

专题综述

单体扩散控制界面聚合制备聚酰胺薄层复合纳滤膜研究进展

刘佳欢^{1,2}, 王建强^{2,3*}, 刘 富^{2,3*}

(1. 宁波大学 材料科学与化学工程学院, 宁波 315211; 2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201; 3. 中国科学院大学 宁波材料工程学院, 宁波 315201)

摘要: 纳滤以其分离效率高、操作温和、适应范围广等特点,在缓解全球水资源危机方面一直备受关注。聚酰胺薄层复合纳滤膜是目前应用最广泛的纳滤膜产品,其分离性能主要受聚酰胺分离层性质影响。界面聚合是目前聚酰胺分离层的通用制备方法,但该反应过程存在反应速率快和结构难调控的问题。近年来,国内外研究学者在可控界面聚合制备聚酰胺薄层复合纳滤膜方面开展了大量研究工作。单体扩散控制是一种简单、高效、易于放大化生产的方法,成为该领域的研究热点。本文介绍了近年来针对单体扩散控制界面聚合制备聚酰胺薄层复合纳滤膜的研究进展,旨在揭示单体扩散控制对聚酰胺分离层结构和分离性能的影响规律,并为聚酰胺薄层复合纳滤膜的应用提供参考。

关键词: 界面聚合; 单体扩散; 聚酰胺; 纳滤膜

中图分类号: TQ028 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)04-0194-12

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.04.020

随着全球水资源短缺、环境污染问题日益严重,膜分离技术已成为全球关注的热点^[1-3]。纳滤(NF)膜作为膜分离技术的重要组成部分,凭借其高通量、高分离精度、低能耗等特点,已广泛应用于海水淡化、污水资源化回收、食品与医药分离等多个领域^[4]。目前,薄层复合纳滤膜是市场上的主流产品,复合膜分离层主要通过界面聚合(IP)的方法制备。薄层复合纳滤膜通常包含无纺布支撑层、超滤基膜和聚酰胺(PA)分离层,其中聚酰胺分离层的物理结构(表面形貌、厚度、孔径尺寸及分布等)和化学性质

(亲水性、交联度和表面电荷性质等)对于复合纳滤膜的分离性能具有重要的影响^[5-8]。但是,传统的界面聚合策略存在单体反应速率快、分离层结构不易调控、孔径分布宽等问题,限制了纳滤膜在不同领域的应用^[9-11]。因此,通过可控界面聚合制备结构和分离性能可控的聚酰胺复合纳滤膜成为当前膜科学与技术领域的研究重点^[12]。

近年来,研究人员提出了多种可控界面聚合策略,主要包括反应单体结构调控策略和反应单体扩散控制策略。反应单体结构调控策略是通过改变反

收稿日期: 2025-03-12; 修改稿收到日期: 2025-03-20

基金项目: 浙江省领雁研发计划“高效选择性纳滤膜材料研发与应用”[2024C03284(SD2)]

第一作者简介: 刘佳欢(2000-),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事纳滤膜制备及其性能研究。* 通讯作者,王建强, E-mail: wangjianqiang@nimte.ac.cn; 刘 富, E-mail: fu.liu@nimte.ac.cn

引用本文: 刘佳欢,王建强,刘 富. 单体扩散控制界面聚合制备聚酰胺薄层复合纳滤膜研究进展[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(4): 194-205.

Citation: Liu J H, Wang J Q, Liu F. Research progress in preparation of polyamide nanofiltration membranes by monomer diffusion controlled interfacial polymerization[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(4): 194-205.

应单体的分子结构,进而影响其反应速率、交联度以及聚合物的最终结构,通过调整单体的官能团、分子大小、电子结构来控制膜分离层的性能^[13-17]。反应单体扩散控制策略是通过调节反应单体在反应介质中的扩散速度,来控制界面聚合反应,从而影响聚酰胺层的厚度、形貌和分离性能^[18-20]。其中单体扩散控制策略由于易于与现有规模化生产工艺相结合逐渐受到广泛关注^[21],本文将重点探讨单体扩散控制界面聚合方面的研究进展。反应单体扩散的有效控制,可以在一定程度上实现对聚酰胺分离层表面形貌、厚度、表面电荷、交联度、孔径大小及其分布的有效调控^[20,22],从而实现对膜分离性能(渗透通量和选择性)、抗污性能和使用寿命等的进一步调控^[23-26]。目前研究人员发展了多种反应单体扩散控制策略,主要包括:中间层策略、溶液黏度调控策略、溶液相态控制策略和反应界面性质调控策略等。研究人员系统研究了反应单体扩散对界面聚合过程、聚酰胺分离层性质的影响机制^[27],并大幅提升了聚酰胺复合纳滤膜的综合性能,扩展了其可应用的范围。总的来说,反应单体扩散控制策略为聚酰胺复合纳滤膜的发展和在不同领域的应用提供了更多的思路 and 机会。虽然在该方面已经取得了诸多进展,但研究过程中仍存在需进一步剖析的问题,例如单体扩散速率对聚酰胺分离层结构和分离性能的影响机制尚不明确和统一。本文聚焦于当前水相胺类单体的扩散过程控制在聚酰胺薄层复合纳滤膜制备领域的研究进展,探讨其技术发展历程、关键影响因素、挑战与应用前景,旨在为相关领域的研究者提供理论依据和研究参考。

1 反应单体扩散的不同调控策略

界面聚合制备聚酰胺分离层过程中,水相反应单体通常为胺类单体[如哌嗪(PIP)],油相反应单体通常为酰氯类单体[如均苯三甲酰氯(TMC)]。研究表明,通常是水相哌嗪单体扩散至油相溶液中与均苯三甲酰氯单体反应,形成聚酰胺交联层^[28]。在界面聚合法制备聚酰胺纳滤膜的过程中,膜性能主要受制于基膜特性、体相溶液性质及反应界面状态等关键要素。上述3个方面调控的核心都是控制反应单体扩散。因此,以下分别从空间效应(基膜维度)、体相溶液(溶液传质维度)和界面性质(反应维度)3个层面系统总结相关研究进展。另外,随着计算科学和人工智能的快速发展,单体扩散控制界面

聚合制备聚酰胺纳滤膜的研究不仅局限在实验研究,对于单体扩散过程的分子模拟和人工智能技术辅助界面聚合设计也在迅速发展。

1.1 空间效应调控

虽然聚酰胺薄层复合纳滤膜的分离性能主要由聚酰胺分离层决定,但基膜表面性质(例如:表面粗糙度、孔径大小及其分布、亲水性等)对界面聚合过程有较大影响。目前常用基膜为通过非溶剂致相转化法制备的超滤膜,该膜存在机械强度高、可连续化生产等优点,但膜表面的低孔隙率和较宽的孔径分布,对水相反应单体的存储和释放造成较大影响。针对上述问题,研究人员提出了在超滤基膜和聚酰胺分离层之间引入中间层的策略,从而可以更好控制水相单体的存储和释放等,并进一步实现对聚酰胺分离层结构和性能的调控^[29-31]。

1.1.1 无机纳米材料中间层

Karan等^[20]通过在基膜表面引入 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 纳米线(直径2 nm),然后将含有胺单体的水相溶液储存于该中间层中,并进行界面聚合制备聚酰胺分离层[如图1(a)所示]。由于通过纳米线构成的中间层具有相对均匀的孔结构,从而可以实现胺单体的均匀释放。因此可以形成缺陷更少的聚酰胺初生层,缩短界面聚合的反应时间,最终可以得到更薄的聚酰胺分离层(<10 nm)。在纳米支撑层骨架的限制下,界面聚合产生的局部高温可以使纳米膜呈现出囊泡褶皱的形式。该结构在5 MPa的压力下也不易坍塌和变形,这种变形结构使得支撑层单位面积上的纳米薄膜面积更大,从而有效提高了渗透性 $[522 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})]$ 。与光滑的纳米分离层相比,在保持选择性的条件下,褶皱型分离层的有效过滤面积至少可增加四倍。因此,纳米线中间层的引入,对于水相胺单体的扩散,以及反应热的限域效应具有重要的影响。

Wei等^[32]设计了高孔隙率羟基方钠石/氧化石墨烯(SOD/GO)复合中间层,并通过界面聚合制备了高性能聚酰胺复合纳滤膜。中间层所产生的独特的曲折结构,以及与胺单体间的氢键作用抑制了胺单体的扩散,扩散速率降低了50%,最终实现了可控的缓慢界面聚合过程。缓慢的界面聚合过程有利于形成具有条纹形态和窄孔径分布,且更薄的致密聚酰胺层。所制备聚酰胺复合纳滤膜具有优异透水性 $[221 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})]$,同时保留了优异的 Na_2SO_4 截留率(97.2%)。另外,除了中间层对单

体扩散和反应热方面的影响外,多壁碳纳米管(MWCNTs)中间层的引入,提高了复合纳滤膜的机械强度,使得所制备膜具有优异的长期运行稳定性^[33]。

另外,虽然纳米线和纳米管作为中间层,展现了优异的结构和分离性能可控性,但纳米材料本身的聚集以及在基膜表面的均匀分散也至关重要。为了进一步提高中间层的亲水性,Gong 等^[34]采用聚多巴胺改性的碳纳米管作为中间层,有效提高了其在水溶液中的分散性,所制备中间层更为均匀。界面聚合后可得到厚度仅为 12 nm 的聚酰胺分离层,可显著提高纳滤膜的渗透通量 $[320\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})]$ 。同时,由于聚酰胺分离层的均匀性,所制备膜对 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的选择性高达 85.5。同时,研究人员也提出了更为绿色的材料,例如纤维素纳米晶体(CNC)和多酚基涂层来制备中间层^[35-36]。利用中间层物质与胺单体间的氢键作用,同样可以起到储存、控制释放水相胺单体的效果。在降低界面聚合反应速率的条件下,可形成缺陷更少的薄层聚酰胺分离层,所制备膜对 Na_2SO_4 截留率超过 97%,渗透通量高达 $59.9\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

1.1.2 框架材料中间层

近年来,共价有机框架(COF)和金属有机框架(MOF)材料由于其丰富的种类、可控的结构、高孔

隙率等特性,成为分离膜领域关注的热点^[37-39]。上述材料由于具有纳米有序结构,在水相溶液储存和胺单体释放方面具有独特的优势,可以实现更为均匀的单体释放。Yuan 等^[40]使用 1,3,5-三甲酰间苯三酚(Tp)与对苯二胺(Pa-1)合成 TpPa-1 型共价有机框架纳米片(CONs),并在基膜表面进行了中间层构筑(CLS)[如图 1(b)所示]。在优化的条件下,最终可形成亚 10 nm 的聚酰胺分离层。所制备纳滤膜的渗透通量高达 $536\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$,对 Na_2SO_4 的截留率为 94.3%。在上述研究中,通常中间层是不需要去除的。但聚酰胺分离层结构形成后,中间层的去除可进一步提高复合膜的渗透通量^[20, 41]。

Wang 等^[41]通过在基膜表面沉积聚多巴胺修饰的 ZIF-8 纳米粒子形成中间层。界面聚合后,通过刻蚀将其去除,从而可以形成更大的聚酰胺分离层空腔[如图 1(c)所示],进一步提升膜的渗透通量 $[535\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})]$ 。另外,在该方法中可形成两种层次结构的聚酰胺分离层。首先,聚酰胺在聚集的纳米粒子上方形成较大的空腔结构(纳米粒子去除后);其次附着在纳米粒子表面的聚酰胺,可进一步形成具有更小尺度的褶皱结构。因此通过纳米粒子聚集模板制备的聚酰胺分离层具有更大的过滤面积,这是该类膜渗透通量高的主要原因之一。

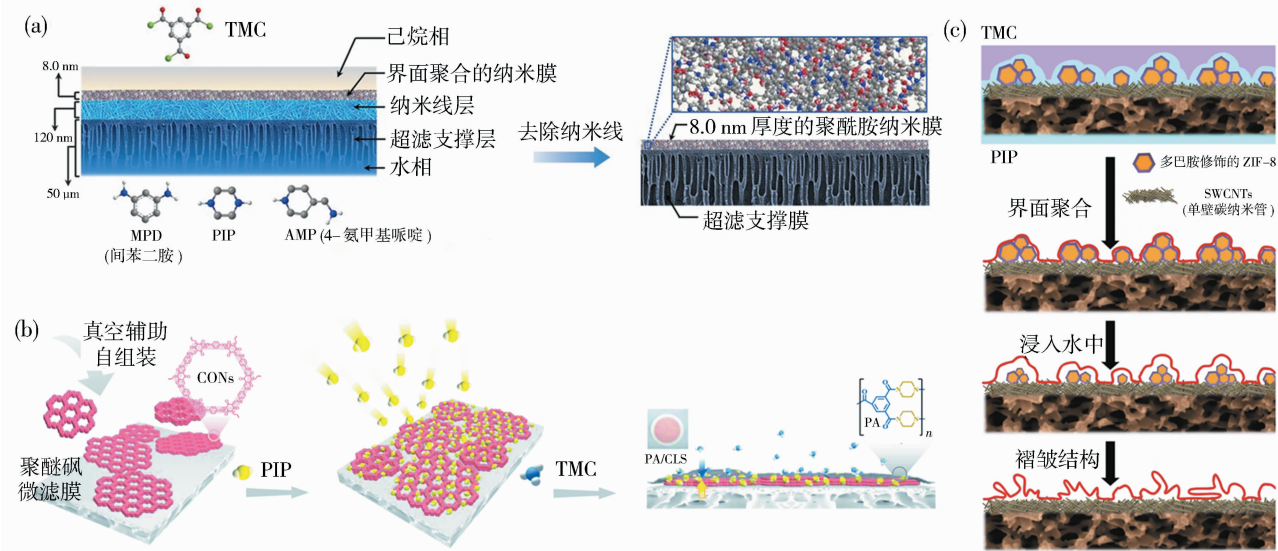


图 1 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 纳米线作为中间层的聚酰胺分离层制备示意图^[20] (a); COF 作为中间层的聚酰胺复合纳滤膜的制备^[40] (b); 纳米粒子诱导的聚酰胺纳滤膜的制备过程示意图^[41] (c)

Fig. 1 Schematic illustration of polyamide separation layer fabrication using $\text{Cd}(\text{OH})_2$ nanostrand layer as intermediate layer^[20] (a); schematic illustration of polyamide separation layer fabrication using COF as intermediate layer^[40] (b); schematic illustration of the preparation process of polyamide nanofiltration membrane assisted by nanoparticles^[41] (c)

上述多项研究表明,中间层的引入可以提升聚酰胺复合纳滤膜分离性能。中间层的引入具有一定的空间效应,主要提供了水相胺单体溶液的储存空间,提升了胺单体的均匀和缓慢释放能力,从而有利于形成少缺陷聚酰胺初生层,最终形成超薄聚酰胺分离层。复合膜渗透通量的提升主要得益于聚酰胺分离层厚度的降低、褶皱结构的形成和由中间层所带来的漏斗效应的抑制^[30-31,42]。目前中间层的引入主要体现在空间效应的调控,主要包括胺单体的空间分布和传输,以及所形成聚酰胺分离层的空间结构。总的来说,中间层是一种可有效提升聚酰胺复合纳滤膜分离性能的方法。

1.2 体相溶液调控

水油两相溶液性质的调控也是近年来研究人员关注的热点。体相溶液的黏度、pH 以及离子强度等对溶液中反应单体的传输、单体质子化等都将产生较大影响,从而进一步影响聚酰胺分离层的结构和分离性能。

1.2.1 水相溶液调控策略

Tan 等^[19]通过在水相溶液中加入聚乙烯醇(PVA),利用 PVA 与哌嗪之间的氢键作用,以及水相溶液黏度的增大,减缓了哌嗪向有机相的扩散。当水相中加入 PVA 时,水相单体与有机相单体在反应区的扩散系数差被拉大,从而导致反应扩散体系的不稳定性。从而,可以使得聚酰胺分离层从光滑表面转变为具有图灵结构纳米级条纹的不均匀表面,如图 2(a)所示。图灵结构的形成增大了聚酰胺分离层的粗糙度,极大提升了其有效过滤面积,从而提升膜的渗透通量 $[260 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})]$ 。Ren 等^[43]在水相溶液中加入甘油,以期提高水相溶液的黏度,从而达到减缓哌嗪的扩散速率的目的。通过甘油的加入,同样可以制备得到图灵结构的聚酰胺纳滤膜。

Liu 等^[44]通过在水溶液中引入不同浓度的 NaOH 来改变 pH 值,溶液碱性的提高可以有效消耗界面聚合过程所产生的氢离子,从而使得反应向正向移动,最终提高了哌嗪和均苯三甲酰氯的交联度。界面聚合反应的快速正向移动,提升了有机相中哌嗪的消耗速率,从而加大了水相中单体向有机相的扩散,并缩短了其自终止时间。最终所制备的聚酰胺复合纳滤膜展现了增强的渗透通量 $[136 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})]$ 并保持了对 MgSO_4 的截留率(95.0%)。

此外,反应溶液中无机盐的引入也会对聚酰胺

分离层结构和性能产生较大影响。盐离子的加入增加了反应单体向油相传输的阻力,因此限制了反应单体向油相的传输速率。Shen 等^[45]通过无机盐介导的界面聚合过程,调节了聚酰胺复合膜的结构和分离性能[如图 2(b)所示]。实验和理论模拟数据表明,盐离子的加入使得水中胺单体被盐离子包围,降低了其向有机相的扩散,从而减慢了胺单体的扩散速率。同时,由于无机盐抑制了共聚物离子之间的静电作用,促进了齐聚物网络的交联,从而促进了致密的超薄聚酰胺分离层的形成。最终,通过该方法可以提升所得膜的渗透通量 $[166 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})]$ 和对 NaCl 的截留性能(72.7%)。

1.2.2 油相溶液调控策略

除了水相溶液的调控,有机相溶液调控同样重要。共溶剂辅助界面聚合策略则通常需要在有机相中加入共溶剂,从而改变水油界面性质,以期达到控制单体扩散的目的^[46]。如图 2(c)所示,Wang 等^[47]通过在油相中加入弱极性有机溶剂甲酸乙酯,有效调节哌嗪和均苯三甲酰氯之间的界面聚合过程,得到了较窄的孔径分布的聚酰胺分离层,所制备膜展现了更高的单价/二价离子选择分离性($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 选择性为 145, $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 选择性为 61)。甲酸乙酯的加入主要降低了水油两相溶液的界面张力,从而促进了哌嗪单体快速均匀地扩散入油相与均苯三甲酰氯发生反应。在优化的化学配比下,可以得到交联度较高的聚酰胺分离层。共溶剂的加入除了对水油界面张力产生影响外,实际上由于所加溶剂的特性(例如:两相相溶性、表面张力以及对哌嗪单体的溶解能力等),其对哌嗪单体扩散的影响机制是多方面的。最近,Ye 等^[48]通过在油相中加入两相互溶共溶剂丙酮,系统研究了丙酮对哌嗪单体扩散行为的影响,提出了“丙酮萃取效应”,如图 2(d)所示。优化后的膜表面电负性降低,结构更致密、孔径更小。在不降低通量的情况下,实现了二价阳离子截留率的提升。基于共溶剂的单体扩散调控策略,有利于在不对现有制造工艺进行任何重大改变的情况下开发高性能聚酰胺纳滤复合膜。

无论是水相溶液调控还是油相溶液调控,实际上都是在控制哌嗪单体向油相溶液的扩散速率,其主要原因是哌嗪在油相正己烷中的溶解度较大,而均苯三甲酰氯单体在水中几乎不溶解,并会在水界面导致酰氯的水解,降低均苯三甲酰氯的反应活性。离子液体是在室温下熔融的有机盐,具有高稳定性

和强溶解性^[49]。相比于水的高表面张力,离子液体的表面张力通常较小,因此将其作为界面聚合水相溶剂时,可形成界面张力较小的稳定界面^[50]。Liu 等^[51]尝试使用一系列离子液体作为胺单体的溶剂,进行界面聚合制备聚酰胺复合纳滤膜。结果表明烷

烃—离子液体界面具有相当高的稳定性,在单体扩散过程中,是正己烷中的均苯三甲酰氯单体扩散到离子液体中,这与传统的界面聚合过程是不同的。所制备的聚酰胺分离层更薄、更光滑、渗透性更强,如图 2(e)所示。

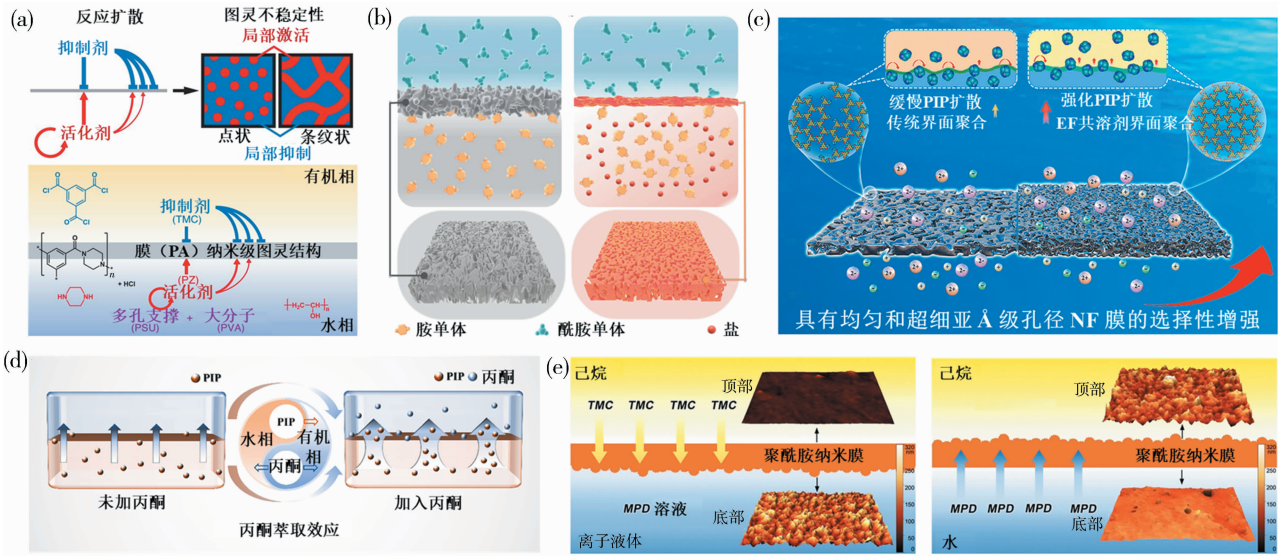


图 2 界面聚合中的图灵结构示意图^[19](a);无机盐介导界面聚合示意图^[45](b);共溶剂辅助界面聚合示意图^[47](c);“丙酮萃取效应”示意图^[48](d);单体在离子液体中的扩散方向示意图^[51](e)

Fig. 2 Schematical illustration of Turing-type structures in interfacial polymerization^[19](a); schematical illustration of the inorganic salt-tuned interfacial polymerization process^[45](b);schematical illustration of co-solvent assisted interfacial polymerization process^[47](c);schematic illustration of “acetone extraction effect”^[48](d); schematic illustration of the monomer diffusion in ionic liquids^[51](e)

这些调控策略通过优化单体扩散速率,显著改善了聚酰胺复合纳滤膜的性能。水相溶液和油相溶液性质的调控都会对反应单体的扩散造成较大影响,通过溶液黏度、pH、离子强度、表面张力和溶剂种类的调控,可以实现对单体扩散速率的有效调控,最终可实现对聚酰胺分离层结构和分离性能的调控。相较于中间层策略,体相溶液调控更易于在规模化生产中应用。

1.3 界面性质调控

由于界面聚合反应单体的稳定性和溶解性差别,需要通过表面张力差别较大的两相溶液形成稳定界面,从而实现单体在相界面处的交联反应。因此,界面性质对于反应单体扩散和聚酰胺分离层性质具有重要影响。

1.3.1 液液界面调控

Liang 等^[52]通过经典的表面活性剂策略,实现了水油界面性质的调控。水相中加入的阴离子型表面活性剂可以在水油界面形成有序排列,由于亲水

的阴离子基团在水相侧,表面活性剂分子上的负电荷吸引了水相溶液中带正电的哌嗪单体,从而使得哌嗪单体能够在水油界面处富集[如图 3(a)所示]。表面活性剂的加入导致了水油界面处胺单体的浓度上升,另一方面,表面活性剂的加入,降低了水油界面的界面张力,使得哌嗪穿过界面的能垒降低。在上述两个方面的影响下,最终使得哌嗪单体能够大量、快速且均匀地穿过界面,所制备聚酰胺分离层展现了更窄的孔径分布,可以实现不同离子的精准分离。但在上述过程中,除了水/油界面上的表面活性剂单层外,水相中还存在大量的游离表面活性剂分子及其聚集体(如胶束)。为消除上述影响, Peng 等^[53]采用了在油相加入油溶性表面活性剂的策略,在保证表面活性剂可以在水油界面形成有序单层排列的情况下,消除了表面活性剂在体相溶液中的聚集[如图 3(b)所示],使得反应单体在溶液中分布更为均匀。通过该方法制备的聚酰胺复合纳滤膜展现出 3.0~8.0 Å(1 Å=10⁻¹⁰ m)的窄孔径分布,优于

大多数商用 NF 膜,如 NF 90(1.6~12.6 Å)和 DK NF 膜(3.0~9.5 Å)。基于优异的孔径分布的特

性,所制备纳滤膜实现了超过 99.1%的 Mg^{2+} 截留率,以及超高的 Li^+/Mg^{2+} 选择性(4 147)。

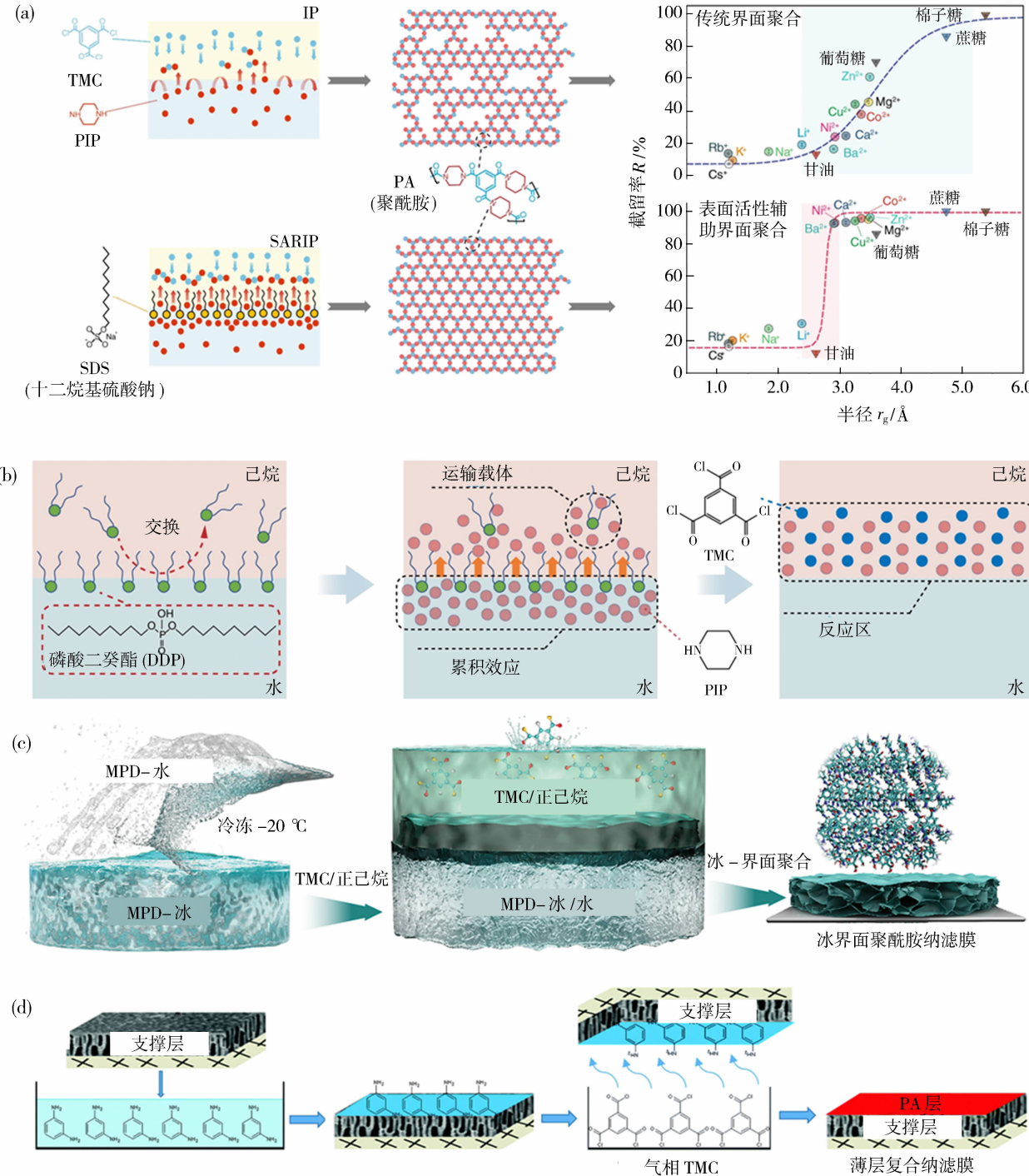


图 3 水溶性(a)和油溶性(b)表面活性剂辅助界面聚合示意图^[52-53];冰/正己烷界面聚合示意图^[18](c);蒸汽界面聚合合成聚酰胺复合纳滤膜示意图^[55](d)

Fig. 3 Schematic illustration of surfactant assistant interfacial polymerization with water soluble (a) and oil soluble (b) ^[52-53]; schematic illustration of the interfacial polymerization at the ice/*n*-hexane interface ^[18] (c); schematic illustration of vapor induced interfacial polymerization for polyamide nanofiltration membrane fabrication ^[55] (d)

1.3.2 固液界面调控

界面包含多种类型,除了液液界面,还有液固界面、气液界面等。在界面聚合制备聚酰胺复合纳滤膜策略中,固相的引入可以降低溶剂的使用量和后续处理的压力。另外,单体在固相中的传输有别于液体中的传输,有望实现更好的单体扩散控制。基于此,Zhang 等^[18]通过冻结冰点较高的水相来构筑固液界面[如图 3(c)所示],胺单体则被储存于上述冰晶中。胺单体可以通过冰界面的融化而缓慢释放,通过对冰融化速率的控制,可以有效调控胺单体的释放速率。由于冰与胺单体的高结合能和吸附性,以及反应过程中冰/水混合物的黏度,融化过程导致在反应界面的某一阶段形成低扩散率和大浓度梯度的胺单体,从而形成疏松的异质孔隙。通过该方法可以制备得到具有增强折叠结构、相互连接和堆叠的三维结构聚酰胺分离层,最终提升了所制备膜的渗透性[297 L/(m² · h · MPa)]和 Cl⁻/SO₄²⁻选择性(143.8)。

1.3.3 气液界面调控

另外,鉴于油相溶液的低沸点特性,研究人员提出了气液界面聚合的策略。通过气态反应物或惰性气体流携带反应物参与气液界面聚合,不仅可以更为均匀地提供反应单体,同时可以降低有机溶剂的使用量。这种方法可避免单体扩散混乱和油水界面的热力学不稳定性^[54]。Paseta 等^[55]通过均苯三

甲酰氯蒸气进行界面聚合反应[如图 3(d)所示]。首先,用胺单体水溶液浸渍基膜,随后将具有二胺的基膜与酰氯的蒸气接触以进行界面聚合反应。提高了酰氯单体的使用效率,避免了在传统界面聚合工艺中进行的清洁操作过程中的损失。通过气液界面聚合法制备的聚酰胺层具有高交联度特性。这是由于均苯三甲酰氯蒸气和水相溶液之间的反应界面稳定^[56],从而形成了具有优异脱盐和渗透性能的高选择性层。与传统的界面聚合工艺相比,气液界面聚合方法相对温和、渐进,可避免局部过热导致的扩散不平衡,并能及时释放反应产生的 HCl 气体。

由此可见,无论是从水相调控反应界面,还是从油相调控反应界面,都会对界面聚合过程造成较大的影响。界面的组成、张力、稳定性等都是界面聚合和聚酰胺分离层结构的重要影响因素。界面性质首先影响的是反应单体的扩散特性,进而可以实现对聚酰胺分离层表面形貌、孔径大小及其分布、交联度、厚度、分离性能进行有效调控。但值得注意的是,上述研究过程中,界面的调控往往是在相对静态的条件下开展。界面聚合法制备聚酰胺复合纳滤膜规模化连续制备过程中,会影响界面稳定性,如何实现上述策略的放大化生产是值得思考的问题。表 1 对上述三种单体扩散策略通过各种制膜方法得到的纳滤膜的性能进行了整理。

表 1 不同调控策略制备的纳滤膜
Table 1 Nanofiltration membranes prepared by different regulatory strategies

调控策略	制膜方法	纳滤膜纯水通量/ (L · m ⁻² · h ⁻¹ · MPa ⁻¹)	纳滤膜截盐性能	参考文献
空间效应调控	Cd(OH) ₂ 纳米线牺牲层	522	—	[20]
	TpPa-1 中间层	536	Na ₂ SO ₄ : 94.3%	[40]
	PD/ZIF-8 中间层	535	Na ₂ SO ₄ : ~95%	[41]
体相溶液调控	水相溶液加入 PVA	260	Na ₂ SO ₄ : 99.6%	[19]
	水相溶液加入无机盐介导界面聚合	166	Na ₂ SO ₄ : 97.8%; NaCl: 72.7%	[45]
	油相溶液加入甲酸乙酯	184	Na ₂ SO ₄ : 99.5%; MgCl ₂ : 98.8%	[47]
界面性质调控	水相表面活性剂 SDS 调控界面聚合	171	Na ₂ SO ₄ : 99.6%; MgCl ₂ : 95.0%	[52]
	油相表面活性剂 DDP 调控界面聚合	88	Na ₂ SO ₄ : 99.7%; MgCl ₂ : 99.1%	[53]
	冰界面限域界面聚合	297	Na ₂ SO ₄ : 99.6%	[18]

2 单体扩散过程模拟

近年来,计算科学(如分子模拟、机器学习)与人工智能技术的深度融入,为界面聚合过程中单体扩散控制与聚酰胺膜结构设计提供了全新模式^[57]。

传统界面聚合技术通过调节单体结构、溶液黏度等参数优化聚酰胺层结构,但存在瓶颈:1) 经验驱动试错:工艺参数与膜性能的构效关系不明确,研发周期长;2) 微观机制模糊:单体扩散、交联反应等关键步骤缺乏微观动态解析,难以实现精准调控。然而,

计算科学[分子动力学(MD)、密度泛函理论(DFT)]与人工智能[机器学习(ML)]的引入推动了纳滤膜从实验研究向“机理解析-数据驱动”转变^[58-59]。

Li等^[60]通过分子动力学和密度泛函理论解析了 N,N -二甲基甲酰胺(DMF)溶剂对聚酰胺层的活化效应[如图4(a)所示]。通过溶胀效应,DMF使聚酰胺自由体积增加,同时每个酰胺键的溶解自由能可促进低聚物解离,形成贯通孔道(孔径 ~ 0.8 nm),能够有效促进单体的扩散,降低聚酰胺分离层的厚度,有望提升纳滤膜的渗透性。Liu等^[61]通过分子动力学模拟真实实验条件,建立单体浓度梯度与扩散动力学的原子模型,系统研究了三甲酰氯与间苯二胺(MPD)浓度比对膜结构的影响[如图4(b)所示]。通过耦合实验验证与模拟分析,首次

建立“浓度比-扩散动力学-膜结构-性能”的定量构效关系,实现界面处单体浓度梯度与反应速率达成动态平衡,形成优化结构的聚酰胺分离层,透水性 $[235 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})]$ 与截留率(NaCl 91%)实现最佳协同,为高通量-高选择性聚酰胺膜的理性设计提供了理论框架。Geng等^[62]以十二烷基苯磺酸钠(SDBS)与十二烷基硫酸钠(SDS)为模型,结合分子动力学和密度泛函理论阐明表面活性剂调控界面聚合的机理。十二烷基苯磺酸钠苯基与间苯二胺单体形成的 $\pi-\pi$ 强相互作用,使间苯二胺单体在混溶区有序分布,避免了结构不均匀性。同时也实现了扩散路径优化,十二烷基苯磺酸钠使间苯二胺扩散速率提升25%,反应区向水相偏移,形成孔径分布更窄的聚酰胺层[如图4(c)所示]。

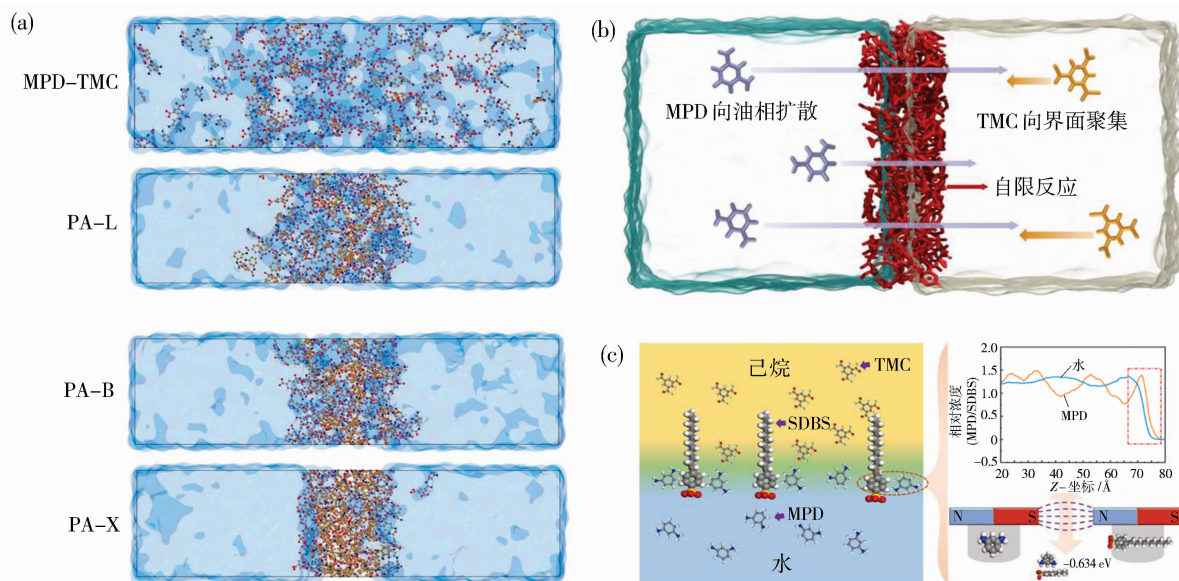


图4 N,N -二甲基甲酰胺溶液溶解低聚聚酰胺层时MPD和TMC分子扩散模拟示意图^[60](a);

分子动力学模拟的界面聚合反应过程示意图^[61](b);表面活性剂调控界面聚合的分子模拟示意图^[62](c)

Fig. 4 Schematic simulation of molecular diffusion of MPD and TMC during dissolution of oligomeric PA layer by DMF solution^[60](a); schematic of IP reaction process simulated by molecular dynamics^[61](b); schematic molecular simulation of surfactant-regulated IP^[62](c)

近年来,分子动力学与密度泛函理论已成为解析界面聚合过程中单体调控机制的核心工具。这种数据-知识双驱动的理性设计模式,标志着界面聚合技术从“黑箱经验”向“白箱机理”的范式跃迁,为新一代高通量-高选择性纳滤膜的按需定制奠定基础。未来随着神经符号计算与自动化实验平台(如材料基因工程)的发展,界面聚合研究将进入“模拟

预测-AI优化-机器人验证”的闭环范式,推动聚酰胺纳滤膜设计实现从经验试错向理性设计的跨越。

3 总结和展望

本文简要介绍了反应单体扩散控制界面聚合制备聚酰胺薄层复合纳滤膜的研究进展,从空间效应调控、体相溶液调控、界面性质调控和单体扩散过程

模拟四个方面,梳理了不同方法对反应单体(包括水相胺单体和有机相酰氯单体)扩散的影响,简要分析了单体扩散对聚酰胺分离层物理化学性质和分离性能的影响机制。简要评价了各种方法的特点以及其规模化生产的可能性,旨在为高性能聚酰胺复合纳滤膜的可控制备提供思路,促进新技术的转化落地。虽然上述工作中都给出了具有逻辑性的影响机制分析,但也存在着一些机制尚不明确和统一的地方,例如反应单体的扩散快慢对聚酰胺分离层形貌、结构和分离性能的影响机制的解释尚不统一。在未来的研究工作中,需要通过以下几个方面的工作继续提升对纳滤膜分离层结构形成机理和分离性能调控的理解:

1) 需要发展快速反应单体扩散原位监测技术,目前文献报道中的单体扩散多是基于扩散终态的数据分析,缺少对于单体扩散过程的原位监测。

2) 需要发展聚酰胺分离层生长的原位监测技术,以能够更精准地反应聚酰胺层的结构演变机制,从而为其结构调控提供理论基础。

3) 需要结合理论计算与实验,进一步阐明水分子、离子、有机分子在聚酰胺分离层中的传输机制,剖析分离层结构与分离性能间的内在关联规律。

参考文献:

- [1] Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, *et al.* Science and technology for water purification in the coming decades[J]. *Nature*, 2008, 452(7185): 301-310.
- [2] Pendergast M M, Hoek E M V. A review of water treatment membrane nanotechnologies [J]. *Energy Environ Sci*, 2011, 4(6): 1946-1971.
- [3] Zhao Y, Tong T, Wang X, *et al.* Differentiating solutes with precise nanofiltration for next generation environmental separations: A review[J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 55(3): 1359-1376.
- [4] Abdel-Fatah M A. Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article [J]. *Ain Shams Eng J*, 2018, 9(4): 3077-3092.
- [5] Gohil J M, Ray P. A review on semi-aromatic polyamide TFC membranes prepared by interfacial polymerization: Potential for water treatment and desalination[J]. *Sep Purif Technol*, 2017, 181: 159-182.
- [6] Cadotte J E, King R S, Majerle R J, *et al.* Interfacial synthesis in the preparation of reverse osmosis membranes[J]. *J Macromol Sci A*, 1981, 15(5): 727-755.
- [7] Wang K, Wang X, Januszewski B, *et al.* Tailored design of nanofiltration membranes for water treatment based on synthesis-property-performance relationships [J]. *Chem Soc Rev*, 2022, 51(2): 672-719.
- [8] Lu X, Elimelech M. Fabrication of desalination membranes by interfacial polymerization: history, current efforts, and future directions [J]. *Chem Soc Rev*, 2021, 50(11): 6290-6307.
- [9] Yang Z, Guo H, Tang C Y. The upper bound of thin-film composite (TFC) polyamide membranes for desalination[J]. *J Membr Sci*, 2019, 590: 117297.
- [10] Geise G M, Park H B, Sagle A C, *et al.* Water permeability and water/salt selectivity tradeoff in polymers for desalination[J]. *J Membr Sci*, 2011, 369(1): 130-138.
- [11] Zhang R, Liu Y, He M, *et al.* Antifouling membranes for sustainable water purification: strategies and mechanisms[J]. *Chem Soc Rev*, 2016, 45(21): 5888-5924.
- [12] 付欣宇,王建强,计艳丽,等. 不对称双层聚酰胺纳滤膜的制备及其性能研究[J]. *膜科学与技术*, 2023, 43(5): 50-57.
- [13] Liu Y, Liu L, Narendra B, *et al.* Advancing high-performance nanofiltration membranes: Tailoring monomer molecular design to enhance diffusion-reaction synergy in interfacial polymerization [J]. *Desalination*, 2025, 598: 118415.
- [14] Baig U, Waheed A, Ahmad H, *et al.* Synthesis of methyl 3,5-diaminobenzoate to develop polyamide thin film composite membrane for investigating the impact of in-situ methyl hydrolysis on its permeate flux and sulfate rejection [J]. *Sep Purif Technol*, 2025: 132178.
- [15] Chen H, Zhao F, Zhang X, *et al.* Design an in-situ anti-bacterial structure of nanofiltration membrane with a novel bisimidazoline aqueous monomer[J]. *J Membr Sci*, 2024, 707: 122992.
- [16] Peng H, Yu K, Liu X, *et al.* Quaternization-spiro design of chlorine-resistant and high-permeance lithium separation membranes[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 5483.
- [17] Wang K, Fu W, Wang X, *et al.* Molecular design of the polyamide layer structure of nanofiltration membranes by sacrificing hydrolyzable groups toward enhanced separation performance [J]. *Environ Sci*

- Technol, 2022, 56(24): 17955-17964.
- [18] Zhang Y, Wang H, Guo J, *et al.* Ice-confined synthesis of highly ionized 3D-quasilayered polyamide nanofiltration membranes [J]. Science, 2023, 382(6667): 202-206.
- [19] Tan Z, Chen S, Peng X, *et al.* Polyamide membranes with nanoscale Turing structures for water purification [J]. Science, 2018, 360(6388): 518-521.
- [20] Karan S, Jiang Z, Livingston A G. Sub-10 nm polyamide nanofilms with ultrafast solvent transport for molecular separation [J]. Science, 2015, 348(6241): 1347-1351.
- [21] Li J, Yuan S, Zhu J, *et al.* High-flux, antibacterial composite membranes via polydopamine-assisted PEI-TiO₂/Ag modification for dye removal[J]. Chem Eng J, 2019, 373: 275-284.
- [22] Freger V, Srebnik S. Mathematical model of charge and density distributions in interfacial polymerization of thin films[J]. J Appl Polym Sci, 2003, 88(5): 1162-1169.
- [23] Werber J R, Deshmukh A, Elimelech M. The critical need for increased selectivity, not increased water permeability, for desalination membranes[J]. Environ Sci Technol Lett, 2016, 3(4): 112-120.
- [24] Ma Z, Zhang X, Liu C, *et al.* Polyamide nanofilms synthesized via controlled interfacial polymerization on a “jelly” surface[J]. Chem Commun, 2020, 56(53): 7249-7252.
- [25] Cheng X, Lai C, Li J, *et al.* Toward enhancing desalination and heavy metal removal of TFC nanofiltration membranes: A cost-effective interface temperature-regulated interfacial polymerization [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(48): 57998-58010.
- [26] 鲁艺文, 吕晓龙, 任 凯, 等. 多羟基单体调控分离层结构制备高性能净水用纳滤膜[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(5): 108-116.
- [27] Xin J, Fan H, Guo B, *et al.* Interfacial polymerization at unconventional interfaces: an emerging strategy to tailor thin-film composite membranes [J]. Chem Commun, 2023, 59(89): 13258-13271.
- [28] Wittbecker E L, Morgan P W. Interfacial polycondensation. I [J]. J Polym Sci, 1959, 40(137): 289-297.
- [29] 李文远, 吕晓龙, 任 凯, 等. 中间层构建及其反渗透复合膜性能的探讨[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(5): 150-155.
- [30] Yang Z, Zhou Z, Guo H, *et al.* Tannic Acid/Fe³⁺ nanoscaffold for interfacial polymerization: Toward enhanced nanofiltration performance[J]. Environ Sci Technol, 2018, 52(16): 9341-9349.
- [31] Zhao W, Liu H, Liu Y, *et al.* Thin-film nanocomposite forward-osmosis membranes on hydrophilic microfiltration support with an intermediate layer of graphene oxide and multiwall carbon nanotube [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(40): 34464-34474.
- [32] Wei S, Ding X, Qiu Y, *et al.* Enhanced performance polyamide membrane by introducing high-porosity SOD/GO composite interlayer to tailor the interfacial polymerization process[J]. Chem Eng J, 2024, 481: 148595.
- [33] Wu M B, Lyu Y, Yang H C, *et al.* Thin film composite membranes combining carbon nanotube intermediate layer and microfiltration support for high nanofiltration performances[J]. J Membr Sci, 2016, 515: 238-244.
- [34] Gong G, Wang P, Zhou Z, *et al.* New insights into the role of an interlayer for the fabrication of highly selective and permeable thin-film composite nanofiltration membrane [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(7): 7349-7356.
- [35] Wang J, Yang H, Wu M, *et al.* Nanofiltration membranes with cellulose nanocrystals as an interlayer for unprecedented performance[J]. J Mater Chem A, 2017, 5(31): 16289-16295.
- [36] Zhang X, Lv Y, Yang H, *et al.* Polyphenol coating as an interlayer for thin-film composite membranes with enhanced nanofiltration performance [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2016, 8(47): 32512-32519.
- [37] Feng X, Ding X, Jiang D. Covalent organic frameworks[J]. Chem Soc Rev, 2012, 41(18): 6010-6022.
- [38] Fu J, Das S, Xing G, *et al.* Fabrication of COF-MOF composite membranes and their highly selective separation of H₂/CO₂ [J]. J Am Chem Soc, 2016, 138(24): 7673-7680.
- [39] 杜海洋, 张文娟, 温 书, 等. 基于金属有机骨架(MOFs)的纳滤膜制备研究现状[J]. 膜科学与技术, 2022, 42(2): 154-162.
- [40] Yuan J, Wu M, Wu H, *et al.* Covalent organic framework-modulated interfacial polymerization for ultrathin desalination membranes [J]. J Mater Chem A, 2019, 7(44): 25641-25649.

- [41] Wang Z, Wang Z, Lin S, *et al.* Nanoparticle-templated nanofiltration membranes for ultrahigh performance desalination[J]. *Nat Commun*, 2018, 9 (1): 2004.
- [42] Dai R, Li J, Wang Z. Constructing interlayer to tailor structure and performance of thin-film composite polyamide membranes: A review [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2020, 282: 102204.
- [43] Ren X, Wang L, Fu H, *et al.* Interfacial polymerization process based on diffusion control: Role of chemical composition and morphology on fouling resistance[J]. *J Environ Chem Eng*, 2023, 11(5): 110511.
- [44] Liu B, Wang S, Zhao P, *et al.* High-performance polyamide thin-film composite nanofiltration membrane: Role of thermal treatment[J]. *Appl Surf Sci*, 2018, 435: 415-423.
- [45] Shen L, Cheng R, Yi M, *et al.* Polyamide-based membranes with structural homogeneity for ultrafast molecular sieving[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 500.
- [46] Lee J, Wang R, Bae T H. A comprehensive understanding of *co*-solvent effects on interfacial polymerization: Interaction with trimesoyl chloride [J]. *J Membr Sci*, 2019, 583: 70-80.
- [47] Wang Y, Chang H, Jiang S, *et al.* An efficient *co*-solvent tailoring interfacial polymerization for nanofiltration: Enhanced selectivity and mechanism [J]. *J Membr Sci*, 2023, 677: 121615.
- [48] Ye Y, Qiu N, Qiu Z, *et al.* Acetone extraction induced piperazine diffusion reaction for regulating thin film composite nanofiltration membrane[J]. *J Membr Sci*, 2024, 694: 122426.
- [49] Dong K, Liu X, Dong H, *et al.* Multiscale studies on ionic liquids[J]. *Chem Rev*, 2017, 117(10): 6636-6695.
- [50] Ben-Zvi A, Taqui Syed U, Ramon G Z, *et al.* Alternative materials for interfacial polymerization; recent approaches for greener membranes[J]. *Green Chem*, 2024, 26(11): 6237-6260.
- [51] Liu C, Yang J, Guo B, *et al.* Interfacial polymerization at the alkane/ionic liquid interface[J]. *Angew Chem Int Edit*, 2021, 60(26): 14636-14643.
- [52] Liang Y, Zhu Y, Liu C, *et al.* Polyamide nanofiltration membrane with highly uniform sub-nanometre pores for sub-1 Å precision separation[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 2015.
- [53] Peng Q, Wang R, Zhao Z, *et al.* Extreme Li-Mg selectivity via precise ion size differentiation of polyamide membrane[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 2505.
- [54] Droudian A, Youn S K, Wehner L A, *et al.* Enhanced chemical separation by freestanding CNT-polyamide/imide nanofilm synthesized at the vapor-liquid interface [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10 (23): 19305-19310.
- [55] Paseta L, Echaide-Górriz C, Téllez C, *et al.* Vapor phase interfacial polymerization: A method to synthesize thin film composite membranes without using organic solvents[J]. *Green Chem*, 2021, 23(6): 2449-2456.
- [56] Li W, Yang Z, Yang W, *et al.* Vapor-phase polymerization of high-performance thin-film composite membranes for nanofiltration[J]. *AIChE J*, 2022, 68 (2): e17517.
- [57] Ignacz G, Bader L, Beke A K, *et al.* Machine learning for the advancement of membrane science and technology: A critical review[J]. *J Membr Sci*, 2025, 713: 123256.
- [58] Dangayach R, Jeong N, Demirel E, *et al.* Machine learning-aided inverse design and discovery of novel polymeric materials for membrane separation [J]. *Environ Sci Technol*, 2025, 59(2): 993-1012.
- [59] Gao W, Wang G, Li J, *et al.* Insights into synthesis and optimization features of reverse osmosis membrane using machine learning[J]. *Materials*, 2025, 18(4): 840.
- [60] Li H, Xu S, Wang B, *et al.* A new insight into the effects of DMF solvent activation on the polyamide layers of nanofiltration membranes by molecular simulation[J]. *J Membr Sci*, 2025, 718: 123667.
- [61] Liu G, Wei M, Li D, *et al.* Understanding interfacial polymerization in the formation of polyamide RO membranes by molecular simulations[J]. *Desalination*, 2024, 586: 117869.
- [62] Geng H, Huo X, Jing Z, *et al.* Monitoring the process of interfacial polymerization for fabrication of polyamide reverse osmosis membrane via molecular simulation based on π - π interaction between surfactant and monomer[J]. *J Membr Sci*, 2025, 713: 123369.

Research progress in preparation of polyamide nanofiltration membranes by monomer diffusion controlled interfacial polymerization

LIU Jiahuan^{1,2}, WANG Jianqiang^{2,3}, LIU Fu^{2,3}

(1. School of materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences,

Ningbo 315201, China; 3. Ningbo College of Materials Technology & Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: Nanofiltration, characterized by its high efficiency, mild operation, and strong adaptability, has always attracted much attention in alleviating the global water crisis. Thin-film composite polyamide nanofiltration membrane is the most applied nanofiltration membrane product. Its separation performance is mainly affected by the properties of the polyamide separation layer. Interfacial polymerization is the commonly used method for fabricating polyamide separation layer. However, the rapid reaction rate and difficulty for structure manipulation are the key problems in this method. Recent years, many works have been developed for the fabricating thin-film composite polyamide nanofiltration membrane. Monomer diffusion control is a simple, effective and scalable strategy for solving the above problem. This article presents the research progress in recent years on the preparation of nanofiltration membranes by regulating the monomer diffusion, aiming to revealing the mechanism for its effect on structure control and separation performances. It also tends to provide references for the application of laboratory membrane fabrication in practical scenarios.

Key words: interfacial polymerization; monomer diffusion; polyamide; nanofiltration membrane

时隔两年我刊编委徐铜文教授团队重要成果再登 Nature: 双极膜制备氘代酸碱

近日,中国科学技术大学精准智能化学全国重点实验室徐铜文教授、汪耀明特任教授和李震宇教授团队联合攻关,在氘代化学品制备领域取得突破性进展。研究团队创新性地利用双极膜实现重水高效解离,发现了核量子效应导致膜层内氘离子迁移速率反超氢离子的现象,颠覆了长期以来“重水解离速率比水慢”的传统认知,并成功开发出低成本制备氘代酸碱的新技术。7月9日,该重要研究成果在线发表于《自然》(Nature)。

氘代酸和氘代碱是合成氘代药物、进行氢/氘交换反应的关键原料,同时在有机发光二极管(OLED)器件寿命提升领域具有重要应用,市场前景广阔。然而,当前氘代酸碱的生产普遍存在工艺复杂、反应条件苛刻、产物纯化困难、过程能耗高等瓶颈问题。

此次研究以廉价的无机盐和重水为原料,在室温条件下利用双极膜解离重水,一步生成高浓度的氘代酸和氘代碱,大幅降低了生产成本,有望为下游众多氘代化学品提供经济、优质的氘代酸碱原料。

研究阐明了双极膜高效解离重水的核心机理。在反向偏压作用下,双极膜中间层离子定向迁出,解离产生的氘离子和氧根离子成为氘代酸碱的来源。研究表明,与水体系相比,重水更高的氘氧键键能和更低的离子扩散系数导致膜堆电压显著升高;尤其是在消耗相同电荷量的情况下,氘离子/氧根离子的生成速率反是氢离子/氢氧根离子的1.25倍,这颠覆了重水解离速率慢的固有认知。分子动力学模拟表明,重水更高的黏度和更强的氢键网络增加了阳离子迁移阻力,使其溶剂化壳层更稳定有序;其次,膜相内氘离子团簇具有比质子团簇更低的脱水能垒,导致氘离子比氢离子在膜相内具有更快的迁移速率。

基于此原理,研究团队成功将技术拓展至多种体系,实现了包括氘代硫酸、氘代盐酸、氟化氘、氘代硝酸、氢氧化钾、氢氧化钠等一系列氘代酸碱试剂的高效制备。以该双极膜重水解离技术为核心的氘代酸碱制备平台,平均生产成本仅为传统工艺的五分之一。整个生产过程无需使用强腐蚀性试剂或重金属催化剂,排放趋近于零,环境友好特性突出,高度契合我国经济社会全面绿色低碳转型的战略方向。目前,该技术已成功完成3吨/年氘代酸碱的中试放大,为其工业化大规模生产奠定了坚实基础。

中国科学技术大学闫军营博士后、蒋晨啸副研究员和曾雄志特任副研究员为论文共同第一作者。徐铜文教授、汪耀明特任教授和李震宇教授为共同通讯作者。

《膜科学与技术》公众号