

多孔膜蒸馏处理高盐废水的污垢抑制策略

王建国

山东理工大学 山东淄博

【摘要】多孔膜蒸馏技术因其能高效去除高盐废水中的溶解物质而备受关注。然而，在实际应用过程中，膜的污垢问题严重影响了其处理性能和稳定性。为了提高膜的抗污垢能力，本文探讨了几种污垢抑制策略，包括膜表面改性、添加清洁剂以及优化操作条件等。通过优化这些策略，能够显著降低膜表面的污染程度，从而提高膜蒸馏系统的处理效果和运行周期。这些策略的有效性为高盐废水处理提供了新的思路，尤其在降低能源消耗和提升膜寿命方面具有重要意义。

【关键词】多孔膜蒸馏；高盐废水；污垢抑制；膜改性；操作优化

【收稿日期】2025 年 8 月 6 日

【出刊日期】2025 年 9 月 17 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20250040

Fouling mitigation strategies for porous membrane distillation in high-salinity wastewater treatment

Jianguo Wang

Shandong University of technology, Zibo, Shandong

【Abstract】Porous membrane distillation technology has attracted considerable attention due to its high efficiency in removing dissolved substances from high-salinity wastewater. However, during practical application, membrane fouling seriously impairs the treatment performance and stability of the technology. To enhance the anti-fouling capability of membranes, this paper explores several fouling mitigation strategies, including membrane surface modification, addition of cleaning agents, and optimization of operating conditions. By optimizing these strategies, the degree of fouling on the membrane surface can be significantly reduced, thereby improving the treatment efficiency and operation cycle of the membrane distillation system. The effectiveness of these strategies provides new insights for high-salinity wastewater treatment, and is of great significance especially in reducing energy consumption and extending membrane lifespan.

【Keywords】Porous membrane distillation; High-salinity wastewater; Fouling mitigation; Membrane modification; Operation optimization

引言

高盐废水的处理一直是环境保护领域的重要挑战之一。传统的反渗透和蒸发技术在处理过程中面临较高的能源消耗和膜污染问题。近年来，多孔膜蒸馏技术凭借其较低的能耗和较高的处理效率，成为废水处理中的一种有前景的方法。然而，膜污染问题依然是制约其广泛应用的瓶颈。由于盐分和有机物的积聚，多孔膜在长时间运行过程中容易发生污垢，导致水通量下降和处理效率降低。针对这一问题，研究者提出了多种污垢抑制策略，如膜表面改性和操作条件优化，旨在减少膜的污垢积累，延长膜的使用寿命，提高废水处理的经济性与可持续性。本文将重点讨论这些污垢抑制策略的原理及其在高盐废水处理中的应用效果。

1 膜污染问题及其对多孔膜蒸馏技术的影响

膜污染是制约多孔膜蒸馏技术广泛应用的主要问题之一。在实际应用中，高盐废水中的溶解盐分和有机物质往往会附着在膜表面，形成污垢层。这些污垢不仅降低膜的通量，而且加剧膜的劣化，影响其长期稳定性。污垢的形成一般包括盐结垢、有机物吸附和微生物生长等多个方面^[1]。尤其是在高盐废水处理中，由于盐分的浓度较高，膜表面很容易发生盐结垢现象。这种结垢会显著降低膜的水通量，进而影响膜蒸馏的处理效率。盐结垢一般表现为膜孔隙的堵塞，导致水流阻力增加，处理时间延长，甚至可能导致膜的完全失效。污垢的积累还会导致膜表面的亲水性变化，使得膜的表面性质发生改变，进一步加剧了膜污染的问题。

膜污染不仅影响膜的水通量和使用寿命,还可能影响到多孔膜蒸馏系统的能源效率。随着膜表面污垢的增加,处理过程中的能量消耗往往会显著提高。污垢层对水蒸气的透过性产生负面影响,从而需要更高的温度差来维持蒸馏过程的效率。尤其是在高盐废水处理中,膜污染的影响更为显著,导致系统整体效能下降。由于膜污染直接影响到系统的经济性,如何有效解决膜污染问题成为多孔膜蒸馏技术发展的关键之一。通过合理的污垢抑制策略,可以显著延长膜的使用寿命,提高水通量,并减少能源消耗,从而提升多孔膜蒸馏技术在高盐废水处理中的应用潜力。

解决膜污染问题的研究已经成为膜蒸馏领域的热点之一。研究者们提出了多种解决方案,包括膜表面改性、操作条件优化以及添加抗污染剂等。这些方法能够有效地减少膜表面污染,改善膜的抗污垢性能。然而,在实际应用中,这些方法仍面临一些挑战,如成本问题、操作复杂性等。寻找一种兼具高效性、经济性和可操作性的污垢抑制策略,是推动多孔膜蒸馏技术应用的关键。

2 膜表面改性方法及其对污垢抑制的作用

膜表面改性是提高膜抗污垢性能的常用方法之一。通过改变膜的表面性质,可以有效地抑制污垢的附着,延长膜的使用寿命。常见的膜表面改性方法包括物理方法和化学方法。物理方法通常通过对膜表面进行粗化或涂覆薄膜等手段,改变膜的表面结构和孔隙分布,从而提高膜的抗污垢能力。通过增加膜表面的粗糙度,可以有效增加膜表面的亲水性,使得污垢不容易附着。然而,物理改性方法的效果通常不如化学改性方法持久,需要与其他改性方法结合使用。

化学改性则通过改变膜表面的化学组成或引入特定功能基团,改变膜的亲水性或电荷特性,从而提高膜的抗污染性能。常见的化学改性方法包括接枝聚合、共聚物改性和自组装技术等。接枝聚合通过将特定单体接枝到膜表面,形成具有亲水性的聚合物层,从而增加膜的亲水性,减少污垢的附着^[2]。利用自组装技术在膜表面构建纳米结构层,也是近年来研究的热点。这些纳米结构不仅能够显著改善膜表面的亲水性,还能够通过控制膜孔径和表面电荷,抑制盐分和有机物的吸附,减少污垢积累。

膜表面改性不仅能够提高膜的抗污垢能力,还能改善膜的其他性能,如耐高温性、机械强度和化学稳定性。通过合理设计改性方法,可以同时实现膜的高效性与长寿命。膜表面改性还能够提高膜在不同水质条件

下的适应性,使其更具广泛的应用前景。然而,膜表面改性技术仍面临一些挑战,如改性材料的选择与制备、改性膜的稳定性等问题。进一步优化膜表面改性技术,提高其稳定性和经济性,是未来研究的重点方向。

3 优化操作条件对膜污垢抑制的效果分析

除了膜表面改性外,优化操作条件也是减少膜污染、提高处理效率的重要手段。操作条件的优化主要包括温度、流速、压力、进水水质等因素。温度是影响膜蒸馏过程的一个重要因素。在高盐废水处理中,适当提高温度能够促进水蒸气的蒸发,从而提高膜的水通量。然而,过高的温度也可能导致膜污染的加剧,特别是在高盐废水中,盐分的结晶速率会随着温度的升高而增加。合理控制温度是优化操作条件、减少膜污染的关键。

流速和压力是影响膜污垢抑制的重要操作参数。适当的流速有助于提高膜的水通量,因为较高的流速能有效地推动水流通过膜的孔隙,减少膜表面污染物的积累。流速较高时,废水中的颗粒物和溶解物质被迅速带走,避免了它们在膜表面形成污垢层。然而,流速过高可能导致膜表面产生较大的剪切力,这不仅会增加膜的机械损伤风险,还可能导致膜的结构破坏,从而降低膜的使用寿命。另一方面,压力调节也是膜污垢控制的重要因素^[3-7]。合适的压力可以提高膜的渗透速率,加速水蒸气的通过,提升处理效率。但如果压力过高,可能会引起膜材料的机械疲劳,导致膜材料逐渐老化并失去原有的性能。在实际操作中,必须根据废水的特性、膜的设计和处理要求,精确调节流速和压力,以实现最佳的膜性能和长效的污垢抑制效果。

进水水质是影响膜污染的另一个关键因素。废水中盐分、溶解有机物和悬浮物的浓度都会对膜的污垢形成产生影响。为了减少膜的污染,通常可以通过预处理来降低水质中的污染物浓度。常见的预处理方法包括超滤、反渗透和化学沉淀等,这些方法能够有效去除废水中的大部分颗粒物和溶解盐分,降低膜的污垢负担。通过合理设计和优化操作条件,可以在保证高效处理的延长膜的使用寿命,降低运营成本。

4 综合污垢抑制策略的效果评估与应用前景

综合污垢抑制策略结合了膜表面改性与操作条件优化,能够有效地解决多孔膜蒸馏技术在高盐废水处理中的膜污染问题。通过膜表面改性,可以在膜的表面引入具有抗污染性能的功能基团或材料,这样能显著减少盐分、细菌、以及有机物的吸附,从而有效降低膜污染的发生。操作条件优化通过调节温度、流速、压力等参数,使膜系统运行在最优状态,进一步减少污垢的

积累。合理选择操作条件,不仅可以提高膜的水通量,还能减少膜表面污垢的沉积,延长膜的使用寿命。添加抗污染剂或使用清洗剂等辅助材料,能够增强膜的自清洁能力,进一步优化其抗污垢特性。综合策略的优势在于能够通过膜表面改性、操作优化和辅助材料的协同作用,综合发挥各个方法的优势,从而实现最佳的污垢抑制效果,为高盐废水的处理提供了有效的技术方案。

综合污垢抑制策略的效果评估通常通过实验室测试和现场应用两种方式进行。实验室测试是评估污垢抑制效果的常见方法,通过模拟实际运行条件,分析不同污垢抑制方法对膜通量、盐分结垢、以及膜表面污染的抑制效果。实验室中可以精确控制变量,获取更为准确的评估结果,比较不同改性方法与操作条件的优劣。现场应用则是验证这些污垢抑制策略可行性的关键步骤^[8]。现场应用不仅能够评估策略在实际废水处理中的效果,还能考虑到现场水质变化、运行条件等复杂因素,帮助优化实际操作参数。在一些实际案例中,经过合理设计的污垢抑制策略能够显著延长膜的使用周期,提高膜蒸馏系统的经济性与处理效率。综合污垢抑制策略通过实验室测试和现场验证的结合,为技术的进一步应用和推广提供了有力支持。

综合污垢抑制策略在多孔膜蒸馏技术中的应用前景广阔。随着研究的不断深入,越来越多高效、环保的污垢抑制策略将会被提出,尤其是在膜材料和膜系统的优化方面,新的创新材料和高性能膜的出现将推动这一领域的快速发展。随着膜表面改性技术的成熟,各类功能化膜材料将不断涌现,具备更强抗污染、抗结垢能力的膜材料将应用于高盐废水处理过程中。随着操作优化技术的不断提高,能够根据不同废水类型和处理要求调整操作条件,将大大提升膜蒸馏系统的适应性和处理效率。环保要求的提高以及节能减排政策的推动,将加速多孔膜蒸馏技术在高盐废水处理中的应用。随着膜技术的普及,多孔膜蒸馏将在全球范围内广泛应用,成为废水处理领域的重要技术之一,为环境保护和资源循环利用做出贡献。

5 结语

综合污垢抑制策略通过膜表面改性与操作条件优

化的结合,能够有效解决多孔膜蒸馏技术在高盐废水处理中面临的膜污染问题。通过提升膜的抗污垢性能,合理调节操作条件,并辅以清洗剂等辅助材料,可以显著提高处理效率并延长膜的使用寿命。实验室和现场应用验证表明,这些策略具有广泛的应用前景。随着技术的不断进步,未来多孔膜蒸馏技术将在高盐废水处理领域发挥越来越重要的作用,为实现可持续的水资源管理提供强有力的支持。

参考文献

- [1] 崔哲,杨晖,张灿,等. 基于污染物分布的模拟高盐有机废水冷冻净化效果研究[J/OL]. 实验技术与管理, 1-11[2025-08-30].
- [2] 王园园,赵文玥,孙绍哲,等. 高盐废水膜浓缩蒸发结晶系统性能试验研究[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(07): 226-229+233.
- [3] 陆威,高正,吴志根,等. 高盐废水流速对管壁结垢及传热特性影响的实验研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(07): 130-136.
- [4] 蔡瑞芸,焦芮,孙寒雪,等. 不对称浸润性 Janus 有机多孔膜的设计、制备及应用[J]. 化工进展, 2025, 44(04): 2057-2067.
- [5] 王俊儒. 基于非均匀多孔膜的气扫膜蒸馏海水淡化组件热质传递性能研究[D]. 郑州轻工业大学, 2024.
- [6] 谢松辰. 疏水多孔膜的结垢和润湿机理及预防策略[D]. 北京工业大学, 2024.
- [7] 马忠,陈晓蓉,彭艳,等. 蒸汽诱导相分离法制备 PVDF 多孔膜及其膜蒸馏性能研究[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(01): 56-62.
- [8] 刘大朋,郑俊芝,周学良,等. 特殊浸润性多孔膜及其在膜蒸馏中的抗污染特性研究进展[J]. 化工进展, 2024, 43(12): 6769-6779.

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