科学通报 2024 年 第 69 卷 第 35 期: 5063 ~ 5064
悦读科学
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

亲水/疏水双膜狭缝: 油水乳液中油水同步回收新技术

杨皓程[1,2], 徐志康[1,2*]

1. 浙江大学, 高分子合成与功能构造教育部重点实验室, 杭州 310058;
2. 浙江大学高分子科学与工程学系, 杭州 310058
* 联系人, E-mail: xuzk@zju.edu.cn

Janus channel of membranes for concurrent oil and water recovery from emulsions

Hao-Cheng Yang[1,2] & Zhi-Kang Xu[1,2*]

[1] *Ministry of Education Key Laboratory of Macromolecular Synthesis and Functionalization, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;*
[2] *Department of Polymer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*
* Corresponding author, E-mail: xuzk@zju.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2024-1232

油水乳液是一种在表面活性剂的作用下, 油相分散于水相或水相分散于油相的稳定油水混合物. 其中的表面活性剂分布于油水两相界面处, 降低了界面张力, 从而有效地稳定了分散相. 油水乳液广泛存在于人类的生产和生活中. 例如, 石油化工、冶金加工等行业产生的含油废水及生活中厨余废水等常以乳液的形式存在; 同时, 在食品、医药等产业中, 许多产品也以乳液的形式存在. 因此, 油水乳液分离技术在环境治理、产物分离等领域均存在广泛的需求.

表面活性剂的存在显著提高了油水乳液的分离难度. 目前常见的油水乳液分离技术包括化学破乳、机械破乳、电聚结和离心分离等. 膜分离技术以其低能耗、高效率等优势, 在油水乳液的分离中得到了广泛关注. 以常见的水包油乳液为例, 超亲水/水下超疏油分离膜被认为是理想的乳液分离膜材料. 其分离机理为: 油滴被尺寸较小的膜孔截留, 而水则通过膜孔渗透. 疏油表面能够有效阻止油滴在表面的黏附与铺展, 从而确保分离膜材料具备优异的抗油特性. 在过去的十多年里, 大量研究集中于超浸润抗油表面的构筑[1]. 近年来, 具有非对称浸润性的亲水/疏水膜(即Janus膜)被研究用于水包油乳液中油滴的破乳分离[2]. 分离过程中, 亲水层面向乳液. 当Janus膜的亲水层较薄且表面带有与乳化剂相反的电荷时, 乳滴会在静电作用下发生破乳; 与此同时, 油滴在亲水表面上呈现较大的水下油接触角, 凸液面产生的Laplace压促使油滴单向传递至疏水亲油层, 从而实现分散油相的捕集与分离.

尽管上述膜分离过程能够分别实现油水乳液中水相或油相的回收, 但它们无法实现油水的同步、完全分离. 在亲水膜的截留机制下, 水相被移除时, 截留侧的乳液逐渐浓缩, 最终得到的是水与浓缩乳液; 而在Janus膜的破乳机制下, 油相被移除时, 乳液浓度会降低, 最终得到的是油与稀释乳液. 其他乳液分离技术也存在类似问题, 它们只能分别分离水或油, 无法完全分离油水. 分离过程中产生的废液需要额外处理, 或者直接排放至环境中. 随着现代化工对“零液排放”和资源全回收目标的日益重视, 研究和发展简单、高效的油水同步分离与回收科学与技术显得尤为重要. 这不仅能够提升分离效率, 还能大幅降低废液处理成本, 推动环境保护和资源可持续利用. 为了实现上述目标, 本课题组[3]最近提出了一种由亲水膜与疏水膜构成的双膜狭缝概念, 并设计了相应的分离器件, 能够实现油水乳液的高效、同步分离, 该研究成果发表于*Science*.

亲水/疏水双膜狭缝的核心设计理念在于亲水膜和疏水膜组成的受限空间. 在分离过程中, 乳液被注入膜与膜之间的狭窄通道, 水相通过亲水膜渗透并被移除, 而分散的油相则在聚并破乳后被疏水膜高效捕获并移除. 研究表明, 狭缝宽度在乳液分离过程中起到了至关重要的作用. 在相同的实验条件下, 当狭缝宽度从125 mm缩小至4 mm时, 水的回收率从19%提升至75%, 油的回收率则从5%提高至97%. 在这一过程中, 狭缝的作用主要体现在两个方面: 首先, 随着水相的移除, 狭小空间内乳液浓度迅速升高, 从而增加了乳滴间的碰撞概率, 使之聚并破乳; 其次, 狭缝宽度的减小使得壁面所起到的作用增大, 油滴在狭窄空间内的碰撞概率也显著提高. 二者共同强化了乳滴在狭缝中“浓缩-聚并-破乳-移除”这一系列过程, 从而有效提升了乳液分离效率.

© 2024《中国科学》杂志社

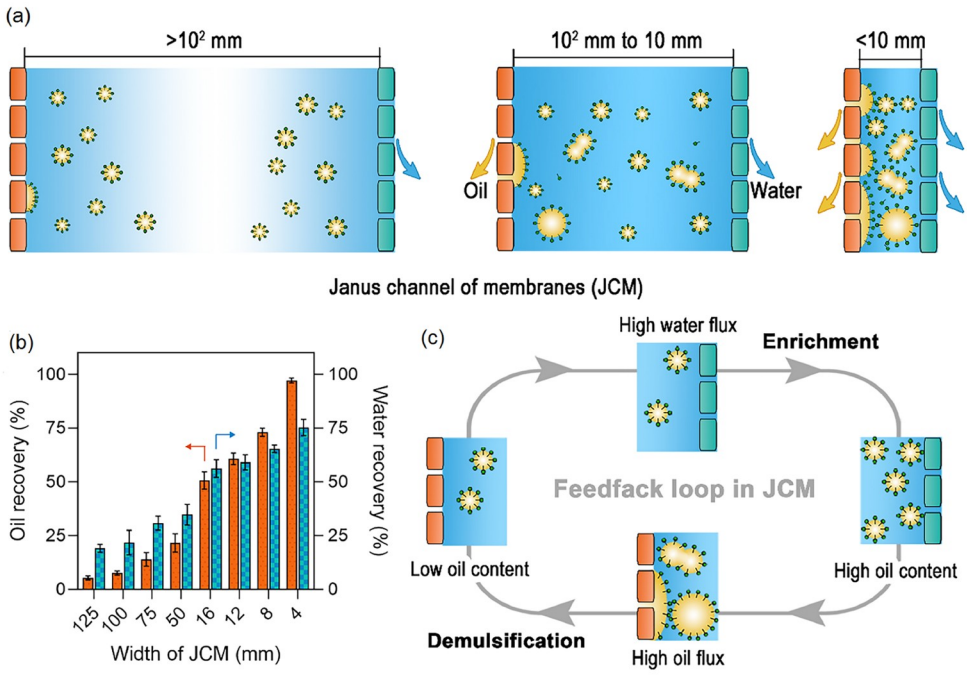


图 1 (网络版彩色)亲水/疏水双膜狭缝及反馈机制[3]. (a) 亲水/疏水双膜狭缝示意图; (b) 狭缝宽度与油水回收率的关系; (c) 双膜狭缝中的反馈机制. Copyright © 2024 AAAS

Figure 1 (Color online) Janus channel of membranes and feedback loop[3]. (a) Schematic illustration of Janus channels in membranes. (b) Water and oil recovery as a function of channel width. (c) Feedback loop during the separation process in Janus channels. Copyright © 2024 AAAS

值得一提的是, 与传统的单膜分离方法不同, 双膜狭缝具有独特的反馈机制. 在双膜狭缝结构中, 水相优先从亲水膜侧透过, 导致体系中油滴浓度的提升; 油浓度的增加促进了油滴的聚并和破乳过程, 从而使疏水膜能够更有效地捕获油滴, 进而提升油相的通量. 另一方面, 随着油相的持续移除, 体系中的油浓度降低, 从而减弱了浓差极化对水渗透的抑制作用. 二者相辅相成, 在一定程度上解决了传统分离方法中由于组分浓度单调变化导致性能下降的问题. 这一反馈机制在实际操作中展现出了显著的优势, 特别是在处理含有较高表面活性剂并且更加稳定的乳液时. 与单膜狭缝相比, 双膜狭缝结构能够提供更加优异的分离性能. 值得一提的是, 这种反馈机制在化工分离过程中具有更加广泛的实用价值. 如果构成狭缝的两张膜能够分别透过体系中的不同组分, 那么这种设计能够有效克服单一组分透过、另一组分截留所导致的浓差极化以及由此引起的性能下降问题. 通过合理调节膜的选择性和透过性, 双膜狭缝结构不仅能实现更加高效的组分分离, 还能够在较长时间的运行中保持稳定的分离性能, 为复杂体系中的分离过程提供了更为有效的解决方案[4].

综上所述, 基于亲水/疏水双膜狭缝的分离原理和技术为油水乳液的同步、高效回收提供了全新的解决方案. 通过简单而巧妙的器件设计, 该技术能够高效地回收水和油, 且回收率显著高于传统膜分离技术. 与此同时, 该技术对膜材料的要求较低, 商品化的亲水膜和疏水膜均可用于膜组件的构建, 具有良好的商业化应用前景. 这一创新方法不仅为油水乳液的处理提供了有效手段, 还为相关工业领域中的资源回收与环境保护技术的开发提供了新理论基础与设计思路.

推荐阅读文献

1 Liu Z, Si Y, Yu C, et al. Bioinspired superwetting oil–water separation strategy: Toward the era of openness. Chem Soc Rev, 2024, 53: 10012–10043

2 Yang J, Li H N, Chen Z X, et al. Janus membranes with controllable asymmetric configurations for highly efficient separation of oil-in-water emulsions. J Mater Chem A, 2019, 7: 7907–7917

3 Guo X Y, Zhao L, Li H N, et al. Janus channel of membranes enables concurrent oil and water recovery from emulsions. Science, 2024, 386: 654–659

4 Yang X, Jandaghian M H. A two-faced membrane channel. Science, 2024, 386: 621–622