



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

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

D22-先进陶瓷材料
D22-Advanced Ceramic Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

D22. 先进陶瓷材料

分会主席：宋力昕、陈立东、林华泰、涂溶、张涛

D22. 先进陶瓷-01

碳化硅/铝复合材料研究及其在新能源汽车中的应用

肖汉宁¹, 谢佳伟¹

1. 湖南大学

随着新能源汽车的快速推广应用,轻量化和智能化已成为当前汽车工业技术发展的两大趋势,高制动性能的轻量化新材料刹车盘倍受关注。碳化硅/铝(SiC/Al)作为一种新型刹车盘材料,在轻量化和制动性能方面优势显著。基于SiC多孔陶瓷的孔结构形成机制,对SiC多孔陶瓷的孔结构进行优化设计和调控,制备出一系列3D-SiC网络骨架,配合以真空/气压熔渗Al合金工艺制备出具有不同微观结构的3D-SiC/Al复合材料。研究了不同孔结构的SiC多孔陶瓷对复合材料微观结构、相组成以及热学和力学性能的影响,分析并提出了通过调控微观结构进而优化复合材料性能的方法。研究表明,在3D-SiC/Al复合材料中构建SiC网络骨架可有效调控复合材料的热膨胀系数,使金属和陶瓷形成良好结合界面,获得同时具有高热导率和高强度的3D-SiC/Al复合材料,为新能源汽车用轻量化刹车盘的材料设计提供了新的参考。

D22. 先进陶瓷-02

极端服役环境用新型氮化硼系陶瓷材料与应用研究

贾德昌^{1,2}、周玉^{1,2}、段小明^{1,2}、杨治华^{1,2}、蔡德龙^{1,2}、牛波^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学材料学院工信部重点实验室

2. 哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所

新型低轨卫星姿轨控霍尔电推力器喷管、飞行器天线窗/罩等核心关键部件要经受剧烈热震或热震疲劳、高温高速离子溅射侵蚀、机械冲击振动等极端服役环境,还需二次电子发射或透波/伽马射线特性、热疏导等要求,对所需材料提出严苛挑战。氮化硼因其良好的耐高温、耐离子溅射侵蚀等性能成为重要候选材料,但其难烧结致密化、易吸潮、力学性能差等弱点严重制约其应用。通过溶胶-凝胶法、固相反应法等引入助烧剂、外加或原位反应自生强化相、以及调控晶粒或各相的结构与形态分布,攻克了氮化硼力学性能差、易氧化吸潮,以及抗热震-耐烧蚀、力学-电学等工程性能指标相互矛盾制约等难题,发明了高强韧、抗热震、耐烧蚀、耐高温、耐离子侵蚀、透波和透伽马射线性能优良、定向疏导能力强等多种具有自主知识产权的新型氮化硼系陶瓷材料,研发出多种关键防热或高温部件,突破了卡脖子问题,并获得成功应用。本报告将就相关成果及研发过程的体会与思考进行概要介绍。

D22. 先进陶瓷-03

中空晶粒结构高强度超级隔热陶瓷

汪长安¹

1. 清华大学

随着航空航天领域的发展,对耐高温轻质隔热材料提出了更高的要求。然而,在1000°C以上的高温环境中,由于毛细作用能较大,纳米结构往往倾向于不稳定,因此纳米结构材料在高温下的应用受到一定的限制。通过利用难熔陶瓷的高温稳定性,本研究开发了一种新的制造多孔纳米晶粒材料的方法,以实现宽温度范围内的高强度超级隔热性能的制备。在这种材料中,气孔大多被隔离在单个晶粒内部,其尺寸与空气分子的平均自由程相当,从而通过克努森效应(Knudsen effect)大大降低了热导率,同时致密的孔壁结构又赋予了其具有足够高的强度。本研究制备的中空晶粒La₂Zr₂O₇陶瓷证实了这一概念,通过强度-密度的关系,可以推断出该中空晶粒多孔陶瓷属于Voronoi多边形泡沫陶瓷结构,该材料展示超高的气孔率(高达88%),在室温至1400°C下具有超低的热导率(0.016~0.03 W/(m·K))和高强度(抗压强度101~259MPa),显示出优异的热稳定性。这种中空晶粒高强度多孔陶瓷的合成策略具有一定的普适性,可

以应用于其它陶瓷材料体系，在耐高温轻质隔热材料方面具有广阔的潜在应用前景。

D22. 先进陶瓷-04

晶粒定向 SiAlON 陶瓷刀具

谭大旺¹, 肖水清¹, 李卫¹, 林华泰²

1. 岭南师范学院
2. 广东工业大学

在放电等离子加热下进行烧结-锻造，在高温下通过自由压缩，面限制压缩，中心挤出等手段，获得了系列不同类型晶粒定向的织构化 SiAlON 陶瓷刀具材料，结合刀具几何参数设计，制备了系列晶粒定向 SiAlON 陶瓷刀具，并进行了切削性能与磨损机理研究。自由压缩下获得晶粒 a,b 轴定向结构，外柱面限制轴向压缩诱导中心流动变形后得到晶粒 c 轴平面辐射状取向结构，中心挤出形成晶粒 c 轴一维取向。晶粒定向 SiAlON 陶瓷的织构化程度较高，晶粒的取向角平均值低至 9.6°。在平行晶粒 c 轴取向的平面，硬度更高；在垂直晶粒 c 轴取向的方向韧性更高；断面垂直晶粒 c 轴取向时强度更高。制备的刀具用于高速切削 In718 高温合金，当棒状晶粒平行于刀具的切削刃时，切削性能更好。与晶粒随机取向刀具或其他结构刀具相比，其抗沟槽磨损和剥落的能力更强，使得切削刃、前后刀面的磨损缓慢而稳定。基于显微结构精细调控，以性能择优取向对晶粒取向进行设计，为制造优异性能 SiAlON 陶瓷刀具提供了可能。

D22. 先进陶瓷-05

过渡金属硼化物增强增韧的氮化硅陶瓷性能调控研究

于俊杰¹, 唐绍钧², 郭伟明², 林华泰²

1. 广东技术师范大学
2. 广东工业大学

氮化硅 (Si₃N₄) 陶瓷因其低密度、优异的力学性能以及良好的耐磨损和耐腐蚀性能，被广泛用于汽车发动机部件、滚珠轴承、切削刀具及散热基板等领域。Si₃N₄ 主要有两种晶型：α-Si₃N₄ 和 β-Si₃N₄，α-Si₃N₄ 为细小的等轴晶粒，具有较高的硬度，但强度和韧性较低；双峰分布的 β-Si₃N₄ 具有较高的韧性和强度，但硬度较低。在不引入第二增强相的情况下，若要提高 Si₃N₄ 陶瓷的硬度，需制备高 α-Si₃N₄ 相含量且具有细小显微结构的 Si₃N₄ 陶瓷，但也因此降低韧性和强度；反之亦然。因此，如何获得高硬度高韧性兼具的 Si₃N₄ 陶瓷，是制约 Si₃N₄ 陶瓷产品高可靠性批量制造的关键瓶颈。研究发现，通过向 Si₃N₄ 陶瓷中引入过渡金属硼化物可显著促进低温烧结下 α-Si₃N₄ 到 β-Si₃N₄ 的相变及长棒状晶粒的长大。本研究主要对过渡金属硼化物的种类及含量对促进 Si₃N₄ 陶瓷中 α-到 β-Si₃N₄ 相变机理、显微结构和力学性能的影响，旨在制备出兼顾高硬度和高韧性 Si₃N₄ 基陶瓷。

D22. 先进陶瓷-06

稀土掺杂氧化铟锌 (LnIZO) 陶瓷靶材晶粒细化机制研究

王之君¹

1. 郑州大学

靶材作为制备平板显示用透明导电薄膜的关键基础材料，其品质影响着整个显示行业的发展进程，因此开展靶材的制备工艺及致密化机制研究具有重要的意义。而晶粒微观组织结构对靶材溅射性能具有重要的影响，如何进一步细化晶粒一直是高性能陶瓷靶材制备的难题。本工作以氧化铟锌 (IZO) 陶瓷靶材为主体，提出掺杂诱导晶粒细化的策略，引入稀土元素作为晶粒细化剂，通过工艺优化，制备出晶粒细小的高致密 LnIZO 靶材。结合 XRD\SEM\XPS 等表征手段深入分析了稀土元素种类、掺杂含量、电子结构等对致密化过程中靶材致密度、物相结构、晶粒尺寸以及电阻率的影响规律。探讨了 LnIZO 靶材的晶粒生长动力学和晶粒细化机理，推断出掺杂有限固溶引起的溶质转化形成微量 LnInO₃ 相富集 In₂O₃ 相晶界处，产生晶界迁移的阻力效应，阻碍了晶粒的进一步生长。这项工作提供了一种通过掺杂诱导晶粒细化来提高氧化物靶材性能的独特思路，为高性能氧化物陶瓷靶材的制备提供了理论支撑。

D22. 先进陶瓷-07**高熵碳化物陶瓷的主元设计与组织性能调控**王玉金^{1,2}, 陈磊¹, 张文¹, 苏文韬¹, 孔庆易¹, 陆文玉¹, 周玉^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学

2. 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室

过渡金属碳化物高熵陶瓷由于多主元复杂性为组织性能带来了广阔的调控空间。研究了高熵碳化物陶瓷主元种类及其含量对物相形成和微结构演变的影响规律, 并初步探讨微结构特征对力学性能和热物理性能的影响。结果表明: 主元元素种类和含量及其主元元素间耦合机制对高熵陶瓷单相形成能力有着显著的影响, 通过序列特征选择(SFS)推断出晶格畸变量、混合焓、固溶体形成温度和各主元平均熔点对高熵碳化物陶瓷单相形成能力影响较大。发现(TiZrNbTaMo)C 高熵陶瓷的单相形成能力、元素偏聚及其硬度与各主元含量密切相关, 主元数对高熵陶瓷强硬化有一定影响, 如六主元(TiZrHfNbTaMo)C 高熵陶瓷的显微硬度高于同体系其他五主元高熵陶瓷。而(TiZrHfVNBa)C 高熵陶瓷具有较高的碳空位容忍度(非化学计量比), 可保留高达~40%的碳空位, 无任何第二相产生。在 2150 °C 无压烧结制备出致密的非化学计量比(TiZrHfVNBa)C_{0.6} 高熵陶瓷, 其致密度、抗弯强度、维氏硬度和断裂韧性分别为 97.9%、201MPa、18.4GPa 和 3.4MPa·m^{1/2}, 其热导率仅为 6.4 W·m⁻¹·K⁻¹, 明显低于其他过渡金属碳化物陶瓷体系。基于上述发现, 通过多元素设计高熵化和非化学计量调控可有效调控碳化物高熵陶瓷的烧结性能、力学性能和热物理性能, 实现不同温度区间内热导率的精细化调控, 为高超声速飞行器热防护、高功率器件防热散热等领域用热控材料设计优化提供了思路。

D22. 先进陶瓷-08**高熵超高温陶瓷的低温致密化与力学性能研究**郭伟明¹

1. 广东工业大学

高熵超高温陶瓷(硼化物、碳化物等)拥有卓越的硬度, 但是烧结温度较高(≥ 2000 °C)、断裂韧性较低(2~4 MPa·m^{1/2})。针对上述问题, 在本研究中, 引入 Co 作为烧结助剂, 在 1500 °C 条件下成功制备了高硬度且致密的(Hf, Zr, Ta, Nb, Ti)B₂ 陶瓷; 设计了 Co-W 复合烧结助剂, 不仅保持了低温致密化效果, 还通过形成 Co-W-B 三元相增强了(Hf, Zr, Ta, Nb, Ti)B₂ 陶瓷的韧性(~6.63 MPa·m^{1/2})。利用 Co 制备无损伤 SiC_w 增强(Ti, Zr, Nb, Ta, Mo)C 陶瓷, 在降低烧结温度的同时显著发挥 SiC_w 增韧的作用, 将断裂韧性提升至~7.2 MPa·m^{1/2}; 另外, 应用 Cr 和 CrN 作为新型烧结助剂, 在 1600 °C 下制备出超细晶粒(0.17~0.25 μm)和高硬度(26.73~28.16 GPa)的(Ti, Zr, Nb, Ta, Mo)C 陶瓷。

D22. 先进陶瓷-09**高压条件下陶瓷材料结构微观动力学及性能研究**季伟¹

1. 武汉理工大学

特种陶瓷材料具有高硬度、高强度、耐高温、耐腐蚀等优异特性, 是高技术产业和国防工业不可或缺的关键材料。传统的陶瓷制备在高温、长时间烧结条件下会导致晶粒显著长大, 引起性能劣化。针对这一问题, 近年来我们开展了(超)高压烧结条件下的陶瓷结构微观动力学研究, 发展了基于类塑性变形为控制机制的陶瓷高压、低温、高效致密化新原理, 研发了全新的高效烧结与晶粒生长控制技术, 建立极端条件下陶瓷微结构与新性能之间的关系, 在陶瓷基础科学研究领域获得了一系列成果。

D22. 先进陶瓷-10**用于多核素固化的钙钛锆石基固化体的研究**孙世宽¹

1. 佛山大学

本研究主要聚焦于钙钛锆石陶瓷及玻璃陶瓷在多核素固化过程中结构特征的演化规律。首先,研究了烧结温度对钙钛锆石陶瓷物相及微观结构的影响。结果表明,在 1400℃ 下烧结的陶瓷达到了致密化,并形成了钙钛锆石-2M 型结构。其次,评估了钙钛锆石陶瓷在协同固化 CeO₂ 及模拟金属结构件中的可行性,发现其能够形成致密的钙钛锆石固化体,对多核素展现出良好的化学兼容性。最后,探讨了钙钛锆石玻璃陶瓷固化多核素的可行性,结果表明其依然能够形成以钙钛锆石相为主的玻璃陶瓷,对多核素具有良好的化学兼容性。通过原位观察的浸出实验,初步揭示了钙钛锆石玻璃陶瓷的微结构特征与其服役稳定性之间的内在关系。该研究为钙钛锆石陶瓷及玻璃陶瓷在高放废物处理中的应用可行性提供了重要参考,并为开发高效的处理技术提供了新的思路。

D22. 先进陶瓷-11

连续纤维增韧陶瓷复材数字化建模与自主仿真软件研制

刘建涛¹, 彭一帆¹, 谭广胜¹, 符美桐¹, 杜小龙¹

1. 西南交通大学

连续纤维增韧陶瓷复材(CMC)具有耐高温、高比强、性能可设计等优点,在航空航天、核电等领域有着广泛的应用。CMC 制备过程难以避免在基体、纤维束内和束间产生形状复杂、分布非均匀和尺寸差异较大的自然缺陷,同时其增韧相编织方式极为复杂,导致其微观组成的精确建模和跨尺度性能精确预测存在诸多困难。研究团队结合水平集法和自研网格智能剖分策略,建立了 CMC 零~三维任意编织预制体精确数字化设计方法和增韧相各向异性性能自动赋值策略。同时,采用三维计算机显微断层扫描技术提取化学气相渗透工艺制备 CMC 试样的自然缺陷等数据,发展了自然孔隙智能提取、自动逼近和体积/形状/方向统计分析的通用方法,解决了现有图像识别软件无法统计自然孔隙形状、方向和分布等信息的难点。此外,采用多级均匀化技术实现了兼顾自然孔隙影响的连续纤维增韧陶瓷复材跨尺度性能预测,并采用文献数据验证了预测方法的有效性。最后,采用 QT 和 C++自主研制了 CMC 数字化建模和跨尺度性能预测软件 SWJTU-CMC,可实现零维~三维 CMC 微结构快速设计、宏观模量预测和按需优化,为极端环境用 CMC 材料及构件按需设计提供了高效的工具,同时克服了现有商业软件无法完成复杂预制体及多级自然孔隙特征快速建模和增韧相材料各向异性精准赋值的难题。

D22. 先进陶瓷-12

低功函数(LaBa)B6-ZrB2 复合材料的致密化机制及其热发射性能

杨新宇¹, 赵威¹, 占强胜¹, 罗时峰¹, 张久兴¹

1. 合肥工业大学

高功率、长寿命热电子陶瓷阴极的研制面临着巨大挑战,即在低温下要求高的热电子发射能力和优异的可加工性。本文采用第一性原理获得了具有最低功函数的(La_{0.5}Ba_{0.5})B₆,然后利用放电等离子烧结技术(SPS)将高弹性模量的 ZrB₂ 与(La_{0.5}Ba_{0.5})B₆ 进行复合,并对该材料的致密化行为、微观结构、热发射性能进行了系统化研究。在温度 T=1800℃ 的条件下,获得了致密度为 98.08%的(La_{0.5}Ba_{0.5})B₆-ZrB₂ 复合材料,且烧结过程中材料的致密机制由颗粒重排转变为晶界扩散,相应的致密表现活化能分别为 282.75 kJ/mol 和 466.54 kJ/mol。复合材料在 T=1500℃ 时的最大电流密度为 12.93 A/cm²,高于 LaB₆ 在 T=1600℃ 时的最大电流密度 11.71A/cm²,这是因为(La_{0.5}Ba_{0.5})B₆ 具有高的费米能级和弱的电子约束力;复合材料的实际功函数分布(PWFD) 为 0.36 eV,表明其具有良好的发射均匀性。

D22. 先进陶瓷-13

冷烧结工艺辅助低温烧结 BNT 基陶瓷

梁岚青¹, 冯培忠¹, 朱超琼¹, 蔡子明¹

1. 中国矿业大学

冷烧结(CSP)工艺是近年来新兴的一种高效、节能的材料方法。本工作采用 CSP 工艺,成功制备出致密度不低于 97%的(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{0.94}Ba_{0.06}TiO₃ 基电介质陶瓷。研究了冷烧结工艺和 NaNbO₃ 含量对冷烧

结试样致密化和显微组织以及介电、铁电和储能性能的影响。冷烧结后的样品经过退火处理，陶瓷的相对密度均大于 97%。在 29 ~ 292℃ 温度范围内，BNTBT-0.3NN 的 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 降低，介质温度稳定性提高， $TCC \leq \pm 15\%$ ，在 200 kV/cm 的电场下，储能密度最高，为 1.5 J/cm³，储能效率为 60%。在透射电镜测量的基础上，探讨了冷烧结辅助烧结机理。本研究提供了一种简单高效的冷烧结辅助烧结方法，可在较低温度下获得致密的(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{0.94}Ba_{0.06}TiO₃ 基陶瓷，且具有良好的介电性能和铁电性能。

D22. 先进陶瓷-14

新型超特高压气体内绝缘材料-氮化硅复合陶瓷

张一铭¹，张一铭^{1,2}，聂京凯^{1,2}，侯东^{1,2}，刘辉^{1,2}，韩钰^{1,2}

1. 国网智能电网研究院有限公司先进输电技术全国重点实验室
2. 国网智能电网研究院有限公司电工新材料研究所

目前，特高压直流穿墙套管中采用的支柱绝缘子均由环氧复合材料制造。随着用电需求的迅速增长，设备内部电、热工况条件日趋严峻，环氧复合材料支柱绝缘子沿面绝缘性能可靠性问题日渐突出。陶瓷材料具有高绝缘性、高机械强度，在绝缘高压直流电气设备内具有一定应用潜力。该文探索了一种新型超特高压气体内绝缘材料，氮化硅复合陶瓷。详细探究了不同助剂体系下，氮化硅粉体的致密化行为和生长动力学分析。通过分段无压烧结，在无压烧结下可得到室温、低场下体积电阻率为 $7.33 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ 的氮化硅复合陶瓷，该材料表现出了较优的力学和耐酸蚀性能。研究成果为超特高压气体内绝缘材料设计提供了一种新思路。

D22. 先进陶瓷-15

超快速光固化陶瓷 3D 打印技术及其产业化应用探索研究

朱朋飞¹

1. 深圳奇遇科技有限公司

本报告聚焦于超快速陶瓷 3D 打印技术在颠覆性超材料结构制备领域的应用。该技术以其高效性和创新性，为制备具有特殊性能和复杂结构的超材料提供了新途径，使得复杂的超材料结构和功能能够在陶瓷材料中实现；重点介绍了超快速陶瓷 3D 打印的技术特点和优势，包括高精度、个性化设计以及超快速制造等；并分享具体陶瓷 3D 打印超材料结构应用案例，此外，还将讨论当前面临的挑战和未来的发展趋势，为进一步研究和应用提供了方向。

D22. 先进陶瓷-16

高比表面积高纯氧化铝的制备及其形貌控制机理研究

唐文奇¹

1. 上海交通大学

高纯氧化铝具有优异的光、电、热和机械性能，是制备光学器件、特种功能陶瓷、集成电路衬底的关键材料，这些领域对氧化铝的纯度、形貌、孔隙结构等参数要求极高。本文研究了铵盐在煅烧氢氧化铝（Al-H₂O 反应产物）过程中对产物粉体微孔和形貌的作用机制，优化了氧化铝粉体的孔径结构。铵盐煅烧过程中分解产生的气体（NH₃ 和 CO₂）可以调控孔隙和晶体结构，防止粉体中毛细孔的坍塌，有利于形成海绵状形貌和更多的活性位点，具备良好的吸/脱附和负载特性。结果表明，用碳酸铵、碳酸氢铵、乙酸铵辅助制备 γ -Al₂O₃ 的比表面积分别为 441.35、459.23、427.32 m²·g⁻¹。另外探明了氧化铝的“继承”特性和颗粒圆化的煅烧机制，将（超声）Al-H₂O 反应产物氢氧化铝在 1250 °C 煅烧后进行研磨，获得粒度 D₅₀ 为 159 nm 以及纯度大于 99.999% 的超细类球状高纯 α -Al₂O₃。

D22. 先进陶瓷-17

待定

王珂¹

1. 清华大学

D22. 先进陶瓷-18**用于高温陶瓷电容器的共掺杂锶石(CaTiSiO₅)基介质陶瓷研究**刘志甫¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

高温陶瓷电容器在航空航天、石油探测、地质勘探等领域有重要的应用。目前商用的高温陶瓷电容器工作温度可达 260℃，所使用的材料都为 CaZrO₃ 基线性介质，但其介电常数只有 30~40，探索更高介电常数的宽温度稳定性介质材料是获得高比容高温电容器的前提。掺杂的锶石基介质陶瓷是一种有潜力的高温陶瓷电容器介质材料，本团队围绕锶石介质材料温度稳定性调控开展了系统的研究工作，通过比较 Ca 位共掺杂、Ti 位共掺杂和两个位置同时掺杂等不同的掺杂取代策略，实现了其温度稳定性的有效调控，获得介电常数 50 以上、工作温度范围优于 -55~300℃ 且具有低介电损耗、高绝缘电阻等优良特性的高温电容器介质材料。

D22. 先进陶瓷-19

待定

吴家刚¹

1. 四川大学

D22. 先进陶瓷-20**高储能密度反铁电材料及多层电容器的应用基础研究**陈学锋¹，闫世光¹，曹菲¹，丁李辉¹，王根水¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

反铁电材料具有储能密度高、充放电速度快等优点，国外已将其制成多层陶瓷电容器并实现了特殊场合应用。反铁电材料要制作成电容器并实现实际应用，一方面，反铁电材料必须具有高储能密度，长充放电寿命和良好的温度稳定性；另一方面，反铁电瓷粉需满足多层电容器制备工艺要求，瓷粉粒径适中且分布窄并可与内电极实现共烧等。本研究团队自 2004 年开始，一直致力于解决反铁电材料实际应用中存在的储能密度低、充放电寿命短、温度稳定性差等问题，并进一步探究影响宏观性能深层的物理机制，最终与电容器企业合作研制的反铁电电容器实现了 0→1 的突破，达到实际应用的要求。本报告围绕反铁电材料应用中存在的五大问题展开，并讨论反铁电材料在相关领域的应用前景。

D22. 先进陶瓷-21**铁电畴调控实现 PNN-PIN-PT 巨压电性**彭巍¹，王宾¹，常江磊¹，刘振²，王根水²，董蜀湘^{*1}

1. 深圳大学

2. 中国科学院上海硅酸盐研究所

Lead-based perovskite-type relaxor ferroelectrics are extensively used in piezoelectric motors, piezoelectric sensors, energy harvesting, etc. due to their excellent piezoelectric performance. High piezoelectric coefficients (d_{33}) (≥ 900 pC/N) have been obtained in several systems. Further to increase the value of d_{33} has drawn the great attention of researchers. Besides the construction of multiphase coexistence, alternative methods are proposed to further flatten the free energy profile, such as aliovalent doping (Sm-doped PMN-PT), polar nanoregions (PNRs) generated by B-site multiple heterovalent cations, etc. Among them, the ferroelectric domain

plays an important role in the piezoelectric performance of ferroelectric ceramics.

Herein, we report that $0.49\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-}0.2\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-}0.31\text{PbTiO}_3$ (PNN-PIN-PT) system has exhibited high d_{33} (940 pC/N) with ordered ferroelectric domain (tetragonal 90° , and rhombohedral 71° , 109°), similar to the reports with different composition. When adding LiNbO_3 (LN) into the system, majority structured macro-domains transform into random micro-domains with smaller sizes, which disrupts these long-range ordered ferroelectric domains, resulting in significant piezoelectric enhancement. The PNN-PIN-PT-1.8LN ceramics exhibit giant piezoelectric responses with $d_{33} = 1112$ pC/N, $d_{33}^* = 1220$ pm/V (@ $E = 5$ kV/cm), $\epsilon_r = 12092$. These findings contribute to a more comprehensive understanding of the underlying factors that give rise to the phenomenon of giant piezoelectricity.

D22. 先进陶瓷-22

绿光陶瓷封装 LED 及其照明与显示应用

周有福¹, 凌军荣¹, 洪茂椿¹

1. 中国科学院海西研究院

相比常用 YAG:Ce 黄光陶瓷, 绿光陶瓷封装 LED 具有功率大、水中穿透好等优点, 在水下集鱼、海洋科考等照明场合应用前景广阔, 也有望解决 RGB 显示中绿色激光光源的性能短板问题。基于团队前期工作, 引入湿化学法合成石榴石型绿光陶瓷粉体, 比传统固相反应法更好调控合成条件, 获得高质量粉体原料, 同时采用晶体工程、功能基元理论, 引入晶体场调控和发光基元, 优化陶瓷烧成制度, 研发了高光效、抗热衰的绿光陶瓷, 结合精密加工和 LED 封装配套技术, 产研合作开发了万瓦级海洋集鱼灯, 相比金卤灯等传统集鱼灯, 具有节能、环保、紧凑、皮实等优点, 远洋捕鱼实际应用取得良好效果。荧光陶瓷封装 LED 光源 (PCLED) 在光强、寿命等性能表现出差异化技术优势。进一步研发绿光陶瓷有望成为 LED 照明与显示细分领域的关键材料。

D22. 先进陶瓷-23

高功率法拉第光隔离器用磁光陶瓷的微结构控制与性能研究

李江¹, 章立轩¹, 胡殿君¹, 李晓英¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

法拉第光隔离器作为激光系统的重要组成部分, 其主要作用是隔离反向光, 防止激光系统中不同部分之间的不必要反馈, 对于激光放大和提高激光系统的稳定性有着重要意义。随着激光系统向着高功率的方向发展, 磁光隔离器的需求也在不断增加。目前在可见及近红外波段应用最为广泛的磁光材料是 $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (TGG) 单晶, 其具有优秀的综合性能, 已占据了主要市场, 但 TGG 单晶在高功率下的服役性能并不理想, 且难以满足器件小型化的需求, 因此迫切需要寻找具有更高 Verdet 常数和更佳热光性能的替代材料。TAG 磁光陶瓷的 Verdet 常数高于商用 TGG 单晶, 有利于磁光器件与系统的小型化, 并在高功率法拉第光隔离器中存在应用前景。本论文对 TAG 陶瓷进行了微观结构与组分调控, 探究了导致第二相出现的原因并采用了多种方式进行解决, 评估了 TAG 陶瓷的磁光服役性能, 最后通过进一步的烧结制度优化, 获得了高光学质量的 TAG 基陶瓷。

D22. 先进陶瓷-24

氧空位在钛酸钡陶瓷致密化与微结构形成中的作用

胡剑峰

1. 上海大学

氧空位作为金属氧化物中普遍存在的本征缺陷, 对调节材料的物理化学性能起着重要的作用。然而, 氧空位如何影响氧化物纳米晶的热稳定性、相关的烧结过程以及材料微观结构的形成, 则研究较少, 尚未清楚。这里, 通过调节氧空位浓度, 研究了其对钙钛矿 BaTiO_3 纳米晶的烧结行为 (涉及致密化和晶粒生长) 的影响。令人惊讶的是, 研究发现氧空位浓度的微小差异导致了纳米晶烧结行为和最终微观结构的显

著差异。出乎意料的是，氧空位浓度较高的 BaTiO₃ 纳米晶的生长速率反而低于氧空位浓度较低的纳米晶。此外，晶粒生长的普适理论很好地解释由不同氧空位浓度而导致晶粒生长行为的变化，并揭示晶粒生长与致密化之间的相关性。此外，观察到的氧空位浓度差异导致钙钛矿 BaTiO₃ 陶瓷中明显不同的孪晶微观结构。这些发现对非化学计量化合物的烧结具有参考意义。

D22. 先进陶瓷-25

铌酸钾钠基压电能量收集陶瓷的构型熵调控研究

席凯彪¹, 侯育冬^{1,*}, 郑木鹏¹, 朱满康¹

1. 北京工业大学

压电能量收集技术作为促进能源低碳转型的环境友好型方法之一，受到了全世界广泛关注，成为科学研究的前沿。高熵概念由于具有热力学上的高熵效应、动力学上的迟缓扩散效应、结构上的晶格畸变效应及性能上的“鸡尾酒”效应，展现出许多传统材料无法比拟的优异性能，逐渐被拓展到陶瓷研究领域，有望成为解决目前材料性能瓶颈问题的关键之一。但是，对于压电能量收集陶瓷而言，体系的构型熵对能量收集性能的影响机制和作用机理仍然模糊不清。因此，本研究采用固相烧结法制备出了具有不同构型熵的 (K_{0.4656(1-x)}Na_{0.5194(1-x)}Bi_{0.015+0.485x}Li_{0.5x}(Nb_{0.9312(1-x)}Sb_{0.0388(1-x)}Hf_{0.015(1-x)}Zr_{0.015+0.985x})O₃ (x = 0.002, 0.004, 0.006, 0.008 和 0.010) 材料体系，系统研究了构型熵对陶瓷的物相结构、微观结构、电学性能及能量收集特性的影响。结果表明，随着构型熵的增加（从 1.23R 到 1.69R），材料的平均晶粒尺寸变化不明显，但物相结构由多相共存的多晶型相界转变为单一的赝立方相，压电常数 d₃₃ 由 98 pC/N 降低至 11 pC/N。在该材料体系中，构型熵的增加一方面导致材料发生物相转变，使得极化方向减少；另一方面其会打破长程铁电有序，铁电畴破碎为极性纳米微区，使材料体系内部变得更加无序，从而导致压电性能恶化。相比于具有高构型熵的材料，具有 1.23R 构型熵材料制备的压电能量收集器展现出优异的发电特性（输出电压为 1.21 V，输出电流为 0.81 mA，输出功率为 8.65 mW）。综上表明，构型熵通过改变材料的物相结构、极化构型从而影响压电陶瓷的能量收集性能。

D22. 先进陶瓷-26

Tm₂O₃ 透明陶瓷的制备及光学性能研究

朱林林¹

1. 广东工业大学

氧化铥 (Tm₂O₃) 透明陶瓷是一种稀土倍半氧化物，由于电子层结构的特殊性使其具有独特的光学性能，在波长为 1.4 和 2.0 μm 处的发光有极高的应用价值。在本工作中，采用 Tm₂O₃ 商业粉体，在较低温度下真空烧结制备高质量光学性能的 Tm₂O₃ 透明陶瓷，系统地研究了 Tm₂O₃ 透明陶瓷的光学、热学、力学性能和显微结构的演变。3 at% ZrO₂:Tm₂O₃ 在波长为 880 nm 处透过率为 76.3%，为理论透过率的 94%。同时其硬度和韧性分别为 9.90±0.44 GPa 和 1.25±0.10 MPa·m^{1/2}，热扩散系数和热导率分别为 1.3 mm²/s 和 7.15 W/(m·K)。本工作制备的 Tm₂O₃ 透明陶瓷在可见光、红外光波段具有优良的透过率，是一种有潜在应用的固态激光材料。

D22. 先进陶瓷-27

Low-temperature sintered Mg_{2.1}SiO_{4.1}-CaTiO₃-LiF microwave dielectric ceramics with temperature stability and high-Q×f

Hanju Guo¹, Maosen Fu¹

1. Northwestern Polytechnical University

Mg_{2.1}SiO_{4.1}-yCaTiO₃-2 wt. % LiF (y = 0.09 ~ 0.17) composite ceramics for low temperature co-fired ceramic (LTCC) are prepared through conventional solid phase reaction. Non-stoichiometric Mg_{2.1}SiO_{4.1} sintered at 1,475 °C shows high quality factor (Q×f = 220,000 GHz) for large grain size, high density and single-phase, but the temperature coefficient of resonant frequency (τf) is too negative (-51.5 ppm/°C). In order to

modify the τ_f value to zero, CaTiO_3 ($\tau_f \sim +859 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) is added. When $y = 0.09$, the τ_f of $\text{Mg}_{2.1}\text{SiO}_{4.1-y}\text{CaTiO}_3$ sintered at $1,325 \text{ }^\circ\text{C}$ is about $-5.9 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. To reduce sintering temperature of ceramics further, LiF is added as sintering aid. The $Q \times f$ and τ_f are associated with the addition of LiF, and the sintering temperature of $\text{Mg}_{2.1}\text{SiO}_{4.1-y}\text{CaTiO}_3-2 \text{ wt. } \% \text{ LiF}$ reduces to $950 \text{ }^\circ\text{C}$. But the τ_f is more negative with the addition of LiF, more CaTiO_3 has to be added. Finally, the $\text{Mg}_{2.1}\text{SiO}_{4.1-0.13}\text{CaTiO}_3-2 \text{ wt. } \% \text{ LiF}$ composite ceramics sintered at $950 \text{ }^\circ\text{C}$ shows excellent dielectric properties of $\epsilon_r = 8.61$, $Q \times f = 82,000 \text{ GHz}$ and $\tau_f = -4.4 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. This represents a promising material for LTCC applications.

D22. 先进陶瓷-28

激光 CVD 沉积 β -Ga₂O₃ 取向薄膜的光电响应性能

涂溶^{1,2}, 李宝文¹, 章嵩^{1,2}, 张联盟^{1,2}

1. 武汉理工大学

2. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心

相比于半导体 SiC 和 GaN 材料, β -Ga₂O₃ 具有禁带宽度更大($\sim 4.9 \text{ eV}$)、击穿场强更高($\sim 8 \text{ MV/cm}$)、巴利加优值更大、吸收截止波长更短($\sim 270 \text{ nm}$)和生长成本更低等优势,在大功率、低损耗功率器件及深紫外光电子器件等领域具有巨大的应用潜力。 β -Ga₂O₃ 的物性具有显著而复杂的各向异性,例如,与其它低指数晶轴相比, β -Ga₂O₃ 的 $\langle 010 \rangle$ 晶向具有更小的吸收截止波长,更高的热导率及更优的电子迁移率。因此, β -Ga₂O₃ 薄膜的取向生长意义重大。由于 β -Ga₂O₃ 的(010)晶面的表面能高,且缺乏合适的衬底,目前 β -Ga₂O₃ 的 $\langle 010 \rangle$ 取向生长尚未在异质衬底上实现。

我们首次采用激光化学气相沉积(LCVD)技术,在石英玻璃衬底上获得了 $\langle 010 \rangle$ 取向的 β -Ga₂O₃ 薄膜,并系统研究了沉积温度与氧气流速对 β -Ga₂O₃ 薄膜的择优取向、微观结构和沉积速率的影响。研究表明, $\langle 010 \rangle$ 取向的形成与富氧环境中氧密排面的稳定性更高有关。 β -Ga₂O₃ 薄膜的晶粒尺寸可达 $2 \text{ } \mu\text{m}$,沉积速率高达 $40 \text{ } \mu\text{m h}^{-1}$,比大多数传统方法的速率快。采用 $\langle 010 \rangle$ 取向 β -Ga₂O₃ 薄膜制成的金属-半导体-金属(MSM)型光电探测器,展现出了超快的光电响应速度,这要比基于其它取向 β -Ga₂O₃ 薄膜光电探测器的高 1~2 个数量级。

D22. 先进陶瓷-29

非线性光限幅晶态薄膜材料

谷志刚¹, 井水明¹

1. 福建物构所

三阶非线性光学材料因其在光开关、光限幅和锁模等激光领域具有重要应用而被广泛关注。金属-有机框架(MOF)兼具两者优势,能将无机和有机组分有序结合,实现非线性光学性能的协同优化与突破。然而制备高质量的(满足取向与厚度可控、均匀致密、表面平整等综合指标)MOF 薄膜并探究其非线性光学性能与应用是备受关注的科学问题。报告人通过自主研发的全自动液相外延层层薄膜技术,组装了一系列高质量的 MOF 薄膜,高效制备了取向可控、厚度可调、均匀致密的晶态薄膜;创新提出了多种结构调控策略,充分发挥了 MOF 薄膜材料的特点与优势,调控与强化了薄膜性质;系统研究了 MOF 薄膜的三阶非线性光学性能,建立了内部结构与外部刺激调控其非线性光学研究体系,实现了负载、结构穿插和电刺激等调控非线性光学性能并获得了具有最大三阶非线性吸收系数的材料,开拓了无机-有机晶态薄膜在光限幅领域中的应用。

D22. 先进陶瓷-30

层状结构热电单晶薄膜的制备及柔性机制研究

逯瑶^{1,2}, 何佳清²

1. 东莞理工学院

2. 南方科技大学

热电技术是一种可以实现热能和电能之间直接相互转换的绿色能源转换技术,以碲化铋为代表的层状结构金属硫族化合物(如 Bi₂Se₃, SnSe 等),为当今研究及应用的主流热电材料。柔性热电材料和器件可

以贴在生物体表,通过收集生物体温进行发电,可为迅猛增长的穿戴式/植入式电子设备持续性供电,因而受到越来越多的重视。然而,无机合金固有的刚性和脆性阻碍了它们在柔性新兴应用领域的适用性。随着一系列塑性半导体材料(Ag₂S, InSe等)的深入研究,越来越多的学者关注具有柔性/弯曲性的层状无机半导体材料,以期在柔性热电领域获得实际应用。因此,发展具有良好变形能力的高性能金属硫族化合物薄膜和器件是拓展热电技术新规模化应用的关键。

本工作通过自上而下的方法,从单晶 Bi₂Te₃ 基块体材料中剥离出厘米尺寸的薄膜,薄膜兼具高功率因子和高柔性,在 4mm 弯曲直径下反复弯折超过 1000 次,薄膜电导率仅下降 9%,弯曲性能优于报道的无机热电薄膜。通过类似方法,获得了高性能柔性 Bi₂Se₃ 及 SnSe 单晶薄膜。借助先进的双球差透射电镜和原位力学透射电镜技术,通过高分辨透射电镜图像原位观察到 Bi₂Te₃ 薄膜制备过程中引入的独特交错层结构,该交错层结构来自于范德华间隙附近的 Te 和 Bi/Sb 的原子交换。通过交错层结构及应变的原位演化分析,充分证明了该结构中原子滑移对薄膜柔性的关键作用。采用第一性原理计算了缺陷的相对形成能,推演了由单晶完美结构向交错层结构的原子交换过程。尽管有缺陷形成,薄膜仍继承了单晶的功率因子,p型和n型 Bi₂Te₃ 薄膜的室温功率因子分别达到 4.2 和 4.6 mW m⁻¹ K⁻²,为目前报道的柔性热电薄膜最高值。通过能带结构计算得到载流子有效质量变化,交错层结构的引入使费米能级移向导带,该结构可作为施主杂质,提供电子并抑制空穴,从而导致 p 型薄膜的载流子浓度较单晶下降,而 n 型薄膜的载流子浓度较单晶增加,这种变化确保了薄膜和单晶基本一致的电导率。最终, Bi₂Te₃ 基柔性薄膜的 ZT 值达到 0.9 (p 型) 和 1.1 (n 型)。将 p 型和 n 型 Bi₂Te₃ 基薄膜组装成柔性热电发电器件,在温差为 60 K 时产生的电压和最大功率密度分别为 111 mV 和 321 W m⁻²。本工作为半导体材料结构-性能关系提出了新的科学见解,推动了柔性热电转换技术在消费者产品领域的应用。

D22. 先进陶瓷-31

新型耐磨耐蚀一体化稀土十二硼化物导电高熵陶瓷设计与表征

郑兴伟¹, 张家华¹, 梁拥成¹, 刘吉轩¹, 张国军¹

1. 东华大学

超硬材料已广泛应用于刀刃模具,航空航天、海洋船舶等诸多领域。金刚石是目前最硬材料,但它的热稳定性与化学稳定性较差;立方氮化硼有较高稳定性,但它的硬度只有金刚石的一半左右。尤其,它们制备都需要高温高压、成本高,而且都是不导电的绝缘体,这些固有缺陷大大限制了它们的工程应用范围。本文以稀土十二硼化物为研究对象,通过高熵化设计开发出多种新型耐磨耐蚀一体化稀土十二硼化物导电高熵陶瓷。所设计高熵陶瓷硬度可高达 51.2GPa,导电率与纯金属(Mg 或 Al)相当的,耐磨性能 5.6×10⁻⁶ mm³/N.m。上述优异的性能使的稀土十二硼化物高熵陶瓷在刀具、涂层、航天航空领域具有巨大的应用潜力。

D22. 先进陶瓷-32

β-Si₃N₄ 晶须增强 CaO-B₂O₃-SiO₂ 微晶玻璃的制备与性能研究

赵艳芸¹

1. 北京有色金属研究总院

低温共烧陶瓷(LTCC)技术是近些年来发展起来的电子封装技术,在高频无线通信领域、电子元器件领域、汽车领域以及医疗领域有很广泛的应用。作为 LTCC 技术的核心组成部分——LTCC 基板的研究受到广泛的关注。LTCC 基板主要分为微晶玻璃体系和玻璃+陶瓷体系两大类。其中 CaO-B₂O₃-SiO₂(CBS)微晶玻璃体系由于烧结温度低、高频介电性能优异等优势具有更广阔的发展前景。微晶玻璃材料通常由玻璃相和晶相组成,玻璃在低载荷下容易发生脆性断裂,这使得 CBS 微晶玻璃的抗弯强度较低。因此,进一步开发具有高抗弯强度的 CBS 微晶玻璃,以减少基板材料在使用过程中的机械冲击,满足高性能电子封装的需求具有重要的意义。

本研究采用流延成型工艺成功制备了 β-Si₃N₄ 晶须增强的 CBS 生瓷带,并研究了生瓷带的特性及烧结样品的性能。利用差热分析(DSC)、X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)及透射电子显微镜(TEM)、矢量网络分析仪及电子万能试验机对不同 β-Si₃N₄ 晶须含量的 CBS 微晶玻璃的晶相组成、显微形貌、介

电性能及抗弯强度进行研究。研究表明：烧结样品的晶相为 CaSiO_3 , CaB_2O_4 及 Si_3N_4 。 β - Si_3N_4 晶须与 CBS 微晶玻璃烧结特性良好且没有发生反应。在 15GHz 的测试频率下, 样品的介电常数为 4.8-5.0, 介电损耗为 0.78×10^{-3} - 1.66×10^{-3} 。当 β - Si_3N_4 晶须的添加量为 16wt% 时, 材料的抗弯强度从 192.69 MPa 提升至 229.02 MPa。对抗弯强度提升的机理进行研究, 发现晶须引起的裂纹偏转、裂纹分支和晶须拔出是提高 CBS 微晶玻璃抗弯强度主要原因。

D22. 先进陶瓷-33

$\text{Li}_2(\text{Mg}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.2})_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ 的微波介电性能及熵调控强化其机械性能研究

袁琦¹, 王森¹

1. 辽宁科技大学

微波介质陶瓷(MWDCs)材料介电与机械性能难以协调, 本研究采用高熵特性强化 MWDCs 机械性能。采用固相反应法制备了新型高熵 $\text{Li}_2(\text{Mg}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.2})_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ 陶瓷, 并研究了高熵策略对提升陶瓷微波介电及机械性能的影响。结果表明, 高熵陶瓷具有单一正交结构和 $\text{Pnma}(62)$ 的空间群的纯相, 晶粒尺寸随烧结温度(ST)的升高逐渐增大, 当 $\text{ST} > 625^\circ\text{C}$ 时, 高熵陶瓷会出现明显气孔, 晶粒异常长大, 使得密度降低。在 625°C 下烧结的陶瓷样品具有优异的微波介电性能($\epsilon_r = 9.82$, $Q \times f = 20,514 \text{ GHz}$, $\tau_f = -35.74 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)。除此之外, 高熵设计分别将 $\text{Li}_2(\text{Mg}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.2})_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ 陶瓷的维氏硬度和耐压强度提高至 4.54 GPa 和 441 MPa。高熵设计使得晶体结构发生畸变, 影响键价及键能, 实现对陶瓷微波介电和机械性能的优化。

D22. 先进陶瓷-34

待定

郭洪波¹

1. 北京航空航天大学

D22. 先进陶瓷-35

沉积基元裁剪的热喷涂柱状结构热障涂层

陶顺衍¹, 赵华玉¹, 杨加胜¹, 邵芳¹, 庄寅¹, 盛靖¹, 倪金星¹, 钟兴华¹, 丁传贤¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

等离子体-物理气相沉积工艺(Plasma spray-physical vapor deposition, PS-PVD)是热喷涂技术谱系的新成员, 融合了等离子体喷涂(Plasma spray, PS)和物理气相沉积(Physical vapor deposition, PVD)两种技术的特点, 可实现气、液、固单相或多相的快速沉积, 对复杂工件遮蔽区域具有非视线式沉积(Non-Line-of-Sight, NLOS)的独特功效, 适用于燃气涡轮双联体或多联体导向叶片的涂层制备。因此, PS-PVD 有望成为制备先进航空发动机热障涂层的特色技术[1]。本文通过解析不同沉积时刻(30 ms-100 s)涂层的表面微观结构, 甄别了注入等离子体喷枪的固态粉体颗粒与等离子体射流交互作用后形成的典型沉积基元种类及特征; 通过沉积基元裁剪, 实现了柱状结构热障涂层的可控沉积; 通过一种专属装置及方法设计, 考察了 PS-PVD 非视线式沉积习性, 辨明了典型沉积基元在非视线式沉积中的贡献度。籍此优化工艺, 获得了抗热冲击性能优的长寿命柱状结构热障涂层。

D22. 先进陶瓷-36

待定

章根强¹

1. 中科大

D22. 先进陶瓷-37

高温防护涂层研究及应用

张小锋¹, 谢迎春¹, 毛杰¹, 邓春明¹, 邓畅光¹, 刘敏¹, 周克崧¹

1. 广东省科学院新材料研究所

高温防护涂层是先进航空发动机、燃气轮机等高端动力装备的关键技术, 其面临超高温、复杂应力、氧化腐蚀等苛刻服役环境, 高温防护涂层的材料设计、关键制备技术等对涂层的服役性能有重要影响。本报告中, 首先介绍了高温防护涂层在高端动力装备中的需求背景, 概述了现代表面工程技术的发展趋势, 包括等离子喷涂-物理气相沉积技术(PS-PVD)、液料喷涂技术、冷喷涂技术、真空镀膜技术、激光表面工程技术及复合表面工程技术等。众所周知, 高温防护涂层是航空发动机、燃气轮机等高端动力装备应用的重要领域, 其中有超过三分之一的关键热端部件表面需要使用高温防护涂层。因此, 针对航空发动机、燃气轮机等高端动力装备中热端部件所需求的高温防护涂层, 本报告中概述了高温抗氧化涂层、热障涂层、封严涂层、环境障涂层、隐身涂层和阻燃涂层材料的发展趋势。此外, 针对上述涂层, 重点汇报了本研发团队近几十年来在高温抗氧化涂层、热障涂层、封严涂层、耐磨/耐蚀/耐冲刷涂层、环境障涂层、冷喷涂修复再制造技术的研究进展, 尤其是展示了上述高温防护涂层在型号中的应用进展。最后, 简介了研究所的发展历程、人才结构、平台建设等。

D22. 先进陶瓷-38

SmNbO₄ 基微波介质陶瓷改性及其器件化研究

吴芳芳¹

1. 宁夏大学

5G/6G 通讯技术的研究为微波介质陶瓷材料带来巨大的市场。当前, 高温稳定性、低损耗的 K20 介质材料因满足多种电子器件的应用频率被广泛关注。因此, 本文选取典型的 K20 稀土铌酸钐(SmNbO₄)微波介质陶瓷为研究对象, 采用 A 位、B 位或 A/B 位取代形成固溶体或复相陶瓷的方法实现了对微波介电性能的调控。制备出系列具有低损耗和近零谐振频率温度系数的 K20 微波介质陶瓷材料, 并尝试在介质谐振器天线领域的原型器件设计和制作, 表明该体系陶瓷在 5G 和 C-波段等通信系统中具有良好的应用前景。

D22. 先进陶瓷-39

0.95MgTiO₃-0.05CaTiO₃ 微波介质陶瓷高致密研究机理

任海深¹, 林慧兴¹, 姜少虎¹, 张龙¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

0.95MgTiO₃-0.05CaTiO₃(95MCT)微波介质陶瓷因其具有低介电常数(≈ 21)、高 $Q \times f$ 值(> 50000 GHz)以及谐振频率温度系数近零(≈ 0 ppm/ $^{\circ}\text{C}$)的特点, 在 5G 通讯中得到了广泛的应用。针对 95MCT 陶瓷烧结温度偏高、 $Q \times f$ 值有待提升、致密度低、力学性能较差导致的在高频应用场景下开裂等问题, (1) 利用 Andreasen 方程和 Dinger-Funk 方程两种密堆积模型对 95MCT 陶瓷进行了粉体级配, 研究了不同粗细粉体比例对 95MCT 陶瓷烧结过程的影响。结果表明, 细粉体颗粒和粗粉体颗粒分别提供了烧结活性和钉扎效应, 降低了烧结温度并提高了陶瓷晶粒均匀性和致密度。在粗粉体的质量比为 20%时, 95MCT 陶瓷在 1225 $^{\circ}\text{C}$ 下烧结 3 h 后得到 98.2%的相对密度, 并表现出优异的介电性能和力学性能: $\epsilon_r = 21.1$, $Q \times f = 82000$ GHz, $\tau_f = -0.9$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$, $\sigma_f = 178.7$ MPa, $HV = 8.78$ GPa。(2) 探讨了两步烧结法对 95MCT 陶瓷烧结行为、介电性能和力学性能的影响, 阐述了第一步烧结温度 T1 和第二步烧结温度 T2 对陶瓷晶粒尺寸的调控作用。通过调节 T1 与 T2 的温度与保温时长, 可调控晶界扩散和晶界迁移在烧结过程中的主导地位。95MCT 陶瓷在 1350 $^{\circ}\text{C}/1$ min-1200 $^{\circ}\text{C}/30$ h 的两步烧结下获得最佳微波介电性能: $\epsilon_r = 20.8$, $Q \times f = 82000$ GHz, $\tau_f = -2.16$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$, $\sigma_f = 148.9$ MPa。

D22. 先进陶瓷-40

稀土离子掺杂氧化锆固体电解质中氧离子扩散的分子动力学模拟

范凤英¹

1. 西北工业大学

通过分子动力学模拟研究低浓度(小于 5 mol%)的 Y2O3、Yb2O3、Lu2O3 和 Sc2O3 对氧化锆离子电导率的影响。通过设计离子掺杂对氧化锆的离子电导率进行探究, 结果发现 Y2O3 单掺杂四方氧化锆时, 在 4.17mol% 时出现最大离子电导率 0.034 S/cm, Sc2O3 掺杂得到的最高离子电导率 0.106 S/cm, 在四种离子中离子电导率最大。探究在 4.55mol% Y2O3 中添加部分 Sc2O3 对电导率的影响, 结果表明掺杂 1mol% Sc2O3 时达到了最大离子电导率 0.043 S/cm, 同时 4.55mol%Lu2O3 组分上添加 1mol%Sc2O3 时离子电导率最高为 0.058 S/cm。进一步分析立方结构对离子扩散的影响, 在同等离子浓度和掺杂种类时立方结构的离子电导率显著高于四方相。对氧离子扩散机理研究发现, 相结构直接影响了离子扩散运动的方向, 阳离子与氧离子之间的相互作用力大小影响断键的难易程度, 掺杂浓度过高以及离子半径过大会导致晶格畸变加剧阻碍氧离子的运动。本研究从计算角度出发为离子共掺杂所产生的影响提供了借鉴。

D22. 先进陶瓷-41**等离子喷涂 YSZ/YTO 双陶瓷层热障涂层的厚度优化及界面形貌对陶瓷层残余应力的影响**李嘉雪¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

本文使用 ABAQUS 软件建立 YSZ/YTO (YT_{0.4}O₄) 双陶瓷层热障涂层体系模型, 将残余应力与隔热性能作为标准对双陶瓷热障涂层进行厚度优化设计并制备出 YSZ/YTO 双陶瓷层热障涂层。使用正弦曲线类比陶瓷层之间的界面形貌, 通过改变曲线的振幅和波长来深入探究界面形貌对双陶瓷层热障涂层陶瓷层界面内部残余应力的影响。

D22. 先进陶瓷-42**Tailoring of PVDF and ferroelectric particles for retrieval of piezoelectric particulates to optimize piezo-catalytic water treatment**Kaiyu Feng¹, Yan Zhang^{*1}, Xuefan Zhou¹, Yan Zhao¹, Hanyu Gong¹, Xiang Zhou¹, Hang Luo¹, Dou Zhang¹, Chris Bowen¹

1. Central south university

Powder-based piezoelectric catalysts have been widely examined due to their high piezoelectric catalytic activity for applications which include water treatment. However, challenges associated with secondary pollution as a result of using a catalyst in a powder form remains a concern for researchers. While the use of bulk catalysts can overcome this problem, their catalytic activity has been shown to decrease significantly. In this study, a simple, efficient, cost-effective and in-situ approach to retrieve a powder-based catalyst is achieved by coating ferroelectric catalytic particles with dopamine and exploiting the interaction between dopamine and PVDF. Furthermore, the universality of this strategy is demonstrated by conducting a range of experiments with other ceramics particulates, catalyst morphologies and dyes. Using this new strategy, we demonstrate the ability of ferroelectric particles to achieve piezo-catalysis while being anchored onto a PVDF layer, thereby ensuring a high piezoelectric catalytic is maintained. This work provides a new approach for the retrieval of powder-based catalysts and expands their application potential to other areas of catalysis.

D22. 先进陶瓷-43**可视化高温形变分析技术在先进陶瓷领域的应用**张海媛¹

1. 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、准确的测量先进陶瓷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，适合用于先进陶瓷材料的非均匀收缩测试。同时适用于研究先进陶瓷材料的表面润湿、抗熔融腐蚀等性能。

D22. 先进陶瓷-44

Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ 陶瓷中氧位移促进 1:1 有序相变及畴形成机制

张琳¹, 傅茂森¹

1. 西北工业大学

Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ 陶瓷因具备优异的微波介电性能而成为无线通信系统中微波谐振器和滤波器的核心材料，但目前对其相变过程的认知仍不清晰。本项工作通过设计实验利用热压烧结制备 Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ 陶瓷，成功实现了从无序(Pm-3m)到 1:2 有序(P-3m1)再到 1:1 有序(Fm-3m)的固态相变过程。随后利用高分辨 HAADF-STEM 技术研究有序畴及畴界类型，反推相变过程。发现 1:1 有序畴中 B 位离子的排列符合空间电荷模型的假设，且 1:1 有序会优先选择在 1:2 有序的反相畴界处形核长大。根据 Mg²⁺和 Nb⁵⁺的价态，结构中存在的电荷不均一性会对离子行为产生影响。进而利用对轻元素敏感的 iDPC-STEM 技术表征不同畴结构内所有离子的分布，发现 1:1 有序畴中氧发生迁移，而无序和 1:2 有序畴中无此现象。针对 1:1 有序畴及其畴界处进行键长统计量化处理和几何相位分析。结果显示随着 1:1 有序度增加和远离畴界，氧八面体畸变逐渐严重，体系晶格应变能增加。这表明 1:1 有序畴的形成过程与 B 位阳离子和氧阴离子的迁移有关，其中氧位置偏移有助于维持电荷平衡，保证 1:1 有序稳定存在。该结果直接为空间电荷模型提供了实证。

D22. 先进陶瓷-45

高熵稀土双硅酸盐涂层(Y_{0.25}Ho_{0.25}Yb_{0.25}Lu_{0.25})₂Si₂O₇ 的设计、制备及抗 CMAS 腐蚀研究

刘雨东¹

1. 中国矿业大学

碳化硅陶瓷基复合材料是新一代涡轮发动机叶片的首选材料，而提高环境障涂层的抗 CMAS 腐蚀能力对航空航天发动机叶片的实际应用具有重要意义。本文通过固相烧结法制备了一种高熵等摩尔稀土双硅酸盐(Y_{0.25}Ho_{0.25}Yb_{0.25}Lu_{0.25})₂Si₂O₇，发现其能在 1300℃ 的高温下一定程度上抵抗 CMAS 的腐蚀。腐蚀后样品表面出现 CMAS 熔盐反应析出的 CaSiO₃ 新相。同时，样品由表及里分别出现 Ca-RE-Si-O 磷灰石相以及 Ca²⁺扩散相。随着腐蚀时间的加长，反应前沿向基体内部移动，从而使磷灰石相反应层厚度增加，有效阻挡了 CMAS 熔盐的继续渗透，提高了稀土双硅酸盐的抗 CMAS 腐蚀能力。这项工作设计了一种高熵陶瓷，利用鸡尾酒效应综合调控材料的抗 CMAS 腐蚀能力，为环境障涂层的抗 CMAS 腐蚀能力的提高提供了见解。

D22. 先进陶瓷-46

基于损耗设计的高熵氧化物吸波材料研究

张涛¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

本研究针对吸波材料在高温服役环境下的设计难题，在过渡金属高熵氧化物体系中原位构筑了不同类型异质相以及异质界面，解析了其吸波性能的影响机制以及高温演化规律，并进一步提出了基于损耗设计的吸波材料设计方法。所设计的 Fe 基第二相高熵氧化物吸波材料可以在 1.9mm 覆盖整个 Ku 波段；Ni 基第二相高熵氧化物吸波材料在 1.6mm 可以实现 Ku 波段的有效吸收，并且在 500℃ 下其吸波性能保持

稳定;介电型第二相高熵氧化物吸波材料的厚度在 2.6mm 时,其性能可以在 800℃ 高温下覆盖 9.6-12.4Ghz,为文献中报道的较高值。研究并进一步深究了不同类型异质相的吸波性能随温度的演化规律与内在机制,分析了欧姆损耗、介电损耗以及磁损耗在不同温度下的贡献以及设计方法。在此基础上,进一步提出了基于损耗设计的吸波材料设计方法,基于电磁波与物质的相互作用机制,逐步建立了目标材料反射衰减性能与理论衰减阈值间的定量关系,为吸波材料损耗的理论设计提供了有效的理论指导。

D22. 先进陶瓷-47

陶瓷 Max@LaZrOx 复合吸波材料高温特性

李享成¹, 孙新宇¹, 陈平安¹, 朱颖丽¹

1. 武汉科技大学

陶瓷吸波材料能在宽温域范围实现电磁波的吸收与防护,对电磁兼容、抗电磁干扰和军事武备,都具有重要的意义,开发新型陶瓷吸收剂是高温吸波材料工程应用的重要基础。本文通过核壳 Max@LaZrOx 材料的设计、制备和结构表征,研究了 Max@LaZrOx 陶瓷吸收剂的高温抗氧化性能以及高温电磁性能,发现 LaZrOx 隔热陶瓷不仅能有效调节材料的电导率和阻抗匹配,还为复合材料提供热稳定性和抗氧化性,稳定的介电损耗保证了核壳 TAC@LZO 复合材料在 X 波段展现出优异且稳定的微波吸收性能。核壳 TAC@LZO 复合材料在 25-600 °C 温度区间保持稳定的微波吸收性能,其在 25-600 °C 温度区间内的 RLmin 均小于 -55 dB,稳定的 EAB 为 4 GHz。陶瓷 Max@LaZrOx 研究为高性能吸波材料提供了新材料支撑。

D22. 先进陶瓷-48

尖晶石结构高熵氧化物陶瓷的制备与红外辐射性能研究

万齐法¹, 张法明¹

1. 东南大学

尖晶石结构高熵氧化物陶瓷作为一种兴起的材料体系,由于具有新奇性能和广泛的应用潜力而备受学者的关注。本文采用易于规模化生产的固相烧结法制备了一种新的非等摩尔比例的 (Co₂/11Mn₂/11Fe₂/11Cr₂/11Ni₂/11Cu₁/11)₃O₄ 尖晶石结构高熵氧化物粉体。在相同的条件下,具有更高构型熵的等摩尔阳离子的原始混合氧化物粉体经煅烧之后,形成 (Co, Mn, Fe, Cr, Ni, Cu)₃O₄ 和 CuO 的混合粉体,而不是单相 (Co₂/12Mn₂/12Fe₂/12Cr₂/12Ni₂/12Cu₂/12)₃O₄ 高熵粉体,这说明构型熵不是形成单相尖晶石结构高熵氧化物的决定性条件。除了合成的 (Co₂/11Mn₂/11Fe₂/11Cr₂/11Ni₂/11Cu₁/11)₃O₄ 高熵粉体,通过合理调控 Cu²⁺ 离子的含量,可以制备更多不同比例的 (Co, Mn, Fe, Cr, Ni, Cu)₃O₄ 尖晶石结构高熵粉体。为了探究 (Co₂/11Mn₂/11Fe₂/11Cr₂/11Ni₂/11Cu₁/11)₃O₄ 尖晶石结构高熵粉体在高温红外辐射领域的应用,对其红外辐射性能进行了研究。结果发现,该粉体在近红外波段 (0.78-2.5 μm) 具有高的红外发射率 (0.880)。更重要的是该粉体经高温处理后 (1300 °C/10h),发射率仅降低 2.8% 且没有形成第二相,表现出优异的红外辐射性能和结构稳定性。以该粉体制备的涂层在近红外波段具有更为优异的红外发射率 (0.933)。本研究不仅为制备高且稳定的红外辐射性能材料提供了有价值的策略,而且拓展了尖晶石结构高熵氧化物在高温红外领域的潜在应用,例如在工业高温炉的节能和航天器与武器装备表面散热涂层等方面。

D22. 先进陶瓷-49

构筑基于稀土元素 Sc 调控电子结构的三元 MAX 相高效吸波材料

李友兵¹

1. 苏州大学

兼具金属陶瓷特性的三元层状 MAX 相作为极具发展潜力的极端环境用电磁波吸收材料备受关注。但由于阻抗差异导致的吸波性能不佳以及结构与吸波性能之间构效机制不明确等核心难题严重阻碍了 MAX 相在吸波领域的实际应用。鉴于 MAX 相吸波性能与其本征物性密切相关,本研究拟利用稀土元素 Sc 特殊的电子和能带结构的特性,从原子层面来调控 MAX 相电子能级分布、电子态密度以及电荷传输等本征属

性, 实现高性能 MAX 相吸波材料的精准设计。研究结果表明合成的新型三元稀土 Sc_2GaC 具有优异的电磁波吸收性能, 其最低反射损耗 (RL) 为 -47.7 dB (1.3mm), 有效吸收带宽 5.28 GHz 。通过调整吸波剂厚度 ($1.3\text{-}2.0 \text{ mm}$), Sc_2GaC MAX 相在 X 和 Ku 波段范围内均可实现有效吸收。此外, 在 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 下氧化后, 其仍保持较好的吸波性能, 最低 RL 为 -28.3 dB 。本研究有望为 MAX 相吸波材料的研究与应用开辟新的道路, 推动其在国防、航空航天等领域的应用发展, 为我国高性能吸波材料的研究与制备提供有力的技术支撑和理论基础。

D22. 先进陶瓷-50

异质相增强高熵过渡金属氧化物的高温吸波性能及机理研究

戴国豪¹, 邓瑞翔¹, 张涛^{*1}, 宋力昕^{*1}

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

在本研究中, 通过高温还原反应, 在高熵过渡金属氧化物基体中原位构建了具备磁性和导电性能的镍基合金异质相, 制备了具有耐高温性能的微波吸收陶瓷。镍基合金异质相的引入, 实现了欧姆损耗、介电极化和磁损耗协同增强, 促进了损耗能力的提升和阻抗匹配特性的优化, 其吸波性能在室温下覆盖了整个 Ku 波段 (吸收大于 90%), 厚度仅为 1.55 毫米 。此外, 原位高温测量的微波吸收性能在高达 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下保持稳定。进一步, 采用原位表征技术研究了其高温下吸波性能的演变过程和失效机制。随着温度的升高, 存在三个明显的阶段: 吸收剂在高温下会面临轻微的化学反应, 并随着温度升高而出现磁损耗的失效以及电导率的快速增加, 这些行为最终导致阻抗失配, 从而在高温下恶化其吸收性能。研究中提出的评估过程揭示了上述不可逆和可逆行为如何影响高温微波吸收性能, 为高温微波吸收剂的设计提供了有效的理论基础。

D22. 先进陶瓷-51

论文题目

作者¹

1. 东莞公司

D22. 先进陶瓷-52

高 Sc 含量 $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{FeO}_3$ 亚稳纯六方相的无容器制备

袁和兴¹, 张明辉¹, 谢坚生¹, 华静静¹, 马晨翔¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

稀土铁氧化物由于体系内自旋、电荷、晶格和轨道等相互耦合而展现出独特的物理性质, 受到广泛关注。研究开发出室温附近的强磁电耦合单相多铁性材料具有重要意义和潜在的应用价值。六方相 $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{FeO}_3$ 材料是为数不多的可望实现室温多铁性能的材料。通过传统的固相烧结法, 可在非常狭窄的成分范围内制备六方相 $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{FeO}_3$ 材料, x 大约在 $0.4\text{-}0.6$ 附近。气悬浮无容器激光加热技术可直接制备六方相 $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{FeO}_3$ 材料, 形成范围为 $0\text{-}0.8$, 极大地拓展了六方相形成区域。但是, 在很多成分区域, 气悬浮无容器技术无法制备纯六方相, 使得无容器制备的 $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{FeO}_3$ 材料弱铁磁转变温度与室温还有很大差距。本研究主要就是为了实现高 Sc 含量纯六方相 $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{FeO}_3$ 材料的制备, 通过掺杂磁性元素 Mn, 利用无容器制备六方 $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{FeO}_3$, 以此来扩展纯六方相 $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{FeO}_3$ 的形成区间, 铁磁转变温度。

D22. 先进陶瓷-53

晶体复合玻璃光纤及其光学应用

董国平¹

1. 华南理工大学

晶体复合玻璃光纤结合了晶体发光性能优异和玻璃易于拉制光纤的优势,成为获得高效荧光和激光输出的理想增益材料。本团队基于分子动力学理论模拟和玻璃基因预测设计了前驱体玻璃体系,利用外场诱导的方式在玻璃基质中可控形成低声子能量的纳米晶体;开发了复合玻璃光纤制备技术,研制了高性能复合玻璃光纤,并演示了复合玻璃光纤在激光、放大、传感、探测等领域的广泛应用。

D22. 先进陶瓷-54

Room temperature fabrication of multi-dimensional carbon-based nanocomposites for energy- and biotechnology-related applications

Masaki Tanemura^{1,*}, Wei Ming Lin¹, Tatsuya Akiyama², and Yong Yang³

1. Nagoya Institute of Technology

2. F.C.C. Co., Ltd

3. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Science

Carbon-based nanomaterials exemplified by carbon nanotubes (CNTs) and graphene are quite promising for a variety of applications. The next research phase should focus on their hybridization into multi-dimensional (multi-D) structures. Currently, most of those low-D nanocarbon materials are synthesized at elevated temperatures, typically involving high-temperature processes. From a viewpoint of sustainable development goals (SDGs), however, their green (environmentally friendly) synthesis should be achieved even for their energy related applications. Here, the fabrication of metal-carbon nanocomposites at room temperature (RT) and their applications especially to energy- and biotechnology- related devices will be demonstrated.

Ion irradiation onto the solid surface sometimes induces the formation of various types of surface nanostructures, such as conical structures, even at RT. Especially for the carbon-based substrates or carbon supply during ion irradiation, 1-D carbon nanofibers grow on 3-D conical structures, and a simultaneous supply of the additional metals during ion irradiation further leads to the inclusion of 0-D metal nanoparticles (NPs) in the ion-irradiated surface (1-3). So, the ion irradiation is quite suitable as a fundamental tool for the synthesis of carbon-based multi-D nanomaterials at RT. A simultaneous supply of C and Ni during the Ar⁺ ion irradiation onto Au at RT, for instance, results in the formation of the densely distributed 3-D conical Au nanoprotusions whose surface is covered with a thin carbon layer (2-D) containing 0-D Ni NPs. Such a multi-D system shows the excellent supercapacitor property, thanks to the spontaneous local graphitization induced by the Ni NPs (4, 5). This ion irradiation method is applicable also for the fabrication of Li-C nanocomposites for Li ion battery, in which metallic Li is still preserved even after the air exposure (2, 3, 6). In the talk, the ultra- sensitive and fast detection of COVID-19 virus using Au nanostructures will be also demonstrated (7).

This work was partly supported by National Key Research and Development Project (No. 2022YFE0110100), and The Chinese Academy of Sciences (CAS) President's International Fellowship Initiative (PIFI).

D22. 先进陶瓷-55

基于微波等离子体化学气相沉积技术的材料制备和改性研究

赵洪阳¹, 付秋明¹, 陶洪¹, 许传波¹, 杨思捷¹, 马志斌¹

1. 武汉工程大学

金刚石被誉为第四代半导体首选材料,具有禁带宽、击穿场强高、载流子迁移率高、介电常数低和导热性能好等优异的性能,同时兼具稳定的化学性能、高硬度、耐磨性和抗辐射能力强等特点,是一种有发展前途的高温、大功率宽禁带半导体材料。微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)是制备大尺寸高质量CVD单晶金刚石的唯一技术,长期受到国外技术封锁。利用自主研发的MPCVD,结合材料的微结构设计理论,通过等离子体引入人工磁性基元,构建出金刚石稀磁半导体,室温下具有铁磁性,带隙为1.65 eV,为后摩尔时代自旋电子学提供关键可选材料;利用等离子体的局域活化作用,在非金属、金属、氧化物等不同的衬底上探索异质外延金刚石生长;利用等离子体弧光放电实现具有超导特性的碳化物制备;凭借等离子体高活性的优势对材料进行改性,在不同微波功率和时间下,采用氮/氢等离子体对多壁碳纳米管及

(100)、(110)、(111)等不同晶面的 SrTiO₃ 晶体进行改性，发现晶体结构发生畸变、氮和基体材料的不同成键类型对其物性的调制。综上，多功能一体化 MPCVD 是碳材料制备及改性的关键技术。

D22. 先进陶瓷-56

Ferroelectric & energy storage properties by microwave sintering and Sm-doping 0.6BT-0.4BMT relaxor ferroelectric ceramics

Wenhao Cui¹, Chundong Li^{*1}

1. Harbin insitute of technology

Relaxor ferroelectrics, as one type of functional materials with ultra-high piezoelectric coefficient, high dielectric constant, and energy storage efficiency, have been widely applied in sensors, actuators, refrigerators, and ultra-high power density energy storage. Therefore, researches on the performance optimization strategies and synthesis methods of relaxor ferroelectrics are still meaningful, which are also hot issues for relaxor ferroelectrics. Up to now, there has been controversy about the origin for the excellent physical properties of relaxor ferroelectrics, but the disorder structure in relaxor ferroelectrics is still recognized as the key factor leading to their excellent performance. Therefore, this article uses the polarization relaxation effect of microwave sintering to obtain 0.6BT-0.4BMT-based relaxor ferroelectrics with high density, fine grains, and more disorder structure, and further improves its electrical property by doping with rare earth element.

The results show that both conventional sintering and microwave sintering can produce relaxor ferroelectric ceramics with pseudocubic structure. For conventional sintered ceramics, the energy storage density of 0.6BT-0.4BMT ceramics under electric field of 230 kV/cm is 2.502 J·cm⁻³, with energy storage efficiency of 87.7% and U_f of 20.3. However, the energy storage density of 2.5 mol% Sm-doped 0.6BT-0.4BMT ceramics under electric field of 230 kV/cm is 2.324 J·cm⁻³, with energy storage efficiency of 92.3% and U_f of 30.2, which are higher than ceramics without Sm-doping. For microwave sintered ceramics, the energy storage density of 0.6BT-0.4BMT ceramics under electric field of 240 kV/cm is 2.629 J·cm⁻³, with energy storage efficiency of 90.9% and U_f of 28.8, which is higher than conventional sintered ceramics without Sm-doping. The energy storage density of 2.5 mol% Sm-doped 0.6BT-0.4BMT ceramics under electric field of 370 kV/cm reaches 4.22 J·cm⁻³, which is 81% higher than energy storage density of conventional sintered Sm-doped ceramics. The Sm-doped microwave sintered ceramic also shows ultra-high energy storage efficiency of 96% and U_f of 105, which is 3.5 times higher than Sm-doped conventional sintered ceramics. Microwave sintering and rare earth doping modification demonstrate significant synergistic effect, significantly reducing the remanent polarization of 0.6BT-0.4BMT ceramics and improving insulation performance, which provide a new research idea for further optimizing the properties of relaxor ferroelectric ceramics.

D22. 先进陶瓷-57

Effect of multi-component at the A site on the thermophysical properties of high entropy niobates

Panpan Wang¹, Xiaofeng Zhao¹

1. Shanghai Jiao Tong University

A series of high entropy niobates with cation at A-site varies regarding size disorder and mass disorder is designed. High entropy niobates are all monoclinic structures with uniform rare-earth elements distribution, but different space groups, which are closely related to the average radius at A-site. High entropy niobates possess excellent sintering resistance and ultra-low thermal conductivity due to stronger phonon-point defect scattering and shorter phonon lifetime. The effect of high entropy on average grain size and thermal conductivity is inversely proportional to size disorder. Moreover, the radiative heat transfer of (Dy_{0.2}Ho_{0.2}Er_{0.2}Y_{0.2}Yb_{0.2})NbO₄ is substantially reduced due to the co-doping of active multi-component Dy, Er and Yb elements, which broadens the range of intrinsic absorption band and improves lattice absorption derived from lattice distortion. Besides, the (La_{0.2}Nd_{0.2}Sm_{0.2}Eu_{0.2}Y_{0.2})NbO₄ exhibits ultra-high thermal expansion coefficient (12.34×10⁻⁶ K⁻¹, 673 °C).

The excellent thermophysical properties imply that high entropy niobates are more promising thermal barrier coating materials.

墙报

D22. 先进陶瓷-P01

CoFe₂O₄ 的引入对 BaFe₁₂O₁₉ 吸波性能影响的探究

姚浩¹

1. 浙江工业大学

通过将 CoFe₂O₄ 引入 BaFe₁₂O₁₉ 材料中, 制备了(1-x)BaFe₁₂O₁₉:xCoFe₂O₄ 材料, 旨在探索 CoFe₂O₄ 对 BaFe₁₂O₁₉ 微波吸收性能的影响。研究发现, 随着 CoFe₂O₄ 含量的增加, 两种材料在 1200°C 的高温煅烧过程中发生了化学反应, 从而生成了第二相软磁相。当 CoFe₂O₄ 的引入量 x 达到 0.05 时, 便开始观察到第二相的生成, 并且当 x 增至 0.15 时, 第二相的量已接近主相 M 相的量。这种第二相软磁相与硬磁相 M 相之间的交换耦合作用虽对样品的饱和磁化影响有限, 但对矫顽力的影响显著, 矫顽力从 2107.02Oe 减小至 450.76Oe。矫顽力的降低对于提升吸波性能是一种有效的策略。实验结果表明, 通过引入 CoFe₂O₄, 改善了 BaFe₁₂O₁₉ 的吸波性能。特别是在 CoFe₂O₄ 引入量为 x=0.08 的样品中, 展现了最佳的综合吸收性能。在 1.5mm 的样品厚度下, 最小反射损耗达到了 -43.2dB, 而且小于 -10dB 的带宽扩展到 5.6GHz, 基本覆盖了整个 Ku 波段。这一成果表明该材料有望在卫星通信、航空通信等领域得到应用。通过本研究, 不仅提升了 BaFe₁₂O₁₉ 材料的吸波性能, 也为高性能吸波材料的设计和应用提供了新的思路。

D22. 先进陶瓷-P02

钛酸铋钠/羟基磷灰石复合生物压电陶瓷的性能研究

黄颖璞¹, 陈涵^{*1}

1. 南京工业大学

压电材料的新兴应用之一是在植入式生物传感器中用于自供电、信号发生等。为满足传感器在生物体内的降解性和安全性要求, 可将无铅压电材料与生物陶瓷材料复合制成生物压电陶瓷。本文将无铅压电陶瓷钛酸铋钠 (BNT) 和生物陶瓷羟基磷灰石 (HA) 进行复合, 研究了 BNT/HA 配比, 以及钾、锂元素掺杂对 BNT/HA 复合生物压电陶瓷的介电、压电性能和生物降解性能的影响。实验结果表明: 在 BNT 质量分数为 70wt% 时, 压电常数为 0.5pC/N, 达到与人体骨骼相近的水平; 其在模拟体液中浸泡 10 天后的质量损失率为 17.23%, 显著高于纯 HA。对 BNT 掺杂钾、锂制得 Bi_{0.5}(Na_{0.7}K_{0.2}Li_{0.1})_{0.5}TiO₃ (BNKLT), 将其与 HA 复合, 在 BNKLT 质量分数达到 70wt% 时, 压电常数为 1.4pC/N; 其在模拟体液中浸泡 10 天后的质量损失率为 4.61%, 与纯 HA 相近。

D22. 先进陶瓷-P03

Microwave dielectric properties of Na₅Tm_{1-x}(Y_{1/3}Yb_{2/3})_x(MoO₄)₄ (x=0.09,0.12,0.15,0.18) ceramics

Siyi Xiong^{1*}, Yuan bin Chen¹, Ling Tang¹

1. School of Electronics and Electrical Engineering, Zhaoqing University, Guangdong, PR China, 526061

This study successfully synthesized Na₅Tm_{1-x}(Y_{1/3}Yb_{2/3})_x(MoO₄)₄ (x=0.09, 0.12, 0.15, 0.18) ceramics through the traditional solid-state method. To clarify the phase composition of these samples, we identified them with an X-ray diffractometer (XRD) and conducted a detailed analysis of the XRD data using Rietveld refinement technology. Furthermore, we explored the intrinsic correlation between the crystal structure and dielectric properties of the samples in depth using the P-V-L theory. To investigate how the microstructure of the samples affects their microwave dielectric properties, we observed the samples using a scanning electron microscope

(SEM). Notably, $\text{Na}_5\text{Tm}_{0.91}(\text{Y}_{1/3}\text{Yb}_{2/3})_0.09(\text{MoO}_4)_4$ ceramics exhibited the best dielectric properties ($Q \times f = 34752 \text{ GHz}$, $\epsilon_r = 7.75$, $\tau_f = -60.21 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) at 600°C . Additionally, we used Raman spectroscopy to detect the crystal vibration characteristics of the samples to obtain more information about their microstructure and properties. Specifically, $\text{Na}_5\text{Tm}_{0.91}(\text{Y}_{1/3}\text{Yb}_{2/3})_0.09(\text{MoO}_4)_4$ ceramics exhibited excellent dielectric properties under low-temperature conditions, which provides higher possibilities for the realization of ULTCC (Ultra-Low Temperature Co-fired Ceramics) technology.

D22. 先进陶瓷-P04

The effects of Mg⁺ doping on the microstructure and dielectric properties of $\text{Zn}_{2.99}\text{Li}_{0.02}(\text{BO}_3)_2$ microwave ceramics were investigated

Ling Tang^{1*}, Yuan-Bin Chen¹, Siyi Xiong¹

1. Zhaoqing University

In this study, $[\text{Zn}(1-x)\text{Mg}_x]_{2.99}\text{Li}_{0.02}(\text{BO}_3)_2$ new composite microwave ceramics with large and small proportions were prepared by traditional solid-state synthesis. The dielectric properties of the materials were studied. The results showed that the microwave properties of the materials decreased significantly when X greater than 0.1 Mg^{2+} was added. At the same time, a new secondary phase was formed in the X-ray diffraction spectra, and the elongate and strange grains were found in the SEM images. In addition, the complex P-V-L theory is used to analyze the influence of bond properties on ϵ_r , $Q \times f$, and τ_f . On this basis, it is concluded that the half-peak width of the Raman peak is closely related to the dielectric constant and $Q \times f$, and the B-O bond is the most critical one at the 973 cm^{-1} Raman shift. Finally, the dielectric loss of $[\text{Zn}_{0.97}\text{Mg}_{0.03}]_{2.99}\text{Li}_{0.02}(\text{BO}_3)_2$ sintered at 900°C ($\epsilon_r = 7.12$, $Q \times f = 170,512 \text{ GHz}$, $\tau_f = -62.56 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) is lower than that of similar materials. It has broad application prospect in microwave ceramics.

D22. 先进陶瓷-P05

分级多孔 SiC_{nws}/SiC 吸波复合材料的结构设计及性能研究

欧阳慧颖¹, 游潇^{1*}, 董绍明¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

随着无线通讯和雷达探测技术的发展, 雷达隐身材料对于武器装备的战场生存、突防及作战能力提升具有重要意义。而武器装备的热结构件在服役过程中会产生大量热量, 因此, 研发耐高温、抗氧化的高性能电磁吸波材料是未来雷达隐身技术领域的重要发展方向。目前, 陶瓷基介电损耗型吸波材料因其良好的耐高温、抗氧化性能成为了耐高温吸波材料的重要选择。其中, 碳化硅纳米线具有高孪晶密度、抗氧化的本征优势, 但其宏观结构难设计, 导致电磁波损耗机制单一, 限制了其在吸波领域的应用。

针对上述问题, 本工作通过 3D 打印、冷冻铸造与碳化硅原位生长技术宏/微观协同构建了轻质多孔碳化硅纳米线/碳化硅复合材料, 其有效吸收带宽为 5.9 GHz , 最小反射损耗为 -41.4 dB 。基于碳化硅的本征抗氧化性, 复合材料在 600°C 时仍保持良好的吸收性能。经 1100°C 热处理后, 有效吸收带宽仍保持在 4.9 GHz , 表明其具有优异的热稳定性与高温吸波应用潜力。本工作阐明了结构与组分对吸波性能的影响, 为生产适用于极端环境的高性能、耐高温陶瓷基电磁波吸收材料提供了一种新方法。

D22. 先进陶瓷-P06

具有增强压电性能的 Na/Pr/Ce/Mn 改性的铋层状高温压电陶瓷

崔鑫¹, 王吉凤¹, 赵高磊¹

1. 中国科学院声学研究所

$\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (CBT) 作为铋层状结构铁电体家族中的一员, 具有高居里温度 ($T_c \sim 790^\circ\text{C}$)、低介电损

耗的特性，因此非常有潜力应用于高温压电传感器、换能器和驱动器等领域，但是其极低的压电系数 ($d_{33} \sim 7 \text{pC/N}$) 严重限制了其在高温压电器件中的应用。为了提高 $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 陶瓷的压电性能，采用固相反应法制备了 $\text{Ca}_{1-x}(\text{Na}_{0.5}\text{Pr}_{0.25}\text{Ce}_{0.25})_x\text{Bi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}+0.2 \text{ wt\% MnO}_2$ 压电陶瓷，研究了 Na/Pr/Ce/Mn 共掺杂对陶瓷电学性能的影响。结果显示：当 $x=0.1$ 时，所制备的压电陶瓷的压电系数 d_{33} 提高至 22.3pC/N ，在 400°C 下具有低介电损耗 ($\tan\delta \sim 0.02$) 和高电阻率 ($9.8 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$)，并且 d_{33} 在 550°C 时仅下降 6.9%，具有良好的温度稳定性。Na/Pr/Ce 共掺杂导致的氧空位浓度的降低、 TiO_6 八面体畸变程度的增加和 MnO_2 引入所形成的缺陷偶极子被认为是 CBT 陶瓷电学性能改善的内在因素，本工作为层状结构压电陶瓷的改性策略提供了思路。

仅发表论文

D22. 先进陶瓷-PO01

氮化铝陶瓷流延成型工艺参数对其结构和力热性能的影响研究

叶需涛¹，赵倡皓¹，匡海波^{1,2}，李盛涛^{*1}

1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室
2. 金冠电气股份有限公司

流延成型是一种广泛应用于工业生产的高效、大规模陶瓷成型工艺。流延工艺参数直接决定了陶瓷坯体的结构、形貌、致密度等参数，进而对陶瓷烧结体的力学和电学性能产生直接影响。氮化铝陶瓷基板以其优异的导热性能、低介电常数、与碳化硅接近的热膨胀系数，被广泛应用于半导体功率器件封装。本文研究了氮化铝陶瓷基片流延工艺参数与其结构、性能之间关系，采用不同流延工艺参数将氮化铝浆料流延成膜，研究了刮刀速度和浆料粘度对陶瓷坯体厚度均一性、密度、拉伸强度和热膨胀系数的影响，揭示了流延工艺参数对陶瓷坯体微观形貌和力学强度的影响机理。本研究建立了流延工艺参数与陶瓷坯体结构性能之间的联系，为优化氮化铝陶瓷基片显微形貌、提升力热性能提供了理论指导。

D22. 先进陶瓷-PO02

多元醇对光固化 3D 打印陶瓷型芯的成型及烧结影响

李飞^{*1}，管大伟¹

1. 上海交通大学

陶瓷型芯是制备航空发动机空心涡轮叶片的关键部件，传统的热压铸型芯由于需要开模，制备周期长且价格昂贵。光固化 3D 打印陶瓷型芯具有制备周期短，成本低的优势。其中陶瓷浆料的质量直接影响着陶瓷素坯的成型质量，此外对烧结后的陶瓷型芯的质量也有着显著的影响。为了防止浆料在打印中导致的素坯成型困难，烧结后出现起泡开裂等现象，需要在浆料中添加合适剂量的助剂。本文旨在提出一种多元醇在陶瓷浆料中的作用机理，及最佳使用浓度，为多元醇在光固化陶瓷浆料中的应用提供参考。结果表明，多元醇浓度较低有利于素坯的固化成型，但烧结后往往产生裂纹等缺陷，多元醇浓度过高便于素坯的脱脂烧结，但固化后强度低，不利于素坯的打印成型。因此需要调整助剂的最佳用量，兼顾素坯成型和脱脂烧结的要求。

D22. 先进陶瓷-PO03

新型高熵碳化物(TiZrVNb)C₄ 的微观结构、力学性能和高温摩擦学性能

李跃辉¹，杜银¹，裴旭辉¹，王海丰^{*1}

1. 西北工业大学

近年来，基于高熵合金中的“高熵”概念设计和制备的高熵陶瓷材料，展现出比各组元更优越的综合性能，成为陶瓷材料领域的研究热点。本文以过渡金属碳化物粉末为原料，采用放电等离子烧结 (SPS)

技术, 在 2300°C 温度下制备了高熵碳化物(TiZrVNb)C₄ (HEC) 陶瓷和 ZrC 陶瓷, 研究了其显微组织、力学性能和宽温域下的摩擦学性能。结果表明: 在 2300°C 合成的(TiZrVNb)C₄ 各元素分布均匀, 检测为具有面心立方结构的单相。HEC 的纳米硬度为 31.5 GPa, 其弹性模量和断裂韧性分别为 316.1 GPa, 断裂韧性为 4.5 MPa·m^{1/2}, 各力学性能均优于单一主元 ZrC 陶瓷。此外, HEC 在室温下具有低的摩擦系数(0.24)和低的磨损率(约为 10E-7), 其在室温下的磨损机制主要以磨粒磨损和黏着磨损为主, 高温下的磨损机制主要以氧化磨损为主, 其中 Ti、V 元素易被氧化先磨损, 从而抑制其他元素的氧化, 起到保护作用。

D22. 先进陶瓷-PO04

粘结剂喷射成型打印 Ni/SiC 周期结构的界面微观组织和力学性能研究

王现文¹

1. 上海交通大学

碳化硅 (SiC) 材料具有优异的机械物理性能、抗热震性、抗氧化性、耐腐蚀性和电学性能等显著特性, 但由于其强共价键连接的特点难以加工成型复杂的结构, 传统工艺难以实现高自由度结构制造。周期结构凭借其可控界面对于结构材料的机械性能和整体功能特性的调节在传热、过滤和电磁波吸收等领域具备极大优势, 但 SLA、SLS 等现有的增材制造方法成型此类周期结构存在很大挑战。粘结剂喷射成型打印可制造多材料、无支撑的异形或中空结构, 并可针对微观组织进行选择调控与性能强化。本研究通过采用粘结剂喷射成型制备了具有周期孔隙结构的 Ni/SiC 结构, 讨论了金属 Ni 粉末掺入量、周期层结构厚度、粘结剂喷射量、打印层厚等参数对 Ni/SiC 结构微观结构和性能的影响, 重点分析了分层界面的结合和微孔隙分布状态, 分析了孔隙分布位置及孔隙率变化对抗弯强度等机械性能的作用关系, 获得了具备周期孔隙的高性能 Ni/SiC 结构。

D22. 先进陶瓷-PO05

Al₂O₃f/Al₂O₃ 陶瓷基复合材料吸湿特性及动力学模型

张琴^{*1}, 杨瑞¹, 郑林峰²

1. 中国航发北京航空材料研究院

2. 中国直升机设计研究所

连续纤维增强氧化铝陶瓷基复合材料在直升机上应用可能会面临雨水天气及高湿度环境下吸湿增重性能劣化的问题。为探究氧化铝纤维增强氧化铝复合材料吸湿特性并构建动力学模型, 采用静态重量法开展了高温湿态和高温水浸两种吸湿方式的吸/脱湿研究, 结合 Hailwood-Horrobin 模型采用 Origin 分析软件对吸湿曲线进行拟合分析。结果表明: 氧化铝纤维增强氧化铝复合材料在 71°C/85%RH 气氛中质量变化率小于 0.1%, 基本不吸湿; 而在 71°C 水浸条件下 4 小时可达到吸湿饱和, 平衡吸湿率为 7.5%, 吸湿速率先增大后减小, 最后趋于吸湿平衡。水浸吸湿速率控制因素可归结于其多孔结构中毛细管驱动的水分传输。建立了等温吸附模型, 曲线拟合决定系数 R² 大于 0.98, 拟合的等温吸湿平衡含水率值与试验测量值一致性较好。

D22. 先进陶瓷-PO06

(Hf_{0.2}Ta_{0.2}Ti_{0.2}Nb_{0.2}Zr_{0.2})C 高熵陶瓷的压缩强度规律

邹伟恒¹, 程赞粼¹, 郭绘芬¹, 张程煜^{1*}

1. 西北工业大学

采用自蔓延高温合成 (SHS) 和放电等离子烧结 (SPS) 相结合的方法制备了 (Hf_{0.2}Ta_{0.2}Ti_{0.2}Nb_{0.2}Zr_{0.2})C 高熵碳化物(HEC)陶瓷。通过 X 射线衍射、扫描电子显微镜和透射电子显微镜对 HEC 的微观结构和相组成进行了表征, 并通过纳米压痕测试了材料的机械性能。研究了晶粒尺寸变化对材料压缩强度的影响, 并结合压缩温度的变化初步总结了压缩强度退化规律, 结果表明, 随着晶粒尺

寸的变化和试验温度的上升，晶粒尺寸增大、晶界数量减少使得晶粒间对变形的阻碍作用减弱；同时材料的晶粒强度下降。二者共同导致材料的压缩强度从室温时的 $1560.45 \pm 74.15 \text{MPa}$ ，下降到 1800°C 时的 $408 \pm 23 \text{MPa}$ 。

D22. 先进陶瓷-PO07

Densification and characterization of hot pressed ZrCN-ZrO₂ ceramics

Egor Dmitrievich Kuzmenko¹, Sergey Veniaminovich Matrenin¹, Yicheng Liang^{*1}, Gulnara Alfridovna Voronova¹

1. Tomsk Polytechnic University, Russia

ZrCN-ZrO₂ ceramics were produced by hot pressing at a temperature of 2273 K, a pressure of 30 MPa, and a holding time at a given temperature of 15 minutes. Sintering was carried out in a vacuum environment. During the work, the influence of composition and structure on the physical and mechanical properties of the samples was investigated. High-density ZrCN-ZrO₂ ceramics with high solid solution content of zirconium carbonitride were fabricated using zirconium nitride and carbide powders. Zirconium dioxide acted as a sintering additive due to the lowest melting point among the studied compounds. An increase in the hardness, elastic modulus and strength of ZrCN-ZrO₂ ceramics was achieved in compositions with an increased content of zirconium nitride in the powder mixture of precursors. At the same time, a decrease in subgrains was recorded according to the results of X-ray phase analysis. It was found that with an increase in the content of zirconium nitride in the powder mixture of precursors, in sintered bulk ceramics without the addition of zirconium dioxide powder, an increase in the content of the m-ZrO₂ phase was observed. The achieved physical and mechanical properties were significantly influenced by the parameters of the resulting solid solution of zirconium carbonitride. Thus, the properties of ZrCN-ZrO₂ ceramics can be adjusted by changing the composition of precursor powders.