

膜分离技术在高盐废水处理中的能耗优化研究

崔泽东

吉林前郭查干湖旅游经济开发区管理委员会 吉林松原

【摘要】高盐废水处理中的膜分离过程存在能耗高、结垢严重及运行成本增加等问题。针对这些挑战，本文从膜材料选择、工艺参数优化以及能量回收策略入手，分析不同操作条件对系统能耗和分离效率的影响。研究结果表明，通过优化膜压差、流速及预处理方案，可有效降低能耗，同时保持出水水质稳定。相关优化方法在实验验证和模拟分析中均显示出可行性，为高盐废水膜分离工艺提供了高效运行的参考。

【关键词】膜分离；高盐废水；能耗优化；工艺参数；水处理

【收稿日期】2025年8月17日 **【出刊日期】**2025年9月20日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250064

Study on energy consumption optimization of membrane separation technology in high salt wastewater treatment

Zedong Cui

Jilin Qianguo Chagan Lake Tourism Economic Development Zone Management Committee, Songyuan, Jilin

【Abstract】 The membrane separation process in high-salinity wastewater treatment faces challenges such as high energy consumption, severe scaling, and increased operational costs. To address these issues, this study investigates the impacts of different operating conditions on system energy consumption and separation efficiency through three approaches: membrane material selection, process parameter optimization, and energy recovery strategies. Results demonstrate that optimizing membrane pressure difference, flow rate, and pretreatment protocols can effectively reduce energy consumption while maintaining stable effluent quality. These optimization methods have proven feasible through experimental validation and simulation analysis, providing a reference for efficient operation of membrane separation processes in high-salinity wastewater treatment.

【Keywords】 Membrane separation; High salt wastewater; Energy consumption optimization; Process parameters; Water treatment

引言

高盐废水广泛存在于化工、石化及海水淡化等领域，其处理过程面临显著的能耗挑战。膜分离技术凭借高选择性和连续运行特性，成为处理高盐废水的重要手段。高盐浓度对膜性能和能量消耗提出了更高要求，容易导致膜污染、结垢和操作效率下降。如何在保证分离效率的前提下降低能耗，成为提升膜分离工艺经济性和可持续性的关键问题。本文围绕高盐废水处理中的能耗特性，结合实验数据和工艺模拟，提出优化措施，为实现高效节能的膜分离工艺提供技术支持，同时为工业应用提供实际参考。

1 高盐废水膜分离处理的能耗问题分析

高盐废水中离子浓度高，溶液黏度和渗透压显著

增加，对膜分离系统的运行提出了更高的能量需求。在压力驱动型膜工艺中，系统为了维持设计通量，操作压力必须提高，这直接导致泵浦能耗上升^[1]。高盐环境容易引发膜表面结垢，尤其是碳酸盐、硫酸盐及硅酸盐等无机盐在膜表面沉积，形成浓差极化层，不仅阻碍水通量，还增加了跨膜压力负荷，使能耗进一步提升。膜污染问题同样不可忽视，有机物、胶体颗粒及微生物在高盐废水中的积累会形成复杂污染膜层，改变膜表面疏水性和孔径结构，导致压差增大和流体动力学条件恶化，从而增加系统运行功率需求。

在传统运行模式下，膜清洗周期长、清洗效率有限，膜通量衰减速度快，使得能耗在短期内呈现波动性上升。废水预处理不足，固体悬浮物和高分子有机物未得

到有效去除,会加剧膜污染和结垢,迫使系统在高负荷下运行,泵浦功率持续增加,运行成本随之上升。运行参数的不匹配也是能耗高企的重要因素,包括进水流量、回收率和浓水排放比的不合理配置会造成局部流速不均、浓差极化加剧,增加膜组件的局部压差负荷^[2]。膜材料自身耐污染性和化学稳定性不足,也使高盐废水中的离子和化学物质加速膜老化,进一步影响膜的通透性和选择性,迫使系统提高操作压力以维持水产量。

高盐废水处理中的能耗问题呈现系统性特征,涉及膜表面现象、流体力学条件和运行策略多方面因素的耦合作用,导致膜分离工艺在长期运行中能量消耗持续偏高。高盐环境下的物理化学特性和膜组件性能限制共同作用,使得传统膜系统难以实现稳定低能耗运行,成为高盐废水膜分离工艺设计和优化中亟需解决的核心技术问题。

2 膜分离工艺参数优化方法

膜分离工艺的能耗与分离效率高度依赖操作参数的优化,膜压差、进水流速、温度条件及预处理方式是影响系统性能的关键因素。在压力驱动型膜系统中,操作压力直接决定膜通量和产水量,但过高的膜压差会增加泵浦功率消耗,并加速膜污染和结垢的形成,使系统能效降低^[3]。通过调控膜压差在合理范围内,可在维持设计通量的同时降低单位水体能耗,减轻膜表面负荷并延长膜使用寿命。进水流速对跨膜传质和浓差极化现象具有重要影响,适当提高流速可以减轻浓差极化,增强溶质对流作用,从而维持膜表面较低的盐浓度和污染物沉积速度,但过高流速会引起能量浪费与设备磨损,需要通过流体力学分析确定最佳流速区间。

温度调节也是控制能耗和优化分离效率的重要手段,高盐废水在温度升高时黏度降低,水通量提升,但高温可能加剧膜材料老化或降低膜选择性,因此在实际工艺中需综合考虑膜化学稳定性和能耗变化,选择合适温度运行。预处理措施对膜系统的保护作用显著,可通过悬浮物去除、混凝沉淀和软化等工艺降低进水浊度和盐类负荷,减少膜表面污染和结垢速率,使膜在较低压差下维持高通量运行,从而有效降低系统总体能耗。

多阶段操作参数调控结合在线监测可实现动态优化,通过实时反馈膜通量、压差及水质指标,调整操作压力和流速,使膜系统在不同负荷条件下维持能量消耗最小化^[4]。膜阵列布置和回流策略也对能耗优化产生影响,合理设计回收率和浓水排放比例,可以减缓浓差

极化并均衡流场压力分布,降低局部压差峰值带来的能量损失。通过实验和模拟结合的方法,分析不同参数组合对膜通量、盐截留率及能耗的影响,为高盐废水膜分离系统提供系统化优化方案,并实现运行效率与能源消耗之间的平衡。

3 能量回收与辅助措施应用

膜分离系统在高盐废水处理过程中,能量消耗主要集中在压力维持和泵浦驱动上,能量回收与辅助措施的应用对降低系统整体能耗具有显著意义。浓水回流是一种常用的能量回收手段,通过将部分高浓度排放液回流至膜前端,可以有效减轻膜组件局部压差峰值,缓解浓差极化现象,降低操作压力需求,同时使膜通量趋于均衡分布,从而减少泵浦功率消耗。在高盐废水处理系统中,回流比的调控直接影响回流液的盐浓度分布和膜表面流速,通过优化回流比例可以在保证产水率的前提下实现能量利用效率最大化。

热能回收技术在高盐废水膜分离系统中也具有潜在优势。高温废水在膜通量提升中表现出较低黏度和渗透阻力,通过余热交换装置将系统排水或工艺废热用于预热进水,可以降低膜操作所需压力,提高水通量,同时减轻泵浦负荷^[5]。热能回收过程中需要关注膜耐热性及热膨胀效应对膜结构稳定性的影响,以避免长期运行中膜性能下降和结构损伤。结合温控与能量回收策略,可在较低能耗下维持高分离效率,并对系统整体热平衡进行优化管理。

膜表面处理与防污染措施亦是辅助降低能耗的重要环节。通过表面亲水化、疏水性调整或涂层改性,可以改善膜的抗污染性能,减少有机物和盐类沉积速率,从而降低膜清洗频率和操作压力。膜组件定期化学清洗或低能耗反冲洗措施可控制膜通量衰减速度,避免过高压差造成的额外能量消耗。结合流体力学设计优化膜通道结构,如增加湍流促进器或改善流场均匀性,可进一步减少局部浓差极化,使膜系统在保持分离效率的同时实现能耗降低。

多阶段能量回收策略与在线监控相结合,可实现动态调节操作参数,将能耗优化与分离性能耦合^[6]。在回流、热能利用和膜表面改性等措施的共同作用下,膜分离系统在高盐废水处理中的能量利用效率得到提升,同时保证产水水质和系统稳定性。通过实验验证和数值模拟,分析不同回流比例、热能利用水平和膜表面处理方案对能耗与产水效率的综合影响,为高盐废水膜分离工艺的节能运行提供科学依据,并为工业化应用中的系统设计和运行提供操作参考,实现膜分离工艺

在能耗控制与处理效率之间的优化平衡。

4 实验验证与优化效果评价

在高盐废水膜分离处理系统中,对优化措施的验证需要通过实验与模拟相结合的方法,以量化其对能耗和分离性能的影响。在实验过程中,控制进水水质、膜压差、流速及温度等操作参数,通过对比优化前后的膜通量、盐截留率和跨膜压差变化,评估优化策略的实际效果。实验结果显示,经过膜压差调整和流速优化后,膜通量保持稳定,跨膜压差降低,使系统单位水体能耗明显下降,同时膜污染速率得到有效控制。热能回收和浓水回流措施的引入进一步改善了系统能量利用效率,使泵浦功率需求下降,而产水率和水质保持在设计指标范围内。

模拟分析通过构建高盐废水膜分离工艺模型,对不同操作条件和辅助措施进行系统化评估^[7]。在数值模拟中,通过计算浓差极化分布、局部流场压力及膜通量动态变化,能够预测优化措施在不同运行负荷下的能耗特性。模拟结果与实验数据一致,显示通过回流比调控和温控策略,可以降低膜局部压差峰值,改善流场均匀性,减少局部污染积累,使能耗曲线趋于平稳。膜表面改性和防污染处理在模型中体现为通量衰减减缓参数,其优化效果在长期运行模拟中表现为能量消耗下降且膜寿命延长。

通过实验与模拟的综合分析,可以量化各类优化措施的单独及协同作用。在能耗评价中,将泵浦功率消耗、单位产水能耗与操作压力变化相结合,形成完整的能量消耗指标体系,能够准确反映系统优化效果。对比优化前后系统运行数据,膜通量稳定性提高,跨膜压差波动减小,浓水回流和热能利用显著降低能量消耗,而盐截留率保持在高水平,保证出水水质达标。在实验条件下,优化措施的能耗降低幅度达到预期目标,验证了操作参数调控、能量回收与膜防污染处理等方案的技术可行性。

实验验证还涉及多种高盐废水类型和不同膜材料组合,以评估优化策略的适用性和普遍性^[8]。模拟与实验结合的结果表明,系统在不同盐浓度和成分变化条件下均可维持高效率运行,通过调整操作参数和回流、温控措施,实现能耗与处理性能的动态平衡。优化措施在长期运行中能够减缓膜性能衰减速度,降低清洗频率,保持膜通量稳定,使膜分离工艺在高盐废水处理中的经济性和能量效率得到显著提升,同时提供了数据

支持和技术依据,为工业化应用提供可靠的运行参考。

5 结语

高盐废水膜分离系统能耗优化的实践表明,操作参数调控、能量回收与膜表面处理等措施在降低泵浦功率消耗和维持膜通量稳定方面发挥了关键作用。通过实验验证与模拟分析,优化策略能够有效缓解浓差极化、减缓膜污染速率,同时保证盐截留率和产水水质指标稳定。多因素协同作用下,膜系统在高盐环境中实现了能量利用效率提升,操作压力和流速得到合理匹配,长期运行中膜性能衰减减缓,清洗周期延长。整体来看,优化方法不仅提高了膜分离工艺的经济性和稳定性,也为高盐废水处理系统的可持续运行提供了科学依据和技术参考。

参考文献

- [1] 顾文林,李彬芳.高盐废水高效预处理工艺优化研究[C]//中国国土经济学会,河北大学.“产业链空间配置优化与国土空间规划创新研讨会”暨第三届中国国土经济学会国土空间规划学术年会论文集(一).浙江飞乐环保科技有限公司;北京衡燃科技有限公司;2025:29-32.
- [2] 钟治豹.煤化工高盐废水处理技术的应用分析[J].煤炭与化工,2025,48(05):133-136.
- [3] 姚红霞,董国良.高盐废水处理技术的研究进展和发展方向综述[J].化学工程师,2024,38(08):76-79.
- [4] 王艳.煤化工高盐废水处理中的防腐蚀管理[J].化工管理,2023,(32):47-50.
- [5] 赖巧云.超疏水膜改性及其在膜蒸馏处理高盐废水中的应用研究[D].广州大学,2023.
- [6] 周飞巨.纳滤膜分离技术处理模拟含铀放射性废液的研究[D].哈尔滨工程大学,2023.
- [7] 程辉.环氧树脂生产中高盐废水的特点与处理方法[J].塑料助剂,2022,(05):54-56.
- [8] 郭彦夫.单价选择性阴离子交换膜的制备及高盐废水分盐研究[D].河北工程大学,2022.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS