。

Ti₂₅V_xCr₂₅Nb_{50-x}多主元合金的显微组织与储氢行为研究。陈瑞润教授团队通过调整Ti₂₅V_xCr₂₅Nb_{50-x}合金中V和Nb的含量,制备了具有单一体心立方(BCC)相的高效储氢合金。研究发现,当V含量降低至15 wt.%时,合金晶格常数增大,活性位点显著增加,使氢的可逆吸附容量提升至1.4 wt.%。这种结构优化使多主元素合金成为高温高压储氢应用的理想候选材料。另外,通过控制冷却速率,在V含量较高的多主元素合金(MPEAs)中可形成细小的枝晶结构,有效抑制合金

在氢化过程中的膨胀和氢脆效应。快速冷却使枝晶臂间距减少40%,合金耐压性提升约25%。这些优化措施显著增强了MPEAs在高压储氢和结构稳定性方面的性能。

高性能低成本BCC型储氢合金的制备及吸放氢机制研究。高熵合金的熔炼过程复杂,需要精确控制成分分配比以确保多种元素均匀分布。中国科学院赣江创新研究院陈庆军团队在论坛中分享了对体心立方结构V基高熵合金的研究,通过引入Mo和Ce替代部分V含量,显著提升了合金在铸造条件下的稳定性和储氢能力。研究表明,添加Mo和Ce后,高熵合金在低温条件下的储氢容量达到2.4wt.%,且低V合金在循环使用15次后仍能保持94%的氢存储能力。此外,这些元素的引入有效减少了氢脆现象,提高了材料的循环稳定性,为大规模氢气储存系统提供了一种经济高效的材料解决方案。

1.5 其他功能材料的研究

1.5.1 形状记忆合金NiTi/铜异种材料激光焊接工艺与接头组织性能

焊接作为铸造工艺的延展,在复杂铸造结构件的精密连接与功能优化中展现出显著的技术互补优势。铸造工艺实现整体成形,而激光焊接通过高精度和高效率的连接补充其不足,为制造复杂多功能部件提供了技术支持。苏州大学王晓南教授团队通过优化激光焊接参数(如激光束偏移量)和调整焊缝微观组织,显著提升了NiTi/铜异种材料接头的性能。研究发现,随着激光束由NiTi侧向铜侧偏移,焊缝组织由均匀的树枝晶逐渐转变为混合结构,元素偏析减弱,金属间化合物脆性降低,同时通过合理控制热输入和引入中间层,显著减少了微裂纹和孔隙的形成,从而提高了抗拉强度与延展性。这一研究不仅为NiTi/铜的异种激光焊接提供了理论指导,也拓展了智能材料在多功能系统中的应用前景,为实现材料高性能和低成本制造奠定了基础。

1.5.2 高强度Invar合金的成分设计、性能优化与增材制造研究

Invar合金是一种含镍36%的铁镍合金,以其极低的热膨胀系数而闻名,几乎在常温至230℃范围内保持尺寸稳定性。其独特的性能源于镍铁间的磁性相互作用,广泛应用于精密仪器、光学器件、航天工程和计量工具领域。Invar合金还具有良好的机械强度和耐腐蚀性,是高精度和高稳定性需求场景的理想材料。西北工业大学陈豫增教授团队通过选择性激光熔化(SLM)技术优化了高强度Invar合金,解决了其强度

较低和加工性能较差的限制问题。通过在Fe-Ni-Co基Invar合金中引入碳化物颗粒，合金的屈服强度提高至495 MPa，同时保持较低的热膨胀系数。SEM和TEM分析表明，碳化物析出并均匀分布在晶界上是主要强化机制。经过热处理后，屈服强度进一步提升至594 MPa。该研究为提升Invar合金性能提供了新思路，助力其在精密制造领域的更广泛应用。

1.5.3 高钛高炉渣制备泡沫玻璃陶瓷隔热材料

泡沫玻璃陶瓷隔热材料是一种由玻璃和陶瓷组成的多孔结构材料，具有低密度、优异的隔热性和耐高温性能。它通过特殊工艺使材料内部形成均匀分布的气孔，从而有效减少热传导，常用于建筑保温、工业高温设备和环保领域等，具有良好的抗压强度、耐腐蚀性和环保性。四川大学冯可芹教授团队以高钛高炉渣和废玻璃为主要原料，研究了泡沫玻璃陶瓷隔热材料的制备工艺及发泡剂选择对材料性能的影响。通过对CaCO₂、SiC和AlN三种发泡剂的对比研究，发现SiC在形成闭孔结构方面表现最佳，生成的圆形闭孔有效降低了热传导率并提高了抗压强度。差热分析（DTA）和扫描电子显微镜（SEM）分析结果表明，SiC具有更高的反应稳定性和均匀的发泡过程，其制备的泡沫玻璃陶瓷展现出优异的热绝缘性能和机械强度。研究表明，SiC是制作泡沫玻璃陶瓷的最优发泡剂选择，为新型建筑隔热材料的开发提供了可行性。

2 总结展望

在世界铸造会议功能材料分论坛中，各位专家学者积极分享了研究成果，充分展现了铸造技术在功能材料制备与性能优化方面的卓越成效。随着工业需求的不断提升，铸造技术在功能材料中的应用将日益多元化和高效化，尤其在储能、隔热，以及轻量化高强度材料等领域，铸造工艺的创新与优化势必影响未来的产业格局。

2.1 高通量计算与人工智能的融合

计算材料学的不断发展，使现代材料研究正逐步向材料研发与高通量计算和大数据分析结合的方向迈进。机器学习和深度学习的广泛应用，让材料设计方法更加科学、严谨和高效。未来，铸造工艺将借助高通量计算筛选出最佳的合金成分与工艺参数，大幅减少试验次数和研发周期。人工智能（AI）在这一过程中将发挥关键作用，通过识别不同铸造条件和合金成分对微观结构及缺陷生成的影响，优化工艺流程，推

动智能铸造的实现。

同时，随着试验数据的持续积累，数据驱动模型将更加精准，传统计算方法对材料性能的预测也将更为可靠。这一趋势将有助于在铸造工艺中实现新型功能材料微观结构的精确控制与定向设计，为材料开发与应用开辟新的可能性。

2.2 功能材料的复合工艺开发

针对复合功能材料的专用工艺逐步发展，未来有望实现多功能集成设计。例如，在隔热与结构件应用中，泡沫玻璃陶瓷与金属基体的复合材料可同时提供优异的隔热性能与承载能力。通过将铸造工艺与复合材料制备工艺相结合，可在铸件中引入高孔隙率的隔热层，同时保留材料的结构强度和刚性。此外，随着制备工艺的不断进步，铸造技术的应用范围也在持续拓展。铸造工艺与增材制造技术融合，可实现复杂材料铸造模具或芯材的精准制备，大幅提升铸造工艺的精度与灵活性^[27]；通过引入冷冻铸造技术，可制备具有多孔结构的电磁波吸收材料^[28]。这些创新工艺为复合功能材料的设计与制造提供了全新的思路，不仅增强了材料性能的多样性，还显著扩展了铸造工艺的应用领域，推动其向高效化、智能化和多功能化方向发展。

2.3 绿色制造与可持续发展

未来的铸造工艺将更加注重材料的经济性和环保性。例如，在二次铝和镁合金的应用中，通过优化能源和资源的管理，不仅可以有效降低生产成本，还能减少碳排放和废物生成，从而实现可持续的生产模式。加强材料循环利用，推动铸造技术与环保理念的深度融合，将废旧材料转化为高附加值产品，会成为铸造行业迈向绿色化的发展方向。

综上，未来铸造技术在功能材料领域的应用前景将更加广阔。通过高通量计算、人工智能、复合制备工艺与可持续发展理念的紧密结合，铸造工艺将逐步实现智能化与绿色化。在这一发展过程中，试验数据为计算材料学提供了可靠支撑，不断优化计算模型。同时，科学计算的结果与性能预测反过来支撑试验设计与工艺调整，构建起高效的理论与工艺优化循环体系。这种试验与计算相互促进的模式，不仅是推动铸造功能材料不断优化的核心动力，更是未来材料行业发展的重要趋势。它将为新一代功能材料的创新和技术进步注入强劲动力，引领材料科学迈向全新高度。

参考文献:

- [1] WANG H, FENG K, SUN Q. Effect of calcium carbonate on the preparation of glass ceramic foams from water-quenched titanium-bearing blast furnace slag and waste glass [J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2018, 117 (5) : 312–318.
- [2] ZHOU H, FENG K, LIU Y, et al. Preparation and characterization of foamed glass-ceramics based on waste glass and slow-cooled high-titanium blast furnace slag using borax as a flux agent [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, 590: 121703.
- [3] YANG F, WANG J, ZHANG Y, et al. Recent progress on the development of high entropy alloys (HEAs) for solid hydrogen storage: A review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47 (21) : 11236–11249.
- [4] YANG C, CHEN M, SU X, et al. The active regulatory effects of magnesium on the preparation, microstructure and mechanical properties of a novel Al-Bi based γ -ray shielding material by casting method [J]. *Scripta Materialia*, 2024, 252: 116281.
- [5] FURSUND V. Das eindringen von stahl in forsand einflub der oberflächen reaktionen und der temperatur [J]. *Giesserei Tech-Wiss, Beihefte*, 1962, 14: 51–61.
- [6] KHAN M, SHEIKH A. A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes [J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2018, 17 (2) : 197–209.
- [7] FU M, YONG M. Simulation-enabled casting product defect prediction in die casting process [J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47 (18) : 5203–5216.
- [8] MEIER J M, CARIS J, LUO A A. Towards high strength cast Mg-RE based alloys: phase diagrams and strengthening mechanisms [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10 (6) : 1401–1427.
- [9] ZHANG F, ZHANG C, LIANG S M, et al. Simulation of the composition and cooling rate effects on the solidification path of casting aluminum alloys [J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2020, 41: 793–803.
- [10] DI L, JING W, JUN-SHENG W, et al. Phase field simulation of misfit strain manipulating domain structure and ferroelectric properties in $\text{PbZr}_{(1-x)}\text{Ti}_x\text{O}_3$ thin films [J]. *Acat Physica Sinica*, 2020, 69 (12) : 127801–1.
- [11] YU D, YANG W, DENG W, et al. Crack initiation mechanism in casting AC4B aluminum alloy parts with complex structure [J]. *Metals*, 2021, 11 (1) : 97.
- [12] LASSANCE D, FABREGUE D, DELANNAY F, et al. Micromechanics of room and high temperature fracture in 6xxx Al alloys [J]. *Progress in Materials Science*, 2007, 52 (1) : 62–129.
- [13] BASAK C, HARI BABU N. Improved recyclability of cast Al-alloys by engineering β -Al₃Fe₂Si₂ phase [J]. *Light Metals*, 2017: 1139–1147.
- [14] JIN H. Development of an aluminum brazing sheet product with barrier layer for high-performance automotive heat exchangers [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2021, 52 (4) : 1409–1426.
- [15] GRAF A. Aluminum alloys for lightweight automotive structures [M]. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Elsevier, 2021: 97–123.
- [16] CAI H, ZHANG N, LIU L, et al. Effects of cooling rate on the microstructure and properties of magnesium alloy—a review [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, 12 (8) : 3094–3114.
- [17] 熊俊杰, 冯志军, 李宇飞, 等. 高性能 Al-Si-Cu-Mg 铸造合金成分和热处理工艺设计 [J]. *铸造*, 2023, 72 (6) : 680–687.
- [18] 许美贤, 高建中, 张增耀, 等. Gd 元素添加对铸态 AS41 合金组织和性能的影响 [J]. *铸造*, 2020, 69 (11) : 1167–1171.
- [19] YANG X, ZHANG J, HOU Q, et al. Regulation of kinetic properties of chemical hydrogen absorption and desorption by cubic K₂MoO₄ on magnesium hydride [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12 (14) : 2468.
- [20] CZERWINSKI F. Oxidation characteristics of magnesium alloys [J]. *Jom*, 2012, 64: 1477–1483.
- [21] CAO W, DING X, ZHANG Y, et al. Enhanced de-/hydrogenation kinetics of a hyper-eutectic Mg₈₅Ni_{15-x}Ag_x alloy facilitated by Ag dissolving in Mg₂Ni [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 917: 165457.
- [22] ZHAO D L, ZHANG Y H. Research progress in Mg-based hydrogen storage alloys [J]. *Rare Metals*, 2014, 33: 499–510.
- [23] HUANG X, DAI Q, XIANG Q, et al. Microstructure design of advanced magnesium-air battery anodes [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2024, 12 (2) : 443–464.
- [24] ZENGIN H, TUREN Y, AHLATCI H, et al. Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of as-cast and as-extruded Mg-4Zn-1La magnesium alloy [J]. *Rare Metals*, 2020, 39: 909–917.
- [25] HU H Z, XIAO H Q, HE X C, et al. Development of Ti-V-Cr-Mn-Mo-Ce high-entropy alloys for high-density hydrogen storage in water

- bath environments [J]. *Rare Metals*, 2024, 43 (10) : 5229–5241.
- [26] HU H, TANG R, XIAO H, et al. Development of V-free BCC structured alloys for hydrogen storage [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2023, 6 (21) : 11108–11117.
- [27] 樊自田, 杨力, 唐世艳. 增材制造技术在铸造中的应用 [J]. *铸造*, 2022, 71 (1) : 1–16.
- [28] NING Y, ZENG X, HUANG J, et al. Multifunctional electromagnetic responsive porous materials synthesized by freeze casting: principles, progress, and prospects [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 35 (6) : 2414838.

Application and Optimization of Casting Technology in Functional Materials

——Functional Materials Forum of the 75th World Foundry Congress

WANG Zhong-he¹, LI Qian¹, WANG Yun-xia^{2,3}

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, China; 2. China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

The 75th World Foundry Congress Functional Materials Forum focused on exploring the application and optimization of casting technology in functional materials. Casting technology has now become an important means of enhancing the performances of functional materials, particularly in the fields such as energy storage, thermal insulation, and neutron shielding materials. During the forum, scholars shared cutting-edge researches on the application of computational materials science in casting technology, composition regulation and process improvement of lightweight functional materials, the development of multi-principal element alloys for hydrogen storage and energy storage, as well as the casting and solidification applications of functional materials. The research findings presented in the forum laid a theoretical foundation and provided practical guidance for the innovative application of casting technology in the field of functional materials. Additionally, with the rapid advancement of high-throughput computing and artificial intelligence, new pathways have been opened for the future development of green manufacturing and intelligent casting technology, further driving continuous innovation and breakthroughs in materials science.

Key words:

casting technology; functional materials; computational materials science; microstructural control; process optimization