

反渗透技术在工业纯水制备中的应用及问题对策

吉鸿飞

中材建设有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i6.4798

[摘要] 随着现代工业的飞速发展和对产品质量要求的日益提高,高纯度水已成为电子、制药、电力、化工等关键行业的核心生产要素。反渗透(Reverse Osmosis, RO)技术作为一种高效、节能、环保的膜分离技术,在工业纯水制备领域扮演着至关重要的角色。本文系统阐述了反渗透技术的基本原理、核心组件及其在工业纯水制备中的应用,深入剖析了其在实际运行中面临的主要问题,包括膜污染、结垢、化学降解以及系统能耗高等,并针对性地提出了涵盖预处理优化、运行参数调控、清洗维护策略及新型技术融合在内的综合对策。最后,文章展望了反渗透技术未来的发展趋势,旨在为工业纯水系统的稳定、高效、经济运行提供理论参考与实践指导。

[关键词] 反渗透; 工业纯水; 膜污染; 预处理; 系统优化

中图分类号: TQ028.8 **文献标识码:** A

Application and Problem-Solving Strategies of Reverse Osmosis Technology in Industrial Pure Water Preparation

Hongfei Ji

China National Materials and Construction Co., Ltd.

[Abstract] With the rapid development of modern industry and the increasing demand for product quality, high-purity water has become a core production factor in key industries such as electronics, pharmaceuticals, power, and chemical engineering. Reverse Osmosis (RO) technology, as an efficient, energy-saving, and environmentally friendly membrane separation technology, plays a crucial role in the field of industrial pure water preparation. This paper systematically elaborates on the fundamental principles and core components of reverse osmosis technology and its application in industrial pure water preparation. It provides an in-depth analysis of the main challenges faced during actual operation, including membrane fouling, scaling, chemical degradation, and high system energy consumption. Targeted comprehensive strategies are proposed, covering pretreatment optimization, operational parameter regulation, cleaning and maintenance strategies, and the integration of novel technologies. Finally, the article discusses future development trends of reverse osmosis technology, aiming to provide theoretical references and practical guidance for the stable, efficient, and economical operation of industrial pure water systems.

[Key words] Reverse Osmosis; Industrial Pure Water; Membrane Fouling; Pretreatment; System Optimization

引言

水是现代工业的“血液”。在半导体、制药、电力及精细化工等领域,生产用水常需达到超纯水标准,因微量杂质即可引发产品缺陷、设备腐蚀或系统效率下降。因此,高效可靠的纯水制备技术至关重要。反渗透(RO)技术自20世纪60年代商业化以来,凭借高脱盐率(>95%)、低能耗、模块化及环境友好等优势,已成为工业纯水系统的核心环节。它不仅作为离子交换的理想前置单元,显著延长树脂再生周期、减少酸碱消耗,更是高纯水制备的关键屏障。然而,RO系统在长期运行中易出现性能衰减,影响产水

质与水量,增加运营成本,甚至危及生产线连续稳定运行。

1 反渗透技术原理与系统构成

1.1 基本原理

反渗透利用半透膜选择透过性,在高于溶液渗透压的压力下,让溶剂(水)从高浓度溶液侧向低浓度溶液侧迁移,截留溶解性盐类等杂质于浓水侧,是克服自然渗透的逆过程^[1]。水分子通过RO膜分三步:膜表面吸附溶解、膜内扩散、膜另一侧解吸;溶质因尺寸、电荷及溶解-扩散差异被截留。这种物理筛分与化学排斥结合的机制,可高效实现水与杂质分离,获高纯度产水。

1.2 核心组件

工业级RO系统高度集成。预处理单元是“第一道防线”，含多介质、活性炭过滤器等，保护后续设备。高压泵是“心脏”，提供能量，也是主要能耗源。RO膜组件是核心，主流用卷式复合聚酰胺膜。高含盐量水源处理时，能量回收装置可回收浓水侧压力能。RO产水若需超纯水标准，常经后处理工艺。系统由PLC或DCS控制系统实时监控调控。

2 反渗透技术在工业纯水制备中的应用

2.1 在纯水制备工艺链中的核心定位

在典型的工业纯水制备流程中，水质的净化是一个由粗到精、逐级深化的过程。反渗透技术精准地定位于“主脱盐”这一关键阶段。完整的工艺链通常遵循“预处理→主脱盐→后精处理”的基本架构。预处理单元(如多介质过滤、活性炭吸附、软化或超滤)负责去除原水中的悬浮物、胶体、有机物、余氯及部分结垢离子，其目标是为RO膜提供符合进水水质标准(如SDI<5, 余氯<0.1ppm)的“洁净”水源，这是保障RO长期稳定运行的前提。经过预处理的水进入RO系统后，在高压驱动下，RO膜凭借其卓越的选择透过性，高效截留水中95%以上的溶解性无机盐、99%以上的有机物、胶体及微生物，产出电导率通常低于10 μ S/cm的初级纯水。这一过程完成了对原水绝大部分杂质的剥离，是整个纯水制备过程中脱盐负荷最重、技术含量最高的环节。随后的后精处理单元(如EDI或混床)则在此基础上进行“抛光”，去除RO未能完全去除的痕量离子，以满足超纯水的终极要求。因此，RO在整个链条中扮演着承上启下的核心角色：它既是预处理效果的最终检验者，又是后精处理单元的坚实保护者。

2.2 典型系统配置模式

根据对最终产水水质的不同要求，反渗透在工业纯水制备中衍生出多种系统配置模式，其中以单级RO和双级RO最为典型。单级RO系统结构相对简单，适用于对水质要求不极端苛刻的场合，如部分锅炉补给水或一般工艺用水。其工作流程为：预处理后的原水经高压泵加压后，一次性通过RO膜堆，产水直接送入后续储存或使用环节。这种模式投资成本较低，但产水水质的上限受限于单次分离的效率，且对进水水质波动较为敏感。对于电子、制药等需要超纯水(UPW)的高端领域，单级RO的产水纯度和稳定性往往难以满足要求，此时双级RO系统成为行业标准。双级RO并非简单的设备叠加，而是一种高效的梯级净化策略^[2]。第一级RO承担主要的脱盐任务，去除原水中绝大部分的离子和杂质。其产水不经过中间水箱储存，而是直接作为第二级RO的进水。由于第二级RO的进水水质极佳(已接近纯水)，其运行压力可以显著降低，同时能更彻底地去除第一级产水中残余的微量离子(特别是由HCO₃⁻转化而来的CO₂)，使得最终产水电导率可稳定降至1-5 μ S/cm，且TOC和微生物指标优异。这种配置不仅大幅提升了水质的安全裕度和系统冗余度，还因其两级协同效应，有效分散了污染负荷，延长了整个系统的清洗维护周期，显著提高了运行的可靠性和连续性。

2.3 与前后处理单元的协同作用

在与后处理单元的协同中，RO的作用尤为突出。传统离子交换工艺直接处理原水时，树脂会因高盐负荷而迅速饱和，需频繁使用强酸强碱再生，产生大量废液。而RO作为前置屏障，预先去除了95%以上的离子负荷，使得进入电去离子(EDI)模块或混床(MB)的水质变得极为“温和”。这极大地延长了EDI的连续运行时间或MB树脂的再生周期，显著降低了化学品消耗、废水排放量及人工维护成本，实现了清洁生产和绿色制造。可以说，RO与EDI/MB的组合是现代高纯水制备技术的“黄金搭档”，其协同效应是单一技术无法比拟的。在与前处理单元的协同方面，RO对进水水质的严苛要求反过来也推动了预处理技术的进步与优化。为了保护昂贵的RO膜，必须采用多级、精准的预处理方案。例如，超滤(UF)作为RO的预处理，能高效去除胶体和微生物，将SDI值稳定控制在极低水平；专用阻垢剂的投加，则允许RO系统在更高的回收率下安全运行，从而减少浓水排放，提高水资源利用率。这种“以RO为中心”的系统设计理念，确保了整个纯水制备流程各环节目标明确、分工协作，最终实现了水质、水量、能耗与成本的全局最优。

3 工业纯水制备中反渗透系统运行中的主要问题

3.1 膜污染

膜污染指悬浮物、胶体、有机物及微生物在膜表面或孔内沉积，导致通量持续下降。颗粒和胶体堵塞流道；有机物(如腐殖酸、油类)易形成凝胶层并促进复合污染；微生物则生成生物膜，其胞外聚合物(EPS)与无机物结合，形成难清洗的复合污垢，严重威胁系统稳定。

3.2 膜结垢

结垢是难溶盐(如CaCO₃、CaSO₄、BaSO₄、SiO₂)在浓水侧过饱和后结晶析出所致，多集中于末端膜元件。垢层堵塞流道，抬升压差，降低产水量。其中硅垢受pH影响大、质地坚硬，极难清除，需重点防控。

3.3 膜的化学与物理降解

聚酰胺膜对氧化剂极为敏感，微量余氯即可造成脱盐率永久下降；极端pH或高温会引发水解，破坏膜结构。此外，水锤、硬颗粒冲刷或操作不当亦可导致膜元件物理损伤，丧失分离功能。

3.4 系统能耗与回收率的矛盾

提高回收率虽利于节水减排，但会加剧浓水侧结垢与污染风险。为维持高回收率，常需强化预处理、增加药剂投加或提升运行压力，进而推高能耗与成本。如何平衡回收率、能耗与系统稳定性，是运行管理的核心难题。

4 问题对策与优化策略

4.1 强化预处理——防患于未然

“七分靠预处理，三分靠膜本身”是反渗透领域颠扑不破的真理。成功的预处理是系统长期、稳定、高效运行的根本保障。首先，必须对原水进行全面而精准的水质分析，包括SDI₁₅(污染指数)、TOC(总有机碳)、硬度、碱度、硅、铁、锰及微生物等关键指标，这是设计有效预处理方案的科学依据。在此基础上，

应构建多层次的物理屏障,例如采用盘式过滤器、超滤(UF)或微滤(MF)作为RO的前置处理。特别是UF/MF技术,能高效截留胶体、颗粒物和绝大多数微生物,将SDI值稳定控制在3以下,为RO膜提供了极其洁净的进水,尤其适用于水质复杂的地表水或市政回用水^[3]。在化学预处理方面,策略同样需要精细化。通过加酸将进水pH调节至6-7,可以将易结垢的碳酸氢根转化为溶解度更高的二氧化碳,有效预防碳酸钙垢的形成;投加专用的阻垢剂,则能通过阈值效应、晶格畸变和分散作用,抑制多种难溶盐的结晶,为系统在更高回收率下运行创造条件;投加亚硫酸氢钠等还原剂,是保护聚酰胺膜免受余氯等氧化剂侵蚀的必要措施;而定期、适量地投加非氧化性杀菌剂,则能有效控制微生物的滋生,从源头上扼杀生物污堵的隐患。

4.2 优化运行参数与系统设计

在系统投运后,科学的运行管理同样至关重要。应根据原水水质和所选阻垢剂的性能,通过严谨的计算来确定最大安全回收率,避免因过度浓缩而诱发结垢。初始运行时,适当降低设计通量,可以有效延缓污染物在膜表面的积累速率,延长清洗周期。同时,保证足够的浓水错流速度,有助于利用水流的剪切力冲刷掉刚刚开始沉积的污染物,维持膜表面的相对清洁。对于大型或复杂的系统,采用多段设计并将前段的部分浓水回流至进水端,可以均衡各段膜元件的污染负荷,避免末端膜元件过早失效。此外,在高能耗的应用场景(如海水淡化)中,投资安装能量回收装置(ERD)是一项具有长远经济效益的战略决策,它能显著降低系统的吨水电耗,提升项目的整体竞争力。

4.3 科学的清洗与维护

当预防措施无法完全阻止性能衰减时,及时、科学的化学清洗(CIP)就成为恢复膜性能的关键手段。系统在投运初期,必须建立一套完整的标准化性能基准数据,包括产水量、脱盐率和各段压差。在日常运行中,通过将实时数据与基准数据进行标准化对比,可以准确判断系统是否出现了污染或结垢。一般而言,当标准化产水量下降10-15%,或段间压差上升15%,或脱盐率出现明显下滑时,就应及时启动清洗程序^[4]。清洗方案绝非千篇一律,必须根据污染物的具体类型“对症下药”。例如,针对碳酸钙、硫酸钙等无机垢,通常采用柠檬酸或稀盐酸进行酸洗;而对于有机物和微生物污染,则需使用氢氧化钠配合表面活性剂或EDTA进行碱洗。错误的清洗药剂、浓度或流程,不仅无法恢复膜性能,

反而可能对膜造成二次伤害。因此,制定并执行一套基于监测数据的、周期性的维护性清洗计划,是实现从被动抢修到主动维护转变的重要举措。

4.4 新型技术与材料的应用

面向未来,解决RO系统现有问题的根本出路在于技术创新。在材料层面,科研人员正致力于开发新一代抗污染RO膜,通过在膜表面引入亲水性基团、增强表面负电荷或提高表面光滑度,从物理化学本质上降低污染物的吸附倾向。在工艺层面,将高级氧化技术(如臭氧-生物活性炭O₃-BAC)与RO耦合,能够更彻底地矿化分解大分子有机物,从根本上减轻RO的有机污染负荷。在管理层面,物联网(IoT)传感器、大数据分析和人工智能(AI)技术的引入,正在推动RO系统向智能化运维迈进。通过构建数字孪生模型,系统可以实时感知自身状态,预测污染发展趋势,并自动优化运行参数,最终实现预测性维护,将故障消灭在萌芽状态,最大化系统的全生命周期价值。

5 结语

反渗透技术作为工业纯水制备的基石,其重要性无可替代。通过对其基本原理的深刻理解和对运行问题的系统性剖析,我们可以认识到,RO系统的成功运行并非仅仅依赖于膜元件本身,而是一个涉及“精准预处理、科学设计、精细运行、及时维护”等多个环节的系统工程。未来,反渗透技术的发展将呈现以下趋势:一是膜材料将持续向更高通量、更高脱盐率、更强抗污染和耐久性方向演进;二是系统集成将更加智能化,借助AI和数字孪生技术实现全流程的优化控制与预测性维护;三是与其他先进技术(如正向渗透FO、石墨烯膜等)的耦合,有望突破现有RO技术的能耗和回收率瓶颈。

[参考文献]

- [1]陶东娅.纯水机反渗透膜自清洁系统的试验与设计[J].净水技术,2019,38(06):87-91.
- [2]张放,时艳,郭蛟.小型反渗透纯水制备系统工艺设计[J].工业加热,2021,50(07):16-20.
- [3]陈炳文.反渗透纯水制备系统的技术改造[J].设备管理与维修,2024,(17):182-184.
- [4]周镛.离子交换与反渗透法生产纯水工艺比较[J].皮革制作与环保科技,2021,2(05):16-17.