

Research on Optimization of Industrial Water Treatment Production Process Based on Membrane Separation Technology

Shipu Feng

Guoneng Zhejiang Ninghai Power Generation Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315600, China

Abstract

Industrial wastewater is complex in composition and has a high concentration of pollutants. Traditional treatment processes are difficult to achieve the dual goals of efficient purification and resource recovery. Membrane separation technology, as a new type of separation technology based on the principle of selective osmosis, achieves efficient separation of pollutants from water through the retention function of membranes. It features high separation accuracy, simple operation and environmental friendliness, and has been widely applied in industrial wastewater treatment, seawater desalination, pure water preparation and other fields. However, problems such as membrane fouling, high treatment costs, and weak resistance to shock loads have restricted its large-scale application in industrial production. Therefore, conducting research on the optimization of industrial water treatment processes based on membrane separation technology holds significant practical significance and engineering value for enhancing treatment efficiency, reducing operating costs, and promoting the recycling of industrial water resources.

Keywords

Membrane separation technology; Industrial water treatment; Process optimization; Membrane fouling control; resource recycling

基于膜分离技术的工业水处理生产工艺优化研究

冯世镛

国能浙江宁海发电有限公司, 中国·浙江 宁波 315600

摘 要

工业废水成分复杂、污染物浓度高, 传统处理工艺难以实现高效净化与资源回收的双重目标。膜分离技术作为一种基于选择性渗透原理的新型分离技术, 通过膜的截留作用实现污染物与水的高效分离, 具有分离精度高、操作简便、环境友好等特点, 已广泛应用于工业废水处理、海水淡化、纯水制备等领域。然而, 膜污染、处理成本高、抗冲击负荷能力弱等问题, 制约了其在工业生产中的规模化应用。因此, 开展基于膜分离技术的工业水处理工艺优化研究, 对提升处理效率、降低运行成本、推动工业水资源循环利用具有重要的现实意义与工程价值。

关键词

膜分离技术; 工业水处理; 工艺优化; 膜污染控制; 资源回收

1 引言

随着中国工业经济的高速发展, 钢铁、化工、电子等工业行业的用水量与排水量持续攀升, 据《2024 年中国水资源公报》数据显示, 2023 年全国工业用水量达 1057 亿立方米, 占总用水量的 19.2%, 而工业废水排放量占全国废水总排放量的 34.5%, 其中部分废水含有重金属、难降解有机物等污染物, 若未经有效处理直接排放, 将对水资源环境造成严重破坏, 同时也加剧了水资源供需矛盾。在此背景下, 开发高效、稳定、经济的工业水处理技术, 实现水资源的循

环利用, 已成为工业领域践行“双碳”目标、推动绿色转型的必然要求。

2 膜分离技术的基本原理与分类

2.1 核心分离原理

膜分离技术的核心原理是利用膜的选择性渗透作用, 在压力差、浓度差或电位差等驱动力作用下, 使水体中的污染物与水实现分离。膜作为分离介质, 其孔径大小、表面电荷特性及亲疏水性等参数, 直接决定了分离效率与截留效果。与传统分离技术相比, 膜分离过程具有无相变、能耗低、分离精度可控等优势, 可实现从微米级悬浮物到纳米级离子的高效截留。

【作者简介】冯世镛 (1982-), 男, 中国浙江苍南人, 硕士, 工程师, 从事电厂化学及环保专业研究。

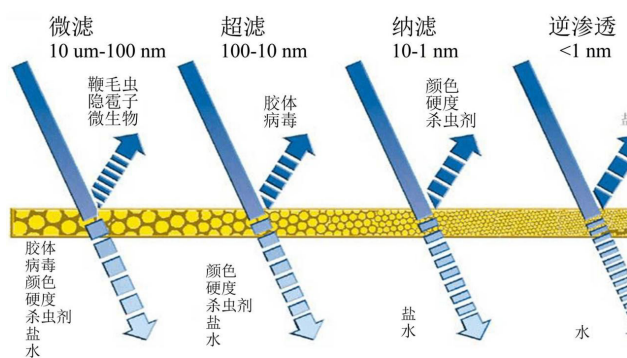


图1 膜分离技术原理

2.2 主要技术类型及应用特性

根据膜孔径大小与分离机理的差异,工业水处理中常用的膜分离技术可分为微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)、反渗透(RO)及电渗析(ED)等,各类技术的应用特性如下:

微滤(MF):微滤(MF)的膜孔径范围为 $0.1\text{--}10\mu\text{m}$,是处理流程的“前置卫士”,主要截留水体中肉眼可见的悬浮物、胶体颗粒及活性污泥、藻类等微生物,其运行依赖 $0.01\text{--}0.2\text{MPa}$ 的压力差驱动,能耗较低。该技术操作简便、成本可控,在工业水处理中多用于预处理环节,核心作用是保护后续精密膜组件免受大颗粒磨损。例如在化工废水处理系统中,MF可高效截留悬浮颗粒,将出水悬浮物含量稳定控制在 1mg/L 以下,为后续深度处理筑牢基础。

超滤(UF):超滤(UF)的膜孔径缩至 $0.001\text{--}0.1\mu\text{m}$,截留精度显著提升,可有效捕获蛋白质、多糖等大分子有机物,以及细菌、病毒等微生物,操作压力需提升至 $0.1\text{--}0.5\text{MPa}$ 。其应用场景广泛覆盖食品加工、循环水回用等领域,在啤酒厂废水处理中表现突出——啤酒生产产生的废水中含大量有机残渣,经UF处理后,不仅浊度大幅降低,COD去除率更可达85%以上,处理后的水可直接用于厂区绿化或设备冲洗。

纳滤(NF):纳滤(NF)膜孔径仅 $0.0001\text{--}0.001\mu\text{m}$,兼具超滤的截留性能与反渗透的脱盐潜力,可精准截留二价及以上离子、染料等小分子有机物,操作压力为 $0.5\text{--}1.5\text{MPa}$ 。在印染废水处理中,NF展现出独特优势,既能实现染料与盐的高效分离,染料截留率超98%,又能回收废水中的盐资源循环用于染色生产,既降低污染物排放,又节约原料成本,实现环保与效益的双赢。

反渗透(RO):膜孔径小于 $0.0001\mu\text{m}$,能截留几乎所有离子、小分子有机物及微生物,操作压力为 $1.0\text{--}4.0\text{MPa}$,是目前海水淡化、超纯水制备的核心技术。在电子工业中,RO+EDI(电去离子)组合工艺可将水的电阻率提升至 $18\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上,满足芯片生产的高纯水需求。

电渗析(ED):利用离子交换膜的选择透过性,在电场作用下实现离子的定向迁移,主要用于高盐废水脱盐,操作压力较低($0.2\text{--}0.5\text{MPa}$)。在煤化工高盐废水处理中,ED可将盐含量从 10000mg/L 降至 1000mg/L 以下,为后续

蒸发结晶减少能耗。

3 工业水处理中膜分离工艺的应用现状与瓶颈

3.1 应用现状

目前,膜分离技术已在化工、电子、钢铁、食品等多个工业领域实现规模化应用,形成了“预处理+膜分离+深度处理”的典型工艺模式。以化工行业为例,采用“混凝沉淀+UF+RO”工艺处理农药生产废水,可使COD去除率达到92%,氨氮去除率超过95%,处理后的水可用于生产循环补水;在电子工业中,“预处理+RO+EDI”工艺已成为超纯水制备的标准流程,占电子工业纯水制备系统的70%以上。

从应用规模来看,2024年中国工业水处理膜市场规模达到380亿元,其中RO膜占比最高(45%),其次为UF膜(25%)和NF膜(15%)。在政策推动下,膜技术在高盐废水处理、再生水回用等领域的应用比例持续提升,如京津冀地区工业企业再生水回用率已达到40%,其中膜分离技术占主导地位^[1]。

3.2 主要瓶颈问题

3.2.1 膜污染问题突出

膜污染是制约膜分离工艺稳定运行的核心问题,主要包括无机污染(钙、镁离子形成的结垢)、有机污染(腐殖酸、油脂等吸附)及生物污染(微生物滋生形成的生物膜)。工业废水中污染物成分复杂,膜污染速率远高于市政污水,如煤化工废水处理中,RO膜运行3个月后通量即下降50%,需频繁进行化学清洗,不仅缩短膜寿命(从3年降至1.5年),还增加了化学药剂消耗与污泥排放量。

3.2.2 处理成本偏高

膜分离工艺的成本主要包括膜组件购置成本、能耗成本及运行维护成本。目前,中国高端膜组件(如抗污染RO膜)仍依赖进口,单价达到 $800\text{--}1200\text{元}/\text{m}^2$,占设备总投资的30%~40%;在能耗方面,RO工艺的单位能耗为 $2.5\text{--}4.0\text{kWh}/\text{m}^3$,高于传统生物处理工艺($0.5\text{--}1.0\text{kWh}/\text{m}^3$);此外,膜清洗、药剂消耗等维护成本占运行成本的25%以上,导致工业企业应用意愿受限。

3.2.3 抗冲击负荷能力弱

工业废水的水质、水量波动较大,如化工企业间歇生产导致废水中COD浓度在 $500\text{--}5000\text{mg/L}$ 之间波动,传统膜分离工艺难以适应这种冲击,易出现膜通量骤降、截留率下降等问题。例如,某印染厂因染料投料波动,导致进入UF系统的废水pH值从7.0升至11.0,24小时内UF膜通量下降60%,需停机进行酸洗恢复,造成生产损失。

3.2.4 资源回收效率低

工业废水中含有大量可回收资源(如重金属、贵金属、化工原料等),但传统膜工艺多以水质净化为目标,资源回收效率较低。例如,电镀废水中含有镍、铜等重金属,采用

单一 RO 工艺仅能实现水的回用,重金属离子浓缩于浓水中,需进一步处理,无法直接回收利用;食品加工废水中的蛋白质、多糖等资源,因膜截留精度不足或工艺设计不合理,回收率低于 50%^[2]。

4 基于膜分离技术的工业水处理工艺优化策略

4.1 预处理工艺优化, 强化污染物去除

预处理是控制膜污染的关键环节,通过优化预处理工艺,可有效去除水体中的悬浮颗粒、胶体、有机物及部分离子,降低膜污染风险。具体优化措施包括:

一是采用“混凝-吸附-微滤”复合预处理工艺。针对高有机物工业废水,在混凝环节选用聚合氯化铝(PAC)与聚丙烯酰胺(PAM)复合药剂,投加量分别为 50-80mg/L 和 1-2mg/L,可使 COD 去除率提升至 60% 以上;吸附环节采用改性活性炭,其比表面积达到 1200m²/g,对腐殖酸等有机物的吸附容量提升 30%;后续微滤工艺可进一步去除絮体颗粒,使进入 UF 系统的废水 SDI(污染指数)降至 3 以下,显著降低膜污染速率。

二是针对高盐废水,增设软化预处理单元。采用石灰-纯碱软化法,去除水中的钙、镁离子,控制钙离子浓度低于 50mg/L,可有效防止 RO 膜结垢;对于含硅废水,添加聚合硫酸铝铁作为除硅剂,除硅率达到 90% 以上,避免硅垢在膜表面沉积。

三是引入高级氧化预处理技术。对于难降解有机物含量高的工业废水(如制药废水),采用芬顿氧化或臭氧氧化技术,氧化降解大分子有机物,使废水 B/C 比从 0.2 提升至 0.5 以上,不仅降低膜有机污染风险,还提高了后续工艺的可生化性。

4.2 膜组件优化, 提升性能与寿命

4.2.1 膜材料改性与新型膜开发

通过膜材料表面改性,提升膜的抗污染性与分离性能。采用亲水性改性技术(如接枝聚乙二醇),使 RO 膜表面接触角从 85° 降至 30° 以下,减少有机物吸附;采用抗污染涂层技术,在 UF 膜表面涂覆纳米二氧化钛涂层,利用其光催化作用抑制微生物生长,生物污染速率降低 40%。

开发新型膜组件,如中空纤维帘式 MBR 膜,采用 PVDF(聚偏氟乙烯)材料,膜丝直径从 0.5mm 增至 0.8mm,抗拉强度提升 50%,同时优化膜丝排列方式,使曝气效率提升 20%,减少膜丝缠绕与污染;另外,新型正渗透(FO)膜的开发,以浓度差为驱动力,单位能耗仅为 RO 膜的 1/3,在高盐废水处理中具有广阔应用前景^[3]。

4.2.2 膜组件结构优化

优化膜组件内部流道设计,提升传质效率,减少浓差极化。将传统 RO 膜组件的平行流道改为螺旋流道,使水流扰动增强,浓差极化系数从 0.8 降至 0.3;采用错流过滤方式替代死端过滤,控制膜表面流速在 1.5-2.0m/s,及时带走膜表面污染物,膜通量稳定率提升 35%。

此外,针对不同水质特点选择合适的膜组件类型,如处理含油废水时选用板式 UF 膜,其表面光滑、易清洗,油污去除率达到 99%;处理高粘度废水时选用管式膜组件,避免膜孔堵塞,运行稳定性提升 50%。

4.3 运行参数优化, 实现高效低耗运行

通过正交试验与响应面法,优化膜分离工艺运行参数,确定最佳操作条件。在 RO 工艺中,针对化工废水处理,优化操作压力为 2.5MPa、温度为 25℃、pH 值为 6.5,此时 COD 去除率达到 98%,单位能耗降至 2.8kWh/m³,较传统参数节省能耗 15%;在 UF 工艺中,控制跨膜压差为 0.15MPa、反洗周期为 30 分钟、反洗时间为 60 秒,膜通量衰减速率降低 30%。

引入智能控制技术,实现运行参数的实时调控。通过在线监测水质指标(COD、浊度、SDI 等)与膜运行参数(通量、压力、温度等),构建模糊控制模型,当废水浊度突然升高时,系统自动提升混凝剂投加量并降低膜运行通量,避免膜污染加剧;利用 PLC 控制系统实现膜清洗的自动化,根据膜污染程度精准控制清洗药剂浓度与清洗时间,化学药剂消耗减少 20%。

4.4 系统集成优化, 提升资源回收效率

4.4.1 “膜+”组合工艺构建

构建“膜+吸附”“膜+离子交换”“膜+蒸发结晶”等组合工艺,实现水质净化与资源回收的双重目标。在电镀废水处理中,采用“UF+NF+离子交换”组合工艺,UF 去除悬浮物,NF 截留重金属离子,离子交换柱回收浓缩液中的镍、铜离子,重金属回收率达到 95% 以上,回收的金属盐可直接回用于电镀生产;在煤化工高盐废水处理中,采用“RO+ED+蒸发结晶”组合工艺,RO 实现水回用,ED 进一步浓缩盐溶液,蒸发结晶得到工业级氯化钠,盐回收率达到 90%。

4.4.2 浓水资源化利用

针对膜分离工艺产生的浓水,开发分级处理与资源化技术。对于低浓度浓水(盐含量<5000mg/L),采用“高级氧化+UF”工艺处理后回用于循环水系统;对于高浓度浓水(盐含量>10000mg/L),采用正渗透(FO)技术进一步浓缩,浓缩液用于蒸发结晶制盐,淡水回用于生产;在制药废水浓水处理中,采用纳滤膜分级截留,分离出的有机溶剂(如甲醇、乙醇)经精馏回收后重新用于生产,资源回收收益覆盖处理成本的 60%^[4]。

5 结语

本文通过对膜分离技术在工业水处理中的应用研究,明确了膜污染、处理成本高、抗冲击负荷弱等核心瓶颈问题,并从预处理、膜组件、运行参数及系统集成四个维度提出优化策略。未来,膜分离技术在工业水处理中的发展方向趋向低碳化发展,开发低能耗膜技术,如正渗透、膜蒸馏,结合新能源,如光伏、风电供电,实现水处理过程的碳中和,构

建“水质净化 - 资源回收 - 梯级利用”的一体化工艺体系，实现工业废水的资源化循环利用，推动工业绿色低碳转型。

参考文献

- [1] 侯亚洲.反渗透设备在工业水处理中的应用及维护[J].设备管理与维修,2024,(18):79-81.
- [2] 谭冲,李俊生,尹煜泓.食品工业废水处理技术及工程实例[M].化学工业出版社:202407:218.
- [3] 顾跃雷.膜分离技术在工业水处理中的应用[J].山西化工,2024,44(04):184-185+246.
- [4] 李剑锋.膜分离技术在工业水净化中的应用研究[J].信息记录材料,2020,21(01):25-26.