

Study on membrane pollution and its prevention and control in seawater desalination

Shaocong Wang Hui Wang

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China

Abstract

Membrane fouling has become a critical factor limiting the efficient and stable operation of reverse osmosis, nanofiltration, and other technologies in seawater desalination processes. This paper systematically investigates the types, characteristics, formation mechanisms, detection methods, and prevention strategies of membrane fouling. The article first clarifies the concept, main categories, and properties of membrane fouling to establish a foundation for understanding its essence. It then analyzes the fouling formation process, key influencing factors, and the structure and composition of fouling layers, revealing the underlying patterns of fouling development. Subsequently, it explores detection methods and evaluation techniques to provide a basis for timely assessment of fouling severity. The focus shifts to prevention technologies including pretreatment, membrane cleaning, and operational optimization. Finally, future research directions are discussed from aspects such as comprehensive prevention strategies, development of new anti-fouling membrane materials, and technological trends. Effective control of membrane fouling is crucial for reducing operational costs, improving water production efficiency, and extending membrane service life.

Keywords

seawater desalination; membrane fouling; fouling mechanism; fouling monitoring; prevention and control technology; anti-fouling membrane

海水淡化过程中膜的污染及防治方法研究

王绍聪 王慧

山东电力工程咨询院有限公司, 中国·山东 济南 250013

摘要

膜污染在海水淡化进程中, 成为限制反渗透、纳滤等技术达成高效稳定运行的关键因素。本文针对膜污染的种类、特点、生成原理、检测诊断手段以及防治措施展开系统探究。文章先说明膜污染的概念、主要类别及其属性, 从而为把握污染实质形成基础。接着详细剖析污染的生成流程、主要影响要素以及污染层的构造与物质, 展示出污染产生发展的深层规律。在此基础上, 再探究膜污染的检测方法与判断技术, 为及时评定污染严重程度提供依据。然后重点论述依靠预处理、膜清洗和运行改良的防治技术。最后从综合防治方案、新型抗污染膜材料研发、技术发展走向等方面展望后续研究方向。有效地控制膜污染, 对削减运行成本、提升产水效率、加长膜的使用寿命有着决定性的意义。

关键词

海水淡化; 膜污染; 污染机理; 污染监测; 防治技术; 抗污染膜

1 引言

全球水资源短缺的状况愈发严重, 海水淡化作为获取淡水资源的主要渠道, 其技术发展备受瞩目。在诸多海水淡化技术当中, 膜法技术特别是反渗透技术, 由于能耗较低、设备较为紧凑等长处, 已经成为主流工艺之一。但是, 膜污染问题一直是限制这项技术大规模应用及其经济效益改善的核心障碍。膜污染会引发系统产水量缩减、脱盐率下滑、操作压力变大以及能耗增多等情况, 而且明显减小膜元件的使用寿命, 加大运行守护成本^[1]。所以, 全面而深入地探究

膜污染的种类、原理、检测手段以及防范措施, 对于推动海水淡化技术向前迈进并走向产业化十分关键。本文旨在对海水淡化过程中膜污染的各个方面进行综合性阐述, 为相关领域的研究与应用提供理论参考。

2 膜污染类型与特征

2.1 膜污染的定义

膜污染指的是在膜法海水淡化时, 进料液里各类组分会在膜表面或者膜孔内产生不可逆或者可逆的吸附、沉降、堵塞等物理化学改变, 进而引发膜分离性能变差的情况。这个过程实际上是污染物和膜材料之间复杂的界面相互影响造成的。污染另外体现为产水通量不断减小, 而且往往伴随操作压力增大和脱盐率起伏。认识膜污染的准确含义是辨别

【作者简介】王绍聪(1997-), 男, 中国山东济南人, 硕士, 助理工程师, 从事电厂化学水处理工艺研究。

膜污染和膜自身结构变化引发的性能下降的关键，还是后面展开污染机理研究以及防治技术开发的理论根基。区分膜污染的可逆性和不可逆性，这对选定清洗方案和考量膜使用寿命有着重要的指引价值。

2.2 主要污染类型

按照污染物的化学性质与来源，膜污染大致可分入四种主要类型。无机污染着重于海水里钙、镁、钡、锶等离子所含的难溶盐类，碳酸钙、硫酸钙、硅酸盐之类，由于浓度极化而析出结晶从而产生结垢现象。有机污染源自海水中的天然有机物，腐殖酸、富里酸、多糖类物质等，其主要表现形式为在膜表面的吸附以及凝胶化过程^[2]。胶体污染关乎水中细小的粘土矿物、铁铝氧化物之类的胶体颗粒的沉降状况。生物污染属于最为繁杂的一类，指的是微生物在膜表面附着、生长并且分泌胞外聚合物以生成生物膜这样一种情况。这四类污染常常不是单独出现的，它们之间存在相互影响、共同作用的情形，进而引发出复杂的混合污染。

3 膜污染机理与分析

3.1 污染形成过程

膜污染的产生属于动态、多步骤的连续过程。起初，污染物经由对流传递和浓差极化被输送到膜表面。之后，污染物同膜表面借助范德华力、静电相互作用、疏水作用等界面力执行初步吸附。伴随过程的发展，污染物持续在膜表面汇集，生成污染层。此层也许会进一步老化、压实，从而加大去除的困难度。就生物污染而言，其过程更为繁杂，牵涉可逆/不可逆粘附、菌落生长、胞外聚合物分泌以及生物膜成熟等诸多阶段^[3]。而整个生成过程受到传质效应和界面相互作用的共同调控。把握这个动态过程乃是预测和干预污染的关键所在。

3.2 关键影响因素

影响膜污染形成与发展的关键要素大致可归为三类。膜自身特性属于内因，涵盖膜材料的表面能（亲疏水性）、表面电荷（Zeta 电位）、表面粗糙度以及膜孔结构参数等，它们决定了膜与污染物最初的作用能。而操作条件则为外因，操作压力、回收率、错流流速以及温度会直接左右浓差极化程度和污染物向膜面的输送通量。进水水质则是决定性要素，污染物浓度、离子强度、pH 值以及共存物质之间的相互作用（比如钙离子对有机污染的推动作用）会大幅改变污染的速度和形式。这些要素相互关联，一起决定了污染的严重程度及其发展路径。

3.3 污染层结构与成分分析

形成的污染层常常具备复杂的结构与化学成分。其结构可能存在分层情况，紧贴膜表面的最初吸附层结合较紧，外层沉积层则比较疏松。从成分来看，实际污染大多是由无机垢、有机大分子、胶体颗粒以及微生物共同存在的混合污染。各组成部分之间也许会产生协同作用，从而加重污染程

度。要想准确判断污染类型并制订清洗方案，关键在于精准剖析污染层。当前常用的技术手段涵盖利用扫描电子显微镜来观察形貌，依靠能谱分析元素构成，凭借傅里叶变换红外光谱识别官能团，还有采用 X 射线衍射分析晶体物相等方法。这些分析有益于展示污染的真实状况。

4 膜污染监测与诊断

4.1 污染监测方法

膜污染的监测方法期望能及时察觉污染现象及其发展情况。传统监测大多依靠追踪关键运行参数的变趋势，标准化产水通量出现衰减、段间压差逐步增大、系统脱盐率产生异常波动等情形。这些参数可作为衡量膜系统性能状况的间接但有效的参照。而且，定时展开膜元件的离线性能检测也属于一种辅助办法^[4]。近些年来，许多在线监测技术持续完善，比如运用超声波传感器来测量污染层厚度，或者借助光学相干断层扫描技术执行原位可视化检测。这些前沿手段大概会给予更为直观、随时可用的污染状态资讯，从而为精确控制形成基础。

4.2 污染程度评估

在监测得到的数据基础上，要对污染程度实施定量评价。常见的评价指标涵盖通量下降百分比、膜面污染阻力（此阻力包含可逆污染阻力与不可逆污染阻力），还有凭借阻力串联模型执行的总阻力分析。经由创建污染动力学模型，能够对污染的发展趋势作出预测，并判定清洗的最佳时间。精确的定量评价利于比较不同工况或者预处理效果的好坏，也是达成从定期守护向依托状态的预测性守护过渡的核心所在。评价结果会直接影响到清洗策略的规划以及运行参数的改良调整。

4.3 污染诊断技术

污染诊断目的在于明确污染的性质，也就是要解答“什么引发了污染”这个问题。离线诊断往往须要在系统停止运行之后，把膜元件拿出来做解剖取样，然后依靠一些物理化学分析方法来表现污染层的情况。前面提到的 SEM - EDS、FTIR 等就属于这种情况。而在线诊断技术试图在不打断整个流程的情况下辨别出污染种类，可以借助分析特定荧光物质的荧光光谱来判断是否为有机污染，或者监测流道压力差的变化特点以初步判定污染类型^[5]。精准的诊断是执行目标清洗并从核心上改良预处理方案的先决条件，这样就能有效地防止清洗时的盲目性，提升处理的效率。

5 膜污染防治技术

5.1 预处理方法

预处理属于控制膜污染的第一道屏障，其关键之处在于海水踏入膜单元之前，要最大程度地去除或者改变可能导致污染的成分^[6]。传统预处理工艺往往包含混凝 - 絮凝步骤，即投入药剂促使胶体和不稳定的有机物失稳并聚集成团；接着借助沉淀、气浮或者介质过滤（比如砂滤、多介质过滤）

来去掉这些凝聚起来的絮状物；而精密过滤（像滤芯过滤）可当作保安过滤器，用以去除细小颗粒。对于某些特定污染物，还可以利用高级氧化、吸附（诸如活性炭、离子交换树脂）、化学软化等加强型预处理技术。预处理的成果会径直左右后面膜系统的污染程度以及清洗间隔时间。

5.2 膜清洗技术

当污染达到一定量的时候，就要借助清洗来重新获取膜的性能。清洗包含物理清洗和化学清洗两种类型。物理清洗大多依靠机械力，比如偶尔减小运行压力（松弛）、定期变换流向（反冲洗）、利用空气或者海绵球实施擦洗等等，这主要是为了清除膜表面那些松散的沉积物。而化学清洗则是采用清洗药剂，酸可以化解无机垢，碱能够清除有机污染和生物粘膜，螯合剂用来结合金属离子，消毒剂负责消灭微生物。清洗方案（包括药剂的选取、浓度、pH值、温度、流速、历时等方面）要按照污染判断的结果专门制定，从而协调好清洗效果和膜受损风险之间的关系。

5.3 运行条件优化

改良系统运行条件之后，无需增添额外设备便能有效延缓污染现象。其关键改良策略包含控制恰当的系统回收率，防止因过度浓缩而导致结垢及浓差极化情况恶化；保留足够高的错流流速，从而形成良好的膜面剪切力，阻止污染物沉降；采用恒定流量或者低于临界流量的操作模式，规避污染速度的突然加快^[7]。而且，创建合理的保养性清洗时间间隔也是很重要的运行策略。运行改良目标在于寻求产水效率、能耗与污染控制之间的理想兼顾点，达成系统的长期稳定运行。

6 膜污染防治策略

6.1 综合防治方案

有效的膜污染控制必须采取多层次、一体化的综合防治策略，遵循“预防为主，防治结合”的原则。一个完整的综合方案通常涵盖以下几个层面：首先要改良预处理工艺以从源头缩减污染负荷，然后经由选择抗污染膜之类的膜材料并改良系统设计（比如流道设计）来加强系统的固有抗污染能力，还要创建依靠即时检测和判断的智能化运作经营平台，做到对运作参数的精确控制以及清洗的精准启动^[8]。也要制订完备的化学清洗和物理清洗规程。把技术手段和管理措施深入融合，才可以达成膜系统整个使用期限内的成本理想化。

6.2 新型抗污染膜

开发具备永久性或者长效抗污染性能的新型膜材料，属于解决污染问题的关键路径之一。当下的研究大多着眼于膜表面的改性，经由表面接枝聚合来添加像聚乙二醇 PEG 这种强亲水性的聚合物刷，或者聚磺基甜菜碱 PSB 这样的两性离子聚合物，从而创建起水合层屏障；塑造低表面能或者类生微纳结构的超滑表面，以此减轻污染物的粘附力；借助共价键结合抗菌纳米材料（诸如纳米银、氧化石墨烯）来

阻止生物膜的生成。而且，新型纳米复合材料膜、仿生水通道蛋白膜等也都表现出较大的潜力，它们期望达成高通量、高选择性、高抗污染性的兼顾。

6.3 技术发展趋势

未来膜污染控制技术朝着绿色、智能、高效的方向发展。在监测诊断上，朝着原位、随时、多参数融合的智能传感发展，依靠大数据、人工智能实施污染预测与警报。在清洗技术上，偏爱开发低化学药剂消耗的物理清洗加强技术（像超声波、微波辅助清洗）、绿色化学清洗剂以及电化学、催化氧化等新的清洗原理。在膜材料方面，高性能、低成本、长寿命的抗污染膜依旧是研发重点。也要重视膜的可持续性及其退役后的可回收性^[9]。系统运行管理会更多地依靠数字孪生技术和智能算法，做到从被动应对向积极预测、自动适应改良的转变。

7 结语

膜污染成为限制反渗透海水淡化技术发展的关键难点，有效地控制膜污染对于保障该系统经济高效地运行十分关键。日后的研究要着眼于研发既能高效分离又能长效抗污的新式膜材料，并更新低能耗、对化学药剂依赖程度低的绿色清洗和预处理技术^[10]。深入融合智能检测、大数据分析以及先进的控制算法，创建起膜污染预测性守护和智能化运作的平台，这是从被动防治向积极精确调节转变的必然走向。经由多学科相互交融、技术加以整合，很可能会冲破当前的限制，突出优化海水淡化技术的可靠性、经济性及其可持续性，为应对全球水资源短缺提供更强大的技术支撑。

参考文献

- [1] 刘思雨,明红霞,任恺佳,等.辽宁某海水淡化系统反渗透膜污染成因分析[J].膜科学与技术,2024,44(03):89-96.
- [2] 王琦.膜式加湿-除湿海水淡化过程中抗凝胶污染膜制备及其作用机理的分子动力学模拟[D].华南理工大学,2023.
- [3] 张桃.用于海水淡化加湿过程的MXene耐污染、自修复膜的制备与性能调控[D].华南理工大学,2023.
- [4] 徐小梅.我国科学家发明超快海水淡化膜, 能实现高通水量, 具有抗污染能力[J].水处理技术,2022,48(06):97.
- [5] 刘舒悦.正渗透同步处理城市污水和海水淡化浓水过程中膜污染特性与控制研究[D].江南大学,2022.
- [6] 赵泞.基于污染源识别的海水淡化预处理工艺筛选评估系统研究[D].哈尔滨工业大学,2021.
- [7] 赵佳旭.三维大孔复合结构的构建及其太阳能海水淡化特性研究[D].中国矿业大学,2021.
- [8] 苏倩文.用于海水淡化的超疏水耐污染透湿膜的制备与性能调控[D].华南理工大学,2020.
- [9] 刘长青,杨兴涛,李珂,等.海水淡化工艺中超滤膜的污染与清洗[J].资源节约与环保,2020,(01):89-91.
- [10] 胡顺利.利用可再生能力源的反渗透淡化污染[J].中国金属通报, 2019,(12):109-110.