

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

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

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

E03-相分离冶金与材料

分会主席：赵九洲、朱苗勇、胡侨丹、张新房、郭胜惠

E03-01

液-液分相合金凝固组织形成及电磁场影响

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
2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

很多合金凝固时发生液-液分相，它们特别适合于研制高性能原位复合材料，但该类合金凝固时极易形成偏析严重乃至两相分层的凝固组织，其凝固过程研究与工业制备技术研发受到了严重限制。近年来作者研究了液-液分相合金的凝固过程，考察了电、磁场的影响。研究表明，施加合适的电、磁场可有效调控液-液分相合金的凝固过程、促进原位复合凝固组织形成。本文介绍了相关研究工作。

E03-02

氧化物液相分离系统凝固过程的跨尺度研究

胡侨丹^{1,*}

1. 上海交通大学

宏观如矿床的沉积和演变，微观到细胞器中时刻发生的生物矿化行为，氧化物体系的液-液分离现象在自然界中广泛存在。在不同时空尺度上理解相分离的结构起源、分离液相的结构特征及转变过程对确定复杂系统相分离的成分/温度区间以及调控第二液相的形核类型具有重要意义。在本报告中，我们选择SiO₂-TiO₂经典相分离体系为研究模型，通过第一性原理分子动力学模拟“再现”了相分离起始阶段的Ti-Ti团簇化过程；利用气动悬浮+同步辐射高能X射线衍射原位实验追踪了富TiO₂液相析出过程母相中网络结构的重组；基于熔体结构特征推导建立了TiO₂晶体从富TiO₂液相中形核的现象学模型。本研究在离子团簇、液相结构、形核选择三个不同的时空尺度上，初步探讨了氧化物液相分离的机理及其凝固调控。这不仅对计算设计新型相分离体系提供了理论基础，而且对于制备具有可控尺寸和相组成的纳米功能材料具有重要的实用价值。

E03-03

液液分离 TiO_{2-x}的组织调控及其电催化硝酸根还原性能研究

杨帆^{1,*}

1. 上海交通大学

TiO₂纳米颗粒具有丰富的功能性，在催化、电容器、电池等领域有广泛的应用。本工作利用SiO₂-TiO₂体系的液液分离特性，采用气悬浮深过冷快速凝固方法，通过成分、冷速和气氛调控，制备了一系列具有不同粒径、相组成并富含氧缺陷的黑色TiO_{2-x}纳米颗粒。探讨了相组成、粒径与液相分离区驻留时间的关联性，揭示了金红石和锐钛矿表面交叉形核过程。基于液液分离第二相液滴生长动力学和异质形核理论分析了富二氧化钛第二相液滴凝固过程的相转变，建立了锐钛矿相/金红石相(A/R)比与粒径之间的定量模型。对获得的TiO_{2-x}纳米颗粒的电催化硝酸根还原产氨性能进行了评估，并结合第一性原理计算对还原路径进行了分析，揭示了氧空位的作用。本工作提出的TiO_{2-x}纳米颗粒粒径和相组成耦合调控策略，有望推广至其他氧化物体系，为获得具有优异性能的高分散纳米颗粒提供可靠方法和理论依据。

E03-04

难混溶合金制备过程原位表征：熔化、凝固与增材

卢温泉^{1,*}

1. 上海交通大学

由于独特的液相分离特性，难混溶合金可实现结构（均质、核壳）调控来获得重要的结构和功能材料，在军工、航空航天、汽车以及电子封装等领域具有广泛应用前景。然而，由于金属的不透明特性以及熔体的高温环境，其形核和生长过程的动态演变表征非常棘手，致使对制备过程复杂性缺乏深刻认识，进而无法精准控制，制约了难混溶合金核心结构部件的制造、发展及应用。鉴于此，我们搭建了金属材料制备过程原位表征平台，发展了从材料液态原子尺度到工件试样的跨尺度原位表征方法，并利用同步辐射高能 X 射线衍射及成像技术，深入研究了难混溶合金熔化、凝固以及增材制造过程的组织演化规律，阐明了第二相液滴的粗化机理，探明了熔池演化、气泡诱导溶质偏析及其对液相分离行为的影响机制，发现异质相会明显改变原子间相互作用，阻碍了第二相液滴形核，打破了异质相促进形核从而细化凝固组织的传统认知。

E03-05

基于 CALPHAD/MD 多尺度计算的铜合金组织演变及变形机制研究

董博闻^{1,*}，吴振鹏¹，刘仕超²，接金川³

1. 湖北理工学院机电工程学院，智能输送与控制湖北省重点实验室

2. 苏州大学沙钢钢铁学院

3. 大连理工大学材料科学与工程学院

基于 CALPHAD/MD 多尺度计算方法，从热力学与动力学角度探究 Cu-Pb-Sn、Cu-Ni-Al 等铜基合金在凝固及热处理过程中的组织演变规律。首先通过热力学分析得到相关多元铜合金的自由能曲线，从热力学角度探究合金元素对元素间相互作用趋势的影响。基于 CALPHAD 方法得到特定成分下铜合金的物相比例、成分及晶格类型，进一步揭示合金元素对铜合金物相演变的影响。基于以上热力学数据，进一步基于 MD 方法对以微观组织建模并开展动力学计算，揭示合金在非平衡凝固条件下的组织演变过程，以及相关组织演变对合金力学性能、位错运动等因素的影响机制。以上提出的耦合计算方法将为新型高性能铜合金的成分设计、组织调控及性能评价提供新的思路。

E03-06

陶瓷型壳与 DZ406 合金的界面反应研究

侯新梅^{1,*}，徐辉²，王恩会¹，董龙沛³，赵云松³

1. 北京科技大学碳中和研究院

2. 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室

3. 北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室

涡轮叶片是先进航空发动机的关键部件，型壳是涡轮叶片制备成型的重要保障，对叶片的表面质量和性能起着关键作用。由于镍基铸造高温合金极高的熔铸温度，现有型壳因界面稳定性不足导致叶片表面缺陷超标，严重影响叶片后续使用性能。本工作以 DZ406 合金与刚玉型壳和锆英粉型壳为模型，研究了锆英粉型壳和刚玉型壳对 DZ406 叶片表面质量的影响，并分析了界面反应机理。主要研究结果有：(1)相比于锆英粉型壳，采用刚玉型壳浇注出的 DZ406 叶片表面粘砂严重，这和刚玉型壳的高温强度较差有关。(2)采用刚玉型壳浇注出的 DZ406 叶片界面反应层厚度在 50 μm 左右，叶片界面产物主要为型壳混合部分扩散至界面的合金氧化物。(3)采用锆英粉型壳浇注出的 DZ406 叶片界面反应层厚度在 10 μm 左右，叶片界面产物主要为富 Hf 氧化物。(4)在浇注过程中，锆英粉型壳中的 ZrSiO_4 与 DZ406 合金熔体发生反应并产生 SiO_2 ，驱动 DZ406 合金中 Hf 元素向界面处富集。相关结果可为 DZ406 叶片制备提供数据支撑和借鉴。

E03-07

Cu 基相分离型偏晶合金凝固组织调控机理及工程化应用接金川^{1,*}, 刘仕超¹, 彭博¹, 董博闻¹, 王同敏¹, 李廷举¹

1. 大连理工大学

Cu 基相分离型偏晶合金具有十分复杂的凝固行为, 通过对其凝固过程的控制可以获得理性的凝固组织, 从而制备出具有优异性能(如高强导电、电磁屏蔽、耐磨等)的结构与功能材料, 往往具有广阔的工业应用前景和重要的科学研究价值。基于此, 针对两类典型具有广泛工程化应用的 Cu 基相分离型偏晶合金, 即含高熔点组元 (Cu-Fe) 以及含低熔点组元 (Cu-Pb-Sn) 合金体系, 开展研究工作。通过以上研究, 揭示了 Cu 基相分离型偏晶合金的熔体均匀化热力学机制, 并提出了相关的熔体均匀化模型; 通过合金成分 (组元与微量元素) 和凝固工艺 (熔体过热度与冷却速度) 的调整, 系统研究了不同条件下合金的组织演变特征及凝固行为, 并明确了对相分离特性及其过程的影响机制; 通过耦合实验与相场模拟, 阐明了相分离的动态过程及凝固组织多样性的形成机制; 基于相分离行为及其过程调控, 对合金的显微组织与结构进行精细化调控, 实现了合金性能 (力学性能、磁性能、耐磨损性能等) 的突破与提升, 上述工作为难混溶及偏晶合金的凝固行为及组织调控提供了重要的理论依据。

E03-08

超纯铁素体不锈钢高温氧化层演变过程元胞自动机模拟宋岩^{1,2,*}、孙铭山^{1,2}

1. 山西太钢不锈钢股份有限公司

2. 中国宝武太原钢铁 (集团) 有限公司

铁素体不锈钢表面氧化物厚度、成分以及性能是铸坯修磨、热轧、酸洗钝化等制造工序中控制不锈钢表面质量以及耐蚀性的重要影响因素之一。同时也是当前换热器零件、新能源燃料电池与焊接部件等功能与结构应用领域中妨碍铁素体不锈钢材料扩大推广的关键因素之一。因此深入研究、认识并理解不锈钢生产与应用过程中高温氧化层的演变过程对提高当前不锈钢材料表面质量, 开发先进不锈钢功能及结构材料具有重要意义。

但是高温环境中通过实验直接观察铁素体不锈钢表面及内部氧化物的演变过程不仅难度极高并且金钱、时间耗费巨大。时至今日大多数研究仍局限于试验后结合理论模型进行倒推分析, 这不仅难以理清诸多影响因子的交互作用, 更有可能无法真实还原实际氧化层的演变过程。为克服上述缺点, 本文基于元胞自动机算法, 开发了描述超纯铁素体不锈钢高温氧化行为的计算机数值模型, 并与文献中试验数据进行了对比, 验证了所开发的模型模拟结果的准确性。

E03-09

银基钎料钎焊过程中液-液相分离行为丁宗业^{1,2,3}, 胡侨丹^{2,*}, 卢温泉², 李建国², 龙伟民³

1. 佛山科学技术学院

2. 上海交通大学

3. 郑州机械研究所新型钎焊材料与技术国家重点实验室

Ag 基钎料钎焊过程中液-液相分离行为尚未明晰, 硬质合金刀具机械性能难以提升。本文主要分析不同合金元素作用下、不同凝固条件下钎料组织分布与凝固路径, 弄清钎料液-液相分离与凝固组织演变机制; 依据不同条件下富 Cu 相与富 Fe 相的分布特征与生长演变, 确定第二相的聚合、凝并、粗化与迁移机制; 研究钎料不同凝固组织状态与接头力学性能的内在关系, 可实现钎料凝固组织与性能的有效调控, 为调控硬质合金刀具钎焊过程中凝固组织演变、提升刀具机械性能提供理论借鉴。

E03-10

U-Cu 和 U-CuZrTi 偏晶合金的凝固组织特性研究

李正飞¹, 黄火根^{1,*}, 法涛¹, 张雷¹, 王勤国¹

1. 中国工程物理研究院材料研究所

偏晶合金是广泛存在于合金体系中的一类合金,其最大的特点就是在凝固过程中具有液-液相变温度区间,如果采用合适的方法或手段控制这类合金的液液相分离过程,则可以制备出第二相均匀弥散于基体的原位自生复合材料[1]。目前常规金属的偏晶合金已经被广泛研究,如 Al-Pb、Al-Bi、Cu-Cr、Ag-Ni 等[2],而铀基偏晶合金的研究却鲜有报道。为此,本研究采用真空电弧熔炼方法制备了 U90Cu10 和 U85Cu9Zr4.5Ti1.5 两种合金,然后利用激光共聚焦显微镜 (OM)、X 射线衍射仪 (XRD)、差示扫描量热仪 (DSC) 以及配置有能谱仪 (EDS) 的扫描电子显微镜 (SEM) 进行了凝固组织特性研究。结果发现,两种合金都形成了第二相颗粒均匀弥散分布于基体的复合材料结构,基体均为 α -U 固溶体相,但弥散相的种类不同,其中 U-Cu 合金的弥散相为 UCu5 化合物,而 U-CuZrTi 合金的弥散相为 Cu 基非晶。这一结果,对于我们后续设计弥散强化型高强铀合金提供了新的思路。

E03-11

IN6203DS 合金与陶瓷型壳界面反应研究

徐辉¹, 王恩会², 侯新梅², 董龙沛³, 赵云松³

1. 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室
2. 北京科技大学碳中和研究院
3. 北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室

宏观如矿床的沉积和演变,微观到细胞器中时刻发生的生物矿化行为,氧化物体系的液-液分离现象在自然界中广泛存在。在不同时空尺度上理解相分离的结构起源、分离液相的结构特征及转变过程对确定复杂系统相分离的成分/温度区间以及调控第二液相的形核类型具有重要意义。在本报告中,我们选择 SiO₂-TiO₂ 经典相分离体系为研究模型,通过第一性原理分子动力学模拟“再现”了相分离起始阶段的 Ti-Ti 团簇化过程;利用气动悬浮+同步辐射高能 X 射线衍射原位实验追踪了富 TiO₂ 液相析出过程母相中网络结构的重组;基于熔体结构特征推导建立了 TiO₂ 晶体从富 TiO₂ 液相中形核的现象学模型。本研究在离子团簇、液相结构、形核选择三个不同的时空尺度上,初步探讨了氧化物液相分离的机理及其凝固调控。这不仅对计算设计新型相分离体系提供了理论基础,而且对于制备具有可控尺寸和相组成的纳米功能材料具有重要的实用价值。

E03-12

偏晶合金微量界面活性元素选取研究

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

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

添加适当的微量界面活性元素能够降低偏晶合金凝固过程中两液相间的界面能,从而提高弥散相液滴形核率、降低其空间迁移速率,促进弥散型偏晶合金凝固组织的形成。本研究建立了描述 A(溶剂)-B(溶质)二元偏晶合金液-液相变过程中微量元素 i 在液/液界面处偏析行为的理论模型,计算分析了微量元素在液/液界面处的偏析行为。实验研究了不同微量元素对 Al-Bi 和 Zn-Pb 偏晶合金凝固组织的影响,实验结果验证了模型的准确性。研究表明,微量元素 i 的偏析行为取决于元素 i 在两液相中的分配系数 K_i (元素 i 在富 B 熔体中的摩尔分数与富 A 熔体中的摩尔分数之比)。提出了一种基于 K_i 的偏晶合金微量界面活性元素的选取原则: $K_A < K_i < K_B$ 。

项目资助: 国家重点研发计划(2021YFA0716303)和辽宁省自然科学基金项目(No. 2023-MS-023)

E03-13

复合脉冲电流和稳恒磁场对 Pb-Zn 合金凝固组织形成的影响

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

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

铅锌合金是一种理想的锌电沉积阳极材料。本文采用复合电磁场控制 Pb-Zn 合金的微观组织, 并对其机理进行了研究。结果表明, 脉冲电流可以显著增强第二相的成核驱动力, 从而促进第二相的细化。稳恒磁场可以有效抑制熔体对流, 提高样品中心轴周围的熔体冷却速度。因此, 有利于改善合金组织均匀性。复合电磁场不仅可以抑制熔体对流, 还可以提高少数相液滴的成核率, 从而促进了弥散型凝固组织的形成。因此复合电磁场的应用是控制偏晶合金微观组织的有效方法, 具有重要的工业价值。

E03-14

再生 6082 铝合金组织性能调控研究

孙影^{1,2}, 江鸿翔^{1,3,*}, 赵九洲^{1,3}, 何杰^{1,3}, 张丽丽^{1,3}

1. 中国科学院金属研究所

2. 沈阳工业大学

3. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

随着铝消费量的不断增加, 原生铝资源日益减少, 近十年来, 废旧铝制品日益增多, 可回收的废铝资源日益庞大。与使用原生铝相比, 使用再生铝合金仅消耗 5% 的能源, 可节省 95% 的碳排放。再生铝合金不仅可以缓解铝资源匮乏问题, 还有利于节能减排, 具有良好的经济、社会和环境效益, 对铝行业的发展大有裨益。然而, 由于回收的废弃铝材中杂质种类繁多, 再生铝合金中 Fe、Cu、Mn、Ti 等杂质元素含量较高, 其中 Fe 是再生铝中的主要杂质元素。由于 Fe 元素在铝基体中的溶解度很小, 容易与 Al、Si、Mn 等元素反应生成针状硬脆相, 对再生铝合金的力学性能、耐腐蚀性能、铸造性能均产生不利影响。为了减弱杂质元素 Fe 对铝合金组织、性能造成的不良影响, 近年来国内外科研工作者开展了大量的研究工作, 主要通过以下措施来减轻 Fe 的影响: 一是降低铝熔体中的铁含量; 二是改善富 Fe 相在铝合金中的形貌, 尽可能抑制针状富 Fe 相的形成, 使之生成对铝合金性能危害较小的块状或近球状富 Fe 相。本研究以在航空航天、交通运输等领域广泛使用的 6082 铝合金为对象, 研究微量稀土对再生 6082 铝合金组织、性能的影响及作用机理, 以期高性能再生铝合金的研发奠定基础

E03-15

高品质钢连铸水口抗结瘤电磁精准调控技术与应用

张新房^{1,2,*}

1. 内蒙古科技大学 (轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室、稀土产业学院)

2. 北京科技大学 (冶金与生态工程学院)

稀土钢、轴承钢、含硫钢、含钛钢等高品质钢是国家市政工程乃至国家制造业的支柱性原材料, 其产品质量关系着人民生命及财产安全。但受传统理论、工艺技术及装备水平限制, 目前高品质钢的洁净化控制还不能满足需求, 产品稳定性亟需提高。尤其, 水口结瘤一直是困扰浇铸过程的重要问题, 现有抑制水口堵塞技术主要集中在夹杂物控制和水口改性两方面。但是, 基于密度差异分离的传统手段难以驱动与钢液密度接近的小尺寸夹杂物定向迁移, 且水口改性生成的“低润湿性玻璃膜”生命周期短、通用性差, 仍无法解决水口堵塞的行业难题。结合物相电学性能差异的本征特性, 本研究提出了“利用脉冲电流调控多组元界面反应及多种类夹杂物迁移的稀土钢连铸水口抗结瘤”创新概念。针对脉冲电流调控连铸水口钢液复杂流场中多组元界面反应、多种类夹杂物迁移及抗结瘤智能控制模型相关性的关键科学问题, 提出了脉冲电流调控多组元界面反应生成低润湿高稳定性的抗结瘤玻璃膜新思路, 建立了电流密度梯度“无差别”

驱动多种类夹杂物定向迁移新理论, 开发了连铸水口抗结瘤智能化电磁调控新技术。本研究将为实现高品质钢浇铸过程智能控制和高效化生产提供理论支撑和科技贡献。

E03-16

硅钙钡脱氧重轨钢精炼过程非金属夹杂物演变行为

张真焯¹, 邓志银^{1,*}, 梁志刚², 朱苗勇¹

1. 东北大学

2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司

由于重轨钢对全氧含量和 Al_2O_3 系夹杂物有严格的要求, 因此重轨钢通常采用非铝脱氧工艺生产, 且为了获得较好的脱氧效果, 钢铁企业通常采用 Si-Ca-Ba 脱氧剂生产重轨钢。为了揭示 Si-Ca-Ba 脱氧对重轨钢中夹杂物的影响, 本文采用工业实验研究了重轨钢精炼过程非金属夹杂物的演变行为, 并在实验室验证了不同类型夹杂物的形成机理。研究发现, 在精炼过程中, 钢中夹杂物由 $\text{SiO}_2\text{-MnO(-Al}_2\text{O}_3)$ 系夹杂物转变为 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 系夹杂物。在 LF 精炼中期, 部分 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 系夹杂物中的 Al_2O_3 含量显著升高 (高于 30%), 而在 LF 精炼结束时又逐渐降低, 到 VD 处理结束时夹杂物成分趋于稳定。验证实验表明, 含 Al_2O_3 耐火材料是导致夹杂物中 Al_2O_3 升高的主要原因, 而精炼渣则可以降低这些夹杂物中的 Al_2O_3 含量。研究还发现, Si-Ca-Ba 脱氧剂主要作用于炉渣脱氧, 对钢液的脱氧作用十分有限。由于 Si-Ca-Ba 脱氧剂价格较高, 在冶炼重轨钢时, 建议考虑经济的脱氧剂, 且采用低 Al_2O_3 的耐火材料。

E03-17

复合电磁场对相分离合金凝固过程及组织的影响

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

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

相分离合金凝固过程中发生的液-液相分离现象有助于形成特征差异较大的两个液相, 这为研制弥散型组织或核/壳结构的原位金属基复合材料提供了一种新的途径。然而, 该类合金凝固过程中极易形成偏析型凝固组织, 这严重限制了相分离合金凝固理论的研究和工业制备技术的研发。

近几十年来, 人们非常重视对相分离合金凝固理论的研究, 自上世纪七十年代起便开始在航天飞机上开展了相分离合金凝固实验, 试图利用空间微重力条件避免重力导致的相偏析, 获得弥散型凝固组织。此后, 人们分别在空间和地面对相分离合金开展了大量的凝固实验。探索了该类合金的快速凝固行为、定向凝固行为和连续凝固行为, 考察了超声场、电场、磁场等对相分离合金凝固过程的影响, 研究了用添加微量表面活性元素和异质形核质点的方法控制相分离合金凝固过程及组织的可行性, 并结合实验对相分离合金凝固组织形成过程开展了深入的建模与模拟研究。结果表明: 施加外场在控制相分离合金的凝固过程和组织方面具有很好的前景。

本文实验研究了正交脉冲电流和恒定磁场对相分离合金凝固过程及组织的影响; 建立了描述复合电磁场作用下相分离合金凝固组织演变的理论模型; 实验与模拟相结合, 研究了正交脉冲电流和恒定磁场对相分离合金凝固组织演变的影响机理。结果表明, 复合电磁场主要通过抑制熔体对流和促进第二相液滴形核来影响合金组织演变。一方面, 复合电磁场可以抑制熔体对流, 有利于第二相形核速率和体积分数沿样品径向均匀分布。另一方面, 复合电磁场可以降低第二相液滴的形核能垒、提高第二相的形核率, 从而促进其尺寸和运动速度的减小以及弥散型凝固组织的形成。

E03-18

脉冲电流作用下特种合金熔体中非金属夹杂物的迁移机理

刘常皓¹, 黄孝山¹, 周梦程², 张新房^{1,2,*}

1. 北京科技大学 (冶金与生态工程学院)

2. 内蒙古科技大学 (轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室、稀土产业学院)

特种合金因其优异的力学、磁学、电学、耐蚀等性能, 被广泛应用于军工、精密机械、电子通信、航空航天和生物医学等领域。然而, 特种合金中夹杂物的存在会显著影响合金机械性能和使用寿命。特种合金的洁净化生产及其返回料的回收利用对于推动资源环境的可持续发展具有深远意义。本研究基于电流密度梯度理论, 以镍基高温合金和钴基非晶合金为研究对象, 采用平行插入电极的方式, 探究了脉冲电流对夹杂物的迁移行为、尺寸粒径的影响规律。研究表明, 在真空条件下施加脉冲电流可以驱动钴基非晶合金中的 10 μm 以下的夹杂物发生定向迁移。在脉冲电流作用下, 近电极端、中间区域和远电极端的夹杂物数量密度依次增多, 分别为 134.7、307.6 和 774.2pcs/mm², 夹杂物的平均直径依次增大, 分别为 5.93、6.79 和 7.2 μm 。近电极端和中间区域的夹杂物去除率分别达 67% 和 24%, 远电极端夹杂物数量增加了 91%。类似的, 在脉冲电流作用下, 镍基高温合金熔体中氧氮杂质呈现离电极越远数量密度越多的趋势。在一定的电脉冲参数下, 脉冲电流处理后样品中的平均氧含量由初始的 41.6ppm 降低至 12.2ppm, 除杂率达 70.6%; 另外, 脉冲电流处理后样品中近电极端的氮含量约为 20.8ppm, 而未经脉冲电流处理样品中的氮含量为 68.0ppm, 降低率达 69.4%。数值计算表明, 施加脉冲电流后熔体内产生非均匀分布的电流密度梯度场, 驱动夹杂物从近电极端至远电极端迁移。本研究提出的绿色高效的脉冲电流净化技术, 对特种合金洁净化生产和返回料高效回收具有重要的指导意义。

E03-19

残余元素 Cu 对钢枝晶生长动力学的影响

郭银星¹, 王卫领^{1,*}, 朱苗勇¹

1. 东北大学

随着钢产量的提高, 废钢比不断增加, 废钢中氧化势低于 Fe 的残余元素 Cu、Sn、As、Sb 将会完全遗留在钢液中。在连铸坯表层凝固后的高温冷却过程中, Cu 易在钢基体和氧化铁层界面间形成液膜, 并浸入奥氏体晶界, 降低连铸坯的高温塑性, 诱发表面形裂纹、角部横裂纹。因此分析凝固组织的枝晶生长是准确描述凝固缺陷产生的关键。已有的研究只描述了 Fe-C 二元合金体系下的枝晶生长动力学, 多组元复杂合金体系下, 残余元素 Cu 对于凝固组织枝晶生长的演变机理有待揭示。

本研究在多组分理论的基础上, 假设枝晶尖端呈抛物面状, 以稳定生长速率沿着竖轴方向生长, 进而引入抛物面坐标系, 描述边界层内的扩散现象。通过耦合固液界面前沿溶质交互扩散、成分过冷和边缘稳定性准则, 并调用 Thermo-Calc 热力学数据, 考虑包晶相变, 进而开发了铁基多组元合金定向凝固枝晶生长动力学模型。研究揭示了低碳钢 P590L、亚包晶钢 AH-32、过包晶钢 37Mn 及高碳钢 SWRH82B 代表钢种下, 五元合金体系 Fe-C-Si-Mn-Cu 中不同 Cu 含量下枝晶尖端半径、生长速率、过冷度的变化规律。结果表明, 随着生长速度的增加, 尖端半径先减小而后在绝对稳定速度极限附近上升, 所需的过冷度不断增大。37Mn 钢在过冷度 10、30 和 50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 枝晶尖端生长速率分别为 6×10^{-4} 、0.13 和 1.3m/s, 尖端半径分别为 1.46、 9.04×10^{-2} 和 $2.59\times 10^{-2}\mu\text{m}$ 。随着 Cu 含量的增加, 生长速率 0.4m/s 下的枝晶尖端半径减小, 枝晶尖端温度下降, 过冷度增大。Cu 含量从 0.02wt.% 增加到 0.40wt.%Cu, 低碳钢 P590L、亚包晶钢 AH-32、过包晶钢 37Mn 和高碳钢 SWRH82B 的枝晶尖端半径分别减小了 3.80×10^{-4} 、 1.67×10^{-4} 、 1.21×10^{-4} 和 $1.11\times 10^{-4}\mu\text{m}$; 枝晶尖端温度分别减少了 1.76、1.72、1.59 和 1.51K; 尖端过冷度分别增加了 0.50、0.45、0.27 和 0.23K。同时随着枝晶生长速度的增加, 在 0.02wt.%Cu、0.21wt.%Cu 和 0.40wt.%Cu 作用下, 亚包晶钢 AH-32 分别在枝晶尖端温度为 1751.4、1750.9 和 1750.4K 发生 δ - γ 的相变, 过包晶钢 37Mn 在枝晶尖端温度为 1757.2、1756.4 和 1755.6K 发生 δ - γ 的相变, 相变温度降低, C 含量的增加导致了相变提前。综合来看, 残余元素 Cu 对于低碳钢枝晶生长影响较大。

E03-20

脉冲电流作用下硅熔体中杂质铁的迁移行为

周梦程¹, 张新房^{1,2,*}

1. 内蒙古科技大学 (轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室、稀土产业学院)
2. 北京科技大学 (冶金与生态工程学院)

硅材料中的杂质铁会严重影响硅太阳能电池的光电转换效率。然而, 传统的硅提纯方法存在周期长、能耗高、污染严重的缺点, 为了进一步提高硅熔体的净化效率, 本研究提出了一种高效、绿色的脉冲电流净化技术。在脉冲电流作用下, 铁元素的电迁移效应、富铁相的电流密度梯度驱动以及富铁相的重力都会影响杂质铁在硅熔体中的迁移行为。无论电极插入硅熔体的深度如何, 在脉冲电流的作用下, 铁在硅中的溶解度均会降低, 有助于富铁相的形成。同时, 富铁相在重力的作用下倾向于向底部下沉。当电极浅插入硅熔体时, 在硅熔体中形成了不均匀电场, 富铁相受到电流密度梯度的驱动加速向底部下沉。当电极深插入硅熔体时, 在硅熔体中形成了大致均匀电场, 在电迁移的作用下, 铁元素优先迁移至阴极并形成富铁相重力下沉。在硅熔体净化过程中, 通过改变电极施加位置和电流参数来构造电流密度梯度, 实现对杂质铁的迁移分离, 为多晶硅的提纯提供了新思路与新途径。

E03-21

有色金属功能材料冶金

王接喜^{1,*}, 冷进¹, 李滔¹, 尤编政¹, 谭欣欣¹, 闫禹岑¹, 易红玲

1. 中南大学

针对现有技术制备电池材料具有流程长、产品一致性差、制备过程反应复杂、界面稳定性差等问题, 开发喷雾热解制备锂离子电池材料。阐明了金属氯化物热解多相反应的物质转化规律、热解与烧结过程的结构演变机制; 开展含镍钴锰氧化物前驱体热解制备的研究, 揭示了阴离子种类、热解气氛、热解温度、外加组分等因素对前驱体物相、结构、形貌等的影响规律, 建立前驱体的形貌、结构调控方法及振实密度提升方法; 研究了前驱体的关键杂质元素、聚集状态对正极材料合成及性能的影响, 阐释了材料合成过程的物相形貌转化规律, 制备了具有不同结构的锂离子电池镍钴锰氧化物基正负极材料。开展烧结过程的微观反应机理研究, 并对其细微结构与界面特性进行了量化分析, 阐述其构效关系; 采用 B 等元素对材料进行表面修饰, 分析了 B 在颗粒中的分布特征, 揭示了 B 掺杂、晶界助融、锂硼氧包覆对材料性能的影响规律。比较研究了前驱体修饰、材料包覆和电极修饰对材料电化学性能的影响。以上研究推动了超高镍多元正极材料的商业化进程。

E03-22

夹杂物控制与去除技术应用研究

王晓峰^{1,*}

1. 陕西科技大学

高纯净度钢的生产是钢铁企业面临的重大课题, 在钢液中获得尺寸可控、弥散分布的气泡是去除细小夹杂物、生产高品质钢的重要手段。微细异相净化钢液技术是一种基于碳酸盐分解反应生产微小气泡与渣滴去除细小夹杂物的技术, 近年来该技术的研发越来越受到冶金工作者的重视, 部分新技术已被开发并趋于成熟。本文从微细异相净化钢水技术原理出发, 详细介绍了微细异相净化钢水技术研究的最新进展, 归纳总结了微细异相去除细小夹杂物、脱硫、脱磷、渣料迁移、RH 快速脱碳及中间包长水口喷粉工艺特点及作用机理, 并对其在工程领域应用亟待解决的问题及未来发展方向进行了展望。

E03-23

电子束冷床熔炼大规格钛合金锭的偏析过程控制数值模拟研究

辛禹辰¹, 高磊¹, 郭胜惠^{1,*}, 杨黎¹, 史亚鸣¹, 冀浩航

1. 昆明理工大学

电子束冷床熔炼设备 (EBCHM) 具备精炼的功能, 可以较为有效的去除钛熔体中的夹杂物, 已成为高品质钛材原料生产的必备工艺流程。然而, 电子束冷床熔炼过程长期处于高温真空环境中, 在熔铸 TC4 (Ti-6wt%Al-4 wt%V) 等含铝钛合金时, 合金元素铝的挥发损耗差异时常引起铸锭成分偏析问题, 需要有效的均匀化手段。本研究采用数值模拟研究方法, 以国产电子束冷床熔炼设备为对象, 探讨了电子束冷床熔炼 TC4 钛合金过程中的元素偏析生成原因及控制方法, 相关研究结果有助于进一步促进我国钛材电子束冷床熔炼工艺的技术进步, 为我国载人深潜、深海空间站、先进战机研发等重大工程提供高质量的、批次性能稳定的原材料。

E03-24

脉冲电流作用下再生黄铜熔体中有害杂质元素的迁移行为

张宝雨¹, 黄孝山¹, 周梦程¹, 张新房^{1,2,*}

1. 北京科技大学 (冶金与生态工程学院)

2. 内蒙古科技大学 (轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室、稀土产业学院)

中国是世界第一大铜消费国, 精炼铜产量占世界的约五分之一, 而铜资源的储量仅为世界储量的 3%。废黄铜的回收再生可缓解矿石资源需求的压力, 还可以从再生合金产品中获得可观的经济效益。然而, 黄铜中过量的 Pb、Bi 和 Fe 杂质元素残留会导致合金的高温脆性严重, 并且由于元素之间的活性差异, 化学分离会使分离过程复杂化。本研究基于杂质元素和黄铜 (Cu-Zn) 熔体之间的电导率差异, 打破了利用金属活性差进行氧化精炼的局限性, 实现了脉冲电流驱动黄铜中杂质 Pb、Bi 和 Fe 的物理分离。针对高含量杂质元素的黄铜熔体, 通过设计脉冲电流强度、频率和电极位置来调整电流密度的分布, 探究了黄铜熔体中杂质元素 Pb、Bi 和 Fe 在脉冲电流作用下的迁移行为。脉冲电流处理后, 杂质元素 Pb、Bi 和 Fe 富集于熔体表面, 特别是在熔体底部, 形成了高含量杂质的富集区域。根据数值计算, 杂质 Pb、Bi 和 Fe 的迁移方向垂直于电流线, 并沿电流密度梯度减小的方向迁移, 由熔体顶部区域迁移到底部边侧区域。目前, 在脉冲电流的作用下, Pb、Bi 和 Fe 的除杂率分别达到了 43%、13.4%和 83.83%。脉冲电流分离技术具有效率高、绿色节能等特点, 为废杂黄铜难回收提供了新的解决方案, 具有巨大的商业价值。

E03-25

脉冲电流作用下再生铝合金中杂质富铁相的分离机理

黄孝山¹, 王俊杰¹, 张迪¹, 张新房^{1,2,*}

1. 北京科技大学 (冶金与生态工程学院)

2. 内蒙古科技大学 (轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室、稀土产业学院)

与原生铝相比, 再生铝的保级利用具有节能减排优势和极高的经济价值, 符合国家碳达峰计划, 因此近年我国再生铝产能快速扩张。但由于来源广泛、预处理困难, 废杂铝中常混入大量的 Fe 杂质。Fe 元素在铝中的平衡固溶度较低, 易形成多种富铁金属间化合物, 对铝合金的力学性能、抗腐蚀性能、铸造性能等造成显著的负面影响。现有许多除铁手段受限于其成本及效率, 在工业生产中应用困难。因而, 亟需寻求一种高效节能、绿色低碳的手段降低再生铝中铁含量, 对再生铝的保级利用和产品性能提升具有重要意义。针对再生铝保级利用的瓶颈问题, 本研究基于杂质富铁相与铝熔体电学性能的差异性, 在不同脉冲电流频率、电流强度、处理时间和熔炼温度条件下, 探究了脉冲电流作用下再生铝熔体中杂质铁含量的分布规律。研究表明, 通过电极浅插入再生铝熔体中形成非均匀电流场, 利用电流密度梯度将富铁相驱动分离至熔体底部, 中上部形成净化区域。在最佳脉冲电流处理参数下, 再生铝样品上部净化区域的平均除 Fe

率达 70% 以上, 其中, 再生铝上部局部区域最高除 Fe 率高于 90%。作为一种高效、绿色、节能的新兴净化手段, 脉冲电流可实现再生铝中富铁相的迁移富集分离, 为再生铝的工业洁净化生产提供了新的解决途径。

E03-26

选区激光熔化制备 AlFeCrCoNi_{2.1} 高熵合金颗粒增强铝基复合材料

陈斌¹, 李润霞^{1,*}

1. 东莞理工学院, 交叉科学研究中心及材料科学与工程学院

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 共晶胞壁上快速凝固, 原位生成了纳米级球形 HEA 颗粒。HEA/AMCs 具有较高的抗拉强度、抗压强度、抗拉伸长率、维氏硬度和耐磨性, 其平均值分别为 478 MPa、719 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。

E03-27

稀贵金属氧化物气敏材料高通量筛选及微纳传感器研发进展

郭胜惠^{1,*}

1. 昆明理工大学, 冶金与能源工程学院

本文主要介绍稀贵金属氧化物气敏材料高通量筛选及微纳传感器研究进展: 1) 针对传统气敏材料开发存在周期长、筛选效率低、选择性不足等问题, 开发了高通量气敏材料合成及筛选平台, 可实现气敏材料的预混和转印功能, 使材料筛选效率从原来的 30 天缩短至 40 小时。该平台目前已针对 10 种金属氧化物基体、27 种表面修饰稀贵金属元素、3 类气体 (易燃爆、VOCs、NO_x) 在 4 个水平实验参数 (工作温度、气体浓度、表面修饰含量、载流子激发类型) 进行 9400 余种条件组合变化, 获得 23 种线索材料组分, 推进了有色金属材料在传感器领域的高值化利用水平。2) 针对气敏传感器功耗高的问题, 开发了 MEMS 微加工平台, 形成了小尺寸、低功耗非硅基气体传感器制备工艺。3) 详细介绍了高通量筛选技术和 MEMS 微加工平台制备产品的应用案例。

E03-28

清洁高效提钒工艺研究

吕学伟^{1,*}

1. 重庆大学

由于钒在冶金、航天、化工等领域的大规模应用, 以及近年来全钒液流电池的飞速发展, 钒的清洁、高效提取已成为推动钒产业持续发展的关键。针对现有提钒工艺存在的钒回收率低等瓶颈难题, 本报告主要介绍了团队在钒渣焙烧、含钒溶液沉钒、钒冶金相图等领域取得的一系列研究成果。针对钒渣焙烧, 基于机械活化预处理的强化作用, 可将钒渣钙化焙烧温度降低 100℃。此外, 机械活化通过降低焙烧温度, 还能有效抑制高铬钒渣钠化焙烧过程中铬的转化, 强化浸出过程中的钒铬分离效果, 钒浸出率提高了 5%。为了进一步提升提钒效果, 开发了钙镁复合焙烧工艺, 基于氧化镁在焙烧过程中的动力学优势, 全流程钒回收率超过 90%, 同时有效降低了石膏产量。在含钒溶液沉钒方面, 开发了有机物沉钒和膜分离结合的无铵沉钒工艺, 沉钒溶液中钒的残留小于 1 ppm, 钒回收率超过 99.9%。在钒冶金相图领域, 深入研究了 CaO-MgO-V₂O₅ 等体系的相平衡关系, 为新型提钒工艺的开发提供理论支撑。

E03-29

基于 TbFe₂ 相晶界扩散过程研究孙小钧^{1,*}

1. 有研稀土新材料股份有限公司

晶界扩散工艺 (GBDP) 已被证明是提高烧结 Nd-Fe-B 磁体矫顽力的有效方法。然而, 有限的扩散深度和较厚的壳层结构阻碍了磁性能的进一步发展。目前, 关于含 Tb 的 GBDP 机制的主要争论围绕着溶解-凝固机制和原子取代机制。为了阐明这一机制, 通过在不同温度下淬火, 系统地研究了烧结 Nd-Fe-B 磁体在 GBDP 加热过程中的微观结构演变。在本研究中, 发现了 TbFe₂ 相的形成是晶界扩散过程中 2:14:1 晶粒溶解的主要原因。混合热和相分离的理论进一步证实, Nd₂Fe₁₄B 相溶解形成 Nd 和 TbFe₂ 的混合相, 然后固化为 (Nd, Tb)₂Fe₁₄B 相。基于 TbFe₂ 相的发现, 溶解-凝固机制被认为是 GBDP 的主要机制。观察到的两种典型核壳结构的元素含量支持了这一点。

E03-30

高锰高铝钢热处理过程非金属夹杂物的演变行为

王笑笑¹, 邓志银^{1,*}, 朱苗勇¹

1. 东北大学冶金学院

高锰高铝钢具有优秀的淬透性、硬度、耐磨性和延展性, 因此广泛应用于冶金、能源、建筑、交通、军事等领域。钢中非金属夹杂物对钢材的性能有重要影响。为了探究高锰高铝钢 (18%Mn、1.5%Al) 热处理过程中夹杂物的演变行为, 本研究通过实验室实验揭示了钢中夹杂物的成分、物相和尺寸在 1200℃ 温度下随加热时间的变化规律, 同时设计了模拟实验证明了夹杂物的演变机理。研究表明, 在热处理过程中, 钢中夹杂物的类型基本不变, 主要为 CaO-Al₂O₃-MnO 和 (Ca, Mn)S 以及它们的复合物。尽管如此, 钢中的 Al 元素与夹杂物反应导致夹杂物中 Al₂O₃ 含量上升, 而 CaO 含量下降。同时, MnS 在氧化物周围析出, 并在 MnS 和氧化物之间形成 (Ca, Mn)S 过渡层。随着加热时间的延长, 夹杂物的尺寸略有增大; 纯硫化物夹杂物的比例基本不变, 氧硫化物复合夹杂物的比例不断增加, 且 (Ca, Mn)S 过渡层不断增厚, 其中的 CaS 含量也不断增加, 而 MnS 含量则不断减小。

E03-31

脉冲电流处理下 M50 轴承钢中难溶一次碳化物快速消融机理探究

张明逵¹, 郭敬东^{1,*}, 张新房^{2,3}, 任乐², 张涛², 刘纪德¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 北京科技大学

3. 内蒙古科技大学

航空主轴轴承服役环境恶劣, 需要优异的热稳定性和力学性能。为了提升轴承钢的性能, 可以向钢中添加 V、Mo 等合金元素。然而, 这些合金元素的添加会导致冶炼过程中形成难溶一次碳化物, 并严重影响航空轴承钢的加工和使用性能。传统高温热处理可以消除 M50 航空轴承钢的 M₂C 型碳化物, M₂C 会发生相变 (M₂C → MC + γ, M₂C + γ → M₆C + MC), 形成热稳定性更高的 MC 型碳化物, 但消除时间长, 处理温度高, 会导致 MC 型碳化物发生长大, 影响 M50 的性能。本研究探究了脉冲电流处理对 M₂C 碳化物溶解行为的影响。通过对 M50 轴承钢施加 1000℃/2h 的脉冲电流处理后, M₂C 型碳化物完全溶解, 且相变产生的 MC 型碳化物尺寸较为细小。而 1150℃/2h 热处理后仍然残余大量尚未溶解的 M₂C 碳化物, 且已经生成了一些尺寸 1.5μm 的 MC 碳化物, 在延长处理时间后 MC 碳化物会继续粗化。当对样品施加脉冲电流时, 电流引起的自由能显著改变了系统的热力学状态, 加速了元素扩散, 从而促进了 M₂C 碳化物的溶解。且在

此过程中, 由于处理温度较低, MC 碳化物长大受到抑制。这些新发现有助于理解 M50 轴承钢中一次碳化物在脉冲处理过程中的变化, 并为其他高碳高合金钢中难溶碳化物的消除与细化提供了一种新的方法。

E03-32

真空悬浮炉增氮析氮析出微小气泡实验研究

刘建华^{1,*}, 何杨¹, 张宇迪¹

1. 北京科技大学

在真空悬浮炉进行了 42CrMoA 钢增氮/析氮熔炼实验, 分别研究了增氮时间、析氮时间、析氮压力对钢液增氮和析氮反应的影响, 分析了析氮试样中氮气泡形貌。测得 42CrMoA 钢在 1777K、 1×10^5 Pa 氮气压力实验条件下增氮溶解度为 510ppm, 在 0.2×10^5 Pa 时氮含量为 230ppm, 均略高于 Satir 氮溶解度公式计算值。 $0.2-0.8 \times 10^5$ Pa 氮气压力析氮实验试样中均观察到细小气泡, 表明真空析氮时, 钢液过饱和度大于或等于 38ppm 时, 可在钢液内部析出气泡; 钢中气泡直径处于 2.7~22.8 μ m 范围, 最小气泡直径为 2.7 μ m, 推测析氮实验条件下钢中气泡临界形核尺寸为 2.7 μ m; 本实验检测得到的钢中气泡尺寸远小于经典形核理论均相形核和非均相形核计算的临界形核半径, 计算分析气泡内部压力也远小于气泡表面张力引起的附加压力, 微小气泡形核理论及表面张力计算方法有待进一步分析研究。

E03-33

连铸凝固过程第二相析出与组织演变在线预测方法研究

祭程^{1,*}, 梁博淳¹, 陈天赐¹, 朱苗勇¹

1. 东北大学

连铸过程组织特征、第二相析出物的形态、尺寸和分布是影响铸坯高温热塑性的决定性因素, 其精准预测可以为连铸过程裂纹精准防控与连铸工艺的优化调控提供重要的数据支撑。然而, 目前大多数数值模拟手段是针对恒定冷速、溶质与组织均匀分布的“理想”均质基体展开研究。而实际连铸过程的溶质偏析与铸坯断面不同位置热履历的连续变化, 难以采用既有热力学模型直接预测第二相夹杂物的析出特征与组织演变行为。鉴于此, 本文基于连铸凝固过程中固液界面的溶质偏析规律, 考虑铸坯凝固过程溶质分配系数变化, 引入动态溶质分配系数, 并结合析出物对溶质偏析的影响, 提出了微观偏析与第二相饱和固溶析出耦合模型, 构建了 MnS、Ti(C,N)等第二相析出动力学模型。进一步采用微元积分法建立了动力学模型, 以描述在板坯连续冷却过程中第二相析出物的生长。同时, 在考虑 Mn 在界面扩散引起能量耗散的基础上, 建立了考虑第二相钉扎的先共析铁素体膜生长与奥氏体尺寸混合模式预测模型。针对微合金钢, 实现了连铸全流程第二相析出与组织演变的在线预测。设计实验对模型进行了验证, 预测准确率达到 90%以上。

E03-34

梯度磁场下难混溶合金的均质化制备

郑天祥^{1,*}, 周邦飞¹, 陈苏林¹, 刘春梅¹, 钟云波¹

1. 上海大学

难混溶合金由于其正混合焓的热力学特性, 在凝固过程中往往会出现液-液分离现象, 最终不同组元的密度差异会导致严重的比重偏析, 从而限制其工业应用。如何制备均质弥散的难混溶合金铸锭一直是困扰学者们的难题。近几十年来, 静磁场已被广泛运用于金属合金材料的制备过程。这主要得益于强静磁场在凝固组织控制过程中的诸多优势, 比如利用强静磁场产生的力/能效应, 能够有效控制材料制备过程中熔体的流动、原子的扩散、晶粒的形核/长大、成分偏析、晶体取向以及颗粒迁移和分布等, 为高性能新材料设计提供新思路。为了探究梯度强静磁场对第二相液滴的迁移行为的影响, 在 0-20 T 梯度强静磁场开展了 Al-Bi 和 Cu-Fe 难混溶合金的均质化制备研究。实验结果表明, 梯度磁场能有效抑制难混溶合金中第二相的沉降或上浮运动。并且通过改变梯度磁场的方向以及强度可以有效操控第二相液滴的空间迁移方向。这

主要是因为第二相液滴受到梯度磁场的磁-阿基米德效应的影响。通过磁场梯度力的非接触控制,可以制备均质弥散的难混溶合金铸锭。该方法也可以用于熔体中夹杂物和气泡的去除,为金属材料的制备提供一种全新的思路。

E03-35

汽车面板钢铸坯凝固钩特征及差异化扒皮策略研究

何杨¹, 潘宇康¹, 李永康¹, 刘建华^{1,*}

1. 北京科技大学

通过对西昌钢钒汽车板生产铸坯中的凝固钩进行系统分析,明确了目前低拉速生产工况下凝固钩的特征参数以及控制策略,并以完全去除凝固钩为依据制定铸坯最小扒皮深度为 2mm。同时,根据分析现场表面检测仪采集得到的冷轧板夹杂物缺陷数据,明确了扒皮深度对冷轧板表面不同位置夹杂物缺陷数量的影响。结合凝固钩和冷轧板夹杂物缺陷分析结果,制定了铸坯不同区域差异化扒皮策略,在铸坯宽面两侧 1/8 宽度区域扒皮 3mm,而在其它区域扒皮 2mm。工业试验发现,该差异化扒皮策略可一定程度减少冷轧板表面夹杂物缺陷数量,并可减少 25%扒皮钢铁料损耗。

E03-36

冷却速率对高锰钢凝固过程中碳化物析出影响的试验研究

韩佳如^{1,*}, 罗森¹, 王卫领¹, 朱苗勇¹

1. 东北大学

高锰钢中的铸态组织主要为奥氏体基体和碳化物组成,其中碳化物的析出会对凝固时的热应力造成严重的影响,从而成为裂纹形成的重要原因之一。为了探究连铸工艺中冷速对高锰钢奥氏体组织及碳化物的影响。本研究设计了液固相变阶段不同冷速,选用高温共聚焦、电子背散射衍射、场发射扫描电镜以及 XRD 等方法对高锰钢试样进行研究。结果表明:液固相变阶段随着冷速的增加,高锰钢奥氏体晶粒细化,奥氏体晶粒的平均尺寸由 601 μm 减小至 467 μm ,并且随着冷速的增加高锰钢中碳化物的数量增加、尺寸减小、分布更加均匀。此外对比发现低冷速时碳化物的形貌为块状,随着冷速的增加碳化物形貌转为片层状及长条状。液固相变阶段冷速的改变对碳化物的特征形貌具有较大的影响,但是此阶段随着冷速的增加碳化物的类型没有改变。

E03-37

氢化锂在微波场中的高温介电特性及升温行为研究

鲁元佳¹, 黄斌², 郭胜惠¹, 杨黎^{1,*}, 帅茂兵², 王伟²

1. 昆明理工大学

2. 中国工程物理研究院

探索氢化锂(LiH)在微波场中的行为对其作为热核燃料和空间反应堆中子屏蔽材料的应用具有重要的指导意义。本研究采用谐振腔微扰技术测量了 LiH 从室温至 700℃、微波频率为 2450MHz 的介电性能。采用有限元仿真技术预测和分析了 LiH 的微波加热。研究了 LiH 在微波场中从室温升温至 700℃的升温行为。通过烧结实验表明微波加热工艺可以大幅度提高 LiH 的烧结效率,同时可改善烧结体力学性能。结果表明, LiH 具有较强的微波响应能力, LiH 在微波场中的加热过程分为两个阶段,分别为缓慢升温阶段(20-250℃)和快速升温阶段(250-700℃)。此外,我们提出了 LiH 与微波相互作用的机制。

E03-38

回收碳纤维-微波协同强化制备树脂基金刚石薄片砂轮的研究

陈楷华¹

1. 昆明理工大学

树脂基金刚石薄片砂轮是面向高端制造业精密加工的重要超硬材料制品，如何提高树脂基超薄金刚石砂轮的强韧性是行业面临的共性难题。根据团队前期研究成果，回收碳纤维能保持原始纤维 80% 以上的力学性能，将回收短碳纤维（recycled short carbon fiber, RSCF）作为增强相添加到树脂基金刚石砂轮中不仅可以提升树脂基体自身的强韧性，还能为 RSCF 的高值化利用提供新的出路。进一步结合微波加热制备树脂基复合材料体现出快速高效、节能降耗的优势，提出了 RSCF 强化树脂基金刚石砂轮微波加热固化的新思路。

首先对酚醛树脂粉、短切碳纤维、铜粉、金刚石微粒以及混合的原料分别进行了介电测试，获得了在不同温度下各物料的介温频谱特性参数。然后，为了实现碳纤维强化树脂基金刚石砂轮在微波场中的均匀加热，通过对微波谐振腔、微波传输装置、微波馈源数量的设计，制造了一套多模聚合物微波加热设备。该设备采用大尺寸圆柱形多模腔设计、多馈口低功率协同输出、物料三维运动等多种方法协同作用，有效改善了树脂基复合材料在微波场中的加热均匀性。基于新研发的微波设备，研究了微波加热制备树脂基砂轮的新工艺，制备出的样品磨耗比可以达到 16.44，且抗弯强度为 75 MPa。

E03-39

MPCVD 法生长金刚石材料研究进展

叶小磊¹

1. 昆明理工大学

金刚石是国家战略新兴产业中先进基础材料和功能材料，因优异的光学、电学、热学、声学、力学、耐腐蚀等性能，广泛应用于航空航天、军事、精密加工、芯片制造、量子科技等高端关键领域。微波等离子体化学气相沉积（MPCVD, microwave plasma chemical vapor deposition）是制备优质金刚石材料最理想的技术。通过 MPCVD 制备的金刚石片及膜材料（MPCVD 金刚石）在光学窗口、超硬刀具、高功率元器件及芯片模块组装热沉等方面具有重要的应用。尤其是，MPCVD 金刚石材料对 X 射线和红外光波具有极高的透过率，是军事光学应用、芯片制造-X 射线光刻等领域理想材料。虽然英、美、日、欧等国家和地区在优质光学级金刚石材料制备上已经取得了关键技术突破，并且进行了工业化生产，但是由于优质光学级金刚石材料的战略属性，其关键的制备工艺仍然处于严格保密状态。国外在先进的 MPCVD 装备及关键金刚石产品上也对我国严格限制出口。因此，研制具有自主知识产权的关键 MPCVD 装备，突破优质光学级金刚石材料的 MPCVD 关键制备工艺，对打破国外的技术封锁和贸易垄断，提升我国在高端金刚石产品上的竞争力，为我国高精尖领域健康发展提供有力的保障具有重要意义。