**靳健 JIN Jian**

国家杰出青年科学基金获得者
Winner of National Science Fund for
Distinguished Young Scholars
中科院苏州纳米技术与纳米仿生
研究所研究员
Professor, Suzhou Institute of
Nano-Tech and Nano-Bionics, CAS

吉林大学博士,2001~2003年日本
东京大学先端科学技术研究中心博士
后;2004~2009年在日本物质材料研究机
构先后任特别研究员、终身职位主任研
究员;2009年4月加入中国科学院苏州
纳米技术与纳米仿生研究所。一直从事
分离膜研究,已发表论文100多篇,总被
他引2400余次,学术成果多次被 Chem.
Rev.、Chem. Soc. Rev.、Prog. Polym. Sci.、
Angew. Chem. Int. Ed.、Adv. Mater. 等
综述论文大篇幅正面引用和评价,并被
NPG Asia Mater. 及 Materials Views(中国)
作为亮点作品介绍。获授权国家发明专
利18项。2010年获江苏省高层次创新
创业引进人才称号,2013年获江苏省杰
出青年科学基金资助,2015年获全国中
帼建功标兵称号。

高分子分离膜——让制造变得更洁净

——访分离膜专家、中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所研究员靳健

Polymer Separation Membranes, Make Our Manufacturing More Cleaner

本刊记者 李丹

李丹:您一直从事分离膜研究,请简要介绍一下分离膜?分离膜材料的核心科学问题是解决高通量与高选择性的矛盾,您是如何实现的?


靳健:具有分子级高精度分离与纯化功能的分离膜材料与技术已成为解决日益恶化的空气/水环境污染和水资源短缺、能源短缺的重要功能材料和核心技术之一,在废污水

净化处理和中水回用、气体纯化与分离等领域具有重要作用。以乳化油处理为例,金属及其合金材料在加工成各种机械零部件过程中都需要使用各种润滑剂,如切削液、冷却液等,然而其废液处理比较困难,经常造成严重的环境污染问题。除了机加,其他产废的主要过程还有冶金、锻造、铸造及热处理等,涉及冷却水的再处

理,防止冷却水变质与腐蚀系统。与传统的乳化油水分离技术相比,基于膜技术的分离效率大大提升,通过试验,一次性分离水中油含量低于10ppm,大大减轻后续处理的负担。

自2009年任职中科院苏州纳米所以来,组建研究团队集中研究分离膜结构与分离性能之间的构效关系。从经典的膜通量 Hagen-Poiseuille 方


程出发,结合 Young-Laplace 方程,提出了从孔隙率、膜临界压力和液体传输路径 3 个参数出发,设计和制备高通量、高选择性高分子分离膜的新思路。(1)通过在刚性聚合物中引入非平面结构单元,实现对膜微孔结构的有效调控,增加自由体积,提高膜孔隙率,提升通量。(2)改变通过施加跨膜压力提升膜通量的传统思路,通过对膜微纳结构和化学性质的协同调控,降低膜临界压力,提高通量。(3)构筑高强度超薄分离膜,缩短分离物质传输路径,实现低驱动力下的超高通量、高选择性分离。

: 膜污染是影响膜性能发挥、阻碍膜技术推广应用的关键和难点之一,您是怎么解决这一难题的?

靳健: 通过构筑微纳复合多级结构,可以有效提升膜浸润性,但对膜抗污染性能的提升有限。提高膜的水合能力,利用水合层来阻隔污染介质与膜直接接触是有效方法之一。我们从提升膜的水合能力的角度出发,利用强水合性亲水高分子对膜表面进行改性,同时,将荷电基团引入到膜中,利用静电排斥和亲水性的协同作用,有效提升膜的亲水性,获得了超亲水膜,并极大改善了膜的抗污染性能,保障了膜在多次循环使用中稳定的通量和截留率。实现了乳液的高效分离,油水乳液经一次分离后,水中油含量小于 10ppm,达到废水排放标准。

但是,仅仅通过对膜表面化学改性仍难以避免膜内部的污染,进而提出了一种以成膜高分子为支撑骨架,水凝胶类强水合性高分子在骨架内灌注,进而形成亲水微区分布的网状结构复合膜的新思路,解决膜内部的污染。以最难处理、膜污染最严重的高粘度原油为测试对象,该复合膜对高粘度油零粘附,一次分离后,水中油含量低于 1ppm,20 次循环分离试验表明,该膜具有理想的抗污染性质和使用寿命。上述研究成果受邀撰

写综述,发表在 NPG Asia Mater., 并受邀为 Royal Society of Chemistry 出版的英文专著 *Smart Materials for Advanced Environmental Applications* 撰写一个章节。

: 超薄膜研究领域面临的挑战是如何兼顾超薄厚度和孔径均一可调,同时保证膜机械强度并实现大面积制备,您和您的团队发展了一系列基于限域反应制备超薄膜的新方法,能否简要介绍一下?


靳健: 商品化的纳滤、超滤、微滤膜由于受到制备方法的限制,需要微米尺度膜厚以维持膜机械强度。我们团队围绕高机械强度、大面积超薄膜的可控制备研究,将传统高分子膜制备过程与新型纳米材料和纳米研究手段有机结合,发展了软模板、二维限域反应、气/液界面聚合等可控制备策略,成功制备了系列膜厚小于 100nm 的高分子超薄膜。

(1) 软模板法: 由两个分子层构成的生物膜是最理想的超薄膜体系。在前期成功制备厚度为 5 nm 的最薄有机固体双分子膜和多种无机超薄膜的基础上,将超薄膜体系扩展到高分子超薄膜的制备中。通过在有机小分子中引入可聚合基团,利用膜内原位交联聚合反应获得了双分子层厚度(小于 10nm)高分子超薄膜。

(2) 二维限域反应法: 为克服软模板法制备的超薄膜种类有限、膜厚难以调控的问题,进而提出了利用二维限域空间反应制备超薄膜的思想。通过设计合成一种可形成 Lamellar 结构的液晶小分子,与水形成 Lamellar/水层/Lamellar 的交替层状有序结构,其中水层的厚度可在几纳米到几百纳米范围内调控,以此水层作为二维限域空间引入聚合反应,成功制备出了系列厚度从几纳米到几十纳米可调的超薄膜。

(3) 气/液界面聚合法: 为获得大面积的聚合物超薄膜,以气/液界面作为反应场,利用界面聚合法,

将聚合反应选择性地控制在气/液界面进行,成功制备了厚度小于 100 nm、面积达到平方厘米级的聚吡咯超薄膜,改善了前两种制备方法中膜面积小的缺点,并通过反应条件的控制,成功实现了膜厚从几纳米到几十纳米的精确调控。

: 通过上述不同策略可以成功制备高分子超薄膜,但是如何调控这些超薄膜的孔道结构和表面浸润性,使其在低压力操作下实现高通量分离应用? 膜的分离机制研究现状如何?

靳健: 我们提出脱离单一的高分子膜体系,以高强度碳纳米管超薄多孔膜作为支撑骨架,对碳管膜表面进行高分子修饰,获得了高分子/碳纳米管复合超薄分离膜。复合膜既保留了碳管膜超薄、多孔结构的特性,又兼具高分子材料的物性和功能。利用修饰的高分子对膜浸润性进行调控,可有效降低超薄膜的临界压力,实现远高于传统高分子膜的超高通量、高选择性分离。

膜物理结构(孔径、孔曲率、膜表面形貌、厚度等)和化学性质(表面电荷、官能团、极性、亲水性等)影响膜分离性能。对膜分离过程微观机制研究,理解和阐明分离物质与孔道表界面间相互作用及其对分离性能的影响规律,是合理设计膜材料和膜结构的基础和关键,对优化膜性能、指导和发展新的分离膜体系具有重要意义。但是,目前对微观分离机制和过程的研究甚少。我们团队拟在分离介质的界面吸附-脱附、聚集、融合、生长、宏观分相等试验数据基础上,构建理论模型开展膜分离过程的微观机制研究,从理论上阐明不同分离介质与膜材料界面之间的相互作用,建立分离膜材料及膜结构和分离结果的效能关系和规律,为设计和优化高分子分离膜体系奠定一定的理论基础。

(责编 古系)