

基于相转化法构筑非对称纳滤膜皮层界面结构的研究策略

王启航*

(1. 中石化(北京)化工研究院有限公司, 北京 100013)

摘要:围绕基于相转化技术制备整体皮层非对称(ISA)纳滤膜展开,系统总结了相转化法的成膜机制、制备调控手段及后缩孔改性策略。重点论述从相转化技术的基本原理与分类,到通过配方设计、工艺调节制备 ISA 纳滤膜,以及耦合化学交联、静电组装等技术对 ISA 纳滤膜进行表面孔径调控与功能化修饰。通过合理调节制备工艺主导相分离过程以及技术耦合,实现对膜分离皮层结构的精确设计,协同优化 ISA 纳滤膜的渗透性与选择性,并赋予膜多样化的功能。未来研究应进一步深化对相转化成膜机制的理解与过程调控,积极促进制膜技术与膜材料的高性能与多功能化、绿色可持续化,并拓展 ISA 纳滤膜在更广泛领域的应用。

关键词:相转化法;整体皮层非对称结构;纳滤膜;渗透分离性能

中图分类号:TQ028.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0050-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.010

Research strategies for constructing the interfacial structure of the skin layer in asymmetric nanofiltration membranes via phase inversion

WANG Qi-hang*

(Sinopec (Beijing) Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: This review focuses on integrally skinned asymmetric (ISA) nanofiltration membranes prepared via the phase inversion technique, systematically summarizing the membrane formation mechanisms, preparation control methods, and post-formation pore shrinkage modification strategies associated with the phase inversion process. Specific emphasis is placed on the transition from the fundamental principles and classifications of phase inversion to the fabrication of ISA nanofiltration membranes through formulation design and process adjustment. Furthermore, it discusses the coupling of techniques such as chemical cross-linking and electrostatic assembly to regulate surface pore size and achieve functional modification of ISA membranes. By rationally adjusting the preparation conditions to govern the phase separation process and integrating complementary techniques, precise control over the structure of the separating skin layer can be achieved. This approach synergistically optimizes the permeability and selectivity of ISA nanofiltration membranes while endowing them with diverse functionalities. Future research should aim to deepen the understanding and process control of membrane formation mechanisms via phase inversion, actively promote the development of high-performance, multifunctional, and green and sustainable membrane fabrication technologies and materials, and expand the application of ISA nanofiltration membranes into broader fields.

Key words: phase inversion; integrally skinned asymmetric (ISA) structure; nanofiltration membrane; permeation and separation performance

作为一种压力驱动膜技术,纳滤基于尺寸筛分效应与道南电荷效应,能选择性地分离无机盐和有机物。凭借低能耗和无二次污染的显著优势,纳滤在实现“绿色”分离方面超越了蒸馏和萃取等传统技术,并已成功应用于水净化、工业废水资源回用及生物医药等多个领域^[1]。

从制备技术上看,纳滤膜主要存在 2 种类型:基于相转化法制备的整体皮层非对称(ISA)纳滤膜或经化学交联、静电组装等技术修饰的改性 ISA 纳滤膜,以及通过界面聚合法制备的聚酰胺薄层复合(TFC)膜^[2]。聚酰胺 TFC 膜虽然可通过分别优化

其分离层与支撑层提升综合性能^[3],但其复合结构存在的层间黏附力不足与耐压性欠佳等挑战直接影响膜的长期运行稳定性^[4]。并且聚酰胺分离层的耐氯性、耐清洗性与机械强度亦均显不足,这些因素共同制约了其在特种分离领域的应用。相比之下,ISA 纳滤膜采用的制备工艺具有流程简便、投资成本低且参数易于调控等优点。同时,基于相转化技术形成的一体化膜结构不仅结合牢固、无分层风险,物理化学稳定性更优,还可保留纯聚合物材料的优异特性,在特定分离场景中展现出独特优势^[5]。然而,受限于相转化法本身,难以对膜孔径进行微孔级

收稿日期:2026-04-20;修回日期:2026-06-16

作者简介:王启航(1997-),男,博士,工程师,研究方向为反渗透/纳滤膜材料及水处理应用,通讯联系人,wangqh.bjhy@sinopec.com。

别(小于 2 nm)的精准调控,致使通过相转化法制备高性能纳滤膜面临挑战。

现有关于纳滤膜领域的综述研究已形成以 TFC 膜为中心的成熟体系,然而,学术界尚缺乏针对 ISA 纳滤膜的系统性回顾,尤其缺少对其相转化法成膜机制、分离皮层结构调控及后修饰策略的深入总结。为此,本文中对上述内容进行了系统梳理,并探讨了该技术在纳滤膜制备及应用的未来发展趋势,为 ISA 纳滤膜的深入研究提供参考。

1 相转化法成膜机制

相转化法是 20 世纪 60 年代由 Loeb 和 Sourirajan 首次引入膜技术领域的,它是大多数商用膜合成的基础。其核心在于通过诱导聚合物溶液发生相分离,从而制备具有特定微观结构的高分子分离膜^[6]。在相转化法中,热力学稳定的聚合物溶液会以可控的方式发生液-液分相。在开始分相形成富聚合物相和贫聚合物相后的一段时间,聚合物浓度最高的相将通过凝胶化、玻璃化或结晶等过程开始固化^[7]。贫聚合物相会在固化材料中形成孔隙,而富聚合物相则会形成固态的膜基质。相转化法的突出优势在于其高度的灵活性与可控性:通过选择适宜的相转化技术路径,并精确调控聚合物浓度、环境温度湿度及凝固浴组成等配方与工艺条件,便能针对特定的分离目标,定制出适合的膜结构。

基于相分离机理的差异,相转化法主要发展出非溶剂诱导相分离(NIPS)^[8]、气相诱导相分离(VIPS)^[9]和热诱导相分离(TIPS)^[10]等几种主要技术路径。其中,NIPS 法作为一项成熟的制膜方法,适用于多种聚合物,可用于制备微滤、超滤膜及复合膜的支撑层。该方法兼具工艺简便、膜结构可控性强和易于规模化生产等特点,在制膜行业中被普遍采用。

NIPS 技术的原理是借助溶剂挥发或与沉淀剂(非溶剂)间的液-液相交换过程改变铸膜液的热力学状态,进而诱发相分离过程。因此,最终膜结构主要由聚合物-溶剂-非溶剂三元体系的热力学行为及相分离过程的传质动力学共同决定。如图 1 所示,Li 等^[11]基于 NIPS 法开发雾化辅助非溶剂诱导相转化(AA-NIPS)法调控膜孔结构,制备得到高孔隙率、双连续高贯通孔结构的多孔膜。这种表面致密、内部多孔的非对称结构,使得分离膜在选择性与通量之间取得了较好的平衡。

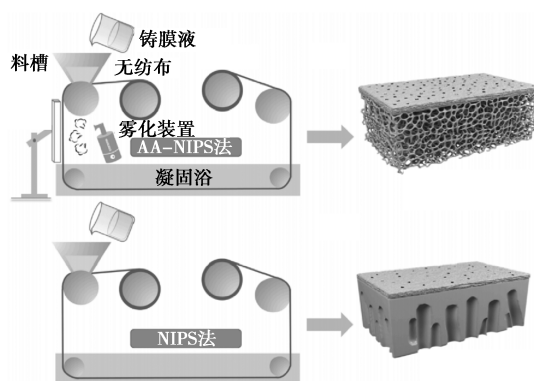


图 1 通过 AA-NIPS 法及 NIPS 法制备多孔膜示意图

2 相转化工艺调控制备 ISA 纳滤膜

2.1 膜材料选择

ISA 膜的独特性在于其能够由单一材料同步形成包含致密皮层与多孔支撑亚层的复合结构。从相转化法的成膜机制来看,分离皮层结构的致密程度(即膜分离精度)主要由分相初期表层聚合物浓度的瞬间富集程度以及凝胶动力学决定。因此,膜材料的本征特性,如亲疏水性、分子链刚性、成膜性以及官能团的相互作用等直接调控相转化过程。从分子设计角度而言,在筛选 ISA 膜制备材料时,需特别关注其化学结构与特征官能团。这是因为特定的官能团(如氨基、酰胺基团、磺酸基和羟基等)不仅影响铸膜液的热力学稳定性,还能在相转化初期通过分子间的氢键作用或聚集行为,诱导表层形成更致密的网络结构,为后续化学改性及构筑高性能纳滤膜奠定关键基础。

研究者们通过合理的材料筛选实现了对 ISA 纳滤膜结构的精准调控。Xu 等^[12]以低成本的商品化共聚物聚丙烯腈-甲基丙烯酸酯[P(AN-co-MA)]为原料制备 ISA 膜。研究表明,通过简单调控铸膜液中的聚合物浓度,即可在无需引入复杂后处理步骤的前提下,实现膜分离精度从超滤到纳滤范围的跃升。PAN 与甲基丙烯酸酯共聚后,由于分子间作用力减弱且与溶剂的亲水性提高,形成的铸膜液在热力学上更稳定,这意味着体系发生相分离所需的非溶剂阈值提高。在相转化过程中,相分离被延迟,倾向于形成更致密的分离皮层。此外,在膜材料中引入纳米填料或功能性嵌段可进一步优化皮层结构。Yang 等^[13]采用相转化法制备了聚间苯二甲酰间苯二胺/氧化石墨烯(PMIA/GO)纳滤膜。当共混 GO 后,氢键网络加强、铸膜液黏度增加、GO 片层提

高了溶剂的扩散阻力,最终制备形成更致密的分离皮层。此外,磺化聚砜、聚醚砜等材料主链由芳香环及稳定的 C—S、C—O 键构成,不含易受活性氯进攻的酰胺基团,相转化形成的分离皮层具有本征氯耐受性,适用于氯化饮用水处理的纳滤膜制备。如图 2 所示, Liu 等^[14] 选用实验室合成的嵌段共聚物聚砜-超支化聚甘油 (PSf-b-hPG), 通过相转化法制备出具有优异耐氯性的新型纳滤膜。凭借硫酸处理与多温度热退火的组合工艺,所得的最佳性能膜兼具极高的水通量 (340 LMH/MPa) 与 74% 的硫酸盐截留率,显著优于多数已报道的 ISA 纳滤膜^[15]。除此之外,聚苯并咪唑^[16]、聚酰亚胺^[17] 和聚苯胺^[18] 等材料均已被应用于 ISA 纳滤膜的制备中。

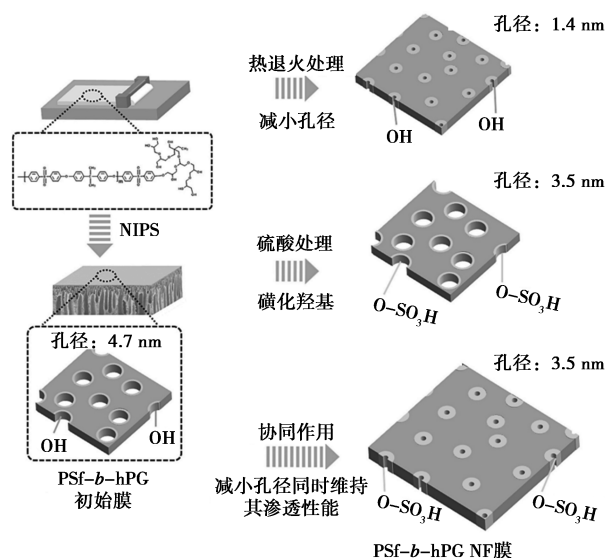


图 2 通过相转化法制备 PSf-b-hPG 纳滤膜示意图

尽管通过对材料的优选与调控已取得显著进展,但 ISA 纳滤膜在脱盐领域的应用仍受限于核心机理瓶颈。目前大多数 ISA 纳滤膜主要应用于染料脱色或有机分子分离领域,却鲜有能够实现高性能脱盐及分盐功能的膜材料。在此领域中,日东电工的 NTR-7450 膜是一款代表性产品,对硫酸盐的截留率可达 83.6%^[19]。其性能优势源于磺化聚醚砜材料的适度亲水性与电荷性:磺酸基团的引入赋予 NTR-7450 膜表面较强的电负性,通过静电排斥效应,实现较高的硫酸盐截留率。然而,从成膜机制上分析,相比于界面聚合法形成的高交联超薄聚酰胺层 (通常 <200 nm), ISA 膜分离皮层的厚度通常在微米级别。同时,相分离过程中孔隙形成的随机性导致 ISA 膜孔径分布较宽,难以对水合半径相近的

离子实现精准筛分。厚皮层增加了水与离子的传输阻力,宽孔径分布降低了离子筛分精度,导致 ISA 膜的脱盐率与渗透通量远低于 TFC 膜。因此,需通过相转化动力学精准调控与后处理改性,实现皮层减薄与孔径分布窄化,提升 ISA 膜在脱盐等实际应用中的分离效率。

2.2 溶剂体系调控

在通过相转化法制备聚合物分离膜时,溶剂是聚合物/溶剂/非溶剂三元体系中的关键因素。它首先溶解聚合物形成均一稳定的铸膜液,继而持续影响相转化过程的热力学状态与动力学路径,最终决定膜的结构与性能。因此,铸膜液各组分的亲和性直接关联相转化过程与膜结构演变,该亲和性可通过汉森溶解度参数 (δ) 近似评估。汉森溶解度参数通过色散力 (δ_d)、极性力 (δ_p) 与氢键力 (δ_h) 3 项分量精确表征分子间作用力,表达式为:

$$\delta = \sqrt{\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2} \quad (1)$$

表 1 总结了几种常见聚合物的汉森溶解度参数值,揭示了聚合物不同的溶解特性。例如,聚乙烯醇 (PVA) 具有较高的氢键分量,表明它倾向于与高极性 or 质子性溶剂结合;而 PAN 则表现出强烈的极性和色散相互作用,这决定了其溶剂必须同时具备与之相当的极性及色散组分,以实现二者的协同匹配。通过比较聚合物和溶剂的汉森溶解度参数,优先选择具有高聚合物-溶剂亲和力的溶剂,有助于实现理想的相转化过程和膜形态。

表 1 常用 ISA 膜制备聚合物的汉森溶解度参数

聚合物	MPa ^{1/2}			
	δ_d	δ_p	δ_h	δ
聚偏氟乙烯	17.10	12.60	10.60	23.74
聚醚砜	19.60	10.80	9.20	24.20
聚砜	18.84	11.22	7.95	23.32
聚醚酰亚胺	19.60	7.60	9.00	22.87
聚酰亚胺	20.90	11.30	9.70	25.66
聚乙烯醇	17.00	9.00	18.00	26.34
聚丙烯腈	21.70	14.10	9.10	27.43

值得注意的是,通过在铸膜液体系中引入挥发性共溶剂或调控初生膜在气隙中的停留时间,可定向制备出具有致密皮层的非对称分离膜。这一策略为实现膜分离性能的定向调控提供了重要途径。例如, Vandezande 等^[20] 利用汉森溶解度参数和相互溶解度参数,从理论上系统分析了聚合物、溶剂与非溶剂之间的相互作用,进而揭示了相转化参数与膜性能及微观结构之间的内在关联。研究指出,当体系

具有较高的聚合物-溶剂参数($\Delta\delta_{P/S}$)和溶剂-非溶剂参数($\Delta\delta_{S/NS}$),同时聚合物-非溶剂参数($\Delta\delta_{P/NS}$)较低时,可获得较高的总溶解度参数($\Delta\delta_t$),表达式为:

$$\Delta\delta_t = (\Delta\delta_{P/S} \times \Delta\delta_{S/NS}) / \Delta\delta_{P/NS} \quad (2)$$

其中, $\Delta\delta_{S/NS}$ 为溶剂与非溶剂间的亲和程度, $\Delta\delta_{P/S}$ 为聚合物与复合溶剂间的相互作用强度,而 $\Delta\delta_{P/NS}$ 为聚合物与非溶剂间的相容性。结果表明, $\Delta\delta_t$ 值较高的聚合物铸膜体系更有利于形成致密皮层,从而获得优异分离性能的材料。Xu等^[12]基于该经验规律,通过调控铸膜液中复配共溶剂的种类与比例,成功促进相转化过程中更致密选择性皮层的形成,实现膜分离性能的提升。此外,Soroko等^[21]利用相互溶解度参数对聚酰亚胺膜体系中溶剂组成的影响进行了定性预测,进一步证实了体系总溶解度参数值与膜选择性之间的正相关性,为膜材料的理性设计提供了理论依据。

2.3 凝固浴定制调控策略

在相转化制膜过程中,凝固浴的组成与条件直接影响非溶剂的扩散速率及体系的热力学状态,从而实现对膜结构与性能的精确调控。纯水作为最常用的凝固浴,因其与多数有机溶剂具有较强的亲和力,能够诱发瞬时分相,促使致密皮层与多孔结构的形成。然而,相转化速率过快易导致皮层缺陷,而过慢则可能使皮层过厚,造成膜通量衰减。因此,研究

者常通过在凝固浴中添加适量极性非质子溶剂或醇类以降低溶剂-非溶剂间的化学势梯度,延缓分相过程,从而获得皮层更致密、缺陷更少的纳滤膜^[22]。

Zinadini等^[23]将自合成的磁性 $ZnFe_2O_4/SiO_2$ 纳米填料引入铸膜液体系中,通过相转化法制备了纳米复合聚醚砜 ISA 纳滤膜。重点探究了凝固浴步骤中磁场对所制备纳滤膜性能的影响,结果显示,当复合膜在磁场下凝固时,磁性纳米颗粒会迁移到纳滤膜表面,从而改变和影响膜的表层结构。当添加质量分数 1% 的 $ZnFe_2O_4/SiO_2$ 纳米颗粒时,膜的纯水通量从无磁场条件下的约 $12 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 显著提升至 $38 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;而当 $ZnFe_2O_4/SiO_2$ 纳米颗粒的添加量为质量分数 0.5% 时,所制备的 ISA 膜不仅表现出优异亲水性,还具备卓越的抗污染性能。Kamp等^[24]采用具有超临界离子强度的水溶液作为溶剂,通过盐稀释诱导相分离技术制备 ISA 纳滤膜。如图 3 所示,超临界盐浓度能够抑制聚阴离子与聚阳离子的络合作用,形成均质液相溶液。在相转化过程中,浓度梯度驱动盐从液态聚合物溶液中扩散析出,同时水扩散进入体系,最终在两相区引发聚电解质沉淀,形成多孔聚电解质复合膜。研究发现,液态聚合物溶液中聚阴离子与聚阳离子的比例会影响相分离动力学,进而影响膜的形貌结构。通过调节单体比例,可制备出不同结构与分离特性的膜材料,分离精度覆盖超滤至纳滤范围。

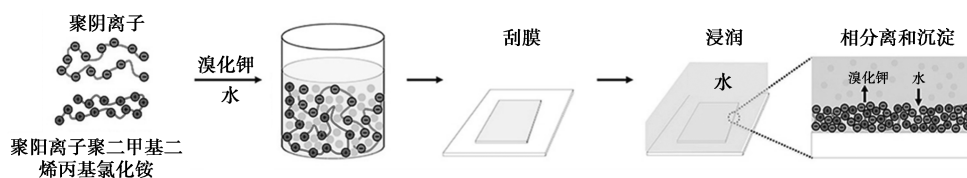


图 3 通过聚电解质水凝固浴调控制备纳滤膜

因此,通过对凝固浴的化学组成、温度及流体动力学等条件进行精细设计与控制,可实现对相转化动力学的调控,从而制备出具有特定孔结构、表面特性与分离性能的纳滤膜材料,以满足水处理、生物分离等不同应用场景的苛刻要求^[25]。

3 基于相转化法的 ISA 纳滤膜表面修饰技术

尽管通过膜材料选择与相转化工艺调控已显著提升了 ISA 纳滤膜的分离性能,但在脱盐应用领域相较于界面聚合法制备的 TFC 纳滤膜仍存在明显差距。这是由于 ISA 膜的致密皮层难以减薄至亚微米级以下,且孔径分布相对宽泛,故而难以对水合半径相近的多种离子实现精准筛分。为突破这一瓶

颈,近年来研究者逐渐探索相转化法耦合后界面改性的新策略进行 ISA 纳滤膜的表面修饰。

3.1 相转化耦合化学交联策略

交联处理作为一种提升膜材料化学稳定性并优化结构致密性的有效工艺,技术路径在于先通过相转化法制备出具有目标结构的膜,再通过交联处理进一步增强膜的分离性或使其在苛刻条件下维持稳定的性能。交联技术通过构建稳固的三维网络,以此强化聚合物链间的连接。这种网络结构可限制链段运动,从而有效抑制了溶胀现象,赋予膜在苛刻环境下保持稳定,拓宽了聚合物膜在特种分离领域的应用。

近年来,相关研究也验证了该策略的可行性。

例如, Liu 等^[26]采用 NIPS 法制备了以部分双季铵化聚(砜-醚腈)无规共聚物(PSF-co-DQAPEN)为膜材料的 ISA 超滤膜(图 4)。随后通过化学季铵化-交联与热退火处理对其分子结构进行重构,成功将其转化为 ISA 纳滤膜。在最优交联条件下,纳滤膜水通量为 41.2 LMH/MPa,对 MgCl_2 、 CaCl_2 和阳离子染料甲基紫的截留率分别达到 98.2%、97.3% 和 100%。得益于膜材料优异的化学稳定性,该膜具有突出的耐氯、耐酸、耐碱性能。类似地, Li 等^[27]成功开发出一种铸膜前聚合物预交联的新型合成工艺,即将环氧树脂的开环反应与相转化工艺相结合制备出具有中等极性、优异稳定性与渗透性的 ISA 纳滤膜,应用于溶剂/水混合物的处理。最优膜对在 N,N -二甲基甲酰胺/水混合液中的罗丹明 B 的截留率超过 99%,渗透通量为 7.5 LMH/MPa。该 ISA 纳滤膜具备卓越的化学耐受性,在经历 pH = 0~14 的极端酸、碱及多种溶剂长达 5 d 的浸泡测试后,依然能兼具结构的完整性与性能的稳定性的。



图 4 ISA 膜表面化学交联过程及其分离性能的变化示意图

3.2 相转化法耦合静电组装策略

与化学交联类似,静电组装同样是改善 ISA 纳滤膜脱盐性能的重要后处理手段。通过引入静电相互作用在膜表面交替沉积聚电解质等功能组分,可实现对膜表面结构、荷电性质与孔径分布的精准调控,提升 ISA 纳滤膜的分离性能。

Ji 等^[28]将线型磺化聚阴离子(聚三氟苯乙烯, SPTFS)引入聚砜(PSF)铸膜体系,通过相转化法制备复合支撑层。通过支撑层中聚阴离子与聚阳离子间的逐级界面组装技术,成功构建了新型纳滤膜。随 SPTFS 添加量增加,支撑层内部形成大孔结构,且表面亲水性增强、电负性提高。最优改性 ISA 纳滤膜表现出高水通量、优异的染料截留率(>98%)与卓越的抗污染性能。Ye 等^[29]以相转化法制备的中空纤维聚醚砜超滤膜为基底,通过在内表面动态组装聚苯乙烯磺酸钠与聚二甲基二烯丙基氯化铵双分子层,成功开发出稳定性优异的中空纤维纳滤膜

(图 5)。通过评估不同组装层数对膜性能的影响,最优改性 ISA 纳滤膜对 Na_2SO_4 截留率达 92.11%。经过 4 轮不同 pH 条件下的抗污染测试,该膜仍能保持稳定的纯水通量。

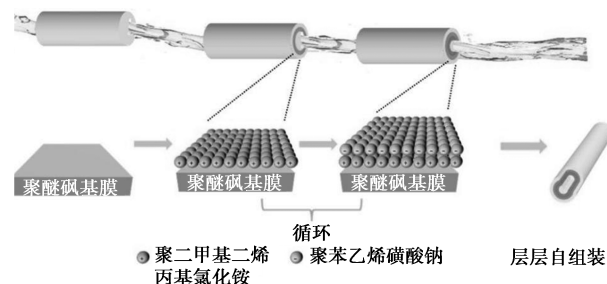


图 5 中空纤维纳滤膜的制备流程示意图

虽然相转化法耦合静电组装策略可通过筛选聚电解质材料和优化组装条件提升纳滤膜性能并拓展其应用,但该技术通常需要多层重复沉积才能实现分离孔径的精准调控,存在制备流程烦琐、耗时较长和成本较高等问题。

4 结论

相转化法作为一种经典且不可或缺的纳滤膜制备技术,凭借持续的材料创新、工艺优化以及与新兴技术的交叉融合,不断推动该技术领域的发展。未来,相转化法制备纳滤膜的研究预计将围绕以下方向展开。

(1) 机理深化与精密调控:利用分子动力学模拟、原位表征等手段,深刻阐释相分离、成膜及液-液交换的内在机制;探索新型相分离技术,指导膜结构的精确调控与设计。

(2) 高性能与功能化:进一步强化膜分离性能,突破传统膜材料水通量与选择性的权衡限制;重点发展抗污染、抗结垢、耐酸碱、耐溶剂等特种功能纳滤膜。

(3) 绿色可持续化:开发低毒/无毒、易回收的环境友好型相转化体系,替代传统高污染、高风险溶剂;从材料、制备、使用到废弃全链条降低环境负荷,实现纳滤膜技术的可持续发展。

(4) 应用拓展:突破传统水处理应用边界,向有机溶剂纳滤、离子精准选择性分离等高端分离领域延伸;拓展膜分离技术在能源化工、精细分离等高附加值领域的应用空间。

参考文献

- [1] Guo S, Zhang J, Gou L, et al. Principles, fabrication, and functional

- advancements of stimuli-responsive nanofiltration membranes; A comprehensive review[J]. *Desalination*, 2026, 619: 119533.
- [2] Rezania H, Davood A F M H, Greer M S, *et al.* Innovative crosslinking strategies for integrally skinned asymmetric membranes in organic solvent nanofiltration; A review of recent advances[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 378: 134577.
- [3] Pérez-Manríquez L, Neelakanda P, Peinemann K V. Tannin-based thin-film composite membranes for solvent nanofiltration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 541: 137–142.
- [4] Saleh E A M, Kumar A, Alghazali T, *et al.* Recent advances in thin film composite (TFC) membrane development; Materials and modification methods [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2025, 11 (5): 1059–1085.
- [5] Wang C, Park M J, Seo D H, *et al.* Recent advances in nanomaterial-incorporated nanocomposite membranes for organic solvent nanofiltration[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 268: 118657.
- [6] Hosseinabadi S R, Caspers S, Shenoy A M, *et al.* Solution casting temperature changing for crosslinked polyvinylidene difluoride solvent resistant nanofiltration membranes; Understanding the phase inversion process and performance impact[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 372: 133495.
- [7] Strathmann H, Kock K, Amar P, *et al.* The formation mechanism of asymmetric membranes[J]. *Desalination*, 1975, 16 (2): 179–203.
- [8] Basko A, Lebedeva T, Yurov M, *et al.* Mechanism of PVDF membrane formation by NIPS revisited; Effect of precipitation bath nature and polymer-solvent affinity [J]. *Polymers*, 2023, 15 (21): 4307.
- [9] Dehban A, Hosseini Saeedavi F, Kargari A. A study on the mechanism of pore formation through VIPS-NIPS technique for membrane fabrication[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022, 108: 54–71.
- [10] Ma W, Zhou Z, Ismail N, *et al.* Membrane formation by thermally induced phase separation; Materials, involved parameters, modeling, current efforts and future directions[J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 669: 121303.
- [11] Li Y, Pan G, Zhang Y, *et al.* A new method for tailoring the surface pore size and internal pore structure of ultrafiltration membranes without using additives—Atomization-assisted nonsolvent induced phase separation method[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 304: 122334.
- [12] Xu Y, Tognia M, Guo D, *et al.* Facile preparation of polyacrylonitrile-co-methylacrylate based integrally skinned asymmetric nanofiltration membranes for sustainable molecular separation; An one-step method[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 546: 251–261.
- [13] Yang M, Zhao C, Zhang S, *et al.* Preparation of graphene oxide modified poly (m-phenylene isophthalamide) nanofiltration membrane with improved water flux and antifouling property[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 394: 149–159.
- [14] Liu T, Wang L, Wang W, *et al.* High-flux and chlorine-resistant nanofiltration membrane fabricated via phase inversion using polysulfone-b-polyglycerol hyperbranched block copolymer [J]. *Desalination*, 2024, 575: 117314.
- [15] Huo K, Wang J, Zhang J, *et al.* Fabrication of a novel composite nanofiltration membrane with effective treating dye wastewater via integration of phase inversion and interfacial polymerization [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11 (5): 111013.
- [16] Valtcheva I B, Kumbharkar S C, Kim J F, *et al.* Beyond polyimide: Crosslinked polybenzimidazole membranes for organic solvent nanofiltration (OSN) in harsh environments[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 457: 62–72.
- [17] Hai Y, Zhang J, Shi C, *et al.* Thin film composite nanofiltration membrane prepared by the interfacial polymerization of 1, 2, 4, 5-benzene tetracarbonyl chloride on the mixed amines cross-linked poly (ether imide) support [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 520: 19–28.
- [18] Siddique H, Rundquist E, Bhole Y, *et al.* Mixed matrix membranes for organic solvent nanofiltration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 452: 354–366.
- [19] Van Der Bruggen B, Koninckx A, Vandecasteele C. Separation of monovalent and divalent ions from aqueous solution by electrodialysis and nanofiltration [J]. *Water Research*, 2004, 38 (5): 1347–1353.
- [20] Vandezande P, Li X, Gevers L E M, *et al.* High throughput study of phase inversion parameters for polyimide-based SRNF membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 330 (1): 307–318.
- [21] Soroko I, Lopes M P, Livingston A. The effect of membrane formation parameters on performance of polyimide membranes for organic solvent nanofiltration (OSN); Part A. Effect of polymer/solvent/non-solvent system choice[J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 381 (1): 152–162.
- [22] Yu C, Xie D, Wu Y, *et al.* Kinetic control of phase inversion assembles mesoporous silica at membrane interfaces for high-affinity tetrabromobisphenol A recognition and membrane antifouling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 528: 172349.
- [23] Zinadini S, Zinatizadeh A A L, Rahimi M, *et al.* Magnetic field-augmented coagulation bath during phase inversion for preparation of $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{PES}$ nanofiltration membrane; A novel method for flux enhancement and fouling resistance[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2017, 46: 9–18.
- [24] Kamp J, Emonds S, Borowec J, *et al.* On the organic solvent free preparation of ultrafiltration and nanofiltration membranes using polyelectrolyte complexation in an all aqueous phase inversion process[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 618: 118632.
- [25] Tang J, Bai C, Huang X, *et al.* Aqueous phase co-solvent-assisted preparation of high-performance polyamide nanofiltration membranes; Preparation, performance and mechanistic [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2025, 62: 106168.
- [26] Liu C, Sun Y, Chen Z, *et al.* From ultrafiltration to nanofiltration; Nanofiltration membrane fabricated by a combined process of chemical crosslinking and thermal annealing [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 212: 465–473.
- [27] 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.
- [28] Ji X, Tang Y, Feng X, *et al.* NF membranes with high permeability and excellent antifouling performance based on enhanced steric hindrance and the introduction of polyquaternium-10 [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2026: 163–178.
- [29] Ye L, Chen Y, Xu L, *et al.* Robust hollow fiber nanofiltration membranes with high stability for wastewater process by dynamic layer-by-layer assembly [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2025, 172: 106146. ■