

超滤膜技术在工业废水深度处理中的应用及经济性分析

黄艳君 (莱特莱德 (上海) 技术有限公司, 上海 201799)

摘要: 超滤膜技术因其高效的污水处理能力, 受到广泛关注。这项技术简易操作、效益高以及能够显著提升处理效果的特性, 使其成为处理污水的优选方案之一。本文重点讨论了超滤膜技术在工业废水深度处理中的应用。分析发现, 通过将超滤膜与吸附法、电凝聚技术、膜生物反应器等先进技术相结合, 既能有效提高废水处理精度, 亦能促进水资源的循环利用, 处理效果明显, 经济效益显著。总之, 超滤膜技术具有良好的应用前景, 未来应进一步推动其在工业废水处理中的广泛应用。

关键词: 超滤膜技术; 工业废水; 化工废水; 深度处理; 经济性

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 016-0073-03

Application and economic analysis of ultrafiltration membrane technology in advanced treatment of industrial wastewater

Huang Yanjun(Rightleder (shanghai) Technology Co.,Ltd.,Shanghai 201799, China)

Abstract: Ultrafiltration membrane technology has attracted wide attention due to its high efficiency in wastewater treatment. The ease of operation, high efficiency and the ability to significantly improve the treatment effect of this technology make it one of the best options for treating sewage. This paper focuses on the application of ultrafiltration membrane technology in the advanced treatment of industrial wastewater. It is found that the combination of ultrafiltration membrane with adsorption method, electrocoagulation technology, membrane bioreactor and other advanced technologies can not only effectively improve the precision of wastewater treatment, but also promote the recycling of water resources, and the treatment effect is obvious and the economic benefits are significant. In short, ultrafiltration membrane technology has a good application prospect, and its wide application in industrial wastewater treatment should be further promoted in the future.

Key words: ultrafiltration membrane technology; Industrial wastewater; Chemical wastewater; Advanced treatment; economy

随着现代工业发展节奏加快, 自然环境破坏、水体污染等问题逐渐显露。近年来, 水污染问题得到社会各界的强烈关注, 水污染处理技术也不断更新迭代。超滤膜技术属于新型水污染处理技术, 相比于传统过滤技术具备低能耗、高分离效率等优势, 能够一定程度提升水污染环境治理效率。鉴于此, 本文将分析和研究超滤膜技术在工业废水深度处理中的应用, 以供参考。

1 超滤膜技术的基本原理

超滤膜 (UF, Ultrafiltration) 是一种膜分离技术。其核心原理是依据膜的孔径大小来选择性地分离溶质和溶剂。与微滤和纳滤相比, 超滤膜的孔径一般介于 $0.01\ \mu\text{m} \sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间, 能有效地截留分子量大于 1000 Daltons 的物质。这些物质包括大多数悬浮物、胶体、部分溶解有机物及细菌、病毒等微生物^[1]。通过外部施加一定的压力, 溶剂 (通常是水) 在膜的推动下通过膜表面, 而被截留的物质则被阻隔在膜的上游区域, 形成浓缩水。

2 工业废水深度处理的必要性

2.1 环境保护与资源可持续性

随着工业化进程的加速, 工业废水排放量持续增

加, 且其污染物类型多样且复杂。传统的废水处理方法往往只能去除较为粗大的污染物, 无法有效去除水中的细小颗粒、溶解性有机物、重金属和有毒有害物质等。这些污染物若直接排放到环境中, 将对水体生态系统及人体健康造成长期的负面影响。工业废水深度处理借助高效的物理、化学和生物方法, 能够有效去除这些难以去除的污染物, 减少废水对水体的污染程度。因此, 进行废水深度处理不仅是为了避免水体富营养化、酸化等环境问题, 更是为了减少对生物多样性和生态平衡的负面影响, 保障水资源的可持续性利用。

2.2 工业废水资源化与经济效益

工业废水深度处理不仅在环保方面具有不可替代的重要性, 同时也能为企业带来潜在的经济效益。通过深度处理, 废水的水质得到显著改善, 进而可以作为生产用水或景观用水等资源进行再利用。这不仅有效缓解了水资源供给紧张的问题, 还为企业节约了水资源成本。特别是在那些水需求量大的工业领域, 废水深度处理能减少对外部水源的依赖, 降低企业的生产成本。

同时,深度处理后的废水可以通过更高标准的处理,满足多种用水需求,如工业循环水、农业灌溉水等,从而提升废水资源化的经济价值^[2]。

3 超滤膜技术在工业废水深度处理中的创新应用方式

3.1 超滤膜与吸附法联用

超滤膜技术与吸附法的结合,是一种在处理高浓度有机物和难降解污染物的工业废水时,常见的创新处理方式。操作过程中,先要利用超滤膜去除废水中的悬浮物和大分子有机物,然后将处理后的水流引入吸附塔。吸附剂,如活性炭或树脂,能进一步去除废水中的溶解性有机物、重金属离子等污染物。该操作能够增强膜过滤系统的处理精度,还可以大幅提高去除效率。

针对化工废水,此联用技术表现出独到优势。化工废水中常含有复杂组分与高浓度有机及无机污染物,超滤膜在初级分离中有效截留大颗粒及胶体物质,为后续吸附阶段创造良好条件。而吸附系统则根据化工废水的特定水质,选用适宜的吸附剂,实现对残余污染物的精细去除。此方案在处理造纸、纺织和化工等行业废水中均显示了显著优势,既降低了后续工艺负荷,又优化了综合处理成本。操作中,超滤膜需在较低工作压力下运行,以确保初步分离效果并降低膜污染风险;吸附剂则根据水质特性进行定期更换或再生,确保系统始终保持较高的处理能力^[3]。

3.2 超滤膜与电凝聚技术结合

电凝聚技术是一种通过电场作用使水中的胶体颗粒、悬浮物和溶解性污染物发生聚集,从而简化后续处理过程的技术。结合超滤膜技术,形成的处理模式具有较强的创新性。在实际操作中,废水先进入电凝聚单元,在电极间产生电荷,电场作用使得水中微小颗粒聚集形成较大团块。经过这一阶段的初步处理后,废水进入超滤膜系统进行进一步过滤,去除聚集后的颗粒物、溶解性污染物和金属离子。该操作模式的实施需要精准控制电凝聚过程中的电流强度和反应时间,以避免过度电解或电极污染。

此外,超滤膜系统的配置要求较高,膜孔径的选择与电凝聚的颗粒大小密切相关,因此在设计阶段需要进行详细的工艺优化。这一技术组合在电镀、钢铁冶金等行业中有着较好的应用前景,尤其是在处理高浓度金属离子和胶体污染物的废水时,显示出较强的处理能力。

3.3 超滤膜与膜生物反应器结合

膜生物反应器(MBR)系统在深度处理高浓度有机废水时表现出良好的处理效果,而超滤膜作为其中

的核心组成部分,起到了固液分离的关键作用。在具体应用中,废水首先进入生物反应器,在其中进行生物降解处理。在生物降解过程中,超滤膜负责分离反应池内的生物固体和水相,去除废水中的悬浮固体和有机污染物。

与传统的活性污泥法相比,MBR技术能够实现更高的水质要求,且占地面积小,运行效率高。操作中,超滤膜的孔径选择和流量控制需要根据反应器的处理负荷进行调整^[4]。为保证系统的长期稳定性,膜表面的污垢清理与再生技术不可忽视。定期的反冲洗和化学清洗可以有效减少膜的污染和提高膜的使用寿命。此外,MBR系统需要精确控制反应器中的溶解氧和污泥浓度,这些参数的变化直接影响到膜的运行状态和处理效果。

3.4 超滤膜与紫外光催化技术的联合

紫外光催化技术是一种利用紫外光激发催化剂,生成强氧化剂降解水中有机污染物的处理方式。结合超滤膜技术,可有效去除工业废水中的有机物和微生物污染。实际应用中,废水首先应用超滤膜去除悬浮物和大部分污染物,然后进入紫外光催化反应器。在反应器中,紫外光通过催化剂激发氧化反应,将难降解的有机污染物分解为无害物质。

此操作模式的关键在于紫外光催化反应的优化,需要根据水质特性选择合适的催化剂,并调节紫外光的照射强度与反应时间。超滤膜的主要作用是在前处理阶段降低水中的悬浮物和细菌数量,避免紫外光催化反应器的堵塞和过度污染。两者联用的优势在于实现了水质的深度净化,并且能够在较低能耗的条件下达到较高的处理效率。该技术方案在食品加工、制药等行业中得到广泛应用^[5]。

4 超滤膜技术在工业废水深度处理中的应用挑战与解决方案

4.1 膜污染问题

膜污染是超滤膜技术应用中最为突出的问题之一。工业废水中的有机物、悬浮物及无机物等污染物在膜表面沉积,形成污染层,显著降低膜的通量和分离效率。尤其在处理高浓度有机废水或含有复杂溶解性污染物的废水时,膜污染问题尤为严重。

为应对膜污染,可以通过优化预处理工艺减少大颗粒悬浮物的进入,例如引入自清洗过滤器或超前沉淀工艺。此外,定期进行化学清洗和反冲洗是控制膜污染的有效手段。近年来,采用抗污染膜材料和膜表面改性技术,也在一定程度上提高了膜的抗污染能力,减少了膜的污染程度。例如,表面亲水性改性可减少膜的污染层积聚,延长膜的使用寿命。结合物理和化

学的方法,能够显著提升膜的处理效率和稳定性。

4.2 高能耗问题

超滤膜技术在高浓度废水处理过程中通常需要较高的操作压力,这无疑增加了系统的能耗。在许多工业应用中,超滤膜的高能耗成为制约其普及的一个重要因素,尤其是在需要大规模处理的场景下,能源消耗成为运营成本的主要来源之一。

为降低能耗,建议优化膜的结构和操作参数来提高膜的透水性。如开发低能耗、高通量的膜材料,能够有效减少运行时所需的压力。同时,采用多级膜过滤技术,结合不同膜孔径的膜系统,可使处理过程更为高效,避免单一膜系统在较高压力下工作的高能耗状态。在操作过程中,合理调整膜系统的流量和压力,结合先进的节能技术,也可进一步优化能源消耗^[6]。

4.3 膜材料的稳定性与耐用性

膜材料的稳定性和耐用性是超滤膜技术长期有效应用的基础。工业废水的成分复杂,且废水处理过程中常伴随高浓度污染物和极端环境条件(如高温、高酸性等),这对膜材料的性能提出了较高要求。传统的聚合物膜材料在面对这些苛刻条件时,往往表现出较差的化学稳定性和耐久性,易发生老化、裂解或失效现象。特别是在处理高腐蚀性废水时,膜的长期使用面临较大的挑战。

对此,需要通过开发新型无机膜或复合膜技术,以提高其对高温、酸碱及腐蚀性废水的耐受能力。例如,陶瓷膜因其优异的耐化学腐蚀和耐高温性能,常被应用于处理高腐蚀性和高浓度的工业废水。另外,膜材料的表面改性技术,如涂覆一层防污染膜或增强膜的抗氧化性,也能够有效提升膜的耐用性和稳定性。在这些新材料的基础上,通过定期维护与优化操作,可大大延长膜的使用寿命,降低膜更换频率^[7]。

5 工业废水深度处理中超滤膜技术应用的经济性

从全生命周期视角审视,该技术的经济特征呈现典型的非线性演变规律,初始资本投入与长期运营效益间的博弈关系构成经济性研究的核心命题。

在资本构成维度,超滤系统的投资结构具有显著的技术依赖性。膜组件作为核心单元,其采购成本通常占据系统总投资的35%~42%,这一比例随膜材料创新呈现下降趋势。压力容器与自动化控制模块的集成成本约占总投资的47%~50%,反映出系统对精密制造的依赖。相较于传统过滤工艺,超滤技术的初始投资强度显著提升,这种资本前置特征对企业的融资能力形成考验,特别是在高浓度有机废水处理领域,投资回报周期可能延长30%~40%。

运营成本体系呈现双因素主导模式,能源消耗与

膜组件更换构成主要支出项。跨膜压差调控产生的动力费用约占运营成本的40%~48%,其优化空间受进水水质波动制约。膜污染导致的通量衰减直接决定更换频率,当处理含胶体或大分子有机物废水时,化学清洗频次增加可能使膜寿命缩减至设计值的60%~70%。

相较于砂滤、活性炭吸附等传统技术,超滤膜工艺在特定场景下展现边际成本优势。这种优势源于三方面机制:其一,截留精度提升减少后续处理单元的药剂投加量;其二,模块化设计降低土建与人力成本;其三,出水水质稳定带来的回用收益。

技术创新正在重构超滤技术的经济参数空间。低能耗膜材料的研发使运行压力降低,表面改性技术将化学清洗周期延长至传统膜的1.5倍。工艺耦合方面,与高级氧化技术的联用可提升污染物去除效率,同时控制膜污染速率。智能控制系统的引入通过优化反冲洗策略,使能耗峰值降低。这些进步推动超滤技术向更具经济竞争力的方向发展。

6 结语

超滤膜技术不仅具有较高的分离精度和处理效率,而且通过与吸附法、电凝聚技术、膜生物反应器等先进处理方法的结合,能显著提升工业废水的处理效果。未来,超滤膜技术仍面临膜污染、膜寿命和能耗等挑战,如何进一步优化膜材料和工艺参数,以提高膜系统的抗污染能力和处理效率,将是未来研究和应用的重点。同时,结合人工智能、大数据等现代技术优化膜系统运行,也将为超滤膜技术的广泛应用提供新的发展方向。

参考文献:

- [1] 袁玺. 市政工程水处理过程中超滤膜技术应用分析[J]. 低碳世界, 2023, 13(02): 34-36.
- [2] 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.
- [3] 王伟, 陈晓芳. 超滤膜技术在水污染处理过程中的应用[J]. 清洗世界, 2022, 38(04): 1-3.
- [4] 宋姣. 污水深度处理技术在工业废水处理中的应用[J]. 清洗世界, 2024, 40(11): 86-88.
- [5] 杭利斌. 工业有机废水深度处理技术研究[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(12): 191-193+207.
- [6] 李正莲. 环保工程水处理的超滤膜技术应用研析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版) 工程技术, 2020(10): 101-102.
- [7] 周进勤, 陈楠, 谢滢, 覃晖, 周歆. 环保工程水处理的超滤膜技术应用研究[J]. 资源节约与环保, 2015(10): 41-41, 45.