



Editorial

MOF 基材料高效分离过程研究进展

任其龙^{a,b}^a Key Laboratory of Biomass Chemical Engineering of the Ministry of Education, College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China^b Institute of Zhejiang University-Quzhou, Quzhou 324000, China

分离和纯化工工艺在石化行业生产高附加值化工原料过程中起到至关重要的作用。这些关键工艺涉及一系列分离和去除杂质的技术，以确保原料满足高效生产过程所需的质量与纯度标准。然而，深冷精馏、吸收和溶剂萃取等传统技术不仅对生态环境有害，而且能源损耗严重。相比之下，基于金属有机框架（MOF）

及其复合膜材料的先进分离技术比传统技术更环保、更节能，已被广泛研究用于突破难分离体系的瓶颈问题。这些新技术依赖于固体多孔介质或可渗透膜，通常由具有纳米级孔隙的多孔材料组成。

利用膜和多孔材料的吸附过程主要依赖于三种分离机制实现分子分离：平衡、动力学和两者的协同组合。在大多数情况下，平衡过程占主导地位，并由热力学亲和力的差异来决定，通过引入强结合位点修饰孔隙表面可以有效增强主客体间的相互作用力。另一方面，动力学分离由扩散系数差异来区分组分，而不是由组分的平衡负载量决定。因此，可以通过微调孔径来改进动力学分离效果。另外，一些分离过程还需要平衡与动力学机制相结合，对吸附剂内部进行协同控制。为了应对这一挑战，本刊邀请全球相关学者就此主题发表文章，共同探讨促进分离工艺发展和应用的创新方法。

气体分离是分离工程领域非常热门的课题。罗格斯大学的李静教授课题组在MOF吸附剂原子级精密设计方面走在世界前列。在本期专题中，李静教授及其同事提出了一种通过引入高极性表面和合适孔径的有效策略提高了低压下乙烷和丙烷的负载量。根据该设计策略成功合成了两种高度稳定的铝基MOFs（MOF-303和MIL-160），从天然气中有效分离和回收乙烷和丙烷。研究表明，碳氢化合物中的碳-氢键通过氢键优先与极性原子或官能团结合，导致丙烷（或乙烷）、甲烷分子与MOF之间存在显著的热力学作用力差异，从而强化了丙烷/甲烷和乙烷/甲烷的分离选择性。

另一个重要的气体分离方法是动力学吸附分离，它利用不同吸附质在材料中的扩散行为差异，优先吸附扩散速率较快的组分。浙江大学鲍宗必教授及其同事报道了一种客体溶剂导向策略对MOF材料孔径进行亚埃级精度调控的方法，并以此实现高效的动力学吸附分离。研究合成的CuFMOF·CH₃OH（表示为CuFMOF-c）材料表现出优异的二氧化碳/甲烷动力学分离性能，这归功于材料具有理想的限制性孔窗尺寸，它能够有效捕获二氧化碳并阻止甲烷的扩散传质，因而有超高动力学选择性和热力学-动力学组合选择性。该工作不但提供了框架孔道尺寸精密调控的方法，且表明适宜的微孔尺寸是实现高效动力学分离的关键，为其他具有尺寸接近和结构相似性的气体混合物的动力学分离提供了重要依据。

在早期的聚合物膜研究中，分离一般通过单一扩散机

制实现，这就面临选择性和渗透性不能同时兼顾的难题。混合基质膜（MMM）将多孔材料与聚合物基质相结合，有望解决该问题并实现高的平衡-动力学组合选择性。多孔材料的可设计性和多样性赋予MMM膜材料可扩展的功能和出色的气体分离性能。在本期专题中，新加坡国立大学赵丹教授及合作者回顾了将多孔材料[包括MOF和离散金属有机笼（MOC）]与聚合物基质合理匹配以改善界面形态和气体分离性能的各种策略，包括调整多孔填料的几何形状，以及通过静电、氢键、配位或共价键在填料与聚合物基质之间建立稳固连接。这些策略为混合基质膜的设计与构筑提供了重要参考。

分离油包水乳液是工业分离过程中的重要难题，传统

的膜破乳技术需要相对较高的跨膜压力（> 0.5 bar）。在此，北京化工大学孟洪教授团队和合作者介绍了一种新的解决方案——一种先进的基于MOF的破乳膜，它使用接触破乳来快速自然地破坏水油界面平衡。论文构筑了具有独特的微纳分级沟槽结构的超疏水ZIF-8@rGO@PDMS/PTFE（ZGPP）复合膜材料，获得了水/固界面的强临界表面张力，从而实现高油通量和出色的油/水分离效果。

本期专题介绍了新型MOF基材料在吸附/膜分离过程中的应用研究进展，以应对传统能源密集型分离过程的技术挑战。笔者希望本专题对推动分离工程技术进步尽绵薄之力。