



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

D08-纳米多孔金属材料
D08-Nanoporous Metals

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D08. 纳米多孔金属材料

分会主席：康建立、韩久慧、王智力、刘凌志

D08-01

三维纳米多孔材料：从基础研究到产业化应用

陈明伟*¹

1. 南方科技大学

去合金化方法制备的纳米多孔材料是近年来备受关注的前沿材料，在能源技术、多相催化、力电驱动、生物传感、超轻结构、量子光学等领域拥有广阔的应用前景。其双连通、可设计、可调控的三维纳米构型赋予了传统材料诸多新的物理化学性能，极大地丰富了材料构效关系，已成为一类新型多功能材料。在这个报告中，我将结合我们十几年来的工作积累简要地介绍这类材料及其的发展历史，尤其是从实验室的研发到产业化应用，以及这类材料的在能源、环境、电子信息等领域的应用前景。

D08-02

Cu-Zn 合金体系电化学脱合金过程中的相变调控

韩久慧*¹

1. 天津理工大学

传统电化学脱合金方法主要基于表面扩散主导的界面自组装过程，通常在室温条件下仅能实现合金前驱体向单质金属或固溶体合金的一步转化。虽然合金体系中存在丰富的热力学稳定的金属间化合物中间相，但由于室温条件下缺乏足够的体相扩散驱动力，这些中间相在传统脱合金过程中难以形成，这极大限制了纳米多孔金属间化合物材料体系的研究进展。本研究发现，在 Cu-Zn 合金体系的室温电化学脱合金过程中，通过精确调控脱合金电势，可实现 $\epsilon\text{-CuZn}_5 \rightarrow \gamma\text{-Cu}_5\text{Zn}_8 \rightarrow \beta\text{-CuZn} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O}$ 的多步相变过程。这一发现突破了传统脱合金过程难以形成金属间化合物的限制。通过优化相变路径，成功制备出具有三维双连续结构的纳米多孔 $\gamma\text{-Cu}_5\text{Zn}_8$ 和 $\beta\text{-CuZn}$ ，韧带/孔径尺寸分别为~6 nm 和~14 nm。机理研究表明，富锌 Cu-Zn 合金体系具有两个关键特性：一是其固有的低原子扩散激活能，二是脱合金过程中形成的超细孔隙结构引发的“纳米效应”。这两个因素的协同作用有效降低了原子重排的能垒，从而在室温条件下实现了金属间化合物的相变过程。本研究揭示了室温电化学脱合金过程中相变调控的新机制，为拓展纳米多孔金属间化合物材料体系提供了新思路。

D08-03

纳米多孔金属在低维材料中的局域场增强效应

张玲*¹

1. 上海理工大学

金属纳米结构界面处的电磁场与表面自由电子相互作用可激发表面等离子激元。这种特殊的电磁模式不仅能突破传统衍射极限，还能在纳米尺度实现电磁场的局域增强与能量高效转换。在众多纳米结构中，多孔金属因其独特的三维双连续结构展现出显著优势：其一，其均衡的正负曲率分布和无序中的均匀特性，可在宏观尺度产生稳定均一的电磁增强场；其二，丰富的纳米孔结构诱导产生强烈的等离子激元耦合效应，使得电磁场增强区域不仅限于表面，更延伸至孔洞内部空间。这些特性使多孔金属成为实现高性能表面等离子激元效应的理想材料。

本文工作重点介绍多孔金属局域场增强对低维材料与光相互作用的影响，主要涉及荧光辐射增强，太赫兹辐射增强，二次谐波增强及晶格振动的增强。

D08-04

纳米孔的弥散强化行为及其与纳米颗粒的对比

关怀¹, 金海军*²

1. 辽宁材料实验室
2. 中国科学院金属研究所

纳米孔 (NanoVoids) 作为一种新型强化相, 在金属材料中展现出区别于传统第二相颗粒的独特表面-位错相互作用机制。本研究通过氧化/还原工艺, 在铜基体中成功构筑了窄尺寸分布的纳米孔结构。该工艺首先在铜熔体中引入氧元素形成铜/氧化亚铜共晶组织, 随后在氢气气氛中进行固态还原反应; 利用氧化亚铜相分解产生的体积收缩原位生成孔洞 (直径 50 nm–5 μm)。结果表明, 纳米孔通过其表面镜像力诱导的长程位错吸引作用, 有效促进位错钉扎与弓出, 产生了与纳米颗粒/析出相相当的强化效果; 二者的临界剪切应力均遵循修正的奥罗万 (Orowan) 模型。同时, 弥散分布纳米孔有助于减轻孔洞周围应力和应变集中, 抑制裂纹的萌生。进一步研究发现, 相较于均匀弥散的孔洞, 周期性排列的孔洞结构引致的临界剪切应力更趋近于不可穿透颗粒的理论极限值。本研究表明, 纳米孔强化相兼具显著的“轻量化 (密度降低 8%)”与“强韧化”优势, 为协同优化铜及其合金的力学性能与物理化学性能提供了新策略。

D08-05

高熵合金 PEM 电解水催化剂的设计与性能优化

刘雄军*¹, 李志斌¹, 吕昭平¹

1. 北京科技大学

质子交换膜水电解 (PEMWE) 在利用可再生能源高效制备绿氢方面展现出巨大潜力。然而, PEMWE 中使用的氢析出反应 (HER) 催化剂不可避免地会因间歇性功率波动的影响而遭受严重的酸介导腐蚀。在此, 我们提出了一种动态溶解-沉积平衡策略, 成功开发出适用于 PEMWE 的超稳定 HER 催化剂。具体而言, 通过脱合金化处理一种贵金属掺杂的亚共晶高熵合金 (HEA), 我们在退火后 HEA 的骨架表面形成了嵌有大量金属间化合物纳米晶的氧化物层。在酸性 HER 过程中, 氧化物层表现出优异的抗元素溶解能力, 从而降低了元素的溶解速率; 而金属间化合物纳米晶则通过提升催化活性降低了沉积电位。最终, 这一策略建立了溶解与沉积的动态平衡, 实现了 HER 的卓越耐久性——在 1 A cm⁻² 电流密度下稳定运行超过 2200 小时, 并可耐受 100 万次循环。

D08-06

铂基纳米多孔材料催化选择性还原反应研究

王云鹏¹, 冯秀娟¹, 李艳辉¹, 张伟¹, 山本 嘉则¹, 包明*¹

1. 大连理工大学

通过调控铂铁铝三元金属合金中铁的含量, 制备了纳米多孔铂铁铝三元合金催化剂 PtFeAlNPore。催化反应研究表明, PtFeAlNPore-2 在 α,β-不饱和醛还原为相应烯丙醇类化合物反应中展现出高活性与高选择性 (烯丙醇选择性达 87%–99%); 各种 α,β-不饱和醛类化合物均能顺利被还原为相应烯丙醇类化合物, 反应收率在 41%–83% 之间。通过结构表征研究, 揭示了 PtFeAlNPore-2 表层 Pt 电子密度的降低提高了其活化氢分子的能力, 催化剂表面金属氧化物作为路易斯酸性位点有助于吸附活化 α,β-不饱和醛分子中的羰基官能团, 较强的氢吸附能力以及 PtFeAlNPore-2 中紧密的 PtFe-Fe₃O₄ 异质界面促进了 α,β-不饱和醛的选择性还原生成相应烯丙醇类化合物。

研究了纳米多孔高熵合金 AlPtPdRu 催化硝基芳烃化合物一锅还原胺化反应。NH₃-TPD 与 XPS 等表征方法揭示了纳米多孔高熵合金 (HEANPore) 中的路易斯酸性与金属态的 Pt、Pd、Ru 物种保证了其在该串联反应中的高活性 (TOF 值为 1152 h⁻¹) 与高选择性。通过 DFT 计算研究了反应物分子在材料表面的吸附构型与吸附能, 由于高熵合金中的鸡尾酒效应, HEANPore 对 H₂ 分子适中的吸附能提高该催化剂活化与

稳定 H 物种的能力, 另外其对于关键反应中间体亚胺分子的较大吸附能, 加快了一锅还原胺化反应进程, 使得 HEANPore 在该串联反应中表现优异性能。

研究了不同第三金属组元 M (M= Mn, Fe, Co, Ni, Cu) 对纳米多孔三元合金 PtMAI 在催化加氢喹啉及其衍生物反应中的影响, 结果表明纳米多孔铂锰铝 (PtMnAlNPore) 催化剂在喹啉加氢制备 1,2,3,4-四氢喹啉与 1,2,3,4-四氢喹啉氧化脱氢制备喹啉反应中展示出较高的催化活性与选择性。一系列表征结果证明其表面较高的氢活化能力、较强的氧活化能力、表面 Pt 位点较低的电子密度、较大的比表面积保证了 PtMnAlNPore 催化剂较高的催化加氢与氧化脱氢能力, 而且独特的纳米多孔结构使得 PtMnAlNPore 在选择加氢与氧化脱氢双功能催化工作中具有较强的稳定性与可重复性。

参考文献:

1. Y. Wang, S. Wang, Q. Xu, X. Feng, Y. Li, R. Sun, W. Zhang, Y. Yamamoto, M. Bao, *Small* 2025, 21, 2407788.
2. Y. Wang, S. Wang, Q. Xu, X. Feng, W. Liu, Y. Yamamoto, Y. Shi, M. Bao, *ACS Appl. Nano Mater.* 2024, 7, 10739–10747.
3. Y. Wang, Z. Zhang, S. Wang, Q. Xu, X. Feng, Y. Li, X. Zhang, Y. Yamamoto, M. Bao, *J. Mater. Chem. A*, 2025, 13, 11540–11546.

D08-07

脱合金化制备纳米多孔非晶合金及其电催化性能研究

李然*¹, 喻学谦¹, 乔海清¹

1. 北京航空航天大学

非晶合金是一类具有独特长程无序短程有序原子排列特点的金属材料。相比于传统晶态合金, 其具有高强度、高硬度、大弹性变形能力、高催化特性、组分大幅可调、组织可控性好等独特物理化学特征, 是一类结构功能一体化的先进金属材料。虽然目前已经可以通过多种快速凝固方法制备获得从微米至厘米级的宏观尺寸非晶合金样品 (如薄膜、条带、棒材、板材等), 然而, 受非晶合金材料亚稳态的本质和传统快速制备方法的局限, 纳米尺度的非晶合金材料极少获得, 其结构表征和相关性能也少有人研究。近期, 我们系统的研究了非晶前驱体中惰性金属元素的组合, 对去合金化后制备的纳米多孔结构的物相组成的影响规律, 首次成功获得了简单组元的纳米多孔非晶合金材料, 并详细揭示了该类非晶合金的形成及结构演化规律, 这类新型纳米尺度的非晶合金材料在催化领域表现出优异的功能特性, 也为非晶合金材料纳米化研究打开了一扇全新的大门。

D08-08

超高孔隙率分级纳米多孔金的压缩行为

厉宗伟^{1,2}, 解辉¹, 金海军*¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

脱合金获得的纳米多孔金属在功能和力学上具有广泛的应用前景。然而, 受限于固相渗流极限, 一方面孔隙率增加到 70 % 以上时, 纳米多孔金属的力学性能会迅速下降, 另一方面孔隙率高于 90 % 的纳米多孔金属极难制备。本工作通过调控 Au-Cu-Ni 前驱体合金的成分、双相结构以及脱合金工艺, 制备出无裂纹的分级纳米多孔金。样品宏观尺寸为毫米级, 一级孔棱尺寸为~ 4 nm, 孔隙率可高达 93 %。由于各层级的结构连接性良好, 因而杨氏模量接近 Gibson - Ashby 标度律理论预测值。极其细小的一级孔棱, 致使分级纳米多孔金的压缩行为由脆性二级孔棱的长径比主导, 随着孔隙率的升高, 由脆性失效行为转变为典型泡沫材料变形行为, 而粗化一级孔棱, 这种压缩脆性得以改善。这种策略也应该适用于其他合金体系, 并为制造轻质高强的材料提供了一个新思路。

D08-09**纳米多孔铜-钯基催化剂用于电催化析氢反应**李羚*¹

1. 天津大学

通过脱合金和电偶置换制备了一种自支撑纳米多孔双金属 Cu-Pd 基催化剂 (np Cu-Pd@ZrCuAl)。np Cu-Pd@ZrCuAl 作为析氢反应 (HER) 的电催化剂。在 1 M KOH 条件下, 10 mA cm⁻² 下的过电位达到 150 mV, 引入微量的 Pd 微量 Pd 的引入有效增强 H₂O 解离为 H₂ 提供足够的 H 原子。此外, np Cu-Pd@ZrCuAl 表现出良好的力学性能, 在变形状态下仍保持催化性能。这项工作通过电偶置换微量的贵金属 Pd, 为设计和合成 HER 电催化剂提供了一种有价值的策略。

D08-10**脱合金腐蚀中的空位注入和体扩散行为探索**金海军*¹

1. 中国科学院金属研究所

脱合金腐蚀是制备纳米多孔金属的重要途径。脱合金腐蚀及纳米多孔结构的形成过程常常受控于活性元素的溶出过程以及固液界面上的原子扩散。在室温条件下, 固态前驱体合金中空位主导的体扩散速率极慢。因此, 一般认为体扩散在化学或电化学脱合金过程中的作用几可忽略。近期我们在 Cu(Au)前驱体的脱合金过程中发现, 其腐蚀前沿并非一个平直界面。在该材料腐蚀过程中, 纳米多孔相呈现胞状生长现象 (*Acta Materialia* 290 (2025)120959) -- 这和凝固过程中固相的胞状生长非常类似。这一异常现象表明, 脱合金腐蚀前沿有可能发生局部体扩散, 从而导致腐蚀过程中界面失稳并诱发胞状结构的形成。该研究为重新理解“脱合金腐蚀中是否存在空位注入”这一难题提供了新线索。

D08-11**分级多孔铜的能量吸收性能及变形行为研究**陈鑫¹, 杨卿*¹

1. 西安理工大学

兼具孔隙和韧性网络结构的多孔铜有望成为新型吸能材料的候选者, 但这受到其结构强度的限制。基于此, 我们设计了一种由微米尺度开孔和纳米尺度闭孔构成的分级多孔结构, 分析并测试了不同孔隙率分级多孔铜的孔隙结构特征及能量吸收性能, 并探究了其韧带结构在压缩过程中的内在变形行为。源于多孔铜粉纳米孔隙的结构遗传性, 微米级开孔呈现为双连续的网络结构特征, 纳米级闭孔则表现为孤立分布于微米级韧带内部的球形纳米孔。得益于孔隙结构的逐级致密化和应力传递效应以及韧带网络的塑性变形, 多孔铜具备极强的抗变形能力, 并表现出优异的能量吸收性能。EBSD 分析结果表明, 高密度位错和退火孪晶的协同作用是韧带结构主要的强化机制。

D08-12**基于熵工程策略的电池电极材料设计及电化学性能研究**王志峰*¹、秦春玲¹

1. 河北工业大学

近年来, 熵工程发展成为一种新兴的材料设计策略, 能够通过调控组元构型熵有效优化电池电极材料的结构稳定性和电化学性能。本报告基于熵工程理念, 介绍了课题组近年来开展的相关工作。一是分别设计合成了多组元低熵/中熵/高熵锂离子电池负极材料, 系统研究了材料在电化学过程中的物相演变规律及

电化学性能影响机制，揭示了熵值调控对材料晶体结构、电子传导及离子扩散动力学的作用。二是利用高熵掺杂效应显著抑制了电极材料在循环过程中的相变和结构退化，组元间的“鸡尾酒效应”优化了电荷传输路径，使材料在锂/钠离子电池中表现出优异的比容量和循环稳定性。本报告相关工作作为高性能电极材料的熵工程设计提供了参考。

D08-13

纳米多孔高熵合金的构建及其催化性能研究

秦凤香*¹, 冯璇璇¹, 朱铭海¹, 李梦雪¹

1. 南京理工大学

高熵合金(HEAs)是近些年来开发出的一种新型多主元金属材料，其由于高熵效应、迟滞扩散效应、晶格畸变效应及鸡尾酒效应而展现出优异的综合性能，在能源存储及催化等领域具有广阔的应用前景。纳米多孔高熵合金兼具高熵合金的四大效应，同时具有多孔金属材料的大比表面积及优异的导电性，可为催化反应提供更多反应活性位点，呈现出优异的催化活性和显著的耐久性，在催化领域引起了广泛关注。本文以不同成分及结构的高熵合金为前驱体，通过脱合金获得具有不同成分和结构特征的纳米多孔高熵合金，探究其脱合金机制、催化小分子反应及电解水析氢的机理。发现高熵合金脱合金后多孔结构具有明显的结构遗传特征，具有分级多孔特征的 CoCrFe 基高熵合金展现出优异的过氧化氢检测灵敏度，良好的抗干扰能力、长期稳定性和重现性；其独特的分级纳米多孔结构及遗传 Fe-Cr 相晶界，使电极材料拥有更大比表面积，提供大量催化反应的活性位点，为反应剂分子的传输提供了通道，同时 Fe-Cr 晶界的遗传存在可促进反应分子的扩散，加速过氧化氢还原反应的进行。同时脱合金纳米多孔高熵合金呈现出优异的 HER 催化能力，进一步的过渡族金属修饰可调节纳米多孔微观表面结构及电子结构特征，降低 HER 的反应能垒，促进析氢反应的动力学过程。研究表明以高熵合金为前驱体脱合金获得的高熵纳米多孔及其复合结构在小分子检测及电解水制氢领域展现出巨大的应用潜力。

D08-14

生物质衍生物催化转化中的界面调控与催化剂设计

程冠桦*¹

1. 山东大学

多相催化反应在生物质资源的高效转化中发挥着关键作用，为实现碳中和与可持续发展提供了重要途径。通过高效催化剂的设计和工艺优化，可将木质纤维素等生物质选择性地转化为高价值的能源载体和化学品，有效替代传统化石资源。我们通过催化剂设计与反应微环境调控，成功实现了高附加值能源载体和化学品的绿色转化。

首先，我们通过动力学实验、同位素标记和原位表征技术，揭示了溶剂分子与催化剂表面活性位点、反应中间体之间的相互作用机制。发现溶剂不仅通过改变反应物/产物的溶解度和传质过程影响表观反应速率，更重要的是通过调控过渡态稳定性和界面双电层结构，显著改变了反应路径和能垒[1, 2]。其次，发展了表面化学修饰和纳米结构设计策略，实现了对液-固界面微环境的精准调控[3]。在催化剂设计方面，采用合金化策略调控电子结构，通过构筑纳米多孔合金催化剂，将催化选择性从析氢反应转向加氢过程，大幅提升法拉第效率，并降低了反应过电势[4-5]。基于原位红外光谱的动态表征与机制解析研究，揭示了合金体系中界面电子协同效应对吸附态反应物活化机制的关键作用。

这些创新性成果不仅深化了对催化反应机理的理解，更为优化多相催化反应条件、开发高效催化剂提供了重要的理论支撑和实践指导，有力推动了相关领域的技术进步和可持续发展。

参考文献：

[1]Guanhua Cheng, Andreas Jentys, Oliver Y. Gutiérrez, Yue Liu*, Ya-Huei (Cathy) Chin*, Johannes A. Lercher*, Critical role of solvent-modulated H-binding strength for catalytic hydrogenation of benzaldehyde on Pd, Nature Catalysis, 2021, 4, 976-985.

[2]Guanhua Cheng, Wei Zhang, Andreas Jentys, Erika E. Ember, Oliver Y. Gutiérrez, Yue Liu*, Johannes A. Lercher*, Interface open circuit potential on aqueous hydrogenolytic reduction of benzyl alcohol over Pd/C, Nature Communications, 2022, 13, 7967.

[3]Guanhua Cheng, Jiameng Sun, Yunfei Ran, Fuquan Tan, Wensheng Ma, Zhonghua Zhang*, Effective free-standing electrodes with refined structure via sputtering Ti sublayer and altering working pressure for electrocatalytic benzaldehyde hydrogenation, Chemical Engineering Journal, 2024, 481, 148735.

[4]Guanhua Cheng, Zhihua Zhai, Jiameng Sun, Yunfei Ran, Wanfeng Yang, Fuquan Tan, Zhonghua Zhang*, Elucidating role of alloying in electrocatalytic hydrogenation of benzaldehyde over nanoporous NiPd catalysts, Chemical Engineering Journal, 2023, 474, 145631.

[5]Yunfei Ran, Jinglei Li, Jiameng Sun, Bin Yu, Fuquan Tan, Guanhua Cheng*, Zhonghua Zhang*, Impact of alloying on electrocatalytic hydrogenation of benzaldehyde over sputtered NiCu film catalysts, Applied Catalysis A: General, 2024, 678, 119725.

D08-15

纳米多孔铜基材料的制备及其电催化氨氧化性能研究

徐文策*¹, 杨林¹, 朱胜利¹

1. 天津大学

电催化氨氧化法具有可再生能源适配性强及反应条件温和等优点,是新兴的亚硝酸盐/硝酸盐制备策略。传统氨氧化催化剂通常以氮气作为目标产物,并易于发生催化剂中毒现象,使得目前催化剂对亚硝酸盐/硝酸盐的选择性较低。本报告介绍了使用脱合金法制备的纳米多孔 Cu₂O 材料作为电催化氨氧化催化剂。在氨氧化过程中,纳米多孔 Cu₂O 生成 Cu₂O/CuO 异质结构,能够优化*NH₂ 吸附,调控界面水结构,有效提升氨氧化催化活性。在 2.0 V vs. RHE 电位下,纳米多孔 Cu₂O 的 NO_x-产率及法拉第效率分别达到 134.62 μmol cm⁻² h⁻¹ 及 90.8%。此外,通过与氧还原反应耦合,纳米多孔 Cu₂O 基电催化器件氨氧化起始槽压约为 0.5 V,并能在 10 mA cm⁻² 电流密度下获得 94.6% 的法拉第效率。本工作为开发新型电催化氨氧化催化剂提供新的思路。

D08-16

纳米多孔 Ag/CeO₂ 的 CO₂ 电还原性能与界面行为

钱立华*¹

1. 华中科技大学

将 CO₂ 电催化还原为 CO 是应对能源与环境挑战的一种有前景的策略,然而实现高选择性和稳定性仍颇具难度。在此,我们报道了一种用 CeO₂ 颗粒修饰的纳米多孔 Ag 催化剂,其可营造局部类碱性微环境,从而提升 CO 选择性。原位拉曼光谱和密度泛函理论(DFT)计算证实,CeO₂ 诱导的高*OH 覆盖率(局部 pH 值)可调控关键中间体(CO_{atop} 和 CO_{bridge})的吸附行为,并抑制氢的吸附。在膜电极组件(MEA)电解槽中,该催化剂在 50 mA cm⁻² 的分电流密度下实现了约 97% 的 CO 法拉第效率,且槽电压低至 2.12 V,并能稳定运行超 1000 分钟。本研究凸显了微环境工程在优化中间体吸附方面的重要性,并为高效的 CO₂ 向 CO 转化提供了一种可扩展的策略。

D08-17

纳米多孔 Ag 薄膜的低功率等离子体氧化-还原法可控制备及其 SERS 特性

甘阳*¹

1. 哈尔滨工业大学

等离子体氧化-还原法是迥异于脱合金等湿法的一种制备多孔金属的方法。然而,目前该方法制备的多

孔 Ag 的 SERS 增强因子还不高,原因是缺乏对等离子体氧化-还原行为的深入理解,也尚未实现对多孔结构的调控与优化。同时,对于具有突触(尖端)的多孔金属薄膜的 SERS 特性研究,目前仍然存在突触电场增强特性不明确、SERS 性能与结构间关系未建立等问题。我们通过系统的实验研究和表征、等离子化学建模、FDTD 分析,深入研究了 Ag 薄膜的低功率等离子体氧化-还原行为,揭示了纳米多孔结构的演变规律,实现了纳米多孔 Ag 薄膜的可控制备,建立了多孔 Ag 薄膜的 SERS 性能与结构间的关系。研究发现^[1,2], (1) 相比于连续骨架结构的多孔 Ag 薄膜,具有突触的多孔 Ag 薄膜的 SERS 增强因子提升了 2~4 个数量级至 $10^9\sim 10^{11}$; (2) 揭示了突触尖端处的电场增强是多孔 Ag 薄膜电场增强的主要来源; (3) 突触的电场增强随其尺寸变化的火山曲线,是突触尺寸影响尖端增强效应与阻尼效应的共同作用的结果; (4) 发现具有最大电场增强的半椭球体突触的尺寸为半短轴 20 nm/半长轴 60 nm。

发表的相关论文

[1] Chengcheng Yuan, Dan Zhang, Ping Xu, Yang Gan*. Nanoporous Silver Films for SERS-Based Sensing [J]. ACS Applied Nano Materials, 7 (2024) 16141.

[2] Chengcheng Yuan, Dan Zhang, Yang Gan*. Mechanistic Insights into Plasma Oxidation of Ag Nanofilms: Experimental and Theoretical Studies [J]. ACS Omega, 9 (2024) 28912.

D08-18

纳米多孔 Ag-Cu 双金属电极的 CO₂ 电催化性能及表面结构演化

吕湘龙*¹, 潘宏宇¹

1. 桂林理工大学

铜基催化电极在 CO₂ 电化学还原中可生成乙烯、乙醇等具有高能量密度和重大经济价值的 C₂₊产物,是目前最有前景的一类催化剂。然而,高效获取 C₂₊产物仍面临许多挑战,这主要归因于 C-C 耦合的动力学缓慢过程,以及与析氢反应和 C₁ 产物的激烈竞争。

本研究通过电沉积的方法在纳米多孔金属基底上构建了双金属银-铜 (NP Ag-Cu) 串联催化剂,借助串联催化机制和纳米多孔结构设计,成功实现了关键中间体*CO 从 Ag 向 Cu 位点的高效溢流,使得 C₂₊产物的法拉第效率达到了约 73% (其中乙醇 44.5%)。采用原位拉曼光谱和 DFT 计算阐明了乙醇的高选择性源于不对称的*CH_x-CO 偶联机制。在长时间催化反应中, NP Ag-Cu 会由于表面结构重构而导致明显的性能衰退,文中通过多尺度表征证实了电极表面结构重构的“溶解-再沉积-粗化”的动态演化过程。

D08-19

面向无膜电解槽的多级纳米多孔镍电极

李诺潼¹, 陈擎*¹

1. 香港科技大学

主动对流型无膜电解槽 (active-flow membrane-less electrolyzer) 通过压差驱动电解液流动,实现氢氧分离,简化电解槽结构,降低其成本。但强对流条件也对电极的结构稳定性提出了较高的要求。我们通过电沉积-脱合金的方法,在镍泡沫基底上构建了具有双连续结构的纳米多孔镍结构,与基于催化剂颗粒的传统电极相比,该电极不仅具有较大的电化学活性面积,更有极佳的结构稳定性,在 1 M KOH 溶液中展现出稳定的低析氢过电位,展示了其在可持续氢能转化中的发展潜力。

D08-20

硅基材料的多孔化及储能应用

冯金奎*¹

1. 山东大学

硅负极作为下一代锂离子电池的关键材料,因其高的理论容量备受关注,硅的理论容量高达 4200

mAh/g (Li_{4.4}Si), 是传统石墨负极 (372 mAh/g) 的 10 倍以上。硅的工作电位接近石墨。硅也是地壳中含量第二的元素, 来源广泛, 成本低, 且无毒, 环境友好。然而硅负极衰减较快, 主要是硅充放电过程体积膨胀较大 (~300%), 引发电极结构破碎和活性材料脱落, 以及 SEI 膜反复生成, 降低了库仑效率。同时硅本身是半导体, 导电性远低于石墨。为了解决这些问题, 我们通过多孔化设计来缓解硅负极体积膨胀应力。通过化学脱合金、真空脱合金、歧化法等制备了多孔硅材料, 系统研究了结构与性能的关系, 并将这些方法扩展应用到了钠/钾/锌等电池体系。

D08-21

纳米多孔铜基复合材料在限域过一硫酸盐活化中的性能与机制研究

张弛*¹, 梁萍¹, 王杰¹, 张欣欣¹

1. 五邑大学

纳米限域效应介导的过硫酸盐活化在高效、选择性降解有机污染物方面具有重要价值, 本研究基于脱合金制备的纳米多孔材料 (NPMs) 的高度可调结构与优异三维连通性, 探究了其在纳米限域催化中的应用潜力。前期研究证实, 纳米多孔铜 (NP-Cu) 独特的弯曲韧带-孔道结构对过一硫酸盐 (PMS) 活化展现出显著催化活性, 但仍面临环境适应性不足及传质-限域效应平衡调控的挑战。为应对这些挑战, 本研究首先以 Al-Cu-Fe 三元合金为前驱体, 通过脱合金化成功制备了纳米多孔铜/富缺陷铁氧化物复合材料, 该材料借助限域效应、缺陷催化及界面协同作用的增强, 显著提升了催化活性并拓宽了环境适应性, 在 pH 4-10 范围内均表现出优异的降解性能; 其次, 通过调控 Al-Cu 合金组分, 构建了梯度多孔结构催化剂, 有效缩短了传质路径, 实现了传质效率与限域效应的协同优化。更进一步, 本研究揭示了基底污染物类型对反应路径的调控机制: 不含胺基的污染物主要循自由基路径降解, 而含胺基的污染物则以亚稳态高价铜为主导路径。以上研究为解决纳米多孔材料在高级氧化过程中应用的关键问题提供了新思路与实验依据, 并深化了对纳米限域催化反应机制的理解。

D08-22

纳米多孔镍基薄膜材料固液界面的力电化耦合研究

邓齐波*¹, 贾函杏¹, 安翠华¹, 胡宁¹

1. 河北工业大学

近年来, 力学与电化学的耦合作用已快速发展成为新能源领域的研究热点之一。一方面, 电极材料在电化学过程中产生较大的应力, 从而导致材料的力学破坏, 继而影响其电化学性能; 另一方面, 许多新型结构金属催化剂电极表面高活性原子受到来自于基底不同程度的应力/应变作用, 从而对其电化学性能产生显著影响。基于此, 本研究通过化学脱合金法制备了自支撑纳米多孔镍基材料, 探究其电化学过程中的形变机理与驱动性能。以 Ni₄₀Zr₂₀Ti₄₀ 合金为原料, 经 0.05 mol/L HF 溶液脱合金 4 h 制得柔性纳米多孔镍, 并通过单侧电化学沉积镍或黏贴硅胶构建非对称结构驱动材料。结果表明, 纳米多孔镍-硅胶材料因保持多孔结构和高比表面积, 在 1 mol/L NaOH 电解液、扫速 1 mV/s 条件下偏转角度达 31.5°, 显著高于纳米多孔镍-镍材料的 7.8°。电化学分析显示, 偏转角度与电荷量正相关, 但低扫速下存在滞后效应。循环稳定性测试表明, 材料经 4200 s 循环后仍保留 61% 的初始偏转性能。相较传统块体材料, 本研究制备的驱动材料兼具轻薄、高柔韧性和宏观形变特性, 为电化学驱动器的设计提供了新思路。该工作通过优化材料结构与反应参数, 实现了非贵金属电化学驱动材料性能的显著提升。

D08-23

Hierarchical porous metal-doped Cu-based catalysts promotes electrocatalytic nitrate reduction to ammonia

Yuhuan Cui*¹

1. Hebei University

As a crucial feedstock in agriculture and the chemical industry, as well as a high-quality carbon-free energy carrier, the green and efficient synthesis of ammonia (NH_3) has garnered significant attention. The conventional Haber-Bosch process for ammonia synthesis suffers from high energy consumption and substantial carbon emissions. In contrast, electrochemical ammonia synthesis using nitrate as a feedstock offers dual advantages of environmental remediation and energy conversion. However, the electrocatalytic nitrate reduction reaction faces challenges such as sluggish reaction kinetics, low ammonia selectivity, and competing hydrogen evolution reactions, and thus the development of highly efficient and stable catalytic systems is urgently needed. Cu-based catalysts have been widely studied for their strong nitrate adsorption capacity, however, the limitations in intermediate reduction and reactive hydrogen supply constrains the ammonia yield and Faradaic efficiency.

To address these issues, this report introduces Ru, Ag, and Ni as dopants and employs an "alloying-dealloying" strategy to construct hierarchical porous multimetallic-doped Cu-based catalysts. On the one hand, Ru doping effect modulates the electronic structure of Cu, enhances reactant adsorption energy, reduces reaction energy barriers, promotes water dissociation to generate reactive hydrogen, and suppresses hydrogen evolution simultaneously. The prepared np Ru-Cu catalyst achieves an ammonia yield rate of $29.63 \text{ mg h}^{-1} \text{ mg}_{\text{cat}}^{-1}$ with a Faradaic efficiency of 97.3% at -0.2 V vs RHE . On the other hand, dual doping of Ni and Ag into porous Cu-based catalysts leverages their synergistic effects to regulate the d-band center of Cu, enhances reactant adsorption and inhibits intermediate desorption, thereby improving the selectivity for ammonia synthesis. The synthesized np Ag,Ni-Cu catalyst demonstrates a Faradaic efficiency of 98.5% and an ammonia yield rate of $41.1 \text{ mg h}^{-1} \text{ mg}_{\text{cat}}^{-1}$ at -0.2 V vs RHE .

Furthermore, the hierarchical porous structure in the catalysts facilitates the exposure of active sites and increases the specific surface area. The macroporous channels accelerate mass transportation, while the small nanopores enrich reactants and prolong intermediate retention time, facilitating deeper reduction of intermediates due to its confinement effects. In summary, this work enhances the performance of nitrate reduction to ammonia through the design of hierarchical porous multimetallic-doped Cu-based catalysts, provides insights into the synergistic effect of multimetallic doping as well as hierarchical pore mechanism, thereby promoting the development of electrocatalytic ammonia synthesis technologies.

D08-24

多壁介孔二氧化硅构建“太阳花”结构促进干细胞迁移分化修复晶状体不全脱位

刘燕¹, 陈天慧¹, 蒋永祥*¹

1. 复旦大学附属眼耳鼻喉科医院

目的：晶状体不全脱位是一种由悬韧带异常引起的致盲性眼病，现有手术疗法难度大、并发症多。本研究旨在探索基于干细胞与功能化纳米材料的促修复新策略，以弥补当前治疗方案的不足。

方法与结果：本研究首先对晶状体不全脱位（EL）患者眼组织和房水进行 RNA-seq 转录组学及 Olink 蛋白组学分析，发现患者眼内细胞外基质相关基因表达与蛋白分泌显著受抑。基于此，我们设计了一种氨基修饰的多壁介孔二氧化硅（mCNT@SiO₂-NH₂）纳米载体，可高效吸附人骨髓间充质干细胞（BMSC），并引导其形成以 mCNT@SiO₂-NH₂ 为核心、BMSC 呈放射状排列的“太阳花”结构。利用人晶状体上皮细胞（LEC）条件培养基对复合结构中的 BMSC 进行定向诱导，发现与 mCNT@SiO₂-NH₂ 共培养显著提升了 BMSC 对悬韧带特异性蛋白（FBN1, MFAP2）的表达。多组学分析（RNA-seq、ATAC-seq、单细胞 RNA-seq）表明，mCNT@SiO₂-NH₂ 通过激活核周肌动蛋白帽（Factin）、肌球蛋白轻链激酶（pMLC）及 Nesprin-1，介导机械力信号传导，最终驱动 YAP 核转位及其下游转录调控。在大鼠 EL 模型中移植该共培养体系，组织学评估证实受损悬韧带结构得到有效重建。

结论：本研究揭示了多孔纳米材料 mCNT@SiO₂-NH₂ 通过细胞骨架-细胞核机械力偶联通路（pMLC、Factin/Nesprin-1/YAP）重编程 BMSC 命运的新机制，成功实现了 BMSC 向悬韧带样细胞的分化，为利用干细胞疗法修复复杂性眼病（如晶状体不全脱位）提供了创新性思路。

D08-25**Defects Enriched Carbon Nitride Sponge with High Surface Area for Enhanced Photocatalytic Hydrogen Evolution**Ming Wu*¹

1. Hunan University of Science and Technology

The limited efficiency of traditional photocatalysts necessitates innovative solutions for sustainable hydrogen production. In this study, a three-dimensional (3D) sponge-like porous carbon nitride (SCN-x) was successfully synthesized using a novel method involving the removal of unstable organic frameworks. The resulting SCN-x exhibits a highly interconnected network structure and significantly higher surface area (116.5 m²/g), compared to normal pure carbon nitride (PCN). Furthermore, this method introduces significant defects into SCN-x, such as additional foreign oxygen atoms, which not only modulate its band structure but also provide more active sites at the defects. These features increase the number of photo-induced electron-hole pairs due to enhanced light absorption, and suppresses their recombination by enabling them to efficiently participate in the reaction with increased number of active sites. As a result, compared to PCN, the optimal SCN-0.5 sample exhibits 86.6 times higher photocatalytic hydrogen production rate under visible light irradiation, along with excellent stability and a high apparent quantum yield (AQY) of 5.8% under 420 nm illumination. Furthermore, with additional calcination under air, the 2SCN-0.5 sample delivers a record-high hydrogen evolution rate of 1663.5 μmol·h⁻¹·g⁻¹ under natural sunlight irradiation. This work presents a novel method for preparing a metal-free photocatalyst by introducing significant defects and a high surface area, enabling efficient large-scale hydrogen production under natural sunlight.

D08-26**高熵合金多尺度孔结构设计及其电解水催化性能调控**李睿*¹

1. 西北工业大学

电解水制氢是一种绿色环保、可持续获取绿色氢能的有效途径。开发高效低成本催化剂是电解水制氢规模化的关键，目前纳米结构化电解水催化剂普遍存在的活性与稳定性之间的矛盾问题。本研究以开发低成本、高活性、高稳定催化材料为目的，基于物理冶金思路，利用负混合焓主元调控高熵合金多尺度结构的策略，成功研发具有自支撑梯度多级孔结构的高熵合金催化电极，其在电解水制氢方面表现出了优越的性能，能够实现安培级电流密度的高效电解水。这项工作为开发梯度自支撑多级孔催化材料提供了一种全新的策略与方法，可广泛应用于能源转换领域。

D08-27**纳米多孔金属电化学有机加氢**谭勇文*¹

1. 湖南大学

传统的加氢反应通常是以氢气为氢源在高压下进行，过程危险，成本高。以廉价、安全的水为氢源，原位利用水电还原产生的活性氢原子 (H^{*})，可以在常温常压下实现绿色、高效、高选择性的电化学转移氢化反应。面向电化学有机加氢的目标，通过界面反应精准调控纳米多孔合金的结构，控制活性氢的生成、反应物的吸附、表面反应和产物的脱附，促进加氢反应，发展了炔烃、炔醇等有机物的半加氢。

D08-28**纳米多孔材料的可控构筑及其氧还原和锌-空气电池性能研究**王孝广*¹

1. 太原理工大学

随着能源与环境问题日益严峻, 高效电催化材料的开发成为研究热点。纳米多孔材料凭借高比表面积、丰富的活性位点以及独特的传质特性, 在电催化领域展现出巨大潜力。在本工作中, 我们分别采用脱合金和高温热解策略, 构筑了 Al-Fe-Mn 和 Fe/Fe₂O₃-NC 型的纳米多孔材料, 并用作电催化氧还原反应 (ORR) 的催化剂。物相表征结果表明, 脱合金构筑的 Al-Fe-Mn 具有 43.08–96.56 m² g⁻¹ 的比表面积和 2–5 nm 的介孔结构, 而高温热解构筑的 Fe/Fe₂O₃-NC 的比表面积高达 2553.25 m² g⁻¹, 包括 90.29 m² g⁻¹ 的外表面积和 2462.96 m² g⁻¹ 的孔表面积, 超高的孔表面积说明具有丰富的孔结构。得益于两种材料较高的比表面积和孔结构, 将两种方法构筑的材料用作 ORR 催化剂时, 不仅具有优异的催化活性, 且催化剂稳定性良好。两种催化剂材料作为锌-空气电池的阴极催化剂, 组装的电池产生了较高的峰值放电功率和比容量, 同时能进行超长时间的循环充放电 (超过 250 h), 表现出良好的稳定性和应用潜力。本工作中采用脱合金和高温热解策略, 为构筑具有良好活性、稳定性、低成本且高效的纳米多孔电催化剂提供了新的思路。

D08-29

纳米多孔铈/铋基合金型负极的储钠性能与机理研究

高辉*¹

1. 太原理工大学集成电路学院

围绕高体积效应下钠离子电池合金型负极稳定性面临的挑战, 取得以下进展: 合金化-脱合金化策略构筑纳米多孔结构缓解合金颗粒粉化问题; 高压磁控溅射诱导纳米孔道和基底表面纳米化策略实现合金薄膜对内部应力有效缓冲和与基底紧密结合; 液相激光剥离策略高效获取 Sb 基颗粒并结合后处理工艺获得合金颗粒与碳壳间体积效应缓冲余量等。同时, 借助原位谱学手段和理论模拟计算, 深入研究了储钠机理。

D08-30

结构一体化三维垂直多孔 Ni@NiO_x(MnO_x) 电极用于高性能滤波电化学电容器

马晓东¹, 康建立*¹

1. 天津大学

电化学电容器 (ECs) 有可能取代笨重的铝电解电容器 (AECs), 以满足电子元件的小型化需求。然而, ECs 复杂的电极材料复杂的结构导致离子扩散缓慢, 限制了其频率响应能力 (<1 Hz)。虽然直孔的碳基材料设计可以提高频率响应, 但存在一定的局限性: 疏松的孔结构减少了离子存储位点, 不可避免地造成电容损失。为了解决这一问题, 通过热处理、脱合金和电化学氧化的方法制备了垂直多孔 Ni@NiO_x(MnO_x) (VPN@MO) 复合电极, 同时提高频率响应和电容密度。得益于 NiO_x(MnO_x) 的赝电容特性和允许快速离子传输的垂直互连结构, VPN-EC 在 120 Hz 时显示出 1.48 mF/cm 的优异面电容密度, 相位角为 -81°。此外, 非对称电容器 (ASPC) 具有 936 μFV²cm² 的高能量密度。集成 3 × 3 ASPC 阵列可以在不损失容量的情况下将电压窗口扩展到 3.6 V, 有效地将各种交流波形转换为稳定的直流输出 (V_{ripple}=30 mV 约为 AECs (280 mV) 的 1/10)。该 ASPC 具有良好的集成性, 当连接到风力涡轮机时, 集成的 ASPC 持续为 led 供电。这些发现将为开发快速响应、高比电容和宽工作电压的电容制备提供了一种新的方法。

D08-31

Lamellar Nanoporous Intermetallic Cobalt-Titanium Multisite Electrocatalyst with Extraordinary Activity and Durability for Hydrogen Evolution Reaction

Zhilan Zhou¹, Xing-You Lang*¹, Qing Jiang¹

1. Jilin University

Constructing well-defined multisites with high activity and durability is crucial for development of highly efficient electrocatalysts toward multiple-intermediate reactions. Here we report negative mixing enthalpy caused intermetallic Co₃Ti nanoprecipitates on lamellar hierarchical nanoporous cobalt skeleton as a high-performance nonprecious multisite electrocatalyst for alkaline hydrogen evolution reaction. The intermetallic Co₃Ti as robust

multisites substantially boosts reaction kinetics of water dissociation and hydrogen adsorption/combination by making use of unisonous adsorptions of hydrogen and hydroxyl intermediates with proper binding energies to break linear scaling relationships. Associated with bicontinuous and hierarchical nanoporous cobalt skeleton that enables sufficient accessible Co₃Ti multisites and facilitates electron transfer and ion/molecule transportation, self-supported nanoporous cobalt-titanium heterogeneous electrode exhibits an extraordinary electrocatalysis toward hydrogen evolution reaction in 1 M KOH, with nearly zero onset overpotential and low Tafel slope of 32 mV dec⁻¹. It reaches current density of as high as ~3.31 A cm⁻² at a low overpotential of 200 mV and maintains exceptional stability at ~1.33 A cm⁻² for more than 1000 h. These impressive electrochemical properties make it an attractive candidate as cathodic electrocatalyst in alkaline water electrolysis for large-scale hydrogen production.

D08-32

纳米多孔金属电极在电氢转化中的应用探索

丁轶*¹

1. 天津理工大学

随着可再生能源在国家能源格局中的占比逐渐加大，各类分布式能源消纳技术引起越来越多的关注。通过电化学过程将绿电转变为各类含能化学品的电氢转化技术拥有储能密度高、价值高、应用广等特点，而驱动该过程的核心是高性能电极材料。这里我们将探讨基于脱合金方法制得的纳米多孔金属电极在该过程中的潜在应用，包括碱性、酸性电解水，电催化有机合成。重点将讨论这类技术在面向规模应用中所亟待解决的关键瓶颈技术。

D08-33

纳米多孔金属气相脱合金成孔机理及碱性电解水应用

刘攀*¹

1. 上海交通大学

纳米孔结构在脱合金过程中的演化主导着合金腐蚀行为，同时也为功能性金属纳米材料的制备提供了可能。然而，孔隙演化的纳米尺度动力学机制长期缺乏实验表征。借助球差校正透射电子显微镜，我们实现了 γ -CoZn 气相脱合金 (VPD) 制备纳米多孔钴的全尺度动态观测。原位表征不仅验证了基于宏观表征与模拟的脱合金机制关键环节，包括台阶流溶解机制、空位团簇成核现象以及韧带-孔隙分叉行为，更将台阶流动力学与气相脱合金动力学解耦，揭示出合金组分间的键能差异可决定脱合金动力学并显著影响材料形貌。该工作完善了经典脱合金理论，为新型材料制备提供了可能。基于对 VPD 的深入理解，我们结合该项技术应用于多孔金属催化电极制备，实现了大电流密度下高效稳定电解水反应，为碱性电解槽装备制造提供核心部件。

D08-34

设计纳米多孔金属电催化硝酸盐还原制氨

王智力*¹

1. 吉林大学

氨是化肥、制药和化学制品等领域不可或缺的原材料之一，也是一种具有巨大潜力的液态储氢材料。Haber-Bosch 法合成氨存在转化率低、能耗大、环境污染严重等缺点。电催化硝酸盐还原反应是一种有希望替代 Haber-Bosch 法的合成氨新方法。开发高性能催化材料至关重要。我们采用合金化、界面、纳米孔孔化等多种策略设计了一系列高性能催化材料，显著提升了电催化硝酸盐还原制氨性能。

D08-35

Flow-Engineered Multiscale Porous Electrode Design for Promoting Bubbles Removal Efficiency

toward High-Current-Density Hydrogen Evolution ReactionQingpeng Sun¹, Shaofei Zhang*¹

1. Hebei University of Science and Technology

Water electrolysis for large-scale hydrogen production at high current densities faces significant challenges due to the sluggish bubble-involved kinetics on tortuous nanoporous electrodes, which result in increased activation losses and structural degradation. Inspired by the directional fluid transport properties of pipeline structures, this study presents a rational design of a bubble-guiding electrode by introducing periodic, vertically aligned porous channels into dealloyed nanoporous NiCo alloy (denoted as PAX-npNiCo, where X represents the periodic spacing). The vertical macro-channels create a split-path effect for gas bubbles and electrolyte flow, promoting rapid bubble detachment and minimizing the likelihood of bubble coalescence. Additionally, nanopores formed via chemical dealloying offer a high density of active sites, significantly improving the hydrogen evolution reaction (HER) performance. Using a combination of high-speed camera observation and computational fluid dynamics (CFD) simulation, the optimized geometry of the flow-engineered channels for efficient bubble detachment and transport has been identified, demonstrating superior bubble-guiding capabilities. As a result, the multiscale PA200-npNiCo electrode with vertically aligned microscale channels with period of 200 μm and 3D nanopores on the ligaments achieves a record current density of 981 mA cm^{-2} at a low overpotential of 223 mV in 1.0 M KOH, and maintains exceptional long-term stability, sustaining over 450 hours at 500 mA cm^{-2} . When integrated into an electrolyzer with PA200-npNiCo both as cathode and anode, only 1.97 V is required to reach 400 mA cm^{-2} , with outstanding durability over 100 hours under 1000 mA cm^{-2} . This work provides valuable insights into bubble dynamics for HER and underscores the importance of multi-scale design in the porous architecture of electrodes for broader electrocatalytic gas-evolving applications.

D08-36**基于氢溢流调控活性氢的宽电位窗口电化学硝酸盐还原制氨**周雪¹, 徐文策¹, 朱胜利*¹

1. 天津大学材料科学与工程学院

电化学硝酸盐还原反应 (NO₃RR) 在常温常压条件下实现绿色可持续 NH₃ 合成方面展现出重要应用前景。然而, 受限于活性氢供给调控能力, 难以在宽电位窗口内实现较高的 NH₃ 选择性, 制约了其与波动性可再生能源的耦合应用。为此, 本工作提出了一种基于氢溢出的策略, 通过调控活性氢的反应路径, 实现宽电位窗口内的高效 NH₃ 合成。该策略采用负载 Pt 纳米粒子的纳米多孔磷化钴 (Pt/np-Co₂P) 催化剂。结合原位傅里叶变换红外光谱、密度泛函理论计算及系列对比实验, 揭示了 Pt 纳米粒子促进活性氢生成, 并以能量有利的方式溢出至 Co₂P, 有效氢化 NO₃RR 过程中的关键中间体*NO, 从而提升 NH₃ 产物选择性的反应机制。得益于此, Pt/np-Co₂P 催化剂在 600 mV 的宽电位窗口内实现了超过 90% 的氨法拉第效率 (FE), 优于已报道体系; 同时, 在工业级电流密度 ($\sim 1 \text{ A cm}^{-2}$) 下, NH₃ 的 FE 接近 100%。此外, 该催化剂在模拟可再生能源波动供电条件下展现出优异的适应性。同时, 该氢溢流策略亦可拓展应用于其他贵金属修饰 Co₂P 的催化体系, 为构建高性能 NO₃RR 催化剂、推动工业化绿色 NH₃ 合成提供了切实可行的新路径。

D08-37**纳米多孔金催化烷基醚 C(sp³)-O 键硼化及其机理解析**赵玉辉^{1,2}, Charlie Lacroix², Takuma Sato², Masahiro Terada², 金铁男*²

1. 辽宁科技大学

2. Tohoku University

烷基硼化合物作为一类关键的精细化工中间体, 在有机合成领域展现出高度灵活的反应特性, 其能够通过多样化的有机合成转化过程, 制备出具有重要价值的生物活性分子与功能性有机材料。相较于经典的 C=C 键加成硼化反应, 近年来, 通过活化裂解受保护的醇类化合物中的 C-O 键来实现取代硼化反应, 逐

渐发展成为选择性合成烷基硼化合物的新兴策略¹。在有机合成研究中，醚类化合物 C–O 键的选择性裂解与功能化一直是极具挑战性的科学问题，尽管醚类化合物来源广泛，但受制于醚中惰性 C–O 键较高的键解离能，基于此类原料实现有效的取代硼化反应的报道较少。解决这一难题对于烷基硼化合物的高效合成而言尤为重要。

本研究团队在前期研究中发现，纳米多孔金属金(AuNPore)材料能够有效催化裂解双(频哪醇合)二硼(B₂pin₂)分子中的 B–B 键，进而实现炔烃和亚甲基环丙烷的二硼化反应²。在此基础上，本研究进一步证实，AuNPore 在催化未活化的醚类化合物 C–O 键与 B₂pin₂ 的选择性取代硼化反应中，展现出优异的催化活性。在 10 mol% AuNPore 催化剂存在下，(3-甲氧基丁基)苯与 B₂pin₂ 在 100 °C 甲苯溶剂中反应 6 小时，可获得脱甲氧基的烷基硼化产物，收率达 80%。该选择性硼化反应表现出广泛的底物适用性，能够兼容无环醚、环醚以及缩醛等多种底物，从而高效制备各类烷基硼酸酯和二硼酸酯产物。

结合实验结果与密度泛函理论(DFT)计算开展的机理研究表明，AuNPore 催化剂能够促进 B₂pin₂ 分子中 B–B 键的裂解，进而引发 C–O 键断裂生成碳正离子。该反应经由一个新的硼化反应路径，反应过程中形成 C(sp³)–Au–Bpin 有机金物种，该物种通过还原消除最终生成目标烷基硼化产物。此外，AuNPore 的多相特性使其具备良好的回收与重复使用性能，在多轮循环使用后仍能保持稳定的催化活性。

参考文献:

1. M. Wang, Z. Shi, Chem. Rev. 2020, 120, 7348.
2. Q. Chen, J. Zhao, Y. Ishikawa, N. Asao, Y. Yamamoto, T. Jin, Org. Lett. 2013, 15, 5766.
- 3) Q. Chen, X. Zhang, S. Su, Z. Xu, N. Li, Y. Li, H. Zhou, M. Bao, Y. Yamamoto, T. Jin, ACS Catal. 2018, 7, 5901.

D08-38

多孔过渡金属化合物的制备及电催化性能研究

刁乐晨*¹

1. 山东理工大学

本文以 NaCl 为模板，利用其模板和空间限域的特性制备了一系列三维多孔过渡金属化合物(MoS₂-Co₉S₈ 异质结、三维多孔 MoS₂-ReS₂ 异质结、二维石墨烯负载 Co-CoO 异质结和三维多孔 RuO₂ 基过渡金属氧化物)等材料。研究了该类材料在电解水制氢、电催化析氧反应、电催化氧还原、电催化生物质升级等反应中表现出优异的活性和稳定性。本文结合实验结果、原位表征和理论计算研究了元素掺杂、异质结构建等手段对材料电子结构的调控及相互作用机制，并揭示了电催化反应历程。本研究为电催化剂的设计和應用提供理论指导。

D08-39

纳米多孔铜微结构调控及其镍沉积机理研究

桑颖吉¹, 陈擎*¹

1. 香港科技大学

纳米多孔金属因其独特的双连续三维结构，在催化、传感以及电化学储能等领域展现出广阔的应用前景。本研究以铜锰合金为初始材料，在不同电化学脱合金电位条件下制备了 1 两种孔隙率的纳米多孔铜前驱体。随后，通过调控沉积电流密度与电荷量，系统地研究了镍在纳米多孔铜内的电化学沉积行为。利用聚焦离子束技术(FIB)对纳米多孔铜横截面的孔径和孔隙率进行精细表征，结合数值模拟分析，发现极低沉积电流密度下的沉积行为与理论均匀沉积模型的孔隙率变化趋势相吻合。通过 Comsol 中电化学与相场耦合的仿真分析，表明低电流密度下，纳米多孔结构内部的电解质和电流密度分布更加均匀，从而减小电极截面方向及孔内镍离子浓度分布差异，显著改善电化学沉积均匀性。此外，研究揭示了不同孔径的镍沉积纳米多孔铜在加压条件下的离子传质行为，表现出与双电层效应相关的离子排斥特性。这项工作为纳米多孔金属的微观结构优化与性能调控提供了具有指导意义的理论基础与技术支持。

D08-40**异质原子共掺杂纳米多孔 RuO₂ 克服酸性析氧反应中活性与稳定性之间的权衡难题**蒋康¹, 谭勇文*¹

1. 湖南大学材料科学与工程学院

氧化钌 (RuO₂) 作为氧化铱 (IrO₂) 的替代催化剂用于酸性析氧反应 (OER) 展现出巨大潜力, 但如何同时实现高活性与高稳定性的 RuO₂ 电催化剂, 仍是当前亟待突破的关键难题。传统策略在提升 RuO₂ 某一性能时, 往往以牺牲另一性能为代价, 难以兼顾二者平衡。针对这一挑战, 我们成功构建了一种钽和硼共掺杂的纳米多孔氧化钌催化剂 (Ta/B-RuO₂)。该催化剂兼具独特的 Ru-O-Ta 框架和 Ru-O-B 活性位点, 巧妙地解决了 RuO₂ 在酸性 OER 中活性与稳定性之间的权衡问题。具体而言, Ru-O-Ta 框架通过桥接氧抑制过氧化并补充氧空位, 有效稳定活性 Ru 位点, 使得催化剂能够通过吸附物演化机制稳定地催化 OER。同时, 活性 Ru-O-Ta/B 位点不仅改变了反应的速率控制步骤, 还通过调节 Ru 的 d 带中心以及局部电荷重排, 显著降低反应的能垒, 从而大幅提升了催化活性。配备 Ta/B-RuO₂ 的质子交换膜水电解槽在 1.6 V 的低电压下即可实现 1.0 A cm⁻² 的电流密度, 并且能够在 200 mA cm⁻² 的条件下稳定运行 120 小时。这一成果不仅为酸性 OER 提供了高性能的 Ta/B-RuO₂ 催化剂, 更为开发兼具高活性和稳定性的 OER 催化剂提供了新的思路和方向。

D08-41**轻质、强韧三维纳米多孔金属集流体的可控合成及储能应用**康建立*¹

1. 天津大学材料科学与工程学院

随着电化学储能技术的快速发展, 金属 (Li、Na、Zn 等) 二次电池以其高能量密度引起了人们的广泛关注, 但金属负极普遍存在的枝晶问题限制了其产品化应用。构建三维金属复合负极是抑制金属枝晶生长的有效手段之一。三维多孔金属为三维复合负极提供了理想的宿主载体。然而轻质、强韧、孔结构及表界面可调仍然是三维金属集流体工程应用面临的主要挑战。本工作以富锰合金为前驱体, 通过相工程和脱合金调控, 构筑轻质、强韧、高导三维网络纳米多孔金属集流体, 通过调控其表界面性质, 将其与 Li、Na、Sn、Zn 等活性材料复合构建了系列一体式复合负极, 并验证了其在储能系统中的应用, 展望了其良好的工程化应用前景。

1) Qiang Ma, Junwei Sha, Biao Chen, Enzo Liu, Chunsheng Shi, Liying Ma, Fang He, Chunnian He, Naiqin Zhao, Jianli Kang*, Synergistic Optimization of Composition-Structure-Conductive Network for High-Performance Integrated Transition Metal Oxide Anodes for Lithium-Ion Batteries, *J. Mater. Chem. A*, 2025, DOI:10.1039/D5TA01525A.

2) Ke Chen, Jianli Kang*, Chunnian He, Chunsheng Shi, Biao Chen, Junwei Sha, Liying Ma, Enzo Liu, Naiqin Zhao, SnO₂/SnVA/Cu-Sn Nanocomposites with a Hierarchical Porous Structure as Integrated Electrodes for Sodium-Ion Batteries, *ACS Appl. Nano Mater.* 2025, 8, 9949–9961.

3) Yanfei Huang, Jianli Kang*, Enzo Liu, Biao Chen, Junwei Sha, Liying Ma, Chunnian He, Naiqin Zhao*, Hierarchical porous CuMn current collector enabled oriented Zn(002) plane growth toward dendrite-free zinc anode, *Chem. Eng. J.*, 2025, 512, 162600.

4) Xiaodong Ma, Junwei Sha*, Biao Chen, Chunsheng Shi, Liying Ma, Naiqin Zhao, Jianli Kang*, Structurally integrated 3D vertically porous Ni@NiOx(MnOx) electrode for high-performance filter electrochemical capacitor, *Energy Storage Mater.*, 2025, 75, 104083.

5) Linyuan Pei, Jianli Kang*, Chunnian He, Chunsheng Shi, Biao Chen, Junwei Sha, Liying Ma, Enzo Liu, Naiqin Zhao*, Designing High Reversibility Free-Standing Hierarchical Porous High-Entropy Oxide as Anodes for Advanced Lithium-Ion Batteries, *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 18, 2422809.

6) Xia Ma, Jianli Kang*, Biao Chen, Liying Ma, Junwei Sha, Enzo Liu, Wenbin Hu, Naiqin Zhao*,

Hierarchical porous and lithiophilic CuMn current collector for advanced lithium metal batteries, *Chem. Eng. J.* 2023, 463, 142426.

7) Lin Yan, Lingshuo Zong, Qi Sun, Junpeng Guo, Zhenyang Yu, Zhijun Qiao, Junhui Han Zhenyu Cui*, Jianli Kang*, Phase separation-hydrogen etching-derived Cu-decorated Cu-Mn bimetallic oxides with oxygen vacancies boosting superior sodium-ion storage kinetics, *J. Energy Chem.* 2023, 80, 163-173.

8) Yan Lin, Lingshuo Zong, Zhijia Zhang, JJianxin Li, Hongzhao Wu, Zhenyu Cui*, Jianli Kang*, Oxygen vacancies activated porous MnO/graphene submicron needle arrays for high-capacity lithium-ion batteries, *Carbon*, 2022, 190, 402-411.

D08-42

Temperature-dependent Formation of Nanoporous Intermetallic Compounds in Liquid Metal Dealloying

Ruirui Song*¹

1. Institute for Materials Research, Tohoku University

The liquid metal dealloying strategy has been widely used in fabrication of porous metal/alloy and heterogeneous composite for various applications, such as batteries, catalysts, and hydrogen storage. The high-temperature liquid metal dealloying enables fabricating not only the similar phase from precursor alloy, but also chemically ordered intermetallic compounds[1] by phase transformation concurrent with dealloying. The microstructure and phase transformation are crucial to tailor the further functionality of these materials. Recently, the effect of phase transformation in ligaments were explored in electrochemical dealloying process through engineering remained composition of ligaments[2] or further annealing the obtained ligaments[3] to adjust the final phase components of porous materials. While, both engineering remained composition of ligaments and heat treatment at high temperature can be achieved by one step liquid metal dealloying. Furthermore, different from the annealing of ligament sized in several nanometer to hundreds nanometer, the phase transformation can happen along the reaction front since the beginning of liquid metal dealloying. Here, we investigate the temperature-dependent formation of nanoporous Fe₇Mo₆ intermetallic compounds during liquid metal dealloying, which shows light on precisely tailoring the microstructure for functional design.

References

[1] Song, R., Han, J., Okugawa, M., Belosludov, R., Wada, T., Jiang, J., ... & Kato, H. (2022). *Nature communications*, 13(1), 5157.

[2] Zeng, Y., Gaskey, B., Benn, E., McCue, I., Greenidge, G., Livi, K., ... & Elebacher, J. (2019). *Acta Materialia*, 171, 8-17.

[3] Liu, M., & Weissmüller, J. (2022). *Acta Materialia*, 241, 118419.

D08-43

对比学习在材料研究中的应用与前景

吴越¹, 苏天昊¹, 熊杰¹, 胡顺波¹, 潘登¹

1. 上海大学

近年来, 对比学习在物理系统的机器学习应用中因其强大的跨模态能力和可扩展性而受到广泛关注。这种学习方法通过在不同模态的数据之间建立关联, 在处理复杂凝聚态物理系统问题中具有巨大潜力和优势。结合对比学习的多模态耦合能力, 我们引入 Kolmogorov–Arnold Contrastive Crystal Property Pretraining (KCCP) 框架, 建立了晶体结构与其物理性质之间的稳健关联。结果表明, KCCP 在预测弹性常数矩阵时, 性能显著优于传统的多层感知机 (MLP) 模型。KCCP 在预测体模量 (KV) 和剪切模量 (GV) 时, 其精度和鲁棒性也远超现有的 SOTA 模型。在晶体结构衍射图谱的表象对照方面, 应用对比学习框架及灵活的 Transformers 结构提出了基于物理引导的深度学习方法 Diffraction Pattern Deep-Reconstruction 2D Structures

(DD2D), 该方法也采用双塔框架(CLIP 式), 集成了晶体几何编码器 (CGE) 和位点纹理编码器 (STE)。实验结果表明, DD2D 在识别和预测 2D 材料结构时表现出色, 具有高抗干扰能力、强大的识别能力和高达 99.0% 的预测精度。此外, DD2D 不仅适用于单层 2D 材料, 还可以预测功能异质结构, 如范德华 2D 材料, 显著加速了 2D 材料的探索。通过这两个具体示例, 我们展示了对比学习。KCCP 和 DD2D 模型不仅在预测精度和鲁棒性上表现出色, 还为材料科学中的高通量分析和筛选提供了新的思路 and 工具。

In recent years, contrastive learning has garnered significant attention in machine learning applications for physical systems due to its strong cross-modal capability and scalability. This report investigates the application and potential of contrastive learning in handling complex physical systems through two concrete examples.

In the correspondence between crystal structures and numerical matrices, beyond the basic framework of contrastive learning, we introduce the Kolmogorov–Arnold Network (KAN) for multimodal latent space mapping. Building on this, we propose the Kolmogorov–Arnold Contrastive Crystal Property Pretraining (KCCP) framework, which integrates principles from CLIP and KAN. KCCP establishes robust associations between crystal structures and their physical properties. It also exhibits substantially higher accuracy and robustness than existing state-of-the-art models in predicting bulk (KV) and shear (GV) moduli. In the representation matching of crystal structure diffraction patterns, we propose a physics-informed deep learning method named Diffraction Pattern Deep-Reconstruction 2D Structures (DD2D), based on a contrastive learning framework and flexible Transformers architecture. DD2D adopts a dual-tower (CLIP-style) architecture, integrating a Crystal Geometry Encoder (CGE) and a Site Texture Encoder (STE). Experimental results show that DD2D performs exceptionally well in identifying and predicting 2D material structures, achieving high noise resistance, strong identification capability, and up to 99.0% prediction accuracy. Moreover, DD2D is not only effective for monolayer 2D materials but also capable of predicting functional heterostructures such as van der Waals 2D materials, significantly accelerating 2D material discovery.

Through these two examples, we demonstrate the immense potential and advantages of contrastive learning in handling complex condensed matter physical systems. The KCCP and DD2D models not only excel in prediction accuracy and robustness but also provide novel approaches and tools for high-throughput analysis and screening in materials science.

D08-44

多孔道双位点可逆氧电极构筑及其锌空电池延寿机制研究

王美¹, 杜浩¹, 王孝广^{*2}

1. 中北大学
2. 太原理工大学

可充式锌空气电池正极在充放电过程中发生的氧析出反应 (OER) 和氧还原反应 (ORR) 均涉及动力学缓慢问题, 亟需开发双功能氧电催化剂来降低反应电位差和能垒。基于脱合金策略产生的纳米多孔材料具有超高比表面积, 且富含低配位原子和缺陷, 将其作为氧电催化剂有助于吸附和活化氧气分子/含氧中间体。课题组通过改变初始合金组分和脱合金化参数, 构筑出多种孔径/韧带尺寸可调、缺陷密度可控的多孔过渡金属化合物, 对 OER 和 ORR 表现出优异的电催化活性, 然而其活性的提升是以牺牲界面稳定性为代价。为了平衡两者关系, 进一步在纳米多孔材料中掺入 B 元素, 并利用其缺电子特性和低电负性高效负载贵金属 Pt, 当诱导贵金属和多孔载体之间形成高稳定、低配位 Pt-B 键时, 可兼顾双功能活性和界面稳定性, 进而提升可充式锌空气电池的往返效率和循环使用寿命。相关研究工作将为可逆氧电极的设计、制备与优化提供理论和技术基础, 有望推动二次锌空电池的规模化应用。

D08-45

纳米多孔 Cu₆Sn₅ 型多元金属间化合物的调控及其电还原制氨研究

彭鸣^{*1}, 向子伟¹, 谭勇文¹

1. 湖南大学

电催化硝酸根还原反应提供了一种潜在的绿色制氨途径，发展高性能催化材料是实现高效电还原制氨的一个重要举措。基于该反应多电子-质子耦合反应的机理，催化材料设计的关键在于，精准设计活性位点，协同促进硝酸根的吸附与活化、活性氢的产生和中间体的加氢转化等过程，并抑制副反应，以提高产氨的法拉第效率、反应速率和能量效率等。鉴于此，本课题开展了纳米多孔 Cu_6Sn_5 型多元金属间化合物的调控及其电还原制氨研究。课题通过合金熔炼、选择性腐蚀、原子取代等制备过程，以体相和表面元素取代调控了活性位点的构成及电子结构，发展了熵可调的 Cu_6Sn_5 型金属间化合物以及表面单原子掺杂的多元金属间化合物。研究通过材料电催化性能对比、原位谱学研究和理论计算结果，共同揭示了各元素对该催化反应的协同影响机制； Cu_6Sn_5 基金属间化合物的精准调控实现了催化材料表面水吸附构型的引导，促进了活性氢的产生，从而实现了宽浓度范围、高稳定、高效率的电还原制氨反应。本课题进一步优选了高性能电催化材料，开发了连续氨产物制备工艺和锌-硝酸根电池系统，为硝酸盐污染治理与资源化利用提供了可行方案。

D08-46

Lewis acid sites and flexible active centers synergistically boost efficient electrochemical ammonia synthesisLibo Chen¹, Tonghui Wang¹, Xingyou Lang¹, Qing Jiang*¹

1. Jilin University

Much effort has been made to develop efficient electrochemical catalysts for the nitrogen reduction reaction (NRR). However, the activity and selectivity of present catalysts are still limited in their applications. Herein, from the perspective of Lewis acid–base interactions and flexible active centers, positively charged tetrahedron transition metal (TM) clusters were anchored onto boron nitride nanotubes (BNNTs) with B-vacancies to design a series of efficient NRR catalysts, meeting the above requirements. Through Density Functional Theory (DFT) calculations, our results uncover that the Mn_4/BNNT (6, 6) system exhibits optimal activity characterized by a low limiting potential of only -0.29 V and high selectivity, as confirmed by the adsorption energy difference between nitrogen molecules and hydrogen proton (-0.73 eV). Owing to the existence of electron-deficient Lewis acid sites, the adsorption and activation of N_2 are strongly enhanced. Simultaneously, the flexible active center destabilizes the N-containing intermediates and upgrades the hydrogenation reaction process, facilitating the desorption of NH_3 or its further hydrogenation to NH_4^+ . This innovative approach, employing a Lewis acid pair and a flexible active center to design efficient NRR catalysts, holds great promise for NH_3 synthesis under ambient conditions.

D08-47

Fast synthesis of hierarchical porous high entropy spinel oxide with rich grain boundaries for efficient oxygen evolution reactionTingting Wang¹, Shaofei Zhang*¹

1. Hebei University of Science and Technology

Defect engineering in high-entropy oxides (HEOs) offers a promising strategy for precisely modulating the surface adsorption energetics of reaction intermediates, thereby enhancing catalytic performance for the oxygen evolution reaction (OER). However, achieving uniform and abundant defect distributions remains challenging due to the limitations of conventional high-temperature synthesis methods. Herein, we present a novel grain boundary (GB) engineering strategy for the one-step synthesis of hierarchical porous $(\text{CoFeCuMn})_3\text{O}_4$ on Ni mesh (denoted as GB- $(\text{CoFeCuMn})_3\text{O}_4$) featuring high-density GBs via a rapid solution combustion approach. The abundant GBs inherent from fast cooling rate of this synthesis method creates unsaturated coordination sites, which can serve as

highly effective adsorption centers for oxygen intermediates during the OER. Besides, we systematically investigated the composition-performance relationship, revealing that the synergistic co-existence of Co and Fe species significantly enhances OER activity by tailoring the electronic structure via d-band center adjustment, as comprehensively verified by combined electrochemical analysis and density functional theory (DFT) calculations. Benefiting from its hierarchical porous structure, synergistic multi-component effects, and high-density GBs, the GB-(CoFeCuMn)₃O₄ catalyst achieves a low overpotential of 222 mV at 10 mA cm⁻², a small Tafel slope (64 mV dec⁻¹), and good stability over 100 h in 1 M KOH. The assembled GB-(CoFeCuMn)₃O₄ | Pt/C electrolyzer operates a low cell voltage of 1.29 V at 10 mA cm⁻². This work introduces a straightforward and facile synthesis strategy for generating advanced HEOs and will inspire the practical applications in many energy storage/conversion fields.

D08-48

一体化高熵合金电极的析氢稳定性提升策略

师荣荣¹, 康建立*¹

1. 天津大学

开发具备恶劣工况适应性的高活性长效稳定电极, 是推进工业级碱性电解技术产业化的核心挑战。纳米结构的高熵合金 (high-entropy alloys, nHEAs) 因兼具成本可控性与活性提升的显著优势, 已成为析氢反应 (Hydrogen Evolution Reaction, HER) 催化剂领域的研究热点。然而, 其稳定性调控仍缺乏系统性解决方案。本研究基于纳米多孔高熵合金 (np-HEAs) 的本征结构与成分优势, 提出了一种新型稳定性增强策略。该策略通过构建元素浸出准则, 实现了对合金元素浸出行为的精准调控, 达成了 HER 催化性能的突破性提升——在 1 A cm⁻² 电流密度下稳定运行超 10,000 小时。尤为重要的是, 该技术在直径 110 mm 的商用碱性水电解槽 (Alkaline Water Electrolysis, AWE) 中完成工程验证。本研究建立的涵盖成分筛选与结构设计的系统性设计框架, 为面向规模化应用的电解水制氢电极开发提供了全新技术路径。

D08-49

σ相高熵金属间化合物 MnFeCoNiCuV 助力实现高稳定性碱性析氢反应

田家壹*¹

1. 天津大学

开发高稳定性、低成本的高性能碱性析氢反应电催化剂对于推进可持续制氢至关重要。无序高熵合金作为优秀的电催化剂引起了人们的广泛研究, 但其在稳定性层面的表现却差强人意。相比之下, 有序高熵金属间化合物具有结构稳定性和热稳定性的优势, 同时实现多功能性, 作为析氢反应电催化剂有着巨大潜力。本工作合成了双相 MnFeCoNiCuV 高熵合金, 并选择性去除 FCC 相, 留下更为稳定的 σ相高熵金属间化合物作为析氢反应电催化剂。该电催化剂在 500 mA/cm² 的大电流密度下过电位仅为 266 mV, 并且有着较低的塔菲尔斜率 (46.93 mV/dec), 表现出优异的催化活性。受益于 σ相高熵金属间化合物结构的稳定性, 电催化剂在 500 mA/cm² 的电流密度下稳定运行超过 1800 h。利用金属间化合物结构和热稳定性成功获得了高稳定性和催化活性的析氢反应电催化剂, 为未来设计高效、稳定高熵电催化剂提供了新的思路。

D08-50

基于 TiO₂ 多孔纳米球的锂硫电池正极材料制备及其电化学性能研究

张新宇*¹

1. 天津大学

锂硫 (Li-S) 电池因其理论比容量高 (1675 mAh g⁻¹) 和环境友好等优势受到普遍关注, 然而锂硫电池还需要解决硫损失严重、多硫化物的溶解和穿梭效应严重等问题。其中正极材料作为系统容量发挥的关键

部件, 对正极进行改性, 设计高效催化载体成为解决上述挑战的最有效策略。在所有催化剂中, 单原子催化剂 (SAC) 因其高活性和较高的催化位点利用率而被认为是锂硫电池商业化的理想催化剂材料。

鉴于此, 本文从正极材料结构设计角度出发, 利用硬模板法、高温热处理法以及喷雾干燥技术制备了负载单原子铁 (Fe) 的二氧化钛/高导电碳复合材料, 对其在多硫化物的吸附和催化转化中所起的作用进行了研究, 为设计高效的锂硫电池正极材料提供了有益的设计思路和技术方法。

(1) 通过硬模板法和热处理法制备了负载单原子 Fe 的异质相二氧化钛空心纳米球结构 Fe-SAC/TiO₂-AR HNP。通过理论计算表明单原子 Fe 的引入能够有效提升对多硫化物的捕获, 可促进还原氧化动力学; 通过扫描透射电子显微镜和同步辐射的表征表明, 所制备的 Fe-SAC/TiO₂-AR HNP 中 Fe 大部分以单原子形式存在; 将单原子 Fe 负载于锐钛矿/金红石两相共存的异质相结构 TiO₂ 时, 丰富的氧空位使单原子 Fe 可充分发挥对多硫化物的吸附/催化作用, 从而抑制多硫化物的穿梭效应、加快多硫化物的转化速率。基于异质相空心结构 TiO₂ 和单原子 Fe 的协同催化效应, 该硫复合正极在 0.2 C 时首次放电比容量可达 1253.30 mAh g⁻¹, 具有 74.8% 的硫利用率; 在 1 C 电流密度下, 首次和第 500 次的放电比容量分别为 878.09 mAh g⁻¹ 和 619.71 mAh g⁻¹, 具有 0.058%/周期的低容量衰减率。

(2) 为了保持原有结构的协同效应优势并改善其导电性, 通过喷雾干燥技术和热还原法合成了均匀包覆石墨烯层的 Fe-SAC/TiO₂-AR@rGO (FTO-AR@rGO) 复合材料。结果表明, 当 GO 与 Fe-SAC/TiO₂-AR HNP 质量比为 1:1 时, 制备的硫复合材料电化学性能最佳; 在 1 C 的高电流密度下稳定循环 500 次后仍保持 694 mAh g⁻¹ 的可逆比容量, 容量衰减率为 0.029%/周期; 在 5 C 的电流密度下, 放电比容量依旧可保持 626.81 mAh g⁻¹。其优异的电化学性能主要基于具有多级储硫空间结构 FTO-AR@rGO 材料的多位点协同催化作用。

D08-51

Dual-Gradient Lithium Metal Anode Current Collectors for Lithium Metal Batteries

Chenglin Gao¹, Jianli Kang¹, Naiqin Zhao*¹

1. Tianjin University

The utilization of 3D porous current collectors represents a promising approach for commercializing lithium metal batteries (LMBs), as they effectively disperse current density, suppress lithium dendrite formation, and accommodate volume expansion through spatial management of lithium deposition. However, the practical implementation of these collectors is hindered by the 'top effect', which prevents efficient utilization of their internal porous structure, leading to non-uniform lithium deposition, low effective loading, and consequently, compromised energy density and cycling performance. In this study, we present an innovative dual-gradient lightweight 3D porous current collector designed with both lithiophilic and structural gradients. This novel architecture, engineered from both thermodynamic and kinetic perspectives, facilitates a bottom-up lithium deposition process while maximizing internal space utilization. The collector's enhanced lithiophilic properties promote uniform and dense lithium deposition, while the formation of Li_xZn alloys during lithiation significantly improves lithium ion migration and diffusion kinetics. The anode demonstrates exceptional cycling stability and rate capability, maintaining stable performance for 300 cycles at a high current density of 6 mA cm⁻² with an areal capacity of 1 mAh cm⁻². When integrated into pouch full-cells with a low N/P ratio of approximately 1.4, the system exhibits remarkable cycling stability, enduring over 140 charge-discharge cycles at 0.1C. With its cost-effectiveness, straightforward fabrication process, and ease of recycling, the current collector material presents substantial potential for commercial applications in advanced lithium metal battery systems.

D08-52

双模式纳米多孔银/银钴双金属在宽硝酸盐浓度范围下高效串联催化硝酸盐还原为氨

冯梓轩¹, 王智力*¹, 蒋青¹

1. 吉林大学

地表水和地下水中硝酸盐 (NO_3^-) 浓度的增加对人类健康和生态系统构成了巨大威胁。电催化 NO_3^- 还原反应 ($\text{NO}_3^- \text{RR}$) 是污水处理和氨 (NH_3) 合成领域的一种有前景的策略。然而, 由于 $\text{NO}_3^- \text{RR}$ 涉及到依赖催化剂不同特性的多个反应步骤, 因此很难在单组分催化剂上实现高效的 $\text{NO}_3^- \text{RR}$ 。这里, 我们报告了一种简单的合金化/去合金驱动的相分离策略, 用于构建双模式纳米多孔银/银钴双金属串联催化剂, 该催化剂在 5~500 mM 的宽 NO_3^- 浓度范围内表现出优异的 $\text{NO}_3^- \text{RR}$ 性能。在 10 mM 和 50 mM 电解液中, NH_3 产率分别达到 3.4 和 25.1 $\text{mg h}^{-1} \text{mg}_{\text{cat}}^{-1}$, 对应的法拉第效率分别为 94.0 和 97.1%, 优于相同浓度 NO_3^- 下大多数已报道的催化剂。实验结果和密度泛函理论计算结果均表明银韧带优先将 NO_3^- 还原为 NO_2^- , 同时银钴双金属韧带催化 NO_2^- 还原为 NH_3 。这独特的串联催化剂体系实现了优异的 $\text{NO}_3^- \text{RR}$ 性能。

D08-53

硼, 钴共掺杂铜诱导的 p-d 轨道杂化和晶格应变促进硝酸盐还原成氨的电催化过程

魏千凌¹, 王智力*¹

1. 吉林大学

电催化硝酸盐还原反应 ($\text{NO}_3^- \text{RR}$) 为可持续的氨 (NH_3) 合成和废水处理提供了一种有广阔前景的策略。然而, 由于缺乏有效的电催化剂, $\text{NO}_3^- \text{RR}$ 性能仍然很低。在此, 我们报道了硼, 钴共掺杂铜 (B,Co-Cu/C) 诱导的 p-d 轨道杂化和拉伸应变催化剂可促进 $\text{NO}_3^- \text{RR}$ 生成 NH_3 。在含有 50 mM NO_3^- 的 0.1 M KOH 溶液中, 优化后的 B,Co-Cu/C 在 -0.2 V vs. RHE 电位下表现出高达 182.5 $\text{mg h}^{-1} \text{mg}_{\text{cat}}^{-1}$ 的 NH_3 产率和 98.4% 的法拉第效率, 优于 Cu/C 催化剂 (16.6 $\text{mg h}^{-1} \text{mg}_{\text{cat}}^{-1}$ 和 23.3%), 以及在相同 NO_3^- 浓度下大多数已报道的电催化剂。实验和理论研究表明, B,Co-Cu/C 的优异性能源于 p-d 轨道杂化和拉伸应变, 它们增强了 NO_3^- 的吸附和活化, 加强了 * NO_2 的结合强度以防止其解吸, 并促进 H_2O 解离以实现主动供氢。这项工作为设计用于 $\text{NO}_3^- \text{RR}$ 的铜基电催化剂提供了一条新途径。

D08-54

自支撑纳米多孔 FeCoNiMnAl 电催化剂制备及其析氧性能研究

王盛¹, 康建立*¹

1. 天津大学

尽管高熵合金材料因具有可调控电子结构和晶格结构的独特灵活性, 其在电解水领域中已经表现出优秀的性能。但是面向恶劣工业条件(高温强碱大电流密度)的低成本, 高稳定性的析氧反应(OER)电催化剂制备仍然存在挑战。本研究通过掺入 Al 元素, 在电化学脱合金过程中设计发生 Mn 和 Al 的同步析出, 形成了具有独特纳米多孔结构的 FeCoNiMnAl 自支撑电催化剂, 其鲜明的多孔结构不仅暴露了更多的活性面积提升 OER 性能, 而且从中析出的 Al 富集在电极表面形成保护层使其在耐久性测试中展现了出色的稳定性。作为非贵金属 FeCoNiMnAl 催化剂, 该催化剂在 KOH(25°C⁻¹mol/L)中表现出 325 mV 的低过电位 (500mA/cm²), 以及 10000CV 循环后 356 mV 的低过电位 (500 mA/cm²)。而且, 在模拟工业环境 (KOH-85°C-6mol/L)全解水测试中该催化剂在高达 1000 mA/cm² 下表现出 1700 h 的长期稳定性。本工作为发现和设计面向工业环境下的低成本高稳定性的高熵合金 OER 电催化剂提供了新的见解和策略。

D08-55

双相高熵合金中抗腐蚀 BCC 基体协同 FCC 牺牲相浸出构筑自持续 MoO_4^{2-} 屏障实现海水电解

张俊¹, 康建立*¹

1. 天津大学

利用可再生电力直接电解海水制氢是应对能源与气候挑战的潜力方案, 但 Cl^- 引发的阳极析氧反应 (OER) 催化剂氯腐蚀、析氯竞争及结构失稳严重阻碍工业化进程。本文提出"结构稳固基体相-动态牺牲相"协同双相高熵合金 (HEA) 新范式: 以 BCC 基体相作为惰性态骨架抵御 Cl^- 腐蚀并保障机械完整性, 同时通过含 Mo 的 FCC 牺牲相实现三重动态功能-(i)可控浸出活性元素维持催化界面重构; (ii)浸出 Mo 氧

化为 MoO_4^{2-} 原位形成自更新阴离子屏障持续静电排斥 Cl^- ; (iii) 高熵效应稳定 FCC 结构维持溶解-补偿动态平衡。所开发非贵金属 HEA 在 OER 中展现出优异的长期稳定性: 在 6 M KOH + 1.5 M NaCl 溶液中 1 A cm^{-2} 下稳定运行 >6,000 小时, 在 1 M KOH + 天然海水中 0.1 A cm^{-2} 下稳定运行 >600 小时, 性能显著优于商业镍网, 为抗腐蚀海水电解提供工业级解决方案。

D08-56

CoCrFeNiAl 分级纳米多孔高熵合金用于过氧化氢传感器的研究

冯璇璇¹, 李梦雪¹, 陈峰¹, 池昱晨¹, 李星宇¹, 秦凤香*¹

1. 南京理工大学

高精度、快速响应时间的 H_2O_2 传感器在化学、生物、临床医学、食品、环境等诸多领域应用广泛。非酶电化学传感技术以其设备简单、检测速度快、成本效益高、灵敏度高显著优势在众多 H_2O_2 传感技术中脱颖而出。然而, 在 H_2O_2 的检测过程中, 反应电极的动力学缓慢的问题, 严重影响了传感性能。高熵合金(HEAs) 由于具有高熵效应、迟滞扩散效应、晶格畸变和“鸡尾酒”效应, 在催化领域显示出较高的催化活性和显著的耐久性。近些年, 由于多孔高熵合金具有比表面积大, 并且可为催化反应提供更多反应位点等优点, 在催化领域引起了广泛关注。

本文以双相 $\text{CoCrFeNiAl}_{1.5}$ HEA 为前驱体, 通过相脱合金法, 得到了由分级多孔及富 Fe-Cr(Co) 的 BCC 相晶界构成的纳米多孔高熵合金。自支撑的分级多孔电极作为非酶 H_2O_2 传感器, 展现出 $510.4 \mu\text{A mM}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 的高灵敏度和 $4 \mu\text{M}$ 的低检出限($\text{S/N} \geq 3$), 49.95 mM 的宽线性检测范围, 以及出色的抗干扰能力。同时, 电极具有良好的长期稳定性和重现性。其独特的分级纳米多孔结构及清晰可见的 Fe-Cr 相晶界, 使电极材料的比表面积最大化, 并为反应剂分子的传输提供了通道。由氧化物构成的精细孔结构提供大量催化反应的活性位点, 同时 Fe-Cr(Co) 晶界促进了 H_2O_2 分子的扩散, 有助于反应分子/电子转移到由氧化物组成的小孔的活性位点, 加速 H_2O_2 还原反应的进行。这项作为纳米多孔高熵合金在电催化领域的应用与拓展提供了一条参考途径。

D08-57

非化学计量高熵金属间化合物结构中的动态成分自适应性可实现持久的高电流密度氧气析出

张雅楠¹, 李睿*¹

1. 西北工业大学

近年来, 可再生能源成本下降使得电解水制氢成为实现碳中和目标的关键技术, 但阳极析氧反应(OER) 的缓慢动力学仍是制约效率和应用的主要瓶颈, 尤其在工况高电流密度条件下, 同时实现 OER 催化剂的高活性和高稳定性仍极具挑战。本研究设计了一种具有多过渡金属活性位点的分级多孔高熵金属间化合物(HEI) 催化剂, 有效地克服了活性与稳定性之间的矛盾。该 HEI 催化剂在 1 A cm^{-2} 时表现出 359 mV 的超低过电位, 并且在波动电流密度 (0.5 至 2 A cm^{-2}) 下保持超过 2000 小时的稳定稳定性, 活性衰减可忽略不计。理论计算表明, 多组元协同电子效应降低了电催化反应能垒。更重要的是, 通过利用非化学计量 B2 NiAl 型金属间化合物构型的成分弹性, B2 结构中动态自适应的 Al 牺牲行为抑制了多活性位点的快速溶解和晶格氧的参与, 从而提高了长期 OER 过程中的耐久性。此外, 基于 B2-HEI 催化剂电极组装的阴离子交换膜水电解器在 1.72 V 电池电压下可实现 1 A cm^{-2} 的电流密度, 并能在 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 下稳定运行至少 300 小时。这项作为利用非化学计量金属间化合物体系固有的成分自适应性来设计高效、稳定的工业电催化剂提供了新思路。

D08-58

CrMo 协同调控纳米多孔高熵合金用于高稳定性碱性电化学析氧反应的研究

陈露沂*¹

1. 天津大学

高熵析氧反应电催化剂具备活性与稳定性的兼容性,这使其在碱性环境电解水中得到广泛的关注。但通过高价金属提高析氧反应活性的同时,金属阳离子溶解析出导致了稳定性下降。此研究中,设计了以CrMoFeCoNi五种元素为主的纳米多孔FeCoNiCrMoOOH作为超长稳定碱性OER的非贵金属电催化剂。纳米多孔MnFeCoNiCrMoOOH展示出更高的活性和稳定性。在10mA/cm²和100mA/cm²的电流密度下的过电位为245mV和304mV,该催化剂在500mA cm⁻²下连续反应720h后仍保持良好的稳定性。这种增强主要归因于Cr和Mo对于表面原子重构过程的协同调控。这项工作将有助于开发高耐久性高熵析氧反应电催化剂。

D08-59

离子型磁性介孔纳米材料的研制及其对化学毒剂标志物的富集与分析

李晓森¹, 李珂萱¹, 袁铃¹, 杨旻*¹

1. 中国人民解放军军事科学院防化研究院

对于环境和生物样本中化学毒剂的分析 and 检测而言,简单高效的样本前处理手段至关重要。尽管目前包括商售固相萃取柱(SPE柱)等许多商业材料或试剂已经广泛应用,但专门针对化学毒剂及其标志物样本制备过程而设计的纯化或富集材料却很少。在本研究中,研究人员成功合成了对醇胺(EAs, 氮芥毒剂的环境标志物)及氰化物具有高吸附性的离子磁性介孔纳米材料,即poly(4-VB)@M-MSNs(4-乙烯基苯磺酸修饰)和Co²⁺@M-MSNs(钴离子修饰)。通过-SO₃H和Co²⁺对基于共沉淀法及CTAB脱模板制备的磁性介孔粒子进行修饰,从而制备得到离子型磁性介孔材料。对功能化纳米材料进行了表征以确定其成分和结构。结果表明,poly(4-VB)@M-MSNs及Co²⁺@M-MSNs具有明确的核壳结构,比表面积为341.7 m²/g,饱和磁化强度为60.66 emu/g,同时材料具有良好的热稳定性。此外,poly(4-VB)@M-MSNs及Co²⁺@M-MSNs对EAs和氰离子的吸附效率较高,吸附过程在90秒内迅速达到吸附平衡,饱和吸附量分别为MDEA=35.83 mg/g、EDEA=35.00 mg/g、TEA=17.90 mg/g和CN-=31.48 mg/g。同时,经过三次吸附-解吸循环后,吸附容量仍能保持在50%-70%。吸附等温线分别符合Langmuir方程和Freundlich方程,进一步通过DFT计算确定吸附机理。金属离子负载的磁性介孔材料被成功应用于真实化武染毒样品的前处理过程,表明其在化武核查和有毒化学品溯源方面具有巨大潜力。

D08-60

电沉积金属的纳米发泡及力学性能研究

黄明薇¹, 刘凌志*¹, 金海军¹

1. 中国科学院金属研究所

多孔金属材料具有低密度、高比表面积的特征,在航空航天、交通运输、生物医学等领域应用广泛。然而,传统多孔金属材料普遍存在强度低、塑韧性差等问题,一定程度上制约了其应用。最新研究表明,细化至纳米尺度的闭合孔隙可显著提升金属的强度而不损失其塑性。但目前的制备技术仍存在较多困难,如可用金属体系少、材料尺寸小等问题,难以实现大规模可控制备。电沉积是广泛用于制备高性能金属材料 and 表面处理的技术手段。在本工作中,我们通过电沉积制备了纯镍的薄层,并发现其经过一定热处理,可以自发发泡形成大量弥散分布的闭合纳米孔洞,而无需常规发泡剂辅助。该纳米孔洞的平均尺寸分布在50nm~110nm,孔隙率为5%~13%。TEM分析表明电沉积态纳米晶Ni的晶界上,分布有2~5nm尺寸的析出相。APT结果表明这些析出相可能为氧化物。其具体组成仍待进一步研究。而热处理引发的发泡现象可能与该物质的分解有关。进一步纳米压痕测试结果表明,虽纳米孔洞结构Ni的硬度较电沉积态的密实Ni降低,但随纳米孔洞孔隙率的增加,纳米孔洞Ni的硬度呈现升高趋势。这一结果暗示纳米孔洞结构确实可提升金属材料强度。

D08-61

选择性腐蚀驱动钙钛矿La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Ru_yO₃表面微结构演变与电催化性能研究

张欣欣¹, 李梦杰¹, 杨佳鹏¹, 张弛*¹

1. 五邑大学

钙钛矿氧化物 (ABO_3) 因其成分和结构的可调性, 在氧气分离、固体氧化物燃料电池、电催化水分解等领域受到关注。然而成分的高度可调性也造成其在工况下易于发生表面重构, 研究发现表面重构与 A/B 位元素的选择性腐蚀相关, 这种多元金属氧化物中的元素选择性腐蚀与合金中的选择性腐蚀(脱合金)有相通之处。本研究将制备多孔金属的选择性腐蚀策略用于钙钛矿氧化物, 拟利用 A/B 位元素的热力学稳定性差异, 在酸性溶液中选择性溶解 A 位元素, 促使 B 位元素再组装形成表面微结构。具体来说, 以 $La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Ru_yO_{3-\delta}$ 为研究对象, 通过 A 位选择性腐蚀, 促使表面微结构的形成与性能变化。结果表明, $La_{0.8}Sr_{0.2}Co_{0.95}Ru_{0.05}O_{3-\delta}$ 在稀硝酸中发生了 A 位 La 和 Sr 的选择性溶解, 同时在钙钛矿表面生成了 Co_3O_4 纳米颗粒, OER 测试发现腐蚀后样品的性能增强; 而高 Sr 含量的 $La_{0.2}Sr_{0.8}Co_{0.9}Ru_{0.1}O_{3-\delta}$ 样品除了选择性元素腐蚀现象以外, 还发生了选择性相腐蚀, 高活性相的腐蚀造成催化剂整体性能下降。本研究结果初步为通过钙钛矿氧化物的选择性腐蚀制备复合结构催化剂提供了一定的佐证, 但 A 位元素选择性溶出与 B 位元素扩散重组的耦合动力学机制有待深入探讨, 发生在混合相体系中的选择性相腐蚀也需要进一步研究。

D08-62

通过金钢金属间化合物脱合金制备蜂窝纳米管阵列

刘兴源^{1,2}, 金海军*¹

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学

脱合金制备的纳米多孔金属往往具有随机网络状骨架。溶解-表面扩散模型认为, 这种结构特点是贵金属原子表面扩散的必然结果。本组之前报道了 $AuAl_2$ 这种金属间化合物在磷酸中脱合金会形成具有极高面外强度的定向孔纳米多孔金, 这超出了传统脱合金模型的认识。然而, 该脱合金体系制备的直孔结构仍有裂纹多、孔壁穿孔多、孔道分叉多等问题。为了解决这些问题, 以及理解这一现象, 我们使用 $AuIn_2$ 作为前驱体, 制备了定向程度极高、分叉和管壁穿孔极少的蜂窝纳米管阵列, 其管轴取向与母合金 $\langle 111 \rangle$ 晶向平行, 脱合金前沿存在与母合金呈一定取向关系的脱合金中间相, 这些特点有助于我们理解脱合金中定向形貌的形成原因。

D08-63

纳米孔及纳米软相颗粒的强韧化机制研究

史爱雪¹, 关怀¹, 金海军*¹

1. 中国科学院金属研究所

当尺寸细化至百纳米以下并弥散分布于材料中时, 孔洞将从有害材料缺陷转变为有益的“强化相”。因为弥散分布纳米孔有助于减轻孔洞周围应力和应变集中, 抑制裂纹的萌生。该材料巨大比表面积也促进表面-位错交互作用, 进而提高强度的同时也提高应变硬化率, 后者有助于提高塑性变形能力。然而, 现有制备技术仍存在局限, 难以对孔洞尺寸与含量实现精准定量调控。此外, 弥散纳米孔相较于传统第二相颗粒的强韧化机制差异尚缺乏系统深入研究。

本研究创新性地采用轻质可热解的聚苯乙烯颗粒与铜进行复合电镀, 成功制备了聚苯乙烯颗粒/铜复合镀层。随后通过高温热处理使聚苯乙烯分解, 获得了含有弥散分布纳米孔的铜基镀层。研究发现, 将含粒径为 23 nm 聚苯乙烯颗粒的复合镀层进行热处理后, 形成的弥散纳米孔结构使材料抗拉强度由 215 MPa 显著提升至 438 MPa (提高了 103%), 同时不损失其塑性变形能力。

此项研究提供了理想的模型材料, 在相同体系中直接对比了纳米孔与位错软相颗粒的强化效果和变形机制, 为理解不同类型缺陷的强化行为提供了重要依据。

D08-64**A Descriptor Based on Orbital-Wise Coordination Number for High-Throughput Screening of Intermetallics in CO₂ Reduction Reaction**Yixin Nie¹, Cong Xi¹, Jiuhui Han*¹

1. Tianjin University of Technology

Electrochemical CO₂ reduction reaction (eCO₂RR) is a crucial approach for mitigating greenhouse gas emissions and enabling renewable energy storage. Intermetallic compounds are promising catalysts for eCO₂RR due to their well-ordered atomic structure and tunable electronic properties. However, a significant challenge remains in identifying descriptors that differentiate the adsorption characteristics of various sites within alloys, hindering efficient and rational catalyst design. In this study, we employ machine learning techniques to extract key factors influencing adsorption properties and introduce a high-throughput screening strategy for eCO₂RR catalysts based on orbital-wise coordination number. This method accounts for both the electronic structure and local coordination environment of active sites, enabling precise characterization of adsorption strength across different crystal planes and alloy compositions. The resulting volcano plot of eCO₂RR performance aligns with experimental data, confirming that the proposed descriptor effectively links intrinsic material structure to catalytic performance. This approach facilitates rapid screening and informed catalyst design, offering valuable insights for advancing eCO₂RR technology.

D08-65**弥散孔洞铜的拉伸性能**黄海庞¹, 金海军*¹

1. 中国科学院金属研究所

泡沫金属的多孔结构使其具有低密度、高比表面积、吸声、吸能、减振等优异特性，在汽车、电池、过滤器等领域获得广泛应用。然而，其强度、塑性及疲劳等力学性能却因孔洞结构而显著受限。近期研究表明，向金属中引入弥散分布的纳米级孔洞能够有效的提升其强度与塑性，揭示了纳米孔的巨大潜力。然而，这种强韧化效应适用的孔径范围仍有待验证。为此，本研究计划采用脱合金、压缩/轧制与烧结致密化相结合的工艺，制备具有不同孔径和孔隙率等参量的弥散孔洞结构铜，并将系统研究其通孔-闭孔转变行为及其拉伸力学性能。初步实验结果表明，上述工艺可以制备 3-10 微米孔径为主的弥散孔洞铜。当孔隙率降至 15% 以下时，轧制后多孔铜中的长通孔更倾向于细化为多个闭孔；孔隙率为~5% 时，多孔铜的屈服强度达 72.7 MPa，延伸率为 36.4%。未来将进一步通过工艺参数调整，研究孔径以及孔隙率等结构参量对多孔铜的拉伸力学性能，特别是其强度与塑性的影响。

D08-66**纳米多孔金属等离激元耦合面外声子增强 Davydov 分裂效应研究**董永乐¹, 张玲¹

1. 上海理工大学光电信息与计算机科学学院

纳米多孔金属（如纳米多孔金，NPG）的三维连通孔道结构和丰富原子级边缘能够产生显著的局域电磁场增强¹，并与二维材料形成独特的耦合界面，为研究新型量子效应提供了理想平台。然而，目前关于 NPG 等离激元与一些二维材料声子模式的耦合机制研究仍然欠缺。本研究通过构建 NPG 与 WS₂/MoS₂ 的复合结构，研究了纳米多孔金等离激元对少层到多层过渡金属二硫化物声子模式的调控机制²。通过利用 1.58 eV 非激子共振激发，观测到了等离激元诱导的 A_{1g} 声子 Davydov 分裂和红外活性 A_{2u} 模式的异常激活。研究表明，NPG 的等离激元与 WS₂/MoS₂ 面外声子形成有效耦合，不仅导致面外声子 Davydov 分裂效应，还突破了传统选择定则限制。这些发现为开发新型等离激元-声子器件和设计拉曼增强基底提供了新

思路，展现了多孔金属在光电器件应用中的独特价值。

参考文献：

1. Fujita, Takeshi, Pengfei Guan, Keith McKenna, Xingyou Lang, Akihiko Hirata, Ling Zhang, Tomoharu Tokunaga, Shigeo Arai, Yuta Yamamoto, Nobuo Tanaka, Yoshifumi Ishikawa, Naoki Asao, Yoshinori Yamamoto, Jonah Erlebacher, Mingwei Chen. "Atomic origins of the high catalytic activity of nanoporous gold." *Nature materials*, 2012, 11, 775-780.

2. Yongle Dong, Zhexiao Li, Zixuan Yan, Yan Liu, Luyi Huang, Meng Xia, Xingwang Zhang, and Ling Zhang. "Edge-Oriented Surface Plasmons and Out-of-Plane Phonon-Coupling-Manipulated Davydov Splitting in WS₂ Flakes with Nonexciton Resonance Excitation under Ambient Conditions." *Nano Letters*, 2025, 25, 9077-9083.