

超滤－反渗透组合工艺处理化工循环水的膜污染控制及经济效益

苏 泽（大唐内蒙古多伦煤化工有限责任公司，内蒙古自治区 锡林郭勒盟 027300）

摘 要：化工循环水处理对保障化工生产系统稳定运作起着关键作用，超滤－反渗透组合工艺凭借其高效的分离性能，在该领域得到大量应用，但膜污染问题极大影响了处理效果与运行成本，本文分析了超滤－反渗透组合工艺处理化工循环水时膜污染的特性、成因及控制方法，目的是为化工循环水的高效处理，从而实现良好的经济效益。

关键词：超滤－反渗透组合工艺；化工循环水；膜污染控制；经济效益

中图分类号：TQ085.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）026-0070-03

Membrane fouling control and economic benefits of ultrafiltration - reverse osmosis combined process for treating chemical circulating water

Su Ze(Datang Inner Mongolia Duolun Coal Chemical Co., LTD, Duolun County Xilingol League Inner Mongolia Autonomous Region 027300,China)

Abstract: The treatment of chemical circulating water plays a crucial role in ensuring the stable operation of chemical production systems. The ultrafiltration - reverse osmosis combined process has been widely applied in this field due to its highly efficient separation performance. However, membrane fouling greatly affects the treatment effect and operating costs. This paper analyzes the characteristics, causes and control methods of membrane fouling when the ultrafiltration - reverse osmosis combined process is used to treat chemical circulating water. The aim is to achieve efficient treatment of chemical circulating water, thereby realizing good economic benefits.

Key words: Ultrafiltration - reverse osmosis combined process;Chemical circulating water;Membrane fouling control;Economic benefits

化工循环水系统在化工生产里起着关键作用，其水质好坏和生产设备的运行效率、使用寿命直接相关，伴随水资源的不断短缺，高效处理及回用化工循环水成为化工行业可持续发展的关键，一种先进的水处理技术就是超滤－反渗透组合工艺，能有效把循环水中的悬浮物、胶体、有机物和盐类等杂质去除，可有效降低膜污染的发生概率，增进超滤－反渗透组合工艺处理化工循环水的效率及经济性，保证系统实现稳定运行^[1]。

1 超滤－反渗透组合工艺原理

超滤－反渗透组合工艺是一种高效的膜分离技术，广泛应用于化工循环水处理^[2]。超滤（UF）利用压力驱动，孔径约0.01-0.1 μm，主要通过筛分作用去除悬浮物、胶体等颗粒，同时吸附部分有机物和微生物。常用的超滤膜材料包括聚醚砜（PES）和聚偏氟乙烯（PVDF），这些材料具有良好的机械性能和化学稳定性。反渗透（RO）则采用半透膜，在压力作用下使水分子选择性透过，孔径达纳米级，能高效去除溶解性盐类、有机物和微生物，脱盐率超过90%。常用的反渗透膜材料有聚酰胺（PA）和醋酸纤维素（CA），

这些材料耐化学腐蚀性好。

在组合工艺中，超滤作为反渗透的预处理，可以有效减轻反渗透膜的污染负荷，提高其工作效率并延长使用寿命。二者协同作用，确保出水水质稳定达标，适应水质波动能力强，降低了运行成本和维护难度，推动化工行业可持续发展。

2 化工循环水的水质特点

化工循环水水质复杂，处理难度大。其含大量悬浮物和胶体颗粒，源于冷却塔填料磨损、空气灰尘及物料泄漏等，粒径小、稳定性高，不易沉降，易在膜表面形成滤饼层，增加膜阻力，致膜通量下降。循环水富含有机物，包括微生物代谢产物、填料降解产物、有机溶剂残留及原料残留等，这些有机物使水COD升高，且会在膜表面吸附形成有机污染层，降低膜性能。

此外，循环水硬度高，含有较高浓度的钙、镁离子，容易在膜表面沉积形成无机垢，如碳酸钙、硫酸钙等，导致膜孔隙堵塞，水通量降低。同时，系统温度适宜、营养充裕，微生物极易大量生长，形成生物膜，依附于膜表面，进一步增加膜阻力，引发腐蚀、异味等水

质问题^[3]。这些特点使得化工循环水的处理需要综合的处理工艺和技术手段,以保障系统的平稳运行。

3 超滤-反渗透组合工艺处理化工循环水的膜污染特性

在以超滤-反渗透组合工艺处理化工循环水的阶段,膜污染是一个无法躲开且亟待应对的问题,膜污染会引起膜的性能下滑,还会让系统的运行成本上升、维护难度增大,透彻掌握膜污染的特性对优化工艺和提升处理效率极为关键。

在超滤膜处理化工循环水的时段,主要碰到的污染物有悬浮物、胶体、有机物以及微生物,悬浮物以及胶体颗粒由于其粒径小,轻易就在膜表面形成滤饼层,这种滤饼层会显著抬高膜的阻力数值,引起膜通量迅速降低,有机物跟微生物会吸附在膜的表面,造就生物膜,导致膜的性能进一步变差,超滤过程里也易出现浓度极化现象,导致膜表面的污染物浓度呈现上升趋势,造成膜污染情况恶化,浓度极化会引起膜的通量降低,还会推动污染物在膜表面堆积,形成更难去除掉的污染层。

处理化工循环水期间,主要面临的污染元素为溶解性有机物、无机盐垢和微生物^[4]。溶解性有机物会在膜表面造就有机污染层,引起膜的水通量和脱盐率下降,诸如碳酸钙、硫酸钙等无机盐垢会沉积在膜表面,形成很难除掉的垢层,微生物污染将引发膜表面生物膜的生成,引起膜的运行阻力增大,生物膜会引起膜的性能降低,还会引起微生物进一步繁衍,引起水质恶化,反渗透膜涉及的污染问题更为复杂,鉴于其处理的水质已完成超滤预处理,但依旧含有一定数量的溶解性污染物。

膜污染的特性依旧与膜材料的性质紧密相关,超滤膜一般由聚醚砜(PES)、聚偏氟乙烯(PVDF)等材料加工制成,这些材料呈现出良好的机械性能与化学稳定性,只是其亲水性比较差,较容易造成有机物和微生物吸附,反渗透膜一般由聚酰胺(PA)等材料加工制成,这些材料表现出高脱盐率和良好的耐化学腐蚀作用,然而其表面有一定的疏水倾向,容易构建起有机污染层,挑选适宜的膜材料与改性技术对减轻膜污染意义重大。

在实际实施运行阶段,操作条件同样影响着膜污染的特性,操作压力、回收率、水流速等参数若设置不合理,会加剧膜污染,操作压力过高会引起膜的压实,加大污染物的吸附量;回收率过高会引发浓水侧盐分的积累现象,加剧了结垢的风险;若水流速过低,就会降低水流剪切力,对污染物的冲刷不利,优化操作条件也是控制膜污染的有效手段。

4 膜污染的控制方法

4.1 优化预处理工艺

合适的预处理工艺可有效降低进水的污染物浓度,减少膜的污染,多见的预处理手段包含:凭借投加混凝剂,让水里的悬浮物及胶体颗粒聚集形成较大颗粒,有助于后续的过滤把悬浮物等去除^[5]。混凝沉淀可大幅降低进水的浊度,减轻超滤膜的污染压力。采用石英砂、无烟煤之类过滤介质,除掉水中的悬浮物以及部分胶体,多介质过滤可进一步减少进水中的颗粒物数量,增加超滤膜的运行效率。就硬度较高的循环水而言,可借助石灰软化或离子交换等手段除去水中的钙、镁离子,降低无机垢的生成几率,软化处理有效果降低反渗透膜的结垢风险,提高膜的使用年限。

4.2 改进膜运行条件

优化膜的运行条件能有效减少膜污染的发生:①恰当掌控操作压力,避免压力过高引起膜的压实以及污染物深度吸附,超滤操作压力控制在0.1-0.2MPa,反渗透操作的压力应控制在1.5-2.0MPa;②合理掌握系统的回收率,降低浓水侧的盐分聚集,减少膜出现结垢的风险,一般把回收率控制到75%左右;③加快膜表面的水流流速,加大剪切力,有利于降低污染物在膜表面的沉积量,超滤以及反渗透的水流速一般稳定在3-5m/s。

4.3 膜清洗技术

定期的膜清洗是控制膜污染的重要手段:①物理清洗,含有反冲洗以及空气擦洗等,靠水流的反向冲击或者气水混合的模式,去掉膜表面的滤饼层与部分污染物,物理清洗的操作简单易行,对膜造成的损害较小,但清洗成效不大;②化学清洗,按照膜的污染种类,挑选恰当的化学清洗剂,诸如以酸洗去除无机垢,以碱洗去除有机物和微生物,化学清洗成效明显,但需调控清洗剂的浓度、温度和时长,防止对膜造成破坏,常见化学清洗剂有柠檬酸、氢氧化钠等成分。

4.4 新型膜材料及改性技术

采用新型膜材料和改性技术可以有效提高膜的抗污染性能:①高性能的聚合物膜,就如聚醚砜(PES)、聚偏氟乙烯(PVDF)这些,这些材料表现出良好的机械性能、化学稳定性以及亲水性,可有效减少膜污染现象;②就如陶瓷膜、金属膜这类的,拥有强度高、耐高温、能抵抗化学腐蚀等长处,然而成本处在较高水平,面对高温、高腐蚀性循环水,陶瓷膜表现出色,可有效抵挡化学污染及物理磨损;③采用表面涂层、接枝等技术,改进膜的亲水性与抗污染本事,在膜表面刷上一层亲水性聚合物,可减少有机物以及微生物的吸附情况;④不同膜层复合技术,把不同材质的膜层复合在一起,展现各自的长处,把超滤膜与反渗透

膜予以复合结合,造就双层膜结构,既能有效排除悬浮物和胶体,还可提高盐分脱除率。

4.5 智能化监测与控制

采用智能化的监测管控技术,实时留意膜的运行状态,及时识别并处理膜污染情况:①采用安装压力传感器、流量计、浊度仪等仪器,实时追踪膜的运行参数动态,及时发觉膜污染的早期征兆;②自动化控制,依照监测到的相关数据,自动修正运行参数,诸如操作时的压力、回收率及水流速度,优化膜的运行状态,减轻膜污染发生的频次;③预警系统,设置预警的临界值,若膜的运行参数超出了正常范围,马上拉响警报,提示操作人员采取恰当的手段。

5 实际案例应用及经济效益

为了更直观展示超滤-反渗透组合工艺在化工循环水处理中的应用效果及其经济效益,详细分析一个实际案例,该案例来自某大型化工企业,该企业采用超滤-反渗透组合工艺处理循环水,处理规模为 $500\text{m}^3/\text{h}$ 。企业循环水系统在运行过程中面临悬浮物、胶体、有机物、硬度和微生物污染等多方面的挑战,处理难度较大。

5.1 进水水质

COD: 30-50mg/L; 浊度: 10-20NTU; 硬度: 300-500mg/L (以 CaCO_3 计); 微生物含量: 较高。

5.2 处理工艺

处理工艺包括预处理、超滤和反渗透三个主要环节。①预处理:采用混凝沉淀与多介质过滤作为预处理工艺。通过投加混凝剂,使水中的悬浮物和胶体颗粒凝聚成较大的颗粒,便于后续过滤去除。多介质过滤进一步降低进水中的悬浮物和胶体含量,使浊度降低至5NTU以下;②超滤:选用聚偏氟乙烯(PVDF)超滤膜,操作压力控制在0.1-0.2MPa。超滤膜有效去除水中的悬浮物、胶体和部分有机物,降低后续反渗透膜的污染负荷;③反渗透:采用聚偏氟乙烯(PVDF)超滤膜,操作压力调整到0.1-0.2MPa。超滤膜有效地去除了水中的悬浮物、胶体与部分有机物,减轻后续反渗透膜面临的污染负荷。

5.3 处理后的出水水质

COD: <10mg/L; 浊度: <1NTU; 硬度: <10mg/L; 微生物含量: 显著降低。

5.4 膜污染控制措施

①预处理优化:通过混凝沉淀与多介质过滤,显著降低了进水中的悬浮物及胶体含量,浊度降低到小于5NTU,有效降低了超滤膜的污染水平;②运行条件调整:控制超滤操作压力在0.1-0.2MPa,反渗透操作压力在1.5-2.0MPa,回收率控制在75%左右,维持

膜表面流速在3-5m/s,这些措施切实降低了膜污染的发生;③膜清洗:定期对超滤膜实施反冲洗及化学清洗,对反渗透膜采用酸碱交替的清洗法,清洗周期延长至3-4个月,膜通量恢复率达到了90%以上。

5.5 经济效益分析

通过优化预处理与运行条件,系统运行的稳定性大幅提高,膜污染得到切实管控。具体经济效益如下:

运行成本降低:膜的清洗周期延长,减少了清洗剂的使用量及清洗的频次,运行成本降低了约20%。

出水水质稳定:出水水质稳定符合标准,满足回用规定,切实提高了水资源的利用效率,实现了经济效益和环境效益的双赢。

系统运行稳定性提高:优化预处理与运行条件后,系统运行稳定性大幅提高,膜污染得到有效控制。

该案例表明,超滤-反渗透组合工艺在处理复杂水质的化工循环水时具有显著优势。通过优化预处理工序、调整运行状况和采用高效的膜清洗手段,可以有效控制膜污染,提高系统的运行效率与经济性。此外,应用新型膜材料及改性技术进一步增强了膜的抗污染性能,保证了系统的长期稳定运行。此案例为其他化工企业提供了宝贵的经验和参考范例。

6 结论

超滤-反渗透组合工艺在化工循环水处理中表现出色,通过优化预处理工艺、改进膜运行条件、采用高效膜清洗技术和新型膜材料及改性方法,有效控制了膜污染,运行成本降低约20%,显著提高了系统的运行效率和经济性。未来聚焦于开发高效、低成本的膜材料及改性技术,智能化膜污染监测与控制,资源回收与再利用,以及综合优化与系统集成,进一步提升系统的性能和经济效益,推动化工行业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 张书博.超滤膜技术在环境工程水处理中的应用研究[J].黑龙江环境通报,2024,37(11):166-168.
- [2] 施锡栋,裘洋波,任龙飞,等.半导体含氟废水“结晶-沉淀结合超滤-反渗透”的零排放工艺研究[J].水处理技术,2023,49(04):95-100.
- [3] 刘仁科,李永清.煤化工循环水系统中微生物、藻类的影响因素及控制[J].安徽化工,2022,48(03):95-98.
- [4] 王玉峰,张强.焦化废水深度处理工艺研究[J].清洗世界,2025(06):1-6.
- [5] 高鹏,刘忠涛.电厂废水治理中膜处理技术的质量影响因素分析[J].中国品牌与防伪,2025(06):173-175.

作者简介:

苏泽(1996.10-),男,汉族,河北石家庄人,承德石油高等专科学校,大专,环境监测与治理技术专业,助理工程师,研究方向:水处理。