

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

E03-相分离冶金与材料
E03-Phase-separation Metallurgy and
Material

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



E03. 相分离冶金与材料

分会主席：朱苗勇、赵九洲、侯新梅、胡侨丹、闵小波

E03-01

合金分相组织形成过程及控制

赵九洲，江鸿翔，张丽丽，何杰
中国科学院金属研究所

很多合金材料在制备过程中会发生分相相变，它们特别适合于研制高性能原位复合材料。近年来，作者开展了分相合金凝固实验以及建模与模拟研究合金分相过程，探索了合金分相过程及其控制途径。本文详细介绍了相关研究工作。

E03-02

定向凝固传热调控对镍基高温合金缺陷影响机制的研究

李奕霖¹，侯新梅¹，王恩会¹，刘静静¹，赵云松²，董龙沛²，陈光耀³

1. 北京科技大学碳中和研究院
2. 北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室
3. 上海大学材料科学与工程学院

航空飞机涡轮叶片作为推动航空发动机发展的核心驱动力，其制备技术直接决定了发动机性能极限。随着推重比要求的提升，叶片结构复杂化导致缺陷控制难度剧增，报废率居高不下。缺陷形成与定向凝固过程中的复杂传热行为密切相关。受限于传热过程的复杂性，传热数据难以直接获取，且当前工艺优化依赖于经验试错，造成资源严重浪费。因此，基于叶片定向凝固传热机制揭示，提出缺陷生成抑制新策略，对实现叶片高效制备至关重要。针对上述难题，本项目针对某牌号单晶高温合金定向凝固过程，构建基于修正的界面换热系数的凝固传热模型，使模拟精准度提高 20%。通过改变型壳厚度（3, 6, 8mm）、铸件结构参数（1.2, 4.1, 16mm），结合数值模拟与物理实验，系统解析并量化型壳/合金界面传热行为对缺陷形成的作用机制，构建了传热条件-缺陷分布的关联模型。此外，通过多工艺参数的交叉组合传热模拟与浇注实验构建了数据库，揭示了定向凝固过程中传热行为对缺陷形成的作用机理，助力精密铸造工艺优化策略的迭代升级，为镍基高温合金复杂构件的高品质制造提供了重要的理论参考。

E03-03

激光增材制造难混溶合金熔池动力学与相分离行为的关联机制

卢温泉
上海交通大学材料科学与工程学院

E03-04

基于液态金属低温相变和相分离的金属微纳制造

汤剑波
西湖大学

熔融金属和合金的液-固相变伴随自发的微观相分离和结构演化过程。相比于常规体系所需的高相变温度，低熔点金属和合金（常被称为液态金属）的引入使得相变和结构生成过程得以在室温下进行并对其进行调控。利用液态金属可在低温下实现相变和相分离的优势，我们开发了一种基于自发相变和图案化的金属微纳结构制备方案[Nat. Nanotechnol. 2021, 16, 431 & Nat. Synth. 2022, 1, 158]。在研究过程中，我们主要关注在液态金属中掺入了少量目标金属的稀释合金体系及其表面相分离行为。我们在多个稀释合金体系中观察到微纳尺度且高度有序凝固图案在样品表面自发形成，特定体系展示出显著的溶质元素表面富集效应。分子动力学模拟结果显示，该表面元素富集效应可以通过相分离过程中体系的最小能量原理进行解释。

我们进一步研究样品表面接触状态和微小扰动对相分离和图案化过程的影响。在应用方面，我们展示了所制备金属微纳结构作为高分辨表面增强光谱成像和检测功能基底的可行性。

E03-05

合金横向凝固过程通道偏析形成机制新认识

康吉柏，王卫领，朱苗勇

东北大学冶金学院

通道偏析会严重影响合金铸件的性能且由于其形成过程涉及到复杂的流体力学现象，因而受到广泛的研究。尽管向上凝固条件下的通道形成机制已较为明确，但横向凝固过程中其形成机理仍未达成共识，尤其是糊状区失稳与通道初始化之间的内在联系尚不清晰。为弥补这一研究空白，本文构建了一个包含多项创新方法的宏观偏析模型，涵盖固相溶质累积速率方程、溶质守恒方程组及热力学平衡框架下耦合宏-微观偏析模型的液相率迭代新格式。该宏观偏析模型通过和基准实验的对比验证了其准确性，继而用于通道偏析形成机理的研究。研究发现，糊状区失稳并非如以往研究所认为的由重熔或流动不稳定性所引起，而是由温度梯度所驱动。该梯度引发固/液界面突起，形成阶梯状凝固前沿，晶间流动在此突起区域受到抑制，促使局部溶质积累，诱导通道偏析发生。随后，探讨了微观组织与凝固条件对通道演化的影响。结果表明当枝臂间距减小时，通道偏析受到显著抑制；在不同的渗透率模型下通道形貌表现出不一致性。此外，通道间距与固/液界面的阶梯间距相当，其相对重力方向的倾斜角度随温度梯度的增加而增大。通道中断的现象与液相区内熔体流动的不稳定性相关联。在高温温度梯度条件下，热驱动环流可在长时间内保持稳定，从而形成排列整齐、发展充分的通道；而提高冷却速率则能有效抑制通道的形成。最后，基于瑞利数判据对通道形成的临界条件进行了评估，发现瑞利数高于 0.55 时通道初始化，而当瑞利数超过 1.0 时，易于形成严重的偏析通道。

E03-06

铝合金钎料成型与钎焊界面冶金凝固行为原位研究

丁宗业，胡侨丹，卢温泉，李建国

上海交通大学材料科学与工程学院

E03-07

帘线钢中夹杂物控制技术研究

王晓峰

陕西科技大学

本文对帘线钢铸坯中氧化物夹杂的尺寸和成分分布进行了研究。在此基础上优化了帘线钢冶炼工艺。结果表明：随着凝固时间的延长，帘线钢连铸坯中氧化物夹杂的尺寸由连铸坯表面到心部不断增大。在帘线钢冶炼过程中，采取低碱度渣精炼工艺，控制夹杂物中的 Al_2O_3 含量在 20% 左右，使钢中夹杂物向低熔点区域转变，促进钢中夹杂物上浮、排出钢液。同时也使钢中残留氧化物夹杂具有良好的变形性能。通过优化 VD 精炼过程氩气搅拌制度，促进钢中残余夹杂物上浮排出钢液，从而降低帘线钢中剩余夹杂物尺寸。通过采用低碱度渣精炼和 VD 精炼过程弱吹氩搅拌等氧化物夹杂控制技术使帘线钢中夹杂物尺寸和成分得到了有效控制。

E03-08

Ni-Nb-Y 合金液-液相分离动力学过程的模拟研究

赵雷¹，何杰^{2,3}

1. 辽宁石油化工大学

2. 中国科学院金属研究所

3. 中国科学技术大学

液态下具有组元互溶度间隙（Miscibility Gap）的三元或多元相分离合金，因其两分离相在性质上存在显著差异，能够实现两相协同的特殊功能特性或优异力学性能，而成为新型复合材料设计基础和应用研究的热点领域。Ni-Nb-Y 合金的液-液相分离过程是实现相分离金属玻璃转变，形成纳米增强非晶态组织或构建特定壳核型分层结构的关键基础。因此，深入研究 Ni-Nb-Y 合金的液-液相变过程对该类合金的材料设计与性能开发具有重要指导意义。本文通过建立 Ni-Nb-Y 合金快速凝固过程的数学模型，对其液-液相变动力学过程开展模拟研究，模拟分析第二液相的析出、长大、运动迁移等相分离行为，从而阐明快速凝固条件下 Ni-Nb-Y 合金微观组织的演变过程。

E03-09

压力影响 30Cr15Mo1N 铸锭二次枝晶间距和柱状晶生长速率的相场法研究

朱红春，何志禹，李花兵，周杨，倪卓文，冯浩，张树才，姜周华

东北大学冶金学院

压力可以通过改变宏观物理现象以及微观热力学和动力学等因素来影响枝晶生长，但其中决定性因素尚未明晰。本研究利用相场法从一次枝晶间距（PDAS）、温度参数（冷却速率和温度梯度）和物性参数三个方面揭示了压力对二次枝晶间距（SDAS）和柱状枝晶生长速率的影响机制。结果表明，随着压力的增加，PDAS 的减小和温度参数（冷却速率和温度梯度）的增大，均减小了 SDAS。温度参数和 PDAS 的影响占比分别为 70%和 30%左右。同时，PDAS 的减少降低了柱状枝晶生长速率，而温度参数的增大提高了柱状晶生长速率。温度参数和 PDAS 的影响比例分别约为 180%和-80%。此外，物性参数的变化会增加 SDAS 并降低生长速率，然而其影响占比极小，可以忽略不计。通过定量比较 PDAS、温度参数和物性参数的影响占比，本研究确定了温度参数是压力影响枝晶生长的决定性因素。

E03-10

电磁定向结晶法设计新型共晶高熵合金的基础研究

徐永超，雷云，马文会

昆明理工大学

共晶高熵合金（Eutectic high-entropy alloys, EHEAs）因其独特的微观组织和优异的性能而受到广泛关注与研究。然而，如何高效且精确地设计新型 EHEAs 的化学成分仍然是一个巨大的挑战。为了解决这一问题，本研究基于共晶合金相图中物相的析晶原理，提出利用单次电磁定向结晶实验分离非共晶合金熔体来设计新型 EHEAs，并通过对 AlCoCrFeNi₃ 非共晶高熵合金熔体进行了一次电磁定向结晶实验，成功将其分离为共晶合金和非共晶合金两部分，获得了具有 FCC/BCC 双相片层状微观组织的 Al_{17.74}Co_{12.02}Cr_{13.70}Fe_{11.65}Ni_{44.89}（at.%）新型 EHEA。铸态 Al_{17.74}Co_{12.02}Cr_{13.70}Fe_{11.65}Ni_{44.89} EHEA 具有良好的室温拉伸力学性能组合，其屈服强度和抗拉强度分别为 538.2MPa 和 1081.3MPa，同时还具有 12.4%的拉伸延伸率。该研究结果充分证明了利用电磁定向结晶法设计新型共晶高熵合金的可行性与高效性，此外该方法不依赖任何热力学数据，因此在设计 EHEAs 领域具有很大的应用潜力。

E03-11

金属材料中试基地-科研基地

张建

铭建（辽宁）高科技实业有限公司

科研基地TM是金材中试(北京)科技有限公司和铭建(辽宁)高科技实业有限公司旗下的科研服务品牌，成立于 2014 年，已在全国主要一二线城市设立了 30 余个分支机构，为数十万科研工作者提供各类科研服

务。科研基地 TM 致力于构建专业性、综合性、全流程性的科研服务平台，公司产品面向科技研发市场，重点聚焦金属材料研发行业，专注为高等院校、科研机构、生产企业提供科研中试服务，主要业务包括：检验分析测试、合金熔炼、锻造开坯、轧制成形、试样加工及材料研发，以及各个实验环节的相关配套模具、辅具、实验耗材的定制，并可提供专业的 CMA、CNAS 检测报告。可以满足先进金属材料研发的全部需求，从科研设想到成果转化，科研基地 TM 一站式解决。经过多年经验积累，公司稳步发展，科技服务能力达年产 20 余万件，多次承担并参与国家重大课题和项目。科研基地 TM 尤其在高强钢、有色金属、高熵合金、高温合金，高比重材料，单晶材料，以及各类先进材料的制备、检测、中试生产的研实验研究、中试生产等方面，形成一套完善的材料制备、加工和分析测试的方法，整理出一套完善的材料制备，加工和分析测试的方法。面对各种新型材料的不断更新，公司持续提升加工和分析测试的技术攻关能力，凭借专业、精准、高效的科研服务能力，打造了良好的业界口碑。已与全国众多高校、研究院所、钢铁生产企业建立了良好的合作和服务关系，收获了各行业客户的高度赞誉与认可。公司创始团队由东北大学、中山大学、四川大学等 985 院校数名博士组成，具有 20 年以上的金属材料研发经历，通过不断技术创新、完善专业设备、强化员工专业素养，现已成为广大高等院校、研究院所、生产企业提供一站式全流程的科研服务平台。

E03-12

偏晶合金地基/空间条件下凝固组织形成过程研究

杨林洁^{1,2}, 赵九洲^{1,2}, 江鸿翔^{1,2}, 张丽丽^{1,2}, 何杰^{1,2}

1. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心
2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

偏晶合金在地面重力条件下凝固时，熔体内的重力对流不仅促进相偏析，而且使凝固过程的各种影响因素的作用相互混淆，给凝固过程研究带来极大困难。微重力环境可有效抑制熔体对流，为揭示偏晶合金凝固组织形成机理提供有利条件。本研究通过结合群体动力学和元胞自动机方法，建立了综合考虑液-液相变与液-固相变的偏晶合金凝固模型，模拟分析了微重力条件下偏晶合金凝固组织形成过程，研究了液-液相变和液-固相变对凝固过程的影响。结果表明，偏晶合金凝固过程是液-液相变与液-固相变耦合作用的结果，凝固界面与弥散相液滴的相互作用是决定液滴分布的关键因素。在微重力条件下，对流显著减弱，通过优化合金成分和凝固工艺，即使在较低冷却速率下，也能获得均匀弥散的凝固组织。

E03-13

铸造铝硅合金组织调控剂设计及细化变质机制

郑秋菊

中国科学院重庆绿色智能技术研究院

铸造铝硅系合金具备优异铸造性、高比强度、高导热、耐磨、耐蚀等特性，被广泛应用于汽车发动机、高铁枕梁等核心零部件的制造。目前铸造铝硅合金难以突破的力学性能水平是限制其进一步发展的技术瓶颈。究其原因，主要在于传统铝硅合金 α -Al 晶粒细化剂和共晶硅变质剂的“毒化”效应致使合金凝固组织改性不良这一核心科学问题尚未被完全解决。本研究提出设计高效细化变质一体化新型 Al-RE-B 中间合金，解决铝硅合金组织调控过程中的“毒化”问题。研究发现中间合金中均匀弥散 REB_6 粒子在铝硅合金熔体中稳定，可直接调控 α -Al 异质形核过程，细化 α -Al 晶粒尺寸；过剩 RE 元素可吸附在硅相生长界面，诱导多重孪晶的形成，变质共晶硅形貌。研究工作为多重组织调控剂设计、突破铸造铝硅系合金性能瓶颈提供新思路。

E03-14

再生钢铁原料电炉炼钢深度净化技术研究与实践

朱荣, 魏光升

北京科技大学

电炉炼钢是再生钢铁原料循环利用的核心环节。受传统工艺技术手段限制,实现残余/杂质元素高效净化是再生钢铁原料电炉炼钢亟待破解的关键难题。本文立足电炉短流程生产高品质钢迫切需求,结合国内外应用及研究现状,介绍并分析了废钢破碎分选、气-固喷射脱磷、CO₂复合喷吹控氮、O₂-CaCl₂喷射脱铜、低熔点金属涂镀层脱除、质量分析监控及过程控制等洁净化冶炼关键技术的创新与发展状况。指出加快电弧炉炼钢流程技术创新,构建近零碳排放电炉短流程高品质钢生产平台,提升电弧炉炼钢流程产品质量和竞争力,将是未来电炉短流程的发展方向。

E03-15**基于微气泡冶金的 RH 高效复吹精炼新技术探索**

刘建华, 何杨

北京科技大学

“双碳”战略是我国近期社会经济发展的重大战略决策,作为我国最大碳排放的工业产业,钢铁工业碳排放控制十分关键;以废钢为主要原料特征的低碳炼钢生产模式将逐渐成为我国钢铁生产主流模式,其面临着钢中氮难以高效去除难题。RH 是一种广泛采用的高效真空精炼工艺技术,面向以废钢为主要原料特征的低碳炼钢生产模式,还存在深度脱氮和高效深脱碳难等问题。本文基于已有微小气泡高效冶炼和 RH 复吹精炼等新技术研究的技术上,提出了一种 RH 复吹吹氩的高效精炼技术;结合本团队微气泡冶金方向的研究成果,进一步阐述了基于微气泡冶金的 RH 高效复吹精炼新技术思想。感谢国家自然科学基金(52174292)的支持。

E03-16**低成本钛合金冶炼技术开发**

陈光耀

上海大学

目前,通过现有冷床炉结合真空自耗电弧重熔技术回收高氧钛合金残料无法实现百分百回收,且降低钛的质量,而这种残料最终会降级进入炼钢行业和民用铸造钛合金。随着钛合金市场规模的扩大及对低成本需求急剧增加,对残料的充分利用是实现钛市场发展的关键。因此,需要一种能百分百利用钛合金残料并将其升级到原合金水平甚至更优的回收方法。在此,我们提出了一种使用真空坩埚式感应熔炼结合电渣重熔的工艺来对钛残料进行升级回收。该工艺不仅可以百分之百利用高氧含量的钛合金碎料和块状料,同时通过高效脱氧工艺,实现合金中氧含量的控制,并可达到甚至优于新料的质量水平。通过高效回收钛合金残料,有可能持续满足钛合金发展需求,对钛合金的真正可持续发展提供指导。

E03-17**基于高稳定耐火材料的高温合金纯净化熔炼及定向凝固研究**徐辉¹, 侯新梅¹, 王恩会¹, 赵云松², 董龙沛², 陈光耀³

1. 北京科技大学

2. 北京航空材料研究院

3. 上海大学

作为先进航空发动机不可或缺关键部件之一的高代次镍基单晶涡轮叶片(以下简称单晶叶片),其纯净度和表面质量直接影响航空发动机的气动性能、服役可靠性及安全性。目前单晶叶片近净形熔模精密铸造(以下简称熔铸)制备用 Al₂O₃基重熔坩埚和型壳因高温热震和化学稳定性差易导致合金洁净度和表面质量缺陷超标,成为限制单晶叶片良品率提升的主要瓶颈之一。本工作基于单晶叶片高稳定性耐火材料需

求, 开发设计新型 $\text{CaO} \cdot x\text{MgO} \cdot (6+x)\text{Al}_2\text{O}_3$ (CMA)系列耐火原料(以下简称 CMA)。CMA 耐火原料具有高熔点, 较低的热膨胀系数、高的化学稳定性及与金属熔液不润湿性等优异特性。基于 CMA 制备的重熔坩埚和型壳在实验室初步浇注过程中可有效控制合金纯净度和铸件表面质量, 具有良好的工业化应用前景。

E03-18

含 TiO_2 精炼渣对 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物溶解行为的影响

郝广御, 邓志银, 朱苗勇

东北大学冶金学院

在含钛钢精炼过程中, 钢中的 Ti 元素会向渣中迁移形成 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-TiO}_2$ 终渣, 导致 Ti 收得率降低。向精炼渣中加入 TiO_2 可以改变钢-渣平衡, 提高 Ti 的收得率, 但同时也会影响炉渣的性质, 进而影响其对夹杂物的溶解行为。为了解渣中 TiO_2 对夹杂物溶解的影响, 使用高温激光共聚焦显微镜在 $1450\text{-}1500^\circ\text{C}$ 下原位观察了 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物在 $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(0-10\%)\text{TiO}_2}$ 精炼渣中的溶解行为。研究发现, 向渣中添加 TiO_2 会改变 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物的溶解机理, 溶解的限制条件为边界层扩散或渣中扩散。适当添加 TiO_2 (如 5%) 会降低精炼渣的熔点和黏度, 有助于夹杂物溶解; 而过量添加 TiO_2 (如 10%) 则会产生相反的效果。 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物的溶解速率小于 Al_2O_3 夹杂物, 这是由于渣中 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的溶解度较低且在反应界面析出了 MgO 颗粒。

E03-19

溶气气浮技术去除钢中夹杂物研究与工业实践

何杨, 刘建华, 张杰, 李巍, 张宇迪

北京科技大学

溶气气浮技术是一种基于气体溶解-析出的新型气泡精炼工艺。其核心原理分两阶段实施: 在 LF 精炼环节向钢液通入氮气或氢气等可溶性气体, 提高钢液中可溶性气体元素含量; 随后在 VD/RH 真空精炼环节进行真空处理, 促使溶解气体以非金属夹杂物为形核基底析出微气泡。这些气泡在上浮过程中通过界面吸附作用捕获夹杂物, 最终实现气-固复合体在熔渣层的分离去除。本文探讨了该技术的近期研究进展: 通过真空悬浮熔炼实验揭示了钢液体系内气体溶解/析出动力学规律及微气泡析出行为, 并结合 LF-VD/RH 协同精炼工艺开展工业实践, 证实了该技术对夹杂物去除的有效性。

E03-20

平行流动钢渣界面下速度分布及夹杂物上浮分离的水模型研究

陈超, 陶鑫, 侯栋智

太原理工大学

为促进夹杂物在钢-渣界面的有效去除, 本文研究了夹杂物在平行流动钢-渣界面的运动行为, 并探讨其分离过程中的关键影响因素。通过构建动态水-油界面装置, 模拟工业条件下动态变化的钢-渣界面。根据夹杂物与熔渣之间接触角的差异所导致的润湿性差异, 选取了两种具有代表性的颗粒: 与油层润湿性较好的聚丙烯 (PP) 颗粒, 以及润湿性较差的氧化铝 (Al_2O_3) 颗粒, 分别模拟不同润湿性的夹杂物。实验结果表明, 夹杂物在界面处的分离行为受到颗粒直径、润湿性、渣层黏度以及界面下方流速的影响。采用无量纲位移来衡量颗粒进入油层的程度。结果显示, 润湿性较好的 PP 颗粒具有更大的无量纲位移, 更易穿越界面; 其穿越能力随直径增大而增强。而对于润湿性差的 Al_2O_3 颗粒, 直径越大反而无量纲位移越小。随着油层黏度的增加, 颗粒的无量纲位移普遍减小, 其中对 Al_2O_3 颗粒的影响尤为显著。此外, 水平流动对颗粒穿越界面具有促进作用, 但该作用存在临界流速, 当水平速度超过临界值后, 促进效应减弱, 但在大多数情况下仍优于静态条件。

E03-21

氮化硅陶瓷发热体制备的基础研究与开发应用

邓腾飞, 罗春希

武汉理工大学

氮化硅 (Si_3N_4) 陶瓷材料具有优良的机械性能、热学性能和化学稳定性, 被广泛的应用于陶瓷电子基板。本研究创新开发了 Si_3N_4 常压烧结技术, 突破了传统制备工艺需超高烧结温度 (通常为 1800°C) 或外加压力的局限。本研究自主设计了适用于 Si_3N_4 常压烧结的复合烧结助剂, 在 1620°C 常压烧结中形成低粘度液相, 显著提升材料致密度并促进 Si_3N_4 相变; 并通过引入增强相调控 Si_3N_4 微观结构及原位强化界面结合进一步提升了常压烧结 Si_3N_4 陶瓷的机械性能。同时, 结合流延成型-金属浆料印刷-温等静压-排胶-烧结一体化工艺, 成功制备 Si_3N_4 基金属陶瓷发热体, 实现了 Si_3N_4 基材与导电电路的高效集成。所形成的产品兼具快速热响应和高抗热震性, 适用于大功率电热设备, 为高温工业领域提供了高性能、长寿命的解决方案, 具有显著产业化前景。

E03-22

高钛钢与 MgO 基耐火材料的反应行为

邓志银, 杨博然, 朱苗勇

东北大学冶金学院

通过实验室实验研究了炼钢温度下高钛钢与 MgO 和 MgO -(0~10%) ZrO_2 耐火材料的反应行为。结果表明, 高钛钢与 MgO 耐火材料会生成 MgO - Al_2O_3 - TiO_x 边界层, 且边界层厚度会随着反应时间和钢中 Ti 含量的增加而不断增大。随着 ZrO_2 的添加, 耐火材料的孔隙率变小, 体积密度增大, 且高钛钢对 MgO 基耐火材料的润湿性不断降低。与钢液反应时, MgO - ZrO_2 耐火材料减少了钢液与 MgO 的接触面积, 阻碍了边界反应, 生成的反应层更薄, 因而更不易被高钛钢侵蚀。

E03-23

铅基湿法冶金阳极的研究进展

韩冰皓¹, 赵九洲^{1,2}, 江鸿翔^{1,2}, 张丽丽^{1,2}, 何杰^{1,2}

1. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

全球近 80% 的锌以及 20% 的铜都通过湿法冶金工艺进行生产。其中, 电沉积环节至关重要。阳极材料的电化学性能显著影响电沉积效率、能耗以及对环境的污染状况。近几十年来, 为了开发高性能合金阳极, 人们采取了诸如优化合金微观组织、设计阳极结构、研发氧化物涂层阳极以及合金成分设计等多种手段, 取得了显著进展。本文着重对几种铅基合金阳极的特性及其改性方法进行了探讨和分析, 并对其未来发展趋势进行了展望。

E03-24

钛微合金钢连铸压下—装送过程组织遗传性与第二相析出行为研究

祭程

东北大学冶金学院

随着海洋经济的快速发展, 大/厚规格钢材的需求量和重要性愈加凸显。对于大厚断面钢材而言, 断面厚度的不断增加不利于变形向钢板中心渗透, 心部与表面组织差异显著, 严重影响产品的服役安全性和稳定性。连铸凝固末端重压下技术利用厚板坯凝固末端内外 500°C 的温度梯度, 有效提高心部压下变形量, 同时利用高熔点第二相应变速诱导析出与奥氏体再结晶细化铸坯心部组织。以 300mm 厚钛微合金钢连铸坯

为对象,通过双道次压缩实验与热模拟实验,结合透射电子与电子背散射衍射显微技术,研究了凝固末端重压下铸坯奥氏体再结晶与碳氮化钛形变诱导析出的相互作用规律,及连铸压下—装送过程组织演变规律,基于经典成核与生长理论(CNGT)建立了连铸压下过程考虑位错密度的 Ti(C,N)应变诱导析出模型与奥氏体软化模型。通过计算与实验得出:压下过程组织应变达到 0.1, Ti(C,N)在 1300~1350℃应变诱导析出,尺寸为 7~13nm,奥氏体晶粒尺寸较未压下从 1563 μm 细化至 870 μm ,冷却后铸坯组织主要为铁素体与珠光体,平均晶粒尺寸较未压下从 82 μm 细化至 39 μm ,针状铁素体面积分数从 7%急剧增加到 36%。以实际装送工艺热模拟铸坯组织升温至 1150℃保温 1h 后,组织未还原为粗大奥氏体,保温期间奥氏体尺寸从 38 μm 增长至 46 μm ,较未压下心部组织细化 41%。

E03-25

亚纳米尺度离子偏聚抑制钛酸盐熔体玻璃形成能力

葛璇, 胡侨丹, 李建国

上海交通大学材料科学与工程学院

TiO₂ 基金属氧化物玻璃兼具优异的光学折射率和透过率,是环保轻质的理想透镜材料。然而,较低的玻璃形成能力(GFA)显著制约其应用拓展。本研究以 MO-TiO₂ 模型体系为研究对象 (M = Mg, Ba),通过联用气动悬浮与同步辐射高能 X 射线衍射技术,原位追踪了熔体结构和成玻倾向随气氛、成分的变化规律,旨在阐明影响钛酸盐熔体 GFA 的关键结构机制,为优化玻璃成分和推进实用化玻璃研发提供理论支持。核心发现如下:(一) Ti⁴⁺离子还原增强近中程序(3~6 Å)阳离子对的结构异质性降低熔体 GFA。还原性气氛导致部分 Ti⁴⁺转变为 Ti³⁺,增强了同类阳离子对(Ti-Ti 和 Ba-Ba)相互作用,对应削弱了异类阳离子对(Ti-Ba)间的连接。这种结构异质性强化的导致了拓扑无序性降低和类晶体排列增殖,减小了钛酸盐熔体 GFA。(二)较大离子势的修饰体会促进钛酸盐熔体结构异质性演化降低成玻倾向。利用德拜-休克尔电解质理论推导发现,二元钛酸盐熔体中修饰体的离子势增大会促进熔体结构异质化演变。对比 MgO-TiO₂ 和 BaO-TiO₂ 熔体, Mg²⁺较大的离子势增强了熔体淬火过程亚纳米尺度上(<1nm)密度波动,对应着较小的 GFA。本研究揭示出亚纳米尺度结构异质性是决定钛酸盐熔体 GFA 的关键因素,为通过调控熔体异质性设计制备高性能钛酸盐玻璃提供了新思路。

E03-26

航空发动机单晶涡轮叶片服役性能影响机制研究

赵云松

中国航发北京航空材料研究院

镍基单晶高温合金在航空发动机极端工况下的服役性能严重依赖于对氧化、氢脆、晶界缺陷及杂质元素(如 S)的多维度控制。研究发现,氧化行为与相界面演化具有强关联性: γ/γ' 相界面在高温氧化过程中扮演核心角色,氧化区从 400℃起优先在界面形核,随温度升至 700℃扩展至 γ 和 γ' 相。关键元素配比(如 Cr/Re 比)优化能显著提升抗氧化性,而 Re 元素通过增大晶格错配度导致界面应力集中,反而削弱了界面稳定性。氢脆机制的深入解析显示: H 在 γ/γ' 界面的富集能降低 Ni-Ni 和 Ni-Al 键合强度,并降低 γ' 相层错能,加速位错剪切及裂纹萌生;在高温氢环境中, H 通过促进空位聚集形成微孔洞(HELP 机制)与应变滞后(HEDE 机制),协同放大界面弱化效应。此外,杂质元素 S 的影响具有多重破坏性:微量 S(如 10ppm)即可改变氧化层粘附性并促进 TCP 相析出,其对蠕变的损害源于位错通道的堵塞与晶界脆化的协同作用。晶界缺陷调控方面,碳和硼的微量添加能强化小角度晶界的稳定性,通过晶界元素偏析(Cr、Mo、Re 及 B)降低界面自由能,并优化位错分布,显著提升高温低周疲劳寿命。本报告从多个尺度揭示了相界面动态演化、氢-硫元素界面作用及晶界作用机制对单晶合金性能的主导作用,强调了跨尺度设计策略对平衡抗氧化、抗氢脆与抗疲劳性能的关键意义,为航空发动机叶片材料的成分-工艺-性能一体化优化提供了理论依据。

E03-27

基于计算机视觉协同 HOP 工艺的镍基粉末高温合金强度-塑性协同优化研究

卢春成¹, 郭春雨², 陈竞炜^{1,3}, 王恩会^{1,4}, 杨涛^{1,4}, 范衍³, 王金辉⁵, 石英男⁶, 侯新梅^{1,4}

1. 北京科技大学
2. 中山大学材料学院
3. 中国航发湖南动力机械研究所
4. 辽宁材料实验室钢铁再生技术研究所
5. 青海大学青海省新型轻合金重点实验室、青海省高性能轻金属合金及深加工工程技术研究中心
6. 北京钢研高纳科技股份有限公司

高性能航空发动机是国家空天安全的核心装备, 镍基粉末高温合金涡轮盘作为关键承力部件, 其性能直接决定航空发动机的推重比与服役可靠性。随着航空发动机性能要求提高, 涡轮盘需在高温高压环境下兼具高强度、抗蠕变、耐氧化、强韧性和长疲劳寿命等综合性能。这些性能与涡轮盘微观组织特征密切相关, 微观组织调控成为性能突破的关键。合金粉末压制成型在涡轮盘制造中至关重要, 直接影响涡轮盘的致密度和性能。传统的热等静压 (HIP) 和热压 (HP) 技术在孔隙消除和组织均匀性方面存在瓶颈。新兴的热振荡压制技术 (HOP) 通过高频振荡压力改善致密度和组织均匀性, 提升力学性能, 并具备流程短、能耗低等绿色制造优势。本研究采用 HOP 工艺制备了致密的 FGH4095 镍基粉末高温合金, 并与 HP 工艺进行了对比。得益于振荡压力对晶界滑移和粉末颗粒塑性变形的促进作用, FGH4095 合金表现出更高比例的二次 γ' 相析出, 同时热诱导孔隙 (TIP) 和原始颗粒边界 (PPBs) 析出相含量较低。因此, 其抗拉强度和屈服强度分别达到了 1433 MPa 和 1153 MPa, 延伸率为 10.46%。然而, HOP 工艺参数复杂, 微观组织与性能调控仍依赖试错, 制约了技术的工业推广。为解决上述问题, 本研究通过引入计算机视觉技术, 构建工艺参数-微观组织-力学性能的映射模型, 实现对 HOP 制备 FGH4095 合金工艺参数的智能调控与合金强度-塑性协同优化。通过调控 HOP 工艺参数 (温度、压力、时间) 制备合金样品, 采集其微观组织图像与力学性能数据, 并结合生成对抗网络 (GAN) 与 Transformer-VGG 深度神经网络, 实现了从工艺到组织的正向建模与从组织到性能的反向预测。研究采用 U-Net++ 算法对 γ' 相、PPBs 和 TIP 等关键组织特征进行高精度图像分割, 提升了对合金微观组织的量化表征能力。建立的图像识别模型预测准确率达 97%, GAN 生成图像组织相似度 (SSIM) 达 0.88, 图像分割精度 (IoU) 超过 92%。经过微观组织的跨尺度逆向设计和 HOP 工艺参数优化后, 实现 FGH4095 合金抗拉强度 (1433→1647 MPa)、屈服强度 (1153→1326 MPa) 及延伸率 (10.46→12.72%) 的协同提升。本研究可进一步为其他粉末高温合金的性能优化提供技术支撑, 有助于突破镍基粉末高温合金致密化过程的“黑箱难题”。

E03-28

跨尺度耦合算法驱动的金属结构材料研发体系探索

董博闻^{1,2}, 吴振鹏¹, 接金川³, 毛成荣², 傅明康²

1. 湖北理工学院
2. 日月重工股份有限公司
3. 大连理工大学

本研究旨在通过开发和应用跨尺度耦合算法 (包括 CALPHAD、分子动力学 (MD) 和有限元方法 (FEM)), 建立一种系统化的金属结构材料研发体系, 以加速新材料的设计与优化。该体系适用于合金力学性能、抗烧蚀性能、摩擦磨损等多种关键属性的评估。提出了一种结合 CALPHAD 计算与 MD 模拟的方法, 用于预测和模型化材料在复杂工况下的行为特性。在此基础上, 进一步扩展了这一方法, 应用于铜基合金、铁基合金、铝基合金及高熵合金等不同类型的金属结构材料。首先, CALPHAD 方法被用于准确预测这些合金的相组成和元素分布, 构建反映实际微观结构的 MD 模型。随后, 通过 MD 模拟揭示了材料在不同温度条件下的微观组织演变和位错行为, 提供了对材料内部机制的深入理解。FEM 则用于模拟宏观尺度上的力学性能和抗烧蚀性能, 确保从微观到宏观的全面覆盖。综上所述, 本研究提出的跨尺度耦合算法

为金属结构材料的研发提供了一个高效且全面的工具，具有重要的理论意义和实际应用价值。

E03-29

增材制造梯度材料与异构材料制备方法及强塑化机理研究

曹晟
暨南大学

E03-30

高拉速低碳钢连铸板坯表层凝固钩及夹杂物捕获行为研究

全文杰，罗森，王卫领，朱苗勇
东北大学

含碳量低于 0.03% 的低碳钢和超低碳钢常被应用于汽车面板以及各零部件，因此对于其连铸板坯需要保证较高的表面质量。而低碳钢在初始凝固过程中容易伴随深振痕而形成凝固钩，并由铸坯表面延伸至内部可达 4 mm，导致在凝固钩附近容易捕获上浮的气泡、保护渣以及夹杂物，从而造成轧板线状缺陷的产生。除了表面质量外，当前国内对于生产低碳钢连铸拉速与日本仍存在显著的差距，因此本研究基于数值模拟和工业实验开展了针对低碳钢高拉速铸坯表层质量的控制研究。研究结果表明在结晶器的振动周期内，弯月面的冻结和溢流导致了凝固钩的形成。弯月面的冻结决定了凝固钩的初始形貌，而在溢流过程中会使得部分凝固钩重新熔化。相较于其他区域，结晶器内水口附近以及角部的低温区域的钩子深度较大。同时，水口附近的铸坯表层夹杂物数量密度明显高于其他部位。通过提升过热度、拉速、减少结晶器水流量，以及应用电磁搅拌，均有助于降低凝固钩深度和夹杂物数量密度。在高拉速连铸生产过程中，拉速的增加给弯月面提供了更多的热量并增强了凝固前沿钢液的流速，使得铸坯表层的凝固钩深度以及夹杂物的数量密度有效降低，有利于铸坯表层质量的提升。

E03-31

大方坯连铸结晶器铜管与凝固坯壳间多界面传热行为研究

王卫领^{1,2}，张航¹，蔡兆镇^{1,2}，朱苗勇^{1,2}

1. 东北大学
2. 辽宁材料实验室

角部/偏离角裂纹是困扰合金钢大方坯连铸的共性难题，其取决于坯壳凝固与收缩、保护渣、气隙共同决定的传热特征。为此，利用 MARC 有限元软件，分别建立大方坯热-力耦合模型与铜管传热模型，并通过坯壳-铜管之间保护渣、气隙多界面热流平衡，将它们联结，从而实现沿铜管周向和高度方向传热、变形、保护渣与气隙厚度的动态耦合求解。基于 Python 二次开发，处理建模、工况运行和热流平衡方程求解等过程；基于 Fortran 二次开发，施加传热边界条件。模型应用于揭示 36Mn2V 钢大方坯连铸过程初始凝固传热行为。结果表明，随着凝固的进行，角部坯壳率先脱离结晶器铜管，从而导致角部铜管/坯壳间隙增大，固渣层与液渣层增厚，热通量降低。对于宽面和窄面中心，在角部收缩挤压和铜管限制的综合作用下，铜管/坯壳间隙厚度不变，液渣层逐渐减薄直至消失，固渣层逐渐增厚直至完全占据铜管/坯壳间隙。气隙结晶器中下部偏离角区域形成，引起热通量与大方坯表面温度的波动。随着铜管角部半径的减小，角部区域的间隙厚度减小，液渣层减薄，固渣层增厚，表面温度降低。当铜管角部半径减小到 12mm，角部坯壳变得最厚，偏离角坯壳最薄，而且角部表面应力低于宽窄面端部。工业试验表明在角部半径从 20mm 减小到 12mm，内弧侧角部柱状晶粒减短，偏离角柱状晶粒增长。基于理论分析和工业试验，建议 36Mn2V 钢大方坯连铸的最佳工艺为铜管角部半径 20mm、冷却水流量 3800L/min。

E03-32

选区激光熔化制备 AlFeCrCoNi_{2.1} 颗粒增强铝基复合材料

陈斌
东莞理工学院

采用选择性激光熔融法制备了 5 wt.% AlFeCrCoNi_{2.1} 高熵合金颗粒增强的新型铝基复合材料 (HEA/AMCs)。与 AlSi10Mg 样品相比, HEA/AMCs 的平均晶粒尺寸从 4.17 μm 减小到 3.24 μm , 晶内胞状结构宽度减小到小于 0.3 μm 。未熔解的 HEA 颗粒转化为纯 B2 相结构并保留在 Al 基体中, 与基体具有良好的润湿性和界面结合性。激光作用下熔池为富集着 Al、Si、Fe、Co、Cr 和 Ni 的金属液, 在 Al-Si 胞状结构上快速凝固, 原位生成了纳米级球形 HEA 颗粒。HEA/AMCs 具有较高的抗拉强度、断裂伸长率、维氏硬度和耐磨性, 其平均值分别为 478 MPa、5.4%、173 HV_{0.5}, 摩擦系数小于 0.4。该工作可为选区激光熔化制备综合力学性能优良的铝基复合材料提供指导。

E03-33

Effect of micro-alloying element on the microstructural and mechanical evolution of immiscible alloys

Samu Yi

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences

Immiscible alloys, characterized by a miscibility gap in the liquid state, hold significant potential for various industrial applications due to their unique physical properties. However, a major challenge lies in the phase separation that occurs during solidification. When a single-phase melt enters the miscibility gap upon cooling, it undergoes liquid-liquid (L-L) phase transformation, often resulting in a coarse, phase-segregated microstructure that limits mechanical performance. Micro-alloying, particularly with rare earth elements such as Ce and La, has emerged as an effective approach to modify the microstructure and enhance the mechanical properties of immiscible alloys. In this study, we investigate the influence mechanisms of micro-alloying on the as-cast microstructure and mechanical behavior of immiscible alloys. This work provides valuable insights into how micro-alloying can be used to tailor the solidification behavior and improve the performance of immiscible alloys for advanced engineering applications.

E03-34

钛微合金钢连铸过程 TiN 析出跨尺度模拟与实验统计研究

卢昊煜^{1,2}, 罗森^{1,2}, 王卫领^{1,2}, 朱苗勇^{1,2}

1. 东北大学多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室
2. 东北大学冶金学院

钛微合金化是提高钢铁产品性能的有效手段。在连铸过程中析出的微米级 TiN 难以消除, 是轧制裂纹的潜在诱因之一。为了明晰连铸坯中微米级 TiN 尺寸与分布的主要影响因素, 开发了一个结合宏观尺度 3D 传热、微观尺度溶质微观偏析以及 TiN 析出热力学动力学的跨尺度数值模型。对钛微合金钢连铸板坯进行了 TiN 实验统计分析, 以确定连铸坯中 TiN 的数量密度分布和尺寸分布。模拟结果与实验结果之间的对比验证了该模型足够准确, 可以预测连铸坯中 TiN 析出的尺寸分布。结果表明, 微观偏析是 TiN 析出的主要驱动力, 且钢液中含量相对较低的 N 元素是 TiN 析出的限制性因素。在铸坯横截面的中心线上, 从宽面以下, TiN 析出的平均尺寸随着深度的增加先逐渐增大到最大值 4.57 μm , 再随深度的增加逐渐减小到 2.86 μm 。进一步的数值模拟分析表明, 这种分布特征来源于连铸过程的动态冷却速率, 由此说明凝固传热行为是决定钛微合金钢连铸坯中 TiN 尺寸分布的关键因素之一。

E03-35

原料中微量杂质元素 Fe 和 Si 对 Al-Bi 偏晶合金凝固组织影响

郜冰¹, 张丽丽², 江鸿翔², 赵九洲², 何杰²

1. 东北大学
2. 中国科学院金属研究所

实验研究了原料纯度和微量杂质元素对 Al-7 wt%Bi 偏晶合金凝固组织的影响,发现,原料纯度显著影响 Al-Bi 合金中富 Bi 相粒子的尺寸,随着原料纯度的降低,富 Bi 相粒子明显粗化;微量的杂质元素 Fe 和 Si 粗化富 Bi 相粒子,富 Bi 相粒子的尺寸随着杂质元素含量的增加而增大。建立了描述 Al-Bi 合金液-液相变过程中微量杂质元素在两液相间界面处偏析行为的解析模型,理论分析了微量杂质元素在两液相间界面处的偏析行为及其对 Al-Bi 偏晶合金凝固组织的影响,结果表明,微量杂质元素 Fe 和 Si 在两液相间界面处贫化,增加两液相间界面能,降低富 Bi 相液滴的形核率,从而粗化富 Bi 相粒子。

E03-36

电磁搅拌对 IF 钢连铸板坯亚表层夹杂物分布的影响

吕高林^{1,2}, 罗森^{1,2}, 王卫领^{1,2}, 朱苗勇^{1,2}

1. 东北大学多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室
2. 东北大学冶金学院

结晶器电磁搅拌是控制 IF 钢表面夹杂物密度的有效措施,可以显著提高板坯的表面质量。为了定量探究电磁搅拌对夹杂物行为的影响。本研究建立了统一的结晶器电磁搅拌三维连铸数值模型,综合考虑了一次臂枝晶间距(PDAS)和颗粒撞击角度的影响,成功地预测了板坯亚表层夹杂物密度的总体分布趋势和范围,并通过实际的工业实验验证了预测结果。结果表明:当搅拌电流从 0 A 增加到 600 A 时,亚表层 0-5 mm 夹杂物密度从 10-15 #/mm² 减少到 5-10 #/mm²,随着距离铸坯表面距离的增加密度逐渐减小。模型预测的亚表层夹杂物密度总体分布与实测值基本一致,平均绝对误差(MAE)分别为 0.964 和 1.264。水平循环流的形成使夹杂物在弯月面处的停留时间加长,夹杂物平均去除率从 0.724%减少到 0.25%;另一方面电磁搅拌显著减少了凝固前沿夹杂物捕获数量,夹杂物平均捕获率从 67.39%减少到 60.43%。