

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

E04-先进凝固科学与技术
E04-Advanced Solidification
Science and Technology

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

E04-先进凝固科学与技术

分会主席：李金山、王慧远、刘永长、查敏

E04-01**双相共生形核模型**

陈光

南京理工大学

E04-02**大型高质量铝合金铸件铸造技术研究**

介万奇

西北工业大学

E04-03**原位生成陶瓷相提高难熔高熵合金高温力学性能**

沈宝龙

东南大学

难熔高熵合金具有高熔点、高强度和优异的抗高温软化性能，有望作为高温结构材料应用于高超飞行器、航空发动机、燃气轮机等关键装备。HfNbTaTiZr 难熔高熵合金具有良好室温塑性，但高温强度低且相稳定性差，严重限制其应用。本团队采用真空电弧熔炼法制备 Al₂O₃ 增强 HfNbTaTiZrV 难熔高熵合金，合金强度随 Al₂O₃ 含量增加而增大，4 vol.%Al₂O₃-HfNbTaTiZrV 合金具有最佳强度与塑性的结合，室温屈服强度为 2700 MPa，塑性应变为 6%，在 1000 °C 保持 693 MPa 的高屈服强度 [1]。随后，在 HfNbTaTiV 难熔高熵合金中添加 N 元素，在 BCC 基体中原位生成 FCC 氮化物相，(HfNbTaTiV)₉₀N₁₀ 合金在 1400 °C 下保持 279 MPa 的高压缩屈服强度，突破 HfNbTaTiZr 系难熔高熵合金抗高温软化性能极限 [2]。针对更高使用温度的难熔高熵合金，本团队通过在 WTaMo 合金中添加 C 元素，制备出由 BCC 金属基体和原位生成的 HCP 及 FCC 碳化物相的 W₂₀Ta₃₀Mo₂₀C₃₀ 合金，该合金在 2000 °C 下压缩屈服强度仍保持 222 MPa [3]。综上，本团队制备出宽温域下具有优异力学性能的耐高温难熔高熵合金，并利用球差电镜、三位原子探针等先进表征手段探究了原位生成陶瓷相增强难熔高熵合金宽温域强韧化机理与变形机制，为开发新型超高温难熔高熵合金提供了理论指导与技术支持。

E04-04**先进高品质铜合金的多级仿生异构设计及关键应用**Yunbo Zhong¹, Zhe Shen¹, Biao Ding¹, Yi Li¹, Peijian Shi²

1. Shanghai University

2. City University of Hong Kong

Bioinspired hierarchical design demonstrates a promising microstructural solution to circumvent multiple intricate property trade-offs in artificial materials. However, it remains extremely challenging to tailor structural hierarchies feasibly and synthetically, particularly for bulk materials. Here, a counterintuitive strategy is reported—exploring multiscale microstructural heredities for highly-developed dendritic hierarchies in as-cast bulk alloys. During optimized thermomechanical processing, we carefully control these dendrites to be progressively deformed, elongated, aligned and refined, rather than completely destroying them as in conventional alloy processing paradigms. As such, a hierarchical fibrous lamellar (HFL) structure—resembling those of shell and bamboo—is controllably designed in a technologically-important CuCrZr alloy. This innovative HFL design promotes multiple synergetic micro-mechanisms with sequential multiscale interactions and salient biomimetic attributes, thereby affording exceptional multifunctionality, especially record-high strength–ductility–conductivity combination. At more fundamental levels, multiple previously inaccessible deformation and reinforcement

mechanisms are activated by exploiting the HFL structure-enabled complex internal stress condition. They perform and interact at multi-length-scales from intense diversified dislocation trapping, massive stacking-fault proliferation, 9R-phase-assisted nano-twinning, self-buffering shear bands to ever-intensified hetero-deformation-induced hardening. These scenarios even create superior, strain-rate-tolerant dynamic properties far exceeding conventional homogeneous-structured counterparts. Dendrites exist ubiquitously, yet generally undesirable, in metallic materials, whereas our ‘bioinspired, heredity-derived’ strategy counterintuitively utilizes them, realizing unprecedented high figure-of-merit multifunctionality.

E04-05

基于单向散热逐层凝固的高纯镁致密熔铸机理研究

郑芮, 单智伟*, 杨博, 刘博宇

西安交通大学

高纯镁具有优良的生物相容性、可降解性和生物功能性, 用作医用植入器械极具发展前景。然而, 其铸锭存在致密性低, 孔隙缺陷大小不一, 空间分布不均匀的问题, 且后续挤压变形等工序不能完全消除这些对性能的影响, 从而造成了器械性能和寿命不稳定的隐患。传统铸造方法因其散热方式, 易使得镁在凝固时产生疏松缩孔、气孔等缺陷, 且还存在凝固组织、成分分布不均的现象。本报告提出“构建单向散热温度场, 控制薄层熔体逐层凝固”的致密熔铸新思路, 一方面单向散热可变为多向收缩为单向收缩, 减缓缩孔产生; 另一方面, 薄层熔体更易于熔体中的气泡逃逸, 且薄层熔体逐层凝固有望将成分偏析和组织差异控制在薄层范围内。基于上述思路制备得到的 65mm×120mm 高纯镁铸锭致密度高, 标准超声探伤方法检测范围内未见缺陷, 远超 AAA 等级; 在~700 mm 长的高纯镁棒材中痕量元素 (μg/g) 的成分分布均一性满足标准样品要求。该思路的应用和放大有望为生物医用可降解植入镁器械领域提供优质原材料, 助力其尽快规模化走入医疗市场。

E04-06

基于空间环境的金属超常凝固研究

阮莹, 魏炳波*

西北工业大学

以“微重力、无容器和高真空”为主要特征的空间环境是世界各国竞相开发的高新战略资源, “空间材料科学与技术”是材料科学与空间技术相互交叉形成的前沿学科, 是指利用空间环境及其优势研究材料的物化性质、相变规律、合成制备、加工成形及服役性能。基于空间环境的材料凝固研究具有两条技术路线: 一是采用空间站等航天飞行器进行真实的空间科学实验, 二是通过仿真技术进行地面模拟实验, 后者是开展此项研究的主要途径。该报告聚焦空间模拟环境中金属材料的制备、组织与性能之间的相关规律, 重点阐述在亚稳液态合金的热力学性质、复相合金的快速凝固及应用性能、新一代原创性超常凝固实验平台和金属功能材料的无容器合成这四个方面所取得的研究成果。

E04-07

高性能铸造镁合金及高质量构件制备加工

蒋斌

重庆大学国家镁中心

镁合金具有密排六方晶体结构, 主要滑移系数量少且滑移方向对称性差, 导致常用镁合金的塑性较差。镁合金熔铸特性导致大型复杂铸件缺陷多、成品率低。通过第一性原理计算和合金化, 在改善镁合金塑性的“固溶强化增塑”机制基础上, 发展了一系列新型高强塑性镁合金, 其中铸造镁合金的室温抗拉强度超过 350MPa、室温延伸率可达到 10%, 有效改善了合金的铸造工艺性, 突破了传统固溶强化损害塑性、高强塑与多物性难以兼得的瓶颈, 实现批产应用。发展了镁合金熔体纯净化、晶粒细化、热裂控制等先进冶金质量控制技术, 以及复杂结构镁合金铸件制备加工技术, 已用于复杂薄壁汽车零部件和大型航空航天关键构件, 实现了大规模应用, 并开发出世界最大的镁合金铸件。

E04-08

非共晶成分合金晕环凝固组织的形成

李金富, 秦清远

上海交通大学

非共晶成分合金凝固时, 常会在初生相周围形成第二相晕环, 但其物理机制尚未明确。本文分别对非共晶成分 Ag-Cu 合金进行了自由凝固和定向凝固, 发现无论在何种凝固方式下, 也无论形核前熔体过冷度有多大或抽拉速度有多高, 过共晶 Ag-Cu 合金中初生 β -Cu 相周围总是存在 α -Ag 相晕环, 而亚共晶 Ag-Cu 合金中初生 α -Ag 相周围恒没有晕环组织出现。计算表明, 过共晶 Ag-Cu 熔体中 α -Ag 在 β -Cu 上的接触角约为 85° , 而亚共晶 Ag-Cu 熔体中 β -Cu 在 α -Ag 上的接触角为 103° , 即 α -Ag 可以润湿 β -Cu 相, 但 β -Cu 不能润湿 α -Ag, 据此提出只有第二相可以润湿初生相时才能形成晕环组织, 否则不会形成光晕。这一理论与其他共晶体系的实验结果也非常一致。根据晕环形成情况, 双相共晶合金可分为三类, 通过比较液-固界面能和固-固界面能的相对大小可对之进行预测。

E04-09

可闭环循环使用材料设计与加工中的凝固问题

邓宇芹¹, 夏明许^{1,2*}, 柏家晔¹, 于鹏飞¹, 曾龙¹, 李建国¹

1. 上海交通大学材料科学与工程学院

2. 宁夏大学材料与新能源学院

随着全球人口的增长及工业化进程的推动, 资源需求日益增加。大量材料完成服役使命后以废品形式堆积形成城市矿山, 使得矿产资源由地下转移为地上。相较于原矿, 城市矿山中目标元素含量更高, 其再利用的环境、能源、经济效益远远超过原矿开发。城市矿山的综合利用, 使得资源的使用模式从传统线性逐渐转变为闭环循环模式。在诸多的城市矿山中, 金属材料如钢铁、铝合金等, 因用途广、使用量大而占据城市矿山的主导地位, 其循环利用技术也发展较早。然而, 受服役环境带入的夹杂、杂质等不利因素的影响, 金属材料的循环利用, 尤其是铝合金循环利用以降级使用为主, 直至失去回收价值, 退出使用周期而成为死金属, 这导致金属的回收价值大打折扣, 造成资源的巨大浪费。本研究从凝固机理及凝固过程控制出发, 采用同步辐射高能 XRD、SEM、K 模、冷却曲线等表征手段, 综合分析由废旧材料来源、服役环境带入的夹杂、杂质对循环材料铸造性能及力学性能的影响, 厘清再生金属材料铸造及力学性能与材料来源、服役历史以及加工过程间的关联关系并探究其与相组成、熔体结构、凝固路径、材料变形损伤机理等的作用机制。基于该理解, 从可持续的角度考虑, 提出可闭环循环使用材料设计的重点在于: 1) 以结构调整代替合金化获得相应性能, 即“材料素化”, 减少成分复杂性; 2) 采用通用合金设计(uni-alloy), 即使用单一的材料成分满足不同工况的性能要求; 3) 高容限合金设计, 杂质无害化甚至有益化处理。本研究结果可为闭环循环使用的材料成分和加工工艺设计提供理论和实验支撑。

E04-10

不同预制体成分与结构参数下 WC/Fe 基复合材料的微观组织、力学性能及磨损性能

李祖来, 石一凡, 张飞, 韦贺, 山泉, 苟浩杰, 廖泽鑫, 张文高

昆明理工大学

为了解决陶瓷颗粒增强 Fe 基表层复合材料存在复合层薄、易剥落和磨损过程不稳定等问题, 制备了不同厚度、不同碳化钨质量分数的预制体, 并采用熔渗铸造法制备了碳化钨颗粒增强高铬铸铁 (HCCI) 复合材料。采用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱 (EDS)、X 射线衍射 (XRD) 和电子背散射衍射 (EBSD) 研究了 WC/Fe 基复合材料的相组成、微观结构与摩擦磨损行为, 并且测试了不同预制件壁厚对复合材料硬度和三体磨料磨损性能的影响。结果表明: WC/Fe 基复合材料主要由 WC、 α -Fe、 W_2C 、 Fe_6W_6C 和 M_7C_3 相组成。随着 WC 质量分数的增加, 复合材料的摩擦系数呈先增加后减小的趋势。摩擦系数分别为 0.36、0.52 和 0.26, 磨损率分别为 $1.52 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 、 $1.24 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 和 $1.57 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。与其他参数相比, 当复合材料中添加 40%WC 时具有最佳的耐磨性。此外, 随着预制体的壁厚从 2.5 mm 增加到 10 mm, WC 颗粒的溶解度逐渐降低, W 元素的比例呈现先增大后减小的趋势。WC 和 HCCI 溶解扩散反应形成的

复合区体积逐渐从 31.8% 增加到 41.2%。不同预制体壁厚厚度下 WC/Fe 基复合材料的摩擦系数呈现出先减小后增大的趋势, 稳定摩擦系数分别为 0.68、0.67、0.54 和 0.62。复合材料三体磨料磨损后的表面没有明显的裂纹, 但有大面积的剥落和犁沟等特征。与壁厚 2.5 mm 相比, 壁厚 7.5 mm 的复合材料的失重量最小, 基体与 WC 增强颗粒之间冶金结合良好, 预制体消散形成的钨合金化复合层占比最高, 复合材料的硬度与耐磨性最佳。

E04-11

N 型 ZrCoSb 基中高熵 half-Heusler 合金热电性能研究

康慧君

大连理工大学

近年来, 热能散失是设备功率损失的主要形式, 例如汽车发动机功率只有三分之一被真正用于推动汽车运行, 其余大部分都变成热量散失掉了, 还有工厂锅炉排放的热气体、炼钢厂排放的余热、垃圾焚烧的余热等。作为一种绿色可持续发展的新材料, 热电材料可以实现电能与热能的直接转换。在众多热电体系中, ZrCoSb 基 half-Heusler (HH) 合金由于出色的热稳定性和优异的力学性能, 已成为目前最具有应用前景的中高温热电材料之一。然而, 由于热电参数间的耦合以及较高的晶格热导率, 导致 N 型 ZrCoSb 基 HH 合金的无量纲热电优值(ZT)一直处于低位徘徊。作为一种全新的设计理念, 中高熵合金设计思想已成功应用于多种热电体系中, 并为热电材料的进一步发展开辟了新途径。鉴于此, 本文基于构型熵-化学成分-微观组织-输运性能迭代设计理念, 通过多位点合金化、构建 Zr 位高构型熵、类三重构设计等策略设计并制备出三种 N 型 ZrCoSb 基中高熵 HH 合金。通过能带结构理论计算及单抛物带模型阐明构型熵以及 V、Nb、Ta 和 Ni 施主掺杂元素对电输运机制的影响, 并借助原位拉曼光谱、球差校正扫描透射电子显微镜以及结合声速、格林艾森参数等内禀物理参数揭示了其相应的声子输运机制。具体研究成果如下:

(1) 基于 Ta、Ni 元素共掺杂和同构合金化 $\text{Hf}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{Ni}_{0.99}\text{Sb}_{0.01}$, 设计并制备出一种新型 $(\text{Zr}_{0.88}\text{Ta}_{0.12}\text{Co}_{0.88}\text{Ni}_{0.12}\text{Sb})_{1-y}(\text{Hf}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{Ni}_{0.99}\text{Sb}_{0.01})_y$ 双相高熵 HH 合金。与 $\text{Zr}_{0.88}\text{Ta}_{0.12}\text{Co}_{0.88}\text{Ni}_{0.12}\text{Sb}$ 中熵 HH 合金相比, 双相高熵 HH 合金的晶粒尺寸细化了至少一个数量级。在 923 K 时, 得益于构型熵及微观组织的协同调控, $(\text{Zr}_{0.88}\text{Ta}_{0.12}\text{Co}_{0.88}\text{Ni}_{0.12}\text{Sb})_{0.9}(\text{Hf}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{Ni}_{0.99}\text{Sb}_{0.01})_{0.1}$ 双相高熵 HH 合金的晶格热导率降至 $2.87 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 导致其峰值 ZT 达到 0.38。

(2) 基于 Nb、Ta 元素共掺杂, 设计并制备出一种具有 Zr 位高构型熵的 $\text{Zr}_{1-x}(\text{NbTa})_x\text{CoSb}$ 中熵 HH 合金。借助于熵驱动形成的位错、层错、纳米畴、纳米析出相等多尺度缺陷, 在 923 K 时, 实现了晶格热导率由 ZrCoSb 的 $7.55 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 降至 $\text{Zr}_{0.6}(\text{NbTa})_{0.4}\text{CoSb}$ 的 $2.76 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 。分析表明, 构型熵的增加有效地提高了德拜温度及格林艾森参数, 使原子间结合力及晶格非谐性增强, 从而降低了声子平均自由程。得益于 Nb、Ta 共掺杂对电导率的优化, 最大功率因子由 ZrCoSb 的 $0.13 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ 提升至 $\text{Zr}_{0.8}(\text{NbTa})_{0.2}\text{CoSb}$ 的 $1.66 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ 。最终, 在 923 K 时, $\text{Zr}_{0.8}(\text{NbTa})_{0.2}\text{CoSb}$ 合金的峰值 ZT 达到 0.35。

(3) 基于元素类型及相对含量调控, 设计并制备出一种具有 Zr 位高构型熵且热电性能优异的 $\text{Zr}_{0.85-x}\text{Hf}_x\text{Nb}_{0.15-y}\text{Ta}_y\text{CoSb}$ 中熵 HH 合金。源于 Hf 元素引入的质量场与应力场波动、以及额外引入的孔隙散射, 实现了 $\text{Zr}_{0.55}\text{Hf}_{0.30}(\text{NbTa})_{0.15}\text{CoSb}$ 中熵 HH 合金晶格热导率的大幅降低。通过调控 Nb 和 Ta 元素的相对含量形成局域势垒, 可以有效阻碍并过滤掉低能量的载流子, 从而在 923 K 时将 $\text{Zr}_{0.45}\text{Hf}_{0.4}\text{Nb}_{0.08}\text{Ta}_{0.07}\text{CoSb}$ 中熵 HH 合金的最大功率因子提升至 $2.11 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ 。最终, 得益于熵驱动形成的位错、纳米析出相以及引入的能量过滤效应, 实现了晶格热导率和功率因子的同步优化, 在 923 K 时, 将 $\text{Zr}_{0.45}\text{Hf}_{0.4}\text{Nb}_{0.06}\text{Ta}_{0.09}\text{CoSb}$ 中熵 HH 合金的峰值 ZT 提升至 0.57。

E04-12

非平衡界面动力学与组织的分子动力学模拟研究

王海丰, 崔德旭, 屈佳润

西北工业大学

对固/液界面迁移的动力学及组织形成过程研究的深入程度直接决定或影响着非平衡凝固枝晶生长理论、先进凝固技术与亚稳新材料制备等的发展水平。受制于实验手段，固/液界面迁移动力学及组织形成过程的原子级实时观测的仍然是材料科学领域的一个重大挑战。本研究以 Ni-Cu 模型合金为例，借助分子动力学模拟技术对合金过冷凝固过程的固/液界面迁移动力学过程及后续组织形成过程开展了原子尺度分析。采用定成分合金建模策略解决了传统分子动力学模拟凝固过程与实际实验不匹配的问题，明确了固/液界面迁移速度及界面成分分布随过冷度的变化规律，获得了无任何参数估计的固/液界面原子扩散速度计算方法。分析了热力耦合作用下的晶粒变形行为及取向转变特征，明确了晶体取向分裂的起源及演化规律。

E04-13

高温合金定向凝固缺陷模拟预测

李军

上海交通大学

E04-14

以凝固为起点的纳米介质调控铝合金微观组织及强韧化机制

杨宏宇*, 刘天舒, 董柏欣, 邱丰, 姜启川

吉林大学

凝固组织的调控是合金制备的起点，影响着一切后续热加工过程中的组织构建。纳米颗粒能够显著调控凝固组织，但纳米颗粒极易团聚，形核利用率低，未形核纳米颗粒也容易团聚恶化合金性能。本工作以铝合金为研究对象，依托自主知识产权的纳米强化技术，解决了纳米颗粒加入合金熔体难引入、易污染、易团聚瓶颈难题。提出了通过微量预分散内生纳米颗粒协同调控新型组织构型-强韧化-高服役性能一体化思想，揭示纳米颗粒对铝合金液固相变、再结晶及时效析出组织调控机制及强韧化机制，揭示纳米颗粒调控新型组织构型对铝合金挤压型材室温及高温服役行为的强化机制；实现铝合金强塑协同和高疲劳性能，为高强韧铝合金组织构型和强韧化一体化调控关键技术提供重要理论支撑。解决铝合金大尺寸铸锭偏析严重、无法制备性能均一的宽幅铝合金板材难题技术难题。

E04-15

高能脉冲电流作用下的相变机制及应用

徐晓峰

吉林大学

从电-热-力多场耦合作用引发的合金中正/逆相变、再结晶、固溶/时效析出、亚稳相形成等非常规变化入手，揭示极端非平衡条件下合金微观组织结构演变规律。基于高能量脉冲电流通过金属产生的瞬时多强化效应的交互作用，配合控热控冷技术，优化脉冲电流处理参数，调控组织中多相尺寸、形态、分布及组成比例，在保持足够塑、韧性的前提下实现合金的高强化。

E04-16

待定

李殿中

中国科学院金属研究所

E04-17

碲锌镉晶体生长及其核辐射探测应用研究进展王涛^{1*}, 杨帆², 席守智², 介万奇¹

1. 西北工业大学

2. 陕西迪泰克新材料有限公司

碲锌镉 (CdZnTe, CZT) 晶体被认为是目前最有前途的室温半导体探测器材料之一, 基于该晶体的探测器件具有能量分辨率高、体积小、便携等优点, 在高能物理与核物理、国家安全和医疗安检等领域应用广泛。但是 CZT 晶体熔点较高, 元素分压差别大, 组元之间交互作用强, 使得晶体生长较为困难。报告采用有限元分析对多组元传质过程进行了模拟, 获得了三种组分扩散过程中组元相互作用的规律, 讨论了引入强制对流 (ACRT) 对溶质传输、界面形状等的影响因素。结合晶体生长全局模拟, 应用到 CZT 晶体生长制备过程, 率先实现了 2 英寸和 4 英寸材料的全单晶生长。采用此晶体制备的器件成功应用到核仪器仪表、辐射成像、医疗 CT 等国家重大工程和国民经济领域。

E04-18

离心铸造制备镁合金环件及高性能镁合金研究进展

杨艳

重庆大学

报告综述了课题组近年来在镁合金离心铸造领域的研究成果, 介绍基于离心铸造-环轧制备大型镁合金环件的研究进展。采用离心铸造制备高性能 Mg-8.5Gd-4Y-1Zn-0.4Zr 合金, 系统研究了均匀化和时效处理和变形-时效处理对离心铸造合金 Mg-8.5Gd-4Y-1Zn-0.4Zr 合金显微组织、LPSO 相及力学性能的影响规律; 发展了离心铸造-挤压和离心铸造-轧制复合成形工艺, 成功制备出抗拉强度达到 510MPa 级的 Mg-8.5Gd-4Y-1Zn-0.4Zr 合金。为后续高性能超大尺寸镁合金环件制备加工奠定重要理论和技术基础。

E04-19

微纳异质颗粒作用下的镁合金凝固组织演化行为

郭恩宇*, 张至柔, 陈宗宁, 康惠君, 王同敏

大连理工大学

微/纳异质颗粒增强金属基复合材料具有重要的工程化应用, 液态熔体处理与凝固过程添加的微/纳米颗粒对凝固组织的作用机理是其关键科学问题。研究微/纳米颗粒增强金属基复合材料凝固过程中的晶体生长与演化以及缺陷的形成机理, 对凝固组织的调控和生产工艺的指导等具有重要意义。本研究主要考察微纳异质陶瓷颗粒作用下的镁合金凝固行为, 通过同步辐射三维 CT 与原位 4D 凝固成像技术揭示异质陶瓷颗粒作用下 Mg-Zn-Al 合金凝固过程三维枝晶晶体的形成与动态演化过程, 以及凝固微孔缺陷的形成机理。通过对合金凝固组织特征 (晶粒尺寸、晶粒形貌、晶粒比表面积等) 的定量化与 LGK 模型理论分析, 发现: (1) 异质颗粒的添加促进晶粒的爆发形核; (2) 熔体中的异质颗粒限制三维枝晶晶体的生长, 其机理为: 纳米颗粒导致凝固过程中枝晶尖端前沿合金元素的有效扩散系数降低, 促使合金晶粒尺寸的细化; (3) 纳米颗粒的添加改变晶粒的生长方向和形貌; (4) 微/纳米颗粒的添加促进合金制备过程的微孔缺陷的形成, 使得制备过程的缺陷含量增加。

E04-20

深过冷金属单质的均匀形核与调幅分解特征

彭平*, 李媛, 刘志邦

湖南大学 材料科学与工程学院

基于快凝期间液态金属组态结构的连续遗传性, 提出了一种可有效区分晶胚与晶核的团簇分析方法, 据此表征了 fcc-Al 单晶晶核的临界尺寸、几何构型、内部结构与界面形态, 并从形核速率、形核能垒、凝固界面能等方面, 与先前的理论与实验结果进行了比较。进一步针对过冷液体 Al 的等温晶化过程, 基于过冷液体的瞬态结构遗传性, 发展了一种可直接测量晶胚孕育与晶胚生长时间 (即晶体形核时间) 的团簇分析技术, 据此考察了过冷液体 Al 的均匀形核极限, 导出了其对应的调幅分解动力学温度, 并通过与热力学调幅分解温度的比较, 分析了金属单质在均匀形核极限前后的形核特征。

E04-21

铸态永磁高熵合金

马天宇*, 苟峻铭, 陈虹宇, 潘贇

西安交通大学

能向外界提供强磁场的永磁材料是一类重要的功能材料, 广泛应用于信息、交通、能源和国防等领域。现有的高性能永磁材料高度依赖于昂贵稀缺的稀土战略元素, 其长期快速发展导致我国稀土资源过快消耗, 因此, 研发高性能无稀土永磁材料成为该领域基础研究的重要方向。不同于经多道热处理复杂工艺制备的传统 Alnico 无稀土永磁, 近期发展的无稀土铁基高熵合金在铸态已具备强的硬磁性 (高矫顽力), 且工作温度远高于具有“磁王”之称的钕铁硼稀土永磁, 因此有望发展成为新型高性能无稀土永磁材料。然而, 目前这种高熵合金产生硬磁性的根源尚属未解之谜。本课题组通过深入研究非等原子比 Fe-Co-Ni-Al-Ti-Cu 高熵合金的微结构与磁性能关联性, 发现该合金在凝固过程中已发生相分解, 形成了层级非均质纳米结构, 即磁性原子定向聚集, 跨越有序相和无序相组成的纳米胞状组织, 形成强烈的化学形状各向异性 (长轴大于短轴)。通过磁场退火进一步增强了化学形状各向异性, 将矫顽力提高了~50%。上述结果表明, 纳米尺度的化学形状各向异性是这种永磁高熵合金的硬磁性根源[1]。与纳米尺度的结构非均质性使非等原子比高熵合金具有高强高韧特性相类似[2], 在凝固过程中使合金产生纳米相分离也有望成为设计高性能功能材料的重要策略。

E04-22

抗辐照难熔高熵合金组织及性能研究

卢一平

大连理工大学

难熔高熵合金因其出色的高温稳定性和优异的抗辐照性能, 在核材料领域展示了巨大的潜力。其独特的微观结构和高熵效应能有效减缓辐照诱导的缺陷积累, 如点缺陷和位错, 限制辐照诱导的微结构退化, 从而保持较高的组织稳定性。报告综述了本团队难熔高熵合金在核材料领域中的最新进展, 详细介绍了难熔高熵合金的成分设计、组织稳定性以及抗辐照性能, 最后指出其所面临的挑战和未来发展方向。

E04-23

中国空间站条件下 Nb-Si 合金快速凝固研究

王海鹏, 魏炳波*

西北工业大学

在中国空间站无容器实验中发现了微重力悬浮 Nb-Si 合金凝固过程中的凝固收缩现象, 获得了具有显著缩孔的 Nb-Si 合金球形样品, 并阐明了缩孔形成的规律与表面形核生长密切相关。同时, 通过微重力 Nb-Si 共晶合金快速凝固实验实现了 Nb 相和 Nb₃Si 相枝晶的解耦独立生长的。并从形核热力学及生长动力学角度解释了解耦效应出现的原因。研究了微重力条件下 Nb-Si 合金样品的表面宏观变形行为, 通过调控形核点位置和过冷度大小实现样品的不同宏观变形现象。

E04-24

先进材料凝固过程的同步辐射原位研究

胡侨丹

上海交通大学

E04-25

大型复杂铝合金汽车飞轮壳构件局部加载强制补缩挤压铸造成形研究

姜巨福^{1*}, 王迎², 李明星¹, 胡国权¹, 葛宁¹, 丁长杰³, 邹德超³

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院

3. 大连创新压铸件有限公司

针对大型大壁厚差复杂铝合金汽车承力构件得成形制造需求, 利用直接压射技术、通用液压技术与定量浇注技术相结合, 研制了 12500kN 低成本、高效率大型铝合金挤压铸造装备。在此基础上, 利用有限元仿真技术与液压加载技术相结合, 提出了局部加载强制补缩挤压铸造技术。研究发现, 研制的 12500kN 低成本、高效率大型铝合金挤压铸造装备较国外装备成本降低 60%以上。有限仿真结果表明飞轮壳铸件成形凝固规律为: 整个过程可以划分为小阻力通道流动、大阻力水平区域填充、高度方向充型及最后难充型区域充型四个阶段。18kg 飞轮壳的正交挤压铸造成形实验确定的最优工艺方案为 T 浇注=655 °C, T 模具=B 方案, 保压时间为 20 s, 比压为 34 MPa。20kg 飞轮壳正交挤压铸造实验表明, 模具温度是对性能影响最显著的工艺因素, 对性能影响的主次顺序为模具温度 > 挤压力比压 > 加压延时 > 浇注温度 > 局部加压力。35kg 飞轮壳有无定域补压条件下抗拉强度和延伸率分别为 205MPa、215MPa 和 6.02%、14.2%, 延伸率同样显著提高了 135.9%。35kg 飞轮壳热处理的极限抗拉、屈服强度和延伸率分别达到 306.1 MPa、237.5 MPa、13.29%。在最佳热处理参数条件下析出大量细小弥散分布的针状 β'' 相, 此时 β'' 相是主要强化相, 引起晶格畸变, 阻碍位错运动, 力学性能提高, 沉淀强化作用显著。

E04-26

磁场下过冷金属熔体的凝固

王军*, 贺一轩, 李金山

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

强磁场作为一种非接触性的极端物理场可以作用至物质的原子尺度, 呈现出全新的物理和化学效应, 为发现新现象、揭示新规律、孕育新技术提供了重大机遇。基于强磁场的特殊效应, 研究者开展了大量强磁场在材料、物理、化学、生物、医学等领域的基础和应用基础研究, 获得了一系列重大科学发现, 逐渐发展成多学科融合的新兴交叉学科, 在特殊冶金、功能材料、化学合成、生物工程、医疗及新型药物开发等诸多领域实现了应用。

近年来, 我们将磁场与非平衡凝固技术结合, 系统研究了合金在磁场下的过冷凝固行为。研究发现, 基于磁场下磁化强度的变化, 可以实现熔体结构变化、凝固过程和固态相变过程直接定量原位表征; 利用强磁场耦合大过冷度增强熔体磁性, 揭示了磁场作用下金属熔体的宏观界面稳定性演化机制; 开展了强磁场下多种合金的凝固行为研究, 获得了磁场调控下材料凝固组织演化规律, 实现了合金力学和磁性能的改进。

E04-27

多元多相多晶 α -Al 枝晶和共晶 Si 凝固生长及固溶变形的随机取向多相场自洽模型

赵宇宏^{1,2}

1. 北京科技大学

2. 中北大学

基于 Ginzburg-Landau 理论, 以多相场 ϕ (枝晶相 ϕ_1 , 共晶相 ϕ_2 , 液相 ϕ_3)、温度 T 和溶质浓度 c 为变量, 考虑各相之间相互作用, 构建了包含各向异性界面能的多元多相合金体系自由能函数, 同时建立了随机分布晶核的随机取向和多晶粒碰撞的相场模型。由于共晶 Si 在固溶热处理过程中的形变主要受界面能和界面动力学系数因素影响, 通过构建界面能 σ 、界面动力学系数 μ_k 和界面厚度 δ 与能量梯度系数 ε_ϕ 、相变势垒高度 w 和迁移系数 M_ϕ 之间的联系, 建立了相场变量与合金体系之间的联系, 构建了固溶热处理形变相场模型。所建立的相场模型自洽耦合了枝晶生长、共晶生长和固溶热处理, 实现了铸造过程与固溶热处理过程微观组

织演化的全过程模拟。

E04-28

一体化压铸专用 Al-Ti-B 中间合金开发思路

陈宗宁, 赵凯, 张宇博, 王同敏*

大连理工大学

已量产的一体化压铸车身底盘结构件采用 Al-Si 系自时效硬化合金, 其基于高压压铸的亚快速凝固条件形成过饱和固溶组织, 从而实现免热处理的目的, 提高良品率。目前, 该类合金存在自然时效和烤漆硬化的时间响应机制不明、远距离充型能力和致密度不足、压铸大型总成局域性能调控手段相对匮乏等难题。大连理工大学自主开发的 Al-Ti-B 系列晶粒细化剂, 通过能场干预和晶种结晶学控制来实现细化剂中 TiB₂ 主相的形貌、尺寸和分布的主动控制。通过压铸过程中的少量添加, TiB₂ 具有影响合金的流动性、自然时效行为、烤漆硬化响应特征和富 Fe 相形貌等一系列作用, 为一体化压铸技术迭代注入新增长点。

E04-29

强磁场下金属凝固等相变行为的原位表征

贺一轩*, 卜凡, 王军, 李金山

西北工业大学

强磁场下的冶金和材料过程控制是目前世界各国重点关注的基础研究前沿领域。获取强磁场下金属多维物性参数, 实现凝固等相变行为的原位表征是揭示强磁场作用机制、调控先进材料制备过程的关键所在。报告报道研究团队自主开发的强磁场下相变原位表征装置, 该装置可以实现金属材料宽温域(过热-过冷态)磁化强度的精确测量。利用物质结构对磁化强度的关联性和敏感性, 可以高效表征合金相变过程。该装置具有以下优点: 1. 灵敏度高, 甚至可以区分固溶体相固溶度的细微差别。2. 适用范围广, 装置不仅可以用来研究固态相变, 耦合熔融玻璃净化法等深过冷方法, 可以用来研究合金过热, 过冷态熔体结构转变。3. 最终组织组成预测性强, 基于磁化强度的原位测量, 不但可以有效预测最终组织组成, 还可以定量表征合金相变程度, 从而获得不同组成相体积分数等。

E04-30

原位反应晶内纳米相增强铝基复合材料组织与性能研究

赵冬冬*, 戎旭东, 张翔, 何春年, 赵乃勤

天津大学

晶内纳米增强结构因其可实现复合材料强韧协同, 是目前高性能铝基复合材料 (AMCs) 的研究重点之一。本研究基于 Al-CuO 原位反应体系, 制备了晶内纳米 δ^* -Al₂O₃ 颗粒和 γ -Al₂O₃ 晶须多组元协同增强的铝基复合材料, 抗拉强度达 481 MPa, 断裂延伸率为 16.8%。通过建立等效分布理论模型, 提出纳米增强相晶内分布是复合材料获取高强度的主要途径。晶内纳米 Al₂O₃ 的引入使复合材料变形过程中几何必须位错表现出显著的晶内分布特征, 并量化了 Al₂O₃ 对于动态硬化和各向同性硬化的显著贡献, 证实了晶内 Al₂O₃ 在改善复合材料应变分配、应变/应力传递和强度匹配方面的重要作用。本研究为高强韧铝基复合材料的组织设计与性能调控提供了理论基础和实现途径。

E04-31

Controlling solid-liquid interfacial energy anisotropy through the isotropic liquid

Lei Wang

Northwestern Polytechnical University

Although the anisotropy of the solid-liquid interfacial free energy for most alloy systems is very small, it plays a crucial role in the growth rate, morphology and crystallographic growth direction of dendrites. Previous work posited a dendrite orientation transition via compositional additions. In this work we examine experimentally the change in dendrite growth behaviour in the Al-Sm (Samarium) system as a function of solute

concentration and study its interfacial properties using molecular dynamics simulations. We observe a dendrite growth direction which changes from $\langle 100 \rangle$ to $\langle 110 \rangle$ as Sm content increases. The observed change in dendrite orientation is consistent with the simulation results for the variation of the interfacial free energy anisotropy and thus provides definitive confirmation of a conjecture in previous works. In addition, our results provide physical insight into the atomic structural origin of the concentration dependent anisotropy, and deepen our fundamental understanding of solid-liquid interfaces in binary alloys.

E04-32

快速凝固 NiCoCrFeAl 共晶高熵合金组织调控机理

何峰*, 谢按, 王志军, 王锦程

西北工业大学材料学院

究采用选区激光熔化 (SLM) 制备了一种 NiCoCrFeAl 共晶高熵合金 (EHEA), SLM 样品为 BCC/B2 胞和 FCC 胞界组成的胞状共晶结构。结果表明, 在选区激光熔化极高的温度梯度和冷却速率下, 强非平衡凝固产生的胞状共晶微观结构特征会受到扫描速度和激光功率的极大影响。胞状结构的形成原因如下: 在大过冷度下 B2 枝晶生长速度远超共晶而形成亚共晶结构, 并在一定条件下演化为离异共晶。当激光扫描速度较高时, 熔池的冷却速率提高, 缩短了枝晶的一次臂间距, 从而细化了胞状结构尺寸。而在较低的扫描速度下, 激光对沉积材料循环热加载的时间延长, 有利于元素的扩散和富集, 促进了胞内 BCC 相的调幅分解过程。研究成果为 SLMed EHEAs 快速凝固组织的形成和演化行为提供了新的见解, 为实现 EHEA 的快速凝固组织调控奠定了理论基础。

E04-33

强静磁场下凝固组织演变规律的 X 射线原位/离位观测研究

郑天祥*, 林文浩, 周邦飞, 冯美龙, 钟云波

上海大学

强静磁场因其独特的无接触力/能效受到广泛关注, 能够对凝固过程中热/动力学产生影响, 进而为调控凝固组织和开发新材料提供了非常规手段。尽管强静磁场能够显著影响凝固过程, 但还有众多理论机制尚不清楚。如强静磁场下凝固过程中溶质传输、初生相的形核、生长及形态演变机制, 从而制约了强静磁场在合金材料冶金和制备过程中的实际应用。

本文主要研究了静磁场以及超强静磁场 (> 20 T) 所产生的高哈特曼数 (Ha) 熔体环境对凝固过程中组织演变的影响。为全面准确反映静磁场对凝固组织结构演变的影响规律, 利用 X 射线实时成像和断层扫描技术对 Al-Cu 合金中 α -Al 和 θ -Al₂Cu 初生相生长和粗化过程进行了原位二维表征和离位三维表征, 深入分析了静磁场对初生相数量、尺寸、空间分布和形貌演变的影响。提出了磁致成分过冷调控熔体形核和晶体生长理论, 为利用静磁场调控凝固组织进而优化合金提供理论基础。

E04-34

大型一体化压铸模具控温流道设计与制造

万杰, 陈豫增*

西北工业大学

压铸模具广泛应用于大型、复杂轻量化金属结构件的制造, 而模具的温度控制对生产效率、模具服役寿命以及铸件成形质量密切相关。与采用传统机加工手段制造的控温流道及模具镶块相比, 增材制造可以实现模具镶块中控温流道的随形设计与制造, 是降低生产成本、提高生产效率的有效手段。该报告将首先对增材制造控温模芯以及热作模具钢制备方法进行介绍, 然后介绍作者开发的几款高性能增材制造专用热作模具钢, 最后对随形控温模芯的增材制造与使用案例进行讲解。

E04-35

异质材料激光焊接界面反应行为与冶金调控技术研究

檀财旺

哈尔滨工业大学 (威海)

E04-36

激光增材制造高强 Invar 型合金及其性能优化

吝放, 陈豫增, 万杰*

西北工业大学

Invar 型合金因其低热膨胀特性而被应用于精密零部件的制造, 然而该类合金强度较低且难加工, 限制了其在更大范围的应用。在 Fe-Ni-Co 低膨胀 Invar 合金中引入弥散分布的碳化物颗粒, 可以在提高合金强度的同时调控其热膨胀系数。本工作设计了高强 Fe-Ni-Co Invar 合金并通过选区激光熔化技术制备了合金样品。通过电子万能试验机与热膨胀分析仪测量了所设计合金的力学性能与热膨胀系数。结果表明, 相较于传统 Fe-Ni-Co Invar 合金, 所设计合金表现出较低的热膨胀系数和显著提高的强度。利用 SEM 和 TEM 表征对合金的强化机理进行了研究, 并对合金热膨胀系数的变化给出了解释。

E04-37

TC4 钛合金返回料的电子束冷床熔炼工艺研究

赖奇

攀枝花学院

以 TC4 钛合金废料为实验原料, 采用电子束冷床熔炼方法实现钛合金资源的回收再利用。实验通过改变熔炼功率和时间对 TC4 钛合金组织的影响, 完成 TC4 钛合金返回料的电子束冷床炉熔炼工艺研究。结果发现回收料的电子束冷床熔炼均能够得到符合国家标准 TC4 钛合金。元素挥发模型计算表明 TC4 合金中合金元素挥发速率服从 Langmuir 定律, 理论计算结果与实际基本吻合。

E04-38

微纳米颗粒可控制备及协同调控铝合金凝固组织机制

董柏欣, 杨宏宇, 邱丰*, 姜启川

吉林大学

通过促进轻质、软韧的铝基体和高熔点、高硬度的陶瓷颗粒增强相独一无二的协同效应, 陶瓷颗粒调控下的铝合金具有优化的凝固组织及良好的强韧性平衡。本报告以内生 TiB₂ 以及 TiC_xNy-TiB₂ 微纳米陶瓷颗粒的制备为起始, 探究不同富铝的反应体系燃烧合成制备微纳米陶瓷颗粒的反应机制。随后系统地研究了冷速变化, 添加颗粒种类、尺寸、形貌及空间分布对纯铝和铝硅合金的凝固行为、凝固组织及力学性能的影响。通过分析燃烧合成过程中生成的陶瓷颗粒的尺寸形貌以及边对边匹配模型预测基体/颗粒界面匹配情况, 最终优化出微纳米混杂尺寸单相 TiB₂ 颗粒与微纳米混杂尺寸双相 TiC_xNy-TiB₂ 颗粒作为纯铝和铝硅合金的调控剂。结果表明, 相同添加量下, 相比于单相 TiB₂ 颗粒, 微纳米混杂尺寸双相 TiC_xNy-TiB₂ 颗粒具有最优异的调控纯铝及铝硅合金的凝固组织的能力: 纯铝由柱状晶变为细小的等轴晶。2.0 wt.% 微纳米 TiC_xNy-TiB₂ 颗粒添加后, 纯铝细化效率为 96.4%。铝硅合金中 α -Al 枝晶、二次枝晶臂间距、共晶硅长度及长径比、第二相尺寸均显著减小; 0.3 wt.% TiC_xNy-TiB₂ 颗粒添加量下 Al-Si-Mg 合金 α -Al 枝晶、二次枝晶臂间距细化了 68.2% 和 39.4%, 共晶硅尺寸减小了 55.3%。微纳米陶瓷颗粒的加入可以有效调控纯铝及铝硅合金的凝固行为, 提高形核温度, 降低再辉过冷度, 缩短 α -Al 和共晶硅的形核及生长时间。在凝固过程中, 大部分纳米颗粒会被界面排斥最终分布于枝晶周围, 而固/液界面前沿处微米尺寸颗粒更容易被界面捕获最终颗粒分布于枝晶内部。位于固液界面前沿的纳米颗粒会降低溶质原子的迁移速率, 从而阻碍枝晶生长, 同时在再辉发生前缩小生长的枝晶前的无形核区, 提高异质形核率。此外, 冷速增加将基体合金的凝固组织对纳米颗粒的敏感性降低。冷速增加改变了陶瓷颗粒的空间分布, 慢冷速下大部分纳米颗粒被固/液界面推移而最终分布于晶界, 而冷速增加导致部分颗粒被固液界面捕获。本文从陶瓷颗粒的固有特性出发, 设计和控制合成具有特定尺寸和形貌陶瓷颗粒并用于合金凝固组织调控具有独特的创新性和实用价值。

E04-39

4D 同步辐射 X 射线表征再生铝合金在脉冲磁场作用下的凝固机理

张治国

暨南大学

铁是再生铝合金中的有害杂质元素。理解再生铝合金中含铁金属间化合物的形成机制以及凝固过程中各凝固相与外部磁场之间的相互作用机制，对于制定除铁策略至关重要。为此，我们采用 4D 同步辐射 X 射线技术原位表征了 Al-5Cu-1.5Fe-1Si 合金脉冲磁场 (PMF) 凝固过程中的多相生长行为。研究发现，Al-Fe 金属间化合物的初始形态决定了再生铝合金中 Fe 相的最终形态以及分布。在熔体凝固过程中施加脉冲磁场主要影响到熔体流场，可导致 Al 枝晶的等轴生长，是脉冲磁场凝固时铝基体晶粒细化的主要机制。此外，脉冲磁场在熔体中产生的电磁力可使初始 Al-Fe 金属间化合物枝晶破碎化，并同时使 Al 枝晶的生长方向向凝固温度梯度方向倾斜，从而实现凝固相的定向生长。上述实验结果可为制定再生铝合金除铁策略或降低含铁相危害提供指导。

E04-40

基于元胞自动机模拟与 CT 实验数据驱动铝合金凝固缺陷智能预测

侯清怀¹，苗以升¹，吴雪龙²，李钟尧²，王诗豪²，陈远路²，李星星¹，王俊升^{1,3*}

1. 北京理工大学材料学院

2. 北京理工大学机械与车辆学院

3. 北京理工大学前沿交叉科学研究院

铝合金因其良好的铸造性能和综合力学性能，广泛应用于汽车结构件、航空飞行器等领域。然而，铸造过程中的孔洞缺陷是造成铸件性能下降的主要因素。为实现缺陷的定量预测，本研究采用三维元胞自动机模型，针对冷却速率和初始氢含量等因素对气孔的影响开展定量模拟。通过对气孔当量直径、几何长度、孔隙率等特征进行量化统计，构建了缺陷数据库。将数值计算数据库与 X 射线 CT 测量数据结合，构建了智能预测模型，通过支持向量机(SVM)、随机森林(RF)、K-近邻(KNN)、梯度提升机(GBM)等模型优化，发现了预测精度较高的 KNN 模型，可以快速有效地计算出凝固条件下的缺陷尺寸。因此，智能算法可实现铝合金铸件内缺陷的高效精准预测，为进一步的力学性能预测提供依据。

E04-41

基于高熵多孔结构调控的铝/钢激光熔钎焊接头组织及性能研究

杨瑾

上海工程技术大学

针对铝/钢异种金属激光熔钎焊界面易产生硬脆金属间化合物及残余应力问题，提出了以高熵多孔结构作为铝/钢激光熔钎焊过渡层的思路，开展了高熵多孔涂层钢润湿及激光熔钎焊试验。首先，采用真空烧结技术在钢基体表面制备了 FeCoNiCr 高熵多孔涂层，比较研究了 Al-12Si 合金在有/无多孔涂层钢基体上的润湿铺展行为，并分析了其界面反应产物的形成；其次，研究了激光功率对铝/钢异种金属激光熔钎焊接头钎焊界面微观组织及力学性能的影响，分析了焊接接头宏观形貌以及钎焊界面的反应层微观组织结构、力学性能和断裂行为，阐述了界面 IMC 的形成机理；之后，研究了激光功率对铝/多孔涂层钢激光熔钎焊接头钎焊界面微观组织及力学性能的影响，并阐述了不同功率条件下铝/多孔涂层钢界面组织的形成机理；最后，分析了不同热输入条件下铝/多孔涂层钢接头的断裂行为，揭示了铝/多孔涂层钢接头的强韧化机制。

E04-42

电磁悬浮 Ti-Al-Fe 合金的表面波现象与微观组织演变规律研究

郑宇航，阮莹*，魏炳波

西北工业大学

电磁悬浮是一种重要的无容器加工技术，对于仿空间条件下的材料加工制备和相变规律研究有重要意

义。利用电磁悬浮技术实现了 $\text{Ti}_{50}\text{Al}_{30}\text{Fe}_{20}$ 合金的快速凝固,研究了该合金的表面波现象、凝固组织演变和微观力学性能。在深过冷条件下,采用高速摄像机原位监测了电磁悬浮熔体表面波的形成过程。表面波的形成主要是由于表面形核生长、半固态旋转和内部涡旋流动的共同作用。来自样品顶部的冷却气体带来外部扰动,为表面波提供了形核位点。在旋转的半固态合金表面,离心力与表面张力的竞争使表面处于伸缩或相对振动的亚稳态,激发了表面波动,在快速凝固过程中表面波形貌被保留下来。当过冷度较小时,合金内部凝固组织由 (βTi) 枝晶和枝晶间层片状的 (βTi) 与 TiFe 共晶组成。随着过冷度的增加, (βTi) 和 TiFe 两相之间竞争形核,微观组织演变为不规则共晶。凝固组织为不规则共晶时合金表面才会出现表面波现象,表明这种现象与共晶生长的流动性有关,因为不规则共晶直接从熔体中形成,对熔体流动的阻力较小。此外,合金保持过冷液态超过 200 s,这为表面波提供了足够的形成时间。由于组织细化和溶质截留效应,合金的显微硬度、断裂韧性以及两相的纳米硬度均随过冷度增加而显著提升。

E04-43

Fe-Mn-Al-C 轻质钢中 κ -碳化物的析出机制及 Cr 元素的调控机理

张鉴磊*, 宋长江、翟启杰

上海大学

随着轻量化成为汽车产业发展的重要趋势,兼具低密度和优异力学性能的 Fe-Mn-Al-C 轻质钢受到广泛关注。 κ -碳化物是轻质钢中最重要的纳米强化相之一,纳米尺寸的 κ -碳化物析出可以显著提高轻质钢强度,并维持轻质钢良好的塑性。因此,轻质钢中 κ -碳化物的析出调控一直是轻质钢研究中的重点内容。然而,奥氏体内 κ -碳化物的析出机制一直缺乏直接的实验证据。尽管 Cr 元素被发现可以有效控制 κ -碳化物的析出和长大,但是其影响机理尚不明确。

本工作中,通过对 Fe-20Mn-9Al-1.2C-3Cr 轻质钢奥氏体内平均尺寸 3 nm 以下的 κ -碳化物进行原子分辨率的表征分析,发现 κ -碳化物在形成初期具备有序的 $L/12$ 结构,但其析出并未导致奥氏体发生任何的元素配分,奥氏体中的元素分布完全均匀,该现象与传统认知中 κ -碳化物的调幅分解有序化形成机制相违背。热力学计算结果也表明,在 κ -碳化物的形成温度范围内,奥氏体中不具备发生调幅分解的热力学条件,反而符合有序相形核长大的热力学要求。因此,奥氏体中 κ -碳化物的形成符合形核长大机制。

Cr 元素添加能显著抑制轻质钢中 κ -碳化物的形成和长大,从而降低其屈服强度。3D APT 表征和第一性原理计算发现, Cr 原子可以掺杂进 κ -碳化物并取代其中的 Al 原子,提高了 κ -碳化物的形成能,同时增加 κ -碳化物与奥氏体基体间的界面能和弹性应变能,使 κ -碳化物的形核能垒提高。热力学计算表明,随着 Cr 含量增加, κ -碳化物的初始析出温度逐渐降低,其析出温度区间缩短;此外, Cr 元素添加降低了奥氏体中 C 元素的扩散系数,使奥氏体内 κ -碳化物的长大速率减慢。形核能垒提高、析出温度区间缩短和 C 元素的扩散系数降低等因素是导致含 Cr 轻质钢中 κ -碳化物含量减少的主要原因。

E04-44

激光振荡提高免热处理压铸铝合金焊接接头剪切性能的研究

徐虹*, 王瑞, 刘文龙, 蔡瀚荣, 白明, 邵锦怡, 程秀明, 赵森

吉林大学

激光振荡焊接(LBOW)技术利用大功率振镜,为免热处理压铸铝合金提供了一种先进的焊接方法。这一创新不仅扩大了集成压铸技术在制造业的实际应用,而且提高了焊接质量。研究了激光振荡频率对焊接接头形貌、组织和力学性能的影响。研究表明,振荡频率的提高有效地缓解了熔池中的塌陷缺陷,降低了孔隙率,改善了组织的均匀性,优化了共晶硅和第二相的分布和形态。这些改善背后的机制是由于熔池内温度场和材料场的均匀化、以及由振荡激光束引起的金属熔体流动动力学的改变。力学试验进一步证实,振荡激光束显着提高拉伸剪切性能。具体而言,在振荡频率为 200Hz 时,我们观察到与传统激光焊接相比,最大拉伸剪切载荷和最大位移分别显著增加了 173% 和 188.5%。此外,随着振荡频率的增加,焊缝的断裂行为从脆性模式转变为韧性模式,表明焊缝延性和整体力学性能得到改善。

E04-45

多元镁合金凝固过程枝晶偏析相场模拟研究

张昂

重庆大学

凝固是铸造镁合金成形的关键过程，在此过程中由于溶质再分配产生的枝晶偏析，会恶化产品的力学性能和可加工性。本报告针对多元镁合金枝晶偏析缺陷，以 AZ91 和 VW92 两种典型的商用镁合金为研究对象，开发了多元合金凝固组织数值模拟架构，对多元镁合金枝晶偏析相场模型进行了参数分析和实验验证，在此基础上，开展了多元镁合金枝晶偏析相场模拟研究，研究了不同温度条件对多元镁合金枝晶偏析的影响，研究了不同合金元素（非稀土和稀土、三元和四元）的偏析差异。研究结果对于深入理解枝晶偏析形成机制，指导偏析控制和提升镁合金产品的性能具有重要意义。

E04-46**格子玻尔兹曼方法及其在计算材料工程中的应用**

孙东科

东南大学机械工程学院

格子玻尔兹曼方法是一种独特的建模思路与计算方法，现已成为一种重要的数值模拟研究手段。该方法因其分子动理论基础具有独特的建模思路与计算优势，已被广泛用于理论研究和处理工程问题。相变传热、液相流动与枝晶生长是合金材料研究中极为常见的非线性物理现象。采用数值模拟手段对其进行研究，有助于理解系统由简单初态演变至复杂终态的机制，有利于揭示合金的“成分-工艺-组织-性能”等关键信息，从而有利于加速新合金、新材料、新工艺的短流程开发过程。我们针对多元多相近平衡与快速凝固过程中熔体流动、传热传质、枝晶生长与晶粒运动等问题，结合格子玻尔兹曼方法与相场方法的优势，建立了描述微观组织形成规律的格子玻尔兹曼相场模型，该模型具有良好的可拓展性，有助于推进材料设计与工艺研发的进步。针对金属增材制造过程中的熔化与重凝现象，研究了液相熔体冲击条件下液柱直径、冲击速度、移动速度等工艺参数对熔池演化过程影响，探究了熔体冲击对凝固条件、界面形态及最终成形质量的影响规律。针对固态相变中的新相析出问题，应用外加力场作用下组织演化相场模型，探究了系统体自由能、界面能和弹性应变能对晶粒生长形貌的影响机制以及弹性模量张量大小对于其组织形态和生长速度的作用，揭示了晶粒形态、晶粒形貌和演化速率响应外场变化的规律。格子玻尔兹曼方法与相场方法融合建模思路，为研究熔体流动、凝固过程与相变规律提供了新方案。

E04-47**大型复杂镁合金构件砂型铸造燃爆控制机理研究**

张伦勇

哈尔滨工业大学

随着国家安全要求日益提升，航空航天飞行器轻量化需求比以往任何时期都更为迫切，大型复杂镁合金构件成为当前从材料减重和结构减重两个方面同时入手实现航空航天飞行器轻量化设计的必然选择。然而镁合金易燃易爆，大型复杂化结构精确成形采用树脂砂铸型带来复杂易氧化气氛，使得镁合金铸造过程安全风险极大，严重制约了目前大型复杂镁合金构件的研制生产，阻碍我国高性能飞行器发展。因此亟需根据大型复杂镁合金的铸造工艺特点和镁合金的燃爆特性，研究镁合金在复杂受限空间和易氧化环境中的燃爆过程与控制机理。本报告将呈现报告人团队近年来结合大型复杂镁合金的铸造工艺特点所开展的镁合金树脂砂型环境燃烧机理的实验与理论研究工作。介绍 PEP-SET 树脂砂热解动力学及逸出气体规律，各系镁合金在 PEP-SET 树脂砂型腔气氛下的氧化行为；加热过程中，镁合金的起燃条件和影响规律。上述结果为发展大型复杂镁合金构件铸造过程阻燃防爆技术奠定理论基础。

E04-48**快速凝固织构强化纳米晶 Bi₂Te₃ 合金**

耿慧远

哈尔滨工业大学

碲化铋基合金是目前唯一的商用热电材料。然而区域熔炼的 Bi_2Te_3 基合金具有较差的机械性能，而通过粉末冶金方法制备的多晶材料由于晶体结构的各向异性而破坏了所需的织构特征。在此，我们通过在富 Bi 环境中定向烧结制备的单辊旋转薄带，在 P 型 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 块体材料中实现了纳米级结构、高取向织构和固有反位缺陷的协同作用。HRTEM 和 EBSD 图像还揭示了高取向纳米晶粒内部存在高密度畸变区。ab initio 模拟和玻尔兹曼输运方程分析表明，反位缺陷同时引入了电子共振能级和额外的声子散射通道。全谱声子散射和高载流子迁移率使 375K 时的 ZT 达到最大值 1.54。同时，其抗压强度高达 140MPa，是区熔合金的 3.5 倍。我们目前的工作为制备基于 Bi_2Te_3 的高性能热电材料提供了一条有效途径。

E04-49

选区激光熔化 A100 钢微观组织及加工硬化机理研究

杨国煜，万杰，陈豫增*

西北工业大学

Aermet100 (A100) 是一种二次硬化型超高强度钢，具有较高的强度、硬度以及良好的断裂韧性，主要用于飞机起落架等高载荷部件。不过 A100 钢的高强度也给其复杂零件的制造带来了诸多难题，而选区激光熔化技术可以为高性能 A100 钢零件的成形提供一条新途径，以便于实现复杂零件的净成形。基于此，本报告对选区激光熔化成形 A100 钢的微观组织与力学性能进行了研究，分析了沉积态 A100 钢微观组织的形成机制，并研究了其高加工硬化的来源，明晰了其加工硬化机理，为选区激光熔化 A100 钢的应用奠定一定的研究基础。

E04-50

模拟近平衡流动作用下枝晶生长的离散动理学格式

秦楚晋，孙东科*

东南大学

枝晶生长是材料加工制造中广泛存在的各向异性液固相变过程，从微、介观尺度深入理解熔体流动对枝晶形貌演化的影响规律有助于预测和控制枝晶动力学行为、优化微观组织结构。本文构造了一种基于玻尔兹曼模型方程的枝晶生长与热对流耦合模型，其中相变过程由含各向异性系数的 BGK 方程描述，通过 Chapman-Enskog 分析与扩散界面相场方程等价；流动与传热过程由 Shakhov 模型方程描述，具有可变的 Prandtl 数。上述两个动理学方程通过热效应耦合，并采用基于离散速度的数值方法进行求解，针对各向异性 BGK 方程，本文提出了一种处理含各向异性时间导数项的离散动理学格式，该格式通过有限体积形式离散，界面通量由特征线上的数值解近似获得；描述热流的 Shakhov 方程由离散统一气体动理学格式 (Discrete unified gas kinetic scheme, DUGKS) 求解。由于 DUGKS 格式能够模拟大 Knudsen 数近连续和近平衡流动，本模型能够在较大范围的时空尺度上模拟枝晶生长与热对流的相互作用。采用此模型计算了顶盖驱动流、热 Couette 流动和方腔自然对流等算例对流动与传热模型进行验证，测试其模拟连续流与近连续流动的效果。通过圆柱绕流算例验证基于扩散界面描述的流固相互作用。此外，模拟了纯热扩散和热对流条件下的枝晶生长，并与传统求解方法进行对比。针对纯物质等轴晶生长过程，研究了近平衡流动作用下枝晶生长与形貌演变，发现在不同尺度下受不同流动和传热模式的影响，枝晶界面动力学和形态行为表现出一定差异。本文从动理学的视角出发对相变、流动及其耦合作用进行建模和模拟，为研究近连续流域、近平衡流动下的相变现象提供了一种有效手段。

E04-51

过冷行为和非晶形成能力的隐藏参数：超过冷临界极限

王磊，Yong Chan Cho，Yun-Hee Lee，Sangho Jeon，Geun Woo Lee*

韩国标准化科学研究院

金属熔体的过冷现象是理解和控制结晶和玻璃化转变的关键手段。当过冷度超过某一临界值 (ΔT_{hyp}) 时，称为超过冷。超过冷条件下不存在近平衡凝固平台，对晶体生长及凝固组织形貌有显著影响。传统观念认

为, 实现超过冷依赖于强大的过冷能力, 且过冷能力越强, 金属熔体越稳定, 越易于形成非晶。然而对于过渡金属而言情况并非如此。比如, BCC 纯金属的过冷能力普遍弱于 FCC 纯金属, 但前者却表现出超过冷行为以及强于后者的非晶形成能力(GFA)。因此, 过冷能力、超过冷以及非晶形成之间的关系亟待进一步研究。

基于静电悬浮无容器处理技术, 我们对一系列纯金属、二元合金、多元非晶合金的过冷行为进行了系统研究。研究发现熔体的超过冷行为是由过冷度($\Delta T_{\max}$)和超过冷临界极限(ΔT_{hyp})共同控制。并且 ΔT_{hyp} 主要由熔点处固液密度差($\Delta \rho_f$)所决定, 这意味着通过合金化调控 $\Delta \rho_f$ 可以实现超过冷。此外, 我们建立了超过冷与 GFA 之间的联系, 并基于经典形核理论给出了热力学和动力学上的解释。这些发现回答了为什么 BCC 纯金属的过冷能力弱于 FCC 纯金属却表现出超过冷和较强 GFA 的问题。这项工作不仅为过冷行为和玻璃形成提供了新见解, 还引入了具体的控制参数, 为设计具有超过冷行为或较强 GFA 的合金指明了方向。

E04-52

Al-Zn 合金固液界面自由能各向异性测量研究

帅三三

上海大学

固/液界面能及其各向异性是晶体形核和生长过程中非常重要的热力学参数, 对凝固过程中的晶体生长形态和演化行为具有重要影响。固/液界面能的大小关乎晶体形核的能量势垒, 而固/液界面能的各向异性决定了凝固过程中枝晶生长取向。本文基于平衡液滴实验方法, 探究了不同 Zn 含量 Al-Zn 合金平衡液滴形态与固相取向之间的关系, 使用亚微米 X 射线断层扫描技术表征液滴的三维形态信息, 计算出了不同组分合金中的固/液界面能各向异性参数值 ε_1 与 ε_2 。进一步, 根据固/液界面能极图与界面刚度极图分析了界面能与界面刚度的各向异性对枝晶取向及形貌的影响。研究表明: 随着 Zn 溶质的增加, 固/液界面能各向异性参数 ε_1 与 ε_2 均呈减小趋势; 固/液界面能极图及界面刚度分布图显示, 在 Al-17/30wt.%Zn 合金中, 固/液界面能极大值(界面刚度极小值)方向位于 $\langle 100 \rangle$ 晶向; Al-75wt.%Zn 合金中界面能极大值(界面刚度极小值)方向转变为 $\langle 110 \rangle$ 晶向。相较于 Al-x0002_17wt.%Zn, Al-30wt.%Zn 合金在 $\langle 100 \rangle$ 与 $\langle 110 \rangle$ 方向的更小的固/液界面自由能及刚度差异, 这可能是 Al-30wt.%Zn 中海藻枝晶形成的原因。

E04-53

Ca/Y 微合金化对 Mg-Al-Mn 基低合金铸轧偏析行为影响

董小锐, 查敏*

吉林大学

本研究采用大视域表征结合多尺度计算方法, 探讨钙/钇微合金化对双辊铸轧 Mg-Al-Mn 基合金铸轧偏析行为的影响。结果显示, 单独添加钙和钇至 Mg-Al-Mn 基合金中, 分别导致严重的共晶相 Al_2Ca 偏析和显著的 Al 溶质枝晶偏析。而钙和钇复合添加后, 共晶相 Al_2Ca 的最大尺寸由约 105 微米降至约 40 微米, Al 溶质枝晶偏析面积比例由约 45%降至约 1.2%。这主要归因于钙-钇多尺度协同弱化铸轧偏析机制: 宏观上, 钙-钇微合金化缩短糊状区长度、减小铸轧应力集中区面积并减缓 Al 溶质再分配; 微观上, 钇的添加引入高熔点颗粒异质形核细化 Al_2Ca , 钙的添加促进部分 Al-Al 原子对转变为 Al-Ca 原子对, 从而协同减弱共晶相和溶质枝晶偏析。

E04-54

通过引入类 Janus 结构和杂质能级协同提升 $\text{Mg}_3(\text{Sb}, \text{Bi})_2$ 基热电材料的热电性能

姜立峰, 康慧君*

大连理工大学

解耦热电材料的电性能和热性能以获得高的均值 ZT 是提高热电材料转换效率的必经之路。我们通过 Y 和 Ga 共掺杂, 在 Mg_3Sb_2 基热电材料中实现了极低的晶格热导率和较高的均值 ZT。研究发现, Ga 掺杂剂会在导带附近引入额外的能级, 提高泽贝克系数; 同时 Ga 和 Bi 在烧结过程中会在晶界处形成类 Janus 结构的 Ga/Bi 共偏析区域, 类 Janus 结构的存在使低温区晶格热导率大幅度下降。此外, 样品中还具有大

量纳米级别的与基体具有共格界面的 Mg 富集区，共格界面的存在可以在不严重损害电导率的情况下，降低热导率。最终 $\text{Mg}_{3.2}\text{Y}_{0.02}\text{Ga}_{0.03}\text{Sb}_{1.5}\text{Bi}_{0.5}$ 在 323K-773K 之间实现了 $0.4 - 0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 的晶格热导率及 1.21 的平均 ZT。

E04-55

类 Stefan 问题的扩散界面模型的构建和应用

邢辉*、景涵煦

西北工业大学

类 Stefan 问题是包含相变过程的自由边界问题的总称，凝固过程是典型的类 Stefan 问题。扩散界面方法是一种描述系统动力学演化过程的模拟方法，其核心思想是引入一个连续变化的序参量，使得相变过程的数学描述由尖锐界面问题转变为扩散界面问题。由于将界面的动力学行为转化为序参量的演化方程，使得动力学模拟过程中不再需要复杂的界面跟踪。相场方法和水平函数方法是最常见的扩散界面方法。本报告将介绍类 Stefan 问题的扩散界面模型的构建方法和模型特点，并将其应用于合金凝固、电化学枝晶生长、物理气相沉积等领域。

E04-56

高性能 Al-Mg/TiB₂p 复合材料制备工艺及微观组织演化机理

李昕宸，陈宗宁*，王同敏

大连理工大学

在生产 Al-Mg 合金大铸坯的过程中，由于芯部和边部的冷却速度不同，导致不同部分的微观组织和力学性能差异明显，表现出较高的冷却速率敏感性，对后续加工产生不利影响。这项工作通过在铸造过程中引入原位 TiB₂ 纳米颗粒来解决这一问题，并研究了 TiB₂ 含量对 Al-Mg 合金显微组织和力学性能的影响。TiB₂ 纳米颗粒可以通过三种方式降低合金组织对冷却速度的敏感性：1) 作为 α -Al 的有效形核位置，可以促进形核和限制枝晶生长；2) 减小粒径差异，分散气孔分布；3) 阻碍元素扩散，显著削弱元素偏析。基于上述优点，生产的铸坯可以在没有均匀化退火的情况下进行塑性加工。此外，在后续热变形过程中，微量 TiB₂ 颗粒改变了微观组织的演变过程，在低 Sc 添加量下制备了具有理想强度-塑性的高性能铝合。同时研究了 TiB₂ 颗粒和 Al₃(Sc,Zr) 相对 Al-Mg 合金热变形过程中微观组织演变的综合影响。结论为：1) 在热挤压过程中，弥散分布在基体中的尺寸为 5~10 nm 的球形 Al₃(Sc,Zr) 起到了对位错的 Zener 钉扎的作用，抑制了动态再结晶 (DRX) 过程；2) 微量 TiB₂ 颗粒的引入诱发了颗粒刺激形核 (PSN) 效应，加速了 DRX 并细化了微观结构；3) TiB₂ 颗粒大幅削弱了材料的各向异性，抑制了 DRX 晶粒的生长，从而扩大了后续加工窗口，为材料提供了更多的潜在应用。该工作为高性能铝合金产品的生产提供了新的思路。

E04-57

超声场辅助激光熔丝增材制造过程中的凝固组织演变

刘兴涛¹，孙东科^{1*}，隋大山²，韩青有¹

1. 东南大学

2. 上海交通大学

随着制造业的快速发展，金属增材制造 (Additive Manufacturing, 简称 AM) 逐渐崭露头角并发展为重要的前沿技术之一。金属增材制造过程具有高温、高能量密度与高冷却速率等特点，这使得制造过程中微观凝固组织与缺陷形成规律变得复杂，成为制约金属增材制造技术深化发展与广泛应用的瓶颈问题。由于凝固缺陷的产生，只有非常有限数量的合金材料能够可靠地打印，限制了增材制造技术的推广及应用。凝固缺陷包括气孔、热裂纹、偏析等，它们可能导致零件的机械性能下降、表面质量不佳以及制造效率降低等生产问题，直接影响了产品的质量及性能，很大程度上制约了金属增材制造的应用。增材制造的凝固过程与焊接工艺类似，在熔池凝固的过程中温度梯度大，并且受到循环的热影响。在凝固过程中，初生的平衡相成分与熔融金属差距大，在固液界面附近的熔体溶质浓度高，产生成分过冷。胞状晶和树枝晶的生长在已凝固区域之间的液相在凝固过程中的体积收缩和凝固组织温度降低产生的热收缩加剧了孔隙及热裂纹

的产生。因此,探究增材制造过程中的凝固过程及微观组织演变机制并加以控制,对金属增材制造成形件的力学性能提升及缺陷控制具有重大科学与工程意义。在激光熔丝增材制造过程中,熔丝过程的熔化、凝固、对流、传热、传质等特性对成形件的凝固组织形成起决定性作用,并深刻影响后续热处理工艺与最终产品性能。随着工艺参数的改变,熔丝沉积过程中的熔化、滴落和固液界面过渡会呈现不同形态,进而改变熔池内的对流、热质输运和最终凝固组织。的超声场辅助激光熔丝沉积增材制造,该过程涉及快速凝固和超声振荡作用下的复杂的流动现象。超声场辅助在金属凝固过程中细化晶粒、消除或降低缺陷形成,而且高能超声波能影响凝固过程中的传热传质及晶体生长,从而能有效抑制气孔及热裂纹的产生,并且熔融合金可在高能超声场作用下变得更为均匀、有效分散进而减少偏析。

E04-58

基于螺旋振荡策略的线弧定向能沉积镁合金构件各向异性与力学性能研究

刘伟, 贾海龙*

吉林大学

线弧定向能沉积技术凝固速度快、热历史复杂,力学性能在行进方向和构建方向易产生强烈的各向异性。本文通过焊枪的螺旋振荡来改变沉积路径,制备了具有低各向异性且强塑性同时提升的增材构件。系统研究了螺旋振荡对线弧定向能沉积 AZ31B 镁合金构件晶粒、第二相演化和力学性能的影响。实验结果表明,无振荡构件具有层内柱状晶体和层间细晶周期交替分布的特点,螺旋振荡构件主要由等轴晶粒组成。无振荡构件中第二相的尺寸大于螺旋振荡构件。螺旋振荡构件相较于无振荡构件强度和塑性同时提升,且在行进方向和构建方向上的力学性能表现为各向同性。通过有限元模拟分析发现螺旋振荡的熔池中温度梯度更小,且在液滴内存在更多的涡流,有利于破碎柱状晶成为异质形核位点,细化晶粒,最终得到强塑性同步提升且各向异性低的线弧定向能沉积镁合金构件。

E04-59

AZ91 镁合金 IMC 生长行为与共晶组织均匀化调控

咸经纬^{1,2*}, 曾广^{2,3}, C.J. Lin², C.M. Gourlay²

1. 大连理工大学 材料科学与工程学院

2. Department of Materials, Imperial College London, UK

3. 中南大学 材料科学与工程学院

AZ91 镁合金在凝固成型过程中(常冷却速率下)会由于溶质扩散速度有限而诱发非平衡态的共晶反应,形成难控的 $Mg_{17}Al_{12}$ 共晶微观组织(体占比、尺寸、形貌和互连性),影响着合金的铸造流动性、耐腐蚀性和力学性能。本研究发现以混合式凝固路径优化、分阶段对熔体进行多级冷却的方式,在凝固过程中相变温度附近调整热处理工艺,有利于促进凝固相的反扩散。借助于直接干预相变过程,实现了从离异共晶向平衡态共晶反应转变,提出了一种重要的共晶组织解析和控制方法。此外,文章研究了不同凝固路径下初晶相金属间化合物(IMCs)的形核贯序、晶体位向关系与晶粒长大、生长孪晶形成机制、相变动力学速率测定以及晶体三维形貌调控等晶体生长行为与内在机理,发现了 $B2-Al_8Mn_5-Al_{11}Mn_4$ 之间的多层壳结构,能隔绝 Fe 元素,为提升镁合金耐蚀性能提供了新思路。

E04-60

液态 CoSb₃ 合金凝固组织调控及其热电性能研究

郭启航, 王伟丽*

西北工业大学 物理科学与技术学院

热电材料作为一种环境友好型且较为灵活的能源转换材料,近年来得到国内外学者广泛关注。以 CoSb₃ 为代表的方钴矿因其高 Seebeck 系数、高电导率以及高机械稳定性,被认为是中温区具有良好应用前景的热电材料之一。根据 Co-Sb 合金相图,按照 Co:Sb 摩尔比为 1:3 进行配比熔炼时,凝固过程中在 936℃ 时 CoSb 相和液相发生包晶反应生成 CoSb₂ 相,874℃ 时 CoSb₂ 相和液相发生包晶反应生成 CoSb₃ 相,1080℃ 时液态(a-Co)和 CoSb 相及 620℃ 时液相(Sb)和 CoSb₃ 相发生共晶反应。凝固过程中两个包晶反应不能完全

进行且由于共晶反应存在使得合金样品相组成较多, 导致合成单相 CoSb₃ 合金具有较大的难度。

采用熔融玻璃净化和等温凝固方法制备了 CoSb₃ 合金, 分别研究了在 850℃、900℃、1000℃、1178℃、1250℃ 下保温 900s 后凝固对 CoSb₃ 合金凝固组织和热电性能的影响。结果表明, 在 850℃ 下保温 900s 后进行凝固有益于液相和 CoSb₂ 相进行包晶反应, 促进了 CoSb₃ 相生成, 抑制了液相(Sb)和 CoSb₃ 相的共晶反应。对比不同保温温度发现, 在 850℃ 下具有最低的热扩散系数(700K 时, 热扩散系数为 2.57mm²/S), 然而在大于 900℃ 的保温温度下, 随着温度的升高, 热扩散系数逐渐减小。通过微观组织和相组成分析可知, 在 850℃ 下 CoSb₂、CoSb、(Sb)三种相体积分数明显降低, CoSb₃ 相成为主导相, 并且不同保温温度均有效促进了两种包晶反应, 使得(Sb)相和 CoSb 相减少, CoSb₂ 相和 CoSb₃ 相增多。此外, 在 850℃ 下合金具有最小的密度(6.52g/cm³)和最高的硬度(636.1HV), 且 Sb、CoSb、CoSb₂、CoSb₃ 四种相的硬度依次提升。

E04-61

机器学习辅助析出强化铜合金多目标性能设计与组织调控

李龙健¹, 康慧君^{1,2*}, 郭晓宇¹, 刘高傑¹, 王同敏^{1,2}

1. 大连理工大学

2. 大连理工大学宁波研究院

与传统铜合金相比, 析出强化铜具有优异的强度、导电性和延展性。合金的成分和工艺是影响合金性能的关键因素。由于对合金成分和工艺参数的巨大研究空间, 提高合金性能和设计新合金具有挑战性。本研究从各种机器学习算法中选择误差最小的算法(Extreme Gradient Boosting, XGB)来建立机器学习模型, 用于探索巨大的搜索空间。在合金设计过程中, 运用特征工程筛选主要特征, 引入工艺参数和综合性能因子, 提取满足性能的合金成分。总之, 我们建立了“成分-工艺-性能”的关系, 并通过贝叶斯优化提出了 Cu-Ni-Si 合金性能优化的材料设计策略, 获得具有优异综合性能的合金。

E04-62

免热处理 Al-Mg-Si 系铸造铝合金的组织性能研究

朱成, 郑策, 陈佳衍, 张军虎, 罗天骄, 冯小辉, 李应举*, 杨院生

中国科学院金属研究所

研究了 Mg/Si 比及微合金化元素对亚快速凝固 Al-Mg-Si 铸造铝合金组织性能的影响。结果表明: 亚快速凝固条件下, Mg/Si 比在 1.55~2.58 时对合金晶粒、SDAS 无明显影响, 合金晶粒尺寸范围为 40.65~52.54 μm、SDAS 尺寸范围为 7.83~8.10 μm。随着 Mg/Si 由 2.58 降至 1.55, Mg₂Si 相由沿晶界均匀分布的长骨骼状向集中分布的短骨骼状转变, 合金延伸率由 5.31%减小至 2.31%。固溶强化对合金强度提升发挥主导作用, 当 Mg/Si 为 1.55 时, 合金中 Mg、Si 元素的固溶度更高, 因而其强度更高, 抗拉强度为 320.6 MPa, 屈服强度为 249.9 MPa。单独添加 Cu、Zn 元素均能使分散的骨骼状 Mg₂Si 相转变为集中分布的短棒状、蠕虫状形貌。Cu、Zn 复合添加时, Zn 元素对强度和塑性的影响程度均大于 Cu 的影响, 0.5wt.%Cu 与 1.5wt.%Zn 复合添加时合金的抗拉强度、屈服强度、延伸率分别为 341.9MPa、282.6MPa、1.5%。

E04-63

激光直接能量沉积-超声滚压 316L 不锈钢组织和性能研究

刘冠

中南大学

激光定向能量沉积 (LDED) 作为一种先进的增材制造技术, 在不锈钢部件的制造中备受关注。LDED 过程的快速熔化和凝固导致气孔和柱状枝晶的出现, 从而降低了合金的强度。基于此, 开发了自行研制的 LDED-UR (超声波轧制) 同步制造设备来制备 316L 不锈钢, 并对其微观结构和力学性能进行了表征。结果表明, LDED-UR 工艺显著减小了气孔的大小和分数, 在超声波振动和辊压的共同作用下, 获得了细小的等轴晶粒。随着塑性变形的加剧, LDED-UR 样品的平均晶粒尺寸从 76.10μm 减小到 26.23μm (LDED 样品), 高角度晶界转变为低角度晶界。同时, 与 LDED 样品相比, LDED-UR 样品中的位错密度增加。由

于晶粒细化和位错强化, LDED-UR 样品的平均显微硬度、屈服强度、极限抗拉强度和伸长率分别达到 268.18 ± 13.90 HV0.2、442 MPa、771.2 MPa 和 49.8%, 高于 LDED 样品的 214.13 ± 13.76 HV0.2、396 MPa、682 MPa 和 45.5%。这意味着在 LDED 工艺下采用原位超声轧制可以获得优越的力学性能。微观结构对力学性能影响的深入研究为提高 LDED 合金的力学性能开辟了一条新途径。

E04-64

脉冲磁场调控金属材料凝固组织技术及应用

郑策, 李应举, 罗天骄, 冯小辉, 杨院生*

中国科学院金属研究所

脉冲磁场技术可有效细化金属材料凝固组织并减弱合金元素的偏析, 提高其力学性能。通过模拟仿真技术可知脉冲磁场在凝固过程中产生的电磁振荡和电磁强制对流效应, 有利于促进凝固初期的形核, 从而实现凝固组织细化和均质化, 并提高了合金的热加工能力。本文系统研究了脉冲磁场技术对高温合金模铸、铝/镁合金半连续铸造、铜合金连铸的影响规律, 并进行应用推广。

E04-65

不同冷却轧制条件对铬钴镍合金组织与性能的影响

赖奇*, 赵曦光

攀枝花学院

以 CrCoNi 合金为原料, 采用了电子束真空熔炼方法及冷轧工艺, 对 CrCoNi 合金进行熔炼并冷轧, 研究了不同冷却轧制温度对 CrCoNi 合金组织与性能的影响。实验结果发现随着轧制温度降低, 合金晶粒变细、晶界清晰, 具备了良好的微观组织结构, 并且冷轧变形不改变其面心立方结构, 还能保持材料良好力学性能。随着温度降低, 硬度呈上升趋势, 在温度为常温时, 硬度最小为 324.23HV, 在温度为 -196°C 时, 最大硬度为 426.02HV, 所以轧制温度降低, 合金的硬度升高。通过 X 射线衍射分析, 进一步证实 CrCoNi 中合金为 FCC 单相, 在冷却轧制过程会发生择优取向。根据应力-应变曲线图可知, 轧制温度降低, 合金的抗拉强度会升高, 合金强度提高, 在 -196°C 时达到最大的抗拉强度 1159MPa, 但其塑性会因为轧制温度降低而降低, 在 -196°C 条件下, 伸长率只有 11.43%。整体来看, 在温度为 -196°C 的条件下, 得到的 CrCoNi 合金综合性能最好, 具有较高的硬度和强度。

E04-66

基于机器学习的高温合金氧化行为预测模型

裴成蒿, 马庆爽, 孙林林, 高秋志*

东北大学秦皇岛分校

本研究首次提出了一种创新的混合深度学习模型, 用于预测高温合金的氧化行为。该模型融合了一维卷积神经网络 (1D-CNN) 和长短期记忆网络 (LSTM), 通过充分利用原始数据, 突破了传统的抛物线氧化规律。这种方法不仅显著提升了在不同条件下对氧化行为的预测精度, 还能有效拟合氧化动力学模型, 并精确推导出关键的动力学参数。研究结果表明, 利用先进的机器学习 (ML) 技术在准确预测和控制高温合金氧化行为方面具有显著优势, 同时也展示了其在材料科学领域广泛应用的巨大潜力。

墙报

E04-P01

Effects of Ca addition on the microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Mn alloys processed by asymmetric hot rolling

Zhenfeng Li, Hailong Jia*

Jilin University

Alloying is an effective method for improving mechanical properties of magnesium alloys by modifying

their grain sizes, precipitates, and texture. In this study, the role of Ca addition on the microstructural evolution and tensile properties of the Mg-6Mn-0.5Mn (wt%) alloy is discussed. The addition of Ca introduces a large amount of $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$ particles, which can pin boundaries to inhibit grain growth during rolling and annealing. The annealed Mg-6Mn-0.5Mn-0.3Ca alloy exhibits a high strength-ductility synergy with a yield strength (YS) of 202 MPa, an ultimate strength (UTS) of 303 MPa and a uniform elongation of 15%. The fine recrystallized grains and dense precipitates account mainly for the YS. The moderate elongation can be attributed to the weak basal texture and the enhanced activity of non-basal slips. The present work provides an effective way to fabricate Mg strips alloys with enhanced mechanical properties at room temperature by the combination of TRC, asymmetric hot rolling and annealing.

E04-P02

TiB₂ 对压铸 Al-Si 合金流动性及充型沿程组织力学性能的影响

杨卫道¹, 陈宗宁^{1,2*}

1. 大连理工大学

2. 大连理工大学宁波研究院

随着汽车轻量化需求的不断提高, 铸件正不断向大型薄壁、形状复杂的方向发展, 流动性作为评估铸件充型能力的重要参数, 是制造具有优异力学性能的大型薄壁件的关键因素。然而高压压铸下在料筒中形成的预结晶会严重恶化流动性, 超大型薄壁压铸件的力学性能存在不均匀性。本研究旨在提高高压压铸 Al-Si 合金的流动性和力学性能, 研究了 Al-6wt.%TiB₂ 细化剂对 AlSi10MnMg 合金的流动性及充型沿程组织力学性能的影响。结果表明, 添加 Al-6wt.%TiB₂ 细化剂改善了预结晶晶粒的尺寸及形貌, 从而降低了预结晶对合金流动性的影响, 增加了合金的充型距离, 并且合金流动性的提升也有助于凝固补缩, 使合金组织更加致密, 气孔减少, 间接提高铸件的力学性能。

E04-P03

晶粒细化剂对 A356.2 合金热处理后组织和力学性能的影响

周顺儿¹, 陈宗宁^{1,2*}

1. 大连理工大学

2. 大连理工大学宁波研究院

随着国家节能与环保需求的不断增强, 在汽车工业, 轻量化是一种能够有效实现节能减排目标的有效途径。A356.2 铝合金因其优异的综合力学性能, 逐步成为汽车轻量化的理想材料。在低压铸造生产 A356.2 铝合金轮毂中, 添加传统的细化剂虽然能够优化微观组织和满足特定生产所需的力学性能, 但存在合金热处理时间较长的弊端。本文以 A356.2 铝合金为基体材料, 在低压铸造条件下添加 Al-6wt.%TiB₂ 和 Al-5Ti-B 两种不同的晶粒细化剂, 调整不同的固溶和时效热处理工艺参数, 研究了两种晶粒细化剂添加下最佳的热处理条件。结果表明, 在 540℃ 的固溶温度下, 合金达到最佳的共晶组织形貌; 在 540℃ 温度下固溶 4h, 130℃ 下 3h 的预时效, 180℃ 下 2h 的终时效下, 添加两种晶粒细化剂合金都达到最优异的综合力学性能和微观组织形貌; 添加 Al-6wt.%TiB₂ 细化剂后在不损害和合金力学性能的条件下, 使合金总热处理时长缩短 1h。

E04-P04

TiB₂ 异质形核对压铸 A360 合金强度-韧性的影响

王馨玉¹, 陈宗宁^{1,2*}

1. 大连理工大学

2. 大连理工大学宁波研究院

随着汽车轻量化需求的不断发展, 铸件正不断向大型薄壁、形状复杂的方向发展, 这就要求新一代一体化压铸材料达到高强度、高韧性的目标。然而金属材料的强度和韧性通常是负相关的, 故研究金属材料强度-韧性之间的权衡关系是必要的。本文研究了 Al-2wt.%TiB₂ 细化剂对 A360 合金快速凝固行为的影响,

旨在通过优化合金微观凝固组织提高材料的强韧性。结果表明, 添加 Al-2wt.%TiB₂ 细化剂改善了合金组织形貌与尺寸, 促进了析出相的强化效果, 与压铸 A360 合金相比, 添加 Al-2wt.%TiB₂ 细化剂后合金的抗拉强度和延伸率分别为 312MPa、9.2%, 分别提升了 5.4%、80.4%。

E04-P05

NiCoCr 中熵合金凝固过程晶核形成及演变机理的模拟研究

李克凡

长安大学

本文采用分子动力学方法对 NiCoCr 中熵合金的形核机理进行了模拟研究, 采用团簇类型指数法 (CTIM), 对凝固过程不同尺度的原子团簇结构进行了识别和表征, 深入研究了临界晶核的形成和长大机理。结果表明, 凝固过程体系包含了上万种不同类型的原子团簇结构, 但其中 22 种团簇结构类型对结晶形核过程起关键性作用。在晶核的形成和长大过程, 类二十面体(ICO)团簇、类 BCC 团簇和缺陷 FCC 及缺陷 HCP 团簇在三个特征温度点 T₁ (1440 K)、T₂ (1418 K)和 T₃ (1390 K)时达到数量上的饱和, 并根据它们在数量和空间分布随温度的变化, 得到了它们在形核和长大过程相互竞争的关系。通过跟踪平行孪生晶粒形成和长大过程发现, 临界晶核是由 FCC 和 HCP 原子构成的单相结构; 平行孪生结构的形成是由 HCP-FCC 双相晶核在沿密排面逐层生长过程形成。结果还表明, CTIM 相比于其它微观结构表示方法, 能更为准确地揭示凝固过程微观结构转变特征。

E04-P06

AlN/Al 颗粒复合添加对 Mg-Gd-Y-Zn 合金显微组织与高温力学性能的影响

谢文龙, 高瑜阳, 杨鸿*, 蒋斌

重庆大学

本研究通过 AlN/Al 复合球磨与搅拌铸造工艺, 在 Mg-10Gd-3Y-1Zn 合金内成功引入了分散均匀的 AlN 颗粒, 同时研究了 AlN 颗粒对铸态和热处理态合金组织演变与 250℃ 下力学性能的影响。结果表明, AlN/Al 的复合添加使铸态合金内的 Mg₃RE 共晶相逐渐转变为层片状 LPSO 相, 并促进了 Al₂RE 与 RE-rich 相的生成, 晶粒也由 126.1μm 细化到 39.8μm。由于复合材料内的 AlN 颗粒界面存在明显的 RE、Zn 元素富集, 并且 Al₂RE 与 AlN 能作为 18R-LPSO 的有效形核位点, 因此复合材料的 LPSO 相在固溶过程中以 Al₂RE 与 AlN 颗粒为核心进行了析出与生长, 最终形成大量块状 18R-LPSO 相。分布在块状 LPSO 内部的 Al₂RE 与 AlN 颗粒能够在高温下有效阻碍裂纹的扩展, 使块状 LPSO 能够继续发挥对晶界的钉扎作用。因此在细晶强化, 热错配强化, 载荷传递强化, LPSO 相强化的综合作用下, 2AlN/Al 增强的复合材料展现最佳的高温拉伸强度, 250℃ 下合金的强度提升了 32MPa。并且由于晶粒细化以及 AlN 颗粒在高温下的协调变形, 复合材料在拉伸过程中能缓解应力集中, 因此能实现材料塑性的同步改善。

仅发表论文

E04-PO01

Research on the microstructure, texture Evolution, twin and properties of aged high vacuum die casting

Mg-4Al-4RE-0.3Mn alloy

Yongfeng Li, ang zhang*

Chongqing University

This paper investigates the microstructure and properties of a high-vacuum die-cast Mg-4Al-4RE-0.3Mn (Wt%) (HVDC-AE44-2) magnesium alloy before and after aging treatment, using non in-situ EBSD technique to study the evolution of twinning and texture during axial hot compression and hot tensile deformation after aging. The results show that the precipitation of Al-Mn phase in the HVDC-AE44-2 alloy after aging can effectively hinder dislocation slip, leading to optimal comprehensive performance after aging at 150℃ for 16 hours. After aging, during medium-temperature axial compression and tensile deformation, a strong {0001} basal texture is

exhibited. As the distance from the fracture increases, distinct texture concentration points appear on the {10-10} and {11-20} planes, with an increase in texture intensity on these planes. When the alloy is compressed axially at medium temperature, coarse grains initially produce a large number of {10-12} tension twins and a small number of {10-10} compression twins. Additionally, the average Schmidt factor (SF) of {10-12} tension twins is lower than that of {10-11} compression twins and {10-12}-{10-12} double twins, indicating that compression twins and double twins are more prone to slip once they are activated.

E04-PO02

Ca 对 WE43 镁合金热裂倾向性的影响

郭鑫, 宋江凤*

重庆大学材料科学与工程学院

本课题系统地研究了 Ca 对 WE43 合金热裂倾向性 (HTS) 的影响, 结果表明添加 Ca 后 HTS 显著降低。使用 Micro-CT 系统量化了 WE43-xCa 合金 ($x=0, 0.5, 1.0$ 和 $2.0 \text{ wt.}\%$) 的热裂纹体积, 并作为 HTS 大小的指标。WE43-2.0Ca 合金的 HTS 最低, 这与大量 Mg_2Ca 相的析出有关。这不仅增强了凝固枝晶冶金桥接强度, 还促进了稀土共晶的富集。WE43 合金的 HTS 最高, 这是因为残余液相分数较低, 且存在不可避免的 Y_2O_3 夹杂。优先生成的 Y_2O_3 会大范围破坏共晶补缩通道, 从而阻碍裂纹愈合。此外, Ca 的添加细化了合金晶粒尺寸, 降低了合金的脆弱温度区间, 减小了单位晶界上的收缩应变, 降低了 WE43-xCa 合金的 HTS。此外, 还研究了 WE43-2.0Ca 合金愈合区第二相平面界面的独特形态, 并推断了其形成和对 THS 影响。

E04-PO03

Effect of Coupling Low-Flow Pouring with Inoculation on the As-Cast Microstructure of 7055 Alloys

Dong Li, Yanfeng Han*, Jiao Zhang

Shanghai Jiao Tong University

Achieving uniform grain size in ingots is challenging in traditional direct chill (DC) casting. The thermal conditions during solidification often result in smaller grain size at the edge of the ingot compared to the center, leading to grain size inhomogeneity even in centimeter-scale samples. In this study, a low-flow pouring technique with the addition of grain refiner is employed to create similar thermal conditions from the edge to the center of the ingot during solidification, resulting in a homogeneous ingot. The grain size at the center of the prepared ingot consistently matches it at the edge. Finite element analysis confirms that low-flow pouring provides suitable thermal conditions for ensuring homogenous grains. Additionally, based on experimental results, a novel analytical model is proposed to precisely identify all active nucleation substrates. The grain size predicted by the proposed model aligns well with the experimental results, outperforming previous models. Our experimental and analytical results provide valuable guidance for the production of homogeneous ingots on an industrial scale.