

论坛二十一：无机复合材料论坛
分论坛主席：张联盟 李贺军 傅正义 董绍明

21-01

高性能碳/碳复合材料制备及其应用

付前刚

西北工业大学

碳/碳复合材料具有耐高温、高比强度、耐烧蚀等独特性能，是先进航空航天器及其动力系统不可或缺的战略材料。报告人主要围绕碳/碳复合材料在航空航天领域应用面临力学性能不足、高温易氧化烧蚀等问题，介绍了高性能碳/碳复合材料制备与强韧化方法、高温有氧环境中提升其抗氧化抗烧蚀性能的途径，以及报告人所在团队在碳/碳复合材料方向的应用情况，并对未来航空航天领域碳/碳复合材料的主要研究方向进行了展望。

21-02

钢渣固碳与固碳钢渣作水泥和混凝土辅助胶凝材料的特性

钱春香

东南大学材料科学与工程学院

我国是钢铁大国，随之产生的钢渣存积已超过 10 亿吨，每年还将持续排放约 1.7 亿吨，但利用率不足 30%，大部分都闲置堆放，占用了大量土地、污染了土壤和水。钢渣无法利用的卡脖子问题是安定性不良和活性较低，很多研究者试图采用流化床工艺和碳化技术解决，但碳化反应太慢、流化床投资太大。报告将介绍最新研发的固碳工艺和装备以及微生物加速固碳技术，1 吨钢渣 1h 即可固碳 100kg，反应时长是直接碳化反应的 1/3 以下，且引发安定性不良的游离 CaO 全部转化，方镁石也大幅减少，经大量样品的压蒸试验表明，安定性得到了解决。固碳钢渣粉的活性指数达到 85% 以上，与相同固碳量的碳化钢渣粉相变，反应时长缩短到 1/3 以下，且活性提高 5 个点。目前已成功完成水泥厂现场固碳及大磨应用试验，为实现钢渣与二氧化碳双废资源化高价值利用提供了可行的技术。

21-03

先进陶瓷材料的研发及产业化发展现状

宋锡滨

山东国瓷功能材料股份有限公司

先进陶瓷材料是新材料产业的典型代表，近些年由于产业转移、技术升级、政策引导等因素来发展比较迅速。因其具有高强度、耐腐蚀、耐高温、稳定性好等优势，在电子信息、汽车产业、航空航天、能源环保、生物医药、智能制造等领域得到快速发展，成为国家立足于先进制造业和高技术产业的关键材料之一。但是，单一陶瓷材料本身的优缺点都比较突出，使其在一些特定应用中有所受限，因而通过陶瓷材料之间进行杂化或与其他材料进行复合来提升其综合应用成为国内外研发和产业化的热点。

本报告首先对先进陶瓷进行了概述说明，包括先进陶瓷的发展历程、分类应用、战略地位等；并对先进陶瓷研发及产业发展现状进行了重点分析，包括先进陶瓷研发、产业化、国内外技术差异等；同时也对陶瓷基复合材料进行了概述说明，包括陶瓷基复合材料的历程、分类、市场、技术、企业等；最后本报告给出了先进陶瓷的战略思考与发展建议，包括先进陶瓷发展现状的战略思考，以及先进陶瓷高质量发展的相关建议等内容。

21-04

共格纳米相强化金属基复合材料研究进展

张于胜 a, 董龙龙 a, 刘承泽 b, 孙国栋 b, 李明洋 b

a 西北有色金属研究院 陕西 西安 710016

b 西安稀有金属材料研究院有限公司 陕西 西安 710016

先进高强韧、耐高温金属基复合材料的发展是推动航空航天领域、现代国防装备的快速升级换代的重要保证。纳米析出强化是金属材料最有效的强化方式之一，尤其是共格纳米相能够大量均匀形核，产生显著的强化效果。本文通过粉末冶金技术路线在铜基、钛基复合材料中构筑出高密度纳米共格析出相，打破了钛基复合材料的“强塑性”倒置矛盾。利用该技术原理开发出系列室温强度大于 1500MPa，断后延伸率大于 10%的高强韧钛基复合材料，其高强高塑性来源于高密度纳米 α' 共格针状析出相和高密度位错；开发出的铜基复合材料 900°C退火 500h 后基体晶粒尺寸和第二相尺寸几乎均未长大，完全共格纳米析出相显著提高了铜基复合材料的热稳定性、高温位错存储能力和高温力学性能，其高温稳定性优于现有报道的材料。本文为以纳米碳源为增强体前驱体的金属基复合材料的发展提供了新的思路。

21-05

SAP 有机无机杂化改性及其对高性能水泥基材料性能的影响

孔德玉, 蔡佳乐, 吴浩天

浙江工业大学土木工程学院, 浙江杭州, 310028

高性能混凝土 (HPC) 由于其自身水胶比低、密实度高、自收缩大，开裂风险较为突出。通过引入高吸水树脂 (SAP) 作为内养护剂可使其风险降低。然而，SAP 在 HPC 内部释水后会在基体内部塌缩，留下较大孔洞，对 HPC 性能带来不利影响。通过在 SAP 合成过程中引入纳米硅溶胶，制备了新型有机无机杂化改性高吸水树脂，研究了掺改性 SAP 对高性能水泥基材料水硬化性能、保水性能、自收缩性能以及力学性能等的影响与机理。结果表明，合成过程中引入单体质量 5% 纳米硅溶胶改性得到的 SAP 在饱和氢氧化钙溶液中吸液率最优；掺改性 SAP 均导致水泥净浆凝结时间和放热峰值出现时间提前，且随 SAP 内部纳米硅溶胶的含量增加而进一步提前；掺改性 SAP 有助于改善新拌水泥基材料保水性，但随改性 SAP 掺量增大，新拌水泥基材料流动度也随之下降。与掺未改性 SAP 水泥砂浆相比，掺改性 SAP 有助于提高其力学性能，且随 SAP 中纳米硅溶胶含量增加，对力学性能的提高也更为明显。然而，掺改性 SAP 会随着纳米硅溶胶含量增加而减缩效果逐渐变弱。微观结构分析表明，掺改性 SAP 的水泥浆体中坍塌孔洞的内部水化产物增加，且水化产物随纳米硅溶胶含量提高而增多，其孔洞填充效果也逐渐明显，因而有利于细化孔径，减少对基体的不利影响。

关键词：高性能水泥基材料；超吸水树脂；杂化改性；自收缩

21-06

碳基材料表面 TaC 涂层制备及抗氧化性能研究进展

上海大学 霍彩霞 17802929776@163.com

碳材料在高温有氧环境中易氧化限制了其在高温领域的应用，TaC 涂层可以有效提高碳材料的抗氧化性能。本研究简要总结了国内外 TaC 涂层的制备工艺及抗氧化性能研究进展，包括涂层制备工艺、涂层结构设计、抗氧化机理等。并对目前碳基材料表面 TaC 涂层研究存在的问题进行总结，有助于制备出高性能 TaC 涂层。

21-07

化学气相沉积 SiC 涂层的设计与制备

李爱军

上海大学

CVD-SiC 涂层广泛应用于高温、耐腐蚀和抗热应力等特殊环境，是一种具有广阔应用前景的涂层材料。本研究旨在通过系统性地调整不同实验参数，如温度、压力和反应时间，结合数值模拟方法，实现对 CVD-SiC 涂层的可控制备。通过优化这些关键参数，获得了具有高沉积速率和不同形态的碳化硅涂层。这种可控涂层的制备为各种高性能应用提供了新的可能性，包括高温材料、陶瓷基复合材料以及耐热涂层等领域。通过实验与模拟相结合的方法，为 SiC 涂层的定制和性能优化提供了有力的工具，有望推动材料科学领域的进一步发展和创新。

21-08

核废料安全处置用胶凝材料制备与应用

陈伟

武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室 武汉 430070

核废料处置用胶凝材料是我国核能清洁发展的重要保障材料。面向我国核能中低放废弃物安全处置用胶凝材料需求，针对长寿命密封材料、高浓度硼废液强缓凝、含铝焚烧灰高效固化等难题，在深入挖掘胶凝材料水硬化机理的基础上，通过胶凝材料组分设计以及关键改性材料开发，提出硼赋存状态调控、活性铝高效钝化以及微结构可控膨胀致密化的新技术和新原理，开发出核废料高整体容器密封材料、中低放固化水泥、中低放焚烧灰固化水泥等系列新型胶凝材料，应用于台山核电站、阳江核电站、田湾核电站等 10 余座核电站和核化工废料处置工程。

关键词：核废料；安全处置；胶凝材料

21-09

宽温域长时抗氧化、耐烧蚀聚合物基热防护材料研究邓宗义¹，杨雪媛¹，黄文超¹，石敏先¹，黄志雄

武汉理工大学

高超声速飞行器在大气层内有氧、机动飞行时，因为急剧的气动加热和气流冲刷，面临极端、恶劣的服役环境。由于其较好的常温承载性能和成型工艺性，碳纤维/酚醛复合材料广泛应用于热防护领域。但是，碳材料本征地存在高温易氧化的症结，因而碳纤维/酚醛复合材料在高温、有氧和急剧的气流冲刷条件下的长时抗氧化性、耐烧蚀性和高温承载性差。

本研究结合热力学计算和试验验证，制备了宽温域长时抗氧化、耐烧蚀性优异的可陶瓷化聚合物基热防护材料。以耐高温、高残炭的酚醛树脂作为基体，碳纤维作为增强体，超高温陶瓷作为主要防热功能体，多元碳化物陶瓷和高硼化物陶瓷作为多元弥散氧耗散和自愈合功能体，制备了可陶瓷化复合材料。利用可陶瓷化功能体的自损毁主动氧化反应，发挥原位耗氧、阻氧和自愈合作用，对碳纤维和裂解炭进行宽温域长时主动氧化防护。利用可陶瓷化功能体氧化产物与裂解炭的原位碳热还原反应，将低熔点的氧化物陶瓷和易氧化的裂解炭转化为难熔、抗氧化的碳化物陶瓷和硼化物陶瓷，从而满足飞行器的大面积、宽温域长时抗氧化、耐烧蚀要求。

关键词：热力学计算；可陶瓷化复合材料；原位陶瓷化；抗氧化；耐烧蚀

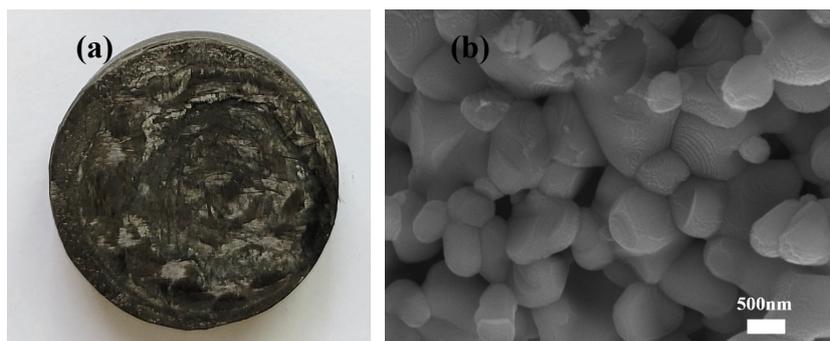


图1 复合材料在 4.3 MW/m^2 的氧-乙炔火焰下考核 30 s 后的宏观形貌 (a) 和微观形貌 (b)

Fig.1 Macromorphology (a) and micromorphology (b) of composites after exposed to an oxyacetylene torch with the heat flux of 4.3 MW/m^2 for 30s

21-10

复合材料在航空发动机中的应用及发展需求

王标

中国航发四川燃气涡轮研究院

提高推重比是航空发动机技术发展的方向,降低结构重量和提高涡轮前温度是提高推重比的技术途径,随着航空发动机技术的发展,材料技术对提高推重比的贡献逐步增加。复合材料具有低密度,其中陶瓷基复合材料还具有耐高温的特点,是航空发动机结构材料的发展方向之一。本报告介绍了复合材料在航空发动机中的应用和需求,重点介绍了未来航空发动机对轻质耐高温复合材料的需求,希望与材料研制单位一起开展复合材料设计-制造-验证一体化融合研究,推动耐高温复合材料在航空发动机中的应用。

关键词:航空发动机, 复合材料

21-11

基于高通量实验与机器学习建立高熵陶瓷形成能力判据

褚衍辉

(华南理工大学材料学院, 广州 100074)

高熵陶瓷因具有巨大的组分空间,独特的微观结构以及优异的可调控性能近年来受到国内外研究学者的广泛关注。然而,高熵陶瓷巨大的组分空间限制了借助传统的手段设计和开发该材料的研发周期。为了加速高熵陶瓷的研发周期,受材料基因工程理念的启发,我们基于高通量实验与机器学习相结合建立了高熵超高温陶瓷材料形成能力判据,即首先借助高通量快烧和燃烧合成法分别合成 91 种高熵碳化物陶瓷和 70 种高熵硼化物陶瓷,然后在此基础上,结合高通量计算每个组分的 22 个形成能力描述符,采用 SVM.linear、SVM.poly、SVM.rbf、KNN、LR 以及 ANN 等多种机器学习模型建立了高熵碳化物和硼化物陶瓷材料多因素形成能力判据,其验证精度分别高达 93.4%和 97.1%。

关键词:高熵陶瓷;高通量实验;机器学习

21-12

可陶瓷化聚合物基复合材料的高温力学性能

张超^{1,2} 王焕芳², 公正¹, 邓勇¹

(1. 西北工业大学; 民航学院, 江苏 太仓 215400;

2 西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

聚合物基复合材料具有比模量高、比强度大、低成本等优点,作为热防护材料被广泛用在航空航天热结构上,但存在抗高温氧化性能差、烧蚀量大等缺点。本研究所采用的 B4C 及

滑石粉改性的可陶瓷化聚合物基复合材料在高温有氧环境下会发生一系列的物理化学反应，能够提高材料的高温稳定性。开展了 25-1000 °C 的准静态及动态高温试验，发现随着温度的升高，试样的强度均呈先降（25-600 °C）后升（600-1000 °C）的趋势；在失效模式方面，在准静态载荷作用下有三种不同的失效模式：剪切破坏、分层破坏，屈曲破坏，而在动态载荷作用下的主导失效模式均为剪切破坏，呈现明显的应变率效应。此外，搭建了基于同步辐射 X 射线的高温力学试验平台，开展了原位热试验，获得了材料在不同温度下的三维形貌，分析了裂纹扩展、孔隙分布及热变形，揭示了材料的热行为。还开展了高温压缩试验，获得了高温加载时不同应力水平下的三维形貌，分析其损伤起始和演化规律，揭示了材料的高温力学失效机理。进一步地，建立了力-热-化学耦合模型，实现了力学性能预测。

关键词：高温；力学性能；失效模式；SHPB；同步辐射光源。

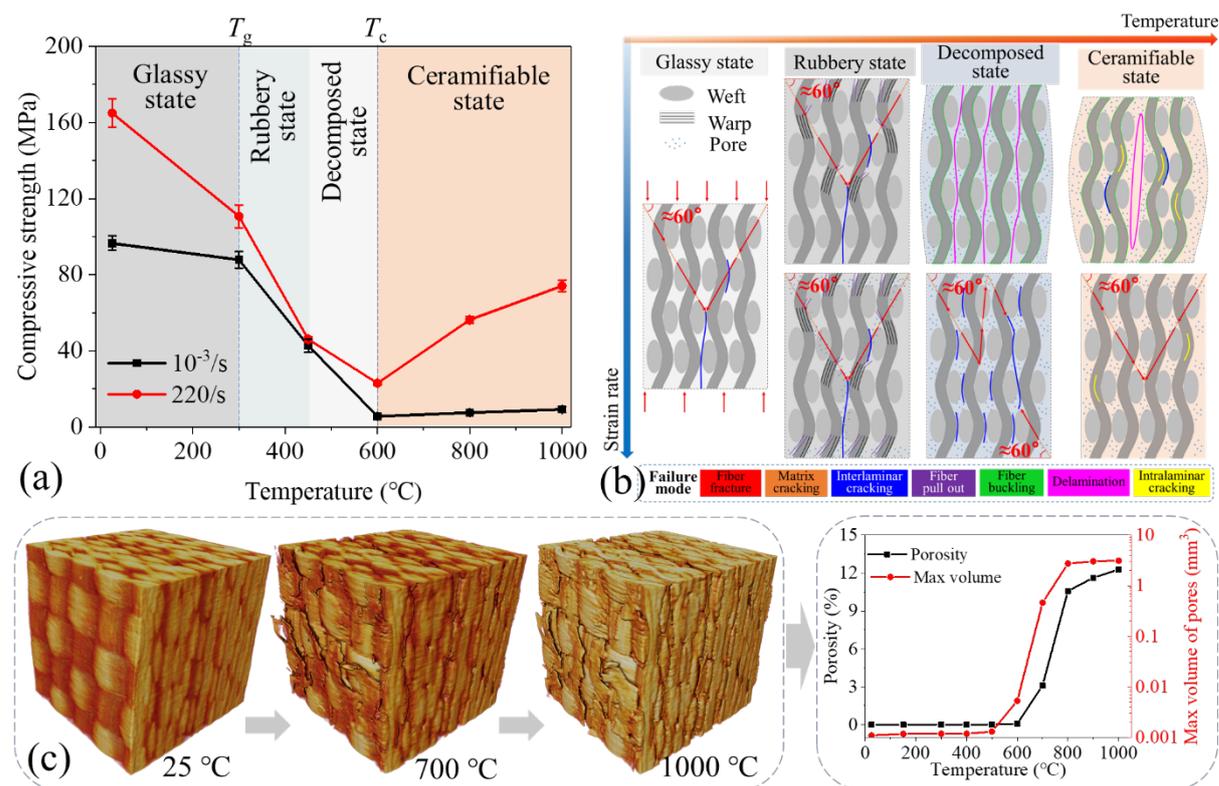


图 1 (a) 不同应变率下，压缩强度与温度的关系图；(b) 高温压缩载荷作用下的失效机理示意图；(c) 不同温度下重构的形貌及孔隙率随温度的演化情况。

21-13

采用铝基复合材料水解产物为原料制备的 Fe MOF/NiAl-LDH 用于高效去除 Cr(VI)

王辉虎* 张紫冠 涂浩 张兢乐 欧阳柳

通讯作者*: E-Mail Address: wanghuihu@hbut.edu.cn

高效去除水中的六价铬(Cr(VI))具有重要的意义，因为 Cr(VI)的高毒性严重威胁着生态环境以及人类身体健康。本研究以铝基复合材料水解产物为原料，探讨了层状双金属氢氧化物 NiAl-LDH 的合成条件。随后，将 NiAl-LDH 进一步负载 Fe MOF 制备了一系列的复合材料作为高吸附剂材料，用于去除水溶液中的 Cr(VI)。研究表明 Fe MOF 与 NiAl-LDH 复合后，对 Cr(VI)具有快速且高效的吸附性能。其中，伪二阶动力学和 langmuir 模型能更好的描述复合材料的吸附过程。吸附机理涉及到多重吸附机理的复合效应。此外，复合材料在多次循环后对去除 Cr(VI)仍表现出较高的可重复使用性。

关键词：六价铬；水解产物；NiAl-LDH；吸附

21-14

无机柔/塑性热电材料与器件

仇鹏飞, 史迅, 陈立东

中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海嘉定区和硕路 585 号, 201899

针对柔性电子的蓬勃发展需求, 开发兼具良好变形性与优异电学性能的无机半导体热电材料, 实现“结构-功能”一体化, 已经成为当前热电领域的一个重要任务。然而, 传统无机热电材料电学性能优良, 但其本征脆性导致室温变形能力和机械加工性较差; 而有机热电材料具有良好的变形能力, 但由于载流子迁移率较低而导致其电学性能较差。近期, Ag₂S、InSe 单晶、黑暗中的 ZnS 室温塑性半导体的发现, 颠覆了人们对于无机半导体本征脆性的传统认知。这些塑性半导体具有和金属一样的延展性和变形能力, 在外力和大应变下材料不发生破碎, 显著区别于已知的陶瓷和半导体材料, 为开发新型柔性和可变形热电器件提供了新的材料和方法支撑。本报告系统介绍了上海硅酸盐研究所基于塑性无机半导体 Ag₂S 所研发的新概念无机柔/塑性热电材料及器件, 并对无机柔性热电技术的存在问题和下步发展方向做出展望。

21-15

涂层刀具高端化的多功能复合策略

章嵩

武汉理工大学

本研究提出了一种涂层刀具高端化的多功能复合策略, 旨在提高刀具的性能和使用寿命。首先, 通过对涂层材料和工艺的研究, 实现了对刀具表面的高精度涂层, 从而提高了刀具的耐磨性和抗腐蚀性。其次, 通过优化刀具结构设计, 实现了多种功能模块的集成, 如可更换刀头、可调节刃角等, 满足了不同加工场景的需求。最后, 通过智能化控制技术, 实现了对刀具性能的实时监测和优化, 提高了生产效率。实验结果表明, 该策略能有效提高涂层刀具的性能和使用寿命, 为制造业提供高效、稳定的加工工具。

21-16

<010>取向 β -Ga₂O₃ 薄膜的制备及其超快光电响应

李宝文 1, 2,*, 李欣雨 1, 2, 徐青芳 2, 章嵩 1, 2, 涂溶 1, 2, 张联盟 1, 2

1 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心, 潮州, 521000

2 武汉理工大学, 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉, 430070

*Email: bwli@whut.edu.cn

相比于半导体 SiC 和 GaN 材料, β -Ga₂O₃ 具有禁带宽度更大 (~4.9 eV)、击穿场强更高 (~8 MV/cm)、巴利加优值更大、吸收截止波长更短 (~270 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<010>晶向具有更小的吸收截止波长[1], 更高的热导率[2]及更优的电子迁移率[3]。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<010>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<010>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^[4]。研究表明, <010>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 μ m, 沉积速率高达40 μ m h⁻¹, 比大多数传统方法的速率快。采用<010>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。

关键词: 氧化镓薄膜; 取向生长; 激光CVD; 光电探测器; 响应速度

参考文献

- [1] Fu, B.; Jian, G. Z.; He, G.; Feng, B. Y.; Mu, W. X.; Li, Y.; Jia, Z. T.; Li, Y. B.; Long, S. B.; Ding, S. A.; Shi, Y. J.; Tao, X. T. *J. Alloys Compd.* **2021**, **889**, 161714.
- [2] Jiang, P. Q.; Qian, X.; Li, X. B.; Yang, R. G. *Appl. Phys. Lett.* **2018**, **113**, 232105.
- [3] Ueda, N.; Hosono, H.; Waseda, R.; Kawazoe, H. *Appl. Phys. Lett.* **1997**, **71**, 933-935.
- [4] Tu, R.; Li, X. Y.; Xu, Q. F.; Gao, T. H.; Zhang, X.; Li, B. W.; Zhang, S.; Goto, T.; and Zhang, L. M. *Small*, **2023**, **19**, 2300154.

21-17

3D 打印纤维增强陶瓷复合材料的研究进展

刘凯

武汉理工大学

纤维增强陶瓷复合材料由于具有高强度、低密度、耐高温、应力作用下非脆性断裂等优点，可替代部分高温金属，正成为航空航天、能源运输等领域热端构件的理想结构材料。然而，陶瓷复合材料复杂构件制造存在可设计空间小的问题，3D 打印技术基于离散-堆积原理，由三维数据驱动直接制造成形任意复杂结构构件，具有无需模具、个性化制造、效率高等优点，近年来成为纤维增强陶瓷复合材料复杂构件制造的重要方法。本文建立了陶瓷基体与纤维涂层的设计制备、3D 打印材料挤出成形及高温致密化方法，研究了炭黑浆料组分对浆料流变特性的影响，提出了具有高固相含量、低粘度的炭黑浆料的设计制备方法，探究了打印参数对炭黑坯体成型精度和表面质量的影响；研究了水热法工艺参数（制备温度、制备压力、沉积速率等）对纤维-陶瓷间复合界面层微观结构（厚度、形态、成分分布）与孔隙特征（结构、尺寸、分布）的影响规律。研究了浸渍碳化-反应烧结工艺对试样微观形貌与致密性的变化规律。本研究为连续纤维增强陶瓷基复合材料复杂构件制造提供了新思路。

21-18

激光 CVD 原位生长石墨烯/碳化硅复合薄膜及其性能研究

徐青芳

武汉理工大学

化学气相沉积（CVD）制备微型电极材料技术与半导体微/纳器件加工技术兼容性强，是制备智能化、小型化、可植入、长寿命自供能微电子器件的首选技术。采用 CVD 技术制备兼具高比电容、高灵敏度和高稳定性的薄膜电极材料，并探索薄膜生长机制与性能调控机制，对发展先进微型器件及其应用推广具有重大意义。针对此关键问题，本研究采用一种新型 CVD 技术——激光 CVD，运用连续大功率激光的光、热协同效应，原位生长具有多孔结构的石墨烯/碳化硅复合薄膜。综合利用石墨烯的高比表面积与碳化硅骨架结构的高稳定性，制备兼具高比电容、高灵敏度和高稳定性的薄膜电极。系统研究生长条件与薄膜微观结构之间的科学关系；探明宽温度、大电流、长时间服役条件下，电极储能机制和生物传感机制与薄膜微观结构之间的对应关系和科学内涵。本研究发展出了一条制备高比电容、高灵敏度和高稳定性新型复合薄膜电极材料的技术路线与相应基础理论。

21-19

自旋电子磁性纳米薄膜异质结

高藤华

武汉理工大学

自旋轨道矩磁随机存储器具有皮秒量级超高的数据读写速度，可靠的读写稳定性，以及与现代半导体器件高集成性等优势，使其在半导体芯片存储领域极具应用潜力。然而，由于自旋轨道矩器件存在高写入电流的技术瓶颈，需适配大尺寸选择晶体管提供电源，难以满足芯片小型化的发展需求。本研究从纳米薄膜异质结材料设计的角度出发，磁控溅射制备金属/绝缘体氧化物、金属/半金属等磁性功能薄膜。利用材料本征的结构与电学特性，探索发现

基于电子自旋量子态激发与传输的新基础理论，以期解决自旋轨道矩器件高能耗的科学难题。

21-20

光热电多场耦合的光解水功能复合材料

李炫华*

西北工业大学材料学院，陕西省西安市碑林区友谊西路 127 号，710072

*Email: lixh32@nwpu.edu.cn

光解水反应是人工光合作用的重要组成部分，是当前国际前沿研究热点。普遍认为，光解水制氢效率提升的关键在于设计高效的半导体光催化材料，其反应的本质可以归因于半导体材料在光场驱动下的氧化还原反应。除了光场作为主要的驱动力外，由光场引起的热场和电场也对光解水性能的提升起到至关重要的作用。针对光催化分解水过程中光，热，电三种效应相互割裂，能量利用不充分的问题，通过光解水复合材料、反应体系，以及多功能器件的有效设计与调控，回答了光-热-电场耦合光解水复合体系设计制备机理以及多场耦合与分解水制氢性能的构效关系等关键科学问题，显著提升了半导体材料光解水制氢效率。首先，在光+热多场耦合方面，提出光催化剂与光热材料协同复合新策略，构建“气/固”两相光催化体系，实现光催化分解水蒸气制氢。其次，在光+电多场耦合方面，设计了水伏增强光催化反应体系，获得了新型光电耦合催化体系设计，实现了较快的光催化分解水反应动力学特性。再次，在光+热+电多场耦合体系方面，以液相光催化器件和热化学电池共享氧化还原离子为切入点，设计了光催化增强热化学电池多功能器件，实现了产氢/产电的协同发生，为基于光热电效应耦合的多元化能源器件设计与应用开辟了新思路。

参考文献：

- [1] Zhang, Y.; Li, Y.; Xin, X.; Wang, Y.; Wang, R.; Huang, W.; Sobrido, A.; Li, X.* *Nat. Energy* 2023, 8: 504.
- [2] Guo, S.; Li, X.;* Li, J.; Wei, B.* *Nat. Commun.* 2021, 12:1343.
- [3] Xin, X.; Zhang, Y.; Wang, R.; Wang, Y.; Guo, P.; Li, X.* *Nat. Commun.* 2023, 14:1759.
- [2] Wang, Y.; Zhang, Y.; Xin, X.; Yang, J.; Wang, R.; Guo, P.; Wei, B.; Li, X.* *Science* 2023, 381:291.

21-21

二氧化碳 (CO₂) 催化加氢用功能催化剂构建

郭利民

华中科技大学环境科学与工程学院，武汉市洪山区珞喻路 1037 号，430074

Email: lmguo@hust.edu.cn

国际社会广泛关注 CO₂ 减排。二氧化碳 (CO₂) 催化加氢制备化工产品，既可实现 CO₂ 资源化，又可减排 CO₂，具有重要战略意义。但是，CO₂ 催化加氢催化机制复杂，导致催化反应产物众多。通过催化剂设计和结构调控，可实现 CO₂ 催化加氢的产物调控，本报告将阐述我们小组最近三个相关工作：

(1) 氧化钴表面引入氧化铟成功实现 CO₂ 催化加氢产物从甲烷向甲醇的转变。研究表明 (图 1)，In_xCo_{1-x}O_y 催化剂在还原气氛下发生表明重构生成核壳结构，极大地提高了 CO₂ 和含碳物种的吸附能力。这种特殊的核壳结构有利于反应中间产物甲氧基加氢生成甲醇，而不是过度加氢生成甲烷。

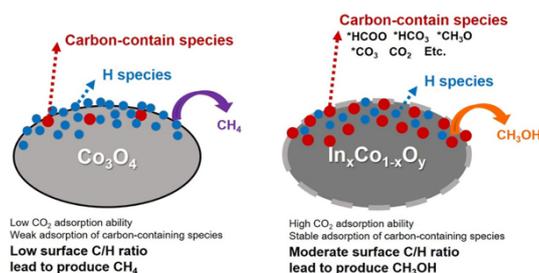


图 1 CO₂ 在 Co₃O₄ 和 In_xCo_{1-x}O_y 上加氢反应示意图

(2) 构建并发现了 Co₃InCo_{0.75}-In₂O₃ 界面这一新的 CO₂ 加氢制甲醇活性位点。研究表明（图 2），Co₃InCo_{0.75} 和 In₂O₃ 的界面导致了电子相互作用并增强了催化剂对 CO₂ 和 CO 的吸附能力，使其表现出优异的催化 CO₂ 加氢制甲醇性能。

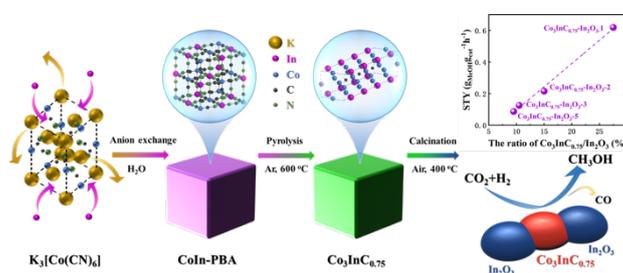


图 2 Co₃InCo_{0.75}-In₂O₃ 界面构建和催化 CO₂ 加氢性能

(3) 调控氧化铈形貌实现对 CO₂ 催化加氢产物选择性调控。研究表明，不同形貌的氧化铈负载的氧化铼催化剂的 CO₂ 催化加氢的产物选择性不同（图 3）。ReO_x/CeO₂-R 产物主要为 CO 和 CH₄；而 ReO_x/CeO₂-C 和 ReO_x/CeO₂-P 的产物为 CO。ReO_x/CeO₂ 催化剂的 CO₂ 催化加氢路径为甲酸盐路径，但是 ReO_x/CeO₂-C 和 ReO_x/CeO₂-P 表面极易形成稳定的碳酸盐，毒化催化剂，致使其催化性能较低。

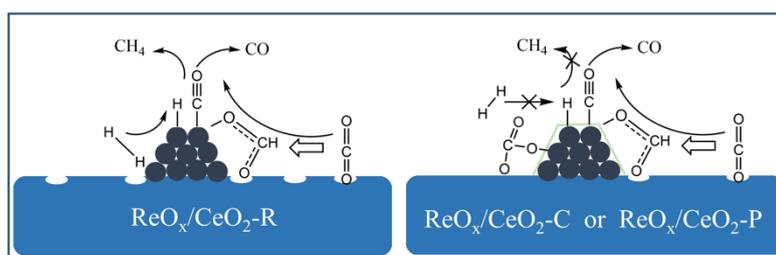


图 3 CO₂ 在不同形貌 CeO₂ 负载 Re 催化剂上的加氢反应示意图

这些工作有助于我们深入理解 CO₂ 催化加氢过程并为催化剂功能化设计提供一些参考。

参考文献：

- [1] L.T. Li, B. Yang, B. Gao, Y.F. Wang, L.X. Zhang, T. Ishihara, W. Qi, L.M. Guo, CO₂ hydrogenation selectivity shift over In-Co binary oxides catalysts: catalytic mechanism and structure-property relationship, *Chinese Journal of Catalysis*, **2022**, 43, 862-876.
- [2] Y.F. Wang, B. Yang, B. Gao, L.T. Li, T. Ishihara, L.M. Guo, Co₃InCo_{0.75}-In₂O₃ composite construction and its synergetic hydrogenation catalysis of CO₂ to methanol, *Catalysis Science & Technology, Applied Catalysis A-General*, **2023**, 665, 119374.

- [3] B. Yang, Y.F. Wang, L.T. Li, B. Gao, L.X. Zhang, L.M. Guo, Probing the morphological effects of $\text{ReO}_x/\text{CeO}_2$ catalysts on the CO_2 hydrogenation reaction, *Catalysis Science and Technology*, **2022**, 12, 1159-1172.

21-22

氮化物基功能梯度材料设计、制备及其在极端环境中应用

陈斐^{1,2}, 黄志锋², 贾明勇¹, 吴玥奇^{1,2}, 向彬华¹, 沈强¹, 张联盟¹

(1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070;

2. 武汉理工大学材料科学与工程国际化示范学院(材料与微电子学院), 武汉 430070)

具有高承载、耐高温、耐腐蚀、绝缘等多功能于一体的氮化物基功能梯度材料的发展有望解决大规模储能、航空航天等领域关键材料和器件长期在极端环境中服役失效问题,如基于液态金属的大规模储能系统中针对 Li/Na 蒸气、熔盐体系的密封,空间站中针对高能粒子辐照、原子氧侵蚀、极冷极热环境的润滑防护材料等。研究了多维多元梯度材料按需精准设计、梯度结构制备的核心科学问题,提出功能梯度材料多维数理表达模型,揭示组分/结构基元在宏微观尺度下应力缓和及力学性能增强行为,同时集成表面梯度化、多材料多维位点定向送达、原位在线监测精控、增减材一体制造等梯度材料制备技术原理,突破具有大物性差异多材料、高强度、异形结构等特征的多维多元梯度材料构筑的技术难题,推动梯度材料和器件在大规模电网储能系统、空间润滑器件上的实际应用。

关键词: 梯度材料; 多维多元; 数理表达模型; 梯度制备技术; 多功能

21-23

面向激光白光及近红外光源器件的无机玻璃-陶瓷复合发光材料

夏志国

华南理工大学

无机稀土发光材料在大功率、长寿命及耐辐照等照明、显示及探测用光源器件应用场景中具有不可替代性。传统的蓝光发光二极管(LED)与稀土荧光粉(荧光粉也称为光转换材料)的组合技术,推动了稀土发光材料的研发,深化了LED光源的应用。然而,InGaN基蓝光芯片存在“效率骤降”问题,很难基于单个LED芯片实现高功率、高亮度白光照明。为解决这一难题,激光二极管(LD)以及LD照明技术应运而生。

为了满足激光光源技术的应用需求,报告人课题组近年来分别开展了面向激光白光和激光近红外光源器件的无机玻璃-陶瓷复合发光材料研究。在激光白光光源器件中,分别针对激光白光照明和激光显示光源,我们主要研发了产业界所亟需的高热稳定性红光玻璃-陶瓷复合发光材料,在一款以AlN为基底上形成的 $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}:\text{Eu}^{2+}$ 红光陶瓷膜中,实现了最高为 21 W/mm^2 的蓝光激光饱和阈值。在激光近红外光源器件中,我们最近开发了一款 $\text{MgO}:\text{Cr}^{3+}$ 半透明陶瓷发光材料,获得了超高的热导率,达到 $50\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,其耐受蓝光激光饱和阈值为 22 W/mm^2 ,最高可实现 6.36 W 的近红外功率输出(近红外宽带发射波长峰值 810 nm ,半峰宽 190 nm)。

关键词: 稀土发光材料; 荧光玻璃; 透明/半透明陶瓷; 激光光源器件

参考文献

[1] M. Zhao, Q.Y. Zhang, Z.G. Xia, *Acc. Mater. Res.* 1, 137 (2020).

[2] Z. Yang, T. Boer, P. Braun, B. Su, Q. Zhang, A. Moewes, Z.G. Xia, *Adv. Mater.* 35, 2301837(2023).

21-24

陶瓷基复合材料高温强韧性能研究

邓勇, 张超

西北工业大学 民航学院, 西安 710072

纤维增强陶瓷基复合材料因其具备耐高温、高比强度、高比模量、抗氧化和耐腐蚀等优点，在空天飞行器及其动力系统有着不可替代的优势和巨大的应用潜力。此类材料在服役过程中常常面临极端苛刻的高温复杂环境，充分认识和科学表征其强韧性能随温度的演化规律和关键控制要素，对材料的研制、应用及可靠性评价具有重要意义。本文通过理论与实验相结合的研究手段探究了陶瓷基复合材料在多场耦合环境下的力学性能，研究了纤维增强陶瓷基复合材料在高温下的损伤破坏机理和强韧性能演变规律。实验研究了大气环境下常温到1500℃断裂韧性退化行为，揭示了控制断裂韧性的主要影响机制；在理论方面，建立了基于物理机理的温度相关性断裂强度理论感知模型，为纤维增强陶瓷基复合材料在不同温度尤其是高温下的力学性能理论表征及预测提供了有力的技术手段。