北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

纳米碳酸钙调控制备的多孔再生纤维素纳滤膜用于离子液体高效回收

王婕 李鑫 许凤

Porous regenerated cellulose nanofiltration membrane enabled by nano calcium carbonate modulation for high-efficiency ionic liquid recovery

Wang Jie, Li Xin, Xu Feng

引用本文:
王婕, 李鑫, 许凤. 纳米碳酸钙调控制备的多孔再生纤维素纳滤膜用于离子液体高效回收[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(8):223–232. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260119
Wang Jie, Li Xin, Xu Feng. Porous regenerated cellulose nanofiltration membrane enabled by nano calcium carbonate modulation for high–efficiency ionic liquid recovery[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8):223–232. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260119

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260119

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

纤维素电纺纳米纤维柔性表皮电极制备与性能
Preparation and property of cellulose electrospun nanofibers–based flexible epidermal electrodes
北京林业大学学报, 2024, 46(9): 132–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240161

酶解木质基分级多孔碳的制备及其电化学性能
Preparation and its electrochemical properties of enzymatically hydrolyzed wood–based hierarchical porous carbon
北京林业大学学报, 2024, 46(10): 136–143. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240026

层状双金属氢氧化物（LDHs）增强低长径比纳米纤维素复合膜：低成本高性能食品包装材料
Layered double hydroxides (LDHs) reinforced low aspect ratio nanocellulose composite films: a low–cost, high–performance material for food packaging
北京林业大学学报, 2026, 48(2): 15–25. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250224

Janus氧化纤维素壳聚糖功能膜的制备及其性能
Preparation and performance of Janus oxidized cellulose–chitosan functional films
北京林业大学学报, 2025, 47(8): 173–181. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250169

具有多刺激响应行为和自修复能力的纤维素纳米晶增强聚乙烯醇水凝胶
Cellulose nanocrystal reinforced polyvinyl alcohol hydrogels with multi–stimulus responsive behavior and self–healing properties
北京林业大学学报, 2025, 47(6): 152–161. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250104

低共熔溶剂预处理麦草制备含木质素纳米纤维素和薄膜
Fabrication of lignin containing nanocellulose and films from wheat straw pretreated by deep eutectic solvent
北京林业大学学报, 2024, 46(11): 141–147. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240260

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260119

纳米碳酸钙调控制备的多孔再生纤维素纳滤膜用于离子液体高效回收

王 婕 李 鑫 许 凤
（北京林业大学材料科学与技术学院，林木生物质化学北京市重点实验室，林木生物质材料与能源教育部工程研究中心，北京 100083）

摘要:【目的】离子液体（ILs）作为纤维素的良溶剂，其高效回收是绿色循环利用的关键。现有纳滤回收技术存在 ILs 截留率低且膜强度差，不可降解等问题。本研究通过在高强度再生纤维素膜基础上造孔，优化孔隙结构，开发绿色可降解纳滤膜，旨在实现 ILs 高效回收。**【方法】**本研究以纤维素为原料、ILs 为溶剂，引入纳米碳酸钙（NCC）作为致孔剂，利用溶解再生耦合气体原位发泡技术制备多孔再生纤维素基底膜（PRCMs）。通过调控界面聚合条件，在 PRCMs 表面构建聚酰胺分离层，制备多孔再生纤维素基纳滤膜（PRC-NFs），进而分析膜材料的孔径、比表面积、化学结构、表面形貌、力学性能、表面电荷特性与 ILs 回收性能。**【结果】**（1）NCC 添加量可有效调控 PRCMs 的孔隙结构、力学性能与水通量，当添加量为 0.30% 时，得到的多孔基底膜 PRCM2 综合性能最优（拉伸强度 52.5 MPa，水通量 5.41 L/(m^2·h)）。（2）在 PRCM2 表面进行界面聚合，构筑了 PRC-NFs。在无水哌嗪（PIP）质量分数为 0.5%、1,3,5-均苯三甲酰氯（TMC）质量分数为 0.30%、聚合时间为 3 min 的条件下，PRC-NF6 表面呈现出致密均匀的褶皱网状结构、孔径最小（1.65 nm）且表面电负性最强。（3）PRC-NF6 对 ILs 的截留率为 49.22%，水通量为 4.25 L/(m^2·h)，优于已报道的未造孔高强度再生纤维素纳滤膜（截留率提高 1.88 倍）。**【结论】**本研究采用溶解再生–气体发泡–界面聚合法，成功制备了孔隙结构可控、高 ILs 截留率的多孔再生纤维素基纳滤膜，实现了 ILs 绿色高效回收。

关键词：绿色可降解纳滤膜；多孔再生纤维素；纳米碳酸钙致孔；气体原位发泡；界面聚合；孔隙结构调控；离子液体回收
中图分类号：TQ351.01；TQ352.79；TQ028.8 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)08−0223−10
引文格式：王婕，李鑫，许凤. 纳米碳酸钙调控制备的多孔再生纤维素纳滤膜用于离子液体高效回收［J］. 北京林业大学学报，2026，48(8)：223−232. Wang Jie, Li Xin, Xu Feng. Porous regenerated cellulose nanofiltration membrane enabled by nano calcium carbonate modulation for high-efficiency ionic liquid recovery[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8): 223−232.

Porous regenerated cellulose nanofiltration membrane enabled by nano calcium carbonate modulation for high-efficiency ionic liquid recovery

Wang Jie Li Xin Xu Feng
(School of Materials Science and Technology, Beijing Key Laboratory of Lignocellulosic Chemistry, Engineering Research Center of Forestry Biomass Materials and Energy, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] As an effective solvent for cellulose, ionic liquids (ILs) play a crucial role in green recycling through efficient recovery. However, current nanofiltration recovery technologies face challenges such as low ILs retention rates, poor membrane strength, and non-biodegradability. This study focuses on

收稿日期: 2026−03−13 **修回日期:** 2026−04−17
基金项目: 国家重点研发课题（2023YFD2201903），国家自然科学基金项目（U22A20422、22308027），北京林业大学“5·5 工程”科研创新团队项目（BLRC2023B01）。

第一作者: 王婕。主要研究方向：生物质能源与材料。Email: JWjie@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。
责任作者: 李鑫，讲师。主要研究方向：生物质高值化利用。Email: xinli@bjfu.edu.cn 地址：同上。许凤，博士生导师，教授。主要研究方向：生物质高值化利用。Email: xfx315@bjfu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

pore formation based on high-strength regenerated cellulose membranes to optimize pore structure and develop green, biodegradable nanofiltration membranes, aiming to achieve efficient ILs recovery. [**Method**] This study utilized cellulose as the raw material and ILs as the solvent, incorporating nano calcium carbonate (NCC) as a porogen to prepare porous regenerated cellulose substrate membranes (PRCMs) through dissolution-regeneration coupled with gas in-situ foaming technology. By regulating the interface polymerization conditions, a polyamide separation layer was constructed on the surface of PRCMs to prepare porous regenerated cellulose-based nanofiltration membranes (PRC-NFs). The pore size, specific surface area, chemical composition, surface morphology, mechanical properties, surface charge characteristics and ILs recovery performance of the membrane materials were analyzed. [**Result**] (1) The addition amount of NCC can effectively regulate the pore structure, mechanical properties, and water flux of PRCMs. When the addition amount is 0.30%, the porous basement membrane PRCM2 exhibits optimal comprehensive performance (tensile strength of 52.5 MPa, water flux of 5.41 L/(m^2·h)). (2) Interface polymerization was conducted on the surface of PRCM2 to construct PRC-NFs. Under conditions of 0.5% anhydrous piperazine (PIP) by mass fraction, 0.30% trimesoyl chloride (TMC) by mass fraction, and a polymerization time of 3 minutes, the PRC-NF6 surface exhibited a dense and uniform wrinkled network structure with the smallest pore size (1.65 nm) and the strongest surface electronegativity. (3) The retention rate of PRC-NF6 for ILs was 49.22%, with a water flux of 4.25 L/(m^2·h), demonstrating superior performance compared to previously reported non-porous high-strength regenerated cellulose nanofiltration membranes (with a rejection rate increase of 1.88-fold). [**Conclusion**] In this study, a porous regenerated cellulose-based nanofiltration membrane with controllable pore structure and high ILs rejection rate was successfully prepared by dissolution regeneration-gas foaming-interfacial polymerization method, and the green and efficient recovery of ILs was realized.

Key words: green degradable nanofiltration membrane; porous regenerated cellulose; nano-calcium carbonate pore-forming; in-situ gas foaming; interfacial polymerization; pore structure regulation; ionic liquid recovery

纤维素是自然界中分布最广、储量最大的绿色生物质原料，在纺织、造纸、医学等多个领域应用广泛[1−2]。传统纤维素加工路线繁琐，污染严重，开发环境友好且高效的溶解体系成为推动纤维素工业化应用的关键[3]。离子液体（ionic liquids，ILs）作为新型绿色溶剂，具有蒸气压低、溶解能力强、结构可设计性等优势，可有效解决传统溶剂的弊端[4]。但 ILs 生产成本较高，若其应用过程中产生的含 ILs 废水直接排放，会造成资源浪费与环境污染，因此对 ILs 进行高效回收与循环利用，是实现其绿色可持续应用的关键。

目前 ILs 回收方法主要有减压蒸馏法、萃取法、吸附法和膜分离法等[5]。其中，减压蒸馏、萃取等传统非膜法手段存在能耗高、二次污染严重等问题。纳滤膜分离技术凭借运行能耗低、分离选择性强、过程无相变等优势，成为最具工业化潜力的回收技术之一[6]。尽管 NF270、NF90 等商业纳滤膜已在 ILs 水溶液浓缩领域实现规模化应用[7−8]，但这些传统石油基纳滤膜存在不可生物降解、生物相容性差等固有缺陷[9]。因此，开发具有环境友好的新型纳滤膜材料对降低环境污染、推动 ILs 绿色循环利用具有重要意义。

再生纤维素基纳滤膜因兼具原料可再生、生物可降解、亲水性优良等优点而备受关注。现有研究已围绕再生纤维素基纳滤膜的制备与应用开展了系列工作，其常用制备方法包括原位共混法、相转换法和界面聚合法等[10]。其中，界面聚合法工艺因可控性强、能形成致密且高性能的分离层而备受青睐。Wang 等[11]通过纤维素固相角化来调控再生纤维素基膜的孔隙结构，松散再生纤维素基纳滤膜 M-75% 对盐和染料具有较强的分离能力（刚果红截留率 98.81%，Na_2SO_4、NaCl 的截留率分别为 5.31%、3.58%），但其拉伸强度仅为 1.38 MPa。Li 等[12]在竹再生纤维素膜表面进行界面聚合，制备了亲水性再生纤维素纳滤膜，对 500 ppm 的 NaCl 溶液进行盐水分离，截留率为 40%。郑文秋等[13]通过设计不同反溶剂，采用界面聚合法制备出高强度再生纤维素基纳滤膜，RC-NF-6 的水通量为 4.30 L/（m^2·h），截留率为 26.18%。上述研究虽然改善了传统纳滤膜难降解、力学强度不足[14]等缺陷，但多聚焦于染料脱除与盐

水分离领域，且纳滤性能低，特别是针对 ILs 回收体系的纤维素基纳滤膜结构设计与性能提升仍有待深入研究。孔隙结构是决定纳滤膜水通量、截留性能的关键因素，原位发泡法因其工艺简单、孔结构可控、环境友好等优势，逐渐成为优化孔隙结构的重要手段[15]。纳米碳酸钙（nano calcium carbonate，NCC）无毒环保、成本低廉，在膜成型过程中可与酸反应原位生成 CO_2，实现发泡致孔，为调控纤维素膜孔隙结构提供了可行途径[16]。

基于上述研究背景和现状，本研究拟采用 ILs 高效溶解纤维素，以 NCC 为致孔剂，通过酸引发 CO_2 原位发泡，制备多孔再生纤维素基底膜（porous regenerated cellulose substrate membranes，RCMs）；在此基础上，通过调控界面聚合反应条件，在基膜表面构建致密的分离层，进而构筑高性能多孔再生纤维素基纳滤膜（porous regenerated cellulose-based nanofiltration membranes，PRC-NFs）。本研究将系统分析 NCC 添加量、界面聚合参数对膜结构与性能的影响规律，旨在开发高分离性能的绿色可降解 PRC-NFs，以期实现 ILs 高效低能耗回收，为 ILs 的循环利用提供新的绿色环保型纳滤膜材料。

1　材料与方法

1.1　材　料

本研究所用纤维素浆板原料（聚合度 800）由新疆中泰纺织集团有限公司提供。1,8-二氮杂双环 [5.4.0] 十一烯（纯度 99%）、乙氧基乙酸（纯度 98%）、正己烷（纯度 99%）、纳米碳酸钙（NCC，粒径 50 nm）、乙醇（纯度 99.7%）、乙酸（纯度 99%）、无水哌嗪（piperazine，PIP，纯度 99%）和 1,3,5-均苯三甲酰氯（trimesoyl chloride，TMC，纯度 99%），均购自上海麦克林生物化学有限公司。根据前期工作[17]，合成 ILs：1,8-二氮杂双环 [5.4.0] 十一烯乙氧基乙酸，同时用于纤维素溶解与溶剂回收实验。

1.2　试样的制备

1.2.1　多孔再生纤维素基膜的制备

分别将质量分数为 0.06%、0.30%、0.60% 的 NCC 加入 ILs 中，于 80 ℃ 下搅拌 10 min 至均匀分散，调节体系中纤维素的质量分数为 6.0%，在 80 ℃ 下持续搅拌直至偏振光显微镜（Axio Imager 2，Carl Zeiss AG）下观察不到明显未溶纤维素颗粒，此时纤维素完全溶解于 ILs，制得均匀的纤维素铸膜液。将铸膜液均匀涂覆于洁净玻璃板上，先置于乙醇中快速预凝固，此时膜未完全再生，随后转移至 1 L 体积分数 10% 的乙酸水溶液中，NCC 与乙酸充分反应实现原位 CO_2 发泡造孔，再将凝固后的湿膜置于去离子水中浸泡 48 h 以脱除残留溶剂，洗净后取出室温干燥，制得 PRCMs。根据 NCC 添加量由低到高，依次命名为 PRCM1、PRCM2、PRCM3。以相同工艺制备未添加 NCC 的再生纤维素膜，记为 RCM，作为空白对照样。

1.2.2　多孔再生纤维素基纳滤膜的制备

以制备的 PRCMs 为支撑层，基于界面聚合反应原理，调控各项反应参数（表 1），在其表面构建聚酰胺选择分离层，制得多孔再生纤维素基纳滤膜（PRC-NFs）[18]。实验制备步骤如下：先配置 0.5% ~ 3.0% 的 PIP 水相单体溶液与 0.05% ~ 0.30% 的 TMC 正己烷有机相单体溶液，将 PRCMs 完全浸没于 PIP 水溶液中，静置 30 min，使反应单体充分吸附于膜表面，垂直悬挂晾干后平整固定于洁净玻璃板上，均匀滴加配置好的 TMC 正己烷溶液，保持膜表面润湿并完成 1 ~ 5 min 的界面聚合反应，最终经 60 ℃、30 min 热处理完成交联固化，得到 PRC-NFs。

1.3　性能表征

1.3.1　比表面积和孔径

为探究 NCC 添加量及界面聚合条件对孔结构的影响，采用比表面积和孔径分析仪（BSD-PM2，北京市贝石德仪器科技有限公司）测定 PRCMs 及 PRC-NFs 的比表面积和孔隙特性。将绝干状态的样品裁剪为 5 mm × 5 mm 的碎片，装入样品管后置于 120 ℃ 真空条件下脱气 6 h，充分脱除样品中的水分与杂质；随后在 77 K 液氮环境下进行 N_2 吸附−脱附实验，基于 BET 模型计算样品的比表面积，同时测定样品的孔径分布特征。

1.3.2　力学性能

为评价 NCC 添加量对力学性能的影响，采用电子万能试验机（E43.104，MTS SYSTEMS）测定 PRCMs 的力学性能。将 PRCMs 样品剪裁为 40 mm × 15 mm

表 1　多孔再生纤维素基纳滤膜（PRC-NFs）界面聚合参数

Tab. 1　Interface polymerization parameters of PRC-NFs

PRC-NFs	PRC-NF1	PRC-NF2	PRC-NF3	PRC-NF4	PRC-NF5	PRC-NF6
PIP质量分数/%	0.5	3.0	0.5	0.5	0.5	0.5
TMC质量分数/%	0.15	0.15	0.15	0.15	0.05	0.30
聚合时间/min	3	3	1	5	3	3

的矩形试样，在室温环境下进行拉伸测试，设定拉伸速率为 100 mm/min，标称标距长度为 20 mm。

1.3.3 润湿性能

为探究 NCC 添加量及界面聚合条件与膜表面润湿性能的关系，采用接触角测量仪（SL200KS，Kino）测定 PRCMs 及 PRC-NFs 的表面水接触角（Water contact angle，WCA）。将绝干状态的样品裁剪为 1 cm × 2 cm 的矩形试样并紧密固定于仪器载物台，将去离子水滴落至样品表面，测定 WCA。

1.3.4 表面形貌

为直观观测纳滤膜的微观形貌，采用扫描电子显微镜（SU-8000，日立）观察 PRC-NFs 的表面形貌。测试前将样品置于 60 ℃ 恒温烘箱干燥 6 h 以上以彻底去除水分，再利用导电胶将干燥后的样品固定于样品台上，经离子溅射仪喷金处理提高导电性，在 20 kV 加速电压下进行微观形貌观察并拍照。

1.3.5 化学结构表征

为分析样品化学结构变化、初步验证界面聚合反应的发生，采用衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪（Tensor27，Bruker）对纤维素浆板、PRCMs 和 PRC-NFs 的化学结构进行表征。将绝干状态的三种样品裁剪为 1 cm × 1 cm 的正方形膜，测试过程中设定分辨率为 4 cm^{-1}，扫描次数 32 次，波数范围控制在 400 ~ 4 000 cm^{-1}。

为分析纳滤膜化学组成与元素结合状态，进一步验证聚酰胺分离层的成功制备，采用 X 射线光电子能谱仪（X-ray photoelectron spectroscopy，XPS）（K-Alpha，Thermo）对 PRC-NFs 进行测试。

1.3.6 Zeta 电位

为明确纳滤膜的表面电荷特性，采用电泳分析仪（SurPASS，Anton Paar）测定 PRC-NFs 表面的 Zeta 电位。测试前将 PRC-NFs 裁剪成 10 mm × 20 mm、厚度小于 1 mm 的试样。以 50 mmol/L 的 NaCl 溶液作为背景电解质，并用 1 mol/L 的 HCl 与 1 mol/L 的 NaOH 溶液调整溶液 pH 为 3 ~ 10，测定不同 pH 条件下样品 Zeta 电位的变化。

1.3.7 ILs 回收性能

为考察 PRC-NFs 对 ILs 的分离回收能力，在有效膜面积为 22.05 cm^2 的实验室级错流膜过滤设备（SF-MA-MP，杭州赛菲膜分离技术有限公司）中，针对质量分数为 1.0% 的 ILs 水溶液进行回收。具体实验操作如下：首先将待测膜装配于过滤单元内，随后向储料罐倒入配置好的 1.0% 的 ILs 水溶液；室温条件下，待系统压力稳定后，收集渗透液，用于后续浓度分析。在 300 nm 处，采用紫外–可见光光谱仪（UV-2550，Shimadzu）测定 ILs 的吸光度，用于计算渗透液中 ILs 的质量分数。通过式（1）计算 PRC-NFs 对 ILs 的截留率 R（%），通过式（2）计算 PRCMs 和 PRC-NFs 对 ILs 水溶液的水通量 F（L/(m^2·h)）。以上实验均设置 3 次平行重复，最终数据取 3 次平行实验的平均值，误差以标准差表示。

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100\% \tag{1}$$

$$F = \frac{V}{\Delta t \cdot A} \tag{2}$$

式中：C_p 为渗透液中 ILs 的质量分数，%；C_f 为进料液中 ILs 的质量分数，%；V 为过滤时间 Δt 内收集的渗透液体积，L；Δt 为收集渗透液时间，h；A 为膜的有效过滤面积，m^2。

2 结果与分析

2.1 不同 NCC 添加量对多孔再生纤维素基膜结构和性能的影响

通过调控致孔剂 NCC 的添加量，可实现对 PRCMs 孔隙结构与综合性能的定向调控。作为基底，膜材料需具备合适的比表面积和孔径，以保证水通量和截留率均处于较高水平[19]。所有 PRCMs 的比表面积均显著高于未加致孔剂的 RCM（0.31 m^2/g），且随 NCC 添加量增加呈持续上升趋势，PRCM1、PRCM2、PRCM3 的比表面积依次为 0.54、0.61、2.19 m^2/g，其中 PRCM2 的比表面积接近 RCM 的 2 倍，PRCM3 的比表面积远大于其他基膜（图 1a）。这是因为 NCC 添加量增加，使酸水洗后在膜基体中留下的致孔位点增多，孔隙数量显著增加，进而使得膜的比表面积持续增大[20]。而 PRCMs 的孔径呈现先减小后增大的变化规律，当 NCC 添加量由 0 增加为 0.06% 时，PRCM1 的孔径与 RCM 相比有所下降，由 2.99 nm 降低为 2.26 nm，当 NCC 添加量由 0.30% 增加至 0.60% 时，孔径从 3.36 nm 变为 3.65 nm。这可能与铸膜液中 NCC 的分散状态密切相关。低添加量时，NCC 均匀分散，酸引发 CO_2 发泡后在膜内形成细小孔隙，孔径减小；高添加量时，NCC 分子之间作用力增强，难以保持均匀分散状态，发生局部团聚，酸作用后形成大孔结构，导致孔径增大[21]。

在实际应用中，基膜的力学强度至关重要，其力学性能直接决定了最终纳滤膜在使用过程中的整体稳定性。因此，制备力学性能优异的支撑层，是保证纳滤膜具备良好耐用性与长期运行稳定性的重要前提[22]。随着 NCC 添加量的增加，膜的拉伸强度呈现先升高后降低的趋势，而断裂伸长率则持续下降（图 1b）。未添加 NCC 的空白组 RCM 拉伸强度为 32.0 MPa，断裂伸长率为 19.9%；当 NCC 添加量为

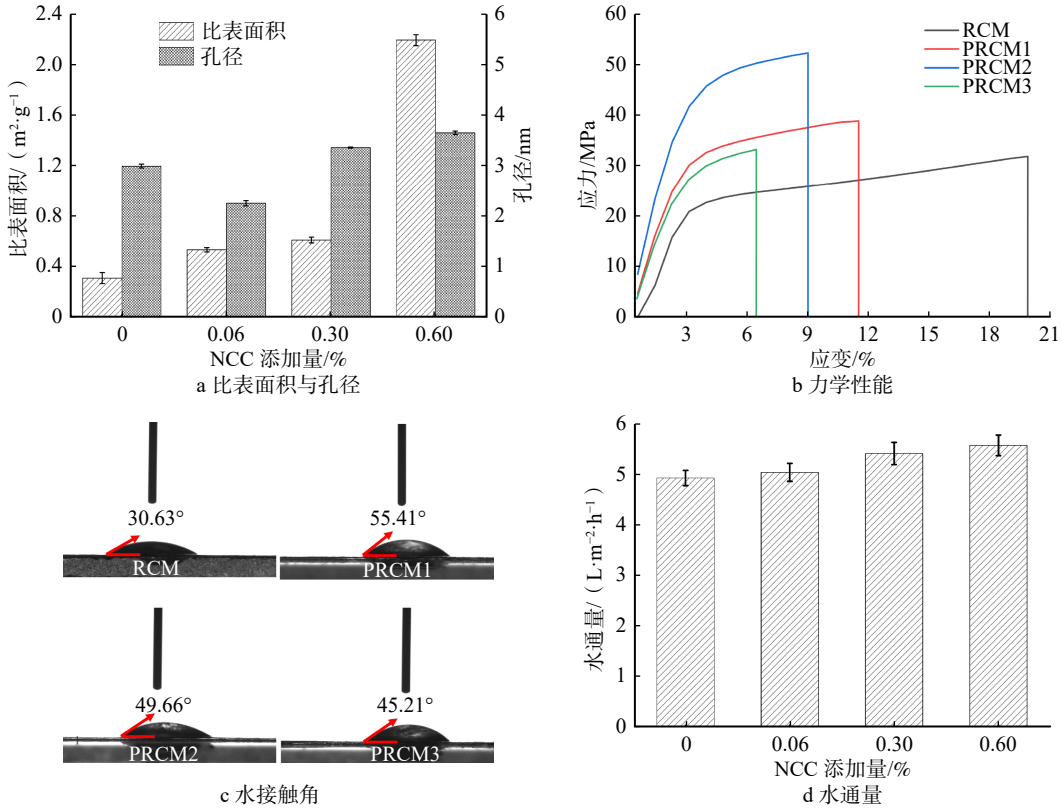


图 1　多孔再生纤维素基膜(PRCMs)的结构和性能

Fig. 1　Structure and properties of PRCMs

0.06% 时，PRCM1 的拉伸强度增大为 39.0 MPa，断裂伸长率降至 11.6%；进一步添加 NCC 至 0.30%，PRCM2 的拉伸强度达到最大值 52.5 MPa，断裂伸长率减小为 9.1%；而当 NCC 添加量为 0.60% 时，PRCM3 的拉伸强度和断裂伸长率分别降低为 33.4 MPa 和 6.5%。这是由于低 NCC 添加量下，体系形成的孔小且分布均匀，对膜整体骨架的破坏程度较低，膜结构更加致密规整，因此拉伸强度有所提升；当 NCC 添加量进一步提高时，过量的 NCC 易发生团聚，在膜内部形成尺寸较大、分布不均的孔，甚至产生局部缺陷。这些大孔与缺陷成为应力集中点，大幅削弱膜的结构完整性与承载能力，进而导致拉伸强度明显下降。与此同时，由于 NCC 的刚性作用使膜体刚性增加，且孔的引入也降低了材料的延展性，高孔隙率使膜的可变形空间持续减少，因此断裂伸长率随 NCC 增加持续下降[23]。上述结果表明，适量添加 NCC(0.30%)可在实现基膜孔隙调控的同时提升其力学强度，实现孔隙结构与力学性能的协同优化；过量添加 NCC 则会因团聚致孔破坏膜体结构，造成力学性能劣化。

未添加 NCC 的空白样 RCM 的 WCA 最小，而引入 NCC 致孔后的 PRCMs 的 WCA 均显著高于 RCM，且 PRCMs 的 WCA 随 NCC 添加量的增加而减小(图 1c)。RCM 表面亲水基团羟基暴露充分，且膜结构致密均匀，因此 WCA 最小；引入 NCC 致孔后，膜表面粗糙度增大，且部分孔会阻碍水分子铺展，使得 PRCMs 的 WCA 均显著高于 RCM。随着 NCC 的增加，孔径与比表面积不断增大，为水分子渗透提供了更多通道，同时膜表面羟基位点暴露程度有所提升，因此 WCA 随 NCC 添加量提升呈逐渐减小趋势[24]。这一结果表明，通过调控 NCC 添加量可改变基膜的孔隙结构，进而实现对其表面润湿性的有效调控。

PRCMs 的水通量与其孔结构变化密切相关。随 NCC 添加量的增加，PRCMs 的水通量逐步增大，依次为 4.93、5.04、5.41、5.57 L/(m²·h)(图 1d)。对比可知，NCC 添加量越高，膜的比表面积和孔径越大，孔数量增加，孔道连通性显著提升，水分子传质速率变快，因此膜的透过性增强，水通量随之升高[25]。其中，PRCMs 的水通量随 NCC 含量增加从 4.93 升至 5.57 L/(m²·h)，而比表面积从 0.54 跃升至 2.19 m²/g，水通量增幅明显小于比表面积增幅，这可能是由于过量添加 NCC 容易导致团聚现象，造成膜内部孔分布不均，孔道曲折度增加，进而导致水分子传质阻力上升，对水通量的提升产生一定抑制作用[26]。

综合上述性能分析可知，NCC 添加量对 PRCMs 的孔隙结构(比表面积、孔径)、力学强度、亲水性及水通量均具有显著影响，且各项性能之间存在相互

制约关系，通过分析雷达图(图 2)可知，高 NCC 添加量可显著提升水通量，但会导致膜力学强度下降；低 NCC 添加量可保证膜的力学强度，但水通量较低。基于各项性能的协同平衡原则，最终筛选出孔径适中、力学强度优异且水通量适宜的 PRCM2 作为基底，为后续界面聚合制备高性能 PRC-NFs 提供支撑。

2.2 聚合条件对多孔再生纤维素基纳滤膜结构和性能的影响

PRC-NFs 表面可观察到聚酰胺层典型的结节结构和褶皱结构[27](图 3)。PRC-NF1 表面出现结节且存在尺寸较大、疏松杂乱的褶皱结构，表面粗糙度较高；当 PIP 质量分数提高到 3.0% 时，PRC-NF2 表面褶皱明显减少，整体形貌更平整致密，仅保留少量细微凸起，分离层连续性明显提升，这说明提高 PIP 的质量分数可促进界面聚合反应充分进行，进而形成更厚、更致密的聚酰胺层。PRC-NF3 聚合时间 1 min，膜表面整体相对平滑，分离层较薄；PRC-NF4 表面则出现密集网状褶皱结构，褶皱相互连接、交织。聚合时间过短(1 min)时，单体扩散与反应不充分，聚酰胺层尚未完全形成，因此表面褶皱极少；时间适中(3 min)时，聚合反应充分进行，聚酰胺链段快速生长并堆叠，形成大尺寸褶皱；时间过长(5 min)时，过度聚合导致聚酰胺层持续增厚，褶皱进一步发展为相互连通的网状结构，膜表面粗糙度显著提升。低浓度 TMC(质量分数为 0.05%)制备的 PRC-NF5 表面聚酰胺层的褶皱结构分散且不均匀；提高 TMC 质量分数后，PRC-NF6 膜表面形成细密的网状结构，褶皱密集且尺寸较小，分离层更致密[28]。

PRCM2 与浆板的红外光谱类似[29]：分子内/间氢键对应的 O—H 伸缩振动特征峰分别位于 3 338、3 342 cm^{-1}，二者峰位差为 4 cm^{-1}；烷基骨架的饱和 C—H 伸缩振动特征峰，对应于 2 894 和 2 896 cm^{-1}，峰位差仅 2 cm^{-1}；纤维素主链 β-1,4-糖苷键对应的 C—O—C 不对称伸缩振动特征峰分别对应于 1 158、1 156 cm^{-1}，峰位差仅 2 cm^{-1}。以上峰位差均在红外光谱测试允许的 ± 5 cm^{-1} 误差范围内，表明加入 NCC 作致孔剂、经 ILs 溶解再生制备的 PRCMs 未发生明显化学结构变化，证实 ILs 溶解纤维素的过程只有物理变化而没有化学变化。对于 PRC-NF6，其红外光谱在 1 632 和 1 440 cm^{-1} 处出现了新的特征峰，分别归属于酰胺官能团中 C═O 键的伸缩振动和 N—H 键的弯曲振动[30]，说明膜表面发生了聚酰胺反应，证明了分离层的成功合成(图 4a)。

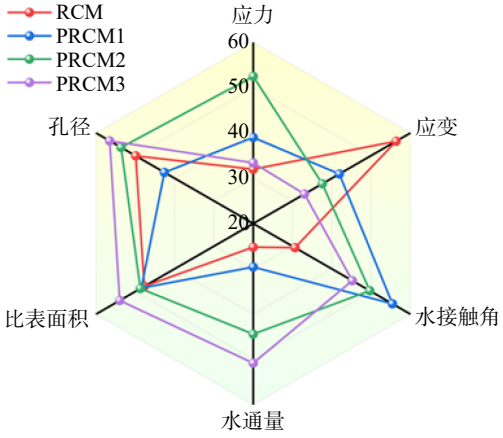


图 2 PRCMs 雷达图

Fig. 2 Radar image of PRCMs

利用 XPS 分析 PRC-NF6 的表面化学组成与元素结合状态。C1s 的谱图中可拟合出 3 个峰，分别对应于 C—C(284.8 eV)、C—N(286.08 eV)和 C—O(287.78 eV)(图 4b)。N1s 可分解为—NH_3^+(401.33 eV)和—NCO—(399.66 eV)基团(图 4c)，O1s 谱图中拟

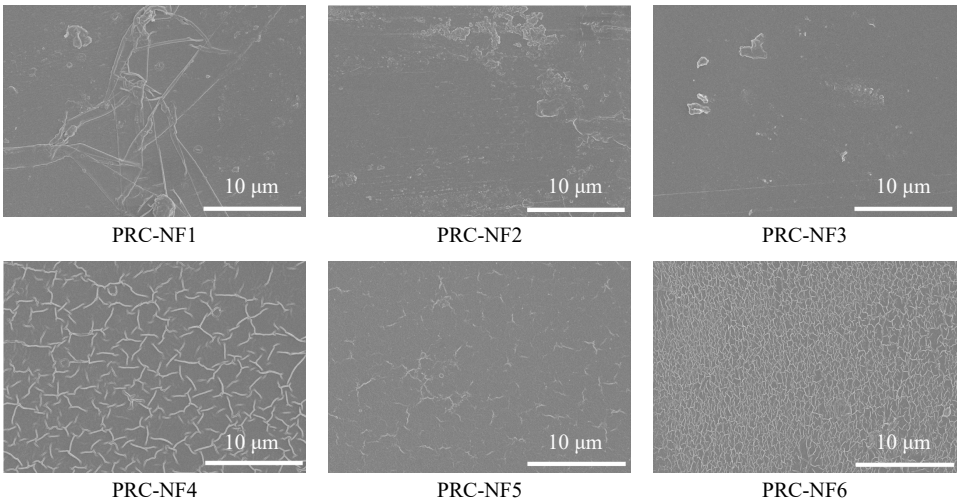


图 3 多孔再生纤维素基纳滤膜(PRC-NFs)的扫描电子显微镜图

Fig. 3 Scanning electron microscope images of PRC-NFs

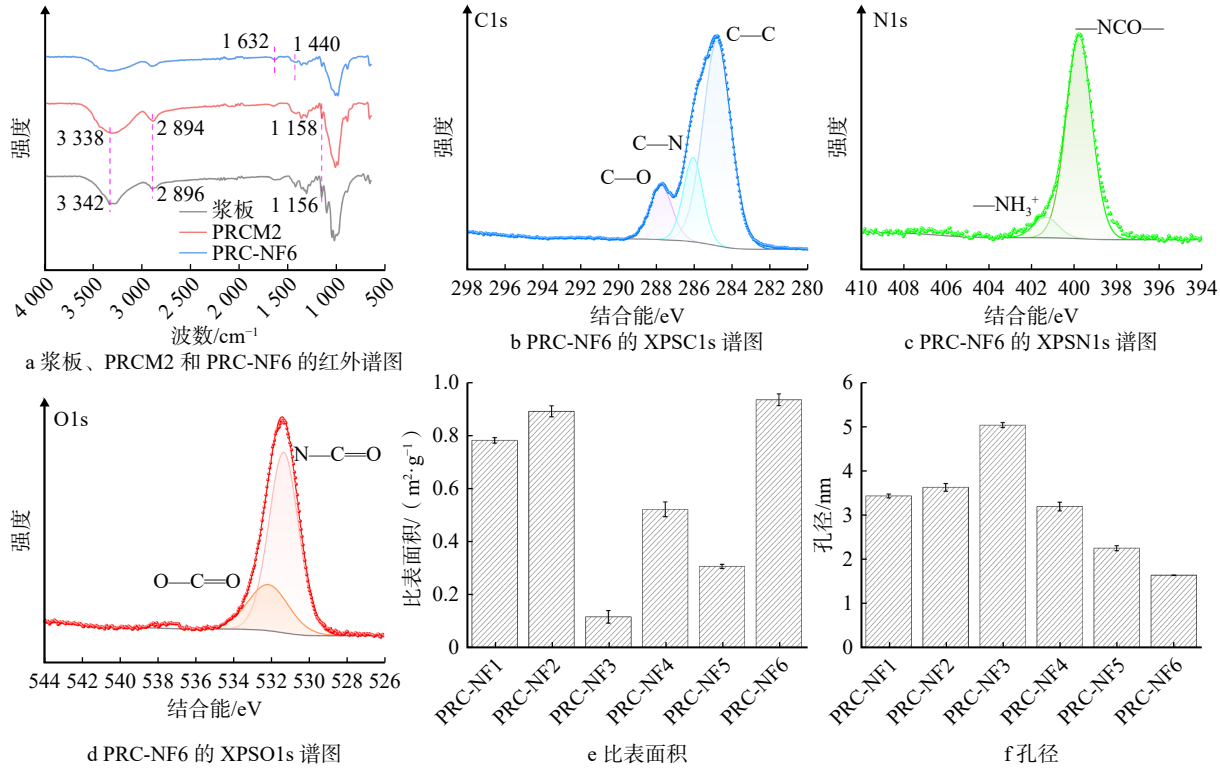


图 4　PRC-NFs 的结构与性能

Fig. 4　Structure and properties of PRC-NFs

合的两个峰分别归属于 O—C═O(532.13 eV)和 N—C═O(531.28 eV)[31](图 4d)。其中，N—C═O 特征峰来源于聚酰胺分子链上的酰胺键，进一步证实基膜表面发生了界面聚合，成功制备了聚酰胺分离层。

PRC-NFs 的比表面积随 PIP 质量分数的增加而增大，PRC-NF2 的比表面积高于 PRC-NF1，这是由于高 PIP 浓度使得聚酰胺分离层更连续致密，进而提高了比表面积；PRC-NF3 比表面积最低，仅为 0.12 m^2/g，由于聚合时间过短(1 min)，分离层未完全形成；PRC-NF4 的聚合时间长于 PRC-NF3，因此比表面积有所增长；随着 TMC 质量分数由 0.05%(PRC-NF5)增大到 0.30%(PRC-NF6)，膜的比表面积持续增大，高 TMC 浓度有助于形成细密的网状褶皱结构，可将膜的比表面积提高至 0.94 m^2/g(图 4e)，为传质与分离提供了更多活性位点。

PRC-NFs 的平均孔径呈现随聚酰胺层交联度升高而减小的趋势。随着 PIP 浓度升高，膜的孔径有所增大，由 3.44 nm(PRC-NF1)增至 3.64 nm(PRC-NF2)；经孔隙结构优化后得到的 PRC-NF1 和 PRC-NF2，其平均孔径与文献中报道的高强度再生纤维素纳滤膜(1.60 nm 和 1.27 nm)相比[13]，增大了 2～3 倍。当聚合时间从 1 min 延长到 5 min，膜的平均孔径由 5.04 nm 降低为 3.20 nm，说明聚合越充分，聚酰胺层交联密度越高，孔径越小；当 TMC 浓度由 0.05% 升至 0.30%，膜的孔径进一步降低为 1.65 nm(图 4f)，这是由于高浓度 TMC 促进交联反应进行，形成了更致密的分离层[32]。提高 PIP 质量分数对纳滤膜孔径影响较小，而提高 TMC 质量分数或延长聚合时间均能显著降低纳滤膜孔径。因此，采用界面聚合法制备纳滤膜时，需要合理调控 TMC 质量分数与聚合反应时间，以实现膜孔径的精准调控。

当 WCA 在 0°～90°之间时，膜表面表现为亲水性，且 WCA 越高，亲水性越弱。PRC-NFs 表面均亲水(图 5)，但 WCA 均高于基底膜 PRCM2，说明界面聚合形成的聚酰胺分离层会降低纳滤膜的亲水性。其中，PRC-NF3 的 WCA 为 61.67°，亲水性最强；PRC-NF6 的 WCA 为 84.35°，亲水性相对最弱。PRCM-NF3 的聚合时间仅为 1 min，聚酰胺分离层未完全形成，膜表面仍有大量亲水羟基暴露，因此亲水性最强；而 PRC-NF6 的聚合交联程度高，分离层致密，同时表面粗糙度高，导致 WCA 增大，这与前文 SEM 形貌分析结果一致。

纳滤膜的分离行为主要受尺寸筛分与 Donnan 静电效应调控，膜表面电荷特性是决定其分离性能的关键因素。随着 pH 的增加，3 种纳滤膜的 Zeta 电位均由正转负，等电点均处于酸性区间(图 6)，符合聚酰胺纳滤膜的典型电荷特征。这是由于界面聚合后，膜表面残留的酰氯基团水解形成了电负性的羧基基团，使膜表面整体呈现负电性[33]。在中性条件

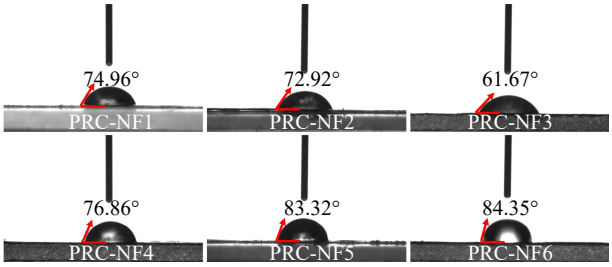


图 5 PRC-NFs 的水接触角

Fig. 5 Water contact angles of PRC-NFs

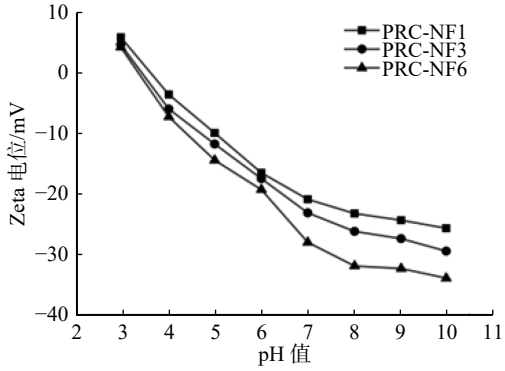


图 6 PRC-NF1、PRC-NF3 和 PRC-NF6 膜表面 Zeta 电位随 pH 值变化图

Fig. 6 Zeta potentials of PRC-NF1, PRC-NF3, and PRC-NF6 on the membrane surface as a function of pH

(pH = 7.0)下，PRC-NF1、PRC-NF3、PRC-NF6 的 Zeta 电位分别为−20.77、−23.00、−27.87 mV，其中聚合时间更短的 PRC-NF3 因分离层较薄、可解离位点暴露更多，负电性强于聚合充分的 PRC-NF1；而 TMC 浓度更高的 PRC-NF6 因聚酰胺层羧基含量更高，表面负电荷密度最大[34]。膜表面负电性越强，对 ILs 解离阴离子的 Donnan 排斥作用越显著，可通过电中性约束同步截留 ILs 阳离子，实现对 ILs 的高效回收。

2.3 多孔再生纤维素基纳滤膜对离子液体的回收性能

以质量分数为 1.0% 的 ILs 溶液为进料液，研究不同 PRC-NFs 对 ILs 的回收能力。图 7a 中，PRC-NFs 对 ILs 的截留率范围为 16.32% ~ 49.22%，其中 PRC-NF6 的截留率最高，为文献所报道的高强度再生纤维素基纳滤膜(ILs 截留率 26.18%)的 1.88 倍[13]；水通量方面(图 7b)，PRC-NF3 通量最高(为 5.91 L/(m²·h))，PRC-NF6 通量最低(为 4.25 L/(m²·h))，整体呈现截留率升高、水通量降低的反向关联，这与膜的孔径大小、交联密度及表面电荷特性密切相关[35]。当 PIP 质量分数从 0.5% 提升至 3.0% 时，PRC-NF2 的水通量升高为 5.63 L/(m²·h)，但 ILs 截留率略有下降(从 20.08% 降至 18.41%)。这是因为高 PIP 浓度使聚酰胺分离层更厚、表面更平整，孔道略有扩张，在提升水渗透性的同时，轻微削弱了分离层的尺寸筛分效应，从而导致截留率小幅降低[36]。界面聚合时间对 ILs 分离性能影响显著。随聚合时间从 1 min(PRC-NF3)延长至 5 min(PRC-NF4)，ILs 截留率从 16.32% 升至 22.15%，水通量从 5.91 降至 4.50 L/(m²·h)。这是由于聚合时间过短(1 min)时，分离层不完整、膜孔径较大，导致 ILs 泄漏严重，截留率最低；时间适中(3 min)时，分离层完整性提升，截留率随之升高；时间过长(5 min)时，过度交联使膜孔径进一步缩小，截留率继续提升，但水通量因传质阻力增大而显著下降。TMC 质量分数是调控 ILs 回收性能的核心参数。随 TMC 质量分数从 0.05%(PRC-NF5)升至 0.30%(PRC-NF6)，ILs 截留率从 22.56% 跃升至 49.22%，水通量仅从 4.37 轻微降至 4.25 L/(m²·h)。高 TMC 浓度可诱导形成致密网状结构，使膜孔径显著减小，同时增强膜表面电负性，通过尺寸筛分效应与静电排斥效应的协同作用，实现对 ILs 的高效截留；而高比表面积仍保证了较高的水通量，避免了因分离层过度致密化导致的通量骤降[37]。综上，PRC-NF6 通过高 TMC 浓度的界面聚合，构建了致密均匀的网状聚酰胺分离层，尽管其水通量略低于其他样品，但凭借最高的 ILs 截留率与优异的结构稳定性，在 ILs 回收中具有显著优势。

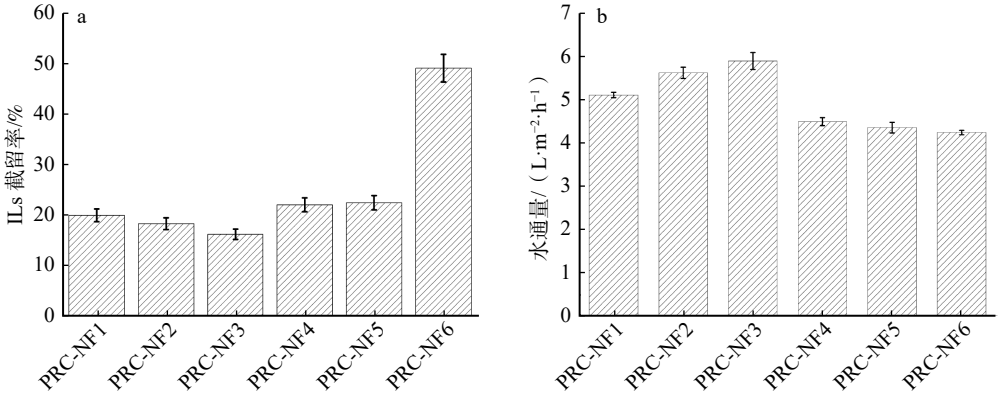


图 7 PRC-NFs 的纳滤性能

Fig. 7 Nanofiltration performance of PRC-NFs

3 结　　论

本研究采用纳米碳酸钙(NCC)原位发泡法构建多孔再生纤维素基膜(PRCMs),考察不同 NCC 添加量对基膜孔隙结构、力学性能的影响。在此基础上,制备多孔再生纤维素基纳滤膜(PRC-NFs),阐明界面聚合参数对纳滤膜的结构与性能的影响机制,实现了 ILs 的高效截留回收。主要得出以下结论。

(1)控制 NCC 添加量实现 PRCMs 孔隙结构和综合性能的协同优化:低添加量时,NCC 可提升膜强度并减小孔径;高添加量时,NCC 团聚形成大孔,使比表面积与水通量升高。综合考虑各项性能间的平衡,筛选出孔径适中、强度较高、水通量较大的 PRCM2 作为纳滤膜支撑层。

(2)明确哌嗪(PIP)浓度、1,3,5-均苯三甲酰氯(TMC)浓度与界面聚合时间对 PRC-NFs 分离层结构与纳滤性能的调控规律。其中,PIP 浓度升高提升了分离层平整度;高浓度 TMC 可诱导膜表面形成致密褶皱网状分离层,增大比表面积,减小孔径并增强表面电负性;聚合时间延长提高了交联密度,但过度聚合会增加渗透阻力。

(3)最优界面聚合条件为 PIP 质量分数 0.5%、TMC 质量分数 0.30%、界面聚合时间 3 min。该条件下制备的 PRC-NF6 具有致密的网状结构、最小孔径与强电负性,对 ILs 的分离回收性能最优,截留率达 49.22%,同时维持 4.25 L/(m^2·h)的适宜水通量。

综上所述,本研究基于原位发泡–界面聚合方法制备了再生纤维素基纳滤膜,阐明了 NCC 添加量、界面聚合参数对纳滤膜结构与性能的调控规律,为环境友好型纳滤膜的制备与 ILs 的绿色低成本回收提供了可行方案。然而,本研究的性能验证均基于实验室小试规模的过滤体系,所制备纳滤膜的长周期运行稳定性、复杂水质下的抗污染性能,以及对不同类型 ILs 的分离普适性仍需进一步系统验证,以实现该类绿色纳滤膜在 ILs 工业化回收领域的落地应用。

参　考　文　献

[1] Yu J, Xiao J, Wang Y, et al. N, P Co-doped cellulose-based carbon aerogel: a dual-functional porous material for CO_2 capture and supercapacitor [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 359: 130569.

[2] Hamedi M M, Sandberg M, Olsson R T, et al. Wood and cellulose: the most sustainable advanced materials for past, present, and future civilizations [J]. Advanced Materials, 2025, 37(22): 2415787.

[3] Ci Y, Lv D, Ma Y, et al. Molecular dynamics and quantum chemical insights into cellulose dissolution in novel superbase-derived ionic liquid/organic cosolvent systems [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 332: 148558.

[4] Zhou W, Zhang M, Kong X, et al. Recent advance in ionic-liquid-based electrolytes for rechargeable metal-ion batteries [J]. Advanced Science, 2021, 8(13): 2004490.

[5] Rahman M M, Choudhary H, Simmons B A, et al. Advances in ionic liquid recycling for lignocellulosic biomass pretreatment [J]. Green Chemistry, 2025, 27(48): 15338−15373.

[6] Wang D, Yuan H, Chen Y, et al. A cellulose-based nanofiltration membrane with a stable three-layer structure for the treatment of drinking water [J]. Cellulose, 2020, 27(14): 8237−8253.

[7] Sosa F H B, Carvalho P J, Coutinho J A P. Recovery of ionic liquids from aqueous solutions using membrane technology [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 322: 124341.

[8] Zheng W, Miao G, Li X, et al. Size sieving and electrostatic exclusion synergetic strategy for high efficiency recovery of superbase-derived ionic liquids via nanofiltration from the spinning process [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 356: 129851.

[9] Li S, Wang X, Guo Y, et al. Recent advances on cellulose-based nanofiltration membranes and their applications in drinking water purification: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 333: 130171.

[10] Peng C, Patil M, Song Y, et al. An all-polyamide organic solvent nanofiltration membrane [J]. Separation and Purification Technology, 2026, 393: 137236.

[11] Wang D, Zhou L, Zhang J, et al. Modulating pore structure of cellulose-based nanofiltration membrane through solid phase keratinization of cellulose for highly efficient dye/salt separation [J]. Journal of Membrane Science, 2026, 741: 125061.

[12] Li S, Liu S, Huang F, et al. Preparation and characterization of cellulose-based nanofiltration membranes by interfacial polymerization with piperazine and trimesoyl chloride [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(10): 13168−13176.

[13] 郑文秋, 马英翔, 杨晓刚, 等. 超高强度再生纤维素纳滤膜制备及其对溶剂回收性能的研究 [J]. 中国造纸学报, 2025, 40(2): 78−87.
Zheng W Q, Ma Y X, Yang X G, et al. Preparation of super high-strength regenerated cellulose nanofiltration membrane and its solvent recovery performance [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2025, 40(2): 78−87.

[14] Li S, Wang D, Xiao H, et al. Ultra-low pressure cellulose-based nanofiltration membrane fabricated on layer-by-layer assembly for efficient sodium chloride removal [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 255: 117352.

[15] Ali Yazdi M, Gruyaert E, van Tittelboom K, et al. New findings on the contribution of Mg-Al-NO_3 layered double hydroxides to the hydration and chloride binding capacity of cement pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2023, 163: 107037.

[16] 宋晓玲, 沈姗姗, 杨晓倩. $CaCO_3$ 填充量对 PBAT 复合材料性能的影响 [J]. 化学工程与装备, 2025(12): 6−9.

Song X L, Shen S S, Yang X Q. Effect of $CaCO_3$ content on properties of PBAT composites [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2025(12): 6−9.

[17] Li X, Li H, Ling Z, et al. Room-temperature superbase-derived ionic liquids with facile synthesis and low viscosity: powerful solvents for cellulose dissolution by destroying the cellulose aggregate structure [J]. Macromolecules, 2020, 53(9): 3284−3295.

[18] Wang L A, He H, Gan Q, et al. Polar solvent-induced spontaneous nanofoaming for synthesizing ultra-high-performance polyamide nanofiltration membranes [J]. Nano Letters, 2024, 24(24): 7373−7380.

[19] Wang S, Li Q, He B, et al. Preparation of small-pore ultrafiltration membranes with high surface porosity by in situ CO_2 nanobubble-assisted NIPS [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(6): 8633−8643.

[20] Yu J, Wang K, Yang P, et al. Simulation of calcium carbonate nucleation processes in confined C-S-H nanopores with different calcium-silicon ratios [J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137157.

[21] 王玉周, 陈增, 曹东鑫, 等. 纳米碳酸钙对 nano-$CaCO_3$/PES 复合膜结构与性能的影响 [J]. 化工进展, 2024, 43(11): 6310−6316.
Wang Y Z, Chen Z, Cao D X, et al. Effect of nano-$CaCO_3$ on structure and properties of nano-$CaCO_3$/PES composite membrane [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(11): 6310−6316.

[22] Rasool M A, Vankelecom I F J. Preparation of full-bio-based nanofiltration membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 618: 118674.

[23] 李洪江, 卢泓冶, 唐亮星, 等. PVC/改性纳米 $CaCO_3$ 复合材料的力学性能和耐热性能研究 [J]. 塑料科技, 2024, 52(1): 40−43.
Li H J, Lu H Y, Tang L X, et al. Study on mechanical properties and heat resistance of PVC/modified nano-$CaCO_3$ composites [J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(1): 40−43.

[24] Hou D, Dai G, Fan H, et al. Effects of calcium carbonate nano-particles on the properties of PVDF/nonwoven fabric flat-sheet composite membranes for direct contact membrane distillation [J]. Desalination, 2014, 347: 25−33.

[25] Gao M, Wang S, Ji Y, et al. Regulating surface-pore structure of PES UF membrane by addition of "active" nano-$CaCO_3$ [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 111: 247−254.

[26] Sukma F M, Çulfaz-Emecen P Z. Cellulose membranes for organic solvent nanofiltration [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 545: 329−336.

[27] Zhu X, Cheng X, Luo X, et al. Ultrathin thin-film composite polyamide membranes constructed on hydrophilic poly(vinyl alcohol) decorated support toward enhanced nanofiltration performance [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(10): 6365−6374.

[28] 林亚玲, 莫敏富, 傅成龙, 等. 界面聚合法制备醋酸纤维素基纳滤膜及性能研究 [C]//中国造纸学会. 中国造纸学会第二十一届学术年会论文集. 南宁: 中国造纸学会, 2024: 152−161.
Lin Y L, Mo M F, Fu C L, et al. Preparation of cellulose acetate based nanofiltration membranes by interfacial polymerization and study on membrane performance[C]//China Technical Association of the Paper Industry. Proceedings of the 21st Annual Academic Conference of the China Technical Association of the Paper Industry. Nanning: China Technical Association of the Paper Industry, 2024: 152−161.

[29] Wei J, Long Y, Li T, et al. Exploring hydrogen-bond structures in cellulose during regeneration with anti-solvent through two-dimensional correlation infrared spectroscopy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131204.

[30] Yang C, Cavalcante J, de Freitas B B, et al. Crude algal biomass for the generation of thin-film composite solvent-resistant nanofiltration membranes [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 470: 144153.

[31] 丰桂珍, 张火梅, 陈俊, 等. 基于纤维素纳米晶体界面聚合制备抗有机污染的高通量复合纳滤膜 [J]. 膜科学与技术, 2025, 45(1): 20−29,39.
Feng G Z, Zhang H M, Chen J, et al. Preparation of high-flux composite nanofiltration membranes based on interfacial polymerization of cellulose nanocrystals for resistance to organic contamination [J]. Membrane Science and Technology, 2025, 45(1): 20−29,39.

[32] Lee S, Xiao M, Kim S, et al. Influence of pore size distribution on ultrafiltration membranes separation performance [J]. Separation and Purification Technology, 2026, 383: 136207.

[33] Zhang H, Duan Y, Elimelech M, et al. Scalable catalytic nanofiltration membranes for advanced water treatment [J]. Nature Water, 2025, 3(9): 1038−1047.

[34] Sadare O, Zoumpouli G A, Chew Y M J, et al. Lignin- and cellulose-derived sustainable nanofiltration polyelectrolyte membranes [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13(5): 2060−2071.

[35] Livingston J L, Cafferty A, Miller R, et al. Polyelectrolyte nanofiltration membranes for base separation and recovery [J]. Water Research, 2025, 274: 123127.

[36] Ke S C, Guo X X, Meng F, et al. Alkali- and chlorine-resistant nanofiltration membranes *via* surface-enhanced crosslinking [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2026, 702: 138952.

[37] Huang J, Yuan M, Zhang Y, et al. Sustainable nanofiltration membranes enable ultrafast water purification [J]. Nature Water, 2025, 3(9): 1048−1056.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 赵广杰）