

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.02.025

尼龙在分离膜材料中的应用进展

夏学莲¹, 陈华义², 冯巧¹, 史向阳¹, 刘晓蕊¹, 王璐斌¹, 颜艺斐¹, 姜凤楠¹

(1. 河南城建学院材料与化工学院, 河南平顶山 467036; 2. 河南神马华威塑胶股份有限公司, 河南平顶山 467200)

摘要: 本文介绍了尼龙分离膜作为高性能分离膜材料理想基材的固有优势, 简述了通过静电纺丝、相转化、溶液浇铸等技术构建尼龙物理基础筛分结构的基本方法, 回顾了采用接枝、共混、涂覆等策略对膜表面进行修饰与功能化的各类途径。基于分离机制不同, 高性能尼龙分离膜可系统归纳为四大类, 分别为精密筛分与传质调控膜、选择性吸附与精密筛分分离膜、抗污染与多机制耦合分离膜以及刺激响应型智能分离膜。分析表明尼龙分离膜的功能已从基础的物理筛分演进至具备特异性吸附、主动识别、抗污染、环境响应等智能行为。未来应研发绿色尼龙原料, 通过多尺度复合、模拟、原位表征手段, 设计新型复合膜、优化膜内传质结构, 并推动其在复杂工业场景的应用。

关键词: 尼龙; 纤维膜; 分离膜; 复合膜; 分离机制

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)02-0199-07

Review on application of nylon in separation membrane materials

XIA Xuelian¹, CHEN Huayi², FENG Qiao¹, SHI Xiangyang¹, LIU Xiaorui¹, WANG Lubin¹, YAN Yifei¹, JIANG Fengnan¹

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China;

2. Henan Shenma Huawei Plastic Co., Ltd., Pingdingshan 467200, China)

Abstract: The inherent advantages of nylon separation membranes as an ideal substrate material for high-performance separation membrane materials were introduced, and the basic methods for constructing the physical base sieving structure of nylon through techniques such as electrospinning, phase inversion, and solution casting were outlined, then the various approaches for modifying or functionalizing the membrane surface using strategies like grafting, blending, and coating were summarized. Based on different separation mechanisms, high-performance nylon separation membranes can be systematically categorized into four main types: precision sieving and mass transfer regulation membranes, selective adsorption and precision sieving separation membranes, antifouling and multi-mechanism coupled separation membranes, and stimuli-responsive intelligent separation membranes. Analysis indicates that the functionality of nylon separation membranes has evolved from basic physical sieving to intelligent behaviors including specific adsorption, active recognition, antifouling, and environmental responsiveness. In the future, efforts should focus on developing green nylon raw materials, designing novel composite membranes and optimizing the mass transfer structure within the membranes through multi-scale combination, simulation, and in-situ characterization techniques, and promoting their application in complex industrial scenarios.

Keywords: nylon ; fibrous membrane ; separation membrane ; composite membrane ; separation mechanism

尼龙膜因其大小均匀的微孔和高孔隙率,能够在渗透过程中有效截留微小的液滴,同时兼具强度高、化学稳定性好等固有优势,成为制备分离膜的理想基底材料。通常,可通过相转化、静电纺丝、溶液浇铸等技术制备尼龙微滤膜,从而构建基础的物理筛分结构。为了进一步赋予其更精密、更智

能的分离功能,采用接枝、共混改性、涂覆、自组装、原位共聚、化学修饰^[1]等手段,对尼龙膜表面进行修饰、优化。由此,尼龙膜的功能得以从简单过滤拓展至精密筛分^[2]、选择性吸附/分离^[3]、抗污染、智能识别、调控^[4]等方面,实现高性能、多功能跨越。

基金项目: 河南省科技攻关项目(252102230151), 河南省教育厅高等学校重点科研项目(25B430024), 河南省大学生创新训练计划项目(S202511765043)

通信作者: 夏学莲, 博士, 副教授, 主要从事尼龙合成、改性及应用研究

收稿日期: 2025-11-06

引用格式: 夏学莲, 陈华义, 冯巧, 等. 尼龙在分离膜材料中的应用进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(2): 199–205.

XIA Xuelian, CHEN Huayi, FENG Qiao, et al. Review on application of nylon in separation membrane materials[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(2): 199–205.

基于尼龙优异的基材特性,研究者们通过多种功能化策略,目前已逐步开发出具有不同分离机制与智能行为的高性能尼龙分离膜,这些膜主要可归纳为以下几类:精密筛分与传质调控型^[5]、选择性吸附型、抗污染与多机制耦合型^[6],以及刺激响应型智能分离膜等。本文分别介绍了以上几种类型尼龙分离膜的制备方法和性能,为尼龙分离膜的开发和应用提供参考。

1 精密筛分与传质调控膜

在各类功能化的尼龙分离膜中,精密筛分与传质调控型是最基础的一类。其主要依赖尼龙基底本身可调控的孔径结构^[7]、高孔隙率与表面特性^[8],通过对颗粒物或分子进行高效的物理筛分、机械截留^[9]和选择性传质^[10],发挥核心分离作用。这一类膜为后续开发更复杂的选择性吸附、抗污染及智能响应等功能膜,奠定了不可或缺的结构基础。近年来,借助界面聚合、溶液共混等先进工艺,研究者们进一步拓展了此类尼龙膜在纳滤和离子选择性传导等领域的应用,提升了其功能维度。

通过静电纺丝工艺制备的尼龙66^[11]、尼龙6纳米纤维膜,凭借其高孔隙率与精细纤维结构,可对油水乳液实现高效的物理筛分。Aussawasathien等^[12]通过静电纺丝技术制备尼龙6纳米纤维膜,调控纤维膜的厚度、纤维直径后,直接用作水过滤膜,无需任何后处理。该膜通过物理筛分作用截留比其平均孔径大的微粒;亚微米颗粒在膜表面形成致密的“滤饼层”,动态减小膜的有效孔径,显著增强对超细颗粒的截留能力。该膜能根据进水颗粒特性,自适应地调整其实际分离界面和性能,实现对不同尺寸颗粒的高效分级分离。同样基于静电纺丝技术,尼龙66膜被用于微藻过滤系统。Bilada等^[13]采用静电纺丝技术制备了尼龙66纳米纤维膜,为了进一步增强其强度,将纤维膜固定无纺布支撑层上,组装成可用于过滤的膜板。亲水表面形成水合层,阻止疏水性藻类物质附着;高孔隙结构提升通量并降低堵塞风险。在过滤-松弛循环中,利用气泡冲刷松散附着的滤饼层,恢复通量。在该过滤膜中,尼龙66作为膜材料,提供超亲水性和极性结构,增强水分子吸附力,减少污染物黏附;此外,其纤维形态形成高孔隙率与均匀孔道,保障高透水性及抗污染能力,是实现高效微藻分离的关键材料基础。

超越常规的微滤过程,尼龙膜在“溶解-扩散”机制渗透领域也扮演着关键角色。Huang等^[14]用刮刀将尼龙6与聚丙烯酸(PAA)的混合溶液在玻璃板上刮涂成膜,干燥后浸入硝酸铝溶液中离子交联,之后在去离子水中浸泡去除残留溶剂并稳定膜结构,制备了基于“溶解-扩散”机制的分离膜。水与乙酸首先在膜表面溶解,在浓度梯度驱动下扩散通过膜并在低压侧蒸发;膜中PAA提供亲水性,优先吸附并传递水分子;尼龙6作为疏水性骨架,限制乙酸的透过;两者协同形成亲/疏水微区,实现对水的高选择性渗透。在该分离膜中,尼龙6作为疏水性聚合物骨架,提供强度与结构稳定性,防止PAA过度溶胀;与PAA形成微相分离结构,调控膜亲/疏水平

衡,协同增强对水分子的选择性渗透;同时作为载体,保障膜在交联和操作过程中的完整性,是实现高性能分离的关键支撑材料。为进一步提升分离精度,Wang等^[15]通过静电纺丝制备尼龙6纳米纤维无纺布;随后采用甲酸/乙酸混合溶剂对其进行选择性表面重溶,使纤维表面部分溶解并再固化;最后通过界面聚合法,在优化后的尼龙6基底上沉积交联芳香族聚酰胺(哌嗪与均苯三甲酰氯反应生成的聚哌嗪酰胺)活性分离层,形成具有高渗透性与选择性的复合膜。尼龙6基底采用溶剂重溶工艺处理,使表面更为致密,且增强平滑度与机械完整性,同时保留内部多孔结构,可支撑超薄且无缺陷的交联芳香族聚酰胺分离层。该膜基于尺寸排阻与表面扩散机制,对有机溶剂中的小分子进行高效筛分。交联芳香族聚酰胺活性层可精密调控约1 nm的孔径,实现分子级筛分,允许溶剂分子快速透过,而截留大于孔径的染料、药物中间体等溶质分子。

溶液共混-浇铸法也是制备尼龙分离膜的重要方法,引入功能基团可赋予膜更高级的离子选择性传输能力。Mahmoud等^[16]将尼龙66溶解于甲酸,同时将聚乙烯醇(PVA)溶于水,分别配成溶液;随后将两者混合搅拌形成均匀铸膜液,在此过程中逐步加入硫酸或氯磺酸作为磺化剂,并掺入磺化活性炭填料;最终将混合液浇铸成膜,经溶剂蒸发和热处理后得到具有离子传导功能的复合薄膜。膜中引入的磺酸基团解离出氢离子,通过膜内亲水区域形成的连续水合网络实现质子高效迁移;同时,致密的尼龙66/PVA与磺化活性炭构建的纳米复合结构形成了曲折的传质路径,能有效阻挡甲醇等分子的渗透,从而实现分子级分离与离子传导。

精密筛分与传质调控尼龙膜的核心在于,通过静电纺丝纳米纤维、致密皮层、界面聚合层、功能化复合层等结构的精确构筑^[17]与调控^[18],实现对微粒、染料分子、离子等的分级筛分与可控传输。其分离机制主要基于物理筛分^[19]、滤饼层自适应调控、“溶解-扩散”、尺寸排阻^[20]、离子通道等,不依赖化学识别或外界响应,展现出良好的结构基础性与工艺适应性。

2 选择性吸附与精密筛分分离膜

在物理筛分的基础上,为进一步提升对特定组分的选择性识别与捕获能力^[21],研究者开发出选择性吸附^[22]与精密筛分分离膜^[23]。通过引入具有识别或吸附功能的材料^[24],结合配位作用、静电效应^[25]、氢键、 π - π 作用^[26]、分子印迹、生物吸附、卤键等多种机制,实现对目标物质的高效选择性分离,展现出精准且多样化的分离能力。

基于化学配位作用是实现选择性吸附的有效策略。Foong等^[27]将胆碱甘氨酸盐离子液体与尼龙66溶液共混后经静电纺丝,形成比表面积高、具有多孔结构的亲水性纳米纤维膜,通过静电作用、离子液体中羧酸根和氨基与Fe(III)配位键合作用,捕获Fe(III)离子,这不是简单的物理筛分,而是属于特异性吸附。该分离膜中,尼龙66作为基底材料,构成纳米纤维网络的核心骨架,且尼龙66的酰胺基团与胆碱

甘氨酸盐离子液体形成氢键,稳固离子液体不被浸出。同样利用配位原理,Amaly等^[28]采用静电纺丝技术制备尼龙6纳米纤维膜,并在酸性条件下用甲醛处理,赋予尼龙6大量的羟基制得Ny-OH;在催化剂作用下,柠檬酸与Ny-OH发生酯化反应,并接枝大量羧基,之后浸入CuSO₄溶液,使羧基与Cu²⁺配位,最终形成尼龙6-柠檬酸-铜复合膜Ny-CCA-Cu(II) NFM。固定在膜上的Cu²⁺可与漆酶表面组氨酸残基的咪唑基团发生特异性配位作用,实现漆酶的高效、快速捕获。吸附后的漆酶可通过洗脱完整释放,且酶活性保持率高,洗脱后的膜经处理移除残留Cu²⁺后,可重新负载新鲜Cu²⁺,实现多次循环使用。

引入天然生物质材料可拓展膜对重金属的吸附能力,Ahmed等^[29]将废弃尼龙溶解于甲酸,与壳聚糖的醋酸溶液以及藻类生物质粉末进行共混,搅拌形成均匀的混合液;随后将混合液浇注于模具中,经溶剂蒸发和干燥,形成兼具吸附与筛分功能的杂化膜材料。膜中的壳聚糖链上的氨基和藻类生物质富含的羧基、羟基等官能团,通过静电、络合及氢键作用,高效吸附废水中的染料分子、Cu²⁺和Pb²⁺等重金属离子;而尼龙基质提供的多孔结构与强度,确保了吸附过程的稳定与高通量。当膜吸附饱和后,通过简单的酸碱调节实现污染物的脱附,可实现材料的循环使用与污染物的资源化回收。

从选择性吸附迈向精密筛分,利用静电排斥是实现分子级筛分的重要机制。Benkhaya等^[30]将尼龙纤维与玻璃纤维,以“尼龙/玻璃纤维/尼龙”的“三明治”结构进行叠层,热压成型后形成具有高孔隙率与强度的多孔支撑基底;随后在该支撑体表面通过相转化法依次涂覆聚砜与聚醚砜亚胺铸膜液,通过溶剂与非溶剂交换过程形成具有指状孔结构的超薄分离层。该膜的核心工作原理为电荷选择性分离与尺寸排阻的协同机制。聚醚砜亚胺分离层在溶液中带负电,通过静电排斥作用高效截留活性黑5等阴离子染料;同时,其纳米级孔径提供尺寸筛分作用,阻隔大分子污染物。相反,阳离子染料因静电吸引作用而更易透过膜孔,从而实现电荷导向筛分。相似地,Selim等^[31]将尼龙612与壳聚糖溶解于混合溶剂中,通过静电纺丝制备纳米纤维基膜,将此基膜浸入聚醚砜的铸膜液中,在尼龙612/壳聚糖纤维基膜的表面及纤维间形成一层聚醚砜功能层,制备出具有分级孔结构的荷电型超滤膜。该膜的分离机理是尺寸筛分与电荷效应协同作用。聚醚砜功能层提供纳米级孔径,对染料分子进行物理尺寸排阻。更重要的是膜材料中的壳聚糖在酸性条件下质子化带正电,使其对水中的茜素红阴离子染料产生强烈的静电吸引与吸附作用,从而高效截留;而阳离子蓝41染料因静电排斥作用而更容易透过。Alemayehu等^[32]将尼龙溶于甲酸等溶剂形成铸膜液,经浇铸、凝固浴相转化形成具有微孔结构的尼龙基膜;再通过真空抽滤使氧化石墨烯分散液在尼龙表面自组装形成致密且稳定的纳米层,最终得到具有“多孔支撑层/纳米分离层”结构的复合膜。该复合膜利用氧化石墨烯片层

间形成的纳米通道和表面电荷效应实现分子级别的智能筛分。水分子和小离子可快速通过氧化石墨烯层间精确调控的纳米间隙,而有机染料、大分子等则被有效截留;同时,氧化石墨烯表面丰富的含氧官能团使其带有负电荷,可通过静电排斥作用进一步提高对阴离子污染物的截留效率。

超越静电作用,构建具有精确尺寸的物理筛分通道或特异性识别空穴,能实现更高精度的分离。Luo等^[33]筛选获得尺寸适中的单层二维过渡金属碳氮化物(MXene)纳米片,将其分散液喷涂在尼龙基底上,修饰后的基底浸入沸石咪唑酯骨架(ZIF-8)前驱体溶液中,快速电流驱动合成连续、无缺陷的ZIF-8选择性分离层。ZIF-8层中刚性R3 m晶相可让氢气(H₂)分子通过而截留更大的二氧化碳(CO₂)分子;MXene中间层为ZIF-8生长提供平整的导电基底,且自身堆叠形成纳米通道,对气体分离有辅助筛分作用;尼龙为机械支撑基底,为复合膜提供足够的结构强度,且酰胺基团与MXene的羟基形成强氢键,化学相容性好,确保修饰层稳定附着。

为实现对特定分子的“锁-钥”式识别,Zheng等^[34]采用酸、碱处理尼龙膜使其表面暴露羧酸根位点,通过溶剂热法在膜上原位生长金属有机框架UiO-66-NH₂,利用单宁酸通过席夫碱反应修饰膜表面,再以磺胺为模板分子,甲基丙烯酸为功能单体,二甲基丙烯酸乙二醇酯为交联剂,在膜表面进行分子印迹聚合,形成具有特异性识别位点的印迹层,最终制备出UiO-66-NH₂-单宁酸-印迹层智能膜。印迹空穴在形状、大小和官能团排列上与目标磺胺类分子互补,实现“锁-钥”式识别,磺胺类分子被特异性捕获在印迹位点上,氯霉素、诺氟沙星等结构类似的物质可穿透,从而实现高效分离与富集。进一步地,通过有机框架材料可引入新型分子作用力,实现更精巧的识别与筛分。Cheng等^[35]对尼龙膜进行预处理,使其表面活化,随后浸入含有1,3,5-三甲酰基间苯三酚和对苯二胺的框架单体(TpBD)的溶液中,通过精确调控的溶剂热反应,使框架单体在尼龙纤维表面原位聚合、结晶、自组装,最终形成一层均匀、稳固且具有高度有序孔道的复合膜。TpBD框架中大量暴露的羰基氧原子作为电子给体,能与目标污染物六溴环十二烷分子(HBCDs)中的溴原子(电子受体)形成特异性强的卤键,类似氢键的定向非共价相互作用,同时,TpBD固有的疏水微环境、 π - π 共轭体系及其与HBCDs分子匹配的纳米孔道,协同实现了对复杂水样中痕量HBCDs的高效、选择性富集与纯化。

选择性吸附与精密筛分尼龙膜的分离机制超越了单纯的物理筛分,融合了化学配位、生物吸附、静电排斥、分子印迹、卤键识别等多种识别机制。通过引入离子液体、金属中心、生物质材料、二维材料、印迹空穴或有机框等功能单元,膜具备了对金属离子、生物酶、染料、气体分子、有机污染物等目标物的特异性捕获能力。这类膜体现了从“被动过滤”向“主动识别”的升级,为复杂体系中的精准分离提供了有效途径。

3 抗污染与多机制耦合分离膜

然而,在实际复杂体系中,膜污染问题严重影响分离效率与使用寿命,且单一的分选机制不能满足复杂体系的分离,因此开发具备抗污染^[36]与多机制耦合功能的分离膜成为关键发展方向。该类膜通过构建超浸润表面、非对称结构或耦合催化、吸附、光催化再生等多种机制^[37],显著提升尼龙膜的抗污染性能^[38]、适用范围、功能集成度等,适用于复杂乳液分离^[39]、空气过滤、生物分离等场景。

超浸润分离膜的核心在于通过界面工程调控膜表面对不同物质的亲和性。Hu等^[40]将TiO₂纳米颗粒加入微晶纤维素(MCC)的溶液中配制浆料,再将尼龙6膜浸入浆料构建具有微纳结构的智能膜。利用MCC和TiO₂的超亲水性,在水下形成稳定的水化层,阻止油滴接触膜表面,实现超疏油特性。此外,膜表面的微纳结构使比表面积增大,毛细作用增强,水能快速渗透而油被排斥。在分离过程中,水在压力驱动下通过膜孔,而油被截留在膜表面,实现高效油水分离。其低表面黏附性使油滴易脱落,避免膜污染,保障长期稳定运行。类似地,Feng等^[41]将尼龙66膜浸入含有多巴胺,以及壳聚糖与三聚磷酸钠预先形成的纳米颗粒的弱碱性水溶液中,在温和搅拌下进行反应,多巴胺发生氧化自聚合形成聚多巴胺黏附层,同时壳聚糖-三聚磷酸盐纳米颗粒通过聚多巴胺的强黏附性与膜牢固结合,最终在尼龙膜表面形成一层均匀、稳定的亲水性复合涂层。该膜利用聚多巴胺和壳聚糖-三聚磷酸盐纳米颗粒的超亲水性,在水中迅速形成稳固的水化层,有效阻隔油滴。其微纳粗糙结构增强毛细作用,使水相快速通过膜孔,而油滴被排斥并聚集于膜上方。在真空驱动下,乳化油水混合物中的水能穿透膜层,油被截留,实现高效分离。膜表面的低油黏附性使其具备抗污染能力,保障长期稳定运行。

在超浸润特性基础上,进一步集成吸附与筛分机制可更全面地去除污染物。Ahmad等^[42]将商用尼龙滤膜浸渍于氧化石墨烯(GO)分散液中,使其表面均匀附着GO纳米片,随后通过浸渍-热解法在GO修饰的膜表面原位生长二氧化铈(CeO₂)纳米颗粒,最终形成具有微纳分级结构的复合膜。CeO₂/GO复合层赋予膜表面超亲水性,可在水中形成稳定水化层,对油相产生强排斥作用,从而实现油水分离;同时,GO的纳米层间通道通过尺寸筛分,截留油滴与部分大分子污染物,其表面富含氧官能团还能通过静电作用、 π - π 堆积作用,吸附溶解性染料分子,从而同步实现含油废水与染料废水的协同净化。贾纳斯(Janus)膜,也称为双面神膜,通过构建非对称的膜面结构实现更智能的分离。Zheng等^[43]在商业尼龙膜表面原位聚合形成聚多巴胺层,利用吸附的Ag⁺原位生成银颗粒,正面喷涂十二硫醇,形成超疏水/超亲油表面;反面用L-半胱氨酸修饰,形成超亲水/水下超疏油表面,获得具有正反面润湿性差异的Janus尼龙膜。超疏水面可分离水包油乳液,油透过阻隔水;超亲水面分离油包水乳液,水透过阻隔油。银颗粒在H₂O₂存在下产生活性氧自由基,高效降

解亚甲基蓝等有机染料;L-半胱氨酸与重金属离子发生配位作用,实现在分离过程中同步吸附Cu²⁺、Pb²⁺等离子,达到多重净化效果。相似地,Zhang等^[44]在尼龙布表面沉积亲水性磷酸钙纳米颗粒,形成稳定的亲水功能层;随后,采用静电纺丝技术在改性后的尼龙基底另一侧引入疏水聚氨酯层,形成一面亲水、一面疏水的薄层复合Janus膜。亲水侧的磷酸钙层可吸附并快速渗透血浆成分,而疏水侧的聚氨酯层则有效阻隔红细胞等血细胞通过;当微量血液在重力作用下接触亲水侧时,血浆被选择性透过,血细胞被截留,从而实现无需外加压力的快速、高效血细胞-血浆分离。

从界面性质调控深入到内部结构设计,多机制耦合是提升分离性能的另一关键。Zhang等^[45]采用气喷射纺丝技术制备了尼龙6微纳纤维复合膜,形成由粗纤维到细纤维的梯度排列,复合膜通过逐层复合纺丝构建“喇叭形”气体通道,实现孔径由大到小的空间梯度变化。大颗粒被粗纤维层拦截,中等颗粒由中间层捕获,PM_{0.25}、病毒气溶胶等超细颗粒由最细纤维层截留。其过滤机制包括拦截、惯性碰撞、扩散效应及极性吸附,尼龙6材料本身具有亲水性,能有效将人体产生的水蒸气及时传导至口罩外层,避免内部积聚水汽,提升佩戴的干爽和舒适度。梯度结构降低气流阻力,且在高温高湿环境下仍保持稳定性能,不依赖静电作用。

此外,将不同分离机制集成于一体可发挥协同效应。Zhu等^[46]将植酸溶液滴加至尼龙网表面并加热,再滴加壳聚糖季铵盐溶液并加热,重复该过程一次得到Nylon-M1膜,重复三次得到Nylon-M3膜,将Nylon-M1膜与Nylon-M3膜顺序叠放、串联,制备了两道关卡的膜过滤系统。植酸和壳聚糖季铵盐通过强静电相互作用反应,进而通过层层自组装在尼龙表面形成涂层。Nylon-M1作为聚结预处理膜,通过静电作用破坏乳液稳定性,在挤压过程中促使微小油滴聚结成为尺寸更大、分布更均匀的油滴。Nylon-M3作为筛分膜,利用其水下超疏油性和适宜的孔径,截留大尺寸油滴。此“聚结-筛分”耦合策略从源头减少了易引起膜孔堵塞的微小油滴数量,缓解膜污染,实现了单一筛分膜难以达到的长期稳定运行。同样,Nguyen等^[47]将纳米ZnO分散于甲醇后,与尼龙6的甲酸溶液混合,在静电作用下使溶液被雾化成充满ZnO纳米颗粒的尼龙6微细液滴,随后在接收器上沉积、铺展、固化,形成一层薄而致密的PA6/ZnO层,然后在其上进行PA6静电纺丝,最终形成双层结构。ZnO在膜表面形成亲水屏障,吸附水分子并排斥油滴,减少油污附着,其纳米结构亦增强膜的表面粗糙度与化学稳定性。在过滤过程中,油滴被截留于膜表面,而水分子优先通过微孔。此外,ZnO具有一定的光催化与抗菌潜力,可延缓有机污染与生物污垢,提升膜的使用寿命与再生能力。Ji等^[48]通过尼龙6静电纺丝制得纤维膜,并在其表面原位生长氨基功能化的铅基金属-有机框架(UiO-66),制备尼龙6@UiO-66-NH₂复合膜。依靠静电和螯合作用,UiO-66-NH₂中的含氮、氧官能团对六价铬离子Cr⁶⁺进行选择性吸附,该膜还具备光催化还原和抗污染再生

等多种功能。

抗污染与多机制耦合尼龙膜的核心在于通过界面工程与结构设计^[49],赋予膜表面特殊的浸润性,如超亲水/水下超疏油^[50],或构建具有梯度孔径、正反异质(Janus)及多层协同的结构体系。其抗污机制依赖于稳固的水化层^[51]、毛细作用力、颗粒物分层截留、聚结-筛分、吸附、催化等的协同,从而达到高效分离、缓解污染积累的作用,通过集成功能,实现多功能化、智能化与长效稳定运行,显著提升该类尼龙膜在恶劣工况及生物分离等复杂场景下的适用性。

4 刺激响应型智能分离膜

随着分离需求向智能化方向发展,刺激响应型分离膜应运而生,这赋予了尼龙膜感知并响应外界环境变化的能力。通过在尼龙膜中引入pH、温度、光、离子等响应单元,使分离过程实现动态、可逆调控,从而使该类尼龙膜在智能分离、可控释放等前沿领域展现出巨大的潜力。

pH响应型膜通过在尼龙膜中引入弱电解质基团进而实现酸碱环境下的构象与孔道调控。岳川^[52]将尼龙膜浸入壳聚糖、氯化钙的乙酸溶液,烘干后初步固定;随后在碱性条件下,使交联剂环氧氯丙烷与壳聚糖上的羟基发生交联反应,交联反应时钙离子通过与壳聚糖氨基的可逆结合实现对氨基的保护;最后用盐酸溶液洗去钙离子释放出氨基,完成pH响应智能膜的制备。该智能膜在酸性条件下氨基质子化带正电,链段伸展,膜孔收缩,通量降低;在碱性条件下氨基去质子化,链段收缩,膜孔扩张,通量升高。这种可逆变化使膜具备自清洁能力,污染后通过交替切换pH环境使膜表面动态伸缩,进而破坏污染物附着层实现了高效清洗。尼龙膜还可与凝胶层复合,如Siegel等^[53]在亲水性纤维素基底上制备具有对称孔结构的双连续界面聚丙烯酸凝胶薄膜,将脆弱的水凝胶膜置于尼龙支撑网上,利用尼龙的高渗透性和强度,防止水凝胶在压力下破裂,获得pH响应的智能过滤膜。在酸性条件下,聚丙烯酸链呈质子化状态,水凝胶收缩,孔道开放,水通量较高;在碱性条件下,羧基解离产生静电斥力,引发水凝胶溶胀,孔道压缩,水通量显著降低。尼龙支撑层提供机械稳健支撑,允许在压力下工作,确保水凝胶在压力驱动过滤中保持结构完整。

温敏型膜主要依赖温度变化引起聚合物链构象转变,进而调控膜孔或层间距。Kajornprai等^[54]将温敏性聚N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAm)通过等离子体引发聚合与微波辅助,接枝到事先经过氩等离子体处理的尼龙膜表面及孔道内,制备了具有温敏“开-关”特性的智能分离膜。可通过温度刺激和水通量的智能调控,实现温控油水分离。当温度低于低临界溶解温度(LCST)时,PNIPAm亲水溶胀,形成水凝胶堵塞膜孔,同时膜表面呈超亲水/水下超疏油特性,允许水相通过而有效截留油滴;当温度高于LCST时,PNIPAm链疏水收缩,孔道打开,水通量显著提升。在该智能膜中尼龙的酰胺极性基团有助于接枝反应进行,且多孔骨架结构和固有的亲水性有利于PNIPAm接枝的均匀性与溶胀行为,是构建高性能温

敏智能膜的关键载体。进一步地,王逸^[55]将硅烷化处理MXene纳米片引入双键,通过原位聚合在其表面接枝温敏聚合物PNIPAm形成MX-PN纳米片,将MX-PN纳米片分散液真空抽滤沉积在尼龙膜表面,形成二维层状结构的智能复合膜。当温度低于32℃时,PNIPAm分子链伸展,MXene片层间距增大,膜通道打开,水分子和较小尺寸溶质透过;当温度高于32℃时,PNIPAm链收缩,片层间距减小,膜通道关闭,阻隔水分子和较大尺寸溶质。该类膜通过温度调控层间距,实现对不同尺寸分子的选择性分离,具备负温度响应特性。此外,具有高临界溶解温度(UCST)行为的丙烯酰胺-丙烯腈共聚物[P(AAm-co-An)]涂覆尼龙膜,亦展现出温度诱导的孔道可逆变化与自清洁能力^[56]。

光响应型膜利用光致异构化或能带结构变化,实现非接触式精准调控。Kang等^[57]将聚偏氟乙烯(PVDF)溶液静电纺丝至尼龙66网状基底上形成纳米纤维膜,在膜上滴涂ZnO纳米颗粒作为晶种,再将其浸入含锌盐和六亚甲基四胺的前驱体溶液中进行低温水热反应,使ZnO纳米线生长在PVDF纳米纤维表面制备智能过滤膜。在光照下,ZnO纳米线产生电流,电导率变化可用于检测极性有毒气体分子,实现实时光电传感。同时,紫外光照诱导ZnO电子跃迁形成电子-空穴载流子,空穴夺取材料表面吸附的水分子中的氧原子,使羟基大量增加,膜表面由此实现超亲水转化,增强对极性分子与颗粒物的捕获能力,从而在连续气流中实现颗粒物过滤与气体检测的双重功能。相似地,Yang等^[58]将聚二甲基硅氧烷(PDMS)、四针状氧化锌(T-ZnO)和4-氨基偶氮苯(AAB)悬浮液喷涂在尼龙网格表面,PDMS、T-ZnO和AAB通过静电、氢键作用牢固附着在尼龙纤维上,最终形成具有光响应性的复合材料。可见光照射下,AAB为反式构型,分子直立,PDMS和疏水苯环暴露出来,材料表现为疏水性,允许油通过而阻隔水;紫外光照射下,AAB转变为顺式构型,分子平躺,亲水的T-ZnO和尼龙暴露出来,材料变为亲水性,允许水通过而阻油。这种光致异构化行为实现了材料在“除油”与“除水”模式之间的智能切换。

除上述类型外,其他响应型尼龙膜也展现出独特的智能行为。魏然^[59]制备了含有氧化石墨烯(GO)、Fe₃O₄、聚离子液体(PIL)的浆料,并将其涂覆在尼龙布表面,制备尼龙基智能膜。当阴离子为亲水离子时,PIL链舒展,表面呈超亲水态,允许水通过而截留油;交换为疏水阴离子后,PIL链收缩,表面转为超疏水态,允许油通过而阻水,从而实现两种分离模式的智能切换。Liu等^[60]采用醛类、胺类单体在溶液中进行席夫碱反应,形成三维共价有机框架,经真空抽滤将其转移到尼龙基底上,尼龙的强度为脆性的膜提供结构支撑,由此制备了三维共价有机框架智能分离膜。该研究将亲水羟基与疏水氟原子集成于框架中,当采用水润湿膜时,表面形成水合层,表现出水下超疏油特性,可分离油包水乳液;当采用油润湿时,表面形成油层,表现出油下超疏水特性,可分离水包油乳液。这种通过预润湿诱导形成稳定双疏界面的液膜,

可实现高效、可逆分离。

刺激响应型智能尼龙膜实现了从“静态分离”到“动态调控”的跨越,其智能行为源于功能聚合物或分子在pH、温度、光、离子等外界刺激下,发生构象、电荷或极性变化,进而可逆地调节膜孔道、亲疏水性或渗透性。这类膜具备环境自适应性,能够依据不同工况切换分离模式,实现通量、选择性与抗污性的智能调节,这显现出分离膜材料向智能化、程序化方向发展的重要趋势。

5 总结与展望

尼龙作为一种性能优异的膜材料,除在上述四类分离膜中发挥重要作用外,还在气体分离、渗透蒸发、药物控释等多种分离过程中展现出广泛的应用潜力。在各类尼龙基分离膜中,其功能多样且层次递进:从基础的物理筛分与传质调控,到选择性吸附与精密识别,再到抗污染与多机制协同,最终发展为具备环境响应能力的智能分离系统。尼龙在其中不仅作为机械支撑体,保障结构稳定性,其丰富的表面酰胺基团与可调控的微孔结构,也为功能单元的锚定、响应行为的实现以及复合结构的构建提供理想平台。

未来,尼龙在分离膜领域的研究应聚焦于以下几个方向:一是开发绿色可持续的尼龙原料来源,如利用回收尼龙制品制备分离膜,推动循环经济;二是通过多材料、多尺度复合策略,构建具有更高精度、更强抗污、更快响应速度的新型尼龙复合膜;三是深化对膜内传质机制与界面过程的理解,借助模拟与原位表征手段指导膜结构设计;四是推动尼龙基分离膜从实验室走向实际应用,拓展其在复杂工业废水处理、资源回收、生物医药分离等苛刻环境下的适用性与稳定性。通过跨学科合作与技术创新,尼龙基分离膜有望在高效分离与可持续发展中扮演更加关键的角色。

参考文献

- [1] HU T, et al. *Advanced Science*, 2023, 10(2). DOI: 10.1002/advs.202204689.
- [2] FERNÁNDEZ-MÁRQUEZ M, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 449. DOI:10.1016/j.ccej.2022.137807.
- [3] FATEMINIA Z, et al. *ACS Omega*, 2023, 8:22 742–22 751.
- [4] PAN Y, et al. *Nanotechnology Reviews*, 2023, 12(1). DOI:10.1515/ntrev-2022-0538.
- [5] MA Y, et al. *Small*, 2025, 21(4). DOI:10.1002/smll.202409570.
- [6] ZHANG H R, et al. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414. DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.125526.
- [7] ALSHAHRANI A A, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21:872–883.
- [8] HUSSAIN A, et al. *Membranes*, 2021, 11(1). DOI: 10.3390/membranes11010042.
- [9] WAN L B, et al. *Microchemical Journal*, 2021, 165. DOI:10.1016/j.microc.2021.106157.
- [10] HE Y S, et al. *Journal of Membrane Science*, 2021, 637. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119667.
- [11] HALIM N S A, et al. *Membranes*, 2023, 13(2). DOI: 10.3390/membranes13020224.
- [12] AUSSAWASATHIEN D, et al. *Journal of Membrane Science*, 2008, 315(1/2):11–19.
- [13] BILADA M R, et al. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223:23–28.
- [14] HUANG R Y M, et al. *Journal of Membrane Science*, 1989, 43(2/3):143–148.
- [15] WANG Y C, et al. *Separation and Purification Technology*, 2022, 285. DOI:10.1016/j.seppur.2021.120322.
- [16] MAHMOUD A, et al. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48:8 941–8 956.
- [17] JIN X G, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471. DOI: 10.1016/j.ccej.2023.144566.
- [18] DARMAWAN A, et al. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, 195:54–64.
- [19] FANG Y X, et al. *Desalination*, 2023, 568. DOI: 10.1016/j.desal.2023.117031.
- [20] XU S T, et al. *Journal of Membrane Science*, 2023, 687. DOI: 10.1016/j.memsci.2023.122003.
- [21] CHEN T, et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3). DOI:10.1016/j.jece.2023.109864.
- [22] HOU C M, et al. *Separation and Purification Technology*, 2024, 336. DOI:10.1016/j.seppur.2024.126346.
- [23] FANG Y X, et al. *Journal of Membrane Science*, 2023, 673. DOI: 10.1016/j.memsci.2023.121470.
- [24] KAKORIA A, et al. *Polymer*, 2021, 213. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.123333.
- [25] CABELLO-ALVARADO C, et al. *Materials Letters*, 2022, 320. DOI:10.1016/j.matlet.2022.132382.
- [26] DARVISHNEJAD F, et al. *Microchemical Journal*, 2021, 170. DOI:10.1016/j.microc.2021.106684.
- [27] FOONG C Y, et al. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 368. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.120677.
- [28] AMALY N, et al. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2020, 194. DOI:10.1016/j.colsurfb.2020.111190.
- [29] AHMED H B, et al. *Polymer Testing*, 2021, 104. DOI:10.1016/j.polymertesting.2021.107381.
- [30] BENKHAYA S, et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 625. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126941.
- [31] SELIM H, et al. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(1):977–999.
- [32] ALEMAYEHU H G, et al. *Nanotechnology*, 2023, 34(30). DOI: 10.1088/1361-6528/acd060.
- [33] LUO M D, et al. *Journal of Membrane Science*, 2025, 733. DOI: 10.1016/j.memsci.2025.124374.
- [34] ZHENG J L, et al. *Separation and Purification Technology*, 2024, 350. DOI:10.1016/j.seppur.2024.127944.
- [35] CHENG J W, et al. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 451. DOI:10.1016/j.jhazmat.2023.131191.

- [36] ANDRADE-GUEL M, et al. *Nanomaterials*, 2022, 12(23). DOI: 10.3390/nano12234247.
- [37] WANG J T, et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(4). DOI:10.1016/j.jece.2023.110154.
- [38] LIU R L, et al. *Science of the Total Environment*, 2021, 799. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149370.
- [39] YE Y, et al. *Applied Clay Science*, 2024, 256. DOI: 10.1016/j.clay.2024.107424.
- [40] HU P C, et al. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2025, 19(4). DOI:10.1007/s11705-025-2530-9.
- [41] FENG S J, et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3). DOI:10.1016/j.jece.2022.107407.
- [42] AHMAD N, et al. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 37. DOI:10.1016/j.susmat.2023.e00698.
- [43] ZHENG L Z, et al. *Journal of Membrane Science*, 2022, 642. DOI: 10.1016/j.memsci.2022.119995.
- [44] ZHANG X Z, et al. *Journal of Membrane Science*, 2021, 620. DOI:10.1016/j.memsci.2020.118853.
- [45] ZHANG L Y, et al. *Separation and Purification Technology*, 2023, 308. DOI:10.1016/j.seppur.2023.122921.
- [46] ZHU X, et al. *Separation and Purification Technology*, 2022, 295. DOI:10.1016/j.seppur.2022.121319.
- [47] NGUYEN T X Q, et al. *Separation and Purification Technology*, 2022, 298. DOI:10.1016/j.seppur.2022.121578.
- [48] JI W, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138973.
- [49] WANG J T, et al. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 294. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119832.
- [50] FENG S J, et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 639. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.128355.
- [51] WANG J T, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 347. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131302.
- [52] 岳川. 具有 pH 响应特性的智能膜制备及其性能研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2023.
- YUE Chuan. Preparation of smart membranes with pH responsive properties and their performance study[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2023.
- [53] SIEGEL H, et al. *Small*, 2025, 21(5). DOI: 10.1002/sml.202504768.
- [54] KAJORNPAI T, et al. *Polymers*, 2023, 15(3). DOI: 10.3390/polym15030497.
- [55] 王逸. PNIPAm 基温度响应性分离膜的构筑及可控分离性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
- WANG Yi. Construction and controllable separation performance of PNIPAm-based thermo-responsive separation membrane[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.
- [56] 贾新应. 具有 UCST 温敏特性的聚合物膜制备及其性能研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2024.
- JIA Xinying. Study on preparation and performance of UCST temperature sensitive polymer membrane[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2024.
- [57] KANG D H, et al. *Applied Sciences*, 2021, 11(17). DOI:10.3390/app11178006.
- [58] YANG C X, et al. *Progress in Organic Coatings*, 2021, 160. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106520.
- [59] 魏然. 聚离子液体纳米复合物修饰的智能分离材料及其抗污抗菌性能的研究[D]. 成都: 四川大学, 2022.
- WEI Ran. Study on intelligent separating materials modified by poly (ionic liquids) nanocomposites and its anti-fouling and anti-bacterial properties[D]. Chengdu: Sichuan University, 2022.
- [60] LIU Y, et al. *Separation and Purification Technology*, 2025, 360. DOI:10.1016/j.seppur.2024.131074.