

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

C12-兵器材料科学与技术
C12-Ordnance Material Science and Technology

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C12 兵器材料科学与技术

分会主席：潘洪革、朱秀荣、魏化震、陈建

C12-01

轻质高性能金属基复合材料制备科学

张荻¹

1. 上海交通大学

轻质高性能金属基复合材料是支撑国家空天、国防等高端装备的关键材料之一。如何创制出轻质高性能金属基复合材料的关键要素是要研究和解决增强体与金属基体的复合界面。本报告主要研究了金属基复合材料中两大类复合界面，即非共格界面、共格界面的调控，以及界面结构对复合材料性能的影响规律，并在基础研究的指导下，创制了一系列轻质高性能 Al、Ti 基复合材料。这些轻质高性能金属基复合材料支撑了我国空天及国防的集成创新发展。与此同时，针对金属基复合材料的强韧倒置难点，初探了如何从能量耗散的全新视角，研究设计和制备新一代高强韧金属基复合材料。

C12-02

轻质高温电磁功能隔热陶瓷

成来飞¹

1. 西北工业大学

随着高超音速飞行器与先进雷达系统的快速发展，航空航天热结构件对材料的功能集成性提出更高要求，亟需兼具高温隔热、电磁吸波或透波性能的轻质多功能陶瓷材料。本报告系统介绍了面向航空航天应用的电磁功能-高温隔热一体化微纳陶瓷材料的最新研究进展与设计策略。

报告聚焦于 SiC 及氮化物基微纳陶瓷材料，开展了吸波-隔热与透波-隔热两类材料体系的多尺度结构与组分协同设计。在吸波-隔热体系中，通过对定向 SiC/SiOCN 纳米纤维薄膜和层状 SiC 纳米线泡沫的结构优化，实现了高温下优异的宽频吸收性能与热屏蔽性能。在透波-隔热体系中，基于 SiON 微纳纤维和 Si₃N₄/BN 气凝胶等多级孔隙结构设计，有效提升了材料的透波效率与隔热能力，部分样品在 1200℃ 环境中仍具低介电损耗和优异的热阻性能。

本研究展示了多功能一体化陶瓷材料在电磁调控、界面工程和高温热管理等方面的显著潜力，为高超声速飞行器、雷达天线罩和隐身蒙皮等先进热构件提供了关键材料支撑。

C12-03

声学新材料：原理与应用

陈延峰¹

1. 南京大学固体微结构物理全国重点实验室，现代工程与应用科学院&材料科学与工程系

具有人工微结构的声学超材料为发展新型声学材料提供了新理论，为解决传统声学材料无法克服的难题提供了颠覆性新材料。通过人工微结构对声子的能带结构、拓扑结构进行设计和剪裁，人们发现了一系列超越传统声学材料的新效应。本文报告我们在这一领域所做的工作：1、发展了声子能带理论，实现了声双负折射、声二极管和亚波长自准直等新效应；进一步发展了声拓扑能带理论，人工声自旋概念并研制出一系列拓扑声学材料，开拓出拓扑声学新领域。2、通过人工智能设计优化声学微结构并制造出低频宽带、轻薄强韧的吸声降噪材料；3、为了表征声学超材料的声学性能，自主研制出高精度声场探测仪，频率覆盖 1Hz 到 109 Hz，为声振工程提供了先进和通用的仪器。所发展的声学超材料与技术被应用于大飞机、高铁列车、特高压电站及航空航天航海动载具等装备，解决了这些装备中噪声振动治理的重大需求。

C12-04**金属—氢（氘）相互作用的 PCT—ND 实验装置的研制**孙大林¹

1. 复旦大学材料科学系

由于氢同位素是最轻的元素，一般的实验手段对其只能做到间接测量，不能直接观测。实现对材料中氢同位素行为的精准表征和分析，意义重大。本实验装置以中国工程物理研究院绵阳研究堆的高分辨中子衍射仪为基础，设计并研制出能够实现原位和实时观测材料中氢(氘)行为的实验装置，旨在准确揭示不同温度和压力条件下氢(氘)致材料构效关系的变化规律，为研究与氢(氘)相关的结构材料 and 功能材料提供先进的实验技术。

C12-05**新质生产力与新材料技术发展分析**魏化震¹

1. 山东非金属材料研究所

新材料是现代科技革命和产业变革的重要驱动力，是支撑高端制造、信息技术、新能源、生物医药等战略性新兴产业发展的物质基础。随着全球科技竞争加剧，新材料技术已成为各国抢占未来制高点的关键领域。围绕新质生产力的发展需求，将系统分析新材料在现代社会与文明进步中的核心作用，探讨重点新材料领域的发展定位及关键技术方向，并结合我国新材料产业发展现状，提出推动技术创新的思考与建议。

C12-06**先进金属材料剪切带理论与应用探索**戴兰宏¹

1. 中国科学院力学研究所

剪切带是一类广泛存在于自然和工程的塑性变形局部化失稳现象。本征上，具有特征厚度的剪切带也是一种远离热力学平衡的材料系统内部多种速率相关的耗散过程非线性耦合作用催生的耗散结构。其中最令人困惑和迷人的问题是：具有特征厚度的剪切带是如何从材料系统涌现 (emerging)? 剪切带的出现往往预示固体介质破坏前兆，因此剪切带一直是力学、材料等多学科交叉共同关注的重大课题之一。剪切带经百余年研究形成了最具代表性的热塑剪切带理论，取得具大成功。然而，由于不考虑材料微结构效应与物质耗散（传输）效应，这一经典理论面对众多蕴含微纳结构的新型金属材料 and 新技术剪切带问题时，遇到前所未有的挑战。针对此挑战，报告人及团队进行了二十多年探索，系统建立了金属材料剪切带新理论。主要包括：与热塑剪切带理论热软化主控机制截然不同的原子尺度自由体积软化主控的非晶合金剪切带新理论、应变梯度驱动金属复合材料剪切带形成的新机制、金属高速切削周期涌现剪切带理论。这些理论创建可以清楚展示材料内禀微纳结构效应及原子尺度与连续尺度物质耗散（传输）过程是如何出人意料地参与动量（粘性）和能量（热）的耗散竞争，进而深刻影响甚至颠覆剪切带涌现机制的。报告还将介绍基于剪切带的调控与利用在解决国家重大需求方面所进行的应用探索。

C12-07**兵器关键材料现状与发展趋势**朱秀荣¹

1. 中国兵器工业集团第五二研究所

本报告聚焦兵器关键材料从三个方面进行了较为全面的论述。一是兵器材料体系介绍，简述防护、行动、动力、火力、轻武器、弹箭和防化器材等八类特色材料类别、功能和主要材料种类。二是兵器金属材

料发展现状，介绍了难熔金属材料、装甲防护材料、轻合金材料、功能材料、腐蚀与防护材料、焊接材料与工艺、增材制造材料与工艺和超常规失效分析与性能表征等九方面材料的基本情况。三是兵器材料技术发展趋势，介绍了轻量化、强防护、高毁伤、极端工况、信息化和高可靠性等装备发展方向对材料技术的需求。

C12-08

多功能材料的构筑

张湘义¹

1. 亚稳材料全国重点实验室，燕山大学

永磁材料是高新技术和国防装备发展的战略性材料。本报告报道一种多级有序纳米结构（HNS）的设计策略，来制备多功能永磁材料。我们采用 HNS 策略，在二元铁磁合金中引入高密度的界面（晶界和层错）和局域原子有序错排，激活了多种微观机制来同时阻止磁畴壁的移动和电子输运，成功突破了永磁材料的多个性能冲突。实验发现了多功能铁磁体。该磁体同时具有高的磁能密度、高的电阻率和高磁热稳定性。我们的 HNS 设计理念具有普适性，为下一代多功能材料的发展和极限性能探索提供了一个新的理念和方向。

C12-09

人体防护技术与高性能有机纤维抗弹复合材料发展态势

翟文¹

1. 山东非金属材料研究所

本报告通过剖析人体防护技术的内涵，梳理现行防护装备标准体系，探讨人体防护装备用基础原材料及设计制造技术，总结当前研究与应用现状，并展望了高性能有机纤维在人体防护装备用抗弹复合材料领域的应用研发趋势，为推动人体防护材料与技术的创新发展、优化装备性能提供理论与实践参考。

C12-10

Spatiotemporal Evolution of Defects in an Additively Manufactured Alloy Monitored through in-situ X-ray computed tomography

丁向东¹

1. 西安交通大学

In-situ X-ray computed tomography (XCT) offers a versatile method for investigating the evolution of defects within materials under loading. It has been used to explore failure mechanisms of materials through the global information of all defects or typical defects. However, these insights often fall short in capturing the evolution of individual defects at each failure progression. Herein, we provide a method for tracking each individual defect from their initial state to the point of fracture, to study their detailed evolution as a function of the tensile strain. Our tracking approach represents defects as 3D point clouds and evaluates their morphological similarity with an emphasis on their local environmental similarity. This significantly improves the average tracking accuracy, compared to the existing method. Moreover, we reconstruct the fracture topology tree using the tracking outcomes so that the original critical defect leading to ultimate fracture can be located. The proposed method enables accurate detection of the evolution of each individual defect in materials from both temporal and spatial dimensions.

C12-11

高性能 Cu-Ni-Mn 合金的组织 and 性能调控

翟薇¹

1. 西北工业大学

Cu-Ni-Mn 合金具有高强、耐腐蚀、耐高温等优点，是广泛应用于海洋工程、火箭发动机燃烧室、电磁炮等领域的重要材料。本文研究了超声凝固结合热处理对 Cu-20wt.%Ni-20wt.%Mn 合金组织和性能的调控规律。超声瞬态空化显著促进了初生 α -Cu 相形核，使其从粗大枝晶转变为细小等轴晶，晶粒尺寸从静态凝固下的 1378 μm 减小至 42 μm 。声流效应促进了凝固过程中的溶质传输，使得等轴晶内 Ni、Mn 溶质分布更加均匀，超声对半固态的高频振动则增大了铸态组织的位错密度。热处理过程中，更高的位错密度提供更多析出位点，更均匀的溶质进一步促进其生长，在等轴晶内得到了细小均匀弥散的 θ -MnNi 析出相。

超声凝固结合热处理使得 Cu-20wt.%Ni-20wt.%Mn 合金的抗拉强度和延伸率达到 1345 MPa 和 3.6%，分别为静态条件下的 1.6 和 4 倍，优于已报道文献中同成分合金轧制后的性能指标。超声作用下初生 α -Cu 相的细晶强化和更多且更细小的 θ -MnNi 相析出强化使合金强度显著提升，同时更均匀的塑性变形应力分布使得变形孪晶更容易被激活，从而协同提高塑性延伸率。本研究为制备高性能 Cu-Ni-Mn 合金提供了一种免轧制处理的新思路。

C12-12

活性毁伤战斗部合金材料研究

程兴旺¹

1. 北京理工大学

近年来，世界各国均在大力发展活性毁伤战斗部合金材料，由此催生出新型毁伤技术，正在形成新质战斗力。活性毁伤战斗部合金材料集传统战斗部合金高强度和高能量释放双重优势于一身，由该材料制备而成的活性毁伤战斗部击中目标时，不仅能产生动能侵彻贯穿毁伤作用，又能发挥靶后二次杀伤和引燃引爆效应，从而实现战斗部威力大幅度提升。本报告重点介绍北京理工大学冲击环境材料技术国家级重点实验室在这一领域开展的研究工作。

C12-13

嫦娥 5 号月壤玻璃的稳定性问题实验研究

张博¹

1. 松山湖材料实验室

玻璃被认为是气、液、固之外的第四态物质，对人类社会发展和科技进步起着至关重要的作用，其应用关系到我们日常生活的方方面面。玻璃是热力学不平衡状态物质，其在玻璃化转变温度以下会不可避免地朝平衡态转变，即发生物理老化（以下简称老化），导致其结构和性能随着时间的推移而转变，直接影响玻璃的稳定性。尤其是玻璃的长期抗老化效应，关系到玻璃的能态下限以及相应的结构和性能极限，更是人们关注的焦点。基于嫦娥 5 号任务带回来月壤样品，我们研究发现，月壤玻璃的长期老化效应均非常显著。通过纳米压痕实验发现，这些月壤玻璃颗粒老化所致杨氏模量的增量高达几十个百分点（其中最大增量高达 73.5%），在其他玻璃体系中还从未报道过如此严重的老化效应。令人惊奇的是，这些经历百万年以上老化的玻璃，仍然保持玻璃的结构和特性。研究还发现，在这些月球玻璃颗粒中观察到不同程度的杨氏模量和硬度之间的解耦现象，即老化虽然导致杨氏模量显著增加，其硬度变化却相对较小。通过对比不同玻璃体系在不同时间尺度下的老化效应，揭示月球玻璃的超凡抗老化效应主要归因于其在特殊的月球环境下自然选择的复杂成分。这项发现也证明通过多组分混合和适当微量元素的掺入，可以有效增强玻璃抵抗老化的能力，从而增强其抗老化效应和稳定性，研究结果为面向辐射防护和空间应用的高性能玻璃材料

的研发和性能调控提供指导和帮助。

C12-14

装甲装备新威胁及防护材料应用与发展浅析

郑威¹

1. 中国兵器工业集团第五三研究所

分析了近期世界冲突条件下地面装甲装备面临的新威胁特点,给出了十余类威胁的毁伤条件、机制和能力,同时也给出了当前对抗这些威胁的基本防护手段、关键防护材料以及在装甲装备的应用情况。讨论了未来装甲防护材料的发展趋势。

C12-15

锂金属负极固态电池的界面设计与性能

何平¹

1. 南京大学

全固态锂电池采用固态、不挥发、不易燃电解质代替传统的有机液态电解质,在开发高能量、安全、宽温度范围的储能器件方面具有很大的优势。然而,在这类电池中电解质/电极材料的界面出现的化学/电化学不稳定性、接触阻抗大、机械应力失效、空间电荷层等问题限制了电池系统的实用化。本报告介绍了近年来本课题组针对以上固态电池普遍存在的科学问题所开展的固-固界面组成、结构设计和输运机制的研究,包括无碳无粘结剂的锂合金固态负极,金属锂表面 SEI 层原位构筑,固-固界面的限域溶解化学机制,固-固界面空间电荷层对锂离子输运特性影响的观测以及固-固界面光热增强效应。这些工作在很大程度上加深了人们对固固界面输运过程的理解,提升了金属锂基负极全固态电池的容量的界面稳定性。

C12-16

水系多价金属离子电池共晶合金负极材料

郎兴友¹

1. 吉林大学

以金属离子电池为基础的电化学能量存储技术是我国下一步优化能源消费结构、保障可再生资源广泛应用和新能源汽车快速发展不可或缺的战略选择之一。尽管锂离子电池是目前技术最成熟、商业化最成功的金属离子电池,占据着当前主要的新能源市场,却因锂资源有限、价格日益剧增等不可持续性问题和高毒性、易燃性有机电解液所引发的安全性等问题远不能满足未来大规模能量存储领域的应用需求。亟待基于低成本、高丰度元素发展高安全的新型能量存储技术(如水性多价金属离子电池),为光伏和风电等间歇性可再生电能规模化存储和汽车电动化发展等新兴应用提供可行性解决方案。本报告针对水性锌离子电池和铝离子电池因锌、铝等金属负极可逆性低所导致的倍率特性差、循环寿命短、库伦/能量效率低等问题,基于共晶合金设计,提出导向性金属剥离/电镀抑制枝晶生长,局域电偶对增强离子扩散动力学和构建薄人工固态电解质膜抑制副反应等策略,发展高可逆锌基和铝基金属负极材料,为发展高性能水性锌/铝电池提供新思路。

C12-17

面向氢电集成的光解水材料与器件

李炫华¹

1. 西北工业大学

航空航天等特需领域对原位协同供应氢能和电能具有迫切需求，报告人围绕高效光解水材料界面、表面及器件开展研究，旨在探索太阳能同时转换为氢能和电能的氢-电集成新路径。报告主要包括三个研究内容：（1）设计了界面强耦合的硫化物基异质结材料，激发了具有超常规量子效率的多激子效应，促进了载流子高效分离。（2）厘清了硫原子局域电子密度和表面氧化势垒之间的反向调控规律，提出了无定形诱导的阳离子位氧掺杂策略，缓解了硫化物材料光腐蚀难题。（3）构筑了“光解水与光热氧化还原电池”多功能集成新器件，建立了催化产氢-温差发电的工作准则，实现了氢-电集成与协同增强，为特需领域氢-电双重需求提供了关键材料。

C12-18

钠电池负极材料的分子设计与界面调控

徐飞¹

1. 西北工业大学

钠电池具有资源丰富、成本低廉以及与锂离子电池生成工艺兼容等优势，得到了学术和产业界的关注。负极材料是决定钠电池性能的关键因素之一。硬碳材料因其结构特征更适合存储半径较大的钠离子，是目前最具实用化前景的储钠负极材料。另一方面，以沉积/剥离的高容量钠金属负极构建的钠电池被认为是最具潜力实现高比能的储能器件。然而，由乱层堆垛的类石墨微晶层构成的硬碳存在大量本征缺陷与微孔，造成初始库伦效率（ICE）较差且无法提升低电压下的平台容量。钠金属负极由于枝晶生长、体积膨胀导致“死钠”产生和不稳定 SEI 膜，从而造成活性钠利用率低、循环稳定性差等问题。基于此，本报告提出交联桥分子调控、异质微结构及催化微晶策略构筑低缺陷、富闭孔的硬碳负极材料，解决 ICE 和低电压下的平台容量低的问题。进一步地，构建了系列空心球内封装高活性纳米颗粒材料，通过调控亲钠单原子/纳米颗粒在壳层-空腔的定向分布，诱导金属钠沿设计位置与方向可控形核与生长，解决了钠金属负极高循环容量、高放电深度、长循环寿命难以兼得的问题。此外，发展了系列二维富碳框架界面层，实现高亲钠性及极低的活性钠消耗，解决了亲钠性与钠消耗不可兼得的问题，实现了自生成钠负极的无枝晶与长循环的钠电池。

C12-19

Ti/x 双金属层状复合材料的制备与界面控制

何维均¹，田雨禾¹，贾顺杰¹，蒋斌¹

1. 重庆大学

现代工业对金属材料的性能提出了越来越苛刻的性能要求，单一的金属材料时常难以满足多种性能要求。双金属层状复合材料可以在一定程度上综合两种金属的特性，进而实现优异的综合性能，为提升装备性能奠定基础。围绕装备对耐磨高强韧、低成本耐蚀高强、轻质高强韧等苛刻性能的要求，通过扩散复合、热轧复合等，本研究开展了钛/硬质合金、钛/钢、钛/铝等双金属层状复合材料的制备研究，并通过优选中间过渡层、优化复合工艺参数、设计新型界面形貌等改善层间结合性能。钛/硬质合金和钛/钢双金属层状复合板材之间界面剪切强度可达到 160MPa 和 240MPa，钛/铝双金属层状复合材料的塑性优于所有组元材料，并制备加工出双金属层状复合构件，在相应装备中开展测试评价。

C12-20

SHPB 冲击加载下含能高熵合金的能量释放行为及微观变形机理研究

郭寻¹, 眭明斌¹, 邢飞¹, 王本鹏¹, 薛云飞¹

1. 北京理工大学

含能高熵合金由于兼具优异的力学性能与较高的能量密度,可以在冲击加载过程中通过燃烧反应释放大热量,是一种理想的战斗部用结构材料。但含能战斗部毁伤性能的评价不仅取决于其动能侵彻能力,还应考虑其燃烧释能后对目标的二次毁伤,因此必须通过高速冲击毁伤实验才可以确定其服役性能。然而传统的冲击毁伤实验方法一方面成本高、风险大、周期长,另一方面难以对加载过程中材料的微观变形及其与冲击释能的关联机理开展深入研究,极大地提高了战斗部用含能结构材料的设计研发、改进优化等方面的难度与成本。鉴于此,本研究建立了一种基于 SHPB 装置的冲击-释能耦合效应定量测试方法,实现了动态加载过程中含能结构材料微观变形、破碎温升与燃烧释能的同步测量,揭示了合金中微观组织结构对冲击变形与失效过程的影响机理。本研究为含能结构材料服役性能的定量评价提供了一种快速、低风险、低成本的解决方案。

C12-21

激光加热耦合电磁悬浮作用下 W-Nb-Zr 合金的单晶生长及力学性能

刘克伦¹, 杨明辉¹, 李浩然¹, 阮莹¹, 魏炳波¹

1. 西北工业大学

钨基难熔合金因其极高的熔点、优异的热力学稳定性及抗辐照性能,在核聚变、航天与高能物理等领域中展现出重要的应用前景。然而,传统的合金制备方法存在显著局限性:电弧熔炼过程中易出现成分偏析和组织不均,粉末冶金虽能实现细化和成分均匀,但易引入孔隙和裂纹,削弱高温力学性能。近年来,无容器材料制备技术发展为钨基难熔合金的研究提供了新途径。通过耦合高功率激光局域加热提供超高能量密度,可有效克服传统电磁悬浮技术对难熔合金加热不足的问题,实现其深过冷和快速凝固调控,进而优化显微组织和力学性能。本文采用激光加热耦合电磁悬浮技术实现了 W40Nb30Zr30 难熔合金在深过冷条件下的快速凝固。合金微观组织主要由初生枝晶(W)相和枝晶间(β Zr)相组成。在快速凝固条件下,获得的最大过冷度为 645 K(0.23TL),对应初生(W)相的最大生长速度为 $4.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当过冷度超过 409 K 时,初生相的生长速度出现突增,表明晶体生长行为发生了由多晶向单晶的转变。与电弧熔炼样品相比,在 310 K 过冷度时合金拉伸强度提高了 102%。断口形貌和 EBSD 分析揭示了合金的混合断裂机制:(W)相发生解理断裂, (β Zr)相呈韧窝断裂特征。力学性能提升归因于悬浮条件下(W)相的均匀分布以及快速凝固引起的高角度晶界比例增加。该研究证实了激光加热耦合电磁悬浮技术在调控钨基难熔合金微观组织和性能方面的潜力,并为高性能难熔合金的制备提供了新思路。

C12-22

钇稳定四方氧化锆改善修复陶瓷膜层脆性开裂,提高 AZ91D 镁合金的耐腐蚀性

王爽¹, 陈永楠¹

1. 长安大学

氧化物陶瓷膜层对于提高镁合金的耐蚀性仍然具有挑战性,特别是膜层固有的脆裂特征。在钇稳定的四方氧化锆(YSTZ)/MgO 修复陶瓷膜层中,观察到明显的改善脆裂行为。这与 (101) t-ZrO₂ // (101) Y₂O₃ 共格界面和 (101) YSTZ // (111) MgO 半共格界面连续位错钉扎作用下稳定的特殊取向 YSTZ 晶粒有关。高质量的修复陶瓷膜层在长时间腐蚀浸泡后裂纹较少,有望为镁合金提供长期保护。

C12-23**铝基复合材料结构设计及装甲防护应用**晁振龙¹, 姜龙涛¹, 陈国钦¹, 武高辉¹

1. 哈尔滨工业大学

随着反装甲武器技术的高速发展, 武器装备的战场生存能力对装甲结构材料性能提出了更高的要求。在车辆基体装甲大幅减薄、抗冲击毁伤能力显著降低的不利条件下, 装甲车辆的防护指标要求进一步提升。由陶瓷、纤维和金属等多组元材料组合形成的陶瓷复合装甲结构由于各层材料性质差别大、层间声阻抗失配严重以及高分子材料的存在, 使得其抗多发弹性能和耐候性难以满足未来战场的发展需求。本研究以多尺度陶瓷相为增强体, 设计并制备了层状功能梯度和仿生阵列梯度两类高防护铝基装甲结构材料, 突破了相应材料的大尺寸、高品质和低成本模块化制备。抗弹性能结果表明, 铝基复合防护材料在实现减重 20% 以上的同时, 靶板损伤面积明显降低。仿生阵列梯度 B4C/Al 复合材料更是提升了装甲结构的耐候性, 使得装甲结构服役温度 $\geq 105^{\circ}\text{C}$ 。该研究为我国装甲材料和结构的升级换代提供了重要的技术和材料支撑。

C12-24**新型低成本装甲用 Ti522 钛合金板材**焦继军¹

1. 新疆湘润新材料科技有限公司

Ti522 钛合金是新疆湘润新材料科技有限公司自主研发的新牌号钛合金产品, 其采用与 TC4B 相近的 Al、Mo 当量, 保证产品具有优异的力学性能, 焊接性能和抗弹性能, 以求满足车体等典型装甲防护构件的使用要求。但按照传统工艺生产 Ti522 钛合金, 其生产成本相对较高, 有必要开发以下新技术降低其生产成本, 从而达到低成本制造。

(1) 使用廉价原材料(合金元素)的合金设计

Ti522 选用适当的 Fe 和 Cr 元素代替昂贵的 V 元素, 降低了钛合金生产过程中合金元素的成本。

(2) 回收料代替海绵钛和中间合金且易得

Ti522 铸锭选用 TC4、TA1、TA2、TA4 和钛-铝-钢回收料, 达到 100%使用回收料和添加中间合金的目的, 极大地降低了原材料成本。其次, 湘润科技钛加工材年产量超过 2 万吨, 回收料超过 6000 吨, 回收料易得且能够稳定供应。为精准控制铸锭化学成分, 公司内置两条回收屑料清洗生产线, 且具备抛丸酸洗、切分、焊接等能力, 可将不同状态的屑料和块状钛残料进行回收利用。

(3) 改性回收

Ti522 选用部分 O 元素代替 Al 元素, 保证产品具有塑韧性和强度的同时解决残料无改性回收及回收次数有限问题。

(4) 冷床炉熔炼(EB)+真空自耗电弧炉熔炼(VAR)

Ti522 铸锭由于原料的多样性, 熔炼时需采用 EB+1 次 VAR 熔炼, 可有效去除高密度夹杂、低密度夹杂, 提高铸锭成分均匀性, 确保铸锭质量。

综上, “添加回收料+廉价原材料代替+改性回收+EB+VAR 熔炼”的低成本制造技术, 通过廉价原材料代替、100%添加返回料、改性回收等手段降低原材料成本, 综合成本可降低 30%以上。

C12-25**Zr64.5Cu35.5 非晶合金的纳米摩擦学性能研究**贾茜¹

1. 西安工业大学

本研究基于原子力显微镜技术模拟摩擦过程中的单粗糙峰接触行为, 探究本征无序结构对 Zr64.5Cu35.5 非晶合金纳米摩擦学性能的影响机制。通过制备同成分的非晶态和晶态 ZrCu 合金, 选用惰

性金刚石探针（针尖半径~10 nm），利用原子力显微镜开展纳米尺度的摩擦学测试。结果表明，相较于晶态合金的不同取向，非晶合金的摩擦系数和磨损率均显著降低。第一性原理模拟计算表明，金刚石探针原子与非晶表面非周期性原子之间的较大非公度性促使其粘附摩擦显著降低。此外，非晶合金的高硬度和高弹性回复降低了犁沟系数并提高了耐磨性。这一发现阐明了非晶合金相较于晶体更为优异的纳米摩擦学性能，对于解释宏观摩擦现象及设计减摩抗磨合金表面具有指导意义。

C12-26

基于金属有机框架玻璃的固态电解质用于高性能锂金属电池

向阳¹，姜银珠¹

1. 浙江大学

传统的聚合物固态电解质（PSEs）因其离子电导率低、界面动力学缓慢以及存在潜在的安全隐患，严重限制了其在高性能能源存储系统中的实际应用。为克服这些挑战，本研究提出了一种创新的多孔金属有机框架玻璃凝胶聚合物电解质（PMG-GPE），采用自上而下的策略制备而成。该材料构建出一种独特的三维互联梯度孔径结构，不仅有效提升了离子传输效率，也增强了材料的结构稳定性和安全性。通过飞行时间二次离子质谱（TOF-SIMS）、固态⁷Li 魔角旋转核磁共振（MAS NMR）、分子动力学（MD）模拟及系统的电化学测试等多维度手段对材料的微观孔结构和离子传输性能进行深入分析，结果显示，当大孔比例适中（约 17%）时，可形成分散分布的“桥梁”，连接各个传输单元，从而大幅提升整体离子迁移速率。进一步地，借助该分级孔结构构建的交联离子传导网络，PMG-GPE 实现了高达 1.9 mS/cm 的优异离子电导率，为下一代高能量密度锂金属电池的开发提供了重要材料基础与理论支持。

C12-27

钠离子电池高熵普鲁士蓝正极材料的设计与储钠机理研究

钱喆¹，周永宁¹

1. 复旦大学

作为锂离子电池的潜在替代储能器件，钠离子电池近年来受到越来越多的关注，而高容量和低成本的优点使普鲁士蓝类似物成为钠离子电池非常有前景的正极材料。在各种普鲁士蓝类似物中，铁基和锰基普鲁士蓝表现出更优异的性能[1,2]。锰基普鲁士蓝具有较高的比容量，但其循环可逆性和容量保持性较差，这主要是由锰离子溶解和 Jahn-Teller 畸变造成的[3]。在无序多组分体系中，大的构型熵往往可以稳定晶体结构，传递高熵效应，即熵驱动的稳定和由阳离子混合引起的“鸡尾酒”效应，并促进其化学和结构多样性。最近的一些研究表明，在电极材料中引入高熵结构可以大大提升循环性能。

在本工作中，我们将六种不同过渡金属元素（Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn）引入了普鲁士蓝结构中，得到了一种具有高可逆性和结构稳定性的六元高熵普鲁士蓝类似物正极材料（H-PBA）[4]。这六种过渡金属元素共同占据了与氰基 N 端配位的点位，结构式为 $\text{Na}_x(\text{MnFeCoNiCuZn})_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 。研究发现，随着构型熵的增加，容量和循环稳定性均有显著提升。六元高熵普鲁士蓝在 5 C 倍率下的同步辐射原位 X 射线衍射（XRD）图显示，三个主峰（200），（220）和（400）在充电和放电过程中均没有明显的位移，计算得到其不同充放电态的晶格参数变化仅为 $\pm 0.05 \text{ \AA}$ ，在充放电过程中表现出“准零应变”的结构演化特征，我们进一步通过多种表征手段，揭示了该材料的储钠机理。本研究为钠离子电池高稳定性普鲁士蓝正极材料的设计提供了新思路。

C12-28

从表面吸附调控到双电层重构：锌离子电池界面优化的多尺度理论模拟与机制探究

夏宇凡¹，姜银珠¹

1. 浙江大学

水系锌离子电池的界面稳定性是决定其循环寿命的关键，但锌负极的枝晶生长与界面副反应问题仍未系统解决。本研究首次借助多尺度理论模拟平台阐明了氨基酸分子在锌金属表面的吸附动力学规律，发现分子平行取向和协同吸附位点可以有效稳定表面吸附，为界面保护设计提供了理论准则。在此基础上，通过耦合量子化学计算、第一性原理计算、分子动力学模拟与实验验证，解析了双电层（EDL）微观结构与电池性能的构效关系：揭示 Helmholtz 层内水分子和硫酸根阴离子富集是引发析氢与副反应的根源，进而提出“定向吸附-双电层重构”协同策略。通过引入三氯蔗糖添加剂构建“贫水-排阴离子”界面，使 $\text{Zn}||\text{Zn}$ 对称电池在 1 mA cm^{-2} 下实现超稳定循环 ($>4,700$ 小时)，并在 $\text{NaV3O8} \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ 基全电池中循环 800 次，容量保持率高达 90.4%。该研究建立了从分子吸附调控到双电层优化的完整理论框架，为高性能锌离子电池设计提供了跨尺度研究方法论。

C12-29

基于含氧官能团的钠离子电池硬碳负极的结构调控和储钠性能研究

贺宇霏¹，吴仁兵¹

1. 复旦大学

在现代化战争背景下，新型武器系统、海陆空作战平台及后勤保障环节对储能技术提出了高效稳定、高环境适应性与可持续性的要求。然而传统的锂离子电池存在低温失效与战略资源依赖风险。钠离子电池作为一种新兴储能技术，具有宽温域工作稳定性、高安全性、优异的快充性能及低成本等优势，在智能化军事装备中的应用前景广阔。硬碳被认为是最具应用潜力的钠离子电池负极材料之一，但其成分-结构-性能之间的关联机制尚未完全明晰，亟需深入研究以推动高性能硬碳负极材料的开发与应用。在本工作中，通过不同含氧量的前驱体在不同温度下构建了一系列具有含氧量的硬碳。利用高分辨透射电镜、中子全散射和软 X 射线吸收谱等表征手段，分析了硬碳的微观结构和成分组成，并结合电化学测试建立了含氧官能团、微观结构和储钠性能之间的关联性。研究发现硬碳中的羰基（ $\text{C}=\text{O}$ ）和羧基（ COOH ）分别能促进类石墨层曲率的增大和类石墨晶的 c 轴方向的生长，从而构建闭孔结构以提高平台区容量；而醚键（ $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ）的含量与类石墨晶的平均长度有关。当硬碳中含有较少的 $\text{sp}^3\text{-O}$ ，适量的 $\text{C}=\text{O}$ 和较多的 COOH 时，可实现可逆比容量和首次库伦效率（ICE）的共同提高。基于此，进一步结合掺杂、结构优化和复合材料策略，以核壳结构 $\text{ZIF-8}@\text{ZIF-67}$ 作为前驱体，引入简便的预处理，制备了原位耦合碳纳米管的氮氧双掺杂硬碳。由于预处理促进了热解过程中 NO 的释放，硬碳的层间距扩大、介孔减少，且促进了吡啶 N 和 $\text{C}=\text{O}$ 的生成。该硬碳材料可以实现 389.4 mAh g^{-1} 的高可逆比容量和 98% 的 ICE。

C12-30

调控负极-电解液界面实现高可逆锌金属负极研究

罗祯¹，姜银珠¹

1. 浙江大学

使用有机电解液的锂离子电池是目前应用最为广泛的可充电电池，但高昂的锂矿价格以及有机电解液的易燃性和毒性阻碍了其在大规模储能领域的应用。相比之下，以锌金属为负极的水系锌金属电池由于其价格低廉、高安全以及对环境友好等特点而表现出巨大的发展潜力。尽管如此，在实际工作中锌金属负极也面临着诸如枝晶生长、副反应以及化学腐蚀等问题，因而限制了其进一步发展。这一系列的复杂过程都是发生在负极-电解液界面上的，因此解决上述问题的关键在于界面。在锌的沉积过程当中主要包括三个过程，分别是液相传质、电还原和电结晶。在水系电解液中，锌离子往往会与六个水分子结合形成六水合锌离子的溶剂化结构，并从体相电解液迁移至电极表面，其快慢主要取决于电解液的离子电导率。当六水合锌离子到达电极表面附近的双电层时，需要先进行去溶剂化过程，当水分子完全从锌离子的溶剂鞘内脱出后，锌离子捕获界面处的电子被还原成锌原子。后续锌原子克服形核能垒便开始聚集形核并生长。电还原和电结晶过程都与界面状态直接相关，因此我们后续的工作便以此为基础，通过调控界面状态来改善锌沉积过程。

首先是对界面的化学环境进行调控。我们选择了最简单的氨基酸——甘氨酸作为电解液添加剂，深入探究其中氨基和羧基对锌沉积的影响。结合实验和理论计算发现，氨基通过与锌原子的强化学吸附作用将甘氨酸牢固地锚定在锌负极表面，显著抑制了水分解带来的副反应；而电负性较强的羧基则通过相互作用促进锌离子的去溶剂化过程，均匀锌离子流从而诱导均匀沉积。基于这种协同“锚定-捕获”效应，构建了稳定的负极-电解液界面，实现了在较高放电深度下（DOD_{Zn}=68%）稳定循环的锌负极。

另一方面，锌金属的沉积/剥离可逆性取决于界面条件。我们以表面过电位作为重要指标，深入探究了微量虫草素的引入对锌金属成核生长的影响。结果表明，由于虫草素大分子的吸附，锌负极的表面过电位显著增大，降低了成核势垒，从而诱导了更均匀的细小成核过程；且虫草素巨大的空间位阻效应显著减缓了 Zn/Zn^{2+} 氧化还原反应动力学，避免了晶核的剧烈生长，最终实现了细晶式沉积/剥离模式。得益于此，锌负极的循环可逆性大幅提升，表现出了超高的库伦效率，并实现了软包电池的的稳定循环。

C12-31

原子级调控 Co@C 金属-载体相互作用实现高效微波吸收

王强强¹, 吴仁兵¹

1. 复旦大学

微波吸收材料对于现代战争中的武器装备电磁隐身及电子对抗具有重要战略意义。碳材料具有低密度和高导电性，在微波吸收方面展现出巨大潜力。然而碳材料电磁响应机理单一、吸收频段狭窄，需要对其进行改性以实现“薄、轻、宽、强”的微波吸收。将金属负载于碳载体表面，可以有效调控材料中电子的自旋、输运和极化行为，实现对电磁特性的精准调制。该策略的实施高度依赖于金属-载体相互作用的精细化调控。本工作中，我们基于 Zn/Co 双金属有机骨架（ Zn/Co -MOF）热解构建了 $\text{Co}@C$ 材料，通过精细调整 Zn/Co 比例，实现钴负载状态和碳结晶情况的精细调控。利用高分辨透射电镜、硬 X 射线吸收精细结构谱、拉曼散射光谱、X 射线光电子能谱等表征手段分析，发现随着钴含量增加，钴逐渐由单原子过渡为纳米晶，同时碳载体结晶度逐渐提高，这导致金属-载体相互作用变化。这一过程中，材料介电和磁特性发生连续演变，电导率逐渐升高，介电极化由偶极子极化向界面极化转变，磁性由顺磁性逐渐过渡为铁磁性。介电和磁特性的演变促进了材料对微波的介电-磁协同响应，优化的 $\text{Co}@C$ 材料微波吸收性能明显优于无钴负载的纯碳材料，最低反射损耗（RL）为 -55 dB，有效吸收带宽（RL < -10 dB）达 6.16 GHz。该工作对碳基材料中金属-载体相互作用调控以及高效微波吸收材料的开发具有重要意义。

C12-32

Activate 1-TM Channel of Disordered Rock Salts via Electrostatic Repulsion Regulation for Enhanced Lithium Storage

Huiqin Huang¹, Yinzhu Jiang¹

1. Zhejiang University

Cation-disordered rock-salt (DRX) has emerged as a promising high-capacity cathode material for next-generation high-energy-density Li-ion batteries. However, its practical deployment is hindered by intrinsic Li^+ diffusion mechanism, where only 0-transition metal (0-TM) channels permit feasible Li^+ migration while 1-TM and 2/3/4-TM channels exhibit prohibitively high Li^+ diffusion energy barriers. Here, we leverage electrostatic repulsion regulation to activate the 1-TM channel, which holds the highest potential for activation while constrained by restrictive tetrahedral site geometries, thereby introducing more Li^+ diffusion pathways and establishing a well-connected percolating 3D Li^+ diffusion network within the DRX lattice to fundamentally addressing the kinetic limitations of DRX. Systematic investigations reveal that in the optimized sample, the tetrahedral height of 1-TM channels increased significantly from 2.525 to 2.613 Å, concomitant with a volumetric expansion from 3.254 to 4.010 Å³, along with the Li^+ migration energy barrier significantly reduced from 1.48 to 0.26 eV. The enhanced Li^+ transport kinetics yield enhanced capacity (306 mAh g⁻¹ at 10 mA g⁻¹), alongside

superior rate capability ($\sim 200 \text{ mAh g}^{-1}$ at 100 mA g^{-1}). This work establishes a material design paradigm overcome transport bottlenecks in disordered cathode architectures.

C12-33

Synergistic solid-liquid hybrid electrolyte for cycle-stable and high-efficiency Li-CuCl₂ batteries

Qianqian Shen², Yinzhu Jiang^{1, 2}

1. Zhejiang University

2. ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center

The escalating demand for high-energy lithium-ion batteries has intensified interest in CuCl₂ conversion cathode, which offers exceptional theoretical energy density. However, its practical application has been severely hindered by rapid capacity decay, primarily due to active material dissolution and copper species crossover. Here, we propose a novel solid-liquid hybrid electrolyte system that integrates a solvation-tuned liquid electrolyte (8 M LiFSI/DME) with a Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄)₃ (LAGP) ceramic electrolyte to address these dual degradation pathways. This strategy can effectively suppress the dissolution of CuCl₂ due to confinement of solvent molecules within Li⁺ solvation sheaths coupled with physical barrier blocking, while simultaneously maintaining favorable Li⁺ transport kinetics across the solid-liquid interface. Meanwhile, the LAGP ceramic electrolyte also functions as an ion-selective barrier, effectively inhibiting Cu species migration and significantly mitigating shuttle-induced lithium corrosion. Consequently, the Li-CuCl₂ battery with this hybrid electrolyte achieves remarkable cycling stability, maintaining 77.9% capacity retention over 400 cycles at 0.5 C. Additionally, it demonstrates a record-high energy efficiency of 95.8% and delivers a practical energy density of 806.6 Wh·kg⁻¹ based on the total cathode mass. The reported results demonstrate that the hybrid electrolyte is a powerful strategy for conversion-type metal chloride to achieve excellent electrochemical performance in lithium-ion batteries.

C12-34

基于深度学习的金属离子电池电极电压预测与材料筛选研究

蔡振坤¹, 吴仁兵¹

1. 复旦大学

在现代战争智能化、高机动化的发展背景下, 前沿作战装备、无人平台及极端环境保障系统对储能装置提出了高能量密度、高稳定性与快速响应等综合性能要求。金属离子电池因其资源丰富、成本可控、体系多样等优点, 在军事能源系统中展现出重要的应用潜力。然而, 电池性能高度依赖于电极材料的电压等核心参数, 传统材料筛选方法普遍存在周期长、效率低的问题, 制约了新型材料的快速开发。本研究提出一种融合残差网络与多头注意力机制的深度神经网络架构 (MHA-ResNet), 用于多种金属离子电池 (如 Li、Na、K、Y、Mg 等) 电极材料平均电压的高精度预测。模型从 Materials Project 数据库中构建包含丰富电化学信息的数据集, 结合材料组成、电荷/放电晶体结构、空间群等特征, 通过嵌入层编码、独热编码与主成分分析 (PCA) 实现高效特征提取与降维处理。在完整测试集上, 模型预测精度达到 0.04 V 的平均绝对误差 (MAE)。特别地, 本研究系统评估了该模型在小样本条件下的预测能力, 结果表明, 即使训练数据量压缩至约 300 个样本, 模型仍显著优于传统机器学习方法, 展现出出色的泛化能力和鲁棒性。此外, 针对部分特定金属离子体系样本更为稀缺的问题, 研究进一步尝试引入跨体系信息辅助策略, 以增强模型在极端数据不足场景下的稳定性与准确性, 取得了良好效果。最终, 基于该框架筛选出多种具有高电压潜力的新型候选材料, 可为新型金属离子电池系统提供高效支撑。本研究建立了一个兼顾精度、效率与可推广性的金属离子电极材料性能预测框架, 为下一代兵器平台中高性能储能系统的快速材料筛选与系统集成提供了智能化解决方案。

C12-35

体心立方相高熵储氢合金的数据库构建与机器学习设计

徐佳翔^{1, 2}, 石睿^{1, 2}, 刘雅娜^{1, 2}, 张纪光^{1, 2}, 朱云峰^{1, 2}

1. 南京工业大学材料科学与工程学院
2. 江苏先进无机功能复合材料协同创新中心

在我国“双碳”目标稳步推进的进程中，氢能因其来源丰富、燃烧热值大且对环境友好等特性，在可持续能源体系的发展中占据着关键地位。然而氢气密度小，易燃易爆，如何安全高效地储氢是推动氢能经济发展的关键所在。近年来，高熵合金被视作一类极具潜力的固态储氢材料，其中体心立方（BCC）相高熵合金凭借高储氢密度和出色的活化性能备受关注。但是，传统的实验试错方法和计算模拟在有效探索高熵储氢合金成分方面都面临着限制，而通过数据驱动的方式有望大幅降低高熵储氢合金的研发时间和成本。本研究采集了大量文献中报道的 BCC 相高熵合金，并结合第一性原理计算确定每种合金的氢化反应焓变，以此构建了超过 100 个样本量的高熵储氢合金成分-反应焓变数据库；结合特征工程和机器学习回归算法，建立了反应焓变预测模型。基于 SHAP（SHapley Additive exPlanations）探索了特征对于模型的贡献度，确认了影响反应焓变的最重要特征为平均电负性。最后，基于上述模型预测并筛选出反应焓变符合条件的 BCC 相高熵储氢合金，并对其储氢性能进行了实验研究。

墙报

C12-P01

高比能、高可逆转化反应型正极材料的设计及其储锂性能研究

林业超¹, 姜银珠¹

1. 浙江大学

FeOF 作为嵌入-转化型正极材料具有很高的理论容量，其高能量密度锂离子电池中具有较大的潜力。然而，其嵌入过程的不充分和氧化还原反应的可逆性差限制了其实际的容量发挥和循环稳定性。因此，我们提出了在 FeOF 中的 S 取代策略（FeOF-S），以促进嵌入反应与反应动力学，在 0.05 A/g 的电流密度下实现了 668 mAh/g 的高容量，在 0.5 A/g 的电流密度下实现了高达 1500 次循环的长循环稳定性。在此策略下，FeOF-S 的 Li⁺插层能量在热力学上显著降低，插层容量提高到 230 mAh g⁻¹，比 FeOF 高 50%。此外，在 FeOF-S 中实现了几乎为零的带隙和优异的电子导电性，从而具有优异的倍率性能和大大增强的赝电容贡献。这项工作从热力学和动力学调节的角度提供了新的见解，以提高高能量密度锂离子电池转化反应型电极的电化学性能。

C12-P02

In Situ Intergrowth Tunnel/P3 Cathode Enhancing High Voltage Stability Toward High Energy Sodium-Ion Batteries

Jinze Guo¹

1. Zhejiang University

Improving the upper voltage limit in layered oxide cathodes is an effective strategy to achieve high-energy sodium-ion batteries (SIBs). However, in the high-voltage region with deep Na⁺ extraction, the phase structure becomes severely unstable, and interfacial side reactions result in rapid capacity decay, hindering the commercial application. This issue is particularly pronounced in low cost P3 Mn-based cathode materials, where the Jahn–

Teller effect exacerbates the instability. Here, the robust tunnel phase is introduced into P3 particles to form intergrowth $\text{Na}_{0.5}\text{Ni}_{0.15}\text{Mn}_{0.65}\text{Al}_{0.2}\text{O}_2$ (T/P-NNMA) materials. The tightly integrated tunnel phase enables pseudo-solid solution reaction, suppresses irreversible oxygen release, and maintains stable interface stability even when the charge cut-off voltage increases to 4.5 V. Consequently, the T/P-NNMA cathode delivers an outstanding reversible capacity of 187.8 mAh g⁻¹ at 0.1 C, yielding an energy density of 544.8 Wh kg⁻¹ (based on the cathode) and displays excellent capacity retention of 83.08% over 200 cycles at 1.0 C. Embedding the tunnel phase into P3-type material to achieve high structure and interfacial stability offers a promising strategy for the development of high energy and low cost SIBs.

C12-P03

基于氟化 MOF 的准固态电解质构建高稳定性锂金属电池的界面调控策略

贾兴凯¹

1.浙江大学

在本研究中,我们提出一种简便且温和的氟化策略。氟离子的引入不仅增强了 MOF 表面的负电场强度,从而改变其对 Li⁺和 TFSI⁻的溶剂化结构调控能力,还能促进 SEI 的稳定构建。增强的负电场有助于实现以阴离子主导的 Li⁺溶剂化结构,进而减少有机溶剂分解副反应的发生。同时,F⁻在 MOF 孔道中与 Li⁺形成强相互作用,有助于在锂金属表面原位构建一层致密均匀、富含 LiF 的无机 SEI,从而有效阻挡电子穿透、防止副反应,并提升 Li⁺跨界面迁移效率。此外,MOF 结构本身可调的孔道构型和平衡电场特性也有助于实现 Li⁺通量均一分布,从而抑制枝晶生成。最终构建的氟化 UIO-66-NH₂@醚类电解液(记为 UNF@D-LE)展现出优异的综合电化学性能:其 Li⁺电导率高达 2.33 mS cm⁻¹,tLi⁺为 0.9;在 Li/Li 对称电池中表现出 2300 小时超长寿命和仅 45 mV 的低过电位;在 LFP 正极配对全电池中,于 2C 倍率下可稳定循环 1400 圈,容量保持率高达 93.6%。本研究不仅验证了氟化策略在调控溶剂化结构和界面稳定性方面的有效性,也为 MOF 基电解质的结构设计和性能优化提供了新的理论指导和实验依据。

C12-P04

Rational Design of Si-Sn-Y Ternary System Anode Materials for Sulfide-Based All-Solid-State Batteries: Constructing Long-Cycle Stability through Multi-Component Synergy

Pingyuan Ou¹, Dongrong Lan¹, Kejie Liu¹, Taotong Yang¹, Shuqian Pei¹, Yaxiong Yang¹, Wubin Du¹, Hongge Pan¹

1.Institute of Science and Technology for New Energy, Xi'an Technological University

Silicon anode has been regarded as one of a promising candidate materials for all-solid-state batteries anodes due to advantages of high specific capacity(4200 mAh g⁻¹) and abundant natural reserves. However, the substantial volume expansion (up to 300%) during charge-discharge processes induce electrode pulverization and interface contact failure. Additionally, the intrinsic low electronic conductivity (~10⁻⁶ S cm⁻¹) results in impeded charge transport. These issues have become critical bottlenecks restricting the performance breakthrough of all-solid-state batteries. This study breaks through conventional single-property optimization paradigm by proposing a multi-component synergistic design strategy. It employs vacuum induction melting combined with low-pressure rapid quenching techniques to construct the Si-Sn-Y composite system, and subsequently processed into nanocrystalline micron particles via sand milling technology. This methodology enables atomic-scale integration of silicon-based and metallic phases, establishing an internally conductive percolation network that yields a rigid-flexible composite architecture. Such structural design not only creates efficient electronic transport pathways but also leverages the metallic phase's plastic deformation capability to mitigate volumetric stress. Coupled with the gradient stress distribution induced by electro-mechanical coupling effects, this synergy establishes a persistently stable ionic transport channel at the electrode-electrolyte interface. Electrochemical

evaluations demonstrate that the Si-Sn-Y composite anode retains a reversible capacity of 1366.55 mAh g⁻¹ after 400 cycles at a high rate of 1.5 A g⁻¹, achieving an exceptional capacity retention of 99.39%. This performance significantly outperforms pristine silicon anode (capacity retention of 17.18% after 400 cycles), underscoring its exceptional structural stability and electrochemical performance. Compared to conventional single-component systems, this multi-component composite design innovation offers a novel technological pathway for practical implementation of high-energy-density all-solid-state batteries.

C12-P05

In-situ Synthesis of Silicon Carbide/Silicon-based Composites Driven by Joule Heat and Its Lithium Storage Performance Regulation Mechanism

Dongrong Lan¹, Pingyuan Ou¹, Kejie Liu¹, Taotong Yang¹, Shuqian Pei¹, Yaxiong Yang¹, Wubin Du¹, Hongge Pan¹

1. Institute of Science and Technology for New Energy, Xi'an Technological University

Silicon-based anode materials are regarded as the most promising next-generation anode materials for lithium-ion batteries due to their high theoretical specific capacity, abundant resources, and low cost. However, in practical applications, silicon anodes face issues such as volume expansion, rupture of the solid electrolyte interphase (SEI) film, and low electrical conductivity. To address the problems of volume expansion and insufficient conductivity of silicon-based anode materials in application, this paper proposes a novel preparation method based on Joule heating. During this process, the instantaneous high temperature prompts the in-situ formation of silicon carbide (SiC) in the contact area between the Si95Sn5M5 (M = Bi, Y) material and carbon paper.

Silicon carbide has excellent mechanical strength and good electrical conductivity. It can not only provide strong structural support for the Si95Sn5M5 anode, effectively alleviating the internal stress caused by volume changes during long-term charge-discharge cycles, but also accelerate the conduction of electrons in the electrode, thereby improving the performance of the battery at high current densities. The experimental results show that the prepared Si95Sn5M5 (M = Bi, Y) anodes exhibit excellent electrochemical performance: the initial Coulombic efficiencies are 83.91% and 84.36% respectively, and the reversible capacities at a 1 C rate are 2198.03 and 2245.01 mA h g⁻¹ respectively. Moreover, after 400 cycles, they can still maintain capacities of 1152.42 and 1367.69 mA h g⁻¹, which are much higher than that of the original silicon under the same conditions. In addition, the full battery based on the Si95Sn5Y5 anode and lithium-rich manganese cathode verifies the practical feasibility of this method. This strategy of in-situ generating silicon carbide through Joule heating technology provides new ideas for the development of durable silicon-based lithium-ion batteries.

C12-P06

Nanocrystalline micro-silicon-based composite anode Interface construction and electrochemical properties of materials

Kejie Liu¹, Wubin Du¹, Dongrong Lan¹, Pingyuan Ou¹, Taotong Yang¹, Qian He¹, Yaxiong Yang¹, Hongge Pan¹

1. Institute of Science and Technology for New Energy, Xi'an Technological University

In silicon-based anode materials are widely regarded as strong candidates for the next generation of lithium-ion battery anode materials due to their high theoretical specific capacity of 3579 mAhg⁻¹; abundant reserves and low cost. However, in its practical application, there are still scientific problems such as the inability to form thin, dense and stable SEI and the low ionic conductivity and electronic conductivity of the electrode. Samples were prepared by smelting, strip throwing, sanding, spray drying, carbonization and other methods, and a

tin-sulfur bond was formed between the silicon-tin and the carbon by introducing sulfur into the carbon layer for coating, so as to enhance the binding force between the silicon and the carbon-clad layer and effectively absorb the stress changes caused by expansion. At the same time, the generated SnS acts as a fast ionic conductor to further improve the ionic conductivity and electronic conductivity. The experimental results show that under the current density of 1500mA g^{-1} , the reversible specific capacity of the anode of the battery reaches 2016.61mAh g^{-1} on the first charge, the first coulombic efficiency is 71.43%, and the capacity retention rate can still reach 79.13% after 300 cycles.

C12-P07

High-Entropy Metal Sulfide Nanocrystal Libraries for Highly Reversible Sodium Storage

Fei Zhang¹, Yang Liu¹

1. Fudan University

Controlled synthesis of high-entropy materials offers a unique platform to explore unprecedented electrochemical properties. High-entropy metal sulfides (HEMSs) have recently emerged as promising electrodes in electrochemical energy storage applications. However, synthesizing HEMSs with tunable number of components and composition is still challenging. Here, a HEMS library is built by using a general synthetic approach, enabling the synthesis of HEMS with arbitrary combinations of 5 to 12 out of 28 elements in the periodic table. The formation of solid solution of HEMS is attributed to the two-step method that lowers the energy barrier and facilitates the sulfur diffusion during the synthesis. The hard soft acid base (HSAB) theory is used to precisely describe the conversion rates of the metal precursors during the synthesis. We investigate the HEMSs as cathodes in Na-ion batteries (SIBs), where 7-component HEMS (7-HEMS) delivers a promising rate capability and an exceptional sodium storage performance with reversible a capacity of 230 mAh g^{-1} over 3000 cycles. This work paves the way for the multidisciplinary exploration of HEMSs and their potential in electrochemical energy storage.

C12-P08

A novel insight to the mechanism on oxygen-poisoning and oxygen-induced disproportionation of

Zr_{0.8}Nb_{0.2}Co_{0.6}Ni_{0.2}Cu_{0.2} hydrogen storage alloy

Chao Li¹, Haoyu Wang¹, Zhendong Yao¹

1. China Jiliang University

ZrCo-based alloys are regarded as highly potential hydrogen isotope storage materials in the field of nuclear fusion due to their high hydrogen storage capacity and excellent de-/hydrogenation kinetics. However, their practical applications are limited by the attenuation of activity caused by hydrogen-induced disproportionation reactions and oxygen poisoning. Although Zr_{0.8}Nb_{0.2}Co_{0.6}Ni_{0.2}Cu_{0.2} alloy was obtained through multiple alloying, which overcomes the hydrogen-induced disproportionation problem, but the oxygen poisoning problems remain to be resolved. Therefore, this study deeply explored the microstructure evolution during the oxygen poisoning and high-temperature recovery process of Zr_{0.8}Nb_{0.2}Co_{0.6}Ni_{0.2}Cu_{0.2} alloy. A novel inactivation mechanism was discovered and proposed as oxygen-induced disproportionation which induces the orthorhombic ZrCo phase transforms into the cubic ZrCo phase and Zr₇Ni₁₀ disproportionation phase. Further theoretical calculations and in-situ characterizations testify that the migration of Zr atoms triggered by the invasion and desorption behaviors of oxygen atoms is the core causing this inactivation mechanism. Thus, by establishing the "time-temperature-performance" spectrum, the most suitable recovery condition for possibly avoiding the oxygen-induced disproportionation was picked, providing a theoretical basis for the optimization of the anti-poisoning performance of ZrCo-based hydrogen storage alloys.

C12-P09

316L 不锈钢纤维毡中超高密度位错与声子局域化研究

张国宇¹、郝昱州¹、郭亮¹、高志斌¹、赵真真²、梁庆²、宋可心²、苏磊³、Turab Lookman⁴、孙军³、丁向东³

1. 金属多孔材料全国重点实验室, 材料科学与工程学院, 西安交通大学

2. 材料科学与工程学院, 吉林大学

3. 金属材料强度全国重点实验室, 西安交通大学

4. AiMaterials Research LLC, 美国新墨西哥州圣塔菲

多孔金属材料在极端高温和强辐射环境中具有作为先进隔热材料的广阔前景。本文提出了一种高孔隙率的 316L 不锈钢 (316LSS) 纤维毡, 采用束拉伸与气流铺设工艺制备。该材料具有低密度、可控孔隙率以及超细纤维结构, 在室温下实现了 $0.0355 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的超低热导率, 性能可与领先的气凝胶相媲美, 同时保持优异的力学强度与热稳定性。系统的高温热导率测试和 γ 射线辐照实验验证了其卓越的隔热性能、辐射耐受性以及结构完整性。显微结构分析表明, 超高密度的位错网络与强烈的声子局域化效应有效抑制了热传导。这些结果表明, 316LSS 纤维毡是一种极具潜力的下一代隔热材料, 适用于核能系统及其他对轻质、耐久和高性能热绝缘要求极高的应用领域。

多孔金属材料因其在结构轻量化、热管理和辐射环境适应性等方面的独特优势, 近年来受到广泛关注。在航空航天、核能、电子设备及热防护系统中, 热绝缘材料需要具备低热导率、结构稳定性及长期服役能力。目前主流隔热材料如玻璃棉、岩棉等虽然成本低廉, 但在高温和强辐射环境中易发生性能衰减, 表现出热导率升高、脆化和结构失稳等问题。

金属材料, 如不锈钢具备优异的高温 and 辐射稳定性, 但其本体热导率较高, 限制其在热绝缘领域的应用。为解决该问题, 研究者提出通过结构设计 (如细化纤维、提高孔隙率) 来降低其有效热导率。316L 不锈钢因其良好的加工性、抗氧化性和辐射稳定性成为研究焦点之一。本文提出一种新型 316L 不锈钢纤维毡, 通过束拉伸与气流铺设工艺制备, 形成高孔隙率、柔性结构的金属纤维毡。该材料不仅实现了低至 $0.0355 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的热导率, 还兼具高温稳定性和抗辐射性能, 具有显著的应用前景。

实验材料与方法

所用 316L 不锈钢原料来自太原钢铁集团, 化学成分为 Fe (62 - 69%)、Cr (16 - 18%)、Ni (10 - 14%)、Mo (2 - 3%) 及少量 C、Mn、Si 等元素。材料通过四步工艺制备: 束材制备、纤维拉拔与剪切、松散处理、气流铺设叠层。所得纤维直径为 $6 - 22 \mu\text{m}$, 孔隙率范围 91%~99%。

材料结构通过 SEM (Hitachi SU8100) 与 LSCM (Olympus OLS5100) 分析; 位错结构通过 HRTEM (JEOL JEM-2100F) 观察; 热稳定性由热重-差热分析仪 (SDT 650) 测试, 升温速率 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 最高温度 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

室温热导率由 Xiatech TC3000E 测试, 尺寸 $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}$; 高温测试 ($150 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$) 使用 Hot Disk TPS 2500 S 完成。隔热性能通过红外成像监测冷面温度, 样品一侧加热至 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

γ 射线辐照采用 SQ(H)-630 源, 剂量为 1.2 kGy , 模拟核设施服役环境。辐照前后样品热导率及结构均进行对比分析。

结论与讨论

(1) 本文制备的 316L 不锈钢纤维毡材料在室温下展现出极低的热导率 (最低为 $0.0355 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), 其优异的热绝缘性能主要源于以下两个方面机制:

① 高孔隙率结构使空气成为主要热传导介质, 显著削弱固相热导路径, 降低了材料有效热导率;

② 单根纤维内部具有超高位错密度 (约 10^{16} m^{-2}), 诱导声子局域化, 极大抑制晶格热导率。同时, 材料表面形成的氧化膜 (Cr_2O_3 、 Fe_2O_3 、 NiO) 具高电阻率 ($76.82 \Omega \cdot \text{cm}$), 有效屏蔽电子热导通道, 抑制电子热导率。综合作用下进一步抑制固体传热 κ_{solid} 的贡献, 从而抑制有效热导率。

(2) 该材料热导率低于绝大多数传统隔热材料, 接近先进气凝胶, 且兼具机械强度与柔性, 适用于极端环境下的长期热防护应用。

(3) 材料在 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 空气环境中热稳定性良好, 无明显失重, 热导率保持稳定, 具备优良的高温服役能力。

(4) 在 γ 射线总剂量达 1.2 kGy 辐照条件下, 材料未发生显著微观结构变化或热导性能劣化, 展现出卓越的抗辐照性能。

C12-P010

Mo-doped VO₂ with micrometer flowers shape boosts the hydrogen storage properties of MgH₂

Chenlu Ye¹, Yixin Zhang¹, Mingxia Gao¹, Wenping Sun¹, Xin Zhang¹, Hongge Pan^{1,2}

1. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

2. Institute of Science and Technology for New Energy, Xi'an Technological University, Xi'an 710021

Hydrogen energy has been recognized as one of the promising energy carriers as high energy density and near-clean production. However, hydrogen storage is the primary factor restricting the advance of hydrogen economy. Among them, solid-state way stands out due to its security, high-efficiency and transportation convenience. MgH₂ possess high gravimetric energy density (7.6 wt%) and rich abundance, nevertheless, stable thermodynamics and sluggish kinetics hinder its further application. Transition metal catalysts doping strategy have demonstrated effective ability to the dehydrogenation/hydrogenation of MgH₂, especially V-based oxides. Mo-doped VO₂ induce the morphology change from nanobelt to micrometer flowers. The peak dehydrogenation temperature of MgH₂+10 wt% Mo-VO₂ is only 224 °C, which is lower by almost 110 °C compared with that of the pristine MgH₂. Mechanism analysis shows that the mutual conversion of V to V-H species derived “hydrogen pump” effect plays an important role in boosting the hydrogen storage properties of MgH₂. The present work provides new insight to the rational design and optimization of high-performance catalysts for the hydrogen storage of MgH₂.

C12-P011

Bulk Structure Modification and Grain Boundary Engineering Towards High-Performance All-Solid-State Lithium Batteries

Wanyue Cai¹, Xin Zhang¹, Mingxia Gao¹, Wenping Sun¹, Hongge Pan^{1,2}

1. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

2. Institute of Science and Technology for New Energy, Xi'an Technological University, Xi'an 710021

The limited ionic conductivity of solid electrolyte and its complex interface with the positive and negative electrodes are two important factors that restrict the performance and practical application of solid-state batteries. Traditional engineering methods (such as doping, coating) usually focus on a single angle, which is difficult to meet the growing requirements for cycle durability and rate capability of all-solid-state lithium batteries. Here, we synthesized a Li₆PS₅Cl-x LiBH₄ (x = 1, 2, 3) composite solid electrolytes (CSEs) by a simple one-step ball milling method. A part of the introduced LiBH₄ reacted with the sulfide, and the spatial arrangement and electron distribution of the structure were changed by pseudohalogen BH₄⁻ substitution, achieving improved ionic conductivity of 3.83×10^{-3} S cm⁻¹ at 25 °C, which is 1.8-times greater than LPSC electrolyte. Another part of the unreacted amorphous LiBH₄ is uniformly dispersed, which increases the relative density of the solid electrolyte, fills the gaps generated during the plastic deformation process, and optimizes the various macroscopic properties required to suppress lithium dendrite penetration. Based on the synergistic effect of bulk structure and grain size, the solid electrolyte exhibits a high critical current density of 3.44 mA cm⁻². Therefore, the LiIn||NCM811 cell using the CSEs exhibited an initial discharge capacity of 184.6 mA h g⁻¹ at 0.1C and a high capacity retention (90.2%) after 100 cycles at 0.33C.

C12-P012**LiBH₄ doping achieves ultra-high ionic conductivity and critical current density composite halide Li₂ZrCl₆ solid electrolyte**Ziming Fang¹, Hongyu Yang¹, Lanxun Li¹, Hongge Pan², Wenping Sun¹, Xin Zhang¹, Mingxia Gao¹

1. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

2. Institute of Science and Technology for New Energy, Xi'an Technological University, Xi'an 710021

The halide solid electrolyte Li₂ZrCl₆ (LZC) is considered one of the candidate solid electrolyte materials for all solid state lithium-ion batteries due to its low preparation cost, good high-voltage positive electrode compatibility, and wide electrochemical window. However, the ion conductivity of Li₂ZrCl₆ is low and its stability to lithium metal is poor, which limits its application prospects. Herein, we prepared Li₂ZrCl_{5.3}(BH₄)_{0.7}(0.7LBH-LZC) solid electrolyte reinforced with lithium borohydride. LiBH₄ was introduced during the synthesis process through simple mechanical ball milling, resulting in a high ion conductivity of 1.645×10^{-3} S/cm at 25 °C and a critical current density of 7.159 mA/cm². The ion migration number reached as high as 0.9999.

C12-P013**Multifunctional Surface Construction for Long-term Cycling Stability of Li-Rich Mn-based Layered Oxide Cathode for Li-ion Batteries**Qihang Ma¹, Haoyu Huang¹, Xin Zhang¹, Wenping Sun¹, Mingxia Gao¹, Hongge Pan^{1,2}

1. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

2. Institute of Science and Technology for New Energy, Xi'an Technological University, Xi'an 710021

Li-rich Mn-based layered oxides (LMLOs) are promising cathode material candidate for the next-generation Li-ion batteries of high energy density. However, the fast capacity fading and voltage decay as well as low Coulombic efficiency caused by irreversible oxygen release and phase transition during electrochemical process hinder their practical application. To solve these problems, in present study, a multifunctional surface reconstruction strategy involving coating layer, spinel-layered heterostructure and rich-in oxygen vacancies are successfully conducted by a facile thermal reduction of the LMLO particles with KBH₄ as reducing agent. The multifunctional surface structure plays synergistic effects on suppressing the interface side reaction, reducing the dissolution of transition metal, increasing electron conductivity and lithium diffusion rate. As a result, electrochemical performances of the LMLO cathode are effectively enhanced. With an optimization of the addition of KBH₄, the electrode delivers a reversible capacity of 280 mAh g⁻¹ at 0.1 C, which maintains after 100 cycles. The capacity retention with respect to the initial capacity is as high as 98% at 1 C after 400 cycles. The present work provides a new insight in designing highly effective functional surface structure of LMLO cathode materials for high-performance LIBs.

仅发表论文

C12-PO01**身管内壁裂纹前缘应力强度因子影响因素仿真分析**司东亚¹

1.陆军兵种大学

火炮发射时,身管内膛表面微裂纹不断扩展造成身管强度降低,影响身管发射安全性。应力强度因子

不仅能反映裂纹尖端的应力状态，也是预测裂纹扩展的重要指标，通过准确计算和分析应力强度因子影响因素，可以更好地理解火炮身管试样裂纹扩展行为。为此，论文以某预制裂纹炮钢身管试样为研究对象，基于 ABAQUS 与 FRANC3D 软件对初始裂纹尺寸、载荷作用幅值、载荷加载次序对裂纹前缘应力强度因子的影响进行了研究，通过分析得到：①裂纹前缘应力强度因子随着裂纹长度、深度的增加而逐渐增大，如图 1 所示；②裂纹前缘应力强度因子随着载荷幅值的增大而增大，但二者并非线性关系，载荷较小时应力强度因子随载荷变化增加较慢，而当载荷幅值较大时，应力强度因子也随之急剧增加，如图 2 所示；③设定两组对照载荷谱进行加载，对身管内壁裂纹扩展进行计算，结果表明先大后小的加载次序裂纹扩展相对较慢，主要是由于当身管承受不同幅度组成的载荷谱时，过载峰对随后的低载恒幅下的裂纹扩展速度有明显的延缓作用，使裂纹扩展速率降低。