

# 高性能水处理纳滤膜从材料创新、结构调控到工艺优化

朱艺<sup>1</sup>, 阳志飞<sup>2</sup>, 左华江<sup>1\*</sup>

(1. 广西科技大学生物与化学工程学院, 广西柳州 545005;  
2. 柳州日高汽车减振技术有限责任公司, 广西柳州 545000)

**摘要:**综述了近年来有机聚合物、无机材料及复合体系纳滤膜的改性策略与性能突破, 阐明了材料创新、结构调控与工艺优化的协同作用机制, 不同制备技术对分离层结构与性能的调控规律。明确“组成-结构-性能”的内在关联, 为高性能纳滤膜的理性设计提供理论依据。进一步展望高性能纳滤膜的发展趋势, 及其在盐湖锂提取与高盐废水趋零排放等新兴领域的应用前景与技术路径, 为相关技术的产业化转化与产业升级提供实用性参考。

**关键词:**纳滤膜; 结构调控; 工艺优化; 界面聚合; 混合基质膜

中图分类号: TQ028.8; X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0047-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.009

## High-performance nanofiltration membranes for water treatment: From material innovation and structural regulation to process optimization

ZHU Yi<sup>1</sup>, YANG Zhi-fei<sup>2</sup>, ZUO Hua-jiang<sup>1\*</sup>

(1. College of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545005, China; 2. Liuzhou Risun Automobile Shock Absorption Technology Co., Ltd., Liuzhou 545000, China)

**Abstract:** Endowed with a unique separation mechanism integrating nanoscale sieving and the Donnan effect, nanofiltration (NF) technology has evolved into a pivotal, efficient, and energy-saving separation technique in the water treatment field. Nevertheless, its practical application is still hindered by core bottlenecks, including the difficulty in reconciling permeability and selectivity, membrane fouling, and insufficient stability. This review summarizes recent advances in modification strategies and performance breakthroughs of NF membranes based on organic polymers, inorganic materials, and composite systems. It clarifies the synergistic mechanism of material innovation, structural regulation, and process optimization, as well as the regulatory principles of different fabrication technologies on the structure and performance of the separation layer. By defining the intrinsic correlation of “composition-structure-performance”, this work provides a theoretical foundation for the rational design of high-performance NF membranes. Furthermore, it prospects the development trends of high-performance NF membranes, along with their application prospects and technical pathways in emerging fields such as lithium extraction from salt lakes and zero liquid discharge of high-salinity wastewater, thereby offering practical references for the industrialization transformation and industrial upgrading of related technologies.

**Key words:** nanofiltration membranes; structural regulation; process optimization; interfacial polymerization; mixed matrix membrane

膜分离技术是应对全球水资源短缺与环境污染挑战的关键策略。其中, 纳滤(NF)技术凭借独特的纳米级筛分与道南效应协同机制, 在高效脱除2价离子与小分子有机物方面展现出显著优势, 已成为饮用水净化、工业废水回用及战略资源提取等领域不可或缺的技术。然而, 传统纳滤膜长期受困于渗透性-选择性权衡、膜污染与运行稳定性不足3大核心瓶颈, 三者的能效与经济性被严重制约。

当前, 高性能纳滤膜的研发正经历一场深刻的范式转变: 从单一的材料筛选, 迈向对材料、结构及工艺的跨尺度协同设计。基于此, 本文中立足于

“材料创新-结构调控-工艺优化”这一核心主线, 系统评述其研究进展。首先, 梳理有机聚合物、无机及复合材料通过分子设计与功能改性实现的性能突破; 其次, 剖析界面聚合、层层自组装等关键技术对分离层微观结构的精准调控规律; 最后, 在整合上述关联的基础上, 展望旨在打破性能边界的新一代高性能、智能化纳滤膜的发展路径。

## 1 多元化膜材料体系的构建

### 1.1 有机聚合物膜的改性设计

有机聚合物<sup>[1]</sup>材料凭借可调的分子链结构、成

收稿日期: 2025-10-31; 修回日期: 2026-07-02

基金项目: 广西重点研发项目(桂科 AB23075089); 广西联合专项项目(广西科技大学专项)(2024JJH130009)

作者简介: 朱艺(2002-), 女, 硕士生; 左华江(1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为高分子功能材料, 通讯联系人, 82365714@qq.com。

熟的加工工艺与优异的成膜性,已成为当前纳滤膜的主流基体材料<sup>[2]</sup>。然而,该类材料普遍存在强疏水性所引发的膜污染、水通量低及渗透-选择性权衡等问题。接下来,通过梳理从醋酸纤维素(CA)、聚醚砜(PES)及聚偏氟乙烯(PVDF)这 3 种代表性材料的改性策略,深入剖析其“结构-性能”内在关联。

### 1.1.1 醋酸纤维素

醋酸纤维素(CA)作为一种来源广泛的生物基高分子,因具备良好的成膜能力与化学稳定性,是环境友好型分离膜的理想候选材料之一<sup>[3]</sup>。然而,纯 CA 膜在苛刻操作环境下易发生水解,分离选择性及抗污染性能亦有待提升<sup>[4]</sup>。为此,研究者发展了共混、交联及界面聚合等多种改性策略以精准调控其性能。

界面聚合(IP)是构建高性能 CA 基薄层复合(TFC)纳滤膜的有效途径。林亚玲等<sup>[5]</sup>通过在 CA 基底上精细调控 IP 过程,成功制备了聚酰胺(PA)/CA 复合纳滤膜。该膜的亲水性显著增强,离子筛分行为由膜表面荷电特性与 Donnan 效应共同主导。为同步提升膜的渗透性与选择性,引入功能单体或纳米填料是关键策略。Ounifi 等<sup>[6]</sup>通过引入含酰胺基团的 CHMA 单体参与界面聚合,制备了新型 TFC 膜,有效兼顾了亲水性、渗透通量与分离选择性。Dmitrenko 等<sup>[7]</sup>则采用 Zn(BDC) Si-MOF 对 CA 进行共混改性,所制得的混合基质膜对  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  等重金属离子的截留率高达 94%~97%,这得益于 MOF 的多孔结构所提供的额外传质通道及与重金属离子的强相互作用位点。

CA 基纳滤膜的改性研究证实了其性能的可调性,尤其是在引入生物基和绿色化学理念方面的潜力巨大。然而,现有研究多集中于实验室规模的性能验证,其改性策略的长期稳定性与规模化生产的可行性仍是未来研究的核心挑战。例如,MOF 填料的均匀分散性与界面稳定性,以及 CA 基底在长期运行中的抗生物降解性能,是决定其能否走向实际应用的关键。未来研究应更聚焦于不同改性方法的协同效应,清晰界定其在高有机物废水处理等复杂体系中的作用范畴。

### 1.1.2 聚醚砜

聚醚砜(PES)凭借卓越的热稳定性、耐化学腐蚀性 & 机械强度成为在分离膜领域应用广泛的基体材料<sup>[8]</sup>。然而,其固有的强疏水性导致所制备的纳滤膜面临亲水性不足、易污染及严峻的“渗透-选择

性权衡”效应。

为突破上述瓶颈,通常采用纳米粒子掺杂、聚合物共混及表面修饰等策略对其性能进行改性。在纳米粒子共混改性方面,刘源骞等<sup>[8]</sup>将 PVP 修饰的  $\text{UiO-66-NH}_2$  引入 PES 基体中,当 MOF 添加量为质量分数 2.5% 时,复合超滤膜亲水性显著改善,并在牛血清蛋白(BSA)污染测试中表现出 95.97% 的高通量恢复率,展现了优异的抗污染性与运行稳定性。在有机高分子共混方面,杨胜龙等<sup>[9]</sup>通过向 PES 中添加乙烯-丙烯酸共聚物(EAA),利用 EAA 的亲水链段有效改善了膜表面性质,使纯水通量提升至  $153.68 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,同时对 BSA 的截留率高达 99.32%。在分子源头的结构改性方面,通过调控共聚物本征链结构可实现更本质的性能突破。冯会美等<sup>[10]</sup>则通过精细的分子设计,合成了含亲水性苯磺酸侧基的杂萘联苯聚醚砜,所制备纳滤膜展现出可调控的分离选择性,凸显了分子剪裁在特定分离场景下的定向设计潜力。

上述改性研究虽在一定程度上缓解了 PES 膜的“渗透-选择性权衡”效应,但现阶段研究多聚焦于功能填料或者共混组分的引入,而基膜本身的本征性质(如聚合物分子质量、链结构)对最终复合膜微观结构及性能的底层影响机制尚不明确。例如,基膜的孔径分布与表面能如何影响界面聚合层的形成质量,仍是需要深入探究的“黑箱”问题。未来的研究应结合先进的原位表征技术与模拟计算,建立从基膜到复合膜的跨尺度结构调控理论,为实现高性能 PES 纳滤膜的定向设计提供指导。

### 1.1.3 聚偏氟乙烯

聚偏氟乙烯(PVDF)凭借 C—F 键带来的优异化学稳定性、热稳定性及机械强度,成为处理苛刻环境废水的理想膜材料之一<sup>[11]</sup>,但强疏水性同样导致膜易污染、水通量低及选择性差。

为了针对性解决上述难题,通常基于特定的应用场景,通过引入多元功能组分对 PVDF 膜进行复合表面改性。在多污染物协同去除方面,针对工业废水中复杂的多组分共存特性,Zhao 等<sup>[12]</sup>采用离子液体改性蒙脱土(IL-Na MMT)作为多功能填料,制备的 PVDF 复合膜纯水通量高达  $320.76 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,对阴/阳离子染料及  $\text{Cr(VI)}$ 、 $\text{Pb(II)}$  等重金属离子的去除率均超过 95%。其高效的分离机理主要归因于离子液体提供的强静电排斥与蒙脱土的高比表面积吸附行为的跨尺度协同。在饮用水精准净化和筛分方面,针对高精度的离子级分离需求,Tang

等<sup>[13]</sup>通过界面聚合技术(IP)在PVDF中空纤维基膜上构建了新型聚酰胺选择层,该膜对四环素的去除率高达98.9%,并实现了 $\text{Ca}^{2+}$ 与抗生素的高效选择性筛分,其精细的离子筛分机制主要源于聚酰胺层对高价阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ )的强Donnan排斥与对抗生素分子的尺寸筛分作用的结合。

综上所述,PVDF膜的改性呈现出明确的“复合化、功能化、场景化”趋势,即通过多元材料复合赋予膜多种功能,并针对特定污水体系进行定向定制。然而,这种策略在深化功能的同时,也凸显了膜材料领域“通用性与专用性”的永恒矛盾。当前大多数改性研究在实验室条件下取得了成功,但将其放大至工业规模时,功能填料的分散稳定性、膜结构的均一性及长期运行的化学/机械耐久性依然是制约产业化转化的严峻考验。因此,未来还需致力于发展更具普适性的“平台化”设计与制备技术,以期在特定应用谱系内实现综合能效与经济效益最大化。

## 1.2 无机膜的稳定化与功能化

无机纳滤膜材料凭借卓越的化学与热稳定性,在高温、强酸碱等极端工况下展现出显著优势。其主要可分为金属氧化物陶瓷膜与碳基材料膜2大方向。

在陶瓷纳滤膜方面,通过表面功能化修饰或构建聚合物中间层是提升陶瓷基薄层复合膜分离性能的重要策略<sup>[14]</sup>。传统金属氧化物陶瓷膜(如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ )具有典型的梯度孔径不对称结构,实现了机械强度与传质效率的平衡<sup>[15]</sup>。然而,应用广泛的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜抗碱性能弱,且存在亲水性不足等问题。基于溶胶-凝胶法的表面功能化修饰是提升其性能的主流策略。Liangdy<sup>[16]</sup>采用此法在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷膜表面构建了 $\text{TiO}_2$ 纳米复合层。该 $\text{TiO}_2$ 层显著增强了膜亲水性,并赋予其可见光催化活性,在处理含酚含盐废水时对 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 截留率保持92%,并实现了85%的COD去除率,展现出在耦合催化氧化-过滤工艺中的潜力。

在碳基纳滤膜方面,以氧化石墨烯GO为代表的碳基材料具有可控的孔隙结构与优异的渗透选择性。针对GO膜在水溶液中易发生溶胀导致盐截留率骤降的共性问题,采用先进的界面聚合调控策略来强化其层间结构已成为研究热点。例如,Li等<sup>[17]</sup>通过界面聚合将微量GO嵌入聚酰胺分离层,通过调控GO添加量精准控制膜表面羧基密度,使膜对 $\text{Li}^+/\text{Mg}^{2+}$ 的选择分离系数提升至23.6,同时显著

增强抗污染能力,为盐湖提锂提供了新路径。

## 1.3 生物基高分子膜的绿色制备

壳聚糖(CS)因优异的生物相容性、可降解性及丰富的活性官能团,在绿色分离膜领域备受关注。但纯CS膜存在机械强度差、酸性易溶胀及分离选择性不足等缺陷。为突破这些瓶颈,研究人员发展了多种改性策略。Zhang等<sup>[18]</sup>采用环氧氯丙烷交联季铵化壳聚糖,构建了稳定的交联网络,使膜在弱酸性条件下的溶解率大幅降低,并凭借Donnan效应实现对甲基橙的高效截留。在制药废水处理等更为复杂的应用场景中,Moradi等<sup>[19]</sup>通过呋塞米对CS进行共价接枝改性,再与果胶复合制备TFC纳滤膜,该膜通量回收率(FRR)高达94.2%,并对头孢曲松等抗生素的截留率超过99.7%。

上述研究表明,通过精准的分子设计与多尺度结构调控,绿色生物基高分子膜可以有效克服壳聚糖基材料的本征缺陷,展现出良好的工业应用场景。

## 1.4 MOFs材料孔道与功能的精准定制

金属有机框架(MOFs)是由无机金属节点与有机配体自组装形成的规则多孔晶态材料,具有高比表面积、可调孔道及丰富吸附位点,在高性能纳滤膜中应用广泛<sup>[20]</sup>。目前,基于MOFs的高性能纳滤膜研究主要衍生出纯MOFs分离膜与复合混合基质膜(MMMs)2大核心构型。

在纯MOFs分离膜制备方面,分离机制主要依赖于晶体内部连续、规整的本征微孔通道进行分子筛分,因而传质能效高度取决于晶面取向的精准调控与晶界缺陷的有效消除<sup>[20]</sup>。朱晓等<sup>[20]</sup>采用原位生长策略构建了 $\text{UiO}-66-\text{NH}_2$ 纯MOFs膜,实现了高水通量并对 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 保持98%以上的高效截留。Huang等<sup>[21]</sup>创新性地制备了 $\text{TiO}_2/\text{MIL}-100(\text{Fe})$ 催化膜,在可见光驱动下不仅实现了对多种有机染料分子超过99%的高效截留与原位深度降解,更展示了其在耦合膜分离与高级氧化(AOPs)技术领域的独特应用优势。

在MOFs基混合基质膜(MMMs)开发方面,通过将功能化MOFs作为纳米增强填料分散于有机聚合物基质中,可完美协同MOFs的精准筛分特性与高分子材料成熟的加工柔韧性<sup>[22]</sup>。巴立波等<sup>[22]</sup>制备了 $\text{GO}@\text{MOFs}/\text{PVDF}$ 复合纳滤膜,对水中典型臭味物质(2-MIB和GSM)的去除率均达100%。方思源<sup>[23]</sup>系统探讨了多种钴基MOF复合纳滤膜的优化路径,通过精细调控高相容性孔道,制备出对氟喹诺酮类抗生素截留率超过92%、且通量恢复率超93%

的高性能复合膜,为缓解 MMMs 长期运行中的膜污染顽疾提供了新思路。

MOFs 材料拓展了纳滤膜的设计空间,但在复杂废水体系下的长效运行仍面临材料本征稳定性不足和两相界面相容性较差的双重制约。未来挑战应聚焦于通过配体修饰与节点置换定向制备高化学稳定性的锆基/钛基 MOFs 填料<sup>[20]</sup>;同时利用表面官能化或引入共价过渡层增强填料与基质的界面结合力,以此打破“材料定制-规模化制备-工程应用”之间的产业化壁垒。

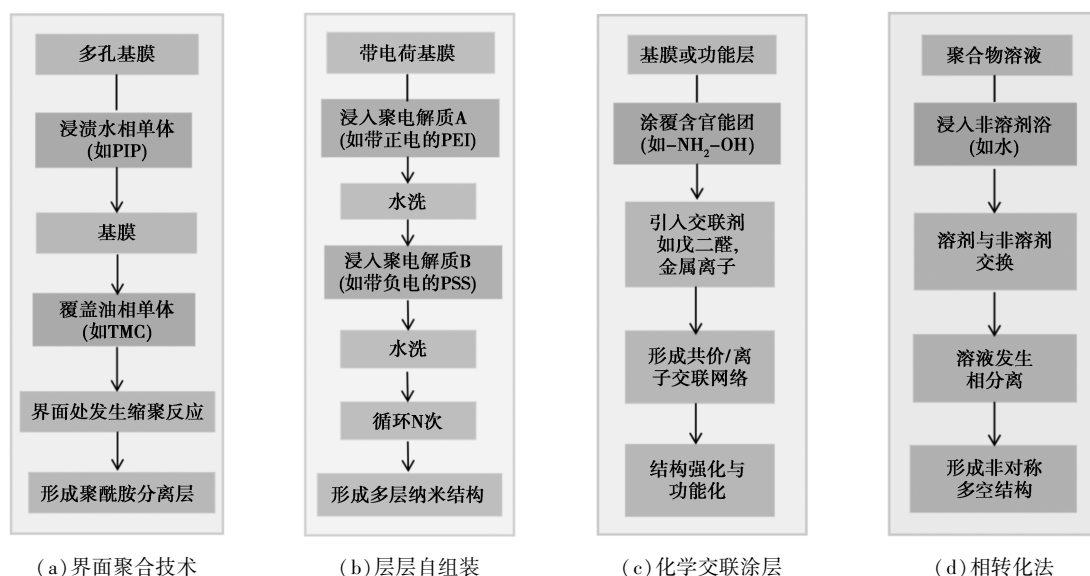


图1 纳滤膜4种关键制备技术的原理示意图

## 2.1 界面聚合,调控分离层形成动力学

界面聚合是制备薄层复合纳滤膜(TFC)的主流技术,利用水相多元胺与油相多元酰氯在液-液界面发生快速缩聚形成聚酰胺层<sup>[24]</sup>。目前突破“渗透-选择性权衡”瓶颈的工艺优化策略主要包括:①单体扩散动力学调控,如采用电喷雾界面聚合法精准控制单体供给路径,以形成交联度更高、结构更均匀的聚酰胺网络<sup>[25]</sup>;②界面特性修饰,通过在基底上构建水滑石、碳点等中间修饰层,改变界面亲疏水性及单体吸附行为,从而调控聚酰胺层的形成质量与表面性质<sup>[26]</sup>;③反应终止与后处理,通过化学试剂及时终止反应或进行水解等后处理,优化聚酰胺网络的自由体积与表面化学,实现性能同步优化<sup>[27]</sup>。这些优化策略的共同目标是制备超薄、低缺陷且交联度合理的分离层,从而实现高水通量与高选择性的同步提升。

## 2.2 层层自组装,实现分子级结构定制

层层自组装(LbL)通过交替沉积聚电解质,实现分子级精度的膜结构调控。该技术的核心优势在

## 2 工艺优化,实现结构精准调控的关键

高性能纳滤膜的实现,不仅依赖于材料的本征特性,更取决于能否通过先进的制备工艺将材料转化为具有理想微观结构的分离层。制备工艺是实现“材料创新”向“结构调控”跨越的关键桥梁,直接决定了膜的分离精度、渗透通量及长期稳定性(图1)。本节将重点剖析界面聚合、层层自组装等核心制备技术的最新优化策略,及其在精准调控膜层结构进而突破性能瓶颈方面的内在机理。

于卓越的可调性:通过精确设计聚电解质种类、溶液条件(离子强度、pH)及沉积层数,可精准定制功能膜的厚度、孔径与表面电荷。例如,在组装体系中引入两性离子聚合物可显著增强膜表面的长效抗污染性能<sup>[28]</sup>。这种对微观结构的原子级操控,是“结构调控”理念的极致体现,彰显了 LbL 在构建多功能分离膜中的独特价值。

## 2.3 相转化与交联,从基膜成型到功能强化

相转化法作为基础成型工艺,通过调控溶剂与非溶剂的交换动力学,可制备具有规整非对称结构的超滤/微滤基膜,孔径与荷电特性可通过选用特定聚合物进行初步设计,为功能层提供理想支撑<sup>[29]</sup>。在此基础上,化学交联技术进一步赋予膜结构增强的稳定性与特定功能:传统共价交联(如戊二醛)能有效填充聚合物网络自由体积,提升选择性与耐氯性;离子交联(如  $\text{Fe}^{3+}$  与单宁酸配位)则赋予膜动态特性与抗污染性;智能交联体系,更使分离层获得了刺激响应型自修复能力,为长寿命运行提供了新思路<sup>[30]</sup>。

## 2.4 工艺协同,跨尺度集成的未来方向

未来纳滤膜制备工艺将由单一方法的独立优化转向多工艺的协同集成,以实现性能的跨越式提升。例如,“相转化法”制备的高强度多孔基膜与“界面聚合”技术构建的超薄选择层相结合,已成为高性能薄层复合膜的经典范式;而将“层层自组装”功能层通过“化学交联”进行后处理,则是强化结构稳定性与长效抗污染的有效途径。这种跨工艺的协同设计与前文提出的“跨尺度协同设计”理念一脉相承,代表了未来高性能纳滤膜制备技术的重要发展方向。

## 3 总结与展望

综上所述,纳滤膜技术在材料体系创新与制备工艺优化方面已取得显著突破<sup>[2]</sup>。有机聚合物、无机陶瓷、碳基材料及新型 MOFs、壳聚糖基材料的引入,大幅丰富了膜结构的设计策略;而界面聚合、层层自组装、相转化与化学交联等技术的精细化发展,则为高性能纳滤膜的可控制备奠定了方法学基础。

然而,纳滤膜从实验室走向产业化应用仍面临以下多维挑战:在材料层面,MOFs 的水稳定性与生物基材料的降解可控性亟待提升;工艺层面,LbL 技术的层厚控制精度与 IP 反应单体利用率仍需进一步提高以适配规模化生产需求;应用层面,长期运行中的膜污染与层间剥离现象仍是制约系统稳定性的关键瓶颈。

未来研究应聚焦于 3 个关键方向,实现从“经验探索”到“理性设计”的跨越。

(1) 材料创新智能化:开发高稳定性功能材料,并利用机器学习和高通量计算逆向设计、筛选新型膜材料与改性单体,从根本上突破固有缺陷。

(2) 制备过程精准化:深度融合先进原位表征技术与过程模拟,实现对界面聚合、相分离等关键过程的动态解析与精准调控,推动制备工艺从“黑箱”走向“透明”。

(3) 应用验证系统化:建立面向盐湖提锂、高盐废水趋零排放等新兴领域的专用性能评价体系,并开展基于全生命周期评估的经济性与环境效益分析。

通过材料-工艺-应用的多维度协同创新,纳滤技术有望突破当前性能瓶颈,为解决水资源短缺、战略资源回收等全球性挑战提供核心的化工技术支撑,展现出广阔的科学价值与巨大的社会经济效益。

## 参考文献

- [1] 李海柯,张环,王晓磊,等.纳滤膜在盐湖提锂领域的研究进展[J].精细化工,2024,41(7):1404-1413.
- [2] Song W, Zhang Y, Tran C H, *et al.* Porous organic polymers with defined morphologies: Synthesis, assembly, and emerging applications [J]. *Progress in Polymer Science*, 2023, 142: 101691.
- [3] Islam M D, Uddin F J, Rashid T U, *et al.* Cellulose acetate-based membrane for wastewater treatment-A state-of-the-art review [J]. *Materials Advances*, 2023, 4(18): 4054-4102.
- [4] 高一洲.醋酸纤维素及其衍生物的制备与应用进展[J].精细石油化工进展,2024,25(6):46-52.
- [5] 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[J].中国造纸学报,2024,39(S1):146-155.
- [6] Ounifi I, Guesmi Y, Ursino C, *et al.* Synthesis and characterization of a thin-film composite nanofiltration membrane based on polyamide-cellulose acetate; Application for water purification [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(2): 707-718.
- [7] Dmitrenko M, Kuzminova A, Zolotarev A, *et al.* Nanofiltration mixed matrix membranes from cellulose modified with Zn-based metal-organic frameworks for the enhanced water treatment from heavy metal ions [J]. *Polymers*, 2023, 15(6): 1341.
- [8] 刘源骞,陈英波,许林哲,等.聚醚砜/改性 UiO-66 共混超滤膜的制备与性能[J].精细化工,2024,41(11):2413-2422.
- [9] 杨胜龙,武晓,罗筑.聚醚砜/乙烯-丙烯酸复合膜制备及性能[J].工程塑料应用,2024,52(10):13-18.
- [10] 冯会美,王丹慧,徐培琦,等.含苯磺酸侧基杂萘联苯聚醚砜纳滤膜的制备与性能[J].膜科学与技术,2024,44(5):12-19.
- [11] 赵靖瑄.聚偏氟乙烯水处理分离膜表面亲水改性及性能研究[D].长春:长春工业大学,2025.
- [12] Zhao J, Liu H, Xue P, *et al.* High-performance PVDF water treatment membrane based on IL- $\text{Na}^+$  MMT for simultaneous removal of dyes and oil-water emulsions [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(1): 109093.
- [13] Tang Y, Zhu J, Yu H, *et al.* Novel PA/PVDF hollow fiber nanofiltration membrane with high permeability and  $\text{Ca}^{2+}$ /antibiotics selectivity for drinking water purification [J]. *Advanced Membranes*, 2024, 4: 100102.
- [14] Wang X, Mao Y, Gao N, *et al.* Ceramic supported polyamide composite nanofiltration membrane with a glutaraldehyde cross-linked chitosan interlayer [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 68: 106566.
- [15] 叶明强,邱敬贤,黄仕良,等.陶瓷膜的制备及处理废水的研究进展[J].山东化工,2025,54(6):263-266.
- [16] Liangdy A. Fabrication of catalytic ceramic membrane in hybrid catalytic oxidation filtration process for water treatment [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2024.
- [17] Li Y, Zhao Y J, Wang M, *et al.* Enhanced anti-fouling and selective performance of GO-modified nanofiltration membranes for lithium extraction from salt lake brine [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 156269.

(下转第 57 页)

- [7] Podgornova O A, Volfkovich Y M, Sosenkin V E, *et al.* Increasing the efficiency of carbon coating on olivine-structured cathodes by choosing a carbon precursor[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2022, 907: 116059.
- [8] Xie X, Zhang B, Hu G, *et al.* A new route for green synthesis of  $\text{LiFe}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{PO}_4/\text{C}@ \text{rGO}$  material for lithium ion batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 157106.
- [9] Dai J. Effect of freeze-drying gel on properties of lithium manganese iron phosphate prepared by sol-gel method[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, 2954(1): 012009.
- [10] Liu L, Cao Z, Cui Y, *et al.* Nanocomposites  $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$  synthesized via freeze drying assisted sol-gel routine and their magnetic and electrochemical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 779: 339–346.
- [11] Wang Y, Yong F, Wang Z, *et al.*  $\text{LiMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{PO}_4/\text{C}$  Nanoparticles via polystyrene template carburizing enhance the rate capability and capacity reversibility of cathode materials[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(4): 4024–4034.
- [12] Ding B, Ji G, Ma Y, *et al.* Increasing the high rate performance of mixed metal phospho-olivine cathodes through collective and cooperative strategies[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 247: 273–279.
- [13] Chi Z X, Zhang W, Wang X S, *et al.* Accurate surface control of core-shell structured  $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4 @ \text{C}$  for improved battery performance[J]. *J Mater Chem A*, 2014, 2(41): 17359–17365.
- [14] Trinh D V, Nguyen M T T, Dang H T M, *et al.* Hydrothermally synthesized nanostructured  $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$  ( $x=0-0.3$ ) cathode materials with enhanced properties for lithium-ion batteries[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 12280.
- [15] Vanaphuti P, Manthiram A. Enhancing the Mn Redox Kinetics of  $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4$  Cathodes Through a synergistic Co-doping with niobium and magnesium for lithium-ion batteries[J]. *Small*, 2024, 20(47): 2404878.
- [16] Tang X, Huang J, Zhao F, *et al.* A 3D continuous mesoporous carbon framework enhances electronic/ionic kinetics of  $\text{LiMn}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{PO}_4$  cathode for high-performance lithium-ion batteries[J]. *Carbon*, 2025, 25: 238.
- [17] Wu K, Yin S, Wang S, *et al.* Construction of submicron-sized  $\text{LiFe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{PO}_4/\text{C}$  enwrapped into graphene framework for advanced Li-storage[J]. *Carbon*, 2020, 169: 55–64.
- [18] Zheng J, Yang J, Wu J, *et al.*  $\text{Y}^{3+}$  doping and electrochemical properties of  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4 @ \text{C}$  cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 960: 170610.
- [19] Jin H, Zhang J, Qin L, *et al.* Dual modification of olivine  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$  cathodes with accelerated kinetics for high-rate lithium-ion batteries[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(2): 1029–1034.
- [20] Liao L, Wang H, Guo H, *et al.* Facile solvothermal synthesis of ultrathin  $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$  nanoplates as advanced cathodes with long cycle life and superior rate capability[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(38): 19368–19375.
- [21] Du G, Guo X, Yang W, *et al.* Additives to disturb  $\text{LiMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{PO}_4$  growth and their influence on performance[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, 17(6): 272.
- [22] Liu S, Zheng J, Zhang B, *et al.* Engineering manganese-rich phospho-olivine cathode materials with exposed crystal {010} facets for practical Li-ion batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 139986. ■

(上接第 51 页)

- [18] Zhang Y, Tao K, Gui H, *et al.* Hydrophilic and antimicrobial properties of hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride chitosan/graphene oxide membrane for dye rejection[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 67: 106220.
- [19] Moradi G, Heydari R, Zinadini S, *et al.* Chitosan-furosemide/pectin surface functionalized thin film nanofiltration membrane with improved antifouling behavior for pharmaceutical wastewater treatment[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2023, 124: 368–380.
- [20] 朱晓, 朱军勇, 张亚涛. 金属有机骨架/聚酰胺薄层纳米复合膜的研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(8): 4314–4326.
- [21] Huang C W, Zhou S R, Hsiao W C. Multifunctional  $\text{TiO}_2/\text{MIL}-100(\text{Fe})$  to conduct adsorption, photocatalytic, and heterogeneous photo-Fenton reactions for removing organic dyes[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2024, 158: 104850.
- [22] 巴立波, 陈保良, 刘一江, 等.  $\text{GO}@ \text{MOFs}$  骨架纳滤膜对地表水中嗅味物质的去除效能[J]. *水处理技术*, 2024, 50(11): 61–66.
- [23] 方思源. 钴基金属有机骨架复合纳滤膜的制备及对抗生素废水的截留性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [24] 陈若桐, 丁晓倩, 李琨, 等. 基于界面聚合技术的抗污染纳滤膜研究进展[J]. *工业水处理*, 2025, 45(11): 19–29.
- [25] Yang S M, Wang J Q, Fang L F, *et al.* Electrosprayed polyamide nanofiltration membrane with intercalated structure for controllable structure manipulation and enhanced separation performance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 602: 117971.
- [26] 朱德良, 何家劲, 唐雨欣, 等. 单宁酸/二乙烯三胺五乙酸酯化层修饰的聚酰胺纳滤膜的制备及性能研究[J]. *浙江理工大学学报: 自然科学*, 2025, 53(2): 166–174.
- [27] Zhu X, Lai C, Liu B, *et al.* Unveiling the role of post-treatment in thin-film composite nanofiltration membranes: Performance and mechanism[J]. *Desalination*, 2023, 556: 116579.
- [28] 陈彦睿, 张星冉, 李方. 基于层层自组装技术的抗污染膜研究进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(11): 5956–5968.
- [29] 孙二强, 姜永健, 张环宇, 等. 相转化法制备疏松纳滤膜研究进展[J]. *石油化工高等学校学报*, 2022, 35(1): 41–47.
- [30] 周威明, 丁春香, 潘明珠. 基于动态共价交联网络自修复涂层的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1381–1394. ■