

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

E10-材料结构与性能表征技术
E10-Advanced Characterization
Technologies of Material Structure and
Properties

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



E10. 材料结构与性能表征技术

分会主席：刘文胜、单智伟、林元华、李金山、李秀艳、董超芳

E10-01

锰含量对高纯净 AZ31 镁合金腐蚀性能的影响及其机理研究

单智伟¹

1. 西安交通大学

E10-02

金属结构材料强韧化及失效行为的电子显微学研究

宋淼¹, 陈家轩¹, 李丹¹, 耿赵文^{1,2}, 周科朝¹

1. 中南大学

2. 香港城市大学

随着高端装备的快速发展,金属材料在服役过程中的安全性、可靠性及使用寿命面临越来越严苛的要求。深入阐明其在制备、加工及服役过程中的微观组织结构演化行为,是理解金属结构材料强韧化机制与失效本质的核心科学问题,对于实现材料的优化设计与性能提升具有重要的理论价值和工程意义。基于电子显微技术,系统探究了低密度奥氏体高熵钢在低温拉伸变形过程中的位错与第二相的交互作用行为,揭示了位错切割硬脆 B2 相颗粒的强韧化机理;此外,采用原位 TEM 摩擦磨损、原位拉伸、准原位疲劳等先进实验表征方法,深入研究了高熵合金、钛合金等严重塑性变形区域的介微观组织结构演化机理及裂纹的形核与扩展行为,阐明了变形诱导组织演化与裂纹行为之间的跨尺度耦合关系。相关成果有望为金属材料的强韧化设计与失效机理分析提供了坚实的理论依据和技术支撑。

E10-03

声子结构测量及热特性:从界面单位错到非均匀应变

杜进隆¹, 李跃辉¹, 韩博¹, 毛瑞麟¹, 杨林¹, 高鹏*¹

1. 北京大学

作为晶格振动的元激发,声子是决定物质热导率的关键因素。晶格变化对应的应变效应,必然影响局部的声子模式,从而改变热传导性质。在半导体器件工艺中,广泛涉及到在晶格不匹配的衬底上生长外延薄膜如 Si/SiGe 等,从而不可能避免地会引入应变进一步影响局部的热导率。如何解耦界面位错应力和元素扩散对界面声子结构的影响,对于界面声子热传输特性的理解具有重要意义。

我们利用扫描透射电子显微镜电子能量损失谱(STEM-EELS)直接测量了硅/锗界面上单个位错的原子尺度局部声子,并将其与局部微结构相关联,揭示了位错对局部热传输特性的影响,结果表明,位错会在核心约 2~4 纳米的范围内引起数毫电子伏特的声子信号重移,其中应变场和锗偏析都起了作用。位错的存在既可以导致局部界面热导增强,也可以导致其减弱,这主要取决于界面位错处晶格失序(位错)和元素失序(异质界面和 Ge 偏析)之间复杂的相互作用和竞争。

为了进一步揭示非均匀应变对材料声子结构和热导率的影响,通过在自主设计的微器件上制备弯曲的单晶硅纳米带来引入非均匀应变并测量了其对硅纳米带热输运性能的影响。结果表明,每纳米 0.112% 的应变梯度可导致单晶硅热导率急剧降低 $34 \pm 5\%$,这一数值是均匀应变下的 3 倍以上。利用扫描透射电子显微镜电子能量损失谱在纳米尺度上对硅纳米带声子结构进行测量,结果表明弯曲单晶硅纳米带中压应力引起横向光学(TO)声子模式蓝移,拉应力引起其红移,而横向声学(TA)声子模式则表现出相反的趋势,从而引起整个声子谱的展宽。结合第一性原理计算,结果表明,弯曲引起的晶格应变梯度的确显著改变了声子的振动态造成声子色散展宽。这种展宽效应增强了多声子散射,缩短了声子寿命,最终抑制了单晶硅纳米带热导率。

本研究发现对于纳米材料、界面器件的热管理,以及热电材料、热开关器件的设计都具有重要意义。

具有原子分辨的电镜非弹性散射谱学技术可以为纳米埃米尺度的热输运行为研究提供新的手段。

E10-04

原子分辨微结构分析的技术前沿：超分辨 4D-STEM 叠层成像

于荣¹

1. 清华大学

“材料的微观结构决定性能”是材料科学的核心范式。透射电镜作为集成像、衍射、谱学于一身的高端科学仪器，是材料微观结构分析的核心工具。电子显微学方法的每一次进展，都加深了人们对材料微观结构与性能的理解，促进了材料科学的发展。

上世纪末期实现的像差校正技术突破了限制电镜分辨率的主要障碍，将电镜的点分辨率提高到了亚埃尺度，将原子位置的测量精度也提高到了约 5 pm，从而在材料表面、界面、位错、析出相、铁电畴等微结构的定量研究中获得了广泛应用，目前仍然方兴未艾，逐渐成为电镜实验室的标配。然而，即使对于像差校正电镜，在原子尺度分析材料微观结构时仍然存在残余像差、带轴偏离、表面损伤、辐照损伤等难题。

近年来，超分辨叠层成像作为一种基于扫描透射电镜中像素化探测器数据（也称 4D-STEM）的计算成像方法，不仅具备准三维成像能力，更在空间分辨率、位置精度和剂量效率等关键性能指标上超越了像差校正电镜的 HAADF、ABF、iDPC 等传统技术，成为原子分辨结构分析领域的前沿技术。

我们将分别以 Al 中的间隙原子团簇、SrTiO₃ 中的极性涡旋、Si 中的重构原子链等前所未见的微结构单元，介绍超分辨方法在金属、陶瓷、半导体等材料体系中的应用。这些新结构的发现突破了人们对经典材料的认知惯性，为构建结构与性能的新型关联机制提供了关键切入点。

E10-05

反铁电氧化物负球差显微结构相变与储能机理研究

魏现奎¹

1. 厦门大学化学化工学院

近年来，诸如锆酸铅（PbZrO₃）之类的反铁电氧化物因其在静电储能、机电响应、电热效应和热开关等方面的优异性能而备受关注。从本质上讲，这些出色的物理响应得益于其独特的反铁电-铁电（AFE-FE）相变。尽管可以通过 X 射线衍射（XRD）、压电力显微镜等确定相变后材料的结构特征，但时间分辨方面的相变路径却鲜少得到研究。一个重要原因在于相变时间（≤1 毫秒）与仪器检测时间（几秒甚至几分钟）之间存在巨大差异。与此同时，为进一步提升材料的储能密度，目前也急需新型反铁电材料体系的开发。本次报告中，我将着重汇报利用时间和原子分辨负球差（NCS）TEM 成像技术研究反铁电 PbZrO₃ 的原位结构相变过程。研究发现照明电子束可同时用于激发和表征材料的结构变化过程。通过追踪铅（Pb）离子位移和氧八面体的动态演化，我们发现了一种以摆线极化序为特征的新型铁旋（FD-Ferrodistorive）中间相。伴随体积的变化，研究揭示了从反铁电正交相 @ 铁旋正交相 @ 铁电单斜相 @ 铁电菱方相的相变过程[1]。当在 PbZrO₃ 薄片样品中引入 Pb-O 空位后，时间及原子分辨 TEM 研究揭示了由点缺陷诱导的晶胞级能量储能路径、以及静电能以带电铁旋畴壁的出现实现存储的中间过程 [2]。此外，我们还意外地在钽酸镱（DyScO₃）中发现了厚度梯度诱导的逆尺寸标度铁电性，即极化强度随着样品厚度的减小而增加的行为[3]。这些结果通过二次谐波发生（SHG）、压电力显微镜（PFM）和第一性原理计算得到了证实。从本质上讲，这种相变归因于表面电荷转移诱导的铁旋性氧八面体畸变以及 Dy-Dy 离子的非对称劈裂。这些发现为理解静电储能机制以及探索具有更高储能性能的反铁电材料提供了全新的视角。

E10-06

一些 COFs 和 MOFs 材料的透射电镜观察

梁超伦¹

1. 中山大学分析测试中心

低剂量显微术是揭示电子敏感材料结构与性能内在关联的重要手段。多孔 COFs, MOFs 及其复合物在透射电镜下极易受辐照损伤, 难以获得结构信息。该报告主要介绍均孔晶态聚合物膜(J. Am. Chem. Soc., 2022, 144, 7, 3233; J. Am. Chem. Soc. 2023, 145, 22079; Nature, 2024, 630, 878) 及部分 MOFs 结构(Angew. Chem. Int. Ed, 2024)的低剂量成像技术。通过信噪比和电子剂量阈值的优化组合, 在有限成像时长内, 观察并分析了部分 COFs 和 MOFs 材料的结构特征。

本文将结构设计和原位分析技术结合, 充分揭示界面工程及纳米结构的结构优势, 并为应用先进的表征技术指导电极材料设计优化提供重要参考。

E10-07

卤化物钙钛矿光伏材料与器件的低剂量扫描透射电镜研究

蔡嵩骅^{*1}, 段甜伟², 王威振¹, 周圆圆²

1. 香港理工大学
2. 香港科技大学

卤化物钙钛矿不仅具有优异的光-电特性, 同时合成简便, 有望大幅降低太阳能电池的成本。然而, 受限于卤化物钙钛矿对环境因素的敏感性, 钙钛矿太阳能电池的使用寿命相比硅太阳能电池还存在较大差距。因此, 有必要深入了解卤化物钙钛矿不稳定性的结构来源。尽管先进透射电镜可以揭示原子尺度的结构信息, 但卤化物钙钛矿在高能电子束下的不稳定性使得相关研究依然面临挑战。为提高卤化物钙钛矿对电子束辐照的耐受能力, 我们通过沉积超薄碳膜对聚焦离子束制备的钙钛矿太阳能电池截面样品进行了后保护处理。结合低剂量成像, 我们揭示了卤化物钙钛矿晶粒内部存在的组分界面, 堆垛层错界面和孪晶界面的原子结构及潜在电子特性。为了研究卤化物钙钛矿在外界刺激下的结构演化过程, 我们开发了原位光照透射电镜测试平台, 实现了对卤化物钙钛矿在光照下降解过程的原位透射电镜观察。

溶液法制备的卤化物钙钛矿晶粒中难以避免存在较多的杂相纳米颗粒。我们发现合适条件的电子束辐照可以有效修复钙钛矿晶粒内部的碘化铅等纳米尺度杂相, 并基于杂相缺陷界面的原子结构计算了相关反应势垒。基于这一独特的自修复现象, 我们开发了利用激光扫描消除杂相并优化器件性能的方案。此外, 我们对不同合成方式的 2D/3D 钙钛矿异质结的界面结构进行了系统表征, 通过引入有机分子中间层对 2D 钙钛矿钝化层的覆盖率、取向与厚度均匀性、相纯度等特性进行了优化, 并抑制了对 2D 钙钛矿生成过程中对 3D 钙钛矿表面的侵蚀。基于改进后的钝化层界面结构, 太阳能电池器件的效率与稳定性均获得了显著提升。

E10-08

多片层电子叠层衍射成像揭示金属氢化物中氢原子空间非均匀性与原子位置偏移

李鹏程^{1,2}, 潘政麟², 董泽昊³, 苏钺雄⁴, 刘涛², 谷林², 陈震^{*1}

1. 中国科学院物理研究所
2. 清华大学材料学院, 北京电子显微镜中心
3. 清华大学物理系, 低维量子物理全国重点实验室
4. 西安交通大学, 核科学与技术学院

氢在功能材料中的原子尺度行为研究需精准解析其三维分布, 然而传统电子显微技术受限于氢的弱散射特性及深度分辨能力不足。本研究采用能量过滤多片层电子叠层衍射成像技术(EFMEP), 首次在 TiZrHfMoNb 多主元合金氢化物中实现氢原子的三维成像。基于 EFMEP 技术, 我们直接观测到四面体间隙位的氢原子, 并通过深度切片分析揭示其三维空间非均匀分布与晶格畸变现象。藉此方法, 进一步完成氢含量定量测定, 并实现氢-金属键长的皮米级精度测量——上述能力均超越 ABF/iDPC 等传统技术的极限。本工作确立了 EFMEP 作为研究化学成分复杂材料中的轻元素的稳健方案, 对氢存储材料性能优化具有重要的原子尺度指导价值。

E10-09**高温高速碰磨测试技术及其在涂层服役性能研究中的应用**刘建明¹, 于月光^{*1}

1. 北矿新材料科技有限公司

热喷涂封严涂层用于减小转子与静子的径向间隙, 对先进发动机提高效率、降低油耗、延长服役寿命具有重要意义。封严涂层在高温高速(室温~1200℃、150~450m/s)条件下与转子叶片叶尖等碰磨服役, 其可磨耗性是核心服役性能。该性能评价难, 以往仅能依赖发动机试车考核, 成本高昂、风险大。矿冶科技集团有限公司研制成功了国内唯一的能满足最高温度 1200℃、最高线速度 450m/s 要求的高温超高速可磨耗试验机, 利用该技术系统研究了封严涂层可磨耗性, 建立了涂层性能评价方法, 揭示了涂层磨耗机理, 并将该极端工况测试技术推广应用于其他高温高速服役材料的测试评价。

E10-10**陶瓷材料高温和超高温弹性模量测试技术及应用**万德田¹

1. 中国建筑材料科学研究总院有限公司

陶瓷极限应变很小, 在 1000-2200℃高温环境下陶瓷材料应变测量极为困难。针对脆性陶瓷材料在高温及超高温下弹性模量的评价难题和挑战, 基于相对法原理, 通过纵向比较或横向比较的方法获取材料受力过程中的真实变形, 从而获得陶瓷和陶瓷涂层的高温弹性模量。以典型的氧化铝陶瓷、C/SiC/ZrB₂ 复合陶瓷以及涂层等为研究对象, 试验结果表明该方法准确有效, 在室温下测试结果与常规测试方法的结果基本相同, 在高温及超高温等极端环境下为脆性材料弹性模量评价提供了一种简便可靠的测试方法, 将其制订成国际和国内标准。同时介绍了陶瓷高通量力学性能快速表征技术和设备研制的难点, 展望了相对法技术的潜在应用。

E10-11**基于纳米压痕测试的 ITO 导电玻璃力学性能测试表征方法研究**王赵鑫¹, 赵宏伟^{*2}1. 山东大学
2. 吉林大学

为提高并确保氧化铟锡(ITO)薄膜的使用性能和微加工工艺, 对基底无关力学性能的测试精度提出了更高要求。本研究提出了一种新型纳米压痕测试表征法, 用于评估玻璃基底上沉积态 ITO 薄膜的力学性能。为验证该方法的可重复性和可扩展性, 对采用不同制备工艺的超薄 ITO 薄膜进行了大量纳米压痕实验。基于锥形压头几何函数下薄膜与基底的平均应力积分及 Sneddon 模型, 同时评估了 ITO 薄膜和玻璃基底的杨氏模量。此外, 结合简化的 Song-Pharr 模型, 对薄膜模量的权重因子进行了修正。在已知薄膜厚度的假设条件下, 商用 ITO 薄膜和玻璃基底的典型估算值分别为 146 GPa 和 70.93 GPa。ITO 薄膜模量估算值与参考值吻合良好——在 300℃和 450℃退火温度下, 计算误差分别为~5.42%和~2.07%。进一步通过残余压痕的微观结构观察, 探讨了该方法的估算误差与技术优势。

E10-12**原位压痕测试技术与表征方法**王顺博^{*1}, 李先柯¹, 赵宏伟²1. 吉林大学
2. 中国矿业大学

微纳米压痕测试技术可有效测试材料特定微区的硬度、弹性模量等力学性能，为进一步表征压痕过程中材料出现的裂纹、塑性流动等行为，常采用扫描电镜下压痕测试技术进行原位表征，然而现有原位压痕测试技术难以直接获取更受关注的材料亚表面以及与压头直接接触区域的变形行为。本报告拟汇报两种基于自研测试仪器的原位压痕测试技术，对典型涂层材料变温作用下亚表面与界面的失效行为，以及对典型半导体材料压痕区域应力演化与相变行为进行直接观测。

E10-13

氧缺陷结构及其对镍基高温超导性能的影响

陈震¹

1. 中国科学院物理研究所

透射电子显微学技术是研究材料原子结构的主要手段之一，但是对于轻元素例如氧元素的探测，受限于其对高能电子弱的散射能力，无法实现精确和定量测量。在该报告中，我将展示我们近年来开发的基于四维扫描透射电子显微术(4D-STEM)的电子叠层成像技术，并展示其在轻元素原子分辨图像和三维结构解析方面的巨大优势。我将重点展示我们在第二个超越液氮温区的镍基超导材料中氧缺陷结构的直接成像和原子尺度成分定量。同时结合单电子计数的电子能量损失谱，将氧缺陷和空穴浓度直接关联起来。通过结构和输运测量的关联和调控，我们也成功构建了氧缺陷结构和镍氧化物中超导电性的关联。我将展望这类定量高分辨率成像技术在不同材料体系中的应用结果。

E10-14

晶粒双峰分布提升固态电解质临界电流密度与循环稳定性

陈凯*¹, 沈昊¹, 贾占辉¹

1. 西安交通大学

固态锂金属电池具有能量密度高、安全性好等优势，引领着下一代储能电池体系的发展。石榴石型固态电解质以其高离子电导率、高化学稳定性和宽电压窗口而备受关注，但由于锂枝晶生长问题，只能在相当低的电流密度下稳定运行，严重限制了石榴石型全固态锂金属电池的应用。因此，本研究协同考虑机械穿刺（Mechanical penetration mechanism）和输运促进（Transport-facilitated mechanism）这两种锂枝晶刺穿固态电解质导致电池失效的机理，针对性提出“迂回与缓冲”（Detour and Buffer）的应对策略，并采取颗粒级配的方法设计制备了晶粒尺寸双峰分布的固态电解质来实现此目的。这种晶粒尺寸双峰分布的微观结构，平均粒径约 5 μm 的细晶粒包围着粗晶粒（平均粒径 50-60 μm ），锂渗透的驱动力被高密度晶界和细小分布的孔隙不断消耗；同时，大晶粒能够有效增加锂枝晶生长路径的曲折性，从而有效抑制与延缓固态电解质的失效。通过这种双峰分布的固态电解质，协同发挥粗晶与细晶的优势，实现了“迂回与缓冲”效应。在不对界面进行任何额外修饰的情况下，具有双峰微结构的锂镧锆氧固态电解质可在电流密度高于 1 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的条件下稳定循环 2000 多个小时，并可在电流密度为 2 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的条件下成功循环 100 小时以上。

E10-15

国仪量子扫描电镜多技术联用及应用进展

郑健萍¹

1. 国仪量子（合肥）技术有限公司

E10-16

原位表征技术在电极材料中的应用

崔洁*¹, 胡仁宗¹, 杨贤锋¹

1. 华南理工大学

纳米结构工程以及界面工程被广泛认为是提高材料电化学性能的有效途径，在原位表征技术的助力下，可以确定更合理的纳米结构材料设计。

针对锂离子电池负极材料 (SnO_2) 转化和合金化反应转换反应的可逆性较差、低可逆容量和较差的循环稳定性等问题，本文通过精心设计 $\text{SnO}_2\text{-Mo}$ 的界面结构，制备了多层 $\text{Mo/SnO}_2\text{/Mo}$ 薄膜电极材料，实现了突破性的综合性能，为确定界面结构与性能关系，结合原位 TEM 等表征技术及理论计算证实 SnO_2 和 Mo 之间的氧原子再分配导致的非晶态 $\text{SnO}_2\text{/Mo}$ 界面能够精确地调节多层膜的可逆容量和循环稳定性，而电极的稳定容量随界面密度呈抛物线分布，氧在 $\text{SnO}_2\text{/Mo}$ 异质界面中的重分布通过诱导内建电场促进了 Li 离子输运动力学及 SnO_2 反应的可逆性。

针对钾离子 Sb 基负极材料，本文设计了具有核壳结构 Sb@C 纳米盒嵌入的碳纳米纤维 (Sb@CNFs)，通过原位 TEM 观察到核壳结构能够有效缓解合金化过程中的体积膨胀，证实由层状核壳结构单元组成的 Sb 基纳米纤维能够大改进钾离子电池负极性能。针对钾离子 Bi 基负极材料，本文设计了具有 Bi-O-C 键耦合和内部空隙空间的二维铋@氮掺杂碳片材料，结合原位 TEM 观察可视化了实时钾化/去钾化过程，证明空隙空间和塑性碳壳可以有效缓解剧烈的体积变化并有力地保持结构完整性。针对 $\text{SbxBi}_{1-x}\text{@NC}$ 复合电极材料，本文通过原位 XRD 和原位 TEM 观察确认了该复合体系的合金的钾化以及去钾化结构演变过程，确认合金纳米棒在循环过程中的膨胀和碳层的约束和缓冲过程。

本文将结构设计和原位分析技术结合，充分揭示界面工程及纳米结构的结构优势，并为应用先进的表征技术指导电极材料设计优化提供重要参考。

E10-17

薄膜材料在毫米波频段的介电表征方法和响应机制研究

邓晨光¹，王思旭¹，马云鹏¹，李千*¹

1. 清华大学

随着通信技术的快速演进，微波光子学等新兴技术也实现了迅速发展。作为构建下一代信息系统的关键支撑平台，微波光子技术对电光调制器和微波移相等核心器件提出了更高的性能要求，进而对材料性能及其高频响应特性带来了挑战。在此背景下，发展能够在 GHz 至亚太赫兹频率范围内准确表征材料介电特性的技术，已成为推动器件设计、材料优化和物理机制理解的核心环节。

传统的材料表征方法主要集中于低频 ($<1\text{ GHz}$) 或静态响应，缺乏对材料在高频场激励下介电行为的有效表征手段，进而限制了对高频极化动力学过程的深入理解。在本研究中，我们建立了一种基于共面波导结构的高频介电表征方法，通过 1–110 GHz 范围内的传输参数测量，结合电场有限元仿真，提取薄膜材料的复介电常数。基于该方法，我们系统测量了包括模板生长的 BaTiO_3 以及 $\text{PbTiO}_3\text{/SrTiO}_3$ 超晶格在内的多种铁电薄膜材料的高频复介电常数。进一步结合介电物理模型拟合，我们明确了材料介电响应行为在频率、偏置电场以及极化结构类型等因素作用下的演化规律。通过提取材料的介电弛豫时间等关键动力学参数，揭示了电场驱动下极化旋转与畴壁运动等主导介电调谐机制。

本工作突显了高频介电表征技术在材料体系优化与物理机制探索中的价值。这一表征技术即能为高频电光和微波器件的设计提供关键材料参数支撑，也能加深对毫米波频段下铁电极化动力学的理解，为实现材料高频性能的进一步提升奠定了基础。

E10-18

自掺杂复合钙钛矿微波介质陶瓷有序畴结构演变机理的 iDPC-STEM 研究

傅茂森¹，刘洋洋¹，张琳¹，党楠¹，马晓¹

1. 西北工业大学

钙钛矿微波介质陶瓷是微波谐振器、滤波器、天线等微波通讯核心元件的关键材料。离子有序能够显著降低微波介质陶瓷的介电损耗，但其作用机制仍缺乏认识。本研究基于经典 B 位 1:2 有序 $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 复合钙钛矿陶瓷体系，探索 B 位离子自掺杂对其离子有序度、有序畴界面及微波介电

性能的影响规律和调控机制。实验发现，化学计量的 $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 陶瓷中存在 B 位 Mg^{2+} 、 Nb^{5+} 非离子配位混排现象，降低了材料的离子有序度。通过设计 B 位离子自掺杂，离子有序度随 Mg^{2+} 、 Nb^{5+} 增加呈现先增后减的变化趋势，最大值为 0.76；同时，伴随有序度的变化，陶瓷内部形成了大量有序畴。HAADF-STEM 表征发现，离子有序过程中晶体学对称性的降低导致有序畴呈现反相畴(APB)或孪生畴特征，且在部分畴界面处形成了离子混排过渡区。进一步结合 iDPC-STEM 研究发现离子混排过渡区内 Mg-O 键、Nb-O 键的键长与 1:2 有序畴内部不同，导致了严重的八面体扭转。值得注意的是，B 位 1:2 阳离子有序状态显著降低了陶瓷的介电损耗，并与有序度的变化呈现一致的趋势。这些结果揭示了钙钛矿微波陶瓷有序结构与介电性能调控机制之间的内在关联，并为开发新型高性能钙钛矿基微波介质陶瓷提供了理论指导和设计参考。

E10-19

先进电子显微学表征与材料构效关系的解析

余倩¹

1. 浙江大学

结合多尺度和三维的缺陷结构表征，以及多场耦合下的原位表征技术，我们实现了对材料缺陷结构和缺陷运动，及其对材料性能影响的新认识；同时，通过对外场作用下材料中的多尺度结构演化及材料性能变化进行同步的表征，大力推进了材料中准确构效关系的建立。本次报告将以位错结构的动态演化作为主题，汇报其相关的原位电镜研究。

E10-20

超越成像：三维原子探针层析技术在微观结构表征与分析中的作用

倪释凌¹

1. 华南理工大学

三维原子探针（APT）是一种前沿技术，结合近原子分辨率与三维纳米级化学分析，在纳米尺度上深入观察材料的微观结构。报告简明研讨概述 APT 的原理、样品制备、材料分析和高级数据技术。报告涵盖了 APT 的基础知识，包括场蒸发和双束聚焦离子束（FIB）样品制备。介绍了多种不同材料实现高分辨率下三维成像及其样品制备的方法。探讨运用 APT 表征方法在不同的材料中晶体结构和导电性对分析结果产生怎样的影响。同时也重点介绍了如何优化不同材料中 APT 的分析方法。报告进一步探讨了高级 APT 数据重构、校准和分析方法。介绍了重构算法、校准重构对精确反应真实情况的重要性以及怎样对化学成分分析中的误差进行修正。报告还介绍了针对沉淀物的表征如二维浓度映射和三维空间分布映射分析（SDM）等分析表征方法。报告介绍了基础的 APT 知识，强调了 APT 在材料科学中的重要性，开辟了材料科学基础研究的创新前景。

E10-21

高性能耐候钢的耐蚀机理的原子尺度探索

刘晓欢¹，沙刚*¹

1. 南京理工大学

耐候钢以其低合金元素含量及在特殊大气腐蚀环境下的优异耐蚀能力，在交通、运输、桥梁及建筑领域有极其重要的应用。精准掌握耐候钢在大气环境下腐蚀机理，明确各合金元素在腐蚀过程中的作用，对于耐候钢的成分设计和耐蚀能的调控及优化有着重要的理论指导意义。然而，由于在交替变化的大气环境下钢的腐蚀过程的复杂性，常规腐蚀研究技术手段和方法，如电化学测量，减/增重测量，和常规组织结构观察，难于实现在腐蚀机理认识上的突破。对于腐蚀产物的研究，缺乏对其精细微观结构成分信息的全面掌握，更缺乏对影响腐蚀发展的关键微观结构的深入研究和认识。这些问题的存在制约了我们对耐候机理

的精准把握。本报告将介绍我们利用三维原子探针技术与 TEM 分析技术相结合的研究技术手段,对含 Sb 耐候钢在富 S 大气腐蚀环境下不同阶段腐蚀产物开展的综合系统研究,以及在耐候机理认识上取得的新进展。通过识别腐蚀表面膜中影响腐蚀动力学的关键组织结构,并对其开展了原子尺度精细成分研究,准确地揭示关键元素 Cr, Sb, Cu, Si 和 P 在腐蚀产物中关键组织中的分布。首次发现,关键元素在腐蚀关键结构的富集是捕获 O 和 S 等腐蚀性元素的关键,进而有效地阻碍 S 向钢基体的扩散,抑制腐蚀的发展。本研究表明,控制关键元素到腐蚀产物的关键结构位置是耐候钢实现高耐候性能的关键。该研究发现,为耐候钢成分设计和耐蚀性能提高提供了明确的技术路径。

E10-22

典型不锈钢应力腐蚀微观特征与机理分析

刘智勇^{*1}, 孙宝壮¹, 潘悦¹, 李晓刚¹

1. 北京科技大学

不锈钢是诸多工业领域与基础设施关键结构与器件的主要材料,应力腐蚀开裂(SCC)是其服役安全性与可靠性的主要威胁之一。由于 SCC 机理研究困难、规律复杂和服役工况的多样性等原因,SCC 长期以来一直难以得到有效控制,受到工业界和学术界的广泛关注。本报告汇总了报告人课题组在典型不锈钢 SCC 机理微观表征与理论模型研究等方面的进展。研究发现,典型不锈钢的 SCC 行为规律均符合非稳态电化学理论模型,其腐蚀断裂机制均为阳极溶解和氢脆的混合机制控制。同时,不锈钢因冷变形、敏化和热处理等过程导致的各类析出相和变形组织对应力腐蚀萌生有重要影响,研究揭示了其精细作用规律与机制。这些研究不仅有助于增进对不锈钢应力腐蚀机理的认识,还能为防控应力腐蚀和优化其耐蚀性提供参考,具有重要科学意义和实用价值。

E10-23

A319 合金的压致微结构及其强-蚀平衡特性表征

方宁^{*1,2}, 朱冬冬¹, 魏尊杰²

1. 台州学院

2. 哈尔滨工业大学

采用 GPa 级超高压打破 A319 合金中共晶 Si 生长的平衡状态并构建高密度纳米 Si 沉淀相的亚稳析出环境,实现合金 Si 元素存在形式的双重正向调控。结果表明:随着压力的升高, α -Al 相的分枝倾向逐渐减弱,共晶 Si 出现层片状至珊瑚状的形态转变。在 5GPa 压力下,合金中生成了多层级共晶结构,在 6GPa 压力下可得到超饱和完全固溶体合金。合金经固溶时效处理后,基体中主要生成 θ' 相,经第一性原理计算可知 Si 元素倾向于取代 θ' 相内部原子从而偏析在 Al/ θ' 界面处,起到降低界面应力的作用。合金经直接时效处理后,基体中生成了细密且平行于 {100} Al 面生长的非常规纳米 Si 沉淀相,经三维原子探针(3D-APT)分析可知 Si 相内部富集 Mg 元素,其与基体界面处存在 Cu 元素偏析。6 GPa 压力下制备的合金在时效处理后硬度达到 259.6 HV,压缩强度达到 1161.8 MPa,具有强度高、耐蚀性能好的最佳综合性能。

E10-24

材料表面不均匀性及局部腐蚀的电化学扫描微探针研究

林昌健¹

1. 厦门大学

金属材料表面的不均匀性普遍存在,由此可诱发各种局部腐蚀,对材料的性能扮演着关键的作用。传统的腐蚀电化学测试技术缺乏空间分辨能力,难以对材料表面不均匀性及局部腐蚀开展深入研究,目前,具有空间分辨的腐蚀电化学方法及检/监测仪器已成为当前一个研究热点及科学前沿。本报告主要介绍多种复合型电化学扫描微探针及与扫描隧道显微镜有机结合的扫描电化学工作站科学仪器,首先提出金属表面

隧道电流与微区腐蚀电化学信号联合测量的新原理,研制成功可同时检测表面结构形貌信息、微区腐蚀电化学行为及表面液层中 pH 和 Cl⁻离子浓度分布的扫描微探针,建立了基于电化学扫描隧道显微镜(ECSTM)开放平台的扫描腐蚀电化学工作站,大幅度提高微区腐蚀电化学测量的空间分辨率和灵敏度,实现了表面微区腐蚀电化学性能参数(包括微区电位分布、微区电流密度分布及微区电化学阻抗分布等)、表面微观结构形貌及界面微化学环境的同时测量和关联研究,可望成为一种研究材料表面不均匀性及局部腐蚀行为的有力工具。

E10-25

聚合物材料老化全生命周期分析方法研究

吕超¹

1. 北京化工大学/郑州大学

聚合物老化现象会导致聚合物结构劣化、形态分解、功能失效,发生灾难性事故。因此,对聚合物老化过程全生命周期评价是保证聚合物材料安全稳定使用的关键。我们基于聚合物材料老化不同阶段的特征,采用不同的分析评价方法,实现了对聚合物老化全生命周期分析。首先,针对聚合物老化初期产生的官能团,采用荧光分子靶向识别成像的方法,实现了对聚合物老化早期的高灵敏鉴定和三维成像分析,通过多维度动力学实现了对聚合物老化三维体积定量分析,为寿命预测提供依据。第二,采用非等温化学发光动力学对聚合物老化过程进行实时追踪,通过反应速率常数及反应活化能获得聚合物老化不同路径,进而调控老化路径,最后简单介绍聚合物老化早期荧光分析工业化及在文物保护材料劣化监测中等方面的应用。以上工作为评价聚合物材料性能及使用寿命提供了有力支持,为深入聚合物老化机理认识、设计高性能聚合物材料提供了理论依据。

E10-26

风电叶片防护涂层雨蚀性能测试设备及试验方法

范国栋¹

1. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所厦门材料研究院

目前风电叶片越来越趋于大型化,叶尖在高速旋转过程中,雨滴等颗粒极易造成前缘防护材料表面疲劳损伤积累而发生破坏,导致发电效率的降低。为了更便捷地研究高速旋转物体的耐雨蚀性能和损伤过程,耐雨蚀加速模拟试验装置的研发和应用受到行业的极大重视。本报告介绍了雨蚀设备的现状、雨蚀机理,以及本单位雨蚀试验装置的研制和性能评价等几个方面内容。为了客观、真实的评价海上风电叶尖耐侵蚀材料环境适应性,快速对比分析和筛选防护材料技术体系和产品类型,提高风电叶片防护材料服役期效提供技术借鉴。

E10-27

复相多元超高温碳化物高温氧化烧蚀行为研究

胡姣¹, 叶子名¹, 卓海鸥¹, 唐建成^{*1}, 曾毅², 熊翔²

1. 南昌大学

2. 中南大学

复相多元陶瓷进一步拓展了现有多元(高熵)陶瓷的成分-结构空间,为更多协同效应的产生提供了新基础,目前,已在复相多元陶瓷中观察到了更为优异的机械性能、摩擦性能及热物理性能,然而关于其高温氧化烧蚀行为的研究仍鲜有报道。本工作通过研究复相多元超高温碳化物 Hf-Zr-Ti-Ta-C(由富 Hf、富 Ta 和富 Ti 多元碳化物相构成)在 2718 K 等离子焰环境下的氧化烧蚀行为,揭示了烧蚀过程中不同多元碳化物相间存在的固相反应现象,并发现该过程中元素互扩散所导致的成分演变使多元碳化物相能在更高的氧分压下稳定存在,进而改善了体系的热力学稳定性。更重要的是,研究发现不同多元碳化物间还存在优

先氧化现象,且这一过程中,热力学势差将驱动非优先氧化相(富 Ta 相)中的 Hf/Zr 元素向优先氧化相(富 Hf 相)扩散,进而在相界面处形成致密的富 Hf/Zr 氧化物过渡层。因而,氧化层中沿弥散分布的富 Ta 相区域,原位形成了网状结构高熔点富 Hf/Zr 氧化物,提升了氧化层抵御烧蚀气流冲刷的能力。因此,在固相扩散与优先氧化行为的协同作用下,多相多元碳化物的抗烧蚀性能得到了强化。上述机理的揭示对完善复相多元陶瓷的氧化烧蚀理论有着重要的意义,可为未来复相多元超高温陶瓷的成分设计和优化提供关键理论参考。

E10-28

面向耐腐蚀铝合金设计的计算-实验一体化研究方法

纪毓成¹, 陈迪灏¹, 付小倩¹, 姚晨阳¹, 董超芳*¹

1. 北京科技大学

确保高强度铝合金具备优异的耐蚀性能,对于延长关键结构部件服役寿命及维持安全性至关重要。耐蚀设计需同时考虑合金的表面状态与基体组织,显著增加了设计的复杂性。如何高效设计兼具高强度与高耐蚀性能的铝合金,仍是结构材料领域的重要研究课题。为此,本研究开发了一种新型的强化自学习机器学习算法(预测精度 $R^2 > 0.92$),并构建了集成机器学习模型、能量计算和力学性能的优化策略,用于指导铝合金的成分设计。基于该策略成功制备了新型耐蚀铝合金,并验证了模拟结果。所制备合金表现出优异的力学性能,延伸率接近 30%,其性能提升归因于晶界内形成的具有氢捕获能力的 Al-Sc-Cu 相以及 Cu 改性的 η/η' 相。

针对表面保护性钝化膜的研究发现,膜/溶液界面处的电压降与外加电位和溶液 pH 值呈线性关系。为进一步评估膜/溶液界面在不同电位和 pH 条件下的极化行为,本研究结合密度泛函理论(DFT)计算和接触角滴定实验进行分析。通过第一性原理计算,系统研究了点蚀电位、Al 钝化膜表面酸性与零电荷点(pHpzc)之间的关联。此外,还探究了合金元素 Zn、Cr、Nb、Si、Mo 和 Sc 对 NH₃ 和 NaCl 吸附行为、Al₂O₃ 的 pHpzc 以及 Al 点蚀敏感性的影响。基于计算结果预测了 Sc 元素对铝氧化物点蚀电位和 pHpzc 的影响,相关结果已通过电化学测试、XPS 分析以及接触角滴定实验得到验证。

E10-29

基于相图计算的高性能高强度不锈钢设计与微纳米尺度腐蚀机理研究

王力¹, 董超芳*², 胡平¹, 王快社¹

1. 西安建筑科技大学

2. 北京科技大学

高强度不锈钢由于其较高的强韧性和较好的耐蚀性,广泛应用于航空航天及海洋工程领域,通常,高强度不锈钢较好的服役性能主要来源于基体中微纳米级第二相强塑性作用。然而,高含量的多重第二相显著影响其表面钝化膜均匀性及耐蚀性。因此,需要借助新型制备工艺改善其组织结构和第二相含量,从而同步优化其强塑性和耐蚀性。增材制造技术近年来逐步应用于金属结构件的制备,由于其特定的热过程(快速冷却、小的熔池结构和较高的激光能量密度),显微组织与传统制造合金存在明显差异。基于此,本文建立了适用于增材制造不锈钢的合金成分与相组成之间的相图关系,设计制备新型增材制造高强度不锈钢,并采用原子力显微镜等微纳米尺度表征手段揭示新型高强度不锈钢腐蚀机理。为借助增材制造技术研发新型先进高强度不锈钢提供思路。

E10-30

钇元素添加对 TiB₂ 细化 Al-Mg-Zn 合金塑性与耐蚀性能的协同增强作用

秦文韬¹, 纪毓成¹, 董超芳*¹

1. 北京科技大学

Al-Mg-Zn 合金因其密度低、比强度高以及优异的耐腐蚀性能，被广泛应用于航空航天、交通运输和机械制造等领域。该类合金的力学性能的提升主要依赖于析出强化与细晶强化两种协同机制。为进一步提高强度，通常在合金中添加 Al-5Ti-B 等晶粒细化剂以实现晶粒细化。然而，此类细化剂易在合金内形成阴极相，进而诱发严重的电偶腐蚀，导致合金的耐蚀性能显著下降。

针对上述问题，本研究创新性地提出了稀土元素钇（Y）合金化策略，以实现力学强度与耐蚀性能的协同提升。微观组织分析表明，Y 的引入进一步细化了晶粒结构，使平均晶粒尺寸减小了 23.6%。Y 与 Al-5Ti-B 的协同添加在强度与塑性之间实现了良好平衡，使合金的极限拉伸强度提升至 381 ± 11.3 MPa，同时延伸率仍保持在 $17.2 \pm 3\%$ 。

电化学测试和浸泡结果证实，Al₃Y 金属间化合物的优先溶解有助于促进以 Al₂O₃ 和 Y₂O₃ 为主要成分的致密的腐蚀产物层形成，该层有效抑制了点蚀的扩展，显著提升了耐蚀性能，使腐蚀电流降低至 $0.17 \mu\text{A cm}^{-2}$ ，腐蚀电位正移至 -0.9 VSCE。此外，扫描开尔文探针力显微镜（SKPFM）测量结果显示，Y 的掺杂可将 TiB₂ 颗粒与基体之间的电位差从 245 mV 降低至 190 mV，从而有效减缓电偶腐蚀效应。

E10-31

晶界和李晶界强韧性的原位原子机制

韩晓东¹

1. 南方科技大学

E10-32

高性能多主元合金中的有序结构

李志明¹

1. 中南大学

兼具优良力学和磁学/电学等特性的高性能多主元合金有望满足未来先进电气部件的设计制造需求，提高能源利用效率等。该类合金具有成分复杂且结构多样化等特征，通过在其微米、纳米及原子尺度上构筑特殊多层次结构，可有效调控位错行为、磁畴运动、电声散射等，从而优化综合性能。本研究通过多主元合金的成分设计和基于热力学优化的热处理工艺，在一系列新型多主元合金中调控长程/短程有序结构等。采用三维原子探针与球差矫正透射电镜揭示各类有序结构的特征及其对合金力学性能及变形机制的影响机理。通过物理性能测试系统分析合金在宽温域内的软磁和电学行为，并进一步通过磁光克尔显微术和洛伦兹透射电镜显微术揭示外磁场作用下磁畴壁在有序结构处的钉扎行为，探究宏观磁学性能背后的微观机理。研究基于宽温域电阻测量和多尺度结构分析，揭示多主元合金中有序结构的演化规律和相应的电声散射机理。研究结果为进一步调控高性能多主元合金的微观结构并优化其综合性能提供了参考依据。

E10-33

增材制造 IN718Plus 合金 γ' 沉淀相稳定性的原位热力耦合 TEM 研究

马晓¹，王品杰¹，王成宇¹，傅茂森¹，林鑫¹

1. 西北工业大学

增材制造过程中的非平衡凝固条件易导致形成非稳定、非平衡显微组织，这对高温金属结构材料的智能制备提出了严峻挑战。以选区激光熔化 IN718Plus 高温合金为例，其沉积态合金为过饱和固溶态，未形成 γ' 强化相。通过优化热处理策略，成功诱导合金中形成了具有“双峰分布”特征的 γ' 沉淀相（一次沉淀相约 90 nm，二次 γ' 沉淀相约 27 nm）。研究表明，这种双峰分布的 γ' 沉淀相显著提高了合金在服役温度下的力学性能：其 704 °C 拉伸强度提高了 17% 达到 1.18 MPa。通过原位加热 TEM 动态观察了 γ' 沉淀相的演变过程，发现双峰分布 γ' 沉淀相在升温至 950 °C 时仍表现出较好的高温性能。同时，704 °C 原位拉伸实验证实了这种双峰分布的 γ' 沉淀相通过强化位错的钉扎作用，显著提升了材料的高温力学性能。为深入解析这一现象背后的微观机制，研究团队采用超高分辨 iDPC-STEM 和 HAADF-STEM 成像技术进行

了表征。分析结果表明, Nb 元素的有序聚集显著促进了 γ' 超晶格的形成, 并通过空间排列优化实现了对位错的有效钉扎, 从而显著提升了材料在高温下的力学性能。这些研究成果不仅为理解增材制造过程中非平衡凝固条件对合金性能的影响提供了重要的微观机理认识, 也为开发具有优异高温性能的增材制造合金提供了新的思路和指导。

E10-34

CoFeNi 基非等原子比多主元合金的多重纳米析出强化机制

李慧¹

1. 上海大学

纳米相在材料中高密度的弥散析出能够起到很好的强化效果。单一的强化相有时不能提供足够的强化效果, 因此, 多重析出强化受到了广泛的研究。 本工作设计并通过混合合金粉末法利用增材制造制备了一种添加少量 Mo、Al、Cr 的非等原子比 CoFeNi 基多主元合金, 通过合适的热处理工艺可形成铁素体基体与多种高密度纳米析出相的微观组织特征。通过扫描电子显微镜 (SEM), 透射电子显微镜 (TEM) 和原子探针层析技术 (APT) 对该合金的多种纳米相的析出序列及析出机理进行了分析。合金时效过程中先后析出了富 NiAl 原子团簇、富 NiAlMo 第二相、基于调幅分解的 α' 富 Cr 相, 且在制备过程中引入了高密度的 AlO 纳米相。这些纳米相在 400℃ 时效时具有高度的稳定性, 并起到了多重析出强化作用, 使合金的硬度值最大达到了 693 HV, 且硬度平台大于 200 h, 合金具有较好的热稳定性。基于实验结果, 分析了不同析出相之间的交互作用规律及强化机理。

E10-35

晶界与李晶界面疲劳开裂机制

张哲峰^{*1}, 李琳琳¹, 张振军¹, 张 鹏¹

1. 中国科学院金属研究所

晶界与李晶界面是工程材料重要的强化机制之一, 而在循环载荷下晶界与李晶界面也是萌生疲劳裂纹的有利位置, 进而造成界面疲劳开裂和最后断裂。本报告主要揭示典型大角度和小角度晶界、李晶界面疲劳开裂机制差别, 发现大角度晶界容易造成位错塞积和强化金属材料, 并容易萌生晶界疲劳裂纹; 位错和滑移带容易穿过小角度晶界不引起强化, 同时, 小角度晶界也难以萌生疲劳裂纹; 同时实验测量了高温合金不同晶界取向差晶界疲劳强度, 建立了晶界疲劳强度与取向差关系定量模型; 李晶界面是否萌生疲劳裂纹取决于李晶界面与应力轴之间夹角、李晶界面两侧晶体主滑移系 Schmid 因子差以及合金的层错能, 其中李晶界面与加载轴交角在 30-70 度范围时容易萌生疲劳裂纹, 而增加李晶界面两侧晶体主滑移 Schmid 因子差和降低合金层错能均有利于李晶界面疲劳开裂。

E10-36

利用透射电镜表征揭示中铝 FeMnAlC 轻质钢强塑协同机制

支辉辉¹, 李金山¹, 李万民¹, 张恒¹, 赖敏杰^{*1}

1. 西北工业大学

在过去几十年中, 高锰奥氏体钢因其优异的力学性能而受到汽车工业的广泛关注。典型高锰奥氏体钢的化学成分通常包含 18 - 30 wt.% Mn、<12 wt.% Al 和 0.6 - 1.8 wt.% C。在铝含量较低 (0 - 3 wt.%) 的情况下, 由于塑性变形过程中会发生孪晶变形, 这类钢材表现出孪晶诱导塑性 (TWIP) 效应。随着铝含量的增加, 钢的密度以每 1 wt.% Al 约 1.3% 的速率下降, 含有中等 (4 - 7 wt.%) 和高 (8 - 12 wt.%) 铝的此类钢材通常被称为奥氏体轻质钢。已有研究表明, 铝的添加促进了有序结构的形成。根据有序程度的不同, 这些有序结构包括长程有序 (LRO) 区域以及具有 L'_{12} 结构的 κ' 碳化物 (非化学计量比的 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{AlC}_x$), 它们能够在一定范围内显著提升屈服强度。

本研究系统分析了中铝 Fe-21Mn-6Al-1C-xSi ($x = 0, 1.5, 3 \text{ wt.}\%$) 轻质钢在固溶态和时效态下的初始组

织、力学响应以及变形诱导组织演化。研究表明,在固溶处理态下,材料中存在纳米级长程有序区域,0Si 和 1.5Si 钢中主要为 $L1_2$ 型有序结构,而 3Si 钢则为 $L'1_2$ 型有序结构。在 550 °C 下时效 20 小时对 0Si 钢的显微组织影响不大,但在 1.5Si 钢中则促进了 κ' 碳化物的析出;对于 3Si 钢,仅在 550 °C 下时效 1 小时,即可获得均匀分布的纳米级 κ' 碳化物(尺寸约为 4.2 纳米)。

随着 Si 含量的增加,固溶处理态钢的强度、塑性以及应变硬化能力均得到提升。含 κ' 碳化物的时效态钢的屈服强度(YS)随着时效时间延长而升高,但塑性相应降低。短时(1 小时)时效的 3Si 钢表现出优异的强塑协同效应,其屈服强度超过 900 MPa,总延伸率超过 50%。Si 元素引入所带来的屈服强度提升主要源自晶界强化、固溶强化和有序结构强化。对于 0Si 钢,其应变硬化行为主要由高密度位错墙和微带结构的演化所主导。而在 3Si 钢中,动态滑移带细化(DSBR)效应和孪晶诱导塑性效应的共同作用,是应变硬化能力提升的根本原因。即使在短时效态下,DSBR 效应仍然存在,且逐步形成的滑移带分布均匀,这也解释了其保持高塑性的原因。

E10-37

超细晶结构铝合金的协同强化机制与性能优化: 基于剧烈塑性变形的微观结构设计策略

陈莹¹

1. 厦门理工学院

与粗晶粒铝合金相比,超细晶粒异质结构铝合金在性能指标方面表现出巨大的优势。剧烈塑性变形(SPD)是一种在原子尺度上控制位错运动和晶粒细化来定制微观结构的方法。超细晶铝合金(Al-Cu-Mg、Al-Cu-Li、Al-Mg-Si 和 Al-Zn-Mg-Cu 合金、TiC-TiB₂/7075 Al)的维氏硬度和屈服强度表现出 70-90%的协同增强效果,在 SPD 处理下达到临界饱和应变 6 时,硬度达到最大值(例如 AA2024 饱和值为 243HV,AA6061 饱和值为 220HV)。使用三维原子探针观察到溶质团簇在超细晶界上的强烈偏析。多重强化模型表明,位错和晶界上的溶质偏析是主要的强化机制。而在 TiC-TiB₂/7075 Al 合金中,陶瓷颗粒也有助于硬度的额外增加。当晶粒细化到超细尺度时,铝合金的耐腐蚀性得到提高。在剧烈塑性变形过程中,铝合金的热导率经历了动态演变,这是析出相重新分布与位错、晶界等的协同作用决定的。我们的研究为铝合金的微观结构设计提供了一种潜在的策略,释放其在机械性能和化学物理性能方面的潜力。

E10-38

面向材料表征的先进辐射光源技术

冷用斌¹

1. 中国科学技术大学

大科学装置是面向国家重大需求的先进利器,是国家实力的综合体现,是物理、化学、材料、电子、机械、工程等多学科前沿科技交叉的共同成果。辐射光源是各国家实验室/国家级科创中心的旗舰装置,是一种平台型的大型科技基础设施,可以同时供多个用户开展多种实验表征。辐射光源的表征手段,包括散射(衍射)、谱学和成像等技术,使得多角度研究物质结构成为可能。

国家同步辐射实验室聚焦红外及软 X 射线能量区间,目前拥有和建设有三大用户型辐射光源包括:合肥光源(HLS)、红外自由电子激光装置(IR-FEL)以及合肥先进光源(HALF)。报告将介绍 HLS 和 IR-FEL 的运行、维护和开放共享情况。同时,报告将汇报 HALF 的一期线站规划及工程建设状况。此外,报告还将展示三大用户装置为材料表征相关研究提供的关键支撑。

E10-39

原位 X 射线三维表征技术及其在材料科学中的应用

王绍钢¹

1. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家研究中心

材料成分、组织、结构与性能之间的关系是材料科学的主要研究内容之一。研究人员常使用多个平行样品，在不同形变阶段停止实验，观察微观结构变化。然而，此类研究方法，仅适合于样品的微观结构在不同形变阶段发生剧烈变化的情况，而对形变量很小的情况无能为力。近年来，X 射线三维成像技术得到快速发展，可以高效提供无损、内部、定量、三维复杂拓扑微观结构信息，尤其是能够实现在多种环境下原位追踪样品内部微观结构的演化，进而清晰解释形变与断裂规律。本报告将介绍最新原位 X 射线三维成像技术，包括基于同步辐射光源的前沿技术和基于实验室的先进三维表征技术，并结合在多场环境如腐蚀环境、高温环境、静态力学载荷场、疲劳动态载荷场以及电化学环境下的高性能材料内部微观结构演化案例，阐明原位 X 射线三维表征技术在清晰、全面、准确地认识高温合金、钛合金、先进钢铁、先进涂层以及 3D 打印材料等材料性能调控中的作用，以期为更多先进材料研发提供借鉴与思路。

E10-40

极端服役环境下结构性能表征的 X 射线显微 CT 应用

李仁庚^{*1}，荆虞飞¹

1. 南京工业大学

随着轻质合金材料在航空、航天和军工等高端装备中的广泛应用，其在高温、低温、循环载荷等极端服役环境下的结构稳定性和服役可靠性日益受到关注。材料内部微观缺陷的萌生与演化，疲劳裂纹的扩展与连接，是引发结构失效的关键机制。因此，开展对关键构件在复杂工况下的结构与性能演化行为的三维可视化与原位观测，对于评估其剩余寿命与失效机制具有重要意义。X 射线显微 CT 技术具备非破坏、高分辨率、三维成像等优势，结合精密转台与机械系统控制，可实现毫米至厘米级试样内部结构的无损成像。通过集成高温、低温及拉伸、压缩、疲劳等多类型加载模块，构建多场耦合条件下的原位表征平台，能够在复杂环境中实现轻质合金材料的疲劳损伤、断裂行为及结构退化过程的动态监测。该系统的建立，将为极端工况下材料的结构-性能表征提供关键技术支撑，推动服役可靠性评估方法向可视化、定量化、智能化方向发展。

E10-41

显化钛合金疲劳裂纹内部萌生区的制样和成像方法

潘向南^{*1,2}，马知未^{3,4}，陈志颖^{5,6}，曹高辉^{1,2}，吴圣川⁷，付亚楠⁸，龙旭⁹，钱桂安¹，洪友士^{1,2}

1. 中国科学院力学研究所

2. 中国科学院大学

3. 布朗大学

4. 鞍钢集团北京研究院

5. 清华大学

6. 华东理工大学

7. 西南交通大学

8. 中国科学院上海高等研究院

9. 西北工业大学

对于具有等轴或双态组织的钛合金（其常为退火态的 $\alpha + \beta$ 钛合金，例如 Ti-6Al-4V），在高周和超高周（超过 10^7 ）次的对称循环（应力比 $R=-1$ ）加载下，疲劳裂纹通常倾向萌生于试样的表面，出现一个或多个具有粗糙形貌的裂纹萌生区（RA, rough area）。随着平均应力的增大，裂纹萌生区呈现出从试样表面向亚表面甚至内部转移的趋势。在传统观念中，这一转变被视为超高周疲劳的典型表现之一，而内部裂纹萌生区也被认为是超高周疲劳区别于高周疲劳和低周疲劳的本质差异。然而，如前所述，在钛合金中、负应力比下，并不容易捕捉到内部起源的疲劳裂纹萌生区。同时，负应力比对应的载荷特征又迥异于正应力比时，前者为拉压疲劳，而后者则为拉拉疲劳。

鉴于此，本研究通过预扭转对具有等轴组织微结构的 Ti-6Al-4V 合金引入梯度分布的残余应力，使得

超高周阶段的疲劳裂纹萌生区稳定出现在试样内部,并接近轴线位置。利用同步辐射光源的高能 X 射线,对这些超高周疲劳内部裂纹萌生区开展立面成像与三维重构。结果表明,在低应力幅水平下,疲劳裂纹萌生及初始扩展呈现出不连续行为。研究人员还通过有限元建模深入剖析梯度残余应力对裂纹萌生及扩展的影响。通过构建精细化的材料模型,将梯度残余应力分布作为关键参数导入,模拟不同应力梯度下超高周疲劳过程。

E10-42

微纳尺度硅材料力学特性及调控机制的原位电镜研究

王悦存¹

1. 西安交通大学

集成电子器件的柔性化、结构功能一体化发展对半导体这一关键材料的机械可靠性与可变形性提出了越来越高的要求。然而,以集成电路基础材料—硅为代表的多数无机半导体,由于强共价键特性导致的室温脆性,易引发无预警的力学失效,甚至造成器件的整体报废。为突破这一限制硅材料拓展应用的关键瓶颈,围绕“如何克服强共价键键阻力—开动变形载体—抑制低应力脆断”这一关键科学问题,以“强塑结合的调控机制为突破,实现了微纳尺度单晶硅在近理论强度下的大塑性变形。本次报告内容主要围绕以下两方面:1)揭示小尺度硅中反常的“拉比压更强”特性;2)通过可控离子辐照与热氧化,发明了一种“柔韧包硬脆”一体结构,消除表面损伤、抑制硅脆性开裂的同时显著提升强度。

E10-43

XAFS 谱学与桌面式谱仪的技术进步与应用进展

章磊杰¹

1. 安徽创谱仪器科技有限公司

X 射线吸收精细结构(XAFS)技术仅对目标原子的近邻结构敏感而不依赖材料的长程有序结构,可以获得材料丰富的局域几何结构以及电子结构信息,因而被广泛应用于催化化学、材料科学、能源环境、环境生物等研究领域中。然而基于同步辐射光源的 XAFS 实验受限于机时紧张,往往不能满足研究者的需求,为此创谱仪器基于多年来在大科学装置领域积累的前沿技术,自主开发了 TableXAFS 仪器,可足不出户的在实验室开展多种样品的 XAFS/XES 测试与实验。本报告将从 XAFS 技术原理出发,结合桌面式 XAFS 谱仪的发展历程与技术进展,介绍仪器在材料表征及原位实验中的应用进展。

E10-44

基于激光超声的材料无损检测与原位监测研究

颜学俊^{*1}, 徐晓东¹, 卢明辉¹, 陈延峰¹

1. 南京大学

结构材料的表征与检测技术是保障其使用性能和可靠性的关键,随着当前材料性能需求的不断提升,亟需发展高分辨率的内部缺陷成像和服役过程中的原位监测技术。激光超声是一种高精度、非接触式新型超声无损检测方法,能够实现微小缺陷的高分辨成像和极端条件下的原位在线监测。本报告将主要介绍本团队在激光超声新原理、新技术、仪器开发和装备应用方面的最新进展,主要包括:面向工程应用中的高灵敏度、抗干扰问题,自主研制了激光超声核心仪器与智能检测装备,在航空航天领域开展了无损检测应用;发展了基于时空调制的激光超声检测与成像方法,结合关联计算和时空反演算法,实现了表面和内部微缺陷的高分辨、高灵敏度探测与成像;发展了多场耦合下的激光超声原位监测系统,利用激光超声高频声表面波检测分析方法,实现了腐蚀气氛下的纳米级氧化层厚度原位监测。相关研究可为新材料研发、性能评价和服役寿命预测提供高性能的表征方法与国产仪器设备。

E10-45

微柱压缩法原位研究“软硬互锁”Cu 基复合焊料抗裂纹失效机理

陈柏杉^{*1}, 罗光雄², 许琪曼³, 梁超平², 刘文胜¹

1. 中南大学高等研究中心
2. 中南大学粉末冶金学院
3. 国网电力科学研究院

压接型 IGBT 器件因其高功率密度、低寄生电感及双面散热等优势, 广泛应用于柔性直流输电、智能电网等高压大功率电压源换流装备。Cu/Sn 复合焊料凭借优异的抗蠕变性能、低热膨胀系数及热稳定性, 成为其关键封装互连材料。然而, 其接头中脆性金属间化合物 (IMC) 的生成易引发微裂纹, 导致寿命缩短及安全隐患。针对此问题, 构建异质结构以调控裂纹扩展路径成为研究热点。本研究以 Cu/Sn 复合焊料接头为研究对象, 采用微柱压缩测试系统开展原位力学测试, 系统获取其微结构应力-应变本构关系。基于实验数据, 利用双球差校正透射电镜 (AC-TEM) 对变形微柱进行原子尺度表征, 揭示了从位错滑移、晶界迁移到相变演化的多尺度变形机制。创新性地通过双球差校正透射电镜与原位力学测试系统的联用技术, 首次实现了裂纹形核与扩展过程的原子尺度动态观测。进一步结合分子动力学模拟和断裂力学理论分析, 建立了宏观力学性能与微观结构参数的定量关联模型, 形成“实验-模拟-理论”多尺度研究方法体系。

本文采用原位力学测试与原子尺度表征相结合的方法, 系统研究了 Cu/Sn 复合焊料接头的断裂行为机制。实验结果表明, 裂纹优先在 Cu/金属间化合物相界面形核。软硬相互锁的异质结构能够诱导裂纹发生三维偏转, 形成高度曲折的扩展路径, 从而显著提高断裂能消耗。原子尺度动态观测揭示了 Cu 颗粒通过钉扎效应实现裂纹尖端钝化的微观机制, 该机制使临界应变能释放率得到显著提升。研究表明, 裂纹扩展过程中与金属间化合物晶界发生协同变形, 导致裂纹呈现非线性扩展特征, 这是断裂韧性提升的关键因素。此外, 软硬相互锁结构中的 Cu 颗粒可有效抑制损伤萌生与扩展, 其增韧机制主要源于裂纹尖端应力场重分布、扩展路径曲折化以及界面能耗散增强等多重效应。该研究阐明了异质结构对裂纹扩展行为的调控机制, 为高可靠性焊料材料的设计提供了重要理论依据, 对提升高压大功率电子器件的服役寿命具有重要指导意义。。

E10-46

基于透射率的电压优化提高实验室 XCT 在增材制造缺陷检测中的图像对比度

刘家圣¹, 乔旭¹, 龚克¹, 孟凡强¹, 张承功², 周舟^{*1}

1. 中山大学
2. 深圳先进光源研究院

实验室 X 射线计算机断层扫描技术 (Lab-XCT) 已广泛应用于增材制造领域的缺陷检测。然而, 目前 Lab-XCT 实验中即使针对相同厚度的相同材料, 在 X 射线源电压的选择上仍存在显著差异, 且在增材制造领域不同电压对成像质量的影响尚未得到系统的研究。本研究通过理论计算得到不同厚度 SLM 制备样品 (In718、SS316L、TC4 和 AlSi10Mg) 对单能和多能 X 射线的透射率, 并通过同步辐射 XCT 和实验室 XCT 进行了实验验证。此外, 本研究根据信噪比、图像对比度及边缘锐度等参数系统性评估了不同电压下获得的实验室 XCT 图像质量, 发现当材料含孔隙区域与致密区域的透射率差值达到最大时, 可获得最优的图像对比度。基于此, 本研究提出了一种面向增材制造材料的、基于透射率的电压优化方法, 能够提高实验室 XCT 图像对比度。

E10-47

变速非等温时效工艺过程中 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织演变与性能表征

袁硕¹, 吴名冬¹, 黄兰萍^{*1}, 刘文胜¹, 肖代红¹

1. 中南大学

在 Al-Zn-Mg-Cu 合金中, 如何解决强度与耐蚀性不能兼容的矛盾是一个具有挑战性的问题。本文提出了一种变速非等温回归再时效 (VNRRA) 工艺, 并与常规等温时效处理 (T6、T77 和 T73 状态) 进行了详细的比较。该新型时效工艺由低温慢速升温阶段、高温快速升温阶段和 120 °C 等温时效阶段组成, 可以同步提高 Al-Zn-Mg-Cu 合金的强度和耐蚀性。本文通过 TEM、APT 等表征手段及力学性能、腐蚀性能测试, 系统地研究了该合金的析出行为及性能特征。在低温慢速升温阶段, VNRRA 具有更高的形核率和形核稳定性, 使得基体析出更多的强化相; 在高温快速升温阶段, 较高的时效温度使得晶界析出相 Cu 含量上升并呈断续分布, 而较快的升温速率避免了晶内析出相严重粗化; 在 120 °C 等温时效阶段, 由于高温而溶解的溶质原子重新在基体内析出强化相。与 T6 时效相比, VNRRA 试样具有更高的硬度和屈服强度。同时, 优化的 VNRRA 试样的耐蚀性与 T77 试样相当。

E10-48

碳纳米管类型对铜基复合材料力电性能的影响

赵险峰^{*1}, 葛昌纯¹, 任晓娜¹, 陈志培¹

1. 北京科技大学

碳纳米管 (CNTs) 因其独特的结构和优异的力学/电学性能, 被视为极具发展前景的铜基复合材料增强相。本研究通过对比单壁碳纳米管 (SWCNTs) 和多壁碳纳米管 (MWCNTs) 的增强效果, 系统探究了碳纳米管结构特征对铜基复合材料性能的差异化影响。采用创新的分子级共混-放电等离子烧结 (SPS) 协同工艺, 首先通过表面修饰和分子级分散技术实现了 CNTs 的表面被 Cu 颗粒包裹并在 Cu 基体中均匀分布, 随后利用 SPS 快速烧结制备出致密的复合材料。微观结构分析表明, 优化的界面修饰工艺使 CNTs 与铜基体形成了强结合的界面结构。力学性能测试显示, MWCNTs 增强铜基复合材料的抗拉强度达到 262.5 MPa, 较纯铜 (212.3 MPa) 提升 23.6%, 且显著高于 SWCNTs 增强体系 (233.1 MPa)。特别值得注意的是, 在保持接近纯铜导电率 (MWCNTs/Cu: 95% IACS; SWCNTs/Cu: 96% IACS) 的同时, 复合材料获得了显著的强度提升。本研究阐明了不同结构 CNTs 的增强机制差异, 为电子封装、导电弹性元件等领域的高性能铜基复合材料设计提供了重要的理论指导和技术支撑。

E10-49

电极结构和样品厚度对块体陶瓷介电击穿测试的影响

杜继实¹

1. 中国工程物理研究院电子工程研究所

近年来, 介质功能陶瓷的应用越来越多, 介质功能陶瓷介电击穿强度的优化方法成为了一个重要的研究点。了解介电击穿机理是提高材料介电击穿强度的基础, 改变介电击穿测试, 发现介电击穿强度和介电击穿通道的差异一直是研究介电击穿机理的重要方法之一。本文将 6 中不同电极结构应用于不同样品厚度的氧化铝陶瓷的介电击穿测试, 并从介电击穿强度数据的统计特性分析了电极结构和样品厚度的影响。结果表明: 随着电极尺寸的增大, 介电击穿强度先增大后减小, 这可能与电场集中效应和面积效应有关, 可以用威布尔尺度规律分析面积效应; 在每种电极测试中都发现了介电击穿强度的厚度依赖性, 即介电击穿强度测试结果随样品厚度增加而降低的现象, 并且没有一种已经提出的介电击穿强度机制能够完全解释它; 多层串联结构提高了氧化铝陶瓷片的耐压性能, 且改善系数小于各层电压分布比相等时的预测值。

E10-50

激光粉末床熔融 René 142 高温合金裂纹控制与热处理组织调控

孔德成^{*1}, 卫东雨¹, 祝国梁¹, 孙宝德¹

1. 上海交通大学

裂纹缺陷是增材制造高强合金制备面临的主要问题, 裂纹产生的机理及其控制是增材高性能高温合金

研制的重点。本文通过以传统高强牌号 René 142 合金作为研究对象,采用激光粉末床熔融制备工艺(LPBF),研究表明 LPBF René 142 合金中裂纹类型为凝固裂纹和液化裂纹,且主要分布在大角度晶界;采用常规热等静压(HIP)后处理难以消除打印合金中的微裂纹,通过设计固溶预热处理+HIP 工艺(SHIP)可以有效消除合金微裂纹缺陷,固溶预热处理可以显著降低合金位错密度,缓解了残余应力并使合金软化,有利于后续 HIP 处理压合裂纹。SHIP 后处理态 René 142 合金室温下展现出优异的室温强塑性结合,1000 °C 高温力学拉伸展现出优异的高温强度,但延伸率较低;基于合金成分设计也可以制备出无裂纹的改性合金(ZGH4142),通过探索不同热处理制度对 LPBF ZGH4142 合金的微观组织和力学性能的影响规律,最终获得短时高温性能优异的增材制造高温合金材料。

E10-51

碳化硅纤维的微观结构表征研究进展

张行健¹, 范金娟¹, 刘昌奎¹, 叶进发²

1. 中国航发北京航空材料研究院
2. 福建建立亚新材料有限公司

陶瓷基复合材料具有耐高温、抗氧化等优异的性能,在发动机热端部件具有较好的应用前景。在陶瓷基复合材料中,碳化硅纤维的微观结构组成决定了其宏观性能。因此,本文以碳化硅纤维作为研究对象,对 SiC 纤维的结构、成分、形貌表征方法进行了归纳总结,将 XRD、SEM、TEM 等检测设备分析的发展和优缺点进行对比,并提出了在碳化硅纤维微观结构表征中的试样制备、表面缺陷、内部组织变化等问题,为制备高性能 SiC 纤维和完善其表征工作提供了参考。

E10-52

难熔中熵合金的宽温域力学性能及变形机理研究

张先兵^{1,2}, 马衍¹, 何斌斌^{*2}

1. 香港城市大学
2. 南方科技大学

体心立方难熔高/中熵合金作为一种新兴金属材料,被视为极端环境下结构材料的潜在候选。然而,其在极低温至高温的宽温域内的力学响应及变形机制尚缺乏系统性研究。本研究以一种非等原子比 TiZrNbTa 中熵合金为对象,开展了 4.2K 至 1073K 区间的拉伸实验,系统评估其力学性能演化,并结合 XRD、EBSD 和 TEM 技术,揭示了主要变形机制的温度依赖性。结果显示,合金屈服强度随温度升高逐步降低,但在各温度下均保持良好拉伸塑性。在 4.2 至 77K 区间,变形主要由{332}<113> 孪晶与位错协同主导,其中 4.2K 为{332}孪晶主导机制,77K 则表现为{332}孪晶与高密度位错并存。185K 时,低密度的短位错导致材料过早发生颈缩,但扭折带(kink)的产生及其软化作用有效抑制了脆性转变。室温(293K)下,合金以位错滑移为主,伴随{112}<111>孪晶及颈缩后形成的扭折带。中温区(573 至 823K)中,逐渐过渡为以高密度位错板条与微扭折带(micro-kink)为主导的变形机制。在 1073K 拉伸后观察到显著的动态再结晶行为,伴随晶粒内低角度晶界与位错结构的形成。本研究系统揭示了 TiZrNbTa 合金在宽温域下的力学行为及其微观机制演化规律,为高性能中熵合金的加工、成分优化及极端环境服役评估提供了重要理论依据。

E10-53

多元铝合金与陶瓷增强相的高温润湿性与界面行为

葛昱杰¹, 郭瑞芬¹, 沈平^{*1}

1. 吉林大学材料科学与工程学院

为满足高性能铝基复合材料在航空航天、电子封装等领域的制备需求,深入理解多元铝合金与陶瓷增强相之间的润湿性与界面反应规律至关重要。本研究采用改良座滴法(通管滴落与气体辅助移液技术),

系统开展了 Al-Mg-Si、2014Al 与 7075Al 三种典型多元铝合金在 SiC、SiO₂、Al₂O₃（单晶 C 面与多晶）及 B₄C 陶瓷基底上的润湿性测试与界面演化行为研究，结合热力学/动力学分析与界面微观结构表征，揭示了温度、合金组分与气氛等因素对润湿行为和粘接功的影响机制。研究发现，不同合金元素通过调控界面反应、表面张力或氧分压等机制对润湿性和粘接功产生显著影响，且多元合金中元素间存在协同与竞争效应；明确了传统 SiC 预氧化工艺的核心作用在于调控 Al₄C₃ 反应产物的形成，而非直接提升润湿性；同时，评估了 Mg, Zn 蒸发导致的液滴体积变化对接触角测量的干扰效应，并提出界面反应诱导粗糙度变化调控润湿行为的机制。本研究建立了多元铝合金/陶瓷体系的润湿性和粘接功数据集，厘清了主要影响因素及共性规律，为铝基复合材料液相工艺设计与优化提供了重要的理论依据与关键数据支撑。

E10-54

激光粉末床熔融成形耐热 Al-Mn-Fe-Sc-Zr 合金的组织结构与性能研究

李丹¹, 陈超¹, 宋淼*¹

1. 中南大学

铝合金中的强化相在高温下易发生相变和快速粗化，这限制了其在航空航天和汽车工业中苛刻应用的适用性。在本研究中，通过探究 Fe 含量（1.5-3 wt.%）对 Al-Mn-Sc-Zr 合金的组织结构与室/高温力学性能的影响，开发了一种适用于激光粉末床熔融制备的新型耐热 Al-Mn-Fe-Sc-Zr 合金。添加 Fe 元素的 Al-Mn-Sc-Zr 合金晶粒为双峰结构，Fe 主要以 Al₆(Mn, Fe)颗粒的形式存在。当 Fe 含量从 1.5 wt.%增加至 3 wt.%时，Al₆(Mn, Fe)颗粒从不连续链状分布转变为连续胞状分布。时效处理诱导初生 Al₆(Mn, Fe)颗粒转变为富 Fe/边缘富 Mn 的核壳结构，并在铝基体中析出 21.0 nm 的准晶态 Al₆(Mn, Fe)粒子和 3.2 nm 的 Al₃Sc 粒子。添加 1.5 wt.%Fe 的合金的室温强度为 529 MPa，延伸率 15%，进一步提升 Fe 的含量降低合金的塑性。核壳结构的 Al₆(Mn, Fe)颗粒具有优异的热稳定性，颗粒在 350 °C 的粗化速率（0.013 nm³/s）相比 Al₆Mn 颗粒（0.062 nm³/s）降低了 79%，使得合金表现出优异的高温力学性能。添加 1.5 wt.% Fe 的合金在 300 °C 下的屈服强度为 264 MPa，比 Al-Mn-Sc-Zr 合金提升 20%，并在 350 °C 下仍保持 228 MPa 的屈服强度。

E10-55

Insights into irradiation-induced defect evolution and segregation in metastable high-entropy alloys: effects of high-density incoherent planar defects and temperature

吴伟松¹, 李志明*¹

1. 中南大学

Strong and ductile metastable high-entropy alloys (HEAs) have potential to achieve excellent irradiation resistance with the presence of multiple principal elements. In this work, irradiation behavior of a prototype metastable HEA composed of face-centered cubic matrix and dispersed σ precipitates was systematically studied with the focus on revealing the effects of temperature and high-density planar defects (e.g., grain boundaries and incoherent phase boundaries) on the defect evolution and segregation behavior. Transmission electron microscopy analysis shows that dislocation-denuded zones (DDZs) are formed in the vicinities of grain boundaries and σ phase boundaries after irradiation at room temperature (RT), whereas dislocation-enriched zones (DEZs, mainly faulted loops) are developed near these interfaces upon irradiation at 500 °C. This is mainly attributed to the temperature-dependent defect mobility. Upon irradiation at 500 °C, Co and Ni tend to be enriched, but Fe, Cr and Mn prefer to be depleted around dislocation loops and interfaces, which follows the inverse Kirkendall mechanism and has been verified by first-principles calculations. Moreover, grain refinement and precipitation lead to increased volume fraction of DDZs at RT, whereas the absorption of defects at 500 °C can be promoted due to enhanced defect mobility, enabling a more prominent irradiation hardening resistance at various temperatures. The work rationalizes the enhanced irradiation resistance in fine-grained metastable HEAs with

dispersive precipitates and provides important insights for developing irradiation-resistant alloys with excellent mechanical properties

E10-56

氢对金属微观缺陷行为的影响

解德刚¹

1. 西安交通大学

氢以离子态和化合态广泛存在于地球环境中，作为体积最小的原子，氢很容易进入大多数金属和合金的原子间隙，导致材料的氢损伤和氢脆。氢损伤指材料内部发生的氢鼓泡、氢裂纹等不可逆的损伤现象，而氢脆主要指材料吸氢导致的塑性损失和由此引发的氢致延滞断裂。氢脆和氢损伤相关研究虽然有百年历史，但多集中于宏观尺度上，至今没有形成广为接受的氢脆和氢损伤微观机理。氢脆和氢损伤都源于氢与金属中的位错、界面等微观缺陷的交互作用，厘清氢-缺陷的交互作用是建立相关微观机制的基础。我们利用先进的环境透射电子显微镜和原位纳米力学测试技术，在微观尺度研究了氢和典型金属-铝和铁中微观缺陷的交互作用。在氢对界面行为影响方面，破解了金属/氧化膜界面上氢鼓泡形核生长的微观难题，发现氢致界面损伤起始于金属表面率先形成的凹坑，解决了经典氢压理论中损伤萌生的应力奇点问题（*Nature Materials*, 2015）；发现微量氢即足以在高温下对铝/氧化铝界面造成显著破坏，并揭示了其起源和演化的微观机制（*Nature Communications*, 2017）。在氢对位错行为影响方面，发现氢以含氢空位的形式对铝中位错产生强钉扎效应（*Nature Communications*, 2016），证实了氢能促进铁的螺位错运动（*Nature Materials*, 2023），阐明了氢对铝和铁中位错运动影响迥异的微观机制，颠覆了“氢对位错运动的阻碍作用可忽略不计”，“氢通过对弹性应力场的屏蔽效应促进位错运动”等主流认知。提出了裂尖位错动态形成富氢小角晶界的新机制，解释了各类氢脆现象中最难理解的穿晶型氢致开裂现象（*Corrosion Science*, 2021）。

E10-57

钢中碳化物氢捕获行为与机理原位研究

张冰芦*¹, 何洋¹, 乔利杰¹

1. 北京科技大学

随着高强钢和氢能的广泛应用，氢脆问题越来越突出。氢脆问题严重制约着临氢装备的应用。在弹性服役条件下，氢脆往往都是沿晶发生的。为了预防和缓解氢脆，在钢中引入弥散的纳米碳化物，可以在强化钢的同时，作为氢陷阱捕获氢，降低氢在晶界的富集，从而抑制钢的氢脆敏感性。此前通过热脱附等方法只能表征试样的平均氢浓度，无法揭示具有不同界面特性（共格、半共格和非共格）的单个析出相的氢捕获行为及其微观机理。因此，需要采用原位、高分辨方法表征不同种类和结构的单个碳化物析出相的氢捕获行为并深入研究其微观机理，为更好地调控碳化物进行高强抗氢钢的设计提供理论指导。

鉴于钢中不同种类碳化物的结构和成分存在差异，其氢捕获行为、机理及对钢氢脆敏感性的影响也不尽相同。本文以 Ti₂CS、NbC、Fe₃C、Cr₂₃C₆ 四种不同成分和结构的碳化物作为研究对象，综合采用原位扫描开尔文探针显微镜（SKPFM）、电子能量损失谱（EELS）和扫描透射电子显微镜（STEM）联用技术，密度泛函理论（DFT）计算、环境透射电子显微镜（ETEM）、慢应变速率拉伸（SSRT）、氢微印（HMT）、热脱附（TDS）等方法，深入研究了钢中碳化物的氢捕获行为与机理，并以此为依据，探究了预应变对碳化物与基体界面氢捕获能力的影响，获得提升抗氢脆性能的方法。主要结果如下：

（1）Ti₂CS 析出相与基体非共格界面的不同氢捕获行为与机理研究。通过原位 SKPFM-FIB-TEM 联用技术，揭示了高强度低合金马氏体钢中 Ti₂CS 非共格析出相与基体界面的不同氢捕获行为与机理。SKPFM 结果表明了非共格界面的氢捕获行为，即有些非共格界面可以捕获氢，有些非共格界面不捕获氢，甚至排斥氢。原子级 STEM 结果明晰了氢捕获位点的原子级微观结构与化学特征，揭示了非共格界面捕获氢行为的机理：Ti₂CS 析出相表面碳（硫）空位和界面近邻基体应变决定了非共格界面的氢捕获行为。

（2）NbC 析出相与基体非共格界面和内部的氢捕获行为与机理研究。对在钢中广泛应用、与 Ti₂CS

结构不同的 NbC 析出相, 通过 SKPFM 方法原位观察了 NbC 非共格析出相与氢的动态相互作用。与 Ti₂CS 析出相不同, NbC 析出相界面只存在不捕获氢和排斥氢的两种不同氢捕获行为, 没有观察到界面捕获氢的现象。结合原位 SKPFM 与 ETEM 结果表明, 氢可能进入 NbC 非共格析出相内部, 并弱化 Nb-C 键合力。不同非共格 NbC 析出相的氢捕获行为存在差异性, 它取决于析出相与基体的取向关系、界面附近区域内的缺陷、原子级界面结构和近邻基体的应变状态等。对钢中的碳化物进行界面调控, 例如通过预应变的方法改变碳化物与基体界面应变, 进而提升界面的氢捕获能力, 可能有助于缓解其氢脆。

(3) Fe₃C 与基体界面的氢捕获行为与机理研究。基于上述结果, 选取含有大量界面、结构简单、易于观察的珠光体为研究对象, 通过预应变调控珠光体钢中片层状渗碳体与铁素体界面的微观结构和化学特征, 结合 SSRT、HMT、TDS、SKPFM 和 TEM 等方法深入研究了预应变对珠光体钢氢脆敏感性的影响。结果表明, 5%预应变可以均匀地增加钢内的氢陷阱密度, 显著提升铁素体与渗碳体界面的氢捕获能力, 界面附近的弹性应变、碳空位的增加和台阶的产生是氢扩散和富集受到阻碍的原因。10%预应变导致钢中滑移带与渗碳体的交叉点处缺陷增多, 氢易在此位置局部富集, 反而促进了氢致开裂, 降低了钢的抗氢脆性能。因此, 在钢的碳化物和基体界面上施加适当应变, 是一种解决钢的高强度和抗氢脆性能互斥关系的可行方法。该方法可以推广应用于以析出相作为主要氢陷阱的钢中。

(4) Cr₂₃C₆ 的氢捕获行为与机理研究。Cr₂₃C₆ 是奥氏体钢中最主要的碳化物, 但其通常倾向于在晶界上形核并聚集长大, 氢也易在较大尺寸晶界碳化物周围的孔洞中富集, 使材料发生沿晶开裂, 极大降低了材料的抗氢脆性能。为此, 选取碳含量较高的 316 奥氏体不锈钢为研究对象, 通过预应变引入高密度位错, 再通过时效诱导 Cr₂₃C₆ 碳化物在钢中弥散析出。结合 TDS、HMT、原位 EELS 和 STEM 结果表明, Cr₂₃C₆ 析出相与基体界面可以捕获氢。其界面捕获氢行为的微观机理为析出相/基体界面的失配位错和应变。弥散碳化物 Cr₂₃C₆ 既可作为氢陷阱增加抗氢脆性能, 又可起到强化作用, 形成位错-析出相复合强化效果, 获得高强抗氢奥氏体不锈钢, 有望解决高强紧固件用钢的高氢脆敏感性问题。

E10-58

细晶镁合金微管加工过程中的组织演变与变形机制研究

盛坤¹

1. 河南省科学院

镁合金因其优异的生物可降解性和生物相容性, 被认为是最具潜力的新一代血管支架用金属材料。然而, 镁的六方密排晶体结构使得其在室温下滑移系难以充分激活, 导致其强度低、延展性差及冷加工性能有限, 制约了薄壁高性能微型管材的加工制备。为此, 本文采用往复挤压、高挤压比热挤压、多道次冷拔及中间退火等多种工艺手段, 成功制备了性能优异的细晶镁合金微管。成品微管长度超过 1000 mm, 壁厚误差控制在 7.7%以内, 屈服强度达 230 ± 8 MPa, 极限抗拉强度为 290 ± 8 MPa, 伸长率为 $23.8 \pm 0.5\%$ 。系统研究表明, 微管在加工过程中的组织演变与变形机制受到冷拔过程中截面减缩量的显著影响。尽管不同减缩量对应不同的主导变形机制, 其组织演化规律具有相似趋势: 变形晶粒结构为主要组分, 而再结晶晶粒的形成则有效削弱并随机化了整体结构。退火后, 具有 {12-10} 取向的晶粒呈现出更大的平均晶粒尺寸, 表明其可能存在择优长大的趋势。此外, 研究还发现, 细晶粒结构、第二相颗粒以及合金元素的偏析均对晶界行为具有强化促进作用。本研究为高性能可降解镁合金微管的制备提供了可行路径, 并深化了其微观组织与变形机制的理解, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

E10-59

Ordered Coherent Core-Shell Nanoprecipitates Enable Ultrahigh Strength and Near-Zero TCR in Ferritic Multicomponent Alloys

徐勋林¹, 李志明¹

1. 中南大学

To overcome the critical challenge of achieving high strength and near-zero temperature coefficient of

resistance (TCR) in resistor alloys, we develop a ferritic multicomponent alloy through compositional control that eliminates brittle grain-boundary Laves phases and forms fully coherent, ordered core-shell nanoprecipitates (L21 shell/B2 core). Scanning transmission electron microscopy (S/TEM) and atom probe tomography (APT) reveal the atomic-scale structure and compositional gradients of these nanoprecipitates, confirming their coherency and ordered configuration. The alloy exhibits: near-zero TCR (5 ppm/K from 273–673 K), high compressive yield strength (1208 MPa), large compressive strain (>50% without fragmentation), and high resistivity (145 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$). Comparative studies on alloy variants demonstrate that the core-shell nanostructure enhances strength and work hardening by impeding dislocation motion through dual mechanisms (tangling at shells and shearing within cores) while promoting dislocation storage. Furthermore, the compositional gradient across nanoprecipitates tunes Kondo-like scattering to achieve near-zero TCR. This work provides a design strategy for low-cost precision resistance alloys, combining stable resistivity over wide temperature ranges with high strength and damage-tolerant compressibility.

E10-60

形变热处理工艺对 Cu-0.44Cr-0.1Zr-xMg 合金微观结构与性能的调控

路莹¹, 郑月红^{*1}, 牛嘉楠¹, 刘芳辰¹, 喇培清¹

1. 兰州理工大学

Cu-Cr-Zr 合金因其优异综合性能, 广泛应用于引线框架、高速铁路接触、架空电线及设备制造等领域。微合金化是改善合金性能的有效途径之一, 适量添加 Mg 元素, 不仅能够有效降低合金的层错能, 而且其在晶界的偏聚效应有助于细化晶粒并减少晶界缺陷。基于此, 本文选取 Mg 作为第四组元元素, 设计了成分为 Cu-0.44Cr-0.1Zr-xMg ($x=0, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2$) 的合金体系, 并采用一步液氮轧制-时效处理与两步轧制-时效处理工艺对其进行加工。经过一步液氮轧制(变形量为 90%)及 450 °C/1 h 峰值时效处理后, 该系列合金的硬度和导电率较铸态时显著提升, 展现出良好的综合性能。液氮轧制后形成的变形晶粒在时效处理过程中发生再结晶, 位错密度降低, 同时时效过程中, Cr 元素明显析出, 从而减少了电子散射, 使合金导电率显著提高至 80 %IACS 以上, 同时抗拉强度维持在约 600 MPa 的较高水平。特别是 Cu-0.44Cr-0.1Zr-0.02Mg 合金的综合性能提升尤为显著, 在保持 589 MPa 高抗拉强度的同时实现了 84.9 %IACS 的高导电率; 相比于一步液氮轧制加时效处理的合金, 两步液氮轧制(总变形量为 90%)结合 450 °C/1 h 峰值时效处理后基体平均晶粒尺寸减小, 析出更加充分, 析出相尺寸更小其分布更加弥散, 位错密度较低, 多重因素共同作用, 实现了该系列合金强度与导电性能的协同优化。其中 Cu-0.44Cr-0.1Zr-0.02Mg 合金的硬度为 214.6 HV、抗拉强度为 608 MPa 和导电率为 93.2 %IACS。与该合金一步液氮轧制变形量为 90%及 450 °C/1 h 峰值时效处理相比, 各项性能分别提升了 9.7%、3.2%和 9.8%, 展现了更优的综合性能。

E10-61

通过双峰晶粒结构在预形变热处理 Al-Mg-Zn 合金中实现强度-塑性协同

黄洋¹, 吴名冬¹, 肖代红¹, 黄兰萍^{*1}

1. 中南大学

双峰结构是当今金属材料领域具有前景的研究热点。本研究采用一种预应变、预时效结合形变热处理工艺, 使双峰晶粒结构 Al-Mg-Zn 合金的抗拉强度提高约 12%, 达到 543.7 MPa, 同时双峰结构使合金保留了约 90%的拉伸伸长率。强度提升源于预时效过程中产生的高密度 Guinier-Preston (GP) 区以及预应变引入的大量位错, 且两者共同加速了 T 相时效硬化动力学, 而双峰结构中的粗晶增强了位错存储能力, 从而缓解了预应变过程中常见的塑性损失。

E10-62

Cu-0.44Cr-0.1Zr-M 合金液氮轧制组织及其性能调控刘芳辰¹, 郑月红^{*1}, 何湉楠¹, 路莹¹, 牛嘉楠¹, 喇培清¹

1. 兰州理工大学

本文以 Cu-0.44Cr-0.1Zr 合金为基础, 微量添加 Mg、Si 或 Y 元素, 熔炼制备了 Cu-0.44Cr-0.1Zr、Cu-0.44Cr-0.1Zr-0.05Mg、Cu-0.44Cr-0.1Zr-0.05Mg-0.02Si、Cu-0.44Cr-0.1Zr-0.05Mg-0.02Y、Cu-0.44Cr-0.1Zr-0.05Mg-0.02Si-0.02Y (wt.%) 五种合金, 并对其分别进行“固溶-液氮轧制-时效”处理, 研究了不同状态合金的组织与性能变化。结果表明 Mg 和 Y 元素对合金的晶粒细化效果明显, 固溶态合金导电率和硬度相比铸态合金均有不同程度的提高。Cu-Cr-Zr-M 合金经变形量为 60%、70%、80%、90%、98% 的液氮轧制后, 晶粒沿受力方向的变形逐渐明显, 晶粒细化程度增加, 导电率和硬度均在变形量为 90% 时获得极大值, 其中 Cu-Cr-Zr-Mg-Si 合金综合性能最突出, 导电率为 66.5 %IACS, 硬度为 215.4 HV, 抗拉强度为 660.2 MPa, 延伸率为 7.7%。轧制态 Cu-Cr-Zr-M 合金在 450 °C/1 h 时效后, 平均晶粒尺寸稍微变大, 析出相含量增加且分布均匀。时效后, Cu-Cr-Zr-Mg-Si 合金的综合性能仍然最突出, 硬度为 232.7 HV, 抗拉强度为 723.8 MPa, 延伸率提高为 13.5%, 导电率大于 80 %IACS。微量元素的添加也显著提高了 Cu-Cr-Zr 合金的软化温度, 其中 Y 元素添加后效果最为明显。

E10-63

Developing lightweight refractory multicomponent alloys with excellent strength-ductility synergy张炜¹

1. 中南大学

Refractory multicomponent alloys (RMCAs) are considered promising candidate materials for high-temperature structural applications that currently use superalloys. However, for most of the reported RMCAs, their poor ductility and negligible cold-workability at room temperature have hindered their use. Here, we report a new class of non-equiatomic NbTiZrTaAl RMCAs that can be cold-rolled to a reduction of over 90% from the as-cast state without surface treatment and/or intermediate annealing. This excellent cold-workability is facilitated by activation of a high-density of dislocations and seeding sites to disperse planar slip, such that these RMCAs can be rendered homogeneous at lower annealing temperatures for much shorter time durations. In addition, we report that the RMCAs retain their high strength at elevated temperatures and exhibit considerable ductility at cryogenic conditions, evading the traditional strength-ductility trade-off.

E10-64

基于第一性原理计算揭示钇稳定四方氧化锆中氢缺陷行为的原子尺度机制李茂媛¹, 刘斌^{*1}

1. 上海大学

随着氢燃气轮机的发展, 热障涂层 (TBC) 材料钇稳定四方氧化锆 (T-YSZ) 的抗氢渗透能力备受关注。本研究采用第一性原理计算系统分析了 T-ZrO₂ 和 T-YSZ 中氢缺陷的构型、形成能及质子迁移行为。结果表明氢在材料中表现为两性缺陷, 并形成间隙或成键构型; 晶格四方畸变导致 Zr-O 键长差异和局域电子分布不均, 决定了质子的成键取向。质子沿晶胞 ab 面迁移较沿 c 轴更易进行, 表现出明显的各向异性。此外, Y-Vo-Y 缺陷提高了邻近氧原子的 p 带中心, 降低质子形成能但显著抑制质子扩散。最终提出两种提高 YSZ 抗氢渗透能力的策略: 一是适度提高氧空位浓度增强俘获效应, 二是通过调控晶粒取向利用迁移各向异性特征。这一研究明确了氢缺陷在 T-YSZ 中的行为机制, 为氢燃料燃气轮机用 TBC 材料优化提供理论指导。

墙报

E10-P01

冷冻氩离子束与 SEM-EBSD 技术在电池材料微观结构表征中的应用

陈永康¹

1. 杭州研趣信息技术有限公司

近年来, 新能源技术在国家“碳达峰、碳中和”双碳战略目标引导下, 不断加速创新迭代。锂离子电池作为一种新型能源, 技术持续优化已进入规模化应用阶段, 越来越多的企业和研究机构在固态电池、氢能与燃料电池等技术领域也在不断加大投入, 突破技术瓶颈, 以应对全球气候变化和能源转型问题。

随着电池技术迭代升级, 社会对电池产品的质量、安全性和使用寿命等方面要求日益严格, 电池的基本结构包含阴极材料、绝缘隔膜层、阳极材料、金属集流体、电解液等组件。在电池研发过程中, 可能会遇到各种失效问题, 譬如: 电池活性颗粒出现裂纹或破碎、极片开裂、固体电解质界面(SEI)的过度生长与分解、集流体的腐蚀或异物析出、导电剂和黏结剂的失效、隔膜融化孔隙阻塞等。扫描电子显微镜(SEM)可通过观察各组分微观形貌及成分变化, 辅助确定失效原因, 从而优化设计和生产工艺, 提升电池综合性能。

本次汇报将展示多个新能源技术领域的技术案例:

案例一: 电池隔膜结构空隙分析

隔膜是一种多孔膜(厚度 10-30 μm), 承担物理隔离正负极, 同时允许离子传输的核心功能。尤其在电池热失控后, 隔膜空隙会发生关闭, 阻断离子传输, 对电池安全性能起到关键作用。通过 SEM 可观测隔膜表面微孔结构, 也可通过氩离子束(CP)冷冻切割技术制备隔膜截面样品, 从表里双维度判定隔膜结构及孔径大小分布, 在确保安全性能的前提下, 优化隔膜厚度, 提升电池性能。

案例二: 燃料电池膜电极结构分析

氢燃料电池的最核心部件是膜电极, 它由质子交换膜(PEM)、催化剂、气体扩散层(GDL)组成, 决定了电堆性能、寿命以及成本上限。借助扫描电子显微镜(SEM+EDS)和冷冻氩离子束(CP)技术, 在无应力影响下研究膜电极的微观组成结构, 助力研发人员实现技术突破, 开发出低成本、高性能、长寿命的膜电极, 加速促进燃料电池大规模商业化应用。

案例三: 电池颗粒性能分析

扫描电子显微镜(SEM)可提供形貌、结构、膜层厚度、孔隙/裂纹分布等可能影响电池材料性能及可靠性的关键参数, 结合能谱仪(EDS)可实现元素成分分析与元素 Mapping 分布分析。对于 Li 元素分析, 可采用 X 射线光电子能谱(XPS)进行深度解析, 通过材料中元素分布及含量研究指导材料配比和性能的优化, 这些信息对电荷传输机制以及改性起到非常重要的作用。

使用氩离子束(CP)对样品进行电池颗粒截面制样, 与传统镶嵌抛光等制样方法相比, 无机械损伤, 减少应变, 避免因外力造成样品破碎、污染或挤压变形, 可实现大面积切割制样, 保障检测质量。

电子背散射衍射(EBSD)技术, 可解析正极颗粒晶粒和晶体学特性。对 NCM 颗粒进行晶粒尺寸统计和取向分布研究证实: 晶粒的尺寸、均匀性、取向等特征都对材料电化学性能有一定的影响。

E10-P02

高通量微试样测试技术在增材制造材料性能预测中的应用研究

彭勃^{*1}, 孔辉¹, 牟光俊¹, 万学忠¹, 方正¹, 王轩泽¹

1. 创材深造(苏州)科技有限公司

针对增材制造材料研发中少试验消耗、精确性能预测的迫切需求, 本研究系统探究了微试样尺寸效应规律并开发了高效表征方法。研究首先分析了微试样标距段长度、厚度以及晶粒尺寸对拉伸性能的影响机制, 揭示了厚度与等效晶粒尺寸比值 10 为增材制造材料性能发生尺寸效应的临界阈值。基于此发现, 本研究开发了机械臂辅助的全自动高通量测试平台, 对增材制造镍基合金、铝合金及模具钢材料进行了全流

程应力-应变数据采集, 高效构建了"成分-工艺-性能"多维数据库, 实现了对目标合金成分与工艺参数的快速精准筛选。为进一步提高测试通量并减少材料消耗, 研究还开展了增材制造梯度材料的局部力学性能测试, 并通过显微压痕技术系统评估了 Haggag 模型在不同增材制造材料体系中的适用性与精度。本研究成功开发的短流程、减量化、高通量原位力学性能测试方法, 显著降低了新材料研发成本, 提高了研发效率, 在增材制造材料性能表征领域展现出广阔的应用前景。

E10-P03

Al_{0.1}CoCrFeNi 合金摩擦磨损组织结构演化的透射电子显微学研究

杨婉仪¹, 宋淼*¹

1. 中南大学

摩擦磨损是结构材料在服役过程中不可避免的一种能量损耗现象, 是结构件的主要失效形式之一。但由于实验条件限制和摩擦学现象的复杂性, 直接观察其微观结构演变仍具挑战性, 阻碍了磨损机制研究和材料性能优化。近年来, (准) 原位透射技术的发展为原子尺度研究摩擦机制提供了新途径, 并在金、钨等模型材料中成功揭示了原子尺度微观结构演化及机制。高熵合金作为兼具优异力学性能和耐磨性的新型材料, 在极端环境应用中前景广阔, 但目前对其摩擦学机制的研究仍局限于宏观性能表征, 微观机理尚未阐明。深入理解高熵合金的原子尺度摩擦行为, 对充分发掘其服役潜力至关重要。本文采用准原位摩擦透射技术, 并结合分子动力学模拟技术, 研究了激光粉末床熔融 Al_{0.1}CoCrFeNi 合金在摩擦剪切变形下的微观结构演化, 包括表面非晶的形成, 次表层相变诱导的晶粒细化等, 阐明了其摩擦磨损原子尺度变形机制。

E10-P04

In-situ TEM Study on Enhanced the Thermal Stability and Oxidation Resistance of Nanoporous Magnesium

Kaixuan Feng¹, Zhihao Zhao¹, Yuecun Wang*¹

1. 西安交通大学

Non-precious magnesium (Mg) exhibits a low electrode potential and high chemical reactivity, causing nanoscale Mg to rapidly oxidize in aqueous solutions. This makes it challenging to fabricate high-quality (crack-free) nanoporous magnesium via traditional dealloying methods in water-based electrolytes. In this study, we successfully prepared three-dimensional bicontinuous nanoporous magnesium through electrochemical dealloying in an anhydrous and oxygen-free environment. Furthermore, CO₂ plasma treatment was employed to enhance the material's thermal stability and oxidation resistance. A systematic investigation was conducted on its microstructure, formation mechanism, thermal stability, and anti-oxidation properties through in-situ TEM technology. This work not only provides new insights for developing lightweight, high-strength nanostructured materials, but also establishes fundamental experimental support for exploring functional applications of this material.

E10-P05

纳米氧化锌材料结构表征及其抗菌性能

周弘康¹

1. 中南大学

基于氧化锌 (ZnO) 纳米颗粒的材料在医疗保健、食品包装、纺织和建筑等各个领域都受到广泛关注。我们通过利用氯化钠 (NaCl) 的相分离过程来提高 ZnO 纳米颗粒掺杂聚乙烯醇 (PVA) 涂层的抗菌功效。我们的实验结果表明在干燥过程中掺杂 ZnO 纳米颗粒和 NaCl-PVA 复合体系原位生成 NaCl 晶体结构的涂层表面的粒径从 100 nm 到 1 μm 不等, 并且 ZnO 纳米颗粒在 NaCl 晶格内表现出优先富

集。在相同的 ZnO 浓度下,与不含 NaCl 的抗菌涂层相比,含有 NaCl 的抗菌涂层表现出显著增强的抗菌功效。抗菌涂层表面富集的 ZnO 能促进细菌的快速接触杀伤,NaCl 在细菌溶液中溶解导致的 Zn^{2+} 离子释放增加。这种抗菌涂层在接触大肠杆菌和金黄色葡萄球菌 3 小时内的抗菌效果超过 99%,在接触 1 小时内即表现出最佳抗菌效果。虽然含 NaCl 的抗菌涂层表现出比纯 ZnO-PVA 涂层具有更高的细胞毒性,但其在接触 24 小时后会表现出较低的细胞毒性,这表明逐渐释放 Zn^{2+} 离子对降低细胞毒性具有积极意义。在相分离产生的独特双相结构中 NaCl 晶体形成表面突起而并未嵌入 PVA 聚合物基质中。这种简单而且环保的抗菌涂层制作方法为纳米颗粒富集策略开发高性能抗菌材料开辟了新途径。

E10-P06

核磁共振水峰压制技术实现电解液中氨浓度定量检测

顾开智¹

1. 中南大学高等研究中心

核磁共振(NMR)波谱是有机化合物结构鉴定的常用工具,NMR 在测定分子结构时具有无损检测、灵敏度高、测试时间短等优点,广泛应用于化学、材料、药学、生物学等学科。但是,对于含有高浓度水溶液样品时,因水中氢原子会表现出极强的氢谱信号峰,对目标化合物氢谱信号产生干扰。水峰压制技术是通过预饱和法先对溶剂水进行连续波照射,此频段质子布局数差为零,能够有效抑制溶剂水的信号,以便更好地观察和研究目标化合物的信号,进一步提高核磁氢谱的信噪比和分辨率。电催化一氧化氮(NO)还原反应能够将有害物质 NO 转化成重要的化工原料氨,为清洁能源转换与存储提供一种极具应用潜力的途径。然而,在电催化还原合成氨过程中,电解液中氨浓度的定量检测是一项具有挑战性的工作。本工作我们采用核磁共振水峰压制技术对不同电位下电解液中还原产物氨进行检测,然后对化学位移 7.0 ppm 附近的三重峰进行积分,结合标准曲线,实现了电解液中氨浓度定量检测。本工作中合成的六边形紧密堆积钴纳米片(hcp-Co)催化剂在 NO 还原反应中表现出合成氨的产率为 $439.50 \mu\text{mmol cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$,法拉第效率为 72.58%。通过密度泛函理论计算和 NO 程序升温解吸实验表明,hcp-Co 催化剂具有优异的 NO 还原反应活性归因其独特的电子结构和质子穿梭效应。

E10-P07

长石表面化学修饰的表征与冰成核调控

梁美辰¹

1. 中南大学高等研究中心

沙尘气溶胶是大气中最丰富的冰的有效异质核,其中长石因其优异的冰成核活性而备受关注,探究其背后的机理对于揭示成核的本质具有重要意义。本研究以长石在自然界中最常见的(001)解理面为研究对象,通过表面化学修饰与多手段表征相结合的方法,探究了表面羟基对冰成核活性的调控机制。首先,基于格子双晶特征,采用反射偏光显微镜进行初步筛选,并结合 X 射线衍射仪(XRD)结构分析,确定了长石的(001)解理面。利用 X 射线光电子能谱(XPS)对氟硅烷修饰前后长石解理面的表面成分演化进行分析,确定了取代程度与反应时间正相关。结合接触角测量仪(CA)对表面润湿性进行表征,可以确定反应时间为 12 h 时,表面羟基被完全取代,实现了对表面羟基的调控。原子力显微镜(AFM)形貌表征进一步表明,修饰前后表面粗糙度变化小于 1 nm,有效排除了形貌改变对冰成核的干扰。通过关联长石表面化学状态与冰成核温度发现:羟基的存在可以有效促进冰成核,氟化修饰使冰成核温度降低,完全氟化后表面的冰成核温度明显降低约 9.0℃。本研究通过表面化学定向修饰与多手段表征相结合,定量揭示了长石解理面羟基作为冰成核活性位点的重要作用,为异相成核机理研究提供了新的思路。

E10-P08

全无机钙钛矿晶相演化过程中的结晶行为分析

王豆蓉¹

1. 中南大学高等研究中心

全无机钙钛矿具有优异的光电性能和光热稳定性,已在多项光电应用中得到广泛报道。尽管如此,由于全无机钙钛矿原子构型的多样复杂性,其内在的结晶动力学机制研究尚不完备。然而,其前驱体的浓度敏感性和溶解度差异阻碍了对全无机钙钛矿结晶行为的调控。在此,采用分步结晶方案对 Cs 基和 Pb 基前驱体卤化物盐实现任意比例及组分调节,有效调控了全无机钙钛矿的原位自组装结晶过程。同时,采取非原位相变追踪方式对全无机钙钛矿自组装结晶机制进行了系统探究,从微观角度提出了 Cs-Pb-Br 体系钙钛矿从 CsPbBr₃ (3D) 到 Cs₄PbBr₆ (0D) 的相转化机制。其中,傅里叶红外变换光谱 (FTIR) 从化学角度揭示钙钛矿结晶过程的溶剂配位解离作用,扫描电子显微镜 (SEM) 和高分辨透射电子显微镜 (HRTEM) 清晰观测到了不同反应时间尺度下的晶面暴露,广角 X 射线散射 (WAXS) 和透射电子显微镜能量散射光谱 (TEM-EDS) 进一步揭示了薄膜内的全无机钙钛矿的晶相演化过程。结合理论计算,研究表明 CsBr 与 CsPbBr₃ 的 (111) 晶面比 (001) 和 (110) 面具有更强的相互作用能。最后,通过结晶优化调控策略构筑了柔性全无机钙钛矿发光复合凝胶,并采用稳态/瞬态荧光光谱 (PL/TRPL) 和万能拉力试验机分别研究了其优异的发光特性和机械性能 (拉伸应变>500%),同时兼容 DLP-3D 打印技术,可定制具有形状记忆功能的全彩立体发光结构。

E10-P09

Modulating Ductility and Strengthening Tradeoff through Grain Boundary Segregation to Secondary Phase in NbMoTaW-C High-Entropy Alloys罗光雄¹, 马运柱¹, 刘文胜¹, 梁超平*¹

1. 中南大学

High entropy alloys (HEAs) are a class of advanced materials that have garnered significant attention in recent research due to their exceptional strength, ductility, corrosion resistance, and other desirable properties. These properties are a result of the unique compositional characteristics of the alloys. In recent times, the benefits of trace doping of small interstitial impurities, such as oxygen (O), nitrogen (N), carbon (C), and boron (B), to the mechanical properties of HEAs have been well recognised. For instance, it has been demonstrated that oxygen enhances the strength and ductility of TiZrHfNb HEAs through the formation of oxygen complexes that are ordered in structure. This form of reinforcement, instigated by non-metallic elements that were formerly considered detrimental, introduces an additional dimension to the methods employed in order to strengthen and toughen HEAs. Nevertheless, the full exploitation of the potential of HEAs in this multidimensional reinforcement strategy remains a significant challenge. In this study, a strategy is proposed that integrates first-principles calculation and cluster variation method (CVM). This approach elucidates the intrinsic atomic behaviour of non-metallic elements C in NbMoTaW HEA. The precise control of the carbon fraction in the NbMoTaW-C1 and NbMoTaW-C20 alloys results in the manifestation of a transition from grain boundary segregation to secondary phase. These two alloys exhibit a superior combination of strength and plasticity in comparison to all existing NbMoTaW-based alloys.

E10-P10

稀土改性铝合金 MgZn₂ 相耐腐蚀性能的电子机理研究曹宇轩¹, 马运柱¹, 刘文胜¹, 梁超平*¹

1. 中南大学

本研究基于第一性原理计算,系统评估了十七种稀土 (RE) 元素掺杂对 AA7085 铝合金中纳米 η 相 (MgZn₂) 耐腐蚀性能的影响,并深入探究了 RE 元素 f 电子在耐腐蚀电子机理中的作用。透射电子显微分析表明,RE 元素主要取代 η 相晶胞 $z = 1/4$ 原子层中的 Zn 原子,且在 η /Al 相界面处呈现最高浓度。据

此, 构建 RE 取代[0001] η 相的表面模型及[0001] η // [111]Al 界面模型, 计算其功函数等表面参数并进行电子结构分析。结果表明, RE 取代 η 相中的不同位点将改变系统结构的电子结构, 从而表现出不同的功函数, 在此基础上, 本文比较 η 相与 Al 基体间相对大小差值 ($\Delta \Phi$) 后发现, 功函数差大的稀土金属掺杂导致腐蚀速度增加, 功函数小造成腐蚀速度降低。进一步的键合电荷密度与势阱分析揭示, 不同 RE 元素与 Mg、Zn 原子间的特异性电子相互作用是影响合金耐腐蚀性能的关键因素。

仅发表论文

E10-PO01

气凝胶材料及制品全流程性能评价技术研究

刘佳¹

1. 中国国检测试控股集团股份有限公司

气凝胶材料具有轻质、耐高温、超疏水、A 级不燃烧等特性, 气凝胶制品是高温窑炉、建筑节能等领域减碳降耗用关键核心材料。随着双碳目标的推进, 在规划实现碳达峰碳中和的路径中, 绝热节能是最重要的组成部分, 碳达峰、碳中和的目标给了气凝胶绝热节能材料较大的施展空间。但由于目前气凝胶材料制备成本高、适应性产品和应用技术缺乏, 严重制约了其在建材、建筑领域的规模化应用, 特别是气凝胶制品的综合评价技术手段缺失, 无法满足气凝胶材料制品全流程性能评价技术面向气凝胶材料支撑双碳目标的内涵要求及工程化应用需求, 以及基于建筑节能用气凝胶复合材料“质量符合性-服役稳定性-绿色低碳性”等应用需求, 因此, 统筹考虑其“质量符合性-技术稳定性-服役适用性-绿色低碳性”等多维属性, 研究气凝胶材料基于全生命周期的、覆盖“质量-技术-服役-绿色低碳”的全流程全性能综合评价技术, 建立典型气凝胶材料及制品的全流程全性能关键指标识别与量化赋值模型及评价指标体系。将为气凝胶新材料及制品的科学合理评价奠定理论支撑和技术依据, 进而支撑气凝胶新材料研发、生产、推广、应用, 促进气凝胶新材料产业高质量发展, 服务国家绿色双碳发展战略。

E10-PO02

气凝胶绝热制品绿色产品评价指标分析

任世伟¹, 刘佳¹, 黄梦迟¹, 马丽萍¹

1. 中国国检测试控股集团股份有限公司

气凝胶绝热制品因其优异的导热性能和环保特性, 成为绿色建筑与工业节能领域的研究热点。本文基于系统分析了气凝胶绝热制品的绿色产品评价指标, 涵盖资源消耗、能源效率、环境排放及产品质量等方面。研究表明, 气凝胶制品因其超低导热系数显著降低了使用阶段的能源损失, 从全生命周期考虑, 较传统绝热材料(如岩棉、聚苯乙烯)减少能源消耗 20%~30%。此外, 通过优化原材料选择和制备工艺, 可进一步降低环境负荷。评价指标体系的构建需综合考虑性能参数(如导热系数、抗压强度)、环保属性(如无毒、可回收性)及经济可行性, 以推动气凝胶制品在绿色低碳领域的规模化应用。本文为气凝胶绝热材料的绿色认证标准制定提供了理论依据和技术参考。

E10-PO03

Study on the microstructure and properties of K444 superalloy

Kehan Wu^{*1}, Xiuping Ma¹, Ailan Li¹, Huaxia Zhang¹, Yali Zhang¹, Yu Meng¹

1. BAIMTEC MATERIAL CO., LTD.

The microstructure of K444 superalloy is characterized by a γ matrix as the primary phase, along with coarse γ' precipitates, ($\gamma + \gamma'$) eutectic structures, and both intragranular and grain boundary MC-type carbides. These microstructural constituents critically influence the alloy's mechanical performance, particularly under

high-temperature conditions. A detailed investigation was conducted to examine how chemical composition adjustments during the remelting process affect phase formation, distribution, and stability. Results indicate that optimizing the concentrations of key strengthening elements can refine the γ' precipitates, control carbide morphology, and suppress detrimental phase formation. Consequently, the modified K444 alloy exhibits enhanced high-temperature strength, improved creep resistance, and superior microstructural stability, leading to prolonged service life in extreme environments like gas turbine engines, where high temperatures, mechanical stress, and oxidation are major challenges. This study provides valuable insights for tailoring superalloy compositions to achieve optimal performance in demanding industrial applications.