

再生水回用中RO膜的污堵预测模型与实证研究

朱 琦 徐华华 邱剑波 陈佳申
宁波市城市排水有限公司 浙江 宁波 315040

摘 要：再生水回用作为缓解水资源短缺的有效途径，其核心技术反渗透（RO）膜在运行过程中易受污堵影响，导致系统性能下降。本文基于中间堵塞模型，深入结合RO膜的实际运行特性，建立了针对再生水回用的RO膜污堵预测模型。通过搜集并分析近20年发表的文献数据，以及选取60余项再生水反渗透处理工程进行实证研究，验证了模型的有效性。同时，本文还深入探讨了再生水中有机物对RO膜污堵的影响机制，并提出了具体的防控措施建议。研究成果为再生水回用中RO膜的高效稳定运行提供了理论支持和技术指导。

关键词：再生水回用；RO膜；污堵预测模型

引言

随着全球水资源短缺问题的日益严峻，再生水回用技术逐渐成为解决水资源短缺的重要途径。RO技术作为再生水回用的核心技术，因其高效的脱盐能力和优异的水质提升效果而得到广泛应用。然而，RO膜在运行过程中易受到进水中的悬浮物、胶体、有机物、微生物等污染物的污堵，导致膜通量下降、产水水质恶化，甚至引发系统故障。因此，建立有效的RO膜污堵预测模型，提前预判污堵风险，并采取有效措施进行防控，对于提高再生水回用系统的整体性能具有重要意义。

1 文献综述

近年来，国内外学术界针对反渗透（RO）膜的污堵问题展开了深入且广泛的探讨。研究揭示，RO膜的污堵是一个多因素交织的复杂过程，主要受进水水质特性、操作条件参数以及膜材料本身的物理化学性质等多重因素影响。进水中的悬浮物、溶解性有机物、无机盐类以及微生物等均可成为污堵的潜在源头。操作条件方面，如压力、温度、流速以及回收率等，均对污堵速率和程度有显著影响。而膜材料的亲疏水性、孔径大小及分布、表面电荷等性质，也决定了其对不同污染物的吸附和排斥能力，从而影响污堵的发生和发展。在污堵预测模型的研究领域，学者们提出了多种理论框架，旨在准确预估RO膜在特定运行条件下的污堵趋势。这些模型大致可分为经验模型和机理模型两大类。经验模型主要基于大量实验数据，通过统计方法建立污染物浓度、操作条件与膜通量变化之间的经验关系式，虽然简便易用，但受限于实验条件的特定性，其普适性有待提高^[1]。机理模型则尝试从污堵的物理化学过程出发，考虑污染物在膜表面的吸附、沉积、聚集以及膜孔内的堵塞机制，理论上具有更高的预测准确性和泛化能力。然而，现有机

理模型在描述复杂有机物对RO膜污堵的影响时，仍面临诸多挑战，如有机物种类的多样性、分子结构的复杂性以及污堵过程的动态性，导致模型参数难以准确确定，预测结果与实际情况存在偏差。因此，开发一种能够准确反映再生水特性、考虑多种污堵机制、且易于实际应用的RO膜污堵预测模型，对于优化再生水回用工程的运行策略、延长膜使用寿命、降低维护成本具有重要意义。

2 研究方法

2.1 模型建立

2.1.1 中间堵塞模型基础

中间堵塞模型作为一种描述有孔膜过滤过程中污堵行为的数学模型，特别适用于解析RO膜在有机物污堵条件下的通量衰减规律。该模型基于以下假设：污堵物质在膜孔内部逐渐形成一层中间堵塞层，这层堵塞层随着过滤时间的延长而增厚，导致膜的有效过滤面积减少，通量随之下降。通过引入污堵常数 k （反映污堵速率）和稳定通量 J_{pss} （表示污堵达到动态平衡时的通量）两个关键参数，模型能够定量描述RO膜通量随时间的变化曲线。

2.1.2 数据搜集与处理

为构建适用于再生水回用场景的RO膜污堵预测模型，本研究广泛搜集了近20年来发表于国际知名期刊上的相关文献，从中提取了来自不同国家和地区、由不同研究团队开展的RO膜通量-时间实验数据。这些数据覆盖了腐殖酸、多糖、蛋白质、表面活性剂等多种典型有机物，以及实际污水样本，浓度跨度从几毫克每升至几克每升不等，操作条件也涵盖了广泛的压力、温度、流速范围^[2]。通过对这些数据的系统整理和深入分析，验证了中间堵塞模型在描述RO膜有机物污堵行为方面的有效性和适用性。

2.1.3 模型参数确定

采用非线性回归分析技术，对实验数据进行曲线拟

合，得到了污堵常数 k 和稳定通量 J_{pss} 与污染物浓度、操作压力等关键因素的数学关系式。具体而言，研究发现污堵常数 k 与污染物浓度呈正相关，即污染物浓度越高，污堵速率越快；而稳定通量 J_{pss} 则与操作压力呈正相关，表明在一定范围内提高操作压力可以增加膜的稳定通量，但超过一定限值后，通量增加不再显著，甚至可能因压力过高而加速膜损伤。这些数学表达式构成了RO膜污堵预测模型的核心架构，为后续模型应用提供了理论基础。

2.2 实证研究

2.2.1 实证研究对象选择

为验证所建模型的实际应用效果，本研究精心选取了某市经济开发区再生水厂等60余项再生水反渗透处理工程作为实证研究对象。这些工程项目涵盖了从小型到大型的不同规模再生水处理设施，处理的水质类型多样，操作条件也各不相同，确保了实证研究的广泛性和代表性。

2.2.2 数据收集与分析

通过现场安装监测设备、定期采集水样以及查阅运行记录等方式，系统收集了RO膜的运行数据和水质指标，包括但不限于膜通量、进水有机物浓度（如生化需氧量BOD、化学需氧量COD、总有机碳TOC等）、操作压力、温度、流速等关键参数。同时，为了更深入地了解污堵物质的化学组成和物理形态，对部分代表性样本进行了傅里叶变换红外光谱（FTIR）分析，以识别污堵物质中的特征官能团；以及扫描电子显微镜（SEM）观察，以直观展示污堵层在膜表面的分布状态和微观结构。

2.2.3 模型预测与验证

利用所建立的RO膜污堵预测模型，对选定的再生水反渗透处理工程的污堵风险进行了预测计算。将模型预测得到的膜通量变化曲线与实际运行记录的通量数据进行对比，通过计算相对误差（即预测值与实际值之差的绝对值除以实际值），评估模型的预测准确性和实用性。

2.3 结果与讨论

2.3.1 模型验证结果

通过实证研究，本文验证了所建RO膜污堵预测模型的有效性。表1列出了部分实证研究结果，展示了模型预测值与实际运行值的对比情况。

表1 RO膜污堵预测模型验证结果

样本编号	进水有机物浓度 (mg/L)	操作压力 (MPa)	温度 (°C)	流速 (m/s)	模型预测通量 (L/m²·h)	实际运行通量 (L/m²·h)	相对误差 (%)
1	50	1.2	25	0.8	105	103	1.9
2	100	1.5	20	1.0	90	88	2.2
...	...	...	...	...	...	...	...

续表：

样本编号	进水有机物浓度 (mg/L)	操作压力 (MPa)	温度 (°C)	流速 (m/s)	模型预测通量 (L/m²·h)	实际运行通量 (L/m²·h)	相对误差 (%)
50	200	1.3	22	0.9	64.5	62.3	3.5
51	250	1.2	24	0.7	54.8	51.2	6.6
注：表中仅列出了部分样本数据							

从表1中可以看出，模型预测值与实际运行值之间的相对误差均控制在10%以内，这充分证明了所建模型具有较高的预测准确性和实用性。进一步分析不同进水有机物浓度、操作压力、温度和流速条件下的预测结果，发现模型能够准确捕捉这些因素对膜通量的影响趋势。例如，随着进水有机物浓度的增加，模型预测的膜通量呈现逐渐下降的趋势，这与实际观察到的污堵现象一致；操作压力的增大在一定范围内提高了膜通量，但超过某一临界点后，通量增加幅度减小甚至趋于稳定，反映了膜材料承受压力的限制；温度和流速的变化也对膜通量产生显著影响，高温和适宜的流速有助于减轻污堵，提高膜性能。

2.3.2 污堵原因分析

本研究通过实证研究深入剖析了再生水中有机物对RO膜污堵的影响机理。结果显示，疏水性有机物是污堵主因，其疏水特性使其易在膜表面和孔内沉积，形成致密污堵层，阻碍水分子透过，导致膜通量下降。FTIR分析显示污堵物质含大量疏水性官能团，如烷基、芳香基，增强了有机物与膜材料的相互作用，促进了污堵层形成。SEM图像直观展示了污堵层在膜表面的分布和微观形态，证实了疏水性有机物在污堵中的关键作用。此外，研究还发现耐氯细菌等微生物的存在增加了污堵风险。这些微生物在膜表面附着繁殖，形成生物膜，减少有效过滤面积，并通过代谢活动产生更多污染物，加剧污堵。因此，在再生水回用中，有效控制微生物生长繁殖，对减轻RO膜污堵风险、保障产水水质至关重要^[3]。

3 防控措施建议

针对RO（反渗透）膜的污堵问题，其不仅影响系统的产水效率和水质，还缩短了膜的使用寿命，增加了运维成本。因此，提出并实施有效的防控措施至关重要。

3.1 加强进水预处理

进水预处理是防止RO膜污堵的关键。（1）选择性吸附介质过滤：根据进水有机物特性，选择活性炭、树脂等吸附介质，去除有机物、余氯及部分重金属离子，降低污堵风险。（2）混凝沉淀：投加混凝剂，使胶体、悬浮物等凝聚成较大颗粒后去除，减轻RO膜负担，提高处

理效率。(3) 氯-紫外线协同消毒: 采用氯和紫外线联合消毒, 杀灭微生物, 防止生物膜形成。

3.2 优化RO膜的运行条件

合理运行条件对延长RO膜寿命、减少污堵至关重要。

(1) 调整操作压力: 在保证产水水质前提下, 适当降低操作压力, 减少污堵物质沉积。(2) 提高温度: 在一定范围内提高进水温度, 增加水分子活性, 有利于污堵物质脱附和清洗, 但需注意膜材料耐温性能。(3) 增加流速: 通过增加进水流速, 冲刷膜表面污堵层, 减少污堵物质积累, 但需避免能耗和膜损伤风险。

3.3 定期对RO膜进行清洗和维护

即使采取预处理和优化运行条件, RO膜仍可能污堵, 需定期清洗和维护。(1) 化学清洗: 根据污堵物质特性选择清洗剂, 溶解或分解污堵层, 恢复膜通透性, 需严格控制清洗剂浓度和清洗时间。(2) 物理清洗: 采用高压水枪、超声波等物理设备去除污堵物质, 损伤较小, 但可能无法彻底去除顽固污堵物质, 通常作为化学清洗辅助手段。(3) 定期更换膜元件: 对于严重污堵或无法清洗干净的膜元件, 应及时更换, 更换周期根据系统实际情况和膜元件性能确定, 需严格按照操作规程进行。

4 实际案例分析: 岚山净化水厂双膜车间超滤膜污堵应急处置

4.1 案例背景

岚山净化水厂双膜车间自2021年9月23日正式启用后, 一直稳定运行, 日均产水量保持在2.4万吨, 超滤膜池回收率为90%。然而, 在2022年11月中下旬, 5组浸没式超滤跨膜压差短时间内迅速上升, 导致产水量迅速衰减。跨膜压差是判断超滤系统是否正常运行的重要监测参数, 其升高意味着超滤膜出现了污堵情况。这一事件对再生水生产运行构成了严重威胁, 需要立即查明原因并采取措施解决。

4.2 问题分析与诊断

4.2.1 初步检查与排查

检查超滤系统设备工况, 包括设备运行、反洗程序、反洗强度、药剂配比等参数, 未发现异常。对超滤进水、超滤出水、RO出水进行了抽样检测, 发现超滤进水中的COD_{Cr}、NH₃-N、TP等指标较高, 可能导致膜污堵。吊装检查超滤膜, 发现超滤膜表面被黑色物质包裹, 膜池水面有少量油性漂浮物质, 初步判断为油污和无机结垢导致的污堵。

4.2.2 深入分析原因

原水中的悬浮颗粒、残留药剂、油脂类物质以及微生物二次繁殖等, 都可能导致超滤膜污堵。对原水水质

的监测不到位, 对工艺辨别与判断能力不足, 未能及时发现并解决问题。

4.3 应对措施

4.3.1 针对油污的清洗

采用表面活性剂+氢氧化钠药剂组合, 调节pH为11-12, 进行浸泡、曝气。在原有清洗流程中加入循环泵+曝气冲洗方式, 增加浸泡时间和循环流动, 提高清洗效果。清洗后跨膜压差降至0.5bar左右, 但清洗周期仍为4天。

4.3.2 针对无机结垢的清洗

采用柠檬酸进行酸洗浸泡, 通过小试确定最佳清洗浓度为柠檬酸原液稀释16倍。采用行车吨桶投加柠檬酸, 共计浸泡22小时, 第二天早上放空置换后正式投产运行。清洗后跨膜压差降至0.3左右, 单套池组流量恢复至450L/h, 清洗周期恢复至8天/洗, 标志着此次超滤膜污堵事件顺利解决^[4]。

4.4 案例启示与建议

定期对双膜车间的运行情况进行评估, 及时调整工艺参数设置。结合实际运行经验, 制定常规清洗方案与预防性清洗方案, 延长膜的使用寿命。梳理完善工艺操作手册, 优化调整加药量, 减少进水水质对双膜系统的压力。对双膜系统设备设施进行定期深度检查, 及时发现并处理潜在问题。

结语

本文基于中间堵塞模型, 结合RO膜的实际运行特点, 建立了RO膜的污堵预测模型, 并通过实证研究验证了模型的有效性。研究表明, 该模型能够准确预测RO膜的污堵风险, 为再生水回用中RO膜的高效稳定运行提供了理论支持和技术指导。同时, 本文还分析了再生水中有有机物对RO膜污堵的影响机制, 并提出了相应的防控措施建议。未来, 我们将继续深入研究RO膜的污堵问题, 探索更加高效、环保的污堵防控技术, 为再生水回用事业的发展做出更大贡献。

参考文献

- [1]赵韬.基于深度学习的反渗透膜表面缺陷检测方法研究[D].西安理工大学,2024.
- [2]刘耀辉.基于BP神经网络模型的海水淡化反渗透膜污染预测研究[D].青岛理工大学,2023.
- [3]殷明威,吴家琛,马兴峰.SEM-EDS结合结垢趋势模拟软件在反渗透膜污堵原因分析中的应用[J].给排水工程,2024,60(03):82-86.
- [4]孙浩,于童,殷豪帅,等.反渗透膜生物污堵监测及其控制的研究进展[J].环境工程,2021,39(07):62-72.