

脱盐水制备工艺中膜污染控制的经济方案探讨

李昊泽 (陕西延长石油(集团)有限公司油田气化工科技公司, 陕西 延安 716000)

摘要: 脱盐水在工业生产中应用广泛, 膜技术因高效、节能等优势成为脱盐水制备的核心工艺, 但膜污染问题严重影响系统运行效率与成本。本文首先分析脱盐水制备工艺中膜污染的主要类型(无机污染、有机污染、生物污染)及成因, 随后从预处理优化、膜清洗策略改进、膜材料合理选择、运行参数调控四个维度, 设计兼顾污染控制效果与经济性的方案。通过某火电厂脱盐水制备系统的案例验证, 所提经济方案可使膜更换周期延长 33.3%, 年运行成本降低 28.75%, 为工业脱盐水制备工艺中膜污染控制的经济性提升提供实践参考。

关键词: 脱盐水制备; 膜污染; 经济方案; 预处理; 膜清洗

中图分类号: TE **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 012-0070-03

Discussion on Economic Solutions for Membrane Fouling Control in the Desalted Water Preparation Process

LI Haoze (Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd. Oilfield Gas Chemical Technology Company, Yan'an Shaanxi 716000, China)

Abstract: Desalted water is widely used in industrial production. Membrane technology has become the core process for desalted water preparation due to its advantages such as high efficiency and energy conservation. However, membrane fouling seriously affects the operational efficiency and cost of the system. This paper first analyzes the main types of membrane fouling (inorganic fouling, organic fouling, biological fouling) and their causes in the desalted water preparation process. Then, from four dimensions—pretreatment optimization, membrane cleaning strategy improvement, rational selection of membrane materials, and operation parameter regulation—it designs schemes that balance fouling control effectiveness and economy. Verified by a case study of a desalted water preparation system in a thermal power plant, the proposed economic schemes can extend the membrane replacement cycle by 33.3% and reduce the annual operating cost by 28.75%, providing practical references for improving the economy of membrane fouling control in the industrial desalted water preparation process.

Keywords: Desalted Water Preparation; Membrane Fouling; Economic Solutions; Pretreatment; Membrane Cleaning

随着工业用水需求的不断增长及环保要求的日益严格, 脱盐水作为锅炉补水、电子工业用水等关键领域的核心水源, 其制备工艺的稳定性与经济性备受关注^[1-2]。膜分离技术(如反渗透 RO、超滤 UF)凭借分离效率高、占地面积小、无化学药剂二次污染等特点, 已逐步取代传统离子交换法, 成为脱盐水制备的主流工艺^[3]。然而, 在长期运行过程中, 原水中的无机离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SiO_2)、有机物质(如腐殖酸、蛋白质)及微生物会在膜表面或膜孔内沉积、吸附, 形成膜污染^[4]。膜污染会导致膜通量下降、操作压力升高、产水水质恶化, 不仅增加膜更换频率与能耗, 还会提高系统运行成本, 制约膜技术在脱盐水制备中

的进一步推广^[5]。

目前, 国内外关于膜污染控制的研究多聚焦于污染机理分析与高效控制技术开发, 但较少从经济性角度整合优化方案。因此, 本文结合脱盐水制备工艺的实际运行特点, 在明确膜污染类型与成因的基础上, 设计低成本、易操作的污染控制经济方案, 并通过工业案例验证方案的可行性, 为企业降低脱盐水制备成本、提升工艺经济性提供理论与实践支持。

1 脱盐水制备工艺中膜污染的类型与成因

1.1 主要污染类型

脱盐水制备工艺中, 膜污染根据污染物性质可分为三类, 其具体特征与危害如表 1 所示。实际运行中,

表 1 膜污染的分类及其危害

污染类型	污染物来源	核心危害
无机污染	原水中的 CaCO_3 、 CaSO_4 、 BaSO_4 、 SiO_2 等难溶盐	形成坚硬垢层, 堵塞膜孔, 导致膜通量不可逆下降
有机污染	原水中的腐殖酸、富里酸、油脂、合成有机物	在膜表面形成吸附层, 增加膜阻力, 降低分离效率
生物污染	原水中的细菌、真菌、藻类及其代谢产物	形成生物膜, 分泌粘性物质, 加剧有机与无机污染协同作用

三类污染常协同发生（如生物膜可吸附有机物，进而促进无机垢沉积），导致污染控制难度增加。

1.2 污染成因分析

膜污染的形成是原水水质、膜特性与运行条件共同作用的结果，具体成因如下：

1.2.1 原水水质因素

原水水质是核心诱因，不同水源风险差异显著。地下水或井水硬度高（ $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} > 300\text{mg/L}$ ），易形成 CaCO_3 、 CaSO_4 垢，某火电厂数据显示，此类原水运行 3 个月，RO 膜无机垢厚度达 5–8 μm ，通量降 40%；地表水或市政污水回用中，天然有机物（ $\text{COD} > 5\text{mg/L}$ ）易通过范德华力吸附膜表面；工业废水回用含油量 $> 5\text{mg/L}$ 时，油脂会阻断膜水通道。此外，原水微生物 $> 100\text{CFU/mL}$ 或预处理反冲洗不彻底，易加速生物膜形成。

1.2.2 膜特性因素

膜材料与结构直接影响污染吸附效率。传统醋酸纤维素（CA）膜亲水性差（接触角 $> 70^\circ$ ），有机物吸附率 35%；聚偏氟乙烯（PVDF）膜经亲水改性后，接触角 $< 30^\circ$ ，吸附率降 60% 以上。膜孔径偏差超 20% 时，大孔径区成污染“热点”；表面粗糙度 $R_a > 10\text{nm}$ ，易使污染物在凹坑累积。耐化学性差的膜（如 CA 膜）限制清洗药剂选择，易残留污染。

1.2.3 运行条件因素

不合理运行参数加速污染。操作压力超额定值 10%，污染物迁移速率升 25%，且污染层更致密；进水温度 $< 15^\circ\text{C}$ ， CaCO_3 溶解度降 20%–30%，结垢风险升高； $> 35^\circ\text{C}$ 则微生物繁殖周期减半，生物污染加剧。进水流量 $<$ 额定值 80%，浓差极化系数 > 1.5 ，污染物富集加速；回收率 $> 85\%$ ，浓水侧盐浓度超 20g/L，易结垢。

2 膜污染控制的经济方案设计

膜污染控制需在“有效控污”与“成本节约”间寻求平衡，本文从预处理、膜清洗、膜材料选择、运行参数调控四个关键环节设计经济方案。

2.1 预处理优化：降低污染负荷，减少药剂成本

预处理的核心目标是去除原水中的悬浮颗粒、有机物、微生物及部分易结垢离子，降低膜污染风险。传统预处理工艺（如多介质过滤 + 活性炭吸附 + 保安过滤）存在药剂投加大、运行成本高的问题，优化方案如下：

2.1.1 药剂替代与投加量控制

采用聚合氯化铝（PAC）替代高价的聚丙烯酰胺（PAM），PAC 对悬浮颗粒的絮凝效果好，且单价仅为 PAM 的 1/3；通过正交实验确定 PAC 最优投加量（原

水浊度 $< 5\text{NTU}$ 时，投加量控制在 2–3mg/L），避免过量投加导致的膜堵塞。

2.1.2 新型预处理技术引入

对于高有机物原水（ $\text{COD} > 8\text{mg/L}$ ），增设低压超滤（UF）预处理单元，UF 对有机物的去除率可达 60%–80%，且可减少后续 RO 膜的污染；采用“多介质过滤 + UF + 保安过滤”组合工艺，相比传统工艺，可使 RO 膜污染周期延长 25%，年药剂成本降低 20%。

2.2 膜清洗策略改进：延长膜寿命，降低清洗成本

膜清洗分为在线清洗（CIP）与离线清洗，传统清洗策略存在“过度清洗”或“清洗不及时”的问题，导致膜损伤或污染累积。经济清洗方案如下：

2.2.1 清洗周期动态调整

通过实时监测膜通量下降率（当通量下降 15%–20% 时）或操作压力升高率（当压力升高 10%–15% 时），启动在线清洗，避免过早清洗导致的药剂浪费，或过晚清洗导致的膜不可逆污染。

2.2.2 清洗药剂优化配比

针对无机污染，采用 1%–2% 的柠檬酸溶液（ $\text{pH}=2-3$ ）替代高价的盐酸，柠檬酸对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的螯合效果好，且对膜的腐蚀性低；针对有机污染，采用 0.5%–1% 的 NaOH 溶液（ $\text{pH}=11-12$ ）与 0.1%–0.2% 的次氯酸钠溶液复配，复配药剂对有机物的去除率可达 90% 以上，且药剂成本降低 30%；针对生物污染，采用 0.2%–0.3% 的过氧化氢溶液，相比传统的甲醛，安全性高且成本低。

2.2.3 离线清洗频次控制

仅当在线清洗后膜通量恢复率 $< 80\%$ 时，才进行离线清洗，离线清洗成本较高（约为在线清洗的 5–8 倍），减少离线清洗频次可显著降低成本。

2.3 膜材料合理选择：兼顾耐污染性与初期投资

膜材料的耐污染性直接影响膜更换周期与运行成本，传统膜材料（如醋酸纤维素膜）耐污染性差，膜更换周期短（通常 1–2 年），增加了初期投资与更换成本。经济膜材料选择方案如下：

2.3.1 优先选择耐污染膜材料

采用聚偏氟乙烯（PVDF）或全氟磺酸树脂（PFSA）材质的膜，PVDF 膜具有良好的亲水性与耐化学腐蚀性，对有机物的吸附率低，膜更换周期可达 3–4 年；PFSA 膜对无机离子的抗结垢能力强，适合高硬度原水（硬度 $> 500\text{mg/L}$ ），虽初期投资比传统膜高 15%–20%，但年平均成本（含更换成本）降低 25%。

2.3.2 膜组件规格匹配

根据脱盐水产量需求，选择合适的膜组件规格（如

8英寸RO膜元件),避免“大马拉小车”导致的能耗浪费;采用错流过滤型膜组件,相比死端过滤型,可减少污染物在膜表面的沉积,降低清洗频率。

2.4 运行参数调控:优化操作条件,降低能耗成本

运行参数(如操作压力、进水温度、流量)的合理调控可减少膜污染,同时降低能耗。经济运行参数方案如下:

2.4.1 操作压力优化

根据膜额定压力(如RO膜额定压力为1.5-2.0MPa),将操作压力控制在额定压力的80%-90%,避免过高压力导致的污染物迁移加速;当膜通量下降时,通过适当提高压力(不超过额定压力)恢复通量,而非直接更换膜。

2.4.2 进水温度控制

将进水温度控制在20-25℃,此温度下膜的渗透性能最佳,且盐类溶解度高,可减少无机结垢;采用余热加热(如利用电厂蒸汽冷凝水余热),相比电加热,年能耗成本降低40%。

2.4.3 流量与回收率调控

将进水流量控制在膜组件额定流量的90%-100%,保证膜表面的错流速度,减少浓差极化;脱盐水回收率控制在75%-80%,过高回收率会导致浓水侧盐浓度升高,增加结垢风险,过低回收率则会导致产水率下降,浪费原水。

3 案例验证

3.1 案例背景

某火电厂脱盐水制备系统采用“多介质过滤+活性炭吸附+保安过滤+RO”工艺,原水为地下水(硬度350mg/L, COD=6.5mg/L,微生物总数120CFU/mL),产水规模为100m³/h。

系统运行过程中,RO膜通量下降比较快,平均每6个月需要进行一次离线清洗,每年更换20%的RO膜元件,年运行成本(含药剂、能耗、膜更换)约80万元。

3.2 经济方案实施

根据本文设计的经济方案,对该系统进行改造:

3.2.1 预处理优化

将“多介质过滤+活性炭吸附”改为“多介质过滤+UF+保安过滤”,PAC投加量控制在2.5mg/L。

3.2.2 膜清洗策略调整

当膜通量下降18%时启动在线清洗,无机污染采用1.5%柠檬酸溶液,有机污染采用0.8%NaOH与0.15%次氯酸钠复配溶液。

3.2.3 膜材料更换

将传统醋酸纤维素RO膜更换为PVDF材质RO膜。

3.2.4 运行参数调控

操作压力控制在1.6MPa(额定压力1.8MPa),进水温度通过余热加热控制在22℃,进水流量控制在额定流量的95%,回收率控制在78%。

3.3 实施效果

方案实施后,系统运行6个月的效果如下:

①污染控制效果:RO膜通量下降率从25%降至12%,操作压力升高率从18%降至8%,产水水质(电导率<5μS/cm)稳定达标。

②经济性提升:膜更换周期从1.5年延长至2年,膜离线清洗周期从6个月延长至12个月,年膜更换成本从25万元降至15万元;年药剂成本从18万元降至12万元;年能耗成本从37万元降至30万元;总年运行成本从80万元降至57万元,降低28.75%。

4 结论

本文针对脱盐水制备工艺中膜污染控制的经济性问题,通过分析膜污染类型与成因,从预处理优化、膜清洗策略改进、膜材料选择、运行参数调控四个维度设计经济方案,并经某火电厂案例验证得出以下结论:

①预处理优化(药剂替代+新型技术引入)可有效降低膜污染负荷,减少药剂成本。

②动态调整清洗周期与优化清洗药剂配比,可延长膜寿命,降低清洗成本。

③选择耐污染膜材料(如PVDF、PFSA),虽初期投资略有增加,但长期运行成本显著降低。

④合理调控运行参数(操作压力、温度、流量),可减少膜污染,降低能耗成本。

⑤所提经济方案可使该火电厂脱盐水制备系统年运行成本降低28.75%,膜更换周期延长33.3%,具有良好的经济性与实用性。

参考文献:

- [1] 李扬,王晓平.双膜处理装置膜污染原因分析及对策[J].大氮肥,2019,42(05):357-360.
- [2] 许建华,王小英,贺旺盛.煤化工脱盐水膜污染的研究与应用[J].山西化工,2024,44(4):155-157.
- [3] 李圣君.脱盐水处理反渗透系统工艺操作的优化与改进[J].化肥设计,2010,48(03):50+52.
- [4] 周利,樊文斌,张云,等.反渗透膜的污染及清洗技术的研究进展[J].中国洗涤用品工业,2025(5):56-63.
- [5] 余宏微.反渗透膜污染类型分析及清洗技术研究[J].清洗世界,2024,40(12):18-20.

作者简介:

李昊泽(1996-)男,汉,陕西延川人,大学本科,助理工程师,研究方向:脱盐水处理。