

## 膜分离技术在水环境治理中的实践研究

翟旭 谭峰

中车环境科技有限公司, 北京 100160

[摘要]在我国水环境污染问题日益严重的形势下, 由于具有高效分离特性以及广泛的应用领域, 使得膜技术成为了我国环保领域中的一项重要技术, 在此背景下对膜技术的水处理工艺进行分析研究就显得尤为重要, 通过对膜技术水处理工艺技术优势分析基础上, 分别从市政污水处理、工业废水处理、饮用水处理及农村分散排污等方面总结归纳了目前膜技术应用的情况, 最后针对其存在的不足从膜材料改进、膜污堵控制、联用工艺配置、智慧管控以及能量消耗等方面提出了相应的提升方向。希望本研究结果可以对促进膜技术在未来水环境保护工作中的应用起到一定借鉴意义。

[关键词]膜法水处理; 环境保护; 微滤; 反渗透; 膜生物反应器

DOI: 10.33142/sca.v9i4.19556

中图分类号: X824

文献标识码: A

### Practical Research on Membrane Separation Technology in Water Environment Treatment

ZHAI Xu, TAN Feng

CRRRC Env. Sci. & Tech. Co., Ltd., Beijing, 100160, China

**Abstract:** In the face of the increasingly serious water pollution problem in China, membrane technology has become an important technology in the field of environmental protection due to its efficient separation characteristics and wide application areas. In this context, it is particularly important to analyze and study the water treatment process of membrane technology. Based on the analysis of the advantages of membrane technology in water treatment process, the current application of membrane technology is summarized from the aspects of municipal sewage treatment, industrial wastewater treatment, drinking water treatment, and rural dispersed discharge. Finally, corresponding improvement directions are proposed from the aspects of membrane material improvement, membrane fouling control, combined process configuration, intelligent control, and energy consumption to address its shortcomings. I hope that the results of this study can provide some reference for promoting the application of membrane technology in future water environment protection work.

**Keywords:** membrane water treatment; environmental protection; microfiltration; reverse osmosis; membrane bioreactor

### 引言

我国的水污染防治正处于越来越严苛的排放要求与越来越高的水资源回收利用需求的两难境地之中。传统的沉淀、过滤等工艺在面对水质越来越复杂的形势以及越来越高的排放限制的要求之下, 常常会遇到出水质量不稳定、占地面积大、利用率不高等问题。而膜分离技术仅用几十年的时间, 就完成了由基础研究到规模化的产业应用的过程, 并逐渐发展为众多污水处理方法中的佼佼者, 为超纯净水生产、工业废水处理、饮用水提纯等提供了强有力的保障手段。随着膜材料、膜组件制造技术和膜的应用工艺不断发展, 膜法水处理工艺已经深入到整个水环境的保护当中, 成为将水处理行业由“达标排放”提升为“资源回收”的重要动力源之一。但是由于膜污染造成的透过系数

下降、操作负荷较高及高浓压缩液处理等问题限制了膜法水处理工艺产业化发展。本文对膜法水处理工艺的技术特点以及应用情况进行全面总结, 并联系新技术发展趋势提出改进措施, 期望能对膜法水处理工艺的环保应用的进一步普及起到借鉴意义。

### 1 膜法水处理工艺应用优势

膜法水处理的技术关键是采用物理筛分或者溶解-扩散机理对水中的污染物质进行有效去除。和传统工艺相比, 膜技术的最大优点就是可以控制分离精度, 出水水质稳定, 并不需要过多地投加化学药剂, 是很好的清洁生产工艺, 常用的膜都是压力推动型的, 其膜孔径也是由大到小排列依次为: 微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)以及反渗透(RO), 适用于各种水处理净化需求; 不同的工艺参数

表 1 四大主流膜分离工艺对比

膜类型	孔径范围	操作压力 (MPa)	主要截留对象	典型应用领域
微滤 (MF)	0.1~10 $\mu$ m	0.01~0.2	悬浮物、细菌、胶体颗粒	预处理、除菌过滤
超滤 (UF)	0.01~0.1 $\mu$ m	0.1~0.5	病毒、蛋白质、大分子有机物	废水回用、饮用水深度处理
纳滤 (NF)	0.001~0.01 $\mu$ m	0.5~1.5	二价离子、部分有机物	水质软化、微污染物去除
反渗透 (RO)	<0.001 $\mu$ m	1.0~8.0	几乎全部溶解性盐分和有机物	海水淡化、工业纯水制备

和应用场合请见表 1。

除了以上压差膜以外，MBR 是把膜过滤和生化工艺结合在一起的一种新的污水处理方法，该种工艺的特点是污泥浓度高、出水水质好、占地少的优点。MBR 采用的是膜组件的高效筛分能力完成泥水的截留，让细菌都集中在反应器内部进行生长繁殖，达到了水力停留时间和污泥龄分离的效果，操作起来更为方便可控，在此之外还有反渗透、电渗析等新型膜工艺也有其独特优势。总的来说，膜水处理工艺不仅从技术层面达到了传统工艺达不到的净水程度，而且对推动水资源的回收利用和减少污染有着举足轻重的作用。

## 2 膜法水处理在环境保护中的应用现状

### 2.1 城市污水处理中的应用

在城市污水处理方面，MBR 工艺是目前对污水处理进行提标改造以及再生水回用的一个最主要技术手段。我国大部分城市污水处理厂面临着越来越严格的排放标准压力。以青岛市李村河污水处理厂为例，在此项目中扩建了 5 万  $m^3/d$  MBR 装置并对原有设备进行了更新改造，使用 A<sup>2</sup>O-MBR 工艺，悬浮物去除率达到 99% 以上，出水达到《山东省城镇污水处理厂水污染物排放标准》“类 IV 类”的标准要求，每年可以减排 COD 量 8.1 万 t，总磷 386t；单方污水处理成本仅为 2.23 元/ $m^3$ 。MBR 工艺取消了传统二沉池，在孔径为 0.1 $\mu$ m 左右的 PVDF 中空纤维膜作用下进行高效的固液分离，使污泥浓度达到 8000~12000mg/L 左右，相对于常规工艺而言节约占地面积 20%~30% 左右。经过 MBR 处理过的污水中的主要污染物的去除率达到接近 90%，出水 SS 以及浊度都在 1 以下，水质优良并且非常稳定可以用于城市杂用水、景观用水以及工业冷却用水等<sup>[1]</sup>。膜技术是促使城市污水处理从“达标排放”到“资源回收利用”的重要引擎。

### 2.2 工业废水处理中的应用

工业废水种类繁多毒性大，不易生物降解，传统的处理方法很难同时达到排放标准和资源化利用的目的，在此背景下，膜技术在工业废水处理上的应用越来越引起重视。例如佛山佳利达染色 MLD 项目，它在全球率先采用纺织

印染废水的“分盐提纯”，配合“单级双膜法中水回用”系统，日处理量高达 16 万 t，回收率达到 88.7%，为国内领先水平；企业每年节省水费约 1400 万元，每年回收硫酸钠、氯化钠等工业盐约 10 万 t，打造了全国唯一一个纺织印染“零排放”基地。对于化纤废水来说，余姚大发化纤有限公司运用了分质分流预处理，运用了非均相催化臭氧氧化、反渗透等技术，水回用率为 98.3%，再生水利用率达到了 58.4%。而对于高盐高 COD 的工业废水，内蒙古煤化工项目运用 DTRO 法减少了 40% 的蒸发量负荷。纳滤分盐技术可使杂盐率小于 3%，得到的硫酸钠纯度达到 99.2%。另外一体式膜设备也有利于工业废水资源化，苏科环保研发出 ViLEP 超滤加反渗透组合工艺可以大大缩短传统繁琐的处理步骤，节省了 90% 以上的能耗。膜技术的深度应用正在推动重点工业行业从末端治理走向资源循环。

### 2.3 饮用水净化中的应用

在缺水严重以及对饮用水水质要求逐渐提高的情况下，采用膜法对饮用水进行深度处理越来越受到人们的关注。超滤膜能有效地截留原水中存在的病原微生物，胶体、有机物、铁锈等，但是其对于溶解态的无机离子几乎没有截留作用；纳滤及反渗透膜对微量有机物有较好的去除效果。纳滤 (NF)、反渗透 (RO) 等对于水中有害化学物质如消毒副产物 (DBPs) 具有很好的去除作用，不仅可大大降低人们摄入消毒副产物的风险，还可以减少消毒副产物对环境的影响。目前，在饮用水中已经检测出了 6300 余种消毒副产物，其中绝大多数都存在致癌、致突变、致畸等效应。NF/RO 等措施除去水中 DBPs，利于快速达成联合国可持续发展目标中人类健康的幸福生活 (SDG3)、清洁用水 (SDG6) 两个目标的要求<sup>[2]</sup>。在工程应用层面，桐城范岗水厂超滤工艺，原水浊度由 1.0 降到 0.2NTU 一下，居民饮水口感明显改善；连云港徐圩新区纳滤项目氯化物由 150mg/L 降到 70~80mg/L，“苦咸水变甘泉”。用超滤及纳滤进行饮用水处理的话，纳滤可以达到 75.4% 总有机碳的去除率，远高于超滤 25.4%，说明纳滤更有利于提高饮用水的生物稳定性。膜技术的持续进步正在为公众饮水安全构筑更加坚实的技术屏障。

## 2.4 农村及分散式污水治理中的应用

我国农村地域辽阔,村居零散分布,管网铺设难度大,难以全部采取集中处理的方式,在此背景下膜法提供了一个较为便捷有效的手段。一体化 MBR 设备具有占地面积小、出水水质好、运行维护方便等优点,是适用农村分散污水处理的最佳工艺。以浙江象山县为例,其采用了生态链工艺、一体式净化槽、人工湿地以及 MBR 膜处理等多工艺组合的方式,通过对症下药的工艺选择,相比于单纯使用 MBR 膜工艺可减少 30%左右的建安费用、20%左右的运行费用,出水水质达标率可保持在 95%以上。但是,在农村地区的运行维护成本相对较高,MBR 膜法工艺的运行能耗一般要比其他处理方法高,每吨水电耗在 1~3 度左右,在一些北方地区由于运行成本太高无法推广下去,为此研发人员正在开发平板陶瓷膜 MBR 工艺等低能耗处理工艺,有着良好的可靠性能,可以节省运行维护费用并且使污水变成可循环用水。膜技术在农村污水处理方面既有很大潜力又存在运行费用高的实际困难。

## 3 膜法水处理工艺优化与发展策略

### 3.1 膜材料的改性与创新

膜材性能直接影响着膜法的净化效能及适用领域。随着传统有机膜易生化污染、不抗腐蚀、寿命较短等缺陷问题日益凸显,新型膜材料的研究开发也获得一定成效。而以二氧化钛-莫来石三层复合设计的新型陶瓷膜,耐受强酸、强碱 pH 值 1~14 的苛刻条件以及高温可到 90°C,具有极高的机械强度(其最高可达 16.34MPa),比传统陶瓷膜提高近 1.15 倍。同时石墨烯膜材料的加入使膜通量大幅度增加达到 50%以上,大大提高了抗氯腐蚀能力。我国科大的“仿生”膜材料不仅可以像传统的纳滤膜那样将盐分以及大分子截留下来,还能在膜内部引起高级氧化反应使得小分子有机物全部分解掉,净化率达到了 99.99%以上,在经过 500 个小时以上的连续工作之后仍然很稳定;哈尔滨工业大学研发出的可降解的纳滤膜不仅净水效果好过市场上的商品化产品,而且还能够在六个月之内被土壤里的微生物分解掉,真正的回归大自然;这些都是新型材料上的突破,给未来的膜技术走向绿色可持续性和性能革新带来无限可能。

### 3.2 膜污染控制与清洗技术优化

膜污染问题是影响膜工艺能够长时间连续平稳工作的阻碍因素之一,在膜表面沉积胶体物质,膜面滋生微生物群落并繁殖生长,还有溶解态有机物对膜孔隙的堵塞都是造成膜污染的原因所在,而膜污染类型的不同对于其对应的处理方式也有差异,在面对不同的膜污染时要选择合

理的清洗方案来解决,如物理清洗:反冲刷、曝气清洗、机械冲刷;化学清洗:酸洗去除无机结垢、碱洗剥离有机粘连物、氧化剂浸泡消除微生物污染等,同时随着抗污染膜表面修饰技术的发展,通过增加膜表面亲水性覆盖层或者赋予膜表面抑菌功能以达到根治膜污染的目的也得到了广泛应用,进而大幅度减少了清洗频率<sup>[3]</sup>。另外,结合反渗透膜污染检测系统以及在线监控装置使用,可随时掌握跨膜压降的发展情况,在还没有达到严重的程度之前进行预防性的清洗操作,防止因严重的污染物沉积引发不可逆转的危害进而减少反复替换膜元件所造成的巨大经济损失。

### 3.3 膜组合工艺的应用

单膜法无法解决较为复杂的波动性较大的原水,而不同膜的组合或者膜与其它技术联合的方式是可以提高处理效能的方向之一。双膜法是指以超滤或者是微滤为反渗透的前处理来大大减少膜的污堵情况,提高 RO 膜的使用寿命,应用于海水淡化及制备纯净水当中;高截留 MBR 是采用截留分子量比较低的膜如纳滤膜等来替代传统的微滤以及超滤膜,可以使得出水的质量更好,对提升再生水的质量具有较好的发展前景。工业废水零排放系统里,NF 分盐+RO 浓缩+蒸发结晶分级式膜组合技术的应用已经成熟,纳滤可使二价及以下盐类达到有效分离,RO 大幅降低蒸发水量,末端结晶得到工业级盐产品。在饮用水深度净化方面,超滤加纳滤双膜叠加可以满足浊度控制及微量有机杂质截留的要求。不同的膜组合方法可根据膜各自特性进行合理选择,最大化发挥不同工艺模块之间的协同效应,这是发展膜技术深入应用以及实现物质回收循环利用的发展方向。

### 3.4 智能化与自动化管理技术的应用

膜法水处理技术正在加快与物联网、大数据、人工智能等最先进技术结合的速度,智能化运营也逐渐由理念变为现实。在线水质分析仪实时获取进水浊度、电导率、跨膜压差、产水流量等重要指标,并通过 PLC 自动化控制系统对产水泵、反洗泵以及加药器进行动态调整,很大程度上节省了人力。分体式结构方便系统的后期扩容及检修工作,数字及智能化控制使整个过程更加可靠高效。对于膜污染的预警来说,在历史工况的基础上训练出来的机器学习模型可以预判出未来可能发生的状况,适时地改变反洗强度以及化学清洗时间间隔,保持膜通量持续稳定地输出的同时减小了药剂使用量以及能耗。物联网智能化监测系统的使用让一体化系统可以做到即插即用及远程无人管理,特别适合应用于分布式

污水处理领域，伴随数字孪生技术逐渐渗透到环保领域中来，整个膜系统的全生命周期管理以及提前预警维护将成为未来的一个趋势。

### 3.5 降低能耗与运行成本的措施

能耗过高限制了膜技术的应用范围，尤其是在 MBR 曝气和 RO 高压泵运行等环节。对于 MBR 来说，近来出现了利用往复运动擦洗替代传统的持续曝气擦洗，能耗减少至原来的十分之一以下。而在反渗透系统方面，能量回收装置的应用使得浓水残余压力得到回收再利用，有效减少了高压泵的运行电耗<sup>[4]</sup>。从运营成本结构分析，一个万吨级 MBR 城市污水处理厂吨水直接运营费大约为 0.64 元/t，其中电费为 0.35 元，药品费用为 0.08 元，每年更换膜费用平均分配大约为 0.12 元，因此降低成本的重点在于延长膜的寿命以及减少曝气能耗。对于工业废水处理来说，提高反渗透系统回收率，减少浓缩液产量，大幅度降低了进入蒸发系统的水量，通过系统的优化设计降低全厂的运行能耗以及投资费用。总的来说，经过工艺上的优化改进，调整运行能效及延长设备使用寿命，整体上使膜法水处理工艺的经济性越来越明显。

## 4 结语

膜技术在污水处理过程中已经经历了几十年的发展，从过去简单的单个分离元件到今天成为综合性的包括材

料学、自动化控制、系统集成的一门新技术系统，其在城镇污水处理达标化、工业废水深度净化和零排放、饮用水安全防护、农村分散型污水处置等领域都表现出了良好的技术优势及应用潜力，但是在膜污染问题、能耗降低、高含盐量废水处理和废弃膜件等问题上依然存在待解决问题。展望今后的发展方向，在新的膜材料研制、智能化操作管理水平的提高以及多种处理工艺的联合集成方面都将对膜技术的应用起到促进作用，从而更好地发挥膜技术在环境治理中的作用，更好地促进我国对水资源的有效利用和落实国家的“双碳”政策方针。

### 【参考文献】

- [1]田珍.全膜法水处理工艺技术在环境保护中的应用研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(10):7-9.
- [2]李静,姜娜.试分析全膜法水处理工艺技术在环境保护中的应用[J].皮革制作与环保科技,2021,2(24):22-24.
- [3]师虹.全膜法水处理工艺在环境保护中的应用[J].山西化工,2023,43(2):113-114.
- [4]朱朝俞.全膜法水处理工艺技术在环境保护中的应用[J].资源节约与环保,2020(2):28.

作者简介：翟旭（1979—），毕业于哈尔滨工业大学市政工程专业，正高级工程师，现就职于中车环境科技有限公司，任产品总监。