

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

C09-先进结构陶瓷的制备与表征
C09-Preparation and Characterization
of Advanced Structural Ceramics

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C09. 先进结构陶瓷的制备与表征

分会主席：陆有军、陈宇红、王海龙、Wang Yanmin、汪长安

C09-01

高强度高热导率氧化铝陶瓷的制备和性能

汪长安^{*1,2}, 李帅^{1,2}, 陈仕乐^{1,2}, 董岩皓^{1,2}

1. 清华大学材料学院
2. 新型陶瓷材料全国重点实验室

氧化铝陶瓷具有优异的力学性能、热稳定性和化学稳定性等性能，是应用最广泛的陶瓷材料之一。然而，高纯氧化铝陶瓷往往需要较高的烧结温度，一方面需要消耗较多的能量，同时高温也会造成晶粒的过度生长，从而导致其力学性能降低。氧化铝陶瓷作为典型的脆性材料，对缺陷的尺寸非常敏感。因此，要想获得高强度氧化铝陶瓷，一方面可以通过先进成型技术提高其结构均匀性，减小缺陷尺寸；另一方面采用低温烧结技术，减小高温下晶粒的异常生长。本研究以亚微米氧化铝(TM-DAR, 平均粒径为 120 nm) 为原料，采用自发凝固成型工艺，通过添加分散剂异丁烯和马来酸酐共聚物(Isobam600AF)和辅助分散剂柠檬酸铵(AC)，制备高固相量、低黏度的氧化铝浆料，经原位固化成型制备了结构均匀的氧化铝素坯。在较低的烧结温度(1350°C)下，即可烧结得到低烧结收缩率(16.3%)、高相对密度(3.98 g/cm³)的氧化铝陶瓷，同时具有高抗弯强度(914±154 MPa)和高热导率(35.2±0.5 W/(m·K))。此外，通过研究高致密氧化铝陶瓷中晶粒在不同退火温度下和退火时间中晶粒生长的情况，计算了氧化铝在 1300°C~1500°C 之间的晶界迁移率和晶界迁移表观激活能，对氧化铝陶瓷在低温烧结过程中晶粒生长行为具有一定指导意义。

C09-02

微波加热制备 TaC 及其吸波性能研究

陈勇强*

郑州大学

碳化钽(TaC)作为一种金属型碳化物和超高温陶瓷材料具有很多优良的物理与化学性能，如高熔点(3880 °C)、高硬度(约 15 GPa)以及优异的耐腐蚀与抗烧蚀性能。其在航空航天、半导体制造以及硬质合金刀具等行业具有广泛的应用。传统生产 TaC 往往采用高温碳热还原法，此方法能耗大、碳排放高、生产成本低，不利于绿色低碳发展。微波加热因其高效节能与绿色低碳的优势，受到越来越多的关注。目前，微波加热制备 TaC 的研究基本处于空白阶段，因此本论文从原材料碳源种类、原材料摩尔比、加热温度、保温时间以及微波加热工艺等方面对 TaC 颗粒和 TaC 晶须的合成机理进行了探究。并研究了 TaC 颗粒和晶须的电磁波吸收性能。

C09-03

核用 SiC 复合包壳的环向强度研究

郭伟明*

广东工业大学

核用 SiC 复合包壳具有优异的高温力学性能、抗腐蚀和抗中子辐照等特性，成为国际公认的新一代核燃料包壳。本研究评估了 SiCf/SiC 复合材料包壳在不同加载速率和预制缺陷条件下的力学行为，重点分析环向强度、断裂模式及缺陷位置对包壳性能的影响。采用膨胀塞法和 C 环测试，探讨 CVD-SiC 涂层、加载速率及裂纹位置的作用机制。C 环测试表明，CVD-SiC 涂层可显著增强包壳环向强度，由 108.9 MPa 提升至 169.3 MPa，同时 CVD-SiC 与 CMC 层间的弱界面结构有助于保护 CMC 层并维持整体力学性能。此外，在膨胀塞法测试中，压头加载速率对包壳强度影响显著，低速加载(0.5 mm/min)时应力分布均匀，环向强度约 112.4 MPa，而高速加载(2 mm/min)诱发应力集中，导致裂纹提前扩展，强度下降至 92.4 MPa。

预制裂纹实验揭示了缺陷位置对包壳环向强度性能的关键影响。外壁裂纹对包壳强度影响较小(136.1 MPa), 而内壁裂纹使环向强度下降至 71.2 MPa, 并诱导裂纹沿缺陷快速扩展, 降低结构完整性。

C09-04

光环境诱导变色功能陶瓷材料的研究与应用

潘志东*¹、柯善军²、李向钰³、张业鸿⁴、张晶萃¹、杨钰涵¹、张缙²、王燕民¹

1. 华南理工大学
2. 佛山欧神诺陶瓷有限公司
3. 广东道氏技术股份有限公司
4. 广州华星光电半导体显示技术有限公司

光环境诱导变色(Allochromic)功能陶瓷材料对光源敏感,是一种可随光源(如日光、太阳光等自然光源和标准光源 D65、A、F2、F11 等人造光源)变化实现可逆色变的光源性变色材料;其在变色过程中无结构转变,颜色的改变为响应迅速的物理变化;又因陶瓷材料通常具有耐高温、耐候、遮盖力和抗溶剂能力突出等优点,使光环境诱导变色功能陶瓷材料在装饰、防伪和近红外反射隔热等领域具有潜在的应用价值。围绕稀土硅酸盐和稀土钼酸盐体系,合成了不同成分和不同类型晶体结构的光环境诱导变色功能陶瓷粉体。当光照条件发生变化时,稀土硅酸盐可呈紫、蓝或红及其组合色,稀土钼酸盐可呈黄、珊瑚红、灰、紫红、黄绿和绿色。基于所得变色材料的反射光谱和标准光源的功率分布特征,通过建立光源差异函数,由色度学理论分析了其变色机制,可见不同光源之间功率分布的差异在某些波段较为集中,如材料的反射率在此波长范围内发生变化,则可能产生显著的变色效果,为下一步材料的成分设计提供了理论参考。以该变色材料为着色剂,制备了陶瓷喷墨打印墨水,实现了建筑陶瓷制品的印花装饰,制品呈现光环境诱导变色的特殊装饰效果。随后,将该变色材料用于光学防伪,制备了无需专用读取设备,应用方案简便的光学防伪标签,可拓宽光学防伪技术的应用模式。进一步,基于其幻彩的装饰效果和较强的近红外反射性能,将其应用于建筑物或设施外表面涂层,选择性地反射不同波段范围的日光,减少物体表面吸收的能量,降低表面温度和热量积累,减小其冷负荷,从而提高建筑物的热舒适性,且有助于实现“双碳”目标。

C09-05

超声波在材料制备方面的应用及发展

孙矿*

上海晨华科技股份有限公司

超声波作为一种高频机械波,近年来在材料制备领域中展现出显著的潜力。超声波在液相制备过程中,可以实现细化晶粒、破坏枝晶、分散颗粒、加速扩散、除杂除气的作用;在固相体系中,如超声波粉体固结,超声波无压/热压烧结中,超声波的引入可以促进颗粒重排,加速致密化,降低烧结温度,改善材料性能等。受制于高温下超声系统超限的问题,目前超声热压烧结技术主要应用于金属材料的制备,尚未应用于陶瓷材料制备领域。为突破此技术瓶颈,本公司自主研发了高温型超声热压烧结炉,将超声波在烧结过程中的耐温上限由 1000°C 提升至 2000°C,实现了高温陶瓷的致密化烧结,填补了超声波技术在高温陶瓷制备领域的空白。该技术的实现不仅显著拓展了超声波在材料制备领域的适用范围,也为下一代陶瓷复合材料、结构陶瓷、高热导陶瓷器件等的高效制备提供了新路径。

C09-06

可视化高温形变分析技术在无机材料领域的应用

焦思慧*

天津中环电炉股份有限公司

烧结是陶瓷材料工艺最基本和最重要的一环,烧结的好坏直接影响陶瓷材料的各种性能。热处理需要

精确的控制温度条件以达到最佳效果。而烧结收缩率是陶瓷材料生产过程中的重要参考指标，实时准确获取高温下材料的烧结参数，可以优化工艺参数，提高质量，降低生产成本。材料烧结往往采用的是传统的盲烧工艺，需要不断改变烧结温度、升温速度、恒温时间等条件进行反复烧结实验，无法在烧结过程实时观察材料的尺寸及形貌变化，大大阻碍了对材料烧结行为的研究。为解决这一难题，本文采用基于高温光学非接触式的可视化高温形变分析技术可以高效、准确的测量陶瓷材料的烧结收缩，获得其“线收缩-温度”、“体积收缩-温度”、“致密度-温度”等关系曲线。可视化高温形变分析技术非常适合用于测量陶瓷材料的非均匀收缩，同时适用于研究材料的熔化、润湿等行为。

C09-07

高熵氮化物陶瓷制备及强韧策略

陆有军*

北方民族大学

高熵氮化物陶瓷以高强高硬著称，但由于氮化物抗氧化性较差，粉体难以制备，严重限制了高熵氮化物陶瓷的发展。针对这些问题，课题组提出了氮化物热还原法制备高熵氮化物陶瓷，成功以金属氧化物与 Si_3N_4 为原料合成了高熵氮化物粉体，并烧结出 $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2})\text{N}$ 块体陶瓷。之后通过第一性原理计算研究了其原子排布、固溶差异，预测了块体陶瓷晶胞参数、力学性能等信息。此外，针对块体陶瓷晶粒粗大、韧性差等问题，以 SiC 作为添加剂，将 $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2})\text{N}$ 块体陶瓷致密度提升至99.12%，维氏硬度、断裂韧性、抗弯强度分别达到了23.34 GPa、4.35 $\text{MPa m}^{1/2}$ 、409 MPa，并研究了其致密化行为与强韧机理，最后，还引入了石墨烯作为增韧剂，在保证陶瓷维氏硬度没有明显降低的情况下，进一步将断裂韧性与抗弯强度提升至 $6.81 \pm 0.46 \text{ MPa m}^{1/2}$ 与 $671 \pm 34 \text{ MPa}$ ，并总结了其增韧方式与机理，对未来高熵氮化物陶瓷的制备及强韧化提供了新的思路。

C09-08

钙钛矿型高熵材料吸波性能研究

范冰冰*

郑州大学

科技电子通讯等的涌现在便利人类生活的同时，随之而来的电磁波污染问题也引发关注。钙钛矿材料(ABO_3)对多种金属离子的高容纳特性，为熵工程设计带来更多的可能性。利用熵工程和合适的元素调控A/B位阳离子，改变八面体的相互连接、增强材料晶格畸变，增强材料的界面极化和缺陷极化等多种极化形式。此外，八面体畸变和缺陷等能改变B阳离子之间交换作用，可实现高熵钙钛矿对电磁波的介电损耗和磁损耗的协同作用。本研究利用化学法，分别制备了A位和B位熵调控的钙钛矿氧化物，最小反射损耗为-54 dB，1.8 mm厚度时，最大有效吸收带宽(EAB)达到7.44 GHz，将材料自身特性与高熵作用结合起来，为高效电磁波吸收材料提供新思路。

C09-09

基于超快速压力烧结高效制备高熵碳化物陶瓷及其体系构筑

申慧珍, 白湘钰, 沈平*

吉林大学

高熵碳化物陶瓷因其优异的热学和力学性能，在极端环境应用中展现出巨大潜力，但传统制备方法存在能耗高、周期长、致密化效率低等瓶颈。为突破这一限制，我们开发了一种集高效合成与致密化于一体的超快速压力烧结(Ultrafast Pressure Sintering, UPS)方法，显著缩短了高熵碳化物陶瓷的制备周期。在定制

装置中,以过渡金属氧化物和石墨粉为原料,结合焦耳加热、碳热还原及精确施压,仅用 3 min 即可在相对低温(1800 °C)下一步完成($\text{Cr}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Mo}_{0.2}\text{W}_{0.2}\text{C}_x$)陶瓷的合成与致密化,获得晶粒细小、致密度高达 99% 的陶瓷体。系统研究了碳含量对烧结合致密度和性能的影响,明确碳计量比 $x=0.85$ 为优化成分,并实现了 21 种不同元素组合的五元高熵碳化物陶瓷的快速筛选,揭示了晶胞参数差异对高熵固溶体形成难易的关键影响。本研究不仅拓展了超快速高温烧结(UHS)技术在难烧结陶瓷领域的适用性,也为高熵陶瓷的快速制备与体系设计提供了新思路 and 高效平台。

C09-10

溶胶凝胶法结合热力学辅助设计用于高熵硼化物陶瓷粉末的制备

张世龙, 邹冀*, 杨海玲

武汉理工大学材料复合新技术全国重点实验室

六方氮化硼包覆粉体已在多个工程领域广泛应用,但其生产过程受限于复杂的气固反应机制。本研究基于热力学原理,开发了一种真空环境下合成层状六方氮化硼(hBN)包覆高熵二硼化物粉体的新方法,采用钛酸四丁酯($\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Ti}$)、五水合硝酸锆($\text{Zr}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、氯化铪(HfCl_4)、氯化铌(NbCl_5)、氯化钽(TaCl_5)、分别作为 Ti 源、Zr 源、Hf 源、Nb 源、Ta 源,硼酸(H_3BO_3)以及蔗糖($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$)分别作为硼源和碳源,根据硼/碳热还原反应原理,利用液相法并通过调控碳源与金属源比例(C/M),在 C/M=5.5、合成温度 1400 °C 的优化工艺条件下,最终成功制得仅含两种硼化物固溶体与 hBN 的复合粉体。研究发现部分 hBN 包覆于高熵二硼化物(HEB)颗粒表面,据此深入探究了核壳结构粉体的形成机理,并揭示了液态先驱体辅助的硼/碳热还原过程。以所制备的核壳粉体为原料,在 1900 °C、50 MPa 条件下无保温直接烧结,成功实现($\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}$) B_2 -11 vol% hBN 陶瓷的致密化,相对密度高达 97.3%。

C09-11

IV-VI 族过渡金属和稀土元素组成的 10 组分高熵硼化物的筛选与发现

胡敬文, 邹子凡*

武汉理工大学

高熵硼化物(HEB)由于其优异的热稳定性、机械性能和可调的电磁性能,正在成为极端环境应用的有前途的候选物。本研究首次系统研究了稀土掺杂的十组分高熵硼化物($\text{Tm}_{0.9}\text{Re}_{0.1}\text{B}_2$) ($\text{Tm}=\text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti}, \text{W}, \text{Cr}, \text{V}, \text{Mo}$ 和 $\text{RE}=\text{Sc}, \text{Y}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Lu}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Tm}, \text{Tb}, \text{Pr}, \text{Yb}$)。对包括电子功函数和混合焓在内的多个描述符的评估表明,含 Sc 的十硼化物(HEB10-Sc)表现出优异的单相形成能力。相比之下,由于稀土元素的外层电子计数相同,广泛使用的价电子浓度参数被证明是不适用的。采用过渡金属氧化物、稀土氧化物和 B4C 作为前体的 1650 °C 硼/碳热还原(BCTR)实验表明,与其他稀土掺杂剂不同,Sc 独特地能够用九种 IVB-VIB 族过渡金属形成单相二硼化物。阐明了 BCTR 过程中的相演化机制:在 BCTR 过程中原位形成的 ScBO_3 比最难熔的 HfO_2 表现出更大的抗还原性,从而抑制聚硼化物的形成(在其他稀土系统中常见)并促进单相 HEB10 的形成。所得 HEB10-Sc 显示出出色的电磁波吸收性能,在 10.6 GHz (3 mm 厚度)下实现了 -35.3 dB 的反射损耗(RL),在 X 和 Ku 波段实现了 4.7 GHz 的有效吸收带宽。这些发现强调了稀土掺杂在定制高熵硼化物的结构和功能特性方面的关键作用,为航空航天和电子应用中的热防护和高温电磁吸收等极端环境设计先进多功能材料提供了途径。

C09-12

高熵碳化物陶瓷的制备及其高温摩擦学性能

海万秀*, 伍子豪, 刘美玲, 陈宇红

北方民族大学

高熵过渡金属碳化物陶瓷具有较高的硬度和弹性模量、优异的抗氧化性和抗烧蚀性能,在发动机,高

超音速飞行器前缘, 耐磨材料等领域有着良好的应用前景。目前, 高熵碳化物组分设计、材料制备和性能的研究都取得了一定的进展。但是, 高熵碳化物组分设计的多样性使其组分、制备工艺、物相和微观结构与性能之间的关系非常复杂。元素组成对高熵碳化物陶瓷材料微观结构和性能的影响方面是值得研究的问题。本文制备了几种三元、四元和五元(TaTiVMM')C₅多元固溶体陶瓷, 研究组元对于高熵陶瓷相组成、微结构和力学、摩擦学性能的影响。

C09-13

多孔氧化铝陶瓷孔结构与力-热性能关系研究

霍英图^{1,2}, 汪长安*^{1,2}

1. 清华大学材料学院
2. 新型陶瓷材料全国重点实验室

多孔陶瓷材料在航空航天、能源冶金等领域应用潜力巨大, 但气孔结构-热导率-力学强度之间相互制约, 协同优化力学与热学性能存在巨大挑战。现有研究虽已阐明气孔率对结构强度和热导率的影响, 然而对孔结构调控力-热性能的机制尚缺乏系统认知。因此本工作选定氧化铝为材料体系, 分别构筑了球形闭气孔、均匀连通孔和定向连通孔三类典型孔结构, 通过对特定孔结构的力-热性能研究, 并结合有限元模拟揭示了多元结构变量对力-热性能的影响机制。研究发现孔形状主导力-热性能, 定向连通孔平行方向抗压强度最优(Rice模型参数 $b=4.92$), 较其他结构提升显著; 垂直方向与均匀连通孔符合低导热模型, 隔热性能最佳。此外孔径分布优化可解耦力-热矛盾。多峰分布结构在 35.5% 气孔率下抗压强度达 210.6 MPa, 较单峰样品提升 2.6 倍, 同时热导率偏差 < 10%。本工作为高强度-低导热多孔陶瓷设计与开发提供了理论依据。

C09-14

低温烧结氧化铝的掺杂效应

李恒毅^{1,2}, 汪长安*^{1,2}

1. 清华大学材料学院
2. 新型陶瓷材料全国重点实验室

掺杂效应始终是氧化铝研究中的热门课题, 尤其是掺杂原子对氧化铝烧结过程的致密化行为和晶粒生长的影响。随着高活性氧化铝粉体的商业化生产, 氧化铝的烧结温度逐渐降低, 而低温下掺杂效应是否会出现显著区别仍未得到充分探索。本研究主要聚焦于各类常见掺杂元素(Mg、Ca、Y、La)在高活性氧化铝粉体低温烧结下的掺杂效应, 使用浸渍法实现高活性氧化铝的微量掺杂。研究发现, 低温下即使是微量的稀土元素掺杂也会显著抑制氧化铝的致密化过程, 同时Ca掺杂促进氧化铝异常生长的效应被有效控制, 所有掺杂原子都表现出对晶粒生长的抑制作用。以上现象表明烧结温度会对掺杂效应产生较大影响, 低温下的掺杂效应需要得到进一步研究。

C09-15

碳化硅基太阳能相变储热复合材料的制备及热稳定性研究

徐照芸*, 裴天宇, 李世梅, 卢自祥

北方民族大学

太阳能作为可再生、无毒、无害、无污染的绿色能源, 是最有应用潜力的可再生能源之一, 在光热发电、房屋保温等方面具有巨大的应用潜力, 利用相变材料对太阳的热能进行利用是解决太阳能间歇性的主流方式。然而, 相变材料由于相态变化时容易产生泄露, 并且部分相变材料具有强烈的腐蚀性, 使得普通材料难以封装。同时, 相变材料通常具有较低的导热系数, 较低的换热效率极大影响了相变材料在实际中的应用。为了解决上述问题, 以榉木为生物质模板, 通过液相渗硅工艺及浸渍法制备具有三维仿生结构定

向导热的碳化硅基高温定型复合相变材料。结果表明定型复合相变材料相变潜热为 124.8 J/g，导热系数为 69.303 W/(m k)，且导热具有明显的各向异性，经过 100 次温度循环后定型复合相变材料具有良好的形状及热循环稳定性，解决单一相变材料热传导性差的问题。

C09-16

SiC 中 Al/Fe 杂质的酸洗-高温热处理去除

李旒璘*, 海万秀

北方民族大学

在先进陶瓷领域，碳化硅 (SiC) 凭借优异的物理化学性能成为结构功能一体化陶瓷研究热点，但其中 Al 和 Fe 杂质对其机械性能、电学性能和热稳定性等有着显著影响，严重制约其高端应用。因此，探寻低能耗、低成本的杂质去除方法，对 SiC 纯度提升和应用领域拓展具有重要意义。本文以工业级 SiC 为研究对象，深入分析 SiC 粉体中 Al 和 Fe 等杂质含量，并开展系统的除杂工艺探索。采用传统酸洗法进行初步除杂，通过正交实验，确定了最佳酸洗条件：使用 5% H₂SO₄ 与 10% HF (体积比 1:1) 的混合溶液，在 70°C 下反应 12 h，可将 SiC 纯度可提升至 99.99%。为进一步提高 SiC 纯度，将酸洗后的 SiC 置于无压炉中进行高温热处理，借助低熔点杂质挥发和碳热还原反应进一步除杂。确定了最佳的热处理工艺。本文的联合除杂方法经济、可行，为高纯 SiC 粉体的制备提供了一定的借鉴。

C09-17

AlN@Ni 增强 Ti(C,N)金属陶瓷的制备及强化机理研究

冯佳英*, 曹雅璟, 刘美玲

北方民族大学

采用化学镀对 AlN 粉末进行表面镀 Ni，将 AlN@Ni 粉末作为原料加入制备 Ti(C,N)基金属陶瓷，研究了 AlN@Ni 含量对金属陶瓷组织结构、力学性能的影响。当添加的 AlN@Ni 为 3wt% 时，金属陶瓷中的粘结相出现 Co₃Al/(Ni,Co)₃Al，原位生成的金属间化合物 Co₃Al/(Ni,Co)₃Al 有效提升了金属陶瓷的抗弯强度。在 1600°C-1h 真空无压烧结的 Ti(C,N)基金属陶瓷的维氏硬度为 1529.8 MPa，抗弯强度为 1565.8 MPa，断裂韧性为 9.3 MPa m^{1/2}。

C09-18

K/Na 掺杂对铌酸锂陶瓷介电性能的影响

刘运琴*, 侯俊峰

北方民族大学

铌酸锂 (LiNbO₃) 陶瓷具有高居里温度，因此在高温压电传感领域具有应用前景，但其介电常数较小 (室温下仅为 30 左右)，且难以烧结致密化，关于 LiNbO₃ 陶瓷改性及高温介电性能的研究鲜有报道。本研究首次在 LiNbO₃ 陶瓷中掺杂等摩尔比的 K⁺和 Na⁺，通过固相反应合成了 (Li_{1-2x}Na_xK_x) NbO₃ (x=1-4%) 粉末，并采用放电等离子烧结技术 (SPS) 制备出不同掺杂量的 LiNbO₃ 陶瓷，系统的研究了不同浓度 k⁺和 Na⁺对 (Li_{1-2x}Na_xK_x)NbO₃ 陶瓷的物相结构、微观形貌、介电性质。结果表明：K⁺和 Na⁺的引入可细化 LiNbO₃ 陶瓷晶粒，在 1MHz 时，随着掺杂量的增大，介电常数增大，介电损耗角减小，温度为 800°C，掺杂量为 4% 时，介电常数为 196，介电损耗角正切值低至 0.87，室温下介电常数从 36 提升至 64，说明通过 K⁺和 Na⁺共掺杂改性技术可有效调节 LiNbO₃ 陶瓷的介电性能。

C09-19 **$x\text{Al}_2\text{O}_3-(1-x)\text{ZnO}$ 系线性热敏电阻的制备与研究**

杨光灿、张笑*
北方民族大学

负温度系数 (NTC) 热敏电阻以其高灵敏度和快速响应而闻名, 在国民经济、军事和航空航天等各个领域发挥着至关重要的作用。线性 NTC 热敏电阻可以简化电路设计, 但目前使用的大多数线性 NTC 系统都使用昂贵、重且有害的金属。因此, 研究具有线性耐温特性的环保型 NTC 热敏电阻对于环境保护和高性能电子陶瓷的发展至关重要。本文讨论了使用固相反应法在 $x\text{Al}_2\text{O}_3-(1-x)\text{ZnO}$ 系统中合成环保型线性热敏电阻材料。通过引入高电阻相 Al_2O_3 , 形成了 ZnAl_2O_4 和 ZnO 的三维导电网络。该网络在 343K-513K 范围内表现出优异的线性负温度系数电阻-温度特性。当 $x=0.05$ 时观察到最高的线性度 ($R^2=0.9984$)。

C09-20**片状大比表面积 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米粉体的制备及其研究**

王品一、张笑*
北方民族大学

为解决传统 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 比表面积小、粉体活性低而无法广泛应用的问题, 探究 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相变过程的诱导因素及机理对片状 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米粉体物相、微观形貌以及比表面积的影响, 本文以 $\gamma\text{-AlOOH}$ 纳米粉体为前驱体, 通过添加 AlF_3 作为助烧剂制备片状大比表面积 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米粉体。探究了不同干燥方式、烧结温度、煅烧气氛以及不同量添加剂对片状 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米粉体的影响。采用 XRD、TEM 以及 BET 等对样品进行了表征, 并对其进行分析。结果表明, 以冷冻干燥法制得的片状 $\gamma\text{-AlOOH}$ 纳米粉体为前驱体, AlF_3 作为助烧剂, 当煅烧温度为 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 比表面积仍达到了 $27.71\text{ m}^2/\text{g}$ (在相同条件下, 已报道文献中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的比表面积一般小于 $10\text{ m}^2/\text{g}$)。烧结温度为 $1150\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 产物 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的形貌均匀分散, 比表面积达到了 $50.48\text{ m}^2/\text{g}$; 在添加少量 AlF_3 助烧剂与聚乙二醇煅烧保护剂的条件下, 于保护气氛中 1000 度煅烧便可以得到比表面积达到 $29.45\text{ m}^2/\text{g}$ 的单相 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 这项研究为拓宽大比表面积、高稳定性 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米粉体的制备途径、应用提供了理论依据和数据支撑。

C09-21**不同助剂体系液相烧结碳化硅陶瓷的热学性能研究**

袁子婷*, 陈宇红
北方民族大学

分别使用 $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-YbF}_3$ 、 $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 作为烧结助剂用放电等离子烧结 (SPS) 制备了致密的 SiC 陶瓷。对比了两种助剂体系对材料导热系数的影响规律。通过物相组成和微观结构, 结合液相含量、孔隙分布与晶粒尺寸的分析, 揭示了不同助剂对 SiC 陶瓷微观结构的影响以及微观结构和热导率的关系。与 $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-YbF}_3$ 作为助剂烧结的 SiC 陶瓷 (YbF) 相比, $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 作为助剂烧结的 SiC 陶瓷 (YbM) 表现出更高的热导率, 为 $219.7\text{ W}/(\text{m K})$ 。分析表明, 晶粒尺寸的差异主导了热导率变化——YbM 样品晶粒尺寸 ($4\text{-}5\text{ }\mu\text{m}$) 较 YbF 样品 ($1.1\text{-}1.3\text{ }\mu\text{m}$) 增大约 3 倍, 该因素对热导率的提升起主导作用。

C09-22**碳化硅陶瓷基复合材料的数智化设计**曾庆丰*¹、关康²、刘建涛³、宫声凯¹、赵文月^{1,4}、茹毅^{1,4}

1. 天目山实验室，北京航空航天大学，杭州，311115
2. 材料科学与工程学院，华南理工大学，广州，510640
3. 机械工程学院，西南交通大学，成都，610031
4. 材料智能设计国家级重点实验室，北京航空航天大学，北京，100191

连续纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料 (Ceramic Matrix Composites, CMC) 由于其耐高温、抗氧化、高比强度和高韧性等优点，已成为航空航天应用中不可或缺的关键材料。为此，本研究采用量子化学、计算力学、有限元、多物理场仿真、人工智能等方法，建立材料成分、工艺参数、微观结构与宏观热物理化学性能之间的关联关系，并根据航空航天高温热物理化学极端环境要求优化材料性能。为了实现上述目标，开发了数智化仿真软件和 AI 人工智能体工具平台，加快碳化硅陶瓷基复合材料在航空航天领域的研发和应用效率。本研究由浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划 (编号: 2024SSYS0085、2024SSYS0076)、“材料智能设计国家级重点实验室开放课题基金项目 (编号: 2024B06) 资助。

C09-23**第一性原理驱动 MAX 相和高熵碳化物陶瓷的力学与热学性能研究**

孙维威*

东南大学

本研究采用密度泛函理论结合进化算法的综合计算方案，系统探索了多组分陶瓷材料的结构设计与性能调控机制。首先，针对 P 和 S 胶合的 Nb 基三元硼化物，发现 212 型结构 (Nb_2PB_2 、 Nb_2SB_2) 属于 $\text{P6m}2$ 空间群，211 型结构 (Nb_2PB 、 Nb_2SB) 倾向于 P63/mmc 空间群结晶，通过负形成能和非虚频声子谱验证了热力学和动力学稳定性，热导率分析揭示 Nb_2PB_2 为优异热导体 ($\sim 65 \text{ W/(m K)}$) 而 Nb_2SC 为超低热导体 ($\sim 5 \text{ W/(m K)}$) 的显著各向异性特征。进一步，对 $\text{Ti}_3(\text{Al}_{1-x}\text{A}_x)\text{C}_2$ 固溶体 MAX 相的研究表明，IIIA 族元素 (Ga、In、Tl) 能够显著增强层内键合并使 $\text{Ti}_3(\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25})\text{C}_2$ 的体积模量较 Ti_3AlC_2 提升 12.8%，而 Si 和 P 元素主要影响层间相互作用，混合焓和吉布斯自由能分析证实了合金化对结构稳定性的调控规律。最后，针对二元 B1 型高熵碳化物，通过实验、第一性原理计算和从头算分子动力学相结合的方法，深入阐明了多组分碳化物陶瓷的硬化机制源于晶格畸变诱导的固溶强化与共价键强化的协同耦合作用。本研究从硼化物的热输运性能调控到 MAX 相的结构稳定性设计，再到高熵碳化物的力学性能强化，为多组分陶瓷材料的结构设计、性能预测和机制理解提供了重要的理论指导，为高性能陶瓷材料的开发奠定了科学基础。

C09-24**反阿伦尼乌斯类型晶粒生长行为的研究**

胡剑峰*

上海大学

陶瓷性能主要取决于自身的化学成分和晶体结构。然而，这些材料性能会受到其内部微观结构的强烈影响。因此，研究材料微观结构的演变规律，对于设计和调控材料性能具有极其重要的意义。本报告将汇报陶瓷反阿伦尼乌斯类型晶粒生长行为的最新研究结果，运用普适晶粒生长理论进行数值模拟计算，并结合实验观察的结果，揭示了反阿伦尼乌斯类型晶粒生长行为的内在物理根源。首先，实验观察到反阿伦尼乌斯类型晶粒生长行为出现在较低烧结温度范围内，该较低烧结温度 ($925\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) 条件下，晶粒生长行为都经历了明显的异常生长和生长停滞过程；研究发现烧结压力较高，反阿伦尼乌斯类型晶粒生长行为出现的温度则更低。其次，结合普适晶粒生长公式的数值计算模拟和实验结果，揭示了较低烧结温度时，只有较少数量的晶粒能够生长，以及晶粒尺寸增加后需要较大的 n 值才能维持生长状态，从而容易出现反阿

伦尼乌斯类型的晶粒生长行为；而台阶能很小或者等于零时，则不会出现这一反常现象。

C09-25

极端服役环境 X 射线显微 CT 在先进结构陶瓷的制备与表征方面的开发与应用

缪蕊, 李仁庚*, 戴峰

南京工业大学

随着轻质合金材料在航空、航天、军工等关键领域的应用，在高温、低温和复杂应力等极端服役条件下对关键材料和构件的内部缺陷形成、演变和裂纹扩展进行可视化、定量化、数字化原位研究，成为评估部件服役可靠性和预测剩余寿命的重要实验手段。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描 (CT) 技术，结合亚微米级精密控制转台和机械控制，可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像。通过配置超高温模块、低温模块、高载荷模块（拉伸/压缩/弯曲/疲劳），构建热-力耦合系统，实现超高温变形、超低温变形以及热冲击、疲劳、蠕变等复杂工况下轻合金材料与部件的原位 CT 成像。极端服役环境 X 射线显微原位 CT 设备的成功研发，将极大提升关键结构材料在服役工况下的可靠性和安全性。

C09-26

钢铁超薄带连铸用关键功能耐火材料开发与应用

刘国齐*

上海大学

钢铁薄带连铸作为典型钢铁工业绿色新技术，具有设备紧凑、工艺简化、生产周期短、成材率高、能耗低等优势，其中布流器作为核心功能组件兼具结构复杂性与碳及杂质成分的严苛控制要求，其服役性能直接决定了带钢产品质量、浇铸过程连续稳定性及多炉次作业效率。本研究通过创新设计高应变容限结构并结合 Al-Si 复合强化，在精准调控碳含量的最佳区间内实现了材料抗热震性与高温强度的协同提升，在确保功能特性的前提下成功研制出新型布流器，经模拟工况验证与工业化浇铸试验表明该技术有效解决了高温工业关键材料瓶颈，为我国先进制造流程提供了重要材料支撑。

C09-27

等离子体调控高熵氧化物的多尺度设计及电磁吸波机制研究

孔春才*

西安交通大学

高熵氧化物因其卓越的磁学和介电性能近年来在电磁波吸收领域的备受关注。研究团队采用等离子体快速处理技术，成功制备出还原氧化石墨烯负载的(CoFeNiCuMn)O 复合体系，通过前驱体金属含量调控实现了材料形貌与介电特性的协同优化。实验表明，截角八面体构型的 HEO/RGO 复合材料展现出最优吸波性能：在 14.1 GHz 处取得 -57 dB 的最小反射损耗，有效吸收带宽达 4.13 GHz。研究揭示了多元素协同作用对微波吸收特性的影响机制，通过阻抗匹配优化和多重损耗机制的耦合作用实现高效电磁耗散。该材料在无线充电延迟时间控制和全角度雷达散射截面 (RCS < -10 dBm²) 模拟中均表现出显著优势。本工作不仅拓展了轻质高效吸波材料的体系构建，更为高熵氧化物的新型结构设计提供了理论指导与实践范例，推动了电磁功能材料在工程应用中的创新发展。

C09-28

原料对反应烧结碳化硅影响

陈宇红*, 刘瑞彬, 海万秀
北方民族大学

分析绿碳化硅和黑碳化硅杂质赋存, 采用不同粒径原料级配制备碳化硅陶瓷, 结果表明, 碳化硅主要杂质元素为铁、铝、钙等, 其中铝元素以固溶形式固溶在晶格中, 酸洗无法除去大颗粒中的铝。绿碳化硅铝元素含量较低, 以其为原料制备的陶瓷热学性能都大于黑碳化硅粉为原料制备的碳化硅陶瓷。引入大颗粒级配, 可明显提升陶瓷导热系数, 但抗弯强度降低幅度较大, 适当的小颗粒 SiC 微粉的级配并未导致导热系数的明显降低, 同时抗弯强度提升 10%。

C09-29

Preparation and high-temperature stability of $(\text{Zr}_{1/5}\text{La}_{1/5}\text{Sm}_{1/5}\text{Dy}_{1/5}\text{Gd}_{1/5})\text{O}_{2-x}$ high-entropy ceramic materials

Jianwei Dai*, Wenhui Yang, Guanxi Liu, Rende Mu, Limin He
AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials

ZrOCl₂·8H₂O, La₂O₃, Sm₂O₃, Dy₂O₃, and Gd₂O₃ powders were used as raw materials to prepare equimolar-ratio $(\text{Zr}_{1/5}\text{La}_{1/5}\text{Sm}_{1/5}\text{Dy}_{1/5}\text{Gd}_{1/5})\text{O}_{2-x}$ high-entropy ceramic materials via chemical co-precipitation method. Microstructure, phase structure, high-temperature stability, and evolution of phase composition of the powders under high-temperature conditions were studied. Results show that $(\text{Zr}_{1/5}\text{La}_{1/5}\text{Sm}_{1/5}\text{Dy}_{1/5}\text{Gd}_{1/5})\text{O}_{2-x}$ high-entropy ceramic materials synthesized via chemical co-precipitation method exhibited single cubic fluorite phase structure. After heat treatment at 1400 °C for 5 h, solid solution of monoclinic rare-earth oxide separated from cubic fluorite phase. Ceramic powders exhibited stable monoclinic phase and rare-earth oxide-doped ZrO₂ dual phase after long-term heat treatment up to 100 h. Results of the fitting of X-ray spectroscopy data show that oxygen vacancy content in high-entropy ceramic powders decreased from 85% to 57% after 100 h of heat treatment. Results of thermogravimetry and differential scanning calorimetry measurements show that hydroxides in high-entropy ceramic powders underwent dehydration reactions at 273 °C and 454 °C, and the separation of rare-earth oxides from cubic solid solutions occurred when the temperature increased above 1320 °C.

C09-30

(NbMoTaW)C 基高熵陶瓷的设计制备与强韧化研究

常贺强、宋晓艳*
北京工业大学

碳化物高熵陶瓷 (HECs) 的本征脆性和抗弯强度不足是其工程应用需要解决的关键瓶颈问题, 且其硬度与韧性、强度与韧性之间表现出显著的性能倒置关系。为了解决这些问题, 本研究提出一种“双相工程”策略, 基于高通量筛选获得的高稳定性(NbMoTaW)C 体系, 成功实现了其硬度、韧性和抗弯强度的协同提升。通过耦合 TiC 固溶强化效应与动态转化氧杂质原位生成 TiO₂ 颗粒增韧机制, 该材料同时达到高维氏硬度 (20.23±0.26 GPa)、优异抗弯强度 (857±23 MPa) 和优越断裂韧性 (4.97±0.16 MPa m^{1/2}), 突破了 HECs 的性能倒置瓶颈。研究阐明了复杂体系中氧杂质的转化与调控机制。综合多尺度表征和密度泛函理论计算表明, TiC 固溶引起的晶格畸变协同 d 轨道杂化效应, 显著提升材料结构稳定性和力学性能。原位生成、择优分布于晶界的 TiO₂ 颗粒, 通过促使裂纹偏转、桥接和分叉机制显著提高了材料的韧性。本研究提出的协同相优化策略为开发具有卓越综合力学性能的 HECs 提供了有效途径。

C09-31

具有独特高温力学和物理性能的致密九元素高熵二硼化物陶瓷

胡敬文, 刘琦*

武汉理工大学

由于其巨大的组成空间和优越的性能特征, 高熵硼化物在许多领域引起了极大的兴趣, 特别是在它们在高温下的高温性能至关重要的情况下。在此, 我们首次发现在 1850°C 制备的致密 $(\text{Ti}_{1.9}\text{Zr}_{1.9}\text{Hf}_{1.9}\text{Nb}_{1.9}\text{Ta}_{1.9}\text{V}_{1.9}\text{Cr}_{1.9}\text{Mo}_{1.9}\text{W}_{1.9})\text{B}_2$ (HEB9) 陶瓷显示出异常低的电阻率温度系数 ($4.28 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$), 约为 $(\text{Ti}_{1.5}\text{Zr}_{1.5}\text{Hf}_{1.5}\text{Nb}_{1.5}\text{Ta}_{1.5})\text{B}_2$ (HEB5) 的 38%, 比先前报道的 ZrB_2 和 ZrB_2 -30 体积%SiC 陶瓷低近一个数量级。还系统地研究了它们在高温下的机械和热物理性质。尽管 HEB9 的热导率随着温度升高而增加, 但在 1273 K 时仍保持在非常低的水平 ($\sim 29 \text{ W/(m K)}$), 几乎是 HEB5 的一半。有趣的是, 发现 HEB9 和 HEB5 的热传导主要由电子贡献, 这表明它们的热导率可以从相应的电导率值粗略估计。此外, HEB9 表现出比 HEB5 大 30 倍以上的几何必要位错密度, 这可能有助于其较高的维氏硬度和独特的物理性质。值得注意的是, 与室温下的值 ($559.7 \pm 36.7 \text{ MPa}$) 相比, HEB9 在 1600°C 下的弯曲强度甚至提高到 $650.0 \pm 86.3 \text{ MPa}$ 而没有降解, 这与 HEB5 相当, 尽管热力学计算表明 HEB9 的熔点较低, 并且在较高温度下 HEB9 中发生晶界软化。HEB9 在高温下优异的机械、电气和热物理性质使其成为各种高温应用的有竞争力的候选材料。

C09-32

短碳纤维增韧高熵硼化物复合材料的制备及性能研究

黄飞龙, 王海龙*, 方成

郑州大学材料科学与工程学院

高熵硼化物陶瓷 (HEBs) 具有优异的耐温特性和巨大的组分设计空间, 是极端环境热防护系统的新型候选材料。然而, 极低的损伤容限严重限制了 HEBs 在工程领域的实际应用。碳纤维因优异的力学性能, 被认为是最具潜力的增韧材料。因此, 将碳纤维与 HEBs 基体相结合有望实现复合材料抗氧化与强韧化协同。通过硼/碳热还原和放电等离子体烧结工艺制备了均匀致密的短碳纤维增韧 HEBs 复合材料 (Csf/HEBs), 实现了 HEBs 损伤容限的大幅提升, 证明了碳纤维增韧 HEBs 的可行性。为了抑制碳纤维的高温结构损伤, 采用反应烧结和液相烧结方法在复合材料制备过程中引入化学反应或液相, 促进物质传输和气孔排出, 显著降低了 Csf/HEBs 复合材料的致密化温度。Csf/HEBs 复合材料在高温氧化过程中形成的含有低热导率氧化物的致密氧化膜可以保护内部碳纤维免受氧化破坏, 保存完好的碳纤维通过丰富的增韧机制有效地耗散了断裂能, 最终实现复合材料抗氧化性能与损伤容限的协同提升。

C09-33

过渡金属碳化物固溶粉对 Ti(C,N)基金属陶瓷结构及性能的调控

刘美玲*

北方民族大学

Ti(C,N)基金属陶瓷中溶解-再沉淀形成的芯环结构较为复杂, 芯环结构间的内应力导致 Ti(C,N)基金属陶瓷强韧性较差。适量碳化物固溶粉的加入, 改善了金属陶瓷芯环结构导致的内应力问题, 使得 Ti(C,N)基金属陶瓷的力学性能得到提高。本文以碳化物固溶粉作为研究对象, 通过碳热还原法制备 $(\text{Ti,W,Nb}_x)\text{C}$ 、 $(\text{Ti,W,V}_x)\text{C}$ 和 $(\text{Ti,W,Mox})\text{C}$ 碳化物固溶粉, 并以碳化物固溶粉为添加剂真空无压烧结制备了 Ti(C,N)基金属陶瓷。分别研究了不同过渡金属元素的摩尔含量变化对金属陶瓷芯环微观形貌结构、物相转变、力学性能及摩擦磨损性能的影响, 结果发现: 在一定的优化含量下, 芯环结构的界面错配度可调控, 进一步调控了金属陶瓷的力学性能和摩擦磨损性能。这一结果为无压烧结制备 Ti(C,N)基金属陶瓷刀具材料的工业化推广提供了应用价值。

C09-34

硅基含油纳米胶囊的设计及对聚合物抗磨减摩性能的影响

高传平*, 张晟卯, 张平余, 张治军

河南大学

内外圈之间聚合物衬垫的摩擦学性能直接影响自润滑关节轴承的服役寿命。因此, 设计高耐磨性的聚合物基衬垫是制备超长服役寿命自润滑关节轴承的关键。结合含铜 (DDP-Cu NPs) 纳米 PAO 油优异的摩擦学性能和纳米中空介孔二氧化硅 (hm-SiO₂NPs) 的孔道和缓释优势, 本文分别通过真空浸渍法和一步法, 成功制备了新型芯材为含铜纳米 PAO 油的硅基含油纳米胶囊 (PAO6/Cu@hm-SiO₂), 以增强环氧树脂 (EP) 的抗磨减摩性能。结果显示, 该纳米胶囊的直径约 150 nm, 铜纳米油含量为 40 wt.%; 当纳米胶囊含量为 15 wt.% 时, EP 的摩擦系数和磨损率分别降低 88% 和 98%。我们认为这与 PAO/Cu 纳米油、hm-SiO₂ 纳米颗粒和 EP 基体间的协同效应密切相关; 另一方面, 摩擦界面上具有双层结构的高性能摩擦膜在其中也发挥着关键作用, 其有效抑制了 EP 基材的疲劳磨损和剥落; 摩擦剪切作用是促使 PAO/Cu 纳米油从胶囊内核缓慢释放的主要动力。本文结果, 可为超长服役寿命和优越摩擦学性能聚合物基自润滑关节轴承衬垫的高端设计提供新的思路 and 基础实验数据。

C09-35

选区激光熔化成形 TiC 增强马氏体不锈钢组织与性能研究

王建宏*

中北大学

在 CX 不锈钢基体中引入陶瓷颗粒增强相, 制备了 TiC/CX 不锈钢材料, 系统研究了微米 TiC 陶瓷颗粒对增材制造 TiC/CX 不锈钢材料微观组织和力学性能的影响, 以及在不同热处理条件下成形试样的微观组织与力学性能的差异, 主要研究内容和结果如下:

研究了工艺参数对 SLM 成形 CX 不锈钢成形件微观组织、力学性能的影响。结果表明, 当激光功率为 160 W, 扫描速度为 620 mm/s 时, 成形件表面质量较好, 没有出现裂纹和孔洞等缺陷, 成形性能最佳。在此工艺参数下, CX 不锈钢的硬度、抗拉强度以及延伸率分别为 308 HV0.5、1101 MPa、13.14%。

本研究系统探究了球磨工艺参数对 TiC/CX 不锈钢粉末微观形貌的影响, 同时深入分析了 TiC 颗粒添加量对基于 SLM 技术制备的 TiC/CX 不锈钢材料微观组织与力学性能的作用机制。研究结果表明, 当球料比设定为 4:1 时, 所制备的复合粉末中 TiC 颗粒分布呈现出良好的均匀性, 且粉末颗粒具有较高的球形度。在 CX 不锈钢粉末中分别添加 2wt.%、4wt.% 和 6wt.% 的 TiC 颗粒, 并通过 SLM 技术进行成形。结果表明: 不锈钢材料的硬度随着 TiC 含量的增加而提高, 其硬度值最高可达 491 HV0.5。抗拉强度则随着 TiC 含量的增加先升高再降低, 当 TiC 含量为 4wt.% 时其最大值为 1574 MPa。断裂延伸率随着 TiC 含量的增加先提高后降低, 当 TiC 含量为 2wt.% 时其最大值为 16.8%。

研究了固溶、时效、固溶+时效三种热处理工艺对 TiC/CX 不锈钢材料的微观组织以及力学性能的影响, 结果表明三种热处理均可以细化不锈钢材料的晶粒尺寸并且提高不锈钢材料的显微硬度。其中固溶+时效处理的不锈钢材料显微硬度达到了 579 HV0.5、抗拉强度达到了 1723 MPa, 与未热处理的 TiC/CX 不锈钢相比分别提高了 60%、9.4%。

C09-36

低温制备氧化铝材料及其性能研究

梁森*, 马伟, 魏凯特

宁夏大学

氧化铝及铝的复合氧化物应用广泛, α -Al₂O₃ 常规制备温度高, 会使其晶粒大、粉体活性低。本研究采用非水解溶胶-凝胶 (NHS) 法结合机械化学法。以醇类与 AlCl₃ 等制备前驱体, 高速球磨后使五配位

铝含量上升, 增加晶格缺陷与活性, 在 $\leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 煅烧可以得到 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉体; 进一步通过引入微量盐类可继续将合成温度降至 $650 - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 制备的粉体比表面积大、活性高。这种方法同样可以用来制备 MgAl_2O_4 、 ZnAl_2O_4 等粉体, 通过 NHSG 工艺形成金属氧桥键, 球磨增加晶格缺陷, 降低合成温度。可制备性能良好的离子掺杂 MgAl_2O_4 陶瓷, 并在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 合成出 $\text{Al}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ 粉体, $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烧结后得到性能优异微波介质陶瓷。

C09-37

基于平台驱动的超高温减摩耐磨陶瓷材料的构建与性能研究

宋俊杰*, 张永胜

中国科学院兰州化学物理研究所

摩擦磨损是造成运动动力系统或部件发生故障、失效的最重要原因之一, 苛刻环境服役润滑材料技术已成为限制高端装备性能提升和发展的关键瓶颈。陶瓷减摩耐磨复合材料是适应 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上超高温环境润滑需求最具优势的选择, 但润滑组元的引入及其高温氧化、分解和挥发, 将破坏基体连续性、引入多种缺陷, 导致陶瓷润滑材料强度、韧性和耐磨性快速劣化, 使其可靠性与寿命显著降低。本研究通过揭示材料宏/微观结构与材料断裂行为和减摩抗磨性能之间的构效特性, 提出了材料多级结构设计原理、失效模型及可靠性调控方法, 采用仿生强韧化设计、润滑自适应设计和复合润滑剂导向构筑技术, 构建了系列结构/润滑功能一体化陶瓷减摩耐磨复合材料, 克服了传统陶瓷复合材料力学性能和摩擦学性能难以协调的矛盾, 实现了材料从室温至 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内具有连续润滑的功能, 并依托苛刻工况使役材料性能评价平台, 驱动多种新型润滑密封材料的迭代优化与实际应用。

C09-38

在导电陶瓷基体中引入 BN 薄片来创制材料性能的各向异性

杨青青, 梁华岳, 邹冀*, 傅正义

武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室

导电陶瓷的物理性能由连续的导电基体所决定, 调控困难。在这项研究中, 通过在陶瓷基体中引入 BN 薄片, 成功实现了导电陶瓷力学和物理性能各向异性的调控。以包含 TiN、Al、硼和 BN 的混合粉末为原料, 通过放电等离子烧结制备了两种 BN 含量不同的导电 $\text{TiB}_2\text{-AlN-BN}$ 陶瓷。在垂直于载荷的方向上, $\text{TiB}_2\text{-AlN-60 vol\% BN}$ 陶瓷在室温下的弯曲强度、断裂韧性、电导率和热导率分别为 $151\pm 6.34\text{ MPa}$ 、 $2.62\pm 0.31\text{ MPa m}^{1/2}$ 、 $5.3\times 10^5\text{ S/m}$ 和 77.87 W/m K 。而在平行于载荷的方向上, 电导率和热导率分别降低到 $2\times 10^5\text{ S/m}$ 和 32.25 W/m K 。这些差异是通过在导电基体中加入少量额外排列的 BN 薄片而产生的, 为材料选择和设计提供了新的机会。

C09-39

1300-1500 $^{\circ}\text{C}$ 下定向凝固 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 共晶陶瓷的抗 CMAS 腐蚀机理

王若彤, 苏海军*, 谭雪, 刘园

西北工业大学凝固技术全国重点实验室

当空气中的硅酸盐颗粒(如粉煤灰、沙漠沙、火山灰和跑道碎屑)在 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温条件下进入喷气发动机时, 这些颗粒会附着在高温表面, 并在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上引发一系列有害的物理和化学变化。这会导致发动机在整个运行期间发生严重的钙镁铝硅酸盐(CMAS)腐蚀, 从而对涡轮造成重大损害。因此, 评估抗 CMAS 腐蚀特性对于热端部件用结构材料至关重要。定向凝固 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 共晶陶瓷包括高度稳定的 YAG 相和 CMAS 的基本成分 Al_2O_3 相, 同时在不同的腐蚀温度下, CMAS 对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 共晶陶瓷的腐蚀程度和腐蚀产物也会发生变化。本文主要研究提拉法制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 共晶陶瓷在 $1300\text{-}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的抗 CMAS 腐蚀性能。在 $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下腐蚀 100h 后未观察到腐蚀痕迹。在 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 50h 后腐蚀深度增

加到 306 和 316 μm ，但腐蚀速率没有明显提高。抗腐蚀性归因于稳定相界面处形成一层连续且致密的石榴石层对 CMAS 的渗透起到一定的抑制作用，同时，该石榴石层中含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Si^{4+} 固体溶质，起到扩散屏障的作用，避免了 CMAS 的进一步渗透。

C09-40

多元素掺杂与微观结构调控对铌酸盐系陶瓷高温压电性能的协同优化

侯俊峰*

北方民族大学

铌酸盐系压电陶瓷具有居里温度高、温度稳定好、绿色环保等优点，在高温压电传感领域具有潜在应用前景。当前铌酸盐系压电陶瓷主要集中在 $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ 、 $\text{CaBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ 、 $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ 、 LiNbO_3 等体系，但压电系数均相对较低。本文综述了采用掺杂改性、相界工程、畴结构调控、织构化等方式提高铌酸盐系陶瓷高温压电性能的研究进展。

C09-41

MC-MB₂(M=Ti, Zr, Hf, Ta, Nb, V)复相陶瓷粉体原位可控合成及陶瓷制备

孙文周*

北方民族大学

本文创新性地构建了基于 $\text{B}_4\text{C}/\text{C}$ 硼/碳热还原 $\text{MO}_2/\text{M}_2\text{O}_5$ 的新型合成体系，原位合成了 $\text{MB}_2\text{-MC}$ 系列复相粉体，并利用 SPS 技术烧结制备复相陶瓷。文章首先通过热力学计算明晰了体系内的物化反应机制，通过相图指导了合成工艺优化和配方优化，系统研究了反应条件及原料比例对复相粉体两相含量、杂质含量及微观形貌的调控规律，结果表明在不同体系内实现了复相粉体中两相含量的有效调控，其中，Ti 系统可调范围最大，硼化物可从 33wt% 提升至 75wt%，且保证在各系统内氧、碳含量分别控制在 1%、2% 以内。随后深入探讨了两相含量、烧结制度对陶瓷致密化程度及力学性能的影响，结果表明所有体系的复相陶瓷相对密度均可达 96% 以上，但不同体系力学性能优势不同。对于 IV 副族系统，其在硬度上有一定优势；对于第 V 副族系统，其断裂韧性更佳。

C09-42

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 复合陶瓷的闪烧：渗透导电网络实现均匀致密化与力学性能提升

樊美岑^{1,2}，汪长安^{*1,2}

1. 清华大学材料学院

2. 新型陶瓷材料全国重点实验室

氧化铝 (Al_2O_3) 的绝缘特性使得闪烧工艺必须依赖极强电场或预热处理，这常导致局部介电击穿和烧结不均问题。本研究通过构建碳化钛 (TiC) 渗透导电网络，开发出绝缘 Al_2O_3 陶瓷的闪烧新方法，同步实现了烧结均匀性与力学性能的提升。通过系统调控 TiC 含量 (0-45 vol%) 与电场参数，我们确定了可靠触发闪烧的临界阈值 (15 vol% TiC)。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 复合陶瓷在 1330 $^\circ\text{C}$ (较传统烧结温度低 200 $^\circ\text{C}$) 下数分钟内完成闪烧，获得 98.84% 的相对密度及亚微米级晶粒 (~500 nm)。优化后的样品展现出卓越机械性能：弯曲强度 (728.8 \pm 32.4 MPa)、维氏硬度 (19.89 \pm 0.76 GPa) 和断裂韧性 (6.01 \pm 0.24 MPa m^{1/2})，证实了 TiC 兼具促进闪烧和增强性能的双重作用。该研究首次全面报道了闪烧 Al_2O_3 基陶瓷的力学性能，并通过可控渗透网络为绝缘陶瓷闪烧建立了设计准则。

C09-43**TiB₂-SiC plate-like agglomerates toughened B₄C composites: mechanical properties, microstructure and residual stress**Xiaoqing Zhao¹, Ji Zou^{*2}, Weimin Wang²

1. Anhui University of Science and Technology

2. Wuhan University of Technology

Boron carbide (B₄C) ceramics extended applications are hindered by their limited fracture toughness and the poor sinterability. For ideal additives such as TiB₂ and SiC have been proved to be effective to address the aforementioned issues of B₄C ceramics. In this work, plate-like TiB₂-SiC agglomerates were in situ synthesized into B₄C matrix using SiC whiskers as template. The agglomerates were composed of interlocked TiB₂ and SiC grains. The obvious increase in the diameter and length of the aggregates compared to the original whiskers was attributed to the in-situ reaction between B₄C and Ti₃SiC₂, as well as the diffusion of elements. When the sintering temperature was only 1700 °C, the relative density could reach 98.89±0.02%. The hardness, flexural strength and fracture toughness of B₄C composite material reached 32.89±1.67 GPa, 515±19 MPa and 5.78±1.10 MPa m^{1/2}, respectively. The resulting residual stress in the matrix was mainly affected by the morphology and aspect ratio of the TiB₂-SiC agglomerates, as the residual stress rose with increasing aspect ratio. High aspect ratio structure and residual stress caused by the mismatch in the CTE were explained as the main factors for the improvement of mechanical properties in this system. The plate-like agglomerates led to higher residual stress in the matrix compared to the spherical structure, resulting in a more effective toughening effect for B₄C ceramics.

C09-44**反应放电等离子烧结制备 ZrB₂-hBN 陶瓷基复合材料**

杨倩, 邹冀*

武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室

由于 ZrB₂-hBN 陶瓷的模量低, 且能够在相对较低的温度下烧结, 因此本研究选择将其作为低成本第二代 SiC 纤维的基体材料。通过反应放电等离子烧结工艺 (1550°C和 1700°C/50MPa/5min), 成功制备出短切 SiC 纤维含量高达 30wt.% 的复合材料。值得注意的是, 在无需对 SiC 纤维表面进行界面预处理的情况下, 材料断裂过程中仍实现了纤维拔出、强化及增韧效果。通过构建挥发相图, 成功地说明了烧结过程中纤维表面的微观结构演变。实验数据显示: 1550°C烧结的含 10wt.% SiC 纤维的 ZrB₂-hBN 陶瓷力学性能显著提升, 其弹性模量达 187 GPa, 弯曲强度为 337±16 MPa, 断裂韧性达到 4.12±0.25 MPa m^{1/2}, 较未添加短切纤维的对照组分别提升 12.6%、61.2%和 118%。通过 He-Hutchinson 模型分析表明, 这些性能变化与基体孔隙率及 SiC 纤维拔出行为存在显著关联。

C09-45**钙钛矿结构高熵氧化物的设计、制备及光/电催化机理探讨**

沈宏芳*

北方民族大学

钙钛矿结构高熵氧化物具有稳定的立方结构、优良的化学特性以及独特的高熵四大效应优点, 是一种优异的理想光催化材料。但是, 由于目前的钙钛矿高熵氧化物实际作为光催化材料的研究相对缺乏, 且对于光催化降解以及光催化析氢领域的具体方案较少。因此, 对开发钙钛矿结构高熵氧化物作为半导体光催化材料成为必然。利用二元钙钛矿氧化物为基础以及采用传统的湿化学法制备钙钛矿结构高熵氧化物半导体材料。首先基于钙钛矿结构 LaFeO₃ 和 SrTiO₃, 按照 1:1 的比例复合, 结合第一性原理计算确定形成 La_{0.5}Sr_{0.5}Fe_{0.5}Ti_{0.5}O₃ 单一物相钙钛矿结构中熵氧化物的可能性, 并采用溶胶凝胶法成功合成了该产物, 研究

其光/光电催化活性。基于此作为高熵氧化物成为优异半导体材料光催化/光电催化研究的基础。首先以 Ti 为 B 位元素基底，通过溶胶水热法制备 A 位高熵氧化物($Mg_{0.2}Ca_{0.2}Sr_{0.2}Ba_{0.2}Pb_{0.2}$)TiO₃。以抗生素为污染源，提高光催化以及光电催化活性。其次以 La 为 A 位元素基底，通过溶胶凝胶法制备 B 位高熵氧化物 La($Mn_{0.2}Fe_{0.2}Co_{0.2}Ni_{0.2}Cu_{0.2}$)O₃ 半导体光催化材料，对其光催化析氢的效果进行了测试，并探讨了光催化析氢机理。

C09-46

Sb₂S₃/TiO₂ 光电阳极的制备及其在可见光催化水氧化中的性能研究

韩非*

北方民族大学

通过简单化学浴沉积 (CBD) 技术成功制备的 Sb₂S₃ 敏化 TiO₂ (Sb₂S₃/TiO₂) 光电阳极 (PA)，在水氧化反应中展现出优异的光电化学 (PEC) 性能。本文中，通过拉曼光谱和 X 射线光电子能谱 (XPS) 证实了 TiO₂ 涂层上 Sb₂S₃ 的形成。该 Sb₂S₃/TiO₂ 光电阳极显著地将吸收边从 395 nm (3.10 eV) 红移至 650 nm (1.90 eV)。此外，与仅在 390 nm 处响应的 TiO₂ 光电阳极相比，Sb₂S₃/TiO₂ 光电阳极在可见光照射下 (波长低于 650 nm) 由于光电化学作用产生了光阳极电流。在 400 nm 波长和 -0.3 V (相对于 Ag/AgCl) 的条件下，其入射光子到电流的转换效率 (IPCE) 达到了 7.7%，是 TiO₂ 光电阳极 (0.21%) 的 37 倍，这得益于 Sb₂S₃/TiO₂ 中低复合率以及载流子的加速传输。此外，在光电催化过程中，通过向电解液中添加 Co²⁺ 离子，进一步提高了 Sb₂S₃/TiO₂ 光电阳极的光阳极电流和光稳定性。

C09-47

高水氧化效率的 WO₃ 光阳极的可控构筑及改性策略研究

李东*

北方民族大学

光电化学 (PEC) 分解水制氢是实现太阳能-氢能转换的最为理想途径之一，有望成为解决能源短缺和环境污染的首选方案。光阳极上的水氧化反应是整个反应体系的速控步，是影响太阳能-氢气转化效率的重要因素。因此，如何设计高效、稳定和经济的的水氧化光阳极材料一直是本领域学者研究的热门课题。n 型半导体 WO₃ 已被广泛地用作为 PEC 光阳极材料。但其光生电子-空穴对易复合导致光电转换效率较低；仅能吸收 460 nm 以下波长的太阳光，降低了太阳光的利用率。针对 WO₃ 存在光吸收弱和载流子传输能力有限的问题。研究团队在前期工作中通过结构工程、掺杂改性以及异质结构构建的多种手段对 WO₃ 进行了改性。改性后的 WO₃ 显示出了优越的 PEC 分解水性能。

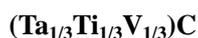
C09-48

结构调控载流子在金属氧化物与金属界面的传输路径研究

马波*

北方民族大学

能源短缺和环境问题是全球需要面临的共同问题，目前以金属氧化物为代表的半导体光催化技术解决上述问题具有较高潜在价值。氧化亚铜和氧化钛由于较好的光吸收和形貌多样等优点，已被广泛应用于光催化技术的研究中。但是单一半导体材料由于较强的载流子复合作业，在使用过程中往往会受到一些限制，因此常将金属与金属氧化物材料组合形成复合界面，一方面将实现载流子有效分离，另一方面可以利用金属表面等离子体共振效应产生的高能电子，进一步增强材料光催化性能。通过简单的液相反应使金属与金属氧化物结合，分别构建核壳、嵌入、空心等多相异质结构，通过结构调控电子在界面的传输路径，促进载流子的产生和分离，从而有效增强复合材料的催化性能。

C09-49**Microstructure, mechanical, thermal, and tribological properties of medium-entropy carbide**

Hai Zhang, Wanxiu Hai*

North Minzu University

In this paper, $(\text{Ta}_{1/3}\text{Ti}_{1/3}\text{V}_{1/3})\text{C}$ medium-entropy ceramics (MECs) were fabricated by spark plasma sintering at 1500–2000 °C and 40 MPa using TaC, TiC, and VC as raw materials. Subsequently, the microstructures and the mechanical, thermal, and tribological properties of the MECs were investigated. When using a sintering temperature of 1900 °C or above and a holding time of 10 min, MECs with a rock salt structure and a relative density greater than 99% can be obtained. With increasing sintering temperature, Ti-rich phase carbides are formed first, followed by the formation of MEC grains containing uniform distributions of Ta, Ti, and V. High-density dislocation arrays and cross-slip exist in the MEC grains, which show a strong lattice distortion and dislocation pinning effect. This leads to an increase in hardness. With increasing holding time, more oxygen impurities are introduced into the MECs, which promotes crack deflection and improves the fracture toughness. Notably, the fracture toughness of MEC-19-30 reaches 5.4 MPa m^{1/2}. However, the thermal conductivity of the MECs is significantly lower than that of binary carbides, with MEC-19-10 exhibiting a thermal conductivity of 7.3 W m⁻¹ K⁻¹ at 25 °C. When coupled with cemented carbide, MEC-19-10 shows excellent wear resistance, with specific WRs of 1.2×10⁻⁷ mm³ N⁻¹ m⁻¹ at 25 °C and 4.4×10⁻⁶ mm³ N⁻¹ m⁻¹ at 600 °C. The development of MECs with high toughness and good wear resistance in this paper provides a certain reference for the preparation of wear-resistant ceramics.

C09-50**YF₃添加对液相烧结 SiC 陶瓷热学性能的影响**

何超凡*

北方民族大学

在本研究中, 分别使用 AlN-Y₂O₃、AlN-Y₂O₃-YF₃ 作为烧结助剂用放电等离子烧结(SPS)制备了致密的 SiC 陶瓷。对比了二元助剂体系和三元助剂体系对材料热学性能的影响规律。研究了不同助剂对 SiC 陶瓷微观结构的影响以及微观结构与导热系数的关系。与 AlN-Y₂O₃ 作为二元助剂烧结的 SiC 陶瓷相比, AlN-Y₂O₃-YF₃ 作为三元助剂烧结的 SiC 陶瓷表现出更高的热导率, 为 102.9 W/(m K)⁻¹。对热导率、相组成和微观结构之间的相关性进行了解释。

C09-51**粘结剂喷射打印碳化硅陶瓷的致密化研究**

陈振祥*

北方民族大学

采用粘结剂喷射 (BJ) 成型, 通过粉体组分优化, 实现复杂形状碳化硅成型。设计不同酚醛树脂浓度与浸渍循环次数方案, 探究了素坯的增碳工艺。实验结果表明: 粉末优化可以使素坯密度由 1.19 g/cm³ 显著提升至 1.58 g/cm³; 酚醛树脂浸渍处理有效填充素坯内部孔隙, 进一步提升了密度, 样品素坯密度增至 1.81 g/cm³。经过渗硅工艺得到的碳化硅陶瓷密度 2.93 g/cm³, 导热系数 155 W/(m K)。本研究证实, 酚醛树脂多次浸渍是提升粘结剂喷射碳化硅陶瓷致密度与导热性能的有效后处理途径。

C09-52

具有内嵌纳米异质结构的空心 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Pt}$ 纳米笼的制备及其高效光催化性能研究

马改兰, 马波*

北方民族大学

基于半导体的光催化技术被认为是解决污染物降解和新能源产生的有效而经济的途径。然而, 太阳能的有效利用和光生载流子的快速复合极大地影响了催化性能。本文采用模板法合成了具有等离子体效应的 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Pt}$ 空心纳米笼, 其壳层具有 Cu_2O 和 Pt 纳米颗粒互嵌的二级异质结构。与立方 Cu_2O 和 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Pt}$ 相比, 空心纳米笼具有更好的光催化性能。5 mg 的空心 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Pt}$ 在近红外光照射下对甲基橙 (20 mg/L) 的降解效率为 91.2%, 在可见光照射下对甲基橙 (50 mg/L) 的降解效率为 96%。此外, 空心 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Pt}$ 纳米笼对抗生素的降解和光催化产氢演化具有增强作用, 表明该纳米笼在光催化降解不同污染物和产氢演化方面具有潜在的应用前景。优越的光催化性能是多种优势协同作用的结果, 包括更大的比表面积、更合适的 d 带中心、多次漫反射、LSPR 效应和增强的局部电磁场。该研究提供了一种具有二级异质结构和 LSPR 效应的空心纳米笼优化策略。

C09-53

一步温和合成 $\delta\text{-MnO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 正极用于水系锌离子电池

常世豪, 甄诚, 杨少林*

北方民族大学

锰基氧化物被视为水系锌离子电池 (ZIBs) 极具前景的正极材料。然而, 其实际应用受限于缓慢的锌离子扩散动力学和 MnO_2 结构的不稳定性。为克服 $\delta\text{-MnO}_2$ 的固有缺陷并显著提升 ZIBs 性能, 研究者开发了 $\delta\text{-MnO}_2/\text{MXene}$ 复合正极材料。但现有 $\delta\text{-MnO}_2/\text{MXene}$ 正极材料普遍存在制备工艺复杂、需高温高压条件或耗时过长等问题。针对这些技术瓶颈, 本研究采用温和条件下的一步原位生长策略, 成功制备了 $\delta\text{-MnO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合正极。该材料兼具 $\delta\text{-MnO}_2$ 的高比容量优势和 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米片的高导电特性, 同时高度导电的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 骨架能有效抑制 $\delta\text{-MnO}_2$ 不可逆的结构损伤。测试表明: 基于 $\delta\text{-MnO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 正极组装的锌离子电池展现出显著优化的电化学性能-在 0.1 A g^{-1} 电流密度下获得 320.6 mAh g^{-1} 的高比容量, 在 3.0 A g^{-1} 大电流下仍保持 153.0 mAh g^{-1} 的优异倍率性能, 在 136.6 W kg^{-1} 功率密度下实现 440.0 Wh kg^{-1} 的高能量密度, 且循环 1500 次后容量保持率达 70.2%, 性能全面超越纯 $\delta\text{-MnO}_2$ 正极。本研究证实 $\delta\text{-MnO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料有望成为高性能水系锌离子电池的理想正极选择。

C09-54

温和制备 Mn_3O_4 -石墨烯复合材料作为高性能锌离子电池正极

陈泽玺, 杨少林*

北方民族大学

水系锌离子电池 (AZIBs) 因其锌资源丰富、安全性高和成本低等优点, 被视为锂离子电池最受关注的替代技术之一。锰基氧化物作为阴极材料在水系锌离子电池领域展现出较大的应用潜力。然而, 锰基氧化物 Mn_3O_4 的导电性和结构稳定性较差, 导致其在实际应用中面临快速容量衰减和倍率性能差等问题。为了解决这些问题, 本文采用化学合成法制备了 MnO_2 -氧化石墨烯 (GO) 前驱体, 并通过化学还原得到 Mn_3O_4 -还原石墨烯 (rGO) 阴极。rGO 的引入不仅能够提高 Mn_3O_4 的导电性, 还能增强其结构稳定性, 使其具有优异的电化学性能。 Mn_3O_4 -rGO 阴极展现出了在 0.1 A g^{-1} 时 522.3 mAh g^{-1} 的大比容量, 在 2.0 A g^{-1} 时 176.8 mAh g^{-1} 的优异倍率性能。此外, 其在 139.9 W kg^{-1} 的功率密度下实现了 730.8 Wh kg^{-1} 的高能量密度, 经过 800 次循环后容量保持率达到 89.3%, 明显优于 Mn_3O_4 阴极。研究表明, Mn_3O_4 -rGO 复合材料有望成为高性能 AZIB 的潜在阴极。

C09-55

富含氧空位的镍掺杂 $\delta\text{-MnO}_2$ 作为水系锌离子电池的高性能阴极材料

宋倩倩, 李芳芳, 杨少林*

北方民族大学

氧化锰因其成本低、电压高、无毒且稳定性好等优点, 被广泛认为是锌离子电池 (ZIBs) 的优秀正极材料。然而, 其缓慢的反应动力学和结构不稳定性限制了其在锌离子电池中的实际应用。本文介绍了一种在室温下制备镍掺杂的 $\delta\text{-MnO}_2$ ($\text{Ni-}\delta\text{-MnO}_2$) 的一步法。该方法不仅解决了 $\delta\text{-MnO}_2$ 的固有缺陷, 还降低了杂原子掺杂 $\delta\text{-MnO}_2$ 的制备成本和能耗。通过掺杂引入镍, 改变了 $\delta\text{-MnO}_2$ 的结晶度, 并引入了额外的氧空位, 从而提高了导电性, 扩大了比表面积, 并增加了总孔隙体积。这些变化为 $\text{Zn}^{2+}/\text{H}^+$ 离子存储提供了更多的活性位点, 并促进了离子嵌入/脱嵌过程的顺利进行, 从而表现出显著的电化学性能。 $\text{Ni-}\delta\text{-MnO}_2$ 正极在 0.1 A g^{-1} 电流密度下具有 401.6 mAh g^{-1} 的显著比容量, 并实现了高达 540.2 Wh kg^{-1} 的高能量密度。其比容量为 136.0 mAh g^{-1} (136.0 W kg^{-1}), 并且表现出出色的循环性能, 在 1000 次循环后容量保持率高达 75.5%。通过原位表征研究阐明了 $\text{Ni-}\delta\text{-MnO}_2$ 正极材料中 $\text{H}^+/\text{Zn}^{2+}$ 共嵌入/脱嵌的电荷存储机制。这种简便的制备方法和卓越的性能为高性能锌离子电池正极材料的大规模生产提供了一条潜在途径。

C09-56

磁场强度对 12 英寸直拉单晶硅 COP 缺陷均匀性的影响

刘天培, 杨少林*

北方民族大学

在半导体制造中, 直拉 (Cz) 法生长的单晶硅是微电子器件的核心基材, 其晶体完整性及缺陷分布对芯片良品率和可靠性至关重要。然而, Cz 法生长过程中晶体原生颗粒 (COP) 缺陷径向分布不均匀的问题亟待解决。本文通过数值模拟与实验研究, 探讨了不同横向磁场强度 (500 Gs 和 3000 Gs) 对 12 英寸 Cz 单晶硅拉制过程中熔体对流、熔体温度分布及固液界面温度梯度的影响, 并分析了磁场强度对 COP 分布均匀性的作用机制。结果表明, 3000 Gs 磁场强度下的熔体流动、温度分布及固液界面温度梯度更加稳定, 有利于形成低密度且均匀的 COP 分布; 而 500 Gs 磁场强度下, 晶棒从头到尾的 COP 均呈现出高密度且不均匀的分布。实验结果与数值模拟结果一致, 验证了磁场强度对 COP 分布均匀性的显著影响。本研究为优化 Cz 法单晶硅生长工艺、提高晶体质量提供了理论依据和实践指导。

C09-57

新型碳基复合 WO_3 光电催化剂的合成及其光电化学性能研究

钱秋花, 李东*

北方民族大学

在我国“双碳”目标的驱动下, 光电化学分解水 (PEG) 制备氢能被认为是可持续、绿色的太阳能利用方式。该技术利用半导体材料能带结构不连续的特点, 将太阳能用于分解水, 从而制备便于存储、运输的氢能。本实验以碳球为基底复合 WO_3 合成高效的宽可见光驱动光阳极, 采用简单的水热法合成碳球, 再利用液相法复合 WO_3 形成异质结构光催化剂。在这项研究中, $\text{WO}_3@\text{CNs}$ 异质结构减少了光电催化电荷-空穴的复合并扩展了光吸收能力, 从而提高了光催化活性。