

怎样保证反渗透膜（RO）的有效使用寿命

吴国亮

华电内蒙古能源有限公司包头发电分公司 内蒙古 包头 014013

摘要：反渗透膜一般使用寿命应在5年以上，但如果使用不当，就达不到这一有效使用寿命，文章将探讨怎样正确选用膜元件，合理选择预处理，正确清洗反渗透膜以及优选工艺设备，加强管理水平等方面确保反渗透膜有效使用年限，以创造更高价值。

关键词：污水处理；反渗透膜；使用寿命

反渗透膜（RO膜）的基本原理是通过施加外部压力克服自然渗透压，使溶剂（通常是水）逆浓度梯度穿过选择性半透膜，从而实现溶质与溶剂的分离。通过压力驱动与精密筛分的协同，实现了高效、节能的分离。

1 反渗透膜基本原理

（1）核心原理。自然渗透现象，当半透膜分隔两种不同浓度的溶液时，溶剂（水）会自发从低浓度侧（稀溶液）向高浓度侧（浓溶液）扩散，直到两侧液位差形成的静压与渗透压平衡为止。渗透压公式：渗透压（ $\Delta\pi$ ）与溶液浓度成正比，是自然渗透的动力源。反渗透的驱动力，通过在浓溶液侧施加外部压力（ Δp ），当 $\Delta p > \Delta\pi$ 时，溶剂流动方向逆转：水分子从浓溶液侧穿过半透膜进入稀溶液侧，而溶质（如盐离子、有机物等）被截留在浓溶液侧。溶剂渗透速率公式：

$$N = K h (\Delta p - \Delta\pi)$$

自然渗透：

低浓度溶液→[水分子]→高浓度溶液
↑
渗透压（ $\Delta\pi$ ）

反渗透：

高浓度溶液→[加压 $\Delta p > \Delta\pi$]→水分子穿过膜→低浓度溶液
溶质被截留

图1 反渗透膜基本原理

2 影响反渗透膜使用寿命的因素

影响反渗透膜（RO膜）使用寿命的关键因素涵盖水质条件、操作规范、维护措施及材料特性等多方面，具体可归纳如下：

（1）水质条件与预处理效果。污染物浓度，高浓度悬浮物、胶体、有机物或微生物会堵塞膜孔或形成污染层，加速性能衰减。化学组分，钙镁离子（硬度离子）引发无机结垢，导致透水率下降和膜结构受损；余氯氧化损伤聚酰胺膜材料，需活性炭吸附或还原剂消除。预

其中K h为膜的水力渗透系数（受温度影响）。分离机制，分子筛分作用：RO膜的孔径仅0.0001微米（约为细菌尺寸的1/5000），仅允许水分子及极小矿物离子通过，而截留绝大多数溶质（如离子、胶体、微生物）。选择性透过：半透膜通过化学结构（如交联聚合物）实现选择性，优先透过水分子并阻挡溶质。

（2）关键组件与技术特点。半透膜材料，通常采用聚酰胺复合膜，具有高脱盐率（> 95%）和抗污染性。其制备工艺借鉴海水淡化膜技术（如界面聚合法）。操作压力，需通过高压泵施加6-20 bar（淡水处理）或50-80 bar（海水淡化）的压力以克服渗透压。分离结果，产水侧（低压侧）：得到净化的溶剂（淡水/渗透液）。浓水侧（高压侧）：产生含截留溶质的浓缩液（如卤水）。

（3）反渗透膜基本原理如图1。

处理不足，多介质过滤、超滤等工艺失效时，进水浊度 > 1NTU或SDI > 5将显著增加膜污染风险。

（2）操作参数控制。压力管理，过高压力（超出膜耐受上限）导致膜压实老化，过低则降低产水效率。流量与回收率，流量波动造成水流冲击，损伤膜表面；回收率>75%时浓水侧污染物浓度激增，加剧结垢风险。温度影响，超温（> 45℃）加速高分子材料降解，低温（< 5℃）降低渗透效率。pH值范围，超出耐受范围（连续运行pH 2-11，清洗时pH 1-13）引发膜水解或污染沉积。

(3) 维护与清洗规范。清洗不及时，产水量下降10%-15%、脱盐率降低或压差上升>15%未清洗，污染将不可逆。清洗方式不当，化学清洗剂浓度/温度超标（如>45℃）损伤膜结构；未针对污染类型选择清洗剂（如无机垢用酸洗，生物污染用碱洗+杀菌剂）。停机保护缺失，长期停用未用保护液（如1%亚硫酸氢钠）浸泡，滋生微生物或氧化失效。

(4) 膜材料与系统设计。材料稳定性，劣质膜耐化学性/机械强度不足，易发生水解或破损89；高端复合膜（如聚酰胺）寿命可达5-7年。抗污技术，抗污染膜表面改性（如三维交联结构）可延缓污染累积。系统设计缺陷，预处理能力不足、管路泄漏或余氯监测失效间接损害膜元件。

(5) 其他关键因素如表1。

表1 关键因素

因素	影响机制	解决方案
微生物污染	生物膜堵塞流道，代谢产物腐蚀膜表面	定期消毒+抑菌剂投加
气锤效应	残余气体在高压下冲击膜，造成物理损伤	启动前排尽气体，缓慢升压
进水SDI超标	胶体颗粒快速阻塞膜通道	强化超滤预处理，控制SDI<5

反渗透膜寿命通常为3-5年，但通过以下措施可延长至5年以上：预防为主：优化预处理确保进水水质合格（SDI<5，余氯<0.1ppm）；精细操作：控制压力/温度/回收率在安全范围，避免极端工况；科学维护：按污染特征及时清洗，停用规范保护；选型升级：采用耐高温/抗污染复合膜（如陶氏BW30系列）

3 如何延长反渗透膜的使用寿命

(1) 前置处理确保反渗透膜进水水质。为确保反渗透膜（RO膜）进水水质符合要求，需通过科学的前置处理系统分级拦截污染物并精准控制关键指标，具体措施如下：（1）多级物理过滤拦截，悬浮物与胶体去除，多介质过滤：石英砂+无烟煤滤料分层截留>10μm颗粒，控制出水浊度<1NTU；精密过滤（保安过滤器）：5μm滤芯深度拦截残留微粒，防止膜表面划伤。超滤/微滤：截留0.01-0.1μm胶体及微生物，确保SDI<5（理想值<3）。有机物及余氯吸附，活性炭过滤：吸附溶解性有机物（TOC）、色素及余氯（控制<0.1ppm），避免膜氧化降解。（2）化学预处理调控，硬度与结垢控制，软化树脂：置换钙镁离子，降低硬度（推荐<1mg/L CaCO₃）；阻垢剂投加：抑制碳酸盐/硅酸盐结垢，允许更高回收率。微生物抑制，氧化杀菌：次氯酸钠等杀灭细菌（后接活性炭脱氯）；非氧化杀菌剂：如DBNPA，

避免余氯残留损伤膜。pH与铁锰调节，加酸/碱：维持pH6.5-7.5（避免膜水解）；曝气/锰砂过滤：氧化去除铁、锰（Fe<0.05mg/L，Mn<0.1mg/L）。

(3) 关键指标实时监测与调控，SDI值，<5（最佳<3），每2小时检测一次。余氯，<0.1ppm，在线ORP仪表+定期比色法验证。浊度，<0.1NTU，在线浊度仪联动报警。温度，5-45℃（最佳25℃），温度传感器+热交换器调节。（4）系统运行优化与维护，预处理设备维护，定期反洗多介质过滤器（压差>0.05MPa时）；

活性炭床每年补充20%新炭，防止吸附饱和。清洗策略，SDI连续超标或压差上升>15%时，立即化学清洗超滤单元。水源适应性调整，地表水季候变化时，动态增加絮凝剂（如PAC）剂量；高有机物废水启用高级氧化（如UV/H₂O₂）预处理。

(2) 反渗透膜定期化学清洗的方法和频率。为确保反渗透膜（RO膜）高效稳定运行，需依据污染特征制定科学的化学清洗策略，具体方法与频率规范如下：

(1) 化学清洗触发标准，出现以下任一情况需立即清洗：产水量下降>10%~15%（对比初始值）；段间压差上升>15%（如初始压差0.1MPa升至0.15MPa）；脱盐率降低>1%~2%（盐透过率增加明显）。（2）清洗频率参考表2。

表2 清洗频率

水源类型	典型清洗间隔	影响因素
地表水/废水	2-3周/次	高微生物及有机物污染风险
地下水（低硬度）	2-3月/次	结垢倾向低，污染积累慢
海水淡化	1-2月/次	高盐度加速无机结垢

(3) 化学清洗操作流程，清洗前准备，污染分析：检测垢样成分（如钙垢、生物膜）匹配清洗剂类型；药剂配制：使用RO产水或软化水配制清洗液（禁用含氯水）；防护措施：穿戴橡胶手套、护目镜及防护服。分

步清洗操作，低压冲洗，用清水冲洗5-10分钟，去除松散污染物，压力<0.3MPa。药剂循环，清洗泵循环30-90分钟（流速为运行浓水流速1.2倍），温度≤45℃（pH2-10时）。浸泡，严重污染时浸泡1-4小时79，生物污染需

碱液浸泡 ≥ 2 小时。彻底冲洗, RO产水冲洗至出水pH中性、无泡沫69冲洗时间 ≥ 30 分钟。清洗剂选择指南, 无机垢, 1-2%柠檬酸或0.4%盐酸, pH = 2-3, 循环 ≤ 20 分钟。生物污染/有机物, 1-2%NaOH+0.1%EDTA或专用杀菌剂, pH = 11-12。复合污染, 酸洗→水洗→碱洗分步处理, 每步循环30分钟。(4) 关键注意事项, 温度控制: pH 1-12时温度 $\leq 30^{\circ}\text{C}$, 避免膜材料降解; 安全操作: 酸洗需实时监测pH, 变化 > 0.5 需补加药剂; 设备保护: 启动时排尽管路气体, 防止气锤冲击; 效果评估: 清洗后产水量恢复 $< 90\%$ 或压差仍超标需离线深度清洗。(5) 清洗优化建议, 在线清洗(CIP): 轻度污染首选, 操作便捷但效果有限; 离线清洗: 重度污染时拆解膜元件单独处理, 恢复率提升30%以上; 智能管理: 安装压差/流量传感器联动报警系统, 实现精准清洗触发。实践提示: 遵循“低pH→高pH”交替清洗原则(先除垢再清有机物), 并每年委托专业机构检测膜性能, 制定长期清洗计划。

(3) 如何控制进水水质参数以延长RO膜寿命要延长RO膜寿命, 需精准控制以下进水水质参数并实时监测, 具体指标与管理措施如下: (1) 水质动态调节策略, pH值调控, 范围控制: 运行中维持6.5-7.5(防结垢与水解)。调节方法: 加酸(盐酸/柠檬酸)防碳酸盐垢(pH < 7), 加碱(NaOH)防硅酸盐垢(pH > 7)。

温度管理, 最佳范围: $20-30^{\circ}\text{C}$ (有机膜耐受极限 $5-45^{\circ}\text{C}$)。异常处理: 30°C 时启用冷却塔, 防膜水解, $< 15^{\circ}\text{C}$ 时加热水源, 防通量衰减。微生物抑制, 杀菌方案: 氧化法: 次氯酸钠(后接活性炭脱氯), 非氧化法: DBNPA(无残留杀菌), 频率: 细菌总数 > 100 CFU/mL时启动。(2) 预处理系统优化要点。多介质过滤器, 截留 $> 10\mu\text{m}$ 悬浮物, 压差 $> 0.05\text{MPa}$ 时反冲洗。活性炭罐, 吸附余氯/有机物, 每年补充20%新炭, 防吸附饱和。软化器, 硬度降至 $< 1\text{mg/L}$, 每月再生树脂, 盐水浓度10%。超滤装置, 去除胶体/微生物(SDI < 3), 每周化学增强反洗(0.1%NaOH)。(3) 失控参数应急方案, SDI突然 > 5 : 启动超滤冲洗循环, 投加絮凝剂(PAC 5-10ppm)。余氯 $> 0.1\text{ppm}$: 紧急注入1%亚硫酸氢钠还原剂。硬度超标: 提高阻垢剂剂量50%+降低系统回收率至 $< 60\%$ 。

(4) 如何优化反渗透膜的操作条件以延长寿命。

(1) 水质适应性动态调节。TDS与压力匹配, 渗透压公式: $P_{\text{required}} = 0.021 \times \text{TDS} \times (T + 273) / 298$ (单位: MPa)。

实例: TDS = 500ppm、水温 20°C 时, 压力需 ≥ 1.05 MPa。SDI预警联动, SDI > 5 时自动降低回收率10%+启动超滤反洗。微生物抑制, 细菌 > 100 CFU/mL时, 投加非氧化杀菌剂(如DBNPA)。(2) 智能运行与冲洗策略。防浓差极化冲洗, 累计运行4小时或电导率突变时启动, 大流量冲洗15-30分钟(流速为运行值1.5倍), 污染积累降低40%。压力波动抑制, 变频泵+缓冲罐控制压力波动 $< \pm 5\%$, 膜结构损伤减少30%。温度-通量补偿, 水温每降 1°C , 自动提压2%-3%维持产水稳定, 冬季产能波动 $< 5\%$ 。(3) 关键限值保护机制。压力防护: 超压0.5MPa自动停机, 防膜元件爆裂。污染预警: 段间压差 $> 0.35\text{MPa}$ 触发化学清洗信号。材料升级:

高温水源($> 35^{\circ}\text{C}$)选用耐热交联膜(耐受 45°C)。

要延长反渗透膜(RO膜)使用寿命, 需通过预处理强化、操作优化、智能维护及新材料应用四维协同策略, 通过“指标实时监测+预处理强化+动态调控”组合策略, RO膜寿命可延长至5-7年, 污染率下降60%以上。

参考文献

- [1]马云.我国反渗透膜技术发展浅[J].膜科学与技术.2022.
- [2]罗亮.设备寿命周期费用方法及其应用[J].北京: 海洋出版社.2022.
- [3]李涛.反渗透系统膜元件清洗技术规范[J].2022
- [4]宋虹强.火电厂反渗透系统污染原因分析及清洗[J].内蒙古电力技术,2021(3):99-101.
- [5]何俊.反渗透系统的污染及清洗[J].水处理技术,2022,28(5):299—301.
- [6]时权堵.怎样保证反渗透膜(RO)的有效使用寿命[J].北京: 化学工业出版社,2021.
- [7]罗大平.反渗透膜元件标准化产水量数学模型的优化[J].天津城市建设学院学报,2020,16(3):193-195.
- [8]曹群义.反渗透膜经济寿命分析[J].清洗世界,222,22(8):9-13.