

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

A12-先进分离膜与多孔材料
A12-Advanced Separation Membranes
and Porous Materials

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



A12. 先进分离膜与多孔材料

分会主席：邢卫红、万印华、邢华斌、伊守亮、王崇臣

A12-01**渗透汽化膜富集技术与应用**

邢卫红

江苏大学

A12-02**MOF 分子阱吸附剂创制及减污降碳应用基础**

李建荣

北京工业大学

A12-03**高纯化学品的分子识别机理与应用**

邢华斌

浙江大学

A12-04**生物炭材料减污降碳研究进展**

江霞

四川大学

A12-05**二维限域材料中的选择性强化传质**

周凯歌

天津大学

离子在限域空间中的选择性传质是表界面物理化学领域的关键科学问题之一，其在盐湖提锂、海水淡化、能源转换器件等新兴技术中具有重要应用价值。然而，限域通道内复杂的几何构型、动态配位作用及流体状态的耦合效应对离子输运选择性与渗透性的调控机制尚不清晰，制约了高性能离子传输膜的设计与应用。为此，本工作基于二维限域材料构建了具有精准调控能力的亚纳米通道体系，系统揭示了通道几何特性与表界面物理化学性质的协同作用规律。聚焦于二维限域通道中几何构型、表界面配位环境及氢键网络动态行为对离子传输选择性的调控机制。建立了“水合-配位”交换势阱模型，利用杂多酸修饰的二维蛭石限域通道，开发了 Li^+/K^+ 分离因子达 16 的锂离子分离膜，为高效盐湖提锂技术提供了技术方案。同时以 BiOI 二维材料为构筑单元，运用二维限域策略，将短氢键含量提升 12 倍，在受限通道中形成了具有 Grotthuss 传递模式的超快阴离子通道。利用 SHB 网络构成的“离子高速公路”，其离子电导率可提升至 168 mS cm^{-1} (90°C)，并在膜式碱性电解槽中展现出高效耐用的电解制氢性能，为快速阴离子传输设计提供了新范式，有望推动下一代氢能装备的研发进程。

A12-06**高温质子交换膜燃料电池与碱性电解水制氢的关键材料设计与研究**

沈江南
浙江工业大学

A12-07**从天然矿物到高效吸附剂：海泡石改性技术突破与多场景污染物吸附性能优化**

胡夏一
湘潭大学

A12-08**聚亚胺微孔膜的原位制备及其单多价离子分离应用**

朱军勇
郑州大学

A12-09**石墨相氮化碳调控反渗透膜结构与分离性能的实验与模拟研究**

葛梦妮
河海大学

反渗透膜作为实现海水淡化、苦咸水淡化及废水资源化等水处理过程的关键功能材料，正面临渗透-分离性能瓶颈及膜污染、氯降解等稳定性问题。纳米材料改性被认为是提升反渗透膜综合性能的有效策略，但其在膜结构调控和传质机制中的作用尚未被充分理解。为此，本研究以石墨相氮化碳（ $g-C_3N_4$ ）为功能纳米材料，系统开展了基于实验与分子动力学模拟的联合研究，探究 $g-C_3N_4$ 对反渗透膜结构演化与分离性能提升的作用机制。通过构建 $g-C_3N_4$ 参与的界面聚合反应模型，结合不同结构（二维片层、一维/二维杂化、 $g-C_3N_4$ /聚吡咯复合）改性策略，制备了一系列 $g-C_3N_4$ 改性聚酰胺反渗透膜。结果表明， $g-C_3N_4$ 的引入可有效调控单体扩散速率，延缓聚合反应，生成更薄且孔径分布优化的选择性层，从而提高水分子通量并抑制盐离子渗透。二维 $g-C_3N_4$ 增强了膜的亲水性、热稳定性和抗污染能力；一维/二维 $g-C_3N_4$ 协同结构显著提升了膜的水通量与耐污染性能； $g-C_3N_4$ /聚吡咯复合材料则赋予膜更优异的负电性和抗氯氧化能力。优化膜水渗透系数可达 $4.00 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ，截盐率超过 99%，表现出优异的综合性能与结构稳定性。本研究揭示了 $g-C_3N_4$ 在调控膜结构与分离机制中的作用机理，为高性能反渗透膜的设计提供了理论依据与技术路径。

A12-10**多层稠环芳烃多孔有机膜的制备及其在 N_2/SF_6 气体分离中的应用**

何萌
西安石油大学

六氟化硫（ SF_6 ）作为电力工业中不可或缺的高效绝缘气体，其回收利用对实现资源循环和可持续发展具有重要意义。然而，传统的低温精馏等回收 SF_6 方法能耗高，急需替代分离技术。报告人采用 LB 方

法制备了一种基于稠环芳烃的多层膜，用于高效 N_2/SF_6 分离。研究通过精确调控表面压力和沉积层数，优化膜内分子堆叠取向与孔径分布，实现了膜结构的可控制备。实验结果表明：优化后的 4 层多孔膜在 25 mN/m 条件下展现出优异的分选性能， N_2/SF_6 选择性达到 155， N_2 渗透通量高达 138 GPU，具有出色的稳定性。该研究为可控多层膜设计提供了新策略，其高选择性与稳定性展现出在 SF_6 回收领域的工业化潜力。

A12-11

Design and fabrication of nanofiltration membranes for high salinity wastewater treatment

Shichao Feng ^a, Fangfang Li ^a, Zixu Wang ^a, Yinhua Wan ^{a,b*}

^a State Key Laboratory of Biopharmaceutical Preparation and Delivery, Institute of Process Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

^b Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341119, China

* Corresponding author: yhwan@ipe.ac.cn

With the rapid development of industrialization, the efficient treatment and resource recovery of high-salinity wastewater has become an urgent issue in environmental management. Nanofiltration-based salt separation technology has attracted increasing attention due to its low energy consumption and high selectivity. However, current commercial nanofiltration membranes still suffer from a trade-off between permeability and selectivity, and their performance is often compromised by membrane fouling during practical applications. In this work, three kinds of nanofiltration membranes were prepared by regulation of the interfacial polymerization process or post-treatment of commercial membrane. First, the negatively enhanced nanofiltration membranes were fabricated using N-[Tris(hydroxymethyl)methyl]-3-aminopropanesulfonic acid sodium (TAPS-NA) and piperazine (PIP) as mixed monomers, which were reacted with trimesoyl chloride (TMC) via interfacial polymerization (IP). The optimal membrane demonstrated a pure water permeance (PWP) of $25.39 \pm 2.17 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$, a high Na_2SO_4 rejection (i.e., ~97.96%) and a low NaCl rejection (i.e., ~25.41%). Second, nanofiltration membranes with a positively charged interlayer and a negatively charged selective layer were fabricated through interfacial polymerization on an interlayer formed by the co-deposition of polydopamine (PDA) and polyethyleneimine (PEI). The results indicate that the charge characteristics and pore size of the nanofiltration membranes can be effectively modulated by varying parameters such as temperature, concentration, deposition time, and the PDA/PEI ratio during the interlayer deposition process. Moreover, the nanofiltration membranes prepared by this method exhibit excellent antifouling properties and long-term stability. Third, the high-performance nanofiltration membranes were obtained by post-treatment of a commercial nanofiltration membrane using a chlorination-grafting technique. Compared to the original membrane, the modified membranes exhibited a 180% increase in water permeance, a 22% decrease in NaCl rejection, and a 3% increase in Na_2SO_4 rejection. This work provides several novel approaches to fabricate or modify the membrane with controllable properties for the treatment of high-salinity wastewater. These methods not only offer new strategies for optimizing the performance of nanofiltration membranes but also demonstrate feasibility for industrial applications, holding significant potential for advancing the development of nanofiltration technology.

A12-12

二维 MXene 膜的精密构筑及性能调控

王海辉

清华大学

A12-13**面向海/卤水中锂分离提取的电化学吸附材料构建**

纪志永

河北工业大学

A12-14**面向有机物和无机盐选择性分离的新型膜过程**

林久养

中国科学院赣江创新研究院

高盐有机废水高值化利用的关键技术途径在于一步快速、高效分离废水中的有机物与无机盐。压力驱动纳滤与电渗析等膜技术因选择分离性低和膜污染等难题无法对高盐有机废水进行高效资源化处理。因此，开发新型高效的膜分离技术和工艺对实现高盐有机废水的资源化至关重要。

报告主要介绍团队在电纳滤技术开发上的研究进展。首先，系统探究了电纳滤技术在分离高盐有机废水资源化处理中的应用可行性，并与压力驱动纳滤技术进行性能比较，以凸显电纳滤技术的先进性；其次，基于电纳滤技术仍存在的技术缺点，团队对电纳滤膜进行改性处理，以制备高性能的电纳滤膜，实现有机物和无机盐的一步高效率分离，以为高盐有机废水的资源化处理提供技术思路。

A12-15**人工智能时代生物医药分离膜的挑战与机遇**

樊荣

中国科学院过程工程研究所

生物医药是人类应对重大健康风险的关键性武器，也是国家战略发展的重大需求。而生物大分子的异质性是影响其功能和安全性的关键因素。膜技术在温和条件下高效分离生物活性分子，是生物药制备过程中的关键性技术。生物活性物质的超滤膜精准分离难点在于孔径的非均一分布和被分离物质形态的非均一性。这些因素的非线性耦合导致了分离精度与效率受限。以机器学习为代表的人工智能手段能够有效分析复杂数据空间中的内在规律，构建生物药膜分离过程的预测模型，并且为材料与过程的设计提供指导。同时，由于生物大分子的构型存在高度可变性，通过粗粒度分子模拟的手段确定影响大分子空间构象的因素及其在流动场中的空间取向分布，及其与膜孔的相互作用模式。这一过程有效揭示了蛋白、多糖及超分子复合物在膜分离过程中的污染机制，为生物药分离膜的材料开发与过程设计提供了理论支持。

A12-16**基于仿生离子通道的高选择性锂离子分离**

高军

中国科学院青岛生物能源与过程研究所

提锂技术对我国新能源车产业的可持续发展非常重要。迄今为止，提锂技术仍面临选择性低的问题，难以满足卤水直接提锂需求。在自然界中，生物离子通道可以高选择性筛分特定碱金属离子。因此本课题组长期致力于构筑仿生碱金属离子通道材料，模仿生物离子通道构效关系解决锂离子选择性低的挑战。我们发展了尺寸匹配与结合能-脱水合能匹配的材料设计方法，可实现仿生高选择性碱金属离子筛分。所设计的材料选择比超过传统材料、甚至超过生物离子通道；进一步利用限域富集效应富集海水低浓度锂离子，极大提升锂/钠选择比；利用阴阳离子共传输解决单种离子传输带来的浓度极化等问题，提升锂离子通量；利用反向仿生策略，实现几乎完美的锂离子截留。

A12-17

膜基电催化纳流体反应器用于电氧化处理水中氨氮的研究

马晶

北京航空航天大学

摘电氧化处理水中氨氮因其快速高效且绿色环保的优势而受到广泛关注。然而，在较短水力停留时间条件下，不添加任何助剂，实现高氨氮去除率与高氮气选择性仍是一项重大挑战。采用耐腐蚀纳米孔碳化铌（NbC）膜负载纳米铂（Pt）催化剂做阳极，构建了膜基电催化纳流体反应器用于水中氨氮电氧化处理，碳化铌膜的每一个纳米孔道都可做为单独的反应器，氨氮在纳米孔道内被电催化氧化，进而转化为绿色产物氮气，反应器时空效率提升。通过固态粒子烧结法可实现碳化铌膜孔径的精准构筑（200-8.3 nm）。在不添加任何氧化剂的条件下，恒电位为 4 V vs. SCE，采用 Pt/NbC（孔径 8.3 nm）纳米孔膜做阳极，水力停留时间为 249 s 时，氨氮的单程去除率达到 100%，主要产物为氮气，选择性达 88.09%，同时生成少量硝酸盐（选择性 11.91%）。有趣地是，通过降低施加电位或增大孔径，氮气选择性可进一步提升至 100%，但这一调整可能导致氨氮的单程去除率下降。采用有限元模拟的方法论证了膜孔径和施加电位对轴向氨氮浓度变化的影响，从传质效率的角度解释了膜基电催化纳流体反应器的高时空效率。此外，密度泛函理论（DFT）计算结果表明，Pt（111）表面氮气的生成遵循 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_2 \rightarrow \text{N} \rightarrow \text{N}_2$ 路径。本研究成果将助力水中氨氮的高效去除，并为高效电催化纳米孔膜反应器的设计提供了可行方案。

A12-18

MOF 分子筛膜动态应力缺陷自适应修复

王悦诚

中国科学院大连化学物理研究所

分子筛膜是由分子筛晶粒紧密堆砌形成的连续、致密薄层。局部和偶然的晶体扭转与边缘位错将形成亚稳态连接的晶间结构。在分离过程中，高温、高压、真空等化学和机械载荷将诱发膜内应力缺陷，极大削弱分子筛膜的耐久性与分离可靠性。

为解决上述挑战，研究团队提出“MOF 分子筛膜动态应力缺陷自适应修复”新概念，解决了膜内应力缺陷形成和纳米粒子生长修复的时空同步问题，在不改变膜厚的情况下最大程度控制修复区域，且修复区域形状可根据应力缺陷类型（针孔、裂纹、断口）自适应调节，实现“点对点”精确修复。修复后的 MOF 分子筛膜可实现多种共沸液体化学品（如乙醇、异丙醇、吡啶、乙腈等）脱水精制，在多种分离环境中表现出显著提升的耐久性，例如，对代表性共沸乙醇体系稳定分离超 600 小时，相比修复前提高 10 倍。

A12-19

基于低共熔溶剂/烷烃界面聚合的高性能纳滤膜

吴慧青

东华大学

纳滤膜作为一类具有精密筛分功能的分离材料，在水处理、化工过程和环境保护等领域展现出重要的应用前景。但是，传统水/烷烃体系界面聚合体系存在单体扩散难以控制、酰氯水解副反应、水溶性胺单体选择受限等问题，导致形成的聚酰胺分离层孔隙率低渗透性偏小、孔径分布宽分离精度较差，严重制约着高性能纳滤膜的发展。本文提出一种新型无水界面—低共熔溶剂/烷烃界面聚合，设计配置低共熔溶剂的组成及理化特性，调变单体界面扩散及反应动力学，拓展非水溶性功能胺单体的使用，通过多尺度策略有效调控界面缩聚反应过程，实现膜结构的精细构建，强化纳滤分离性能。

在共熔溶剂（甲基三苯基溴化磷和乙二醇组成）/烷烃体系中，以常见的哌嗪为胺单体的研究表明，与传统水/烷烃体系相比，该体系使两相单体的扩散速率及分配系数发生显著逆转，促使聚酰胺网络形成更疏松且均匀的拓扑结构，成功制备兼具高通量、高染料/盐选择性的疏松纳滤膜。该膜纯水通量可高达 $48.0 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ，对 Na_2SO_4 、 NaCl 、等无机盐的截留都低于 11%，而对结晶紫、酸性品红等小分子染料及工业

中常用的活性染料的截留率均大于 95%，对于盐酸四环素和利福平等抗生素也表现出优异的分选效能。进一步地，共熔溶剂（氯化胆碱和乙二醇组成）/烷烃体系中，通过引入带疏水基团的非平面结构的非水溶性胺单体，精细调控界面聚合过程，成功构建了具有高微孔隙率的聚酰胺结构。所获得的有机溶剂纳滤膜展现出优异的极性和非极性溶剂渗透性（对甲醇的通量为 $36.6 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ，对正己烷的通量高达 $56.5 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ），同时对分子也具有精细的选择性。

本文所提出的低共熔溶剂/烷烃界面聚合体系，有望突破现有界面聚合及聚酰胺膜性能的瓶颈，为开发高性能纳滤膜提供的理论依据和技术路径。

A12-20

膜材料的仿生设计及其应用

侯旭

表界面化学全国重点实验室，福建 厦门

厦门大学化学化工学院，厦门大学

厦门大学物理科学与技术学院，厦门大学

自然界的生物体内存在不同尺度孔径的生物膜，这些膜经过长时间的进化，展现出近乎完美的结构，赋予其在特定环境中独特的选择分离性、智能响应性和智能门控性。近年来，受自然界生物膜启发，仿生膜材料在设计与应用方面取得了重要突破。根据孔道尺度的不同，仿生多孔膜可分为纳米尺度和微米尺度两类，其中纳米尺度多孔膜包括受细胞膜离子通道、水通道蛋白以及肾小球滤过膜启发的多孔膜，具有出色的离子和水分子选择性；微米尺度多孔膜则包括受叶子气孔和肺泡孔启发的液体门控膜。这些仿生膜材料因其智能响应性和自适应等特性，在空气净化、污水处理、物质检测、生物医学导管、智慧农业、智能气阀等多个领域展现出广泛的应用前景。

A12-21

金属有机框架材料的可持续合成及应用

王崇臣

北京建筑大学

A12-22

MOFs 界面限域晶化构筑亚纳米/纳米通道分离膜

计艳丽

浙江工业大学

金属有机框架（MOFs）作为一种新型结晶性多孔材料，具有高的比表面积和可调控的孔道结构，逐渐被用于制备高性能分离膜。然而，由于 MOFs 成膜结晶过程通常难以控制，易产生晶界缺陷，膜层较厚；同时，MOFs 结晶材料固有脆性以及在水溶液中结构不稳定性等问题，极大限制了 MOFs 分离膜的规模化制备及其在水溶液分离体系中的应用。本工作提出以金属配位聚合物纳米粒子为模板，通过“界面限域晶化”策略构筑了多级孔聚合物纳米基元膜。通过聚合物纳米粒子中的荷电基团吸附金属离子配位，诱导纳米晶体 MOFs 在聚合物纳米粒子外层及粒子界面限域空间内原位生长，形成亚纳米/纳米多级孔结构。结合低场核磁、正电子湮灭技术和分子动力学模拟等手段，深入分析了 MOF 复合纳米基元膜的微观结构和传质行为。结果表明，膜内水分子的传质速率为 $41.7 \text{ molecules.nm}^{-2}.\text{ns}^{-1}$ ，达到了与碳纳米管相当的水传输速率。通过优化成膜条件和工艺，获得了晶体强化聚合物纳米基元膜放大制备的关键技术。采用卷对卷成膜工艺，

成功实现了超薄晶体强化聚合物纳米基元膜的连续化放大制备，并制备成卷式膜组件。在生物医药分子分离纯化和染料脱盐应用中，该膜组件展现出了优异且稳定的分离性能。本工作的聚合物纳米粒子界面限域结晶策略可广泛应用于多种 MOFs 膜材料的制备，为高性能 MOFs 分离膜的规模化制备及其应用提供了新思路。

A12-23

锥形均孔膜的精准设计、机理及应用

陈国强

中国科学院过程工程研究所

用于生物大分子分离和传感的传输通道引起了人们的广泛关注，构筑孔道均匀的膜成为提升传输效率的有效策略。现有研究表明纳米锥形孔道相比柱形孔道在促进小分子和离子传输方面具有优势，但微米锥形孔膜在生物大分子传输方面的应用鲜有报道。我们开发了一种形状-尺寸顺序蚀刻法，通过对微米锥形孔道的精细调控来实现微米尺度锥形通道的构筑。提出了顺序蚀刻法的模型，对微米锥形孔的蚀刻过程进行理论分析；研究了实验条件（蚀刻时间、温度、乙醇添加剂、电压）对蚀刻过程的影响，并对微米锥形孔膜的性能（水通量和蛋白载量）进行评估。结果表明蚀刻时间、温度、乙醇添加剂均对蚀刻性能有显著影响。与圆柱形通道相比，锥形通道的水通量明显增加（0.08 MPa 时为 8.10 vs 3.84 $\mu\text{L/h}$ ），蛋白载量也有所提高（476.03 vs 382.88 pmol/cm^2 ），表现出明显的优势。本研究为各种具有挑战性的生物制药分离、生物传感和药物输送提供了一个多功能的膜基平台。

A12-24

用于锂镁分离的薄层复合纳滤膜构筑策略

刘长坤

深圳大学

盐湖卤水中锂资源含量占全球总锂储量的 60%，亦有相当丰富的镁资源。面向盐湖卤水的高效镁锂分离技术开发是缓解当前战略性工业盐资源短缺的关键问题。薄层复合纳滤膜分离技术是实现锂镁分离的有效途径之一。

本报告聚焦用于锂镁分离的薄层复合纳滤膜构筑策略，提出了微量金属离子掺杂策略、表面改性修饰策略、界面聚合调节剂构筑策略、以及界面聚合单体结构设计策略，构筑新型薄层复合纳滤膜，开展锂离子选择性分离研究，实现了纳滤膜水渗透系数和提锂选择性的双向提升，有效打破“渗透性-选择性”之间的制约效应。同时，利用分子动力学模拟等手段进行辅助分析，从界面聚合单体扩散行为、单体结构设计对自由体积的影响、水分子运输行为、以及锂镁在皮层内部的传输差异等方面，阐明了选择性提锂的相关机制，以及道南效应发挥的主导型作用。基于上述策略开发的纳滤膜分离技术在锂镁选择性分离领域的应用方面具有重要的意义。

A12-25

高性能纳滤膜材料的开发及其盐湖卤水提锂性能研究

曾广勇

成都理工大学

作为“21 世纪的新能源金属”和“推动世界前进的重要元素”，锂在国民经济发展中扮演着重要的角色。相比于传统矿石提锂，从盐湖卤水中提锂不需要大量的药剂投入，生产成本较低，已成为获取锂资源的重

要途径。纳滤膜因特殊的孔径范围（纳米级）和荷电性质，能有效分离单价、二价及多价离子，在盐湖卤水的镁锂分离领域表现出显著优势。然而，膜污染以及膜选择性与渗透性之间的 trade-off 效应限制了纳滤膜在盐湖提锂中的扩大应用。新型膜分离材料，如新型二维材料膜、新型荷正电复合膜，具有“弱反应性-强选择性”分离特点，能够协同尺寸筛分、静电排斥与特异性识别的多重机制，为不同品位卤水提锂提供新的解决方案，从而积极推动双碳战略目标的实现。

A12-26

3D 多级孔聚合物新材料吸附-催化分离水中铀酰离子研究

徐熙焱

北京理工大学

现代工业发展导致传统化石能源消耗的增长，带来碳排放等环境问题，而核能是重要低碳能源替代之一。积极安全有序发展核能有利于保障国家安全、推进能源绿色低碳转型。但核燃料制造和乏燃料后处理过程会产生含铀放射性废液，其未经处理直接排放会危害生态环境和人类健康，对其进行有效分离提取对资源有效利用和环境保护均有重要意义。本研究制备系列 3D 多级孔新型聚合物材料，用于水中铀酰离子的高效吸附-催化提取，探究影响铀提取转化性能的关键因素，厘清相关机理，为核化工过程核燃料循环中的关键放射性核素提取分离和资源化转化方面应用提供基础支持。

A12-27

晶圆基纳米孔石墨烯分离膜的快速制备

侯丹丹

北京石墨烯研究院

膜分离技术因其能耗低、操作简便等优点而受到工业界与学术界的广泛关注。在众多有潜力的新材料中，晶圆级单晶石墨烯因其超平整表面、超低的缺陷，优良的机械强度和化学稳定性而脱颖而出，成为“自上而下”制备纳米孔分离膜的理想选择。尽管这些特性令人鼓舞，但是晶圆石墨烯铜基底刻蚀速率缓慢致使膜转移效率低的问题给其大规模应用带来挑战。在本研究中，我们提出了一种利用晶圆基石墨烯快速制备多孔原子级薄膜（NATMs）的创新方法。首先，使用氩等离子体处理石墨烯晶圆，引入具有尺寸选择性的缺陷。随后，采用聚偏氟乙烯（PVDF）进行非溶剂诱导原位聚合相转化过程，制备石墨烯膜的多孔支撑层。进而通过在刻蚀铜之前用乙醇浸润 PVDF，消除 PVDF 的疏水作用，促进了刻蚀剂在铜表面的快速扩散。铜离子与刻蚀剂（过硫酸钠）之间发生多点自催化效应，使得铜基底的刻蚀速率提高了 115 倍，同时保持了 NATMs 的选择性。通过上述方法，4 英寸晶圆基石墨烯分离膜的整个制备过程可以在 1 小时内完成。这种新颖的转移制膜技术在克服高效石墨烯转移的挑战方面取得了进展，同时不牺牲石墨烯膜的分离选择性，从而为实现基于石墨烯晶圆的纳米多孔膜材料的产业化应用奠定了一定的理论与技术基础。

A12-28

MXene 复合膜的结构调控及分离应用

张红梨

西安工业大学

以 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ($\text{T}_x = \text{F}, \text{O}, \text{OH}$) 为代表的过渡金属碳/氮化物（MXene）具有刚性的二维层状结构、高长径比和表面亲水性等特点，被视为膜分离领域具有前景的候选材料。然而，MXene 表面的高水合性促使水

分子更容易吸附到 MXene 纳米片层间，导致膜材料产生溶胀问题，这使得 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 膜实际性能远低于理论预测。针对上述问题，我们将柔性亲水的羧基化纤维素纳米纤维（CNFs）、不同连接体长度的 β -酮烯胺 COF（包括 TpPa、TpBD 和 TpTAPB）、聚二甲基二烯丙基氯化铵（PDDA）聚阳离子等，依次通过氢键、共价键、静电作用引入到 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片层间。插层剂的引入不仅有效地固定了层间距离，提升了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 膜的抗溶胀性能；还可实现对 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 层间传输通道结构和表界面性质的精细化调控，为分子的稳定、快速和选择性分离提供可能。研究结果丰富了 MXene 膜传质通道结构的调控策略，为高性能纳滤膜设计和开发提供了新的思路。

A12-29

Molecule single-file and quasi-ballistic diffusion in single ultra-long carbon nanotube

吴经纬

清华大学

A12-30

二维材料在聚合物膜中的定向迁移规律与表面偏析行为研究

郑霞

成都理工大学

墙报

A12-P01

低分子量右旋糖酐分离膜的设计与性能研究

郑沛¹、伊守亮¹、曾广勇²、樊荣^{*3}

1. 四川大学

2. 成都理工大学

3. 中国科学院过程工程研究所

右旋糖酐是由葡萄糖聚合而成的多糖，其核心功能包括作为血容量扩充剂和抗血栓药物载体等，分子量差异决定其在生物药等领域的多样化应用。工业上常采取化学或酶催化水解的方法生产特定分子量的右旋糖酐。由于水解反应的随机性导致了工业生产的低分子量右旋糖酐分子量分布宽、纯化成本高，限制了其规模化应用。超滤膜分离技术能够利用尺寸筛分作用实现不同分子量物质的右旋糖酐分子之间相互分离。然而，该技术的核心难点在于如何制备孔径高度均一的分离膜以及强化分离过程中膜的抗沉积能力。因此，本工作首先通过解析溶质分子与膜孔的相互作用、污染层的形成规律以及对分离选择性的影响，设计了更加高效而精准的分子量筛分膜及分离工艺。研究表明，分子量为 5 和 10 kDa 的右旋糖酐粒径相近；由截留的右旋糖酐形成的凝胶层改变了对不同分子的截留；通过污染层调节可以提高右旋糖酐的分离效率和准确性。其次，本研究采用自制的甲基丙烯酸右旋糖酐对超滤膜进行了表面改性，并将超滤膜改性工艺由实验室平板膜片拓展至卷式超滤膜。开发的表面改性技术使改性超滤膜在截留分子量（MWCO）10-50 kDa 范围内形成可调控的筛分截留窗口；平板改性膜对 1 和 10 kDa 右旋糖酐的分离因子（ α ）由原膜 1.7 提升至 2.2-3.7；膜平均孔径从 3.94 nm（原膜）降至 2.22-3.68 nm，且孔径分布由 2.14 缩窄至 1.93-2.10；此外，拓展的卷式改性膜同样具有更优的分离性能。最后，基于污染机理分析与超滤膜性能表征，本研究构建多膜分级筛分工艺体系，并集成卷式改性膜实现三级分离工艺放大试验。平板超滤三级分离工艺将工业右旋糖酐酸解液分离为 3 个产品，其中 6.3 kDa 产品的多分散系数为 1.4，回收率达到 90%。此外，卷式三级分离工艺将右旋糖酐酸解液分离出三个产品，其中二级分离产品 J-2-4R（39.3 kDa）、三级分离产品 J-3-4R

(18.07 kDa) 和 J-3-5CR (6.69 kDa) 的分子量与平板膜分离结果高度一致, 且放大产品的多分散系数略优于实验室规模生产的产品。

A12-P02

Mechanistic Insights into Competitive Adsorption-Enhanced CO₂/N₂ Separation by Monolayer Fullerene Membranes

Ruirui Han, Yuanyuan Qu*

School of Physics, Shandong University

Efficient CO₂/N₂ separation is critical for advancing carbon capture technologies and addressing climate challenges posed by industrial flue gases. This study employed first-principles calculations and molecular dynamics simulations to investigate the separation mechanism of CO₂ and N₂ using monolayer fullerene membranes with funnel-shaped nanochannels. The unique pore geometry induces a synergistic separation mechanism: competitive adsorption preferentially enriches CO₂ at the membrane surface, while a stark contrast in free energy barriers (15.66 kJ/mol for CO₂ vs. 41.56 kJ/mol for N₂) enables selective permeation. This dual mechanism yields exceptional performance, achieving a CO₂/N₂ selectivity of 3564 and a CO₂ permeance of $2.11 \times 10^{-5} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, surpassing conventional membrane benchmarks. Rotational density of states analysis further reveals that weaker rotational constraints on CO₂ during transport enhance its diffusion kinetics. These findings demonstrate the potential of monolayer fullerene membranes as high-performance, sustainable solutions for gas separation.

A12-P03

Strain-Induced Geometric Modulation of Nanopores for Enhanced Hydrogen Isotopologue Separation via Quantum Sieving

Huiru Zhang, yuanyuan Qu*

School of Physics, Shandong University

The exploitation of quantum effects in light isotopologue separation represents a pioneering advancement in isotopic purification technologies. This study employs first-principles calculations to explore the mechanisms underlying the separation of hydrogen isotopologues facilitated by strain-engineered nanopores, emphasizing that the geometry of these nanopores, critically governs separation efficiency through the intricate interplay between quantum tunneling and zero-point energy (ZPE) effects. We demonstrate that the application of directional strain to carbon nitride membranes, specifically N-graphyne (*r*-N-GY) and N-graphdiyne (*r*-N-GDY), results in distinct nanopore geometries with profound separation efficiency. The strained *r*-N-GY membrane with quasi-circular nanopores achieves industry-grade performance across a wide strain range (14%-18%) along the armchair (AC) direction, effectively separating multiple hydrogen isotopologue pairs (D₂/H₂, DT/H₂, T₂/HD, etc.). In contrast, the strained *r*-N-GDY membrane with slit-like nanopores exhibits limited utility, selectively sieving isotopologue pairs only under specific strain condition of 3.5% applied along the zigzag direction. This discrepancy arises from the strain-induced geometric transformations that AC-strained *r*-N-GY develops quasi-circular nanopores that amplify ZPE effects, thereby enhancing isotopologues selectivity. These insights establish geometric modulations as a critical design principle for quantum sieving materials and advance the frontier of strain-engineered membranes for isotopic separation. The work provides both theoretical insights into quantum-driven separation mechanism and practical guidelines for developing high-performance isotopic purification systems.

A12-P04

皮肤层基质中“协同”正电荷载体的部分转化为“排斥”正电荷载体，以增强纳米过滤中的镁/锂选择性

阚陶*

深圳大学

通过胺与酰氯界面聚合制备的薄层复合（TFC）膜已广泛应用于盐湖卤水锂镁分离领域，其分离机制主要依赖电荷排斥与尺寸排阻效应。本研究开发了一种新型纳滤膜：首先对聚乙烯（PE）基底进行亲水改性，随后在界面聚合过程中将 Fe^{3+} 离子与甜菜碱同步引入分离层基质。 Fe^{3+} 与水相单体聚乙烯亚胺（PEI）的胺基发生配位作用，同时甜菜碱的羧基与 Fe^{3+} 形成静电吸引，共同构建配位络合物。三元配位相互作用显著增强了膜的正电性与亲水性。所得纳滤膜具有超薄分离层（约 32 nm）、高正电荷密度及适度疏松结构，对 MgCl_2 截留率达 98.2%，纯水渗透率为 $15.5 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ，并表现出优异的长期运行稳定性。该研究为制备高性能盐湖提锂纳滤膜提供了有效策略。

A12-P05**COF-聚酰胺复合膜的制备及其抗生素分离纯化应用**

郑豪、张凯、计艳丽*、高从培

浙江工业大学

自抗生素发现以来，凭借其优异的抑菌抗感染特性，在医药健康领域需求持续增长，2024 年全球市场规模达数百亿美元并保持稳定上升趋势。在传统抗生素生产工艺中，分离纯化是关键环节，但传统方法因大量使用挥发性有机溶剂、工艺复杂且能耗高，显著影响产品纯度。耐溶剂纳滤（OSN）膜技术在生物医药复杂组分分离及溶剂回收领域具有良好应用前景，其凭借无相变、高效、环保及操作便捷等优势，为抗生素分离纯化带来新希望。然而，当前用于医药分离的耐溶剂纳滤膜面临诸多挑战，通常难以克服分离选择性和渗透性的 trade-off 效应以及膜长期运行稳定性等问题。共价有机框架（COFs）作为一种孔径可调控，具有高孔隙率和比表面积，高化学稳定性的新型多孔材料被视为下一代高性能 OSN 膜的理想成膜材料。本研究以 1,3,5-三(4-氨基苯基)苯（TAPB）和 2,3,5,6-四氟对二苯甲醛（TFTA）为单体，通过界面聚合反应合成疏水性氟化 COF（FCOF），再采用真空辅助过滤方法将其负载于微滤多孔支撑膜表面，最后经界面交联得到聚酰胺改性 F-COF 膜（FCOF-PA）。本研究系统考察了 FCOF 材料合成与膜制备工艺参数对 FCOF 材料及其复合膜结构与性能的影响规律。研究表明，通过调控反应温度、催化剂用量和反应时间，可以有效控制 FCOF 纳米粒子尺寸和孔径。另外，通过改变 F-COF 负载量、哌嗪（PIP）和均苯三甲酰氯（TMC）浓度，以及界面交联时间等关键参数，调控膜的微观结构、表面性质及 OSN 分离性能。所得最佳 FCOF-PA 复合膜，其膜孔径为 $\sim 0.6 \text{ nm}$ ，能够高效截留 400-1000 Da 抗生素分子 $> 95\%$ ，甲醇渗透通量为 $\sim 11 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ，在抗生素分离纯化方面表现出良好的应用前景。

A12-P06**阳离子取代（ $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ ）调控锰基离子筛价态以提升 Li^+ 分离性能研究**

扎西措*

青海民族大学化学与材料科学学院

锂是战略性能源金属，全球需求受“双碳”驱动激增。我国盐湖锂资源丰富，开发价值极高。吸附法是盐湖提锂最具前景的技术，其中锰系离子筛因对 Li^+ 高选择性、高吸附容量成为核心材料。本研究通过溶胶-凝胶法耦合控温煅烧合成了一系列金属离子（ Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} ）掺杂的锰酸锂氧化物（LMOs），用于增强锂提取应用。通过相关结构表征得出，所合成的样品具有八面体配位几何构型和多级介孔结构的明确立方尖晶石结构（Fd-3m 空间群）。使用 LiCl 溶液进行的吸附评估表明，阳离子掺杂显著提高了锂吸附容量。优化后的材料对 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 修饰的 LMOs 分别表现出 26.71 、 27.47 和 32.95 mg g^{-1} 的 Li^+ 吸附容量，相较于原始 LMO（ 26.07 mg g^{-1} ）分别提高了 2.4%、5.4% 和 22.5%。值得注意的是， Al^{3+} 修饰的吸附剂（LMO-Al）表现出优异的循环稳定性，在五次吸附-脱附循环后仍保留 86.33% 的初始容量——显著高于原始 LMO 观察到的 79.85% 的保留率。经过 5 次吸附/脱附循环后，HMO-Al 的 Mn 溶解损失为 1.25%，

低于 HMO 的 2.34%。这种性能提升可归因于优异的结晶度、丰富的化学吸附氧以及更高的锰平均价态，这有效降低了锂离子筛中 Mn^{3+} 的含量，从而抑制了 LMO-Al 中的 Jahn-Teller 效应和 Mn^{3+} 的歧化反应。这些发现为锂离子筛中的结构-性能关系提供了基础性见解，同时指导了从盐水资源中可持续提取锂的高性能吸附剂的合理设计。

A12-P07

用于盐湖提锂的基于 COF 选择性阳离子交换膜研究

王昊、陈泽健、计艳丽*

浙江工业大学

随着新能源产业高速发展，对锂资源需求急剧增加，而盐湖提锂面临高镁锂比的相近尺寸阳离子难分离的核心难题。电渗析技术虽然在盐湖提锂中展现出一定优势，但现有阳离子交换膜难以兼顾高选择性与高渗透性：常规阳离子交换膜受限于其孔径分布较宽且荷电性调控不足等问题，无法同步实现镁锂离子的精准筛分与快速传输。共价有机框架材料（COF）凭借其可设计的纳米孔道（尺寸筛分）和可修饰的荷电基团（静电排斥）的协同作用提升镁锂分离选择性。本研究开发了一种基于共价有机框架（COF）材料的新型选择性阳离子交换膜。以 1,3,5-三醛基间三苯酚（TFP）和 2,5-二氨基苯磺酸（DABA）为原材料，通过席夫碱反应制备磺酸功能化 COF 材料（SCOF）。进一步采用加压过滤法制备 SCOF 基膜，并利用聚乙烯亚胺（PEI）界面交联形成 SCOF-PEIM 复合膜。优化 SCOF 浓度，PEI 浓度、PEI-GA 浓度比例等成膜条件，调控膜孔径、表面荷电性和亲水性。实验结果表明，该膜在 3 mA cm^{-2} 电流密度下展现出 $0.9 \text{ mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 的锂离子通量和 >6.0 的 $\text{Li}^+/\text{Mg}^{2+}$ 选择性，这是由于磺酸基团的静电排斥与纳米孔道筛分的协同作用。该研究作为盐湖提锂提供了兼具高选择性与高通量的新型选择性阳离子交换膜，具有良好的应用前景。

A12-P08

Enhanced desalination by multilayered *r*-N-GDY membrane through oriented interlayer sliding and interlayer spacing modulation

Wenfeng Wu, Yuan Yuan Qu*

Shandong University

Advancements in the development and design of two-dimensional (2D) nanomaterials have ushered in promising avenues for revolutionizing seawater desalination technologies, particularly in enhancing the efficiency of reverse osmosis membranes. In this study, we employ molecular dynamics simulations to investigate the desalination performance of a three-layer *r*-N-GDY membrane under two regulation strategies involving oriented interlayer sliding and interlayer spacing modulation. Our results reveal that precisely controlled interlayer sliding can induce the formation of ordered one-dimensional water chains within the nanochannels, leading to a substantial enhancement in water permeance, reaching approximately $31.05 \text{ L/cm}^2\text{day/MPa}$, nearly five times higher than that of the initially synthesized ABC-stacked configuration. Furthermore, modulating the interlayer spacing profoundly impacts transport behavior by altering the state of confined water molecules. Notably, while increased interlayer spacing reduced confinement, it paradoxically decreases water permeance beyond an optimal threshold ($5.0 \text{ \AA}$), underscoring the critical role of spatial confinement in maintaining efficient transport. This study demonstrates two viable physical strategies for optimizing the performance of multilayer membrane systems and offers novel perspectives for innovative nanotechnology, aiming at efficient and sustainable water resource management.

A12-P09

具有双 Li^+ 传输通道的双层冠醚工程纳滤膜用于盐湖盐水的超高 $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ 分离刘科¹、曾广勇^{*1}、伊守亮²

1. 成都理工大学

2. 四川大学

对锂的需求不断增长，需要发展先进的分离技术，以有效地从高 $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ 比的盐湖盐水中提取和回收锂。在此，我们报告了一种双界面聚合策略，结合苯并-15-冠-5（B15C5）醚来制备具有分层结构的 Li^+ 传输通道的纳滤膜。二次界面聚合（SIP）参数的系统优化与 B15C5 功能化协同作用，使膜具有优异的 Mg^{2+} 排斥（>99 %），同时保持稳定的水透性（ $8.2 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ）。该膜实现了超高的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ 分离因子（ $S_{\text{Li, Mg}}$ ），达到了 57.2，优于以往报道的大多数膜。实际盐湖卤水（察尔汗盐湖；初始 $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ 比为 928.6）表现出两段分离效率，使 $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ 比降至 1.9，锂富集量为 488.7 倍。密度泛函理论（DFT）计算和静态扩散实验进一步表明，B15C5 修饰膜对 Li^+ 具有较强的结合亲和力， Li^+ 渗透能力显著增强。此外，x 射线光电子能谱（XPS）深度刻蚀和飞行时间二次离子质谱（TOF-SIMS）解析了膜的空间梯度双层结构。这些发现建立了离子选择膜的分子尺度设计范例，解决了从高 $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ 比盐水中高效提取锂的关键挑战。

A12-P10

聚氧化乙烯基超薄复合膜的可控构筑及其 CO_2/N_2 分离性能研究

何美贵、张晓东、贾万鑫、张建民、赵静、金万勤*

南京工业大学化工学院

全球气候危机加剧背景下，大气 CO_2 浓度升高导致的温室效应严重威胁生态系统稳定性和人类可持续发展。开发高效低耗的 CO_2 分离技术不仅是实现碳中和与能源结构优化的战略需求，更是构建碳捕集封存与利用（CCUS）体系的核心环节。膜分离技术凭借低能耗、操作简便、设备紧凑等优势，成为新兴碳捕集方案的研究焦点，其性能核心在于膜材料设计。交联聚氧化乙烯（PEO）基膜材料因其独特三维网络结构展现出显著潜力：高密度醚氧基团赋予优异 CO_2 选择性，非晶态结构构建快速气体传输通道。当前交联 PEO 膜主要分为自由基聚合与环氧开环聚合（热交联）两类，前者虽具高分离性能但溶液加工性差导致成膜厚度难控，后者虽机械性能优异却存在渗透率瓶颈。针对上述技术瓶颈，本研究提出创新解决方案：（1）通过预交联策略精准调控自由基聚合反应进程，优化涂膜粘度参数，突破传统自由基聚合 PEO 的加工限制，实现亚微米级超薄膜制备；（2）在热交联体系中引入单氨基 PEO 功能单元，通过削弱分子间氢键作用增强链段运动性，增加动态自由体积通道，促进 CO_2 气体分子高速传输。进一步结合紫外臭氧表面处理技术，成功开发出具有工业化应用潜力的多层超薄复合膜，展现优异的分离性能，自由基聚合 PEO 膜 CO_2 渗透率为 1280 GPU， CO_2/N_2 选择性为 56，分离层厚度仅约 75 nm，热交联 PEO 膜 CO_2 渗透率为 1194 GPU， CO_2/N_2 选择性为 35，分离层厚度仅约 42 nm。两者在 360 h 连续运行中均保持 > 95% 初始性能的优异稳定性。

A12-P11

T 型沸石膜的制备及其应用研究

文艺霏¹，鲁金明²，杨建华^{2*}

1. 哈尔滨工程大学航建学院

2. 大连理工大学化工学院

沸石分子筛膜具有耐高温、耐腐蚀、耐强溶剂等优势，同时由于其独特的规则结晶孔道以及可调变的骨架硅铝比（膜层骨架硅元素与铝元素的摩尔比）等特性，使得其在物质分离、膜反应器、催化、传感器等领域具有极大的应用潜力。T 型沸石膜骨架硅铝比为 3-4，适中的硅铝比使其兼具较高的亲水性和水热稳定性，并且 T 型沸石的孔道尺寸为 $0.36 \text{ nm} \times 0.51 \text{ nm}$ ，能有效筛分水溶液中的盐离子，因此 T 型沸石膜具有

潜在的海水脱盐工业应用前景。

本研究采用自行合成的不同尺寸的T型沸石分子筛作为晶种，修饰载体表面缺陷并诱导晶体成膜，在大孔 α - Al_2O_3 载体管上制备出高质量的晶种层。研究发现：

(1) 在无氟体系下，采用不同微结构的T型分子筛作为晶种，制备得到了T型分子筛膜，考察了晶化温度、硅源、投料硅铝比的影响，得到优化后的T型分子筛膜在75℃时分离90 wt.% IPA/ H_2O 最佳通量为 $3.66 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，对应的分离因子 > 10000 。

(2) 在清液体系中添加氟盐，考察氟盐类型、氟盐含量对 T 型沸石膜的影响，结果表明，在 $n(3\text{NaF}:1\text{KF})/n\text{SiO}_2=0.25$ 条件下合成的 T型沸石膜具有良好的渗透蒸发性能，在75℃下分离90wt.% IPA/ H_2O 和90wt.%EtOH/ H_2O 体系，渗透通量分别为 $4.06 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $2.30 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，分离因子分别为10591和3539，而且T型沸石膜具有良好的重复性。

(3) T型沸石分子筛膜在75℃下对 90 wt.% 异丙醇/水溶液持续进行了202 h的分离测试，T型分子筛膜稳定通量约为 $3.37 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，渗透测水含量均维持在100 wt.%，表明制备的T型沸石分子筛膜具有良好的水热稳定性。

(4) 在75℃下90 wt.%异丙醇/水溶液中加入乙酸直至pH=5，持续进行PV测试 154 h之后，T型分子筛膜的稳定通量约为 $1.43 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，渗透测水含量维持在99.8 wt.%左右，表明制备的 T型沸石分子筛膜具有一定的耐酸稳定性。

(5) 进一步研究了T型沸石膜的脱盐性能，发现在348 K下渗透蒸发分离35 g/L的氯化钠溶液时，渗透通量可稳定在 $7.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，离子截留率大于99.9%。

研究结果表明，制备的T型沸石膜在长时间渗透蒸发测试过程中表现出良好的水热稳定性及耐酸稳定性，同时其脱盐分离性能稳定，分离高浓度盐溶液时有显著优势，有望应用于有机试剂脱水、海水脱盐以及工业废水处理等领域。

A12-P12

管式 Janus 碳化硅膜的制备及柴油连续膜乳化性能

杨琦琦，古其林*，周科，梁政，仲兆祥，邢卫红*

南京工业大学化工学院，国家特种分离膜工程技术研究中心

柴油掺水形成柴油包水(W/D)乳液可以显著提高燃烧效率，并有助于降低氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)等污染物的排放。因此，高效制备液滴尺寸均匀、稳定的W/D乳液并探讨其燃烧特性对提高柴油燃烧效率有重要意义。已有研究表明，Janus多孔碳化硅(SiC)陶瓷膜可制备出稳定均匀的乳液，并且在抗污染性能方面具有显著优势。为了实现柴油乳液的连续制备，亟需制备管式Janus多孔 SiC 陶瓷膜。为此，本研究以TEOS和MTES为前驱体溶液，以氨水为催化剂疏水二氧化硅(SiO_2)小球的可控制备，再采用“先分离、再分散”的方法将疏水 SiO_2 小球选择性地涂敷于管式碳化硅膜内表面，制备出内壁疏水、外表面亲水的管式Janus多孔 SiC 陶瓷膜。采用SEM、光学接触角测试仪、孔径测定仪、表面张力仪等手段，系统研究了改性条件对多孔 SiC 陶瓷膜的微观结构、润湿性、孔径分布等的影响。研究结果表明，通过调控氨水浓度，可以制备出与管式多孔 SiC 陶瓷膜孔径相匹配的 SiO_2 小球颗粒；随着 SiO_2 固含量的增加，管式多孔 SiC 陶瓷膜的孔径从 $1.2 \mu\text{m}$ 降低到 $0.52 \mu\text{m}$ ，内壁水接触角从 15° 升高到 142° 。同时，将具有不同表面润湿性的管式多孔 SiC 陶瓷膜用于乳液制备，发现以管式Janus多孔 SiC 陶瓷膜为乳化介质制备的乳液具有粒径分布均一、平均粒径较小的优点。本工作提出了一种同步调控管式多孔 SiC 陶瓷膜表面润湿性和孔结构的方法，为柴油乳液的连续膜乳化制备提供一种关键膜材料。

A12-P13

无机固态电解质膜用于锂资源提取

张千禧，王梦鸽，王秋月，刘泽贤*，仲兆祥，邢卫红*

南京工业大学化工学院，国家特种分离膜工程技术研究中心

随着全球能源结构加速向可再生能源转型，锂元素作为关键战略资源的需求急剧增加，开发高效、可持续的锂提取技术已成为当前能源革命中的重大挑战。膜分离技术与传统提锂方法相比，无需使用大量化学试剂，工艺流程简单，环境友好，且不受气候条件限制，在锂资源提取方面展现出巨大的潜力。然而，当前膜技术在离子分离领域的应用仍面临重大瓶颈：现有膜最多只能分离一多价离子，对于同族一价离子的分离仍面临巨大挑战，即缺乏对特定离子具有高选择性、高通量的分离膜材料。无机固体电解质（ISSEs）是一类致密的无机晶体或多晶固体，主要分类为硫化物、氧化物和卤化物。这些不同结构的无机固体电解质展现出与液态电解质相当的离子电导率，属于全固态电池的重要组成部分，传统上作为安全性更高的电解质使用。其中，部分 ISSEs 在近年来已被开发为锂离子选择性膜材料，并展现出优异的分离潜力，同时具备更高的结构稳定性。ISSEs 晶体结构是其选择性离子传输机制的核心，其晶格空位之间构建有序的离子通道，有利于与晶格结构相匹配的锂离子快速传输。当离子半径大于离子通道的离子进行传输时，如 Na^+ 和 K^+ ，由于尺寸不匹配，需迫使晶格发生形变，从而需要克服更高的能量势垒，迁移效率显著降低。同样， Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等高价离子与晶格结构中的阳离子会产生更强的静电相互作用，同时被离子通道周围的氧气牢牢束缚，从而进一步降低了它们的扩散速率，实现选择性离子传输，展现出独特的潜力，成为未来极具前景的离子选择性膜材料。

A12-P14

一多价离子选择性传输 ZIF 膜的电法制备及其性能研究

王梦鸽、张千禧、王秋月*、刘泽贤、仲兆祥、邢卫红*

南京工业大学，国家特种分离膜工程技术研究中心

随着向可再生能源的转变，对锂的需求急剧增加，高效、绿色的提锂技术已成为研究热点。膜分离技术因其低能耗和环境友好特性备受关注，未来有望为新能源产业提供可持续的锂资源解决方案。本研究提出了一种制备锂离子分离膜的方法，利用电法辅助对扩散的方式在基膜上合成 ZIF 膜层，以实现离子分离的效果。选择性电渗析过程实现离子分离的机制主要包含：(a) 静电排斥，(b) 尺寸筛分效应，以及 (c) 静电排斥与尺寸筛分效应共同作用，因此目前的研究主要是针对孔径筛分和静电排斥机制上。本工作利用 ZIF 材料孔径大小适宜且分布集中的特点，通过电场加强对扩散的方法制备较为致密的 ZIF 膜层，实现对 Li^+ 的高效分离。由于 ZIF 的孔径大小只允许裸离子通过，从而大大限制了多价离子的传输，因为多价离子所需的脱水能更高，这种设计使膜实现了卓越的离子分离性能。