

膜法水处理技术在市政给水中的效能评估与优化研究

邹成新

江西吉干发建设工程有限公司 江西吉安 331300

摘要：本文系统研究了膜法水处理技术在市政给水中的效能评估与优化路径。研究首先构建了涵盖污染物去除、运行稳定性及经济与环境效益的多维度效能评估体系，全面衡量了膜技术的综合表现。在此基础上，深入剖析了影响膜效能的关键因素，包括膜材料特性与膜污染的内在关联、原水水质与水温波动的外部扰动，以及运行工艺参数与操作条件的可控影响。进而，提出了三条核心优化路径：通过优化预处理工艺从源头减缓膜污染，通过优化膜清洗策略与药剂投加实现精准维护，以及通过优化系统运行参数与控制模式实现智能节能运行。该研究旨在通过系统性的评估与多维度的优化，提升膜法水处理技术的长期稳定性、经济性与可持续性，为保障城市供水安全提供高效、可靠的技术支撑。

关键词：膜法水处理；效能评估；膜污染；运行优化

引言

随着饮用水水质标准的不断提高和水源污染问题的日益复杂，传统的水处理工艺面临严峻挑战。膜法水处理技术以其高效的分离性能和稳定的出水水质，在市政给水领域展现出巨大的应用潜力。然而，其高昂的投资与运行成本、膜污染等问题也制约了其大规模推广。因此，科学评估膜法水处理技术的综合效能，并深入研究影响其性能的关键因素与优化路径，对于充分发挥该技术优势、降低运行成本、推动其在市政给水中的可持续发展具有重要的理论价值和现实意义。

一、膜法水处理技术的效能评估维度

（一）污染物去除效能评估

污染物去除效能是评估膜法水处理技术作为市政给水核心工艺可行性的首要维度，核心是量化该技术对原水污染物的截留能力，确保出水水质达标。评估需构建多维度体系：一是覆盖不同污染物，对颗粒态污染物，超滤和微滤膜去除率高，通过浊度等检测量化；对溶解性小分子有机物，纳滤和反渗透膜起主要作用，需深入特定微量有机物分析。二是关注污染物形态转化，评估膜对NOM去除及消毒副产物生成势。三是考察不同原水水质下膜系统去除效能的稳定性。全面评估为技术选型和工艺优化提供依据。

（二）运行稳定性与可靠性评估

运行稳定性与可靠性评估是衡量膜法水处理技术在市政给水应用的关键维度，核心是评价膜系统维持性能

和抵御干扰的能力。稳定性评估聚焦膜污染演变及对系统性能的影响，通过监测跨膜压差等量化污染累积速率，分析污染物组成以确定清洗策略。可靠性评估关注系统应对外部冲击的表现，包括适应原水水质波动、容错能力及膜材料稳定性。评估为膜系统优化设计等提供数据支撑，保障其长期服务市政供水^[1]。

（三）经济效益与环境效益评估

经济效益与环境效益评估是决定膜法水处理技术大规模推广的最终决策维度，从全生命周期衡量投入产出比和可持续发展潜力。经济效益评估采用全生命周期成本分析，包括资本成本和运营成本，计算单位制水成本并与传统工艺对比，通过敏感性分析控制成本。环境效益评估采用生命周期评价方法，量化膜技术全生命周期的环境负荷，膜法虽有环境优势，但存在高能耗和废弃膜处置问题。综合评估为膜技术推广提供科学依据。

二、影响膜法水处理效能的关键因素

（一）膜材料特性与膜污染

膜材料特性是决定膜法水处理技术内在性能和抗污染能力的根本性因素，而膜污染则是这些特性与外部环境相互作用下导致效能下降的直接表现。二者共同构成影响膜系统运行的核心内因。膜材料特性体现在物理结构参数和化学特性两方面。物理结构参数包括膜孔径、孔隙率、表面粗糙度等。孔径决定截留精度，越小去除溶解性物质率越高，但更易被小分子堵塞；孔隙率影响渗透通量，高孔隙率产水效率高，但易形成内部污染；表面粗糙度与污染物初始吸附相关，粗糙表面会加剧膜

污染。化学特性方面，表面电荷和亲疏水性对污染行为有决定性影响。带负电荷的膜可通过静电排斥减缓污染物沉积；亲水性强的膜表面形成水化层，能阻碍疏水性有机物和微生物吸附，提高抗污染性能。膜污染是材料特性在运行中的体现，过程复杂、多阶段，初期是可逆的浓差极化和滤饼层形成，随后是不可逆的孔内堵塞和孔道吸附，最终可能形成生物膜。污染物种类与膜材料特性相互作用决定污染类型和严重程度。例如，疏水性膜易吸附NOM疏水性组分，带正电荷的膜易吸附天然胶体。深入理解膜材料特性与膜污染的关联，能为膜材料选型和改性提供理论指导，通过选择或设计特定膜材料，可延缓污染进程，降低清洗频率和强度，提升膜系统长期运行效能和经济性^[2]。

（二）原水水质与水温波动

原水水质与水温波动是影响膜法水处理效能的主要外部扰动因素，它们直接决定了膜系统面临的污染负荷和运行阻力，是系统设计和运行中必须应对的挑战。原水水质波动性体现在多方面。一是悬浮物和胶体浓度变化，如雨季或汛期地表水浊度升高，泥沙等在膜表面形成滤饼层，使跨膜压差攀升、产水通量骤降。二是溶解性有机物（DOM）浓度和组分变化，水源中NOM含量、分子量分布等影响膜污染类型和速率，NOM浓度升高，膜污染加剧。三是季节性藻类暴发释放毒素和胞外聚合物（EPS），易造成膜污染和生物膜滋生。四是水中离子组成，钙、镁等二价阳离子与带负电荷物质“架桥”，加剧膜污染。水温也是关键因素，水温升高水粘度降低，产水通量增大；冬季低温则相反，且会增加能耗和膜压实效应。同时，温度影响化学反应和微生物活性。因此，深入分析原水水质与水温波动对膜效能的影响，强调膜系统设计和运行需有适应性和灵活性。工艺设计要考虑原水最不利污染负荷并预留余量，运行管理需建立基于原水水质和水温预测的动态调控机制，确保系统稳定高效运行^[3]。

（三）运行工艺参数与操作条件

运行工艺参数与操作条件是连接膜材料特性、原水水质与最终处理效能之间的桥梁，是人为可控的、直接影响膜系统运行状态和能耗水平的关键因素。对参数的优化控制是实现膜法水处理效能最大化和成本最小化的核心。操作压力（或跨膜压差TMP）是基本控制参数，提高压力可增加产水通量，但会加剧浓差极化和膜污染，过高压力会导致不可逆内部污染和通量衰减，因此需权衡产水效率和污染控制，确定经济的操作压力区间。膜

通量决定水厂产水规模，高通量运行虽可减少膜组件投资，但会加快污染和增加清洗频率，运行中应将通量控制在临界通量以下。错流速率（或膜面流速）决定膜表面剪切力，提高流速可减缓污染物沉积，但会增加泵的能耗，需找到能耗与污染控制的平衡点。操作模式如恒定通量和恒定压力运行会影响污染行为。回收率决定原水利用程度和浓缩液污染物浓度，高回收率节约水资源，但增加膜结垢和污染风险。化学清洗策略是关键运行条件，决定被污染膜性能能否恢复。深入研究和优化组合这些工艺参数，可揭示膜系统运行规律，通过建立优化算法找到特定水质下的最优参数组合，将膜系统运行提升到精细化、智能化管理新高度。

三、膜法水处理系统运行优化路径

（一）优化预处理工艺以减缓膜污染

优化预处理工艺是保障膜系统长期稳定运行、降低运行成本的首要且最有效的优化路径，其核心目标是在原水进入膜组件之前，针对性地去除或转化导致膜污染的关键物质，从源头上减轻膜系统的处理负荷。膜污染根源是原水中特定组分，预处理工艺设计需基于对原水水质和膜污染机理的深刻理解。针对悬浮物、胶体和微生物，传统混凝-沉淀-过滤工艺必不可少，关键在于优化混凝剂选择与投加量，可通过烧杯试验和在线监测确定最佳投加量，高效去除浊度物质，避免堵塞膜系统。对于溶解性天然有机物（NOM），常规混凝对疏水性大分子组分去除效果有限，需引入深度预处理技术，如粉末活性炭（PAC）吸附和臭氧氧化等高级氧化技术。PAC吸附要确定最佳投加点和投加量，高级氧化技术能分解大分子NOM，减轻膜污染。对于高硬度或高碱度原水，需设置软化或阻垢预处理，投加阻垢剂时要根据结垢离子浓度和系统回收率，计算饱和指数，选择合适类型并精确控制投加量，防止难溶盐结晶析出。优化预处理工艺遵循“预防优于治疗”原则，在膜系统前端构建屏障，消除污染威胁，延长膜运行周期，减少清洗频率和强度，保护膜组件，降低能耗和运行成本，是膜法水处理技术经济高效运行的基础^[4]。

（二）优化膜清洗策略与化学药剂投加

优化膜清洗策略与化学药剂投加是恢复膜性能、延长膜使用寿命的关键维护性优化路径，其核心在于从固定周期的“预防性”清洗，转变为基于状态监测的“预测性”和“精准化”清洗，以最低的化学和人力成本实现最佳的清洗效果。膜清洗策略的优化首先体现在清洗时机的选择上。传统固定周期清洗（如每3个月一次）

易导致清洗不足或过度。清洗不足会使膜污染累积，部分污染物发生不可逆变化，导致膜性能永久下降；清洗过度则增加药剂消耗、停机时间和废液处理量，还可能损害膜材料。优化策略是基于在线监测数据进行状态触发式清洗，实时监测跨膜压差（TMP）或标准化产水量变化，设定清洗触发阈值，如TMP达初始值1.2~1.5倍时进行维护性清洗（MC），达更高阈值时进行恢复性清洗（RC）。其次，核心是优化清洗方案，包括清洗药剂选择、浓度、温度、pH值、清洗方式和时间的组合优化，针对不同污染类型采用不同配方，如有机和生物污染用碱性清洗剂配合表面活性剂或杀菌剂，无机结垢用酸性清洗剂。关键是通过膜污染物成分分析确定主导污染类型，“对症下药”，如主要污染物为铁离子和有机物，可设计“碱洗+酸洗+络合剂”方案。化学药剂投加优化还体现在控制浓度和温度，需通过实验确定经济有效的组合。优化膜清洗策略将膜清洗从粗放的经验性维护提升为精细化、数据驱动的科学管理，能精准预测污染状态、匹配清洗方案，在最小化干扰和消耗的前提下恢复膜性能，对保障水厂供水和控制成本意义重大^[5]。

（三）优化系统运行参数与控制模式

优化系统运行参数与控制模式是挖掘膜系统内在潜力、实现节能降耗和精细化操作的主动性优化路径，其核心在于摒弃固定不变的运行设定，建立一套能够根据原水水质、水温等工况变化进行动态调整的智能控制体系。运行参数的优化主要体现在产水通量、操作压力、错流速率和回收率的调控上。传统运行采用恒定通量或恒定压力模式，面对工况变化存在弊端。恒定通量模式下，原水水温降低或水质恶化时需提高压力，导致能耗和污染增加；恒定压力模式下，产水量会波动，难以满足供水需求。优化的控制模式是恒定产水量的智能变压运行，系统根据供水需求设定总产水量目标，依据实时监测的进水温度、浊度和TMP，通过优化算法动态调整操作压力和膜组件通量分配，如冬季低温时适当降低单支膜通量、增加运行膜组数量。错流速率的优化采用变错流速率控制。水质差、TMP增长快时，提高错流速率抑制污染物沉积；水质好、TMP稳定时，降低错流速率节省能耗，实现污染控制与节能的平衡。回收率的优化可根据原水结垢潜力和有机物含量动态调整。原水水质好、结垢风险低时，提高回收率节约水资源；水质差、结垢风险高时，降低回收率保护膜系统。优化系统运行

参数与控制模式能将膜系统运行从被动适应提升为主动优化。通过先进传感技术和智能控制算法，使系统具备“思考”和“自适应”能力，在满足供水水质和水量的前提下，实现能耗最低、污染最慢、产水成本最优，是膜法水处理技术实现“高效用”和“智慧用”的必由之路。

结语

膜法水处理技术在市政给水中的应用，不仅展现了其在污染物去除、运行稳定性及经济效益等多方面的显著效能，更揭示了通过科学管理与技术创新实现效能最大化的广阔空间。从深入剖析原水水质与水温波动对膜效能的影响，到精细调控运行工艺参数与操作条件，再到系统性地优化预处理工艺、膜清洗策略及系统运行参数，每一步都凝聚着对技术本质的深刻理解与对实际需求的精准把握。这些优化路径的实施，不仅显著提升了膜系统的处理能力与运行效率，更在降低能耗、减少化学药剂使用、延长膜使用寿命等方面取得了实质性进展，为市政给水行业提供了高效、可持续的解决方案。展望未来，随着材料科学、自动化控制及人工智能等领域的不断发展，膜法水处理技术将迎来更加智能化、精细化的新时代，其在保障城市供水安全、促进水资源循环利用方面的作用将更加凸显。因此，持续深化膜法水处理技术的研究与应用，对于推动我国给水工程领域的科技进步与产业升级，具有不可估量的价值与意义。

参考文献

- [1] 廖昆. 探讨全膜法水处理在农村环境保护中的应用措施[J]. 生态环境与保护, 2021, 4(1): 103-104. DOI: 10.12238/eep.v4i1.1233.
- [2] 王先铭. 生活污水深度处理中膜法水处理技术的应用研究[J]. 现代科技: 现代物业下旬刊, 2020, 000(006): P.1-1.
- [3] 朱惠良, 陈阳, 邱晓鹏, 等. 膜法水处理过程中水质预处理技术研究进展[J]. 西北水电, 2021(6): 1-7.
- [4] 杨若雪. 全膜法水处理技术在电厂中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2022(19): 3. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2022.19.096.
- [5] 徐雁金. 膜法水处理技术在生活污水处理中的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(23): 125-128.