

煤矿高盐水中反渗透膜化学清洗顺序的优化研究

蔡蒙蒙

兖矿能源集团股份有限公司南屯煤矿, 山东 济宁

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月28日; 发布日期: 2026年8月5日

摘 要

对于煤矿井下高盐水处理系统中反渗透膜复合型污染的清洗问题, 比较传统(碱洗-酸洗)以及优化(酸洗-碱洗-酸洗)这两种不同清洗方式对膜的影响。选取南屯煤矿水处理膜浓缩系统中一级反渗透(RO)系统, 采用上述两种方式清洗, 观察其清洗前后膜回收率、段间压差及产水量变化情况。结果显示, 采用优化方式清洗后一级RO系统回收率达到设计要求, 明显高于传统方式。结合煤矿高盐水中硬度大、有机物含量高的实际情况, 探讨改进顺序清洗原理: 先用酸洗去除无机垢层, 便于碱洗去除有机物, 然后第二次酸洗去除剩余碱液并且避免再次形成垢层。这种方法大大延长了膜清洗时间间隔, 可供类似高盐水处理工程参考借鉴。

关键词

煤矿高盐水, 反渗透膜, 化学清洗, 酸洗-碱洗-酸洗, 膜回收率

A Study on Optimization of Chemical Cleaning Procedures for Reverse Osmosis Membranes in High-Salinity Coal Mine Water

Mengmeng Cai

Nantun Coal Mine, Yankuang Energy Group Company Limited, Jining Shandong

Received: June 29, 2026; accepted: July 28, 2026; published: August 5, 2026

Abstract

To address the issue of cleaning composite fouling on reverse osmosis (RO) membranes in

underground coal mine high-salinity water treatment systems, this study compared the effects of two different cleaning methods—the traditional method (alkali wash–acid wash) and the optimized method (acid wash–alkali wash–acid wash)—on the membranes. The first-stage RO system in the water treatment membrane concentration system at the Nantun Coal Mine was selected for testing. Both methods were applied, and changes in membrane recovery rate, inter-stage pressure difference, and water production were observed before and after cleaning. The results showed that after cleaning using the optimized method, the recovery rate of the first-stage RO system met design requirements and was significantly higher than that achieved with the traditional method. Taking into account the high hardness and organic content typical of high-salinity water in coal mines, this study explores an improved sequential cleaning principle: first, acid washing is used to remove inorganic scale, facilitating the removal of organic matter during alkali washing; then, a second acid wash removes residual alkali solution and prevents the reformation of scale. This method significantly extends the intervals between membrane cleanings and can serve as a reference for similar high-salinity water treatment projects.

Keywords

High-Salinity Coal Mine Water, RO Membrane, Chemical Cleaning, Acid Cleaning-Alkaline Cleaning-Acid Cleaning, Membrane Recovery Rate

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国煤矿矿井水资源化利用率不断提高,反渗透技术已经成为高矿化度矿井水深度处理的重要手段[1][2]。但是由于矿井水中含有大量杂质,硬度较高、有机物含量高、铁锰等金属离子浓度较大等原因容易引起反渗透膜上无机垢、有机物以及微生物三者同时存在并且相互影响的复合型污染问题,大大增加了膜清洗的工作量[3][4]。反渗透装置长期连续工作后,由于污染而导致产水量下降、各段之间压降增大、除盐率下降甚至部分膜组件过早损坏[5][6]。所以定期对膜进行化学清洗是维持整个膜系统正常运转必须的步骤[7]。

化学清洗效果受到清洗剂类型、浓度、温度、循环等因素的影响,在诸多影响因素中,清洗顺序对清洗效果起着决定性作用[8]。酸洗主要用于去除无机盐垢(碳酸钙、硫酸钙、铁锰氧化物等),而碱洗主要用于去除有机物、生物黏泥以及微生物污染。当膜污染以无机结垢为主时,一般建议先酸后碱清洗;如果以有机物或者微生物污染为主时,则应先碱后酸清洗[9]。但是煤矿高矿化度矿井水是一种典型的无机垢-有机物-微生物混合污染,传统的单步骤“碱洗-酸洗”或者“酸洗-碱洗”,无法有效去除复杂污染物,清洁效果较差[10]。

近年来,针对RO膜复合污染的多步化学清洗技术受到广泛关注。研究人员在清洗顺序、药剂组合和分步策略等方面开展了大量工作。

在清洗顺序方面,现有研究尚未形成统一结论,需根据污染类型灵活确定[11]。有研究表明,当污染以无机盐结垢为主时,优先采用酸性清洗剂可有效防止后续碱洗时因pH升高导致的二次结垢[12]。针对复合污染,部分研究推荐“碱洗-酸洗-二次碱洗”的流程,认为最终碱洗有助于恢复膜孔通透性[11][12]。也有研究建议“先酸后碱”的分步策略[13]。先用酸性清洗剂溶解无机盐垢和金属氧化物,使被水垢包裹的微生物和有机粘泥充分暴露,再以碱性清洗剂清除有机污染物和生物膜。每次清洗之间要充分

冲洗,以防止不同步骤间的相互干扰[11]-[13]。

在药剂组合方面,整合剂和表面活性剂的加入可显著提升清洗效果[11]。常用的整合剂包括乙二胺四乙酸(EDTA)和柠檬酸,表面活性剂如十二烷基硫酸钠(SDS)等[14]。有研究在碱洗液中添加 Na_2EDTA 和 SDS,发现可降低污染物之间及污染物与膜之间的相互作用力,从而提高清洗效率[15]。针对有机-无机复合污染,有研究提出了“柠檬酸-EDTA”的清洗顺序,即先用柠檬酸溶解膜表面的无机污染,再以 EDTA 螯合残余无机离子并使污染层疏松,该顺序下的通量恢复率可达 95%以上,显著优于反向顺序[12] [14] [15]。在碱性清洗中,氢氧化钠常与表面活性剂联合使用以增强对有机物和生物污染的去除效果[14] [16]。

在多步清洗策略方面,大量学者针对不同污染程度和不同膜段开发了差异化方案。有研究针对双膜法再生水中深度污染的 RO 膜,根据一段和二段污堵物的组成差异,制定了一段着重酸洗(弱酸酸洗 + 弱碱碱洗 + 强酸酸洗)、二段着重碱洗(弱碱碱洗 + 强酸酸洗 + 强碱碱洗)的分段清洗方案,最后辅以杀菌剂浸泡[14] [17]。膜性能得到较好恢复。另有研究表明,复合清洗的清洗效果优于单一清洗[11] [12]。分层清洗的效果优于分段清洗。对于严重污染的膜,可采取延长循环和浸泡时间、添加剥离分散剂等措施[11]。这些做法能提高清洗效果。也有研究比较了改变酸、碱性清洗药剂顺序的效果,考察了不同水质条件下的适用性[18]。初步建立了膜清洗过程的监测指标和评价体系。

然而,上述研究多集中于市政污水、印染废水、电镀废水等领域。针对煤矿高盐水处理系统 RO 膜复合污染的化学清洗研究相对较少。煤矿高盐水有其自身特点:高硬度、高矿化度,含少量有机物和硅。膜污染机理与清洗需求与其他行业有所不同。当无机垢与有机污染同时存在时,采用何种清洗顺序效果最好,目前还缺乏系统的工程实证。

本研究依托南屯煤矿水处理中心的三级 RO 系统,结合本矿高盐水质特征,对比了传统“碱洗-酸洗”与优化“酸洗-碱洗-酸洗”两种清洗顺序的实际效果。重点分析了优化顺序的清洗机理和工程适用性,旨在为同类高盐水处理系统中 RO 膜的化学清洗提供参考。

2. 工程概况与水质条件

2.1. 工艺流程

南屯煤矿水处理中心设计处理能力为 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$,采用“三级预处理 + 三级 RO 膜浓缩”处理工艺。一级 RO 系统是该工艺的核心浓缩单元,承担主要脱盐任务。

2.2. 一级 RO 系统配置

一级 RO 系统共计两组(A 组和 B 组),每组配备膜元件 126 支,排列方式为一级二段(14:7),设计处理水量为单组 $120 \text{ m}^3/\text{h}$,设计回收率为 70%,设计脱盐率为 98.5%。

2.3. 进水水质特征

一级 RO 进水为超滤(UF)系统产水,进水含有微生物且含有大量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SiO_2 等结垢性离子,这种水质条件容易导致膜表面结垢及有机物复合污染。进水指标如表 1 所示。

Table 1. Influent index range of primary RO system

表 1. 一级 RO 系统进水指标范围

序号	进水指标	指标范围	单位	序号	进水指标	指标范围	单位
1	pH	6.5~8	-	7	铁	0.02	mg/L
2	电导率	3500~4500	us/cm	8	浊度	<1	NTU

续表

3	COD	<10	mg/L	9	SiO ₂	15~18	mg/L
4	总硬度	700~800	mg/L	10	TDS	2900~3200	mg/L
5	钙硬度	180~200	mg/L	11	碱度	200~250	mg/L
6	镁硬度	65~75	mg/L	12	SO ₄ ²⁻	1650~2200	mg/L

3. 实验材料与方法

3.1. 污染判断与清洗时机

当一级 RO 系统标准化产水量下降 10%~15%，或进水与浓水间标准化压差上升 15%以上时，启动化学清洗程序。

3.2. 清洗药剂与配方

碱洗配方：加入 NaOH 和反渗透专用碱性清洗剂，pH 控制在 11~12 (针对有机物、微生物和胶体)。

酸洗配方：加入反渗透专用酸性清洗剂，pH 控制在 2~3 (针对钙镁垢)。

清洗液配制用水采用 RO 产水，药剂均为工业级，浓度根据膜厂家推荐和现场小试确定。清洗温度控制在 30~35℃，操作压力 0.2~0.3 MPa。

3.3. 清洗方案

3.3.1. 传统模式(碱洗 - 酸洗)

步骤一：碱洗。将碱洗药剂注入一级 RO 系统，pH 稳定后循环 40 min，浸泡 40 min，共计循环 3 次、浸泡 2 次。碱洗结束后用 RO 产水将 RO 系统冲洗至出水 pH 中性。

步骤二：酸洗。将酸洗药剂注入一级 RO 系统，pH 稳定后循环 20 min，浸泡 20 min，共计循环 3 次、浸泡 2 次。酸洗结束后用 RO 产水将 RO 系统冲洗至出水 pH 中性。

3.3.2. 优化模式(酸洗 - 碱洗 - 酸洗)

步骤一：首次酸洗。循环 30~45 min (根据现场循环药液状况决定)，浸泡 40 min，共计循环 3 次、浸泡 2 次，重点溶解膜表面无机垢层。结束后彻底冲洗。

步骤二：碱洗。循环 40 min，浸泡 40 min，共计循环 3 次、浸泡 2 次，清除首次酸洗后暴露的有机物和生物粘泥。结束后彻底冲洗至 pH 中性。

步骤三：二次酸洗。循环 40 min，浸泡 40 min，目的为中和残余碱液、去除碱洗过程中可能形成的二次无机微垢。结束后用 RO 产水充分冲洗。

3.4. 评价指标

针对化学清洗效果的评价指标如表 2 所示。

Table 2. Evaluation indicators of chemical cleaning under two modes
表 2. 两种模式药洗评价指标

序号	指标名称	序号	指标名称
1	系统回收率	3	清洗周期
2	段间压差(Δp)	4	清洗药剂成本

其中，系统回收率为本次研究的核心评价指标，计算方式如(1)所示。

$$\text{系统回收率} = \frac{\text{产水量}}{\text{进水量}} \times 100\%$$

(1)

4. 结果分析

4.1. 两种清洗模式的清洗效果对比

4.1.1. 回收率恢复情况

将两种药洗模式下，一级 RO 系统(A 和 B 两组)药洗前后 3 天回收率进行对比分析，结果如所表 3 和图 1 所示。

Table 3. System performance metrics for the two medicated wash modes
表 3. 两种药洗模式系统运行指标

清洗模式	膜柱组别	清洗前平均回收率	清洗后平均回收率	回收率提升	是否达到 70%
传统模式	A	60.47%	62.65%	2.18%	否
	B	68.19%	68.01%	-0.18%	否
优化模式	A	62.62%	63.70%	1.07%	否
	B	69.48%	70.05%	0.57%	是

其中，传统模式：碱洗 - 酸洗模式，优化模式：酸洗 - 碱洗 - 酸洗模式；A：一级 RO 系统 A 组，B：一级 RO 系统 B 组。

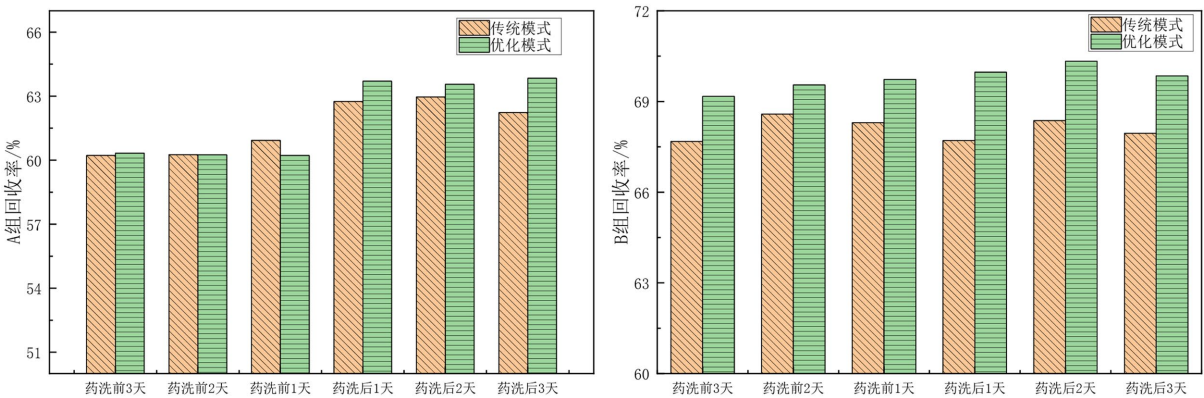


Figure 1. Comparison of recovery rate before and after chemical cleaning under two modes
图 1. 两种模式化学清洗前后回收率对比

从表 3 和图 1 数据可以得出：

A 组清洗后回收率为 62.65%。比清洗前提高了 2.18%。但仍远低于 70%的设计值。B 组清洗后回收率为 68.01%。比清洗前下降了 0.18%。说明传统模式基本无效。两组均未达到设计回收率。

B 组清洗后回收率达到 70.05%。超过了设计值 70%。三天实测数据分别为 70.33%、69.85%、69.97%。运行稳定。这表明优化顺序能够将膜性能恢复至初始投运状态。

A 组清洗后回收率为 63.70%。比清洗前提高了 1.07%。虽未达到设计值，但止住了下滑趋势。这说明优化模式优于传统模式。

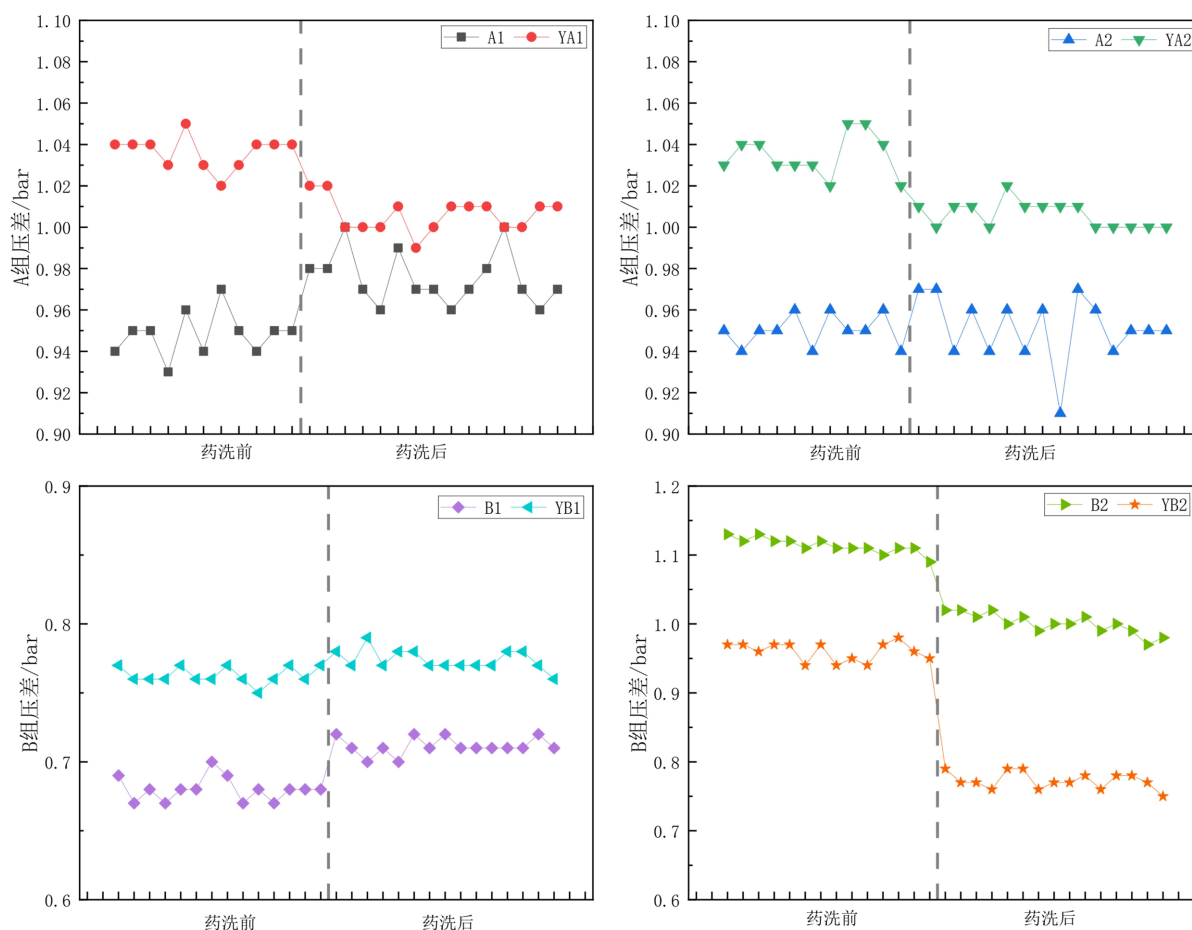
清洗前，B 组回收率为 69.48%。A 组仅为 62.63%。两者相差约 6.8 个百分点。原因可能是 A 组已发

生部分不可逆污染。但是优化模式在两组装置上均表现出正向效果。传统模式在 B 组甚至出现负效果。这进一步证明了优化模式的可靠性。

综上, 优化(酸洗 - 碱洗 - 酸洗)模式明显优于传统(碱洗 - 酸洗)模式。对于未发生不可逆污染的膜系统, 优化模式可将其回收率恢复至 70% 的设计值。该方案值得在同类煤矿高盐水处理系统中推广。

4.1.2. 段间压差与产水量变化

将两种模式下化学清洗前后一级 RO 系统运行过程中一段和二段压差进行统计, 结果如图 2 所示。



注: A1: 传统模式清洗后 A 组一段压差; A2: 传统模式清洗后 A 组二段压差; YA1: 优化模式清洗后 A 组一段压差; YA2: 优化模式清洗后 A 组二段压差; B1: 传统模式清洗后 B 组一段压差; B2: 传统模式清洗后 B 组二段压差; YB1: 优化模式清洗后 B 组一段压差; YB2: 优化模式清洗后 B 组二段压差。

Figure 2. Differential pressure changes before and after chemical cleaning in two modes

图 2. 两种模式化学清洗前后压差变化

由图 2 可知:

传统模式下, A 组一段压差从 0.95 bar 左右升至 0.98 bar 左右。不降反升。二段压差基本不变。说明清洗没有改善 A 组系统运行状况, 反而可能加重了一段污染。优化模式下, A 组一段压差从 1.04 bar 左右降至 1.00 bar 左右。二段压差从 1.03 bar 左右降至 1.00 bar 左右。降幅虽然不大, 但压差更加稳定。

传统模式下, B 组二段压差从 1.12 bar 降至 1.00 bar 左右。降幅约 0.12 bar。有一定效果。但回收率数据(图 1)显示, B 组回收率从 68.19% 降至 68.01%。这说明压差下降并未带来产水量的提升。可能的原

因是：清洗只去除了部分松散垢层，但膜孔仍被堵塞。或者清洗造成了膜面的二次污染。优化模式下，B组一段压差变化不大。清洗前为 0.76 bar 左右，清洗后为 0.77 bar 左右。压差变化基本持平。但二段压差下降非常明显。清洗前为 0.96~0.97 bar，清洗后降至 0.76~0.79 bar。降幅约 0.18 bar。这说明二段污染被有效清除。而且 B 组二段压差的大幅下降，与回收率恢复至 70%相吻合。这表明优化模式重点清除了二段的无机垢和有机物复合污染。

优化模式对 B 组二段压差的降幅(0.18 bar)大于传统模式(0.12 bar)。而且优化模式在降低压差的同时，回收率同步提升。传统模式虽然也降低了压差，但回收率反而下降。这进一步证明优化模式的清洗更彻底、更有效。

4.2. 清洗机理分析

4.2.1. 煤矿高盐水的污染特性分析

根据一级 RO 系统进水水质指标分析(表 1)，一级 RO 系统进水具有硬度高(总硬 700~800 mg/L)以及 SO_4^{2-} 浓度高(1650~2200 mg/L)等特点。在 RO 浓缩过程中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 会与 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 结合，从而在膜表面形成碳酸钙垢和硫酸钙垢，尤其是二段浓水侧，结垢倾向更明显。从 COD 浓度来看，来水中含有一定量的有机物，且矿井水中含有少量的腐殖酸、油脂及微生物代谢产物。这些有机物可与无机离子结合，形成复合污染层。

由此可知，一级 RO 膜的主要污染物为钙镁垢和有机物的复合体。部分区域存在硅垢风险。这种复合污染的特点是：无机垢包裹或覆盖在有机层表面，形成致密的污染层。单一顺序的化学清洗难以将其彻底剥离。因此，需要一种能够分层去除复合污染的清洗策略。

4.2.2. 优化顺序(酸 - 碱 - 酸)的机理优势

第一阶段是酸洗去除无机垢层。先进行酸洗可以溶解附着在膜上或者包覆在外层有机物上的坚硬无机垢层，这样有利于之后碱洗对有机物更好地作用。

第二阶段碱洗去除有机物。无机垢层除去之后，碱洗能有效去除有机大分子以及生物粘泥等。碱液可以皂化油脂、水解有机高分子物质，破坏生物膜。

第三阶段酸洗可以：① 中和碱洗后系统内残余碱液，避免碱液与随后进入系统的离子生成金属硅酸盐；② 去除碱洗过程中产生的二次无机微垢；③ 将膜系统环境调至弱酸性，利于膜孔充分扩张以及产水量提升。三次清洗之间均用 RO 产水彻底冲洗，以免各阶段清洗之间发生影响。

4.2.3. 传统模式(碱 - 酸)的不足分析

如果先碱洗，在较高 pH 条件下，有可能有部分无机盐类变成更难去除的氢氧化物(例如镁离子形成氢氧化镁)，反而造成堵塞；另外，碱洗之后的一小部分有机物以及微生物尸体可能会发生变性而固化，使得后续酸洗更加困难。

4.3. 清洗效果对系统运行的影响

4.3.1. 清洗周期

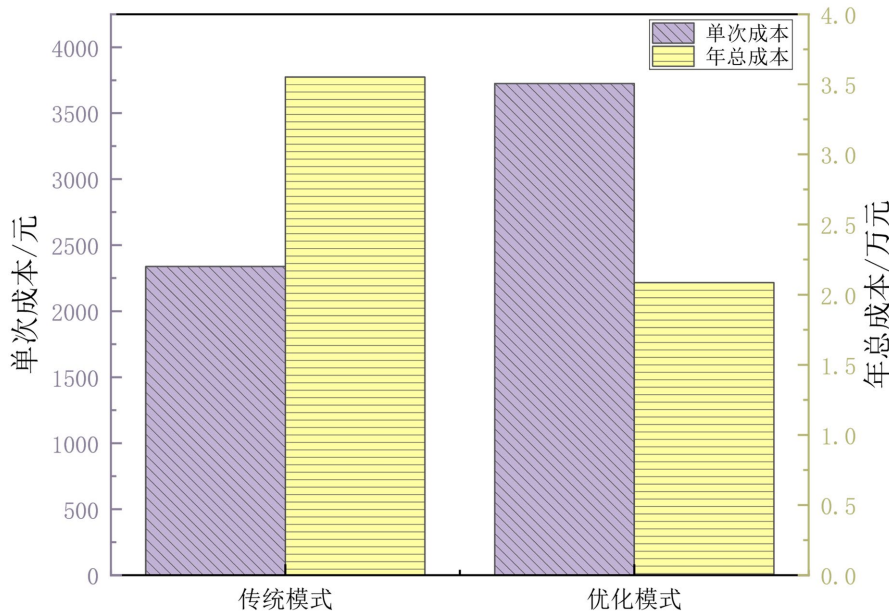
经过统计，在来水水质不发生巨变的条件下，传统模式的清洗周期为 20~28 d/次，而优化模式的清洗周期为 60~70 d/次。传统模式单组 15.2 次/年、优化模式单组 5.6 次/年(年清洗次数按清洗周期中间值计算，即传统 24 天/次，优化 65 天/次)。通过优化模式进行化学清洗，清洗频率降低，运行时间延长。

4.3.2. 膜寿命预期

优化模式清洗后回收率完全恢复，段间压差稳定，减少了不可逆污染积累，预期可延长膜使用寿命。

4.3.3. 清洗药剂成本

由图 3 可知，传统模式单次单组药剂清洗费用为 2338 元，优化模式单次单组清洗费用为 3726 元。单次单组化学清洗药剂成本优化模式相对传统模式高出约 59%。但由于清洗频率大幅下降，年总清洗药剂成本呈下降状态。传统模式年费用约为 3.55 万元，而优化模式年费用约为 2.09 万元。相对传统模式，优化模式(仅针对一级 RO 清洗)每年可节约清洗药剂成本 2.94 万元，降幅约 41%。由上述分析可以进一步证明，优化模式具有明显的经济优势和工程推广价值。



注：单次成本 = 单次酸性清洗剂使用成本 + 单次碱性清洗剂使用成本；年总成本 = 单次成本 × 药洗次数。

Figure 3. Cost comparison of cleaning agents for two modes

图 3. 两种模式清洗药剂成本对比

5. 结论

针对煤矿高盐水复合型污染特征，采用“酸洗 - 碱洗 - 酸洗”三级化学清洗顺序，可将一级 RO 系统的回收率恢复至初始设计值 70%，清洗效果显著优于传统“碱洗 - 酸洗”模式。

优化顺序的清洗机理是：先用酸洗去除无机垢层，暴露出内部有机物；再用碱洗有效去除有机物以及生物粘泥；最后用二次酸洗去除剩余碱液及微量细小污垢，达到“分层剥离、精准清洗”。

优化清洗工艺大大延长了膜清洗周期，节省药剂费用以及减少膜更换次数，具有很好的经济性和工程应用前景，在煤矿高盐水处理系统中 RO 膜(CaCO₃、MgCO₃等无机物及有机物复合污染)化学清洗方面具有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] 顾大钊, 李庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 11-18.

[2] 李双, 王恒. 反渗透水处理设备在工业污水处理中的应用研究[J]. 清洗世界, 2026, 42(2): 150-152.

[3] 韦文术, Jeffery Zhang, 张健恺, 等. 煤矿井下水处理反渗透膜的污染机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 103-110.

[4] 李佳鹏. 含可溶硅废水处理过程中反渗透膜污染行为及脱盐性能研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2024.

- [5] 李瞳, 徐梦兰, 赵悦, 等. 矿井水反渗透系统阻垢剂成分与阻垢机制[J]. 工程科学学报, 2024, 46(6): 1004-1011.
- [6] 刘兆峰, 郭强, 唐佳伟, 等. 二次改性高渗反渗透膜在矿井水脱盐处理中的应用及技术经济性分析[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S2): 1093-1100.
- [7] 王小强, 王煜乾, 陈哲, 等. 高盐矿井水近零排放工艺设计实例研究[J]. 给水排水, 2024, 60(2): 85-90.
- [8] 李福勤, 王丛, 郑昶州, 等. 煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 工业水处理, 2024, 44(9): 1-8.
- [9] 曹荣, 邱敏, 汪庆喜, 等. 高矿化度矿井水碟管式反渗透系统的化学清洗[J]. 能源与环境, 2025(5): 126-128.
- [10] 周洵平, 胡婕, 陈淑艳, 等. 火电厂排污水处理系统 RO 膜污染成因分析及处理[J]. 工业水处理, 2024, 44(11): 188-193.
- [11] 杨晓明. 钢铁废水处理中反渗透膜污染及清洗方法研究[J]. 技术与市场, 2024, 31(7): 85-88, 92.
- [12] 邱崇玉, 李鑫, 梁毓宏, 等. 一种结合有机阻垢剂预处理与清洗剂使用的膜清洗方法[P]. 中国专利, CN120132613A, 2025-06-13.
- [13] Liu, Z., Cao, J., Li, C. and Meng, H. (2017) A Review on Cleaning of Nanofiltration and Reverse Osmosis Membranes Used for Water Treatment. *Desalination and Water Treatment*, **87**, 27-67. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21002>
- [14] Wang, H., Wang, L., Li, E., Dai, R. and Wang, Z. (2023) Efficacies and Mechanisms of Different Cleaning Strategies for NF and RO Membranes in a Full-Scale Zero Liquid Discharge System. *Journal of Water Process Engineering*, **56**, Article 104308. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104308>
- [15] Wang, Z., Ouyang, R., Zhang, G., Wei, C., Ji, S., Li, Q., *et al.* (2026) Reverse Osmosis Membrane Cleaning Optimization from Textile Dyeing Wastewater Reuse Applications. *Membranes*, **16**, Article 29. <https://doi.org/10.3390/membranes16010029>
- [16] Ang, W.S., Tiraferri, A., Chen, K.L. and Elimelech, M. (2011) Fouling and Cleaning of RO Membranes Fouled by Mixtures of Organic Foulants Simulating Wastewater Effluent. *Journal of Membrane Science*, **376**, 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.04.020>
- [17] 汪勉, 朱新建, 胡远远, 等. 高盐废水的反渗透膜污染与膜清洗实验研究[J]. 应用化工, 2019, 48(6): 1392-1396, 1412.
- [18] 吕振华, 丁国良, 王炎锋. 一种污染的聚酰胺反渗透复合膜的修复方法[P]. 中国专利, CN116747714A, 2023-09-15.