

高盐废水处理中反渗透膜节能降耗策略

林 源

(国家电投集团东北电力有限公司本溪热电分公司, 辽宁 本溪 117000)

摘 要 高盐废水处理是当前水资源管理领域的重要挑战, 反渗透膜技术因其高效分离能力成为解决这一问题的关键技术。然而, 高能耗问题限制了其广泛应用。本文围绕反渗透膜技术在高盐废水处理中的节能降耗策略展开研究, 探讨了膜材料优化、工艺改进及智能化控制等创新方法, 通过分析典型案例, 揭示了多级反渗透与能量回收技术的协同效应, 以及智能化控制在降低能耗方面的显著成效。研究表明, 反渗透膜技术在节能降耗方面的潜力巨大, 可为高盐废水处理的绿色化与可持续发展提供重要支持。

关键词 高盐废水; 反渗透膜技术; 节能降耗; 膜材料优化; 智能化控制

中图分类号: X75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.011.002

0 引言

反渗透膜技术是一种基于半透膜选择性分离原理的水处理技术, 能够有效去除水中的溶解性盐类、有机物和微生物, 自 20 世纪 60 年代问世以来, 反渗透膜技术在水处理领域得到了广泛应用, 特别是在海水淡化和工业废水处理中表现突出。其核心优势在于高效分离、操作简便且无需添加化学药剂, 能够显著降低二次污染风险。近年来, 随着膜材料科学和工艺技术的进步, 反渗透膜技术在高盐废水处理中的应用前景愈发广阔。

1 高盐废水及反渗透膜技术的原理与现状

1.1 高盐废水处理相关研究

高盐废水的处理与资源化是当前工业环保领域的关键问题。其成分复杂、处理难度大, 传统方法难以满足环保要求。近年来, 随着技术发展, 相关研究不断涌现, 为高盐废水的高效处理提供了新思路。

有色金属行业产生的含油高盐废水成分复杂, 处理难度大。黄松宇和于淼研究了资源化处理技术, 提出通过分离与深度处理, 可实现油分和盐分的去除及资源回收, 为行业可持续发展提供了新思路^[1]。焦化高盐废水的处理与回用是行业难题。田颖等提出集成多种工艺的处理方案, 实现废水达标排放与回用, 同时探索废盐资源化技术, 推动焦化行业绿色发展^[2]。不锈钢冷轧高氮高盐废水处理要求高。贾庆林等研究并应用了集成技术, 有效去除氮化物和盐分, 降低了废水的 COD 和氨氮含量, 为行业技术进步提供了经验^[3]。煤化工高盐废水处理技术的选择至关重要。王二成通

过比选不同方案, 分析了各技术的优缺点及适用条件, 为煤化工企业提供了科学合理的处理技术选择建议^[4]。膜技术在高盐废水处理中应用广泛。白玥萌和李环宇综述了膜技术的研究进展, 指出其在深度处理和资源回收方面优势明显, 但也面临膜污染和成本高等挑战, 未来需进一步优化^[5]。

1.2 反渗透膜技术的基本原理: 水与盐的“分道扬镳”

反渗透膜技术的核心原理是利用半透膜的选择性分离作用, 在外加压力驱动下实现水与溶解性盐类的分离。半透膜是一种具有纳米级孔径的高分子材料, 允许水分子通过, 而截留溶解性盐类、有机物和微生物。当高盐废水通过反渗透膜时, 水分子在压力作用下穿过膜孔, 而盐分和其他污染物被截留在膜表面, 从而实现水与盐的“分道扬镳”。反渗过程的关键在于操作压力必须高于溶液的渗透压, 以克服自然渗透现象。例如, 在处理盐分浓度为 3.5% 的海水时, 所需操作压力通常为 50 ~ 70 bar。反渗透膜技术的分离效率取决于膜材料的性能、操作压力以及进水水质。

1.3 高盐废水处理中的技术瓶颈: 能耗与效率的博弈

节能降耗是反渗透膜技术在高盐废水处理中实现绿色化的核心目标。高盐废水处理过程中的高能耗问题不仅增加了运行成本, 还加剧了能源消耗和碳排放, 与环境可持续发展的理念相悖。据统计, 传统反渗透工艺在高盐废水处理中的能耗通常高达 3 ~ 10 kW · h/m³, 远高于普通废水处理的能耗水平。因此, 降低能耗已成

为反渗透膜技术推广应用的关键。近年来,研究人员从膜材料优化、工艺改进和智能化控制等方面入手,提出了多种节能降耗策略。例如,通过开发低阻力、高通量的新型膜材料,可以显著降低运行压力,从而减少能耗;采用多级反渗透工艺和能量回收装置,能够充分利用高压浓水的余压,实现能量的高效利用;引入智能化控制系统,通过实时监测和优化运行参数,可以进一步提高能效。这些策略不仅降低了反渗透技术的能耗,还提升了其经济性和环保性。节能降耗不仅是技术创新的方向,更是实现绿色水处理的必由之路。

尽管反渗透膜技术在高盐废水处理中表现出色,但其高能耗问题仍是制约其广泛应用的主要瓶颈。高盐废水中的高盐分浓度导致渗透压显著升高,从而需要更高的操作压力来驱动反渗过程。例如,处理盐分浓度为5%的工业废水时,操作压力通常需达到80~100 bar,能耗高达5~10 kW·h/m³。此外,高盐废水中的复杂成分(如有机物、胶体等)容易造成膜污染,进一步增加能耗和维护成本。膜污染不仅会降低水通量,还会缩短膜的使用寿命,导致运行成本上升。

1.4 国内外研究进展:从实验室到工业化的跨越

近年来,反渗透膜技术在高盐废水处理领域取得了显著进展,从实验室研究逐步走向工业化应用。在膜材料方面,国内外研究人员开发了多种新型膜材料,如纳米复合膜、石墨烯膜和生物仿生膜,这些材料具有更高的水通量和抗污染性能。例如:某研究团队开发的纳米复合膜在高盐废水处理中的水通量比传统膜提高了30%,同时能耗降低了20%。在工艺优化方面,多级反渗透和能量回收技术的应用显著提升了能效。例如:某海水淡化厂通过引入能量回收装置,将能耗从4.5 kW·h/m³降低至2.8 kW·h/m³。此外,智能化控制技术的应用也为反渗透技术的工业化推广提供了重要支持。通过实时监测和优化运行参数,智能化系统能够显著提高能效并降低运行成本。

2 节能降耗策略的创新与实践

2.1 膜材料优化:从“高能耗”到“低阻力”的进化

膜材料优化是降低反渗透技术能耗的关键策略之一。传统反渗透膜在高盐废水处理中面临高阻力、易污染等问题,导致能耗居高不下。近年来,研究人员通过开发新型膜材料,如纳米复合膜、石墨烯膜和生物仿生膜,显著降低了膜阻力并提高了抗污染性能。

例如:某研究团队开发的纳米复合膜在高盐废水处理中的水通量达到40 L/(m²·h),比传统膜的30 L/(m²·h)提高了33%,同时操作压力从70 bar降低至50 bar,能耗减少了28%。此外,石墨烯膜因其超薄结构和高效分离性能,在高盐废水处理中表现出色,水通量可达50 L/(m²·h),能耗降低至2.5 kW·h/m³(见表1)。

表1 不同膜材料的性能对比

膜材料类型	水通量 (L/(m ² ·h))	操作压力 (bar)	能耗 (kW·h/m ³)
传统聚酰胺膜	30	70	3.5
纳米复合膜	40	50	2.5
石墨烯膜	50	45	2.0

2.2 工艺改进:多级反渗透与能量回收的协同效应

工艺改进是反渗透技术节能降耗的另一重要策略。多级反渗透工艺通过将高压浓水的余压用于下一级反渗过程,显著降低了能耗。例如:在某海水淡化厂中,采用两级反渗透工艺后,能耗从4.5 kW·h/m³降低至3.0 kW·h/m³,降幅达33%。此外,能量回收装置(如压力交换器)的应用进一步提高了能效。某工业废水处理项目通过引入压力交换器,将能耗从5.0 kW·h/m³降低至3.2 kW·h/m³,同时水回收率从50%提高至70%(见表2)。

表2 多级反渗透与能量回收技术的性能对比

工艺类型	能耗 (kW·h/m ³)	水回收率 (%)
单级反渗透	4.5	50
两级反渗透	3.0	60
两级反渗透 + 能量回收	3.2	70

2.3 智能化控制:精准操作下的能耗“瘦身”

智能化控制技术通过实时监测和优化运行参数,为反渗透技术的节能降耗提供了新的途径。例如:某海水淡化厂引入智能化控制系统后,通过实时调整操作压力和清洗周期,能耗从3.5 kW·h/m³降低至2.8 kW·h/m³,降幅达20%。此外,智能化系统还能够预测膜污染趋势并自动调整运行策略,从而延长膜使用寿命并降低维护成本。在某工业废水处理项目中,智能化控制技术的应用使膜更换周期从12个月延长至18个月,维护成本减少了25%(见表3)。

表3 智能化控制技术的节能效果

指标	实施前	实施后	降幅(%)
能耗 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)	3.5	2.8	20
膜更换周期 (月)	12	18	50
维护成本 (万元/年)	100	75	25

3 案例分析与未来展望

3.1 典型案例解析：节能降耗的成功实践

反渗透膜技术在高盐废水处理中的节能降耗实践已有多项成功案例。例如：某沿海城市的工业园区采用两级反渗透工艺和能量回收装置处理高盐废水，能耗从 $5.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 降低至 $3.2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ，水回收率从 50% 提高至 70%。此外，某海水淡化厂通过引入智能化控制系统，能耗从 $3.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 降低至 $2.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ，同时膜更换周期延长了 50%（见表 4）。

表4 典型案例的节能降耗效果

案例名称	工艺类型	能耗 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)	水回收率 (%)
工业园区 废水处理	两级反渗透 + 能量回收	3.2	70
海水淡化厂	智能化控制	2.8	60

3.2 经济效益与环境效益的双赢之道

反渗透膜技术的节能降耗不仅降低了运行成本，还带来了显著的环境效益。例如：某工业园区通过采用两级反渗透工艺和能量回收装置，每年节省电费约 500 万元，同时减少碳排放约 2 000 吨。此外，某海水淡化厂通过智能化控制技术的应用，每年节省维护成本约 25 万元，同时延长了设备使用寿命（见表 5）。

表5 反渗透技术的经济效益与环境效益

效益类型	具体指标	实施前	实施后
经济效益	年电费节省 (万元)	-	500
经济效益	年维护成本节省 (万元)	-	25
环境效益	年碳排放减少 (吨)	-	2 000

3.3 未来趋势：反渗透膜技术的绿色革命与可持续发展

未来，反渗透膜技术将朝着更高效、更绿色、更可持续发展的方向发展。在膜材料方面，新型纳米材料和生物仿生膜的应用将进一步提高分离性能和抗污染能力。例

如：某研究团队开发的生物仿生膜在高盐废水处理中的水通量达到 $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，能耗降低至 $1.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。在工艺方面，多级反渗透与能量回收技术的结合将更加紧密，能耗有望进一步降低至 $2.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以下。此外，智能化控制技术的普及将实现反渗透系统的全自动化运行，能耗降低 20%~30%（见表 6）。

表6 未来反渗透技术的发展方向及预期效果

技术方向	关键技术	预期效果
膜材料	生物仿生膜	水通量提升至 $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ， 能耗降低至 $1.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$
工艺优化	多级反渗透 + 能量回收	能耗降低至 $2.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以下
智能化 控制	全自动化运行	能耗降低 20%~30%

4 结束语

反渗透膜技术作为高盐废水处理的核心技术，在节能降耗方面展现了巨大的潜力。通过膜材料优化、工艺改进和智能化控制等策略，反渗透技术的能耗显著降低，运行效率大幅提升。典型案例的成功实践表明，多级反渗透与能量回收技术的协同应用，以及智能化控制的精准操作，能够有效实现节能降耗目标，同时兼顾经济效益与环境效益。然而，反渗透膜技术的进一步推广仍面临诸多挑战，包括膜污染控制、长期运行稳定性以及成本优化等问题。未来，随着新型膜材料的研发、工艺技术的创新以及智能化水平的提升，反渗透膜技术将朝着更高效、更绿色、更可持续发展的方向发展。为实现高盐废水处理的绿色革命，需要政策支持、技术创新与产业协同的多方努力，共同推动水资源管理的可持续发展。

参考文献：

- [1] 黄松宇,于淼.有色金属行业含油高盐废水的资源化处理研究[J].绿色矿冶,2024,40(06):35-40.
- [2] 田颖,王雨,刘佳峰,等.焦化高盐废水处理回用及废盐资源化技术研究[J].包钢科技,2024,50(05):94-98.
- [3] 贾庆林,师培俭,张泽林.不锈钢冷轧高氮高盐废水处理集成技术的研究应用[J].科技创新与生产力,2024,45(10):63-66.
- [4] 王二成.基于不同方案比选的煤化工高盐废水处理技术[J].山西化工,2024,44(07):232-234.
- [5] 白玥萌,李环宇.膜技术处理高盐废水的研究进展[J].辽宁化工,2024,53(05):734-737.