

新型膜分离技术在工业废水深度处理中的应用进展

刘 慧 余 翔

宁夏宁东泰畅水务有限责任公司 宁夏 银川 750000

摘要:传统废水处理工艺在应对成分复杂、毒性高、难降解的工业废水时面临诸多挑战。膜分离技术作为一种高效、节能、环境友好的物理分离方法,在废水深度处理领域展现出巨大潜力。近年来,以正渗透(FO)、膜蒸馏(MD)、纳滤(NF)以及各类复合/功能化膜材料为代表的新型膜分离技术取得了显著进展。本文系统综述了这些新型膜分离技术的基本原理、核心优势与现存挑战,并重点阐述了它们在制药、石化、电镀等典型高难度工业废水深度处理中的具体应用案例与研究进展。最后,文章对新型膜分离技术未来的发展趋势进行了展望,旨在为工业废水深度处理技术的创新与工程化应用提供理论参考。

关键词:新型膜分离技术;工业废水;深度处理;正渗透;膜蒸馏;纳滤;功能化膜

引言

水资源是生存与社会发展的基础战略资源,但全球工业化发展使大量工业废水排入水体,造成严重污染,破坏生态平衡,威胁人类健康与经济社会可持续发展。为此,各国出台严格排放标准,倡导“零液体排放”理念,对工业废水处理技术提出更高要求。传统处理工艺虽能去除部分污染物,但在处理复杂工业废水时存在效率低、能耗高、易二次污染等问题。膜分离技术凭借物理筛分机制,能在分子或离子尺度选择性分离污染物,具有高效、温和、低能耗等优点。但传统膜技术处理复杂废水时,存在通量衰减快、运行压力高、截留率不足等问题。为此,以正渗透、膜蒸馏、纳滤为核心的新型膜分离技术应运而生,实现了抗污染性、选择性和稳定性的飞跃。本文将梳理评述其最新进展,分析应用潜力与挑战,并展望未来。

1 新型膜分离技术原理与特性

1.1 正渗透(FO)技术

正渗透(FO)利用半透膜两侧的渗透压差驱动水分子从低渗透压侧(原料液)自发迁移至高渗透压侧(汲取液),无需外加压力,理论上能耗极低。相比反渗透,FO具有优异的抗污染能力,尤其适用于高粘度、高固含或含油废水;同时能高效截留盐分、大分子有机物、胶体及微生物,产水水质好。然而,FO技术面临两大瓶颈:一是汲取液再生困难,影响整体经济性;二是内浓差极化(ICP)显著降低有效驱动力,导致水通量偏低。因此,开发高通量、低ICP的FO膜及高效节能的汲取液回收策略,是推动其工程化应用的关键。^[1]

1.2 膜蒸馏(MD)技术

膜蒸馏(MD)是一种热驱动过程,依靠疏水微孔膜

两侧的蒸汽压差(由温差产生),使水蒸气从热侧穿过膜孔在冷侧冷凝,非挥发性溶质被完全截留。MD脱盐率接近100%,不受渗透压限制,特别适合处理高盐卤水,是实现“零液体排放”(ZLD)的理想终端技术。此外,MD可在常压下运行,并可利用太阳能或工业废热等低品位热源。但MD实际应用受限于膜润湿风险(如遇表面活性剂易失效)和温度极化效应,导致热效率低、通量不高。未来需重点研发高疏水性、高孔隙率、低热导率的新型膜材料,并优化组件结构以强化传热传质。

1.3 纳滤(NF)技术

纳滤(NF)是一种介于反渗透与超滤之间的压力驱动膜过程,孔径约1 nm,结合尺寸筛分与道南效应,对二价及以上离子(如 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-})和200-1000 Da有机物截留率高,而对单价离子(如 Na^+ 、 Cl^-)截留较低。这一选择性使NF广泛用于水质软化和特定污染物(如染料、抗生素)去除,同时降低后续RO系统的负荷。操作压力(5-20 bar)低于RO,能耗更低。但NF仍面临膜污染和结垢问题,且无法实现完全脱盐,常需与RO联用。提升抗污染性能与调控选择性是其优化方向。^[2]

1.4 FO与MD相较于传统RO的技术定位及工程化现状

在当前工业水处理体系中,反渗透(RO)仍是脱盐与回用的主流技术,但其高能耗、高污染敏感性及对进水水质的严苛要求,促使业界积极探索替代或协同方案。正渗透(FO)相较于RO,在运行成本、操作条件与维护保养方面具有突出优势。FO无需外加高压,可在常压下运行,显著降低设备投资与能耗;其天然的低污染倾向使膜表面污染物呈松散附着状态,易于清洗恢复,延长使用寿命;同时,FO对进水预处理要求较低,简化了前端工艺。尽管汲取液再生带来额外能耗,但在高污

染或高盐废水预浓缩场景中，FO作为RO前段可大幅降低整体系统负荷与运维成本。

反观RO技术，尽管成熟度高、市场占有率大，但也面临发展瓶颈。目前，RO广泛应用于海水淡化、电子超纯水及市政再生水等领域，但其在处理高浓度工业废水时能耗剧增，且膜污染与结垢频发。未来RO的发展将聚焦于高性能复合膜（如掺杂纳米材料）、低压/超低压膜开发，以及与能量回收装置、高级氧化等技术的智能集成，逐步从“污染物截留”向“资源协同回收”转型。

在工程实践层面，FO与MD已迈出从实验室走向示范应用的关键一步。例如，Oasys Water公司曾在中东某石化园区部署FO系统用于高盐废水预浓缩，成功削减50%以上蒸发器进水量；新加坡PUB评估FO用于NEWater升级，验证其抗有机污染能力。膜蒸馏方面，荷兰Prometheus公司的真空膜蒸馏（VMD）系统已用于电厂脱硫废水ZLD处理。

2 功能化膜材料的开发

新型膜分离技术的性能提升，在很大程度上依赖于先进膜材料的研发。通过物理或化学方法对膜表面或本体进行改性，赋予其特定的功能，是解决膜污染、提高选择性和稳定性的关键策略。（1）抗污染改性：通过接枝亲水性聚合物（如聚乙二醇PEG、两性离子聚合物）或构建仿生水化层，在膜表面形成物理或能量屏障，减少污染物吸附。例如，基于贻贝启发的聚多巴胺（PDA）涂层因其强粘附性和易于二次功能化，被广泛用于构建抗污染表面。（2）响应性智能膜：开发对pH、温度、光、电场等外界刺激具有响应性的膜材料。例如，pH响应膜可根据废水pH值变化自动调节孔径或表面电荷，实现对不同污染物的选择性分离。（3）催化/抗菌功能化：将纳米催化剂（如TiO₂、g-C₃N₄）或抗菌剂（如Ag纳米粒子、季铵盐）负载于膜上，在分离的同时降解有机污染物或抑制微生物生长，实现“分离-降解”一体化。（4）高通量/高选择性结构设计：采用新型制备工艺（如界面聚合优化、静电纺丝、3D打印）构建具有更薄选择层、更高孔隙率和更优孔道结构的复合膜，以兼顾高通量与高选择性。

3 在典型工业废水深度处理中的应用

3.1 石化废水处理

石化废水成分极为庞杂，通常包含油类、酚类、氰化物、多环芳烃（PAHs）等多种有毒有害物质，并伴有较高的盐分，处理难度极大。在处理流程的前端，高效的油水分离是关键。采用具有特殊润湿性（如水下超疏油特性）的超滤或微滤膜，可以有效破乳并分离乳

油，为后续的生化及深度处理单元创造良好条件。经过生化和常规物化处理后的石化废水，虽然大部分污染物已被去除，但仍含有难以降解的微量有机物和残余盐分，此时NF/RO组合工艺便成为实现水质深度净化和回用的核心^[1]。NF负责去除残余的有机物和二价离子，RO则完成最终的脱盐任务。对于那些需要实现“零液体排放”（ZLD）的石化企业，正渗透（FO）技术提供了一种极具吸引力的低能耗浓缩方案。沙特SABIC Yanbu石化园区位于水资源极度稀缺的干旱地区，受法规强制要求实施零液体排放（ZLD）。该项目将正渗透（FO）技术用于处理反渗透浓水及部分工艺排水，并与多效蒸馏（MED）耦合，成功实现FO系统稳定运行超2年，水回收率提升至95%以上，整体能耗较传统热法ZLD降低30%–40%，成为中东地区具有示范意义的ZLD工程。然而，其推广仍受限于汲取液再生能耗高、膜污染与结垢、FO膜成本较高、缺乏标准化设计以及与现有ZLD系统集成复杂等问题。

3.2 电镀废水处理

电镀废水的核心特征是含有高浓度的重金属离子（如Cr⁶⁺、Ni²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺等），这些离子不仅毒性极强，而且具有很高的回收价值。纳滤（NF）技术在此类废水处理中展现出了卓越的选择性分离能力。NF膜对二价重金属离子（如Ni²⁺、Cu²⁺）的截留率通常超过95%，而对作为电导主要贡献者的Na⁺、Cl⁻等单价离子的截留率则很低。这种价态选择性使得NF成为电镀漂洗水在线回收的理想技术：它既能保证回用漂洗水的高纯度，又能将重金属离子高效浓缩并返回电镀槽循环使用，从而实现闭路循环，既减排又增效。对于水质要求极为严苛的场合，或处理含Cr⁶⁺等特殊形态重金属的废水时，反渗透（RO）仍是不可或缺的深度保障单元。更前沿的研究方向是开发集吸附与分离功能于一体的特种膜。通过在NF或RO膜上引入氨基、羧基、巯基等螯合基团，膜不仅能通过物理筛分截留重金属，还能通过特异性的化学吸附作用将其牢牢捕获，从而极大地提高了对目标重金属离子的去除效率和选择性，为电镀废水的资源化处理开辟了新路径。

3.3 制药废水处理

制药废水含有高浓度的抗生素、激素、溶剂残留等具有强生物毒性的物质，不仅对常规生物处理系统构成致命冲击，其中的许多成分更是备受关注的新型污染物，对生态环境和公共健康构成长期潜在威胁。针对此类废水，NF/RO深度处理组合显示出强大的适用性。NF能够有效截留分子量多在300-1000Da范围内的大多数抗

生素和大分子有机物，而RO则作为最后一道防线，确保出水中各类微量污染物的浓度降至安全阈值以下，这对于遏制环境中抗生素耐药基因（ARGs）的传播至关重要。对于含有高浓度有机溶剂或热敏性物质的制药母液，膜蒸馏（MD）技术则展现出独特价值。由于MD仅传递水蒸气，能够完美实现水与非挥发性有机溶剂的分离，且回收的溶剂纯度极高，为资源化利用创造了条件。考虑到制药废水中污染物的顽固性，单纯的膜分离有时难以达到理想效果，因此常与高级氧化技术（AOPs）联用。通过臭氧氧化、Fenton反应等AOPs对废水进行预处理，可将大分子有毒有机物氧化分解为更易生物降解或更易被膜截留的小分子，甚至实现部分矿化，这不仅能够显著提高整体处理效率，还能有效缓解膜污染，延长膜组件的使用寿命。

4 挑战与未来展望

首要问题是经济性，高性能膜材料的高昂制备成本、正渗透技术中汲取液的再生成本，以及膜蒸馏过程所需的热能消耗，共同构成了制约其广泛应用的经济壁垒。其次，膜在真实复杂工业废水环境下的长期运行稳定性仍有待充分验证，尤其是在强酸、强碱、高氧化性或高污染负荷条件下，膜的抗污染性、耐化学腐蚀性和机械强度能否经受住时间的考验，是工程界普遍关心的问题^[4]。再者，单一膜技术往往难以独立应对成分复杂的工业废水，如何将其与传统工艺或其他先进技术（如高级氧化、生物电化学系统）进行科学、高效的系统集成与优化，以实现协同增效和全生命周期成本最小化，是决定技术成败的关键。此外，行业内尚缺乏统一的膜性能评价标准和针对特定工业废水的处理工艺设计规范，这也给技术的推广和标准化带来了困难。

面向未来，新型膜分离技术的发展将呈现出更加鲜明的趋势。（1）智能化与精准化：开发具有实时监测、

自清洁、自修复功能的智能膜系统，实现对废水处理过程的精准调控。（2）绿色低碳化：更加注重利用可再生能源（如太阳能驱动MD、FO）和开发环境友好型膜材料（如生物基膜），降低技术的碳足迹。（3）资源化导向：从单纯的“污染物去除”向“污染物资源化”转变。膜技术不仅是净化工具，更是从废水中提取有价值化学品（如重金属、酸碱、有机溶剂）和能源（如利用盐差能）的关键平台。（4）材料-过程-系统协同创新：通过材料科学、过程工程和系统集成的深度融合，开发下一代高效、稳定、经济的膜分离解决方案。

5 结语

新型膜分离技术，包括正渗透、膜蒸馏、纳滤以及基于先进功能化材料的各类膜过程，正以其独特的优势革新着工业废水深度处理的格局。它们不仅能够有效应对传统工艺难以处理的高难度废水，实现水质的深度净化和回用，还为废水中有价资源的回收提供了可能。然而，成本、稳定性、系统集成等挑战依然存在。未来的研究应聚焦于高性能低成本膜材料的创制、高效低耗工艺的开发以及面向资源回收的系统集成优化，以推动新型膜分离技术在工业废水治理和水资源可持续利用中发挥更大的作用。

参考文献

- [1]张玉,张春霞,汪斌,等.新型膜分离技术在污水处理中的应用[J].节能与环保,2019,(04):100-101.
- [2]叶永婷.膜分离工艺在工业废水处理中的性能优化研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(14):24-26.
- [3]王树德.膜分离技术在工业废水处理工程中的应用分析[J].造纸装备及材料,2025,54(07):136-138.
- [4]张成林,裘洋波,王超,等.工业废水资源化的膜分离技术前沿与进展研究[J].水处理技术,2025,51(08):23-28.