

重离子微孔膜技术

重离子微孔膜(nuclear pore membrane)又称核孔膜、径迹蚀刻膜等。它是利用高能重离子穿透聚合物薄膜后，经过化学蚀刻放大孔径，从而形成的多孔过滤材料。重离子微孔膜具有孔密度可控、孔径大小均匀可控、孔道形状规则、膜面光滑无纤维脱落等特点，被认为是世界上最精密的微孔膜材料。

产业化基础

中国科学院近代物理研究所拥有亚洲能量第一的兰州重离子加速器装置（HIRFL），拥有生产重离子微孔膜独一无二的先决条件。

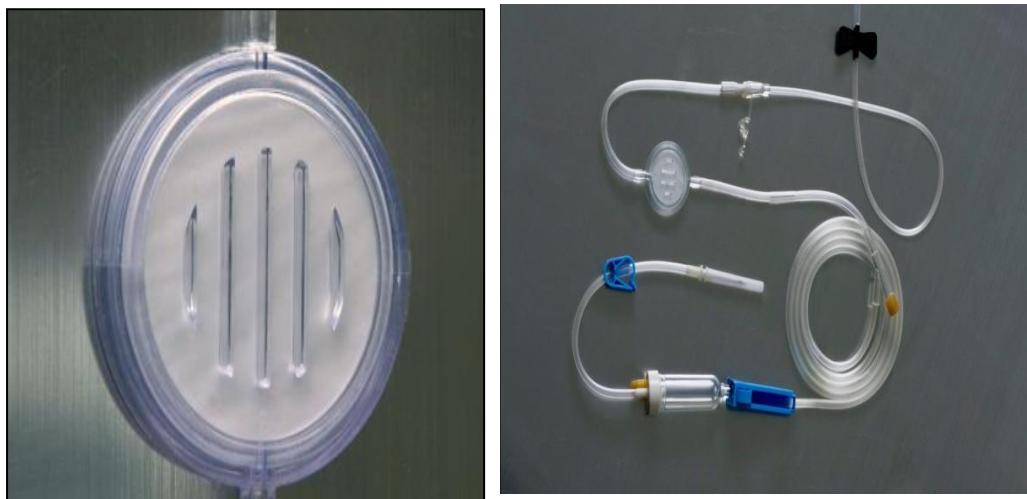
2012 年，近代物理所在 HIRFL 上自主建成第二条核孔膜束线 TR6 重离子微孔膜辐照生产终端，该终端 1 小时最大辐照 1 万平米；2015 年，建成武威、枣庄、徐州蚀刻基地，可批量化生产多达二三十种型号的重离子微孔膜；2019 年，在惠州成立重离子微孔膜产业研发中心和惠州市科近离子膜材料研究院，从事新材料研究和技术开发和推广，重点进行重离子微孔膜技术在水处理领域的研究和工程示范、以及企业孵化。



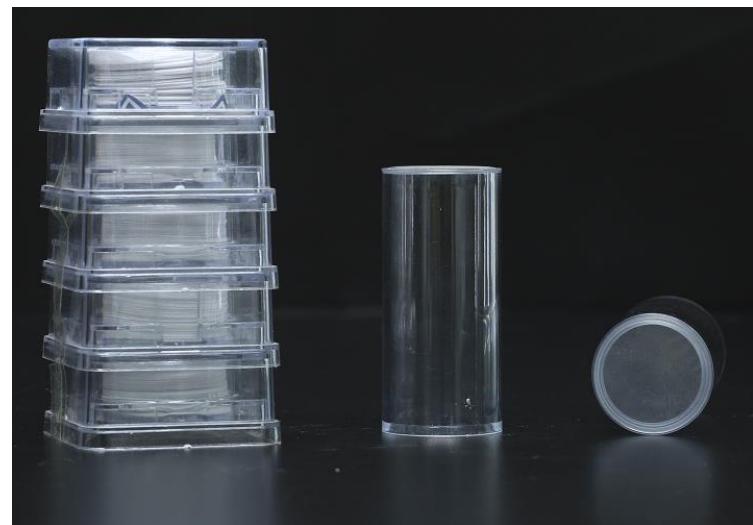
惠州市科近离子膜材料研究院

主要产品

目前在售的主要产品有：重离子微孔膜辐照膜、重离子微孔膜蚀刻膜、重离子微孔膜复合膜、细胞检测膜、空气过滤产品、污水处理膜元件、污水处理膜组件、离子膜增氧管设备、精密输液器重离子微孔膜材料等。



精密输液器重离子微孔膜材料



TCT 专用滤膜

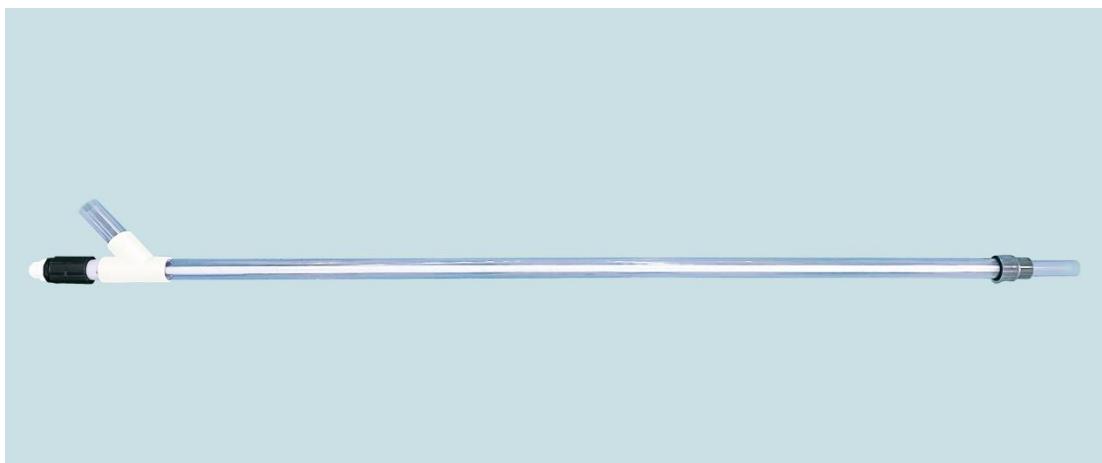




污水处理领域产品-膜元件及膜组件



重离子微孔膜管式膜组件



重离子微孔膜增氧管

在研项目

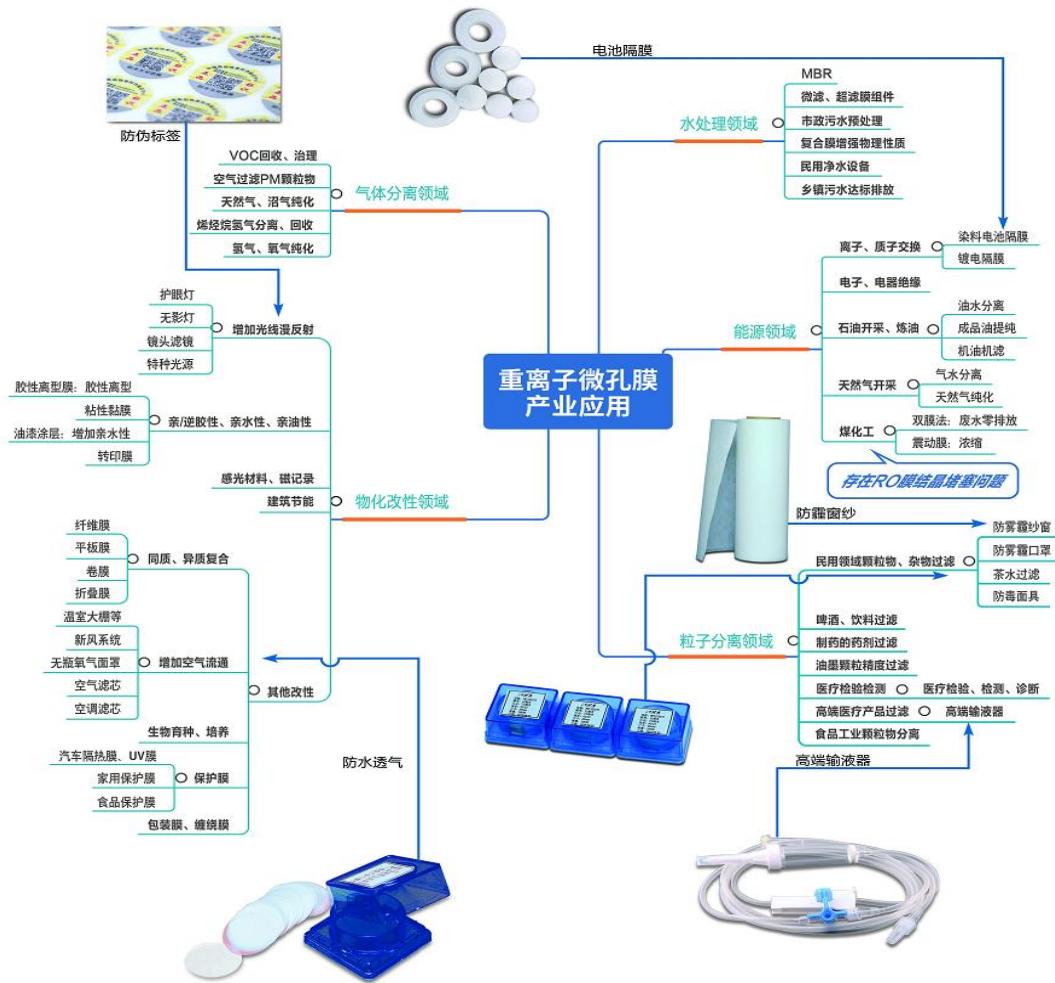
重离子微孔膜污水处理创新示范基地项目位于惠州市惠南高新技术产业园宏达路，总投资额 1000 万元，日处理量 5000t。项目采用磁絮凝沉淀工艺+离子膜曝气生物滤池+动态离子膜水处理技术，废水经处理后出水各指标均能稳定达到地表水环境质量标准（GB3838-2002）V 类以上的相关指标。

该项目已起到积极示范作用，未来计划投资新建项目，预计总处理量可达 20000t/d，综合运行收益可达 5000 万元/年。

产业化需求

中科院近代物理研究所重离子微孔膜技术，致力于推广重离子微

孔膜材料在空气过滤、污水处理、家用净水、医用过滤、生物细胞检测、食品饮料过滤、防伪标签、电池隔膜等领域应用。让重离子科技走进生活，服务国家造福人民。

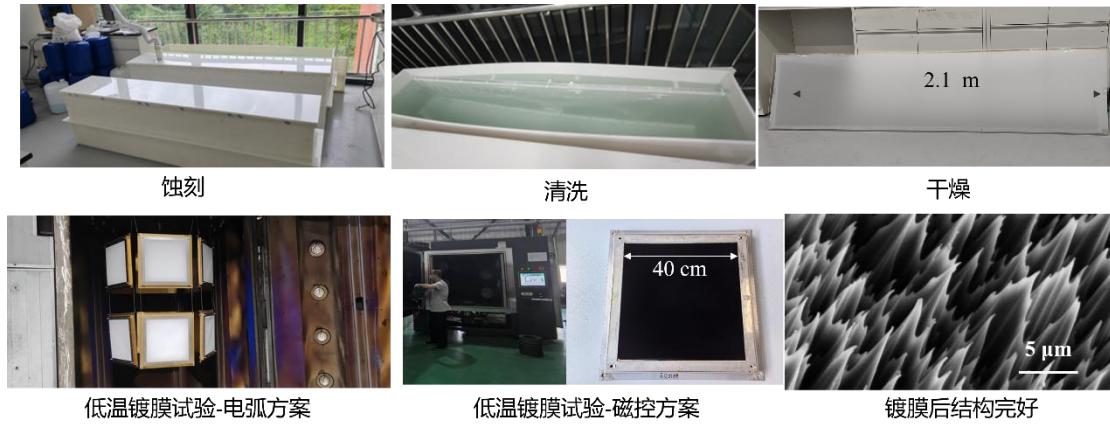


重离子微孔膜产业应用范围

核孔膜超黑材料

超黑材料是高灵敏光学系统的杂散光抑制、红外检测与成像定标、空间热控等重大应用的关键核心材料。基于原创的光学设计，项目组研制出核孔膜超黑材料，其最高吸光率为 99.99% (认证新极限)。项目组聚焦应用，研发了辐照、蚀刻、镀膜、拼接、贴覆等全链条核心

专有技术，为应用奠定了基础。并完成了超黑材料首个应用：解决了西光所大口径光学测试系统核心部件“高性能吸光板”的研制难题。



建成平米级刻蚀线、验证低温镀膜工艺

西光所Φ1.6m大口径点源透过率测试系统

核孔膜超黑材料应用于高性能吸光板

首个应用证明（里程碑）

应用证明	
项目名称	Φ1.6m大口径点源透过率测试系统核孔膜超黑材料消光板
应用单位名称	中国科学院光电技术研究所
完成时间	2021年9月
项目联系人	冉阳
联系电话	17792231872

具体应用情况：

- 利用新开发的Φ1.6m大口径点源透过率(PST)测试系统,完成大面积超黑材料的光学性能检测与数据测量任务。通过采用黑色核孔膜材料与超黑膜材料结合的光学结构,有效的降低实验室杂光对测试的影响,确保设备在无杂光条件下PST测试的准确性,中国科学院近代物理研究所研发的超黑膜具有透射率吸收率均达99.99%。总积分辐射(TIS)利用反射率为零(0%)的反射率,利用其独特的1.8×1.8米测试平台与我国自主研发的1.6m大口径点源透过率(PST)测试设备,代表我国设计中的大面积消光板,实现消光板之外的光源收集。解决了当前现场空间有限,无法安装光学检测的问题。
- 核孔膜超黑材料消光板,保证点源透射率在10~10⁻⁴范围内满足精度要求。
- 期间共完成超黑膜透射率的近似值。初步操作和使用PST测试设备的数据精度。此外,影响目前快速搭建超黑膜材料空间可否过验证,使其早日投入使用。

中国科学院光电技术研究所
2021年9月4日

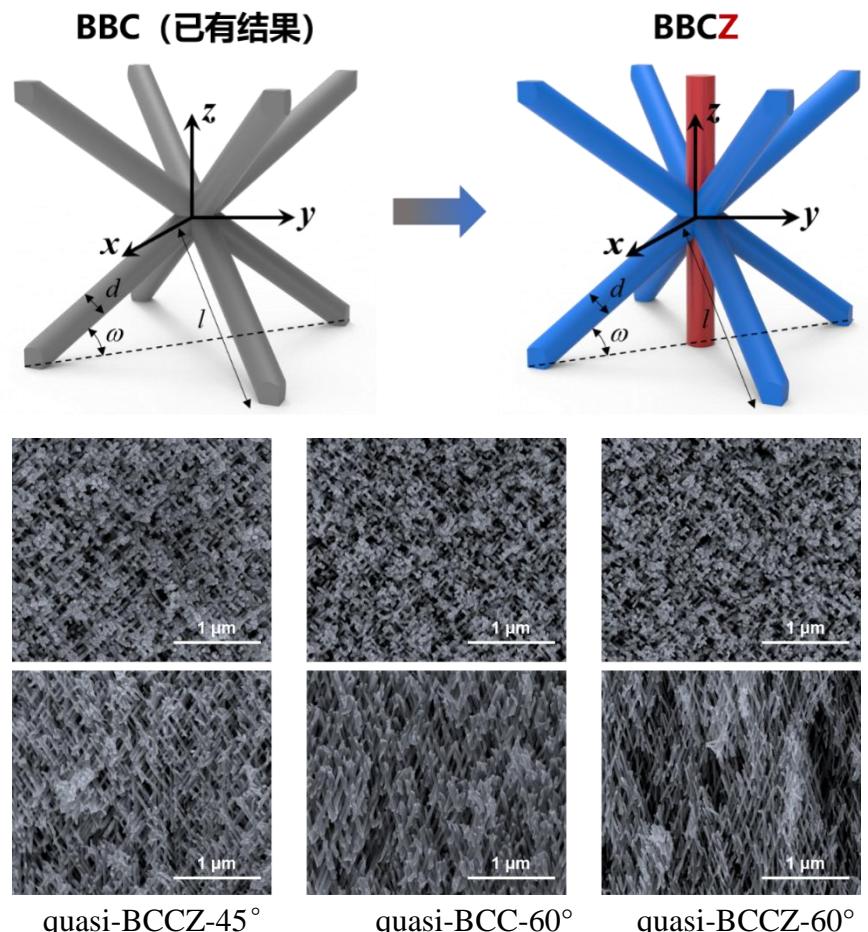
超黑材料首个应用： $\Phi 1.6\text{ m}$ 大口径点源透过率测试系统核孔膜超黑材料消光板

在研项目：

《极限吸光和吸能材料应用关键技术研究》是首批东江实验室重大项目，总投资 1000 万元，计划建成极限吸光材料产业化制备平台，年产能达 1000 m^2 。项目以极限吸光、极限吸能理论研究为基础，结合在杂光抑制、红外定标应用研究，突破应用关键技术，产生重大应用，项目完成时极限吸光材料技术就绪度将达到 8-10 级。

核孔膜力学超材料

将离子径迹技术引入至超材料领域，突破尺寸极限，实现超高能量吸收。通过力学优化增强梁拉伸形变，进一步提升强度，纳米梁直径从 34 nm 进一步降低至 8 nm，最终能量吸收密度有望突破 2×10^8 J/m³，是已有的 2 倍。



通过力学优化增强梁拉伸形变

在研项目

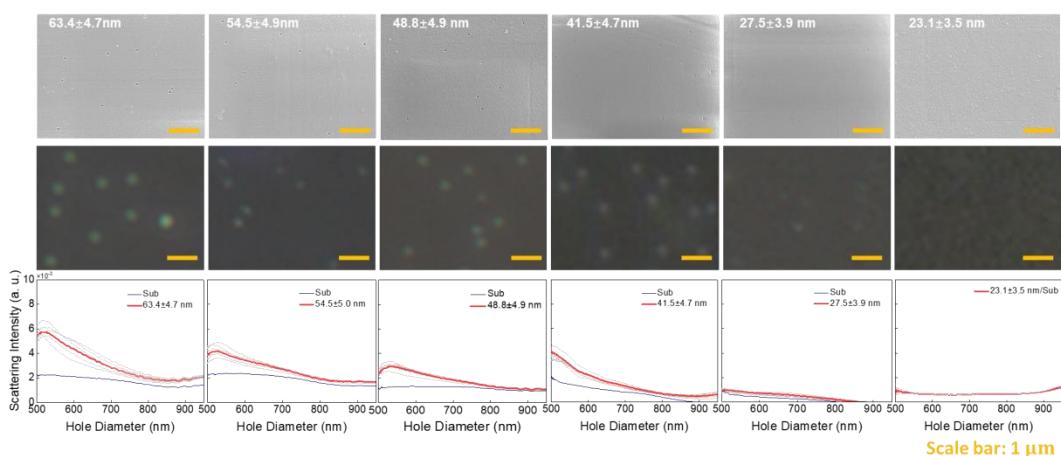
《面向应用的极限吸能材料动态吸能方法与机理研究》项目，总经费 120 万元。针对实际工况中更为常见的高速冲击载荷条件下的动态吸能方法与机理研究仍存在显著空白的关键科学问题，系统开展超

音速弹丸冲击载荷条件下纳米梁晶格材料的动态吸能特性研究，初步揭示了其在冲击载荷下的动态响应规律和能量吸收机制。

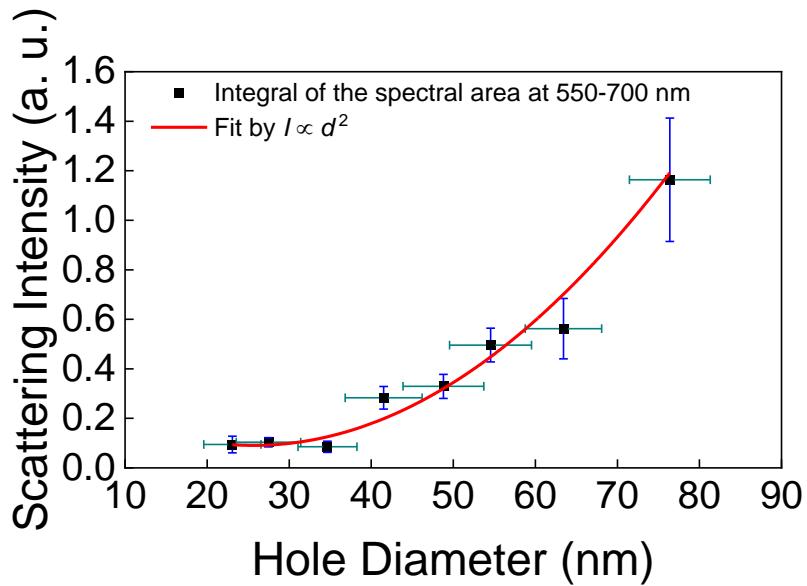
《基于离子径迹技术的极限吸能材料研究》项目，总经费 30 万元。针对极限吸能材料吸能极限需进一步突破的关键科学问题，在前期准体心立方（Quasi-BCC）结构的研究基础上，创新构建了增加垂直支撑的准体心立方（Quasi-BCCZ）新结构，有限元模拟和初步实验结果表明，该结构能量吸收密度有望突破 200 MJ/m^3 ，有望进一步刷新该类材料的吸能极限。

纳米孔径核孔膜快速检测方法研究

提出了暗场光学方法用于纳米孔径核孔膜的快速检测，实现了对孔径低至 41.5 nm 的核孔膜的快速检测，发现了在百纳米尺度孔径(d)-暗场光谱强度(I)的标度关系： $I \propto d^2$ ，可用于孔径的光学评估。方法的可靠性在 25 年 4 月核孔膜生产中已进行验证，相关专利已经获得授权。



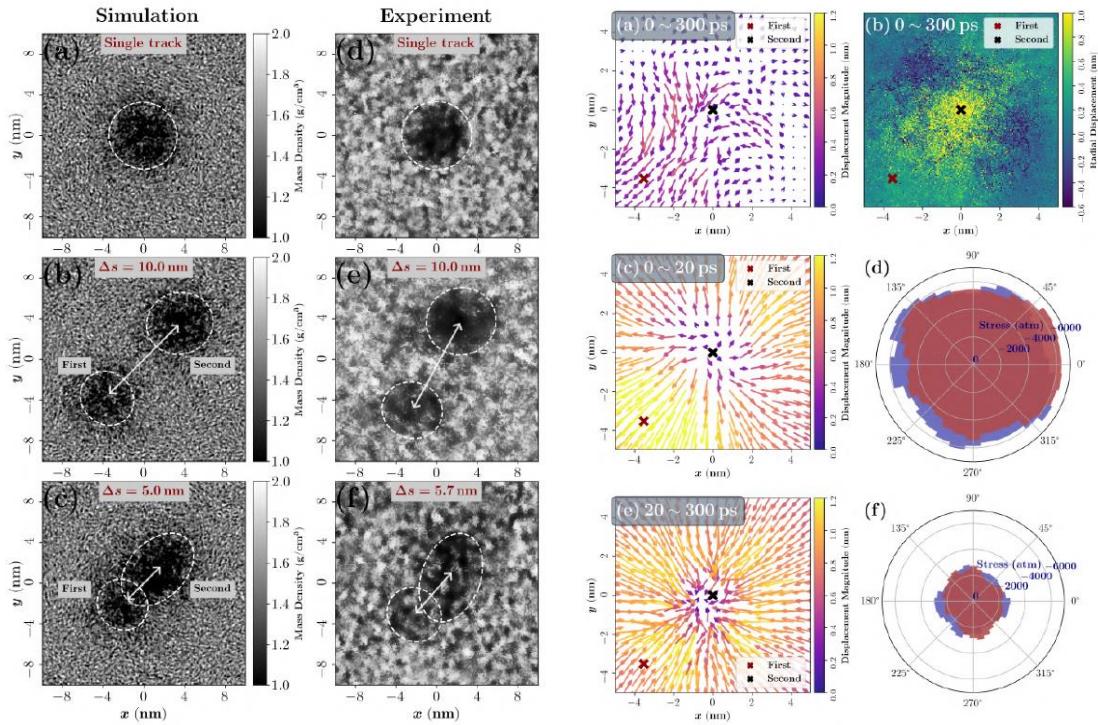
低折射率介电纳米孔光谱图，上：电镜成像；中：暗场成像；下：暗场散射光谱



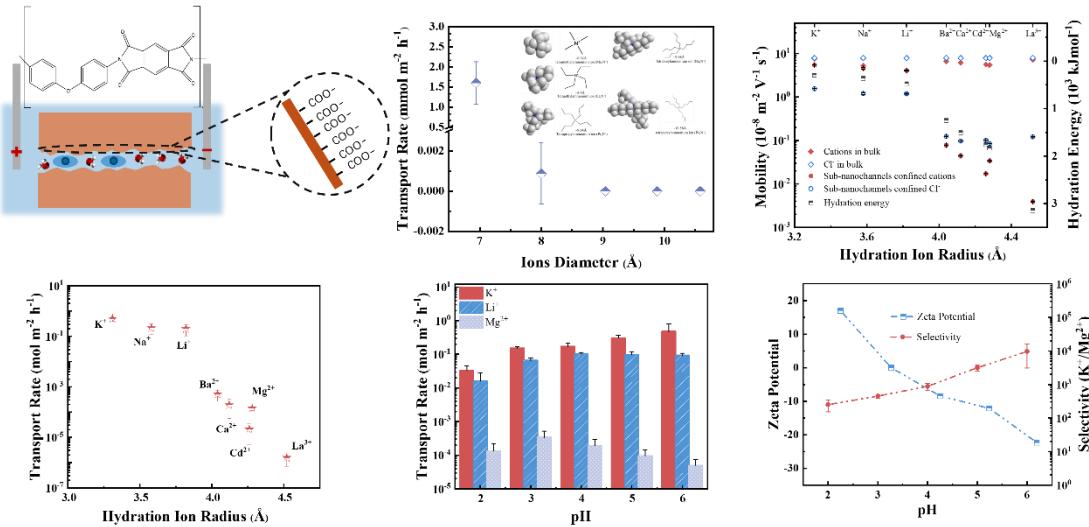
光散射强度与孔径关系图：二者成平方关系（因此散射强度可测定孔径）

埃尺度孔道重离子微孔膜离子分离研究

目前，已成功利用快重离子直接打孔的办法得到埃尺度孔径重离子微孔膜，得到了其离子选择性输运性质，进行了盐湖锂资源提取的实验室验证，其锂镁选择性超过高端进口商业膜。同时对重离子径迹埃尺度孔道的产生机制有了初步的研究结论，利用分子动力学从理论上解释离子径迹的产生过程及结构。此外，利用冷冻透射电子显微镜等先进手段对径迹精细结构进行了表征。



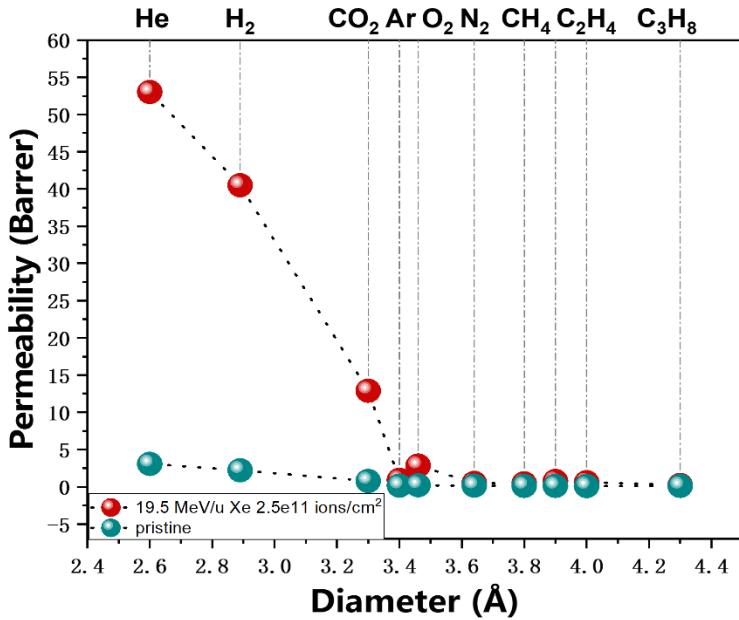
分子动力学模拟径迹的形成过程



埃尺度尺寸排斥与壁面电荷静电作用共同造就了高离子选择性

在已建立的重离子辐照制膜技术基础上，取得了核孔膜气体分离性能的显著提升。下一步将重点开展核孔膜孔道内原位生长金属有机框架（MOF）的研究，构建具有协同分离效应的 MOF/核孔混合膜。该工作旨在利用 MOF 材料的精确筛分特性，进一步提升膜的气体选

择性，同时维持核孔膜固有的高渗透性优势。计划系统研究 MOF 生长工艺，优化复合膜结构，并评估其在 He/CH₄、He/N₂等混合气分离中的性能与长期运行稳定性，推动高性能气体分离核孔膜向实用化发展。



不同直径气体分子在核孔膜中的透气系数

在研项目

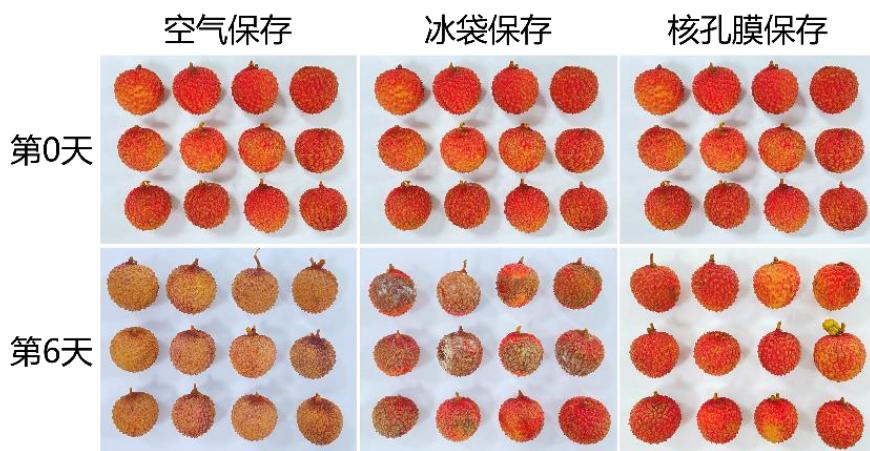
重离子微孔膜埃尺度孔道的产生及其锂离子分离研究项目是惠州市科技创新团队项目，团队等级为国内先进，项目总经费 1000 万元，包括专项 500 万元，自筹 500 万元。本项目将澄清重离子微孔膜埃尺度孔道的形成机理，关键参数与孔道传质机理，为埃尺度孔径重离子微孔膜的离子分离应用建立理论基础和提供关键数据。基于埃尺度孔径重离子微孔膜，探索利用其开展锂资源提取的方法和工艺，建立锂资源提取实验室示范装置。

先进能源科学与技术广东省实验室自立项目-卓越青年项目，总金额为 15 万元，该项目计划完成埃尺度孔径重离子微孔膜的制备以及表面正电荷改性和调控，阐明膜表面正电荷对不同离子输运特性的影响，助力实现高镁锂比盐湖体系下的高效提锂。

核孔膜在氦气回收提纯中的创新应用研究, 总经费 100 万元。围绕氦气分离膜的关键需求，重点开展了基于重离子辐照技术的核孔膜研制与应用研究。通过系统调控聚合物膜微观结构，成功构建了有利于氦气传输的离子潜径迹通道，研制出具有优异氦气分离性能的聚酰亚胺核孔膜。项目建立了离子注量与电子能损可调的辐照工艺，完善了膜微观结构表征方法，明确了氦气分离性能与材料及辐照参数的依赖关系，揭示了氦气在核孔膜中的输运与分离机理。所研发的核孔膜在 He/CH₄和 He/N₂体系下实现了氦气渗透性数十倍到百倍的提升，并兼顾良好选择性，突破了传统聚合物膜在渗透性与选择性之间的制约关系。技术路线具有方法简便、材料普适、性能可调和易于规模化等优势，为我国氦气分离膜的自主研制与天然气提氦产业发展提供了新的技术路径，有望缓解对外依赖，推动气体分离技术实现自主创新与可持续发展。

重离子微孔膜果蔬肉类保鲜研究

目前已实现对厚度为 $12 \mu\text{m}$, 孔密度为 $10^6 \text{ ions cm}^{-2}$ 的辐照膜, 制备不同孔径 (1、2、3、4、6 μm) 的重离子微孔膜, 初步完成透气透湿量测试。同时, 初步进行荔枝的保鲜效果研究, 结果表明重离子微孔膜气调保鲜技术对荔枝保鲜期延长及品质维持具有显著效果。与邮政和顺丰等达成战略合作, 2025 年实现 430 万平米量产, 可供 3 亿个核孔膜果蔬保鲜包装箱使用, 有力支撑了果蔬快递绿色转型。



荔枝在不同保鲜条件下的感官图片。重离子微孔膜保鲜能有效延长荔枝的保鲜期, 同时维持其感官品质。



新闻联播、焦点访谈等央媒报道果蔬保险箱

在研项目

先进能源科学与技术广东省实验室自立项目重点项目, 项目名称“重离子微孔膜在果蔬肉类保鲜中的应用研究”, 项目经费 200 万元。项目通过系统性研究

不同参数下重离子微孔膜的透气透湿特性，构建“膜参数-透气量”理论模型及透湿数据库，匹配果蔬的呼吸强度，实现膜参数的快速筛选。项目拟实现三种及以上果蔬的长效保鲜，保鲜期延长一倍。同时，探索性研究重离子微孔膜对海鲜肉类的保鲜效果。预期项目结束时，完成理论构建从而支撑重离子微孔膜气调保鲜技术的开发，并且带动相关膜材料销售额突破 1000 万元。

通讯地址：兰州市城关区南昌路 509 号

邮政编码：730000

联系人：胡老师

电话：0931-4969204

电子邮件：hulingang@impcas.ac.cn

传真：0931-4969619