

Performance evaluation of MBR membrane process in advanced treatment and reuse of industrial wastewater

Yinghao Ying

China Stamp Ink Co., Ltd., Shanghai, 200120, China

Abstract

With the growing demand for industrial wastewater treatment, MBR membrane technology has gained widespread application in metal surface treatment industries due to its superior advanced treatment efficiency and stable effluent quality. This study analyzes a wastewater treatment system employing an anaerobic-aerobic-MBR membrane process at a metal surface treatment facility. The system, with a daily processing capacity of 150 cubic meters, addresses high COD levels (3000-4000 mg/L) and foam issues in wastewater. The effectiveness of MBR membranes in removing COD, suspended solids, foam, and other pollutants was evaluated. Through comprehensive analysis of membrane selection, flux calculation, pollutant removal performance, and cleaning/maintenance procedures, this paper explores the advantages and challenges of MBR membrane technology in practical applications. The research demonstrates that MBR technology can significantly enhance wastewater treatment efficiency while demonstrating promising reuse potential. Finally, the study outlines prospects for reclaimed water reuse after MBR treatment, providing valuable references for advancing wastewater treatment technologies.

Keywords

MBR membrane process; wastewater treatment; membrane flux; pollutant removal; reclaimed water reuse

MBR 膜工艺在工业废水深度处理与回用中的性能评估

应英豪

中钞油墨有限公司, 中国 · 上海 200120

摘 要

随着工业废水处理需求的不断增加, MBR膜工艺因其优异的深度处理效果和稳定的出水质量在金属表面处理行业中得到广泛应用。本文基于某金属表面处理企业的抛光清洗废水, 分析了采用厌氧+好氧+MBR膜处理工艺的废水处理系统。该系统每日处理能力为150立方米, 针对废水中的高COD (3000至4000mg/L) 和泡沫问题, 评估了MBR膜在去除COD、悬浮物、泡沫及其他污染物方面的效果。通过对膜选择、膜通量计算、污染物去除效果及清洗与维护工作的深入分析, 探讨了MBR膜在实际应用中的优势与挑战。研究表明, MBR膜工艺能够有效提升废水的处理效果, 并具有良好的回用潜力。最后, 本文展望了MBR膜出水后的中水回用前景, 为废水处理技术的进一步发展提供参考。

关键词

MBR膜工艺; 废水处理; 膜通量; 污染物去除; 中水回用

1 引言

随着环保法规的不断严格与工业可持续发展的要求提升, 金属表面处理行业对废水处理技术提出了更高的要求。传统的废水处理方法在面对高COD、高悬浮物和大量泡沫等问题时, 往往难以满足日益严格的排放标准。膜生物反应器 (MBR) 作为一种新型的废水处理技术, 结合了膜分离与生物降解的优势, 在处理高浓度废水方面显示了巨大的潜力。尤其是在金属表面处理行业, MBR膜工艺能够有效地去除水中的有机物、悬浮物及泡沫, 并且处理后的水质符合中水回用标准, 进一步提升了资源的循环利用率。

【作者简介】应英豪 (1984-), 男, 本科, 工程师, 从事水污染及大气污染治理研究。

2 MBR 膜工艺概述

2.1 MBR 膜工艺的基本原理

MBR膜工艺结合了膜分离与生物降解技术, 在废水处理过程中实现了固液分离和有机物降解的双重作用。该工艺采用生物反应器与膜组件结合的方式, 通过生物降解过程去除废水中的溶解性有机物、氮磷等污染物, 同时膜组件则提供了高效的固液分离。MBR膜具有较小的孔径, 能够有效过滤废水中的悬浮物、胶体物质及微生物, 保证了出水水质的稳定性。膜的选择主要考虑其孔径、通量、化学稳定性和耐污性。膜通量的计算可以通过流量与膜面积的比值来确定, 通常在实际应用中, 以反渗透膜或超滤膜为主, 根据水质与处理要求进行选择。

2.2 MBR 膜在废水处理中的应用现状

MBR 膜工艺在工业废水处理领域逐渐得到了广泛应用，尤其是在处理高浓度有机废水和含有高 COD、氮磷的废水中，展现出优异的处理效果。与传统的污水处理方法相比，MBR 膜工艺能够显著提高废水处理的效率和水质，且不易受到外界环境变化的影响。许多工业领域，包括食品加工、化工、金属表面处理等行业，均采用 MBR 膜工艺处理生产废水。特别是在金属表面处理行业，废水通常含有较高的有机物与金属离子，使用 MBR 膜工艺可实现更高的 COD 去除率与水质稳定性。此外，随着膜技术的不断发展，MBR 膜的性能逐渐提升，膜的成本逐步降低，使其在更多领域得到了应用。

3 金属表面处理废水的特点与处理工艺

3.1 抛光清洗废水的污染特征

抛光清洗废水在金属表面处理过程中是主要的废水来源之一，通常富含高浓度的有机物（COD 值高达 3000-4000mg/L）、悬浮物、油脂及表面活性剂。由于抛光过程中使用的清洗剂和溶剂种类繁多，这些化学物质通常容易与废水中的金属离子结合，形成复合污染物，进一步增加了废水的处理难度。此外，由于废水中泡沫较多，传统的处理方法难以有效去除这些泡沫，影响了废水的正常处理。此类废水的高 COD 和泡沫问题使得其在处理过程中需要采用特殊的膜处理技术。

3.2 现有废水处理流程的分析

目前，金属表面处理废水的处理流程通常包括初步的物理化学处理、厌氧生化处理、好氧生化处理以及膜生物反应器（MBR）处理等阶段。初步处理阶段通过沉淀与絮凝去除大部分悬浮物与油脂，虽然能够有效减少废水中的有机物浓度，但对于高 COD 废水和泡沫的去除效果较差。为了提高废水处理效果，现代处理设施采用了厌氧+好氧+MBR 膜工艺的组合，其中厌氧处理有助于降解废水中的大部分有机物，随后通过好氧处理进一步去除残余的有机物，MBR 膜系统则作为最后一道防线，利用膜的微滤或超滤性能，去除残留的悬浮物及细小颗粒，从而有效提高出水水质。

4 MBR 膜工艺的性能评估与关键参数

4.1 膜选择与膜通量计算

膜的选择是 MBR 膜工艺中至关重要的一步，合理的膜选择不仅能提高废水处理效率，还能减少膜污染。膜的选择依据其孔径、通量、耐污性等因素。一般情况下，膜的孔径通常选择在 0.1-0.4μm 之间，以便有效去除废水中的悬浮物、胶体物质和细菌。膜的通量是膜分离效率的重要指标，膜通量可以通过流量和膜面积的比值计算：

$$J = \frac{Q}{A}$$

其中，J 为膜通量 (L/m² · h)，Q 为膜的渗透流量 (L/h)，A 为膜的有效过滤面积 (m²)。膜通量越高，膜的分离效率越好，处理废水的能力越强。

4.2 废水中 COD、泡沫及其他污染物的去除效果

MBR 膜工艺的效果评估可以通过废水进入系统前后的污染物浓度数据对比来体现。以下表格展示了某金属表面处理废水在进入 MBR 膜系统前后的 COD、泡沫浓度、悬浮物浓度等污染物的变化情况。在进入 MBR 系统前，废水中的 COD 值通常较高，达到 3000-4000 mg/L，而处理后的 COD 通常能够降至 300 mg/L 左右，去除率高达 90% 以上。废水中的泡沫问题也是 MBR 膜工艺处理中的一个关键指标，处理前泡沫浓度高达 500 mg/L，而经过 MBR 膜处理后，泡沫浓度显著减少，降至 50 mg/L 左右。悬浮物浓度同样显著下降，进入 MBR 系统前废水中的悬浮物浓度为 150 mg/L，经过处理后降至 10 mg/L，去除效果非常明显。此外，MBR 膜工艺还能够有效去除废水中的其他污染物如氮、磷等，进一步提高了水质。这些数据表明 MBR 膜工艺能够显著降低废水中的多种污染物浓度，确保出水水质符合中水回用标准。通过数据对比，可以看到 MBR 膜系统在提高废水处理效率和水质稳定性方面的显著优势，详见表 1。

表 1 废水中 COD、泡沫及其他污染物的去除效果

污染物类型	处理前（进水）	处理后（出水）	去除率（%）
COD (mg/L)	3500	300	91.43
泡沫浓度 (mg/L)	500	50	90
悬浮物浓度 (mg/L)	150	10	93.33
氨氮浓度 (mg/L)	40	5	87.5
BOD5 (mg/L)	500	20	96

4.3 MBR 膜处理系统的性能参数分析

MBR 膜系统的性能评估涉及多个重要参数，包括膜通量、污染物去除率、膜污染情况及系统运行的稳定性等。膜通量是评估膜分离效率的关键指标，膜通量通常随着膜污染的增加而下降。膜通量变化可以通过以下公式来描述：

$$J_{\text{inal}}=J_{\text{inital}} \times (1-P_{\text{clean}})$$

其中，J_{inal} 和 J_{inital} 分别为清洗前后的膜通量，P_{clean} 为膜清洗效率（%）。该公式用于计算膜清洗后的通量恢复情况。膜污染的控制和膜清洗的优化是保持系统稳定运行的重要因素。

5 MBR 膜的清洗与维护

5.1 膜污染的类型与清洗策略

膜污染通常分为有机污染、无机污染和生物污染三类。有机污染主要来源于水中的溶解性有机物，无机污染是由于水中的盐类、矿物质等物质积累，生物污染则是由于微生物在膜表面的生长和附着。针对不同的污染类型，膜清洗策略应有所不同。清洗策略通常包括化学清洗、酸碱洗涤等，具

体使用何种方法取决于污染的类型。

5.2 膜清洗频率与操作成本分析

膜污染的严重程度直接决定了膜清洗的频率。在 MBR 膜系统中,随着膜表面污染物的积累,膜通量会逐渐下降,影响废水处理效率。膜通量变化是判断膜污染程度的重要依据,膜通量减少至初始值的 70%-80% 时,通常需要进行清洗。此时膜污染物积累会导致膜表面出现不可逆损伤,进一步影响系统的处理能力和膜的使用寿命。除了膜通量外,膜吸泵的真空压力变化也是膜清洗的一个重要依据。当膜吸泵的真空压力增加至正常运行压力的 10%-15% 时,表明膜表面已积累大量污染物,也需要进行清洗。通过监测膜通量和真空压力变化,可以精确判断膜污染的程度,并根据污染程度调整清洗频率,以保证系统的长期稳定运行。频繁的清洗操作不仅增加了操作成本,还可能缩短膜的使用寿命,因此需要根据膜污染的程度、废水水质、系统运行条件和膜材料的特性来优化清洗周期。在高污染废水的处理过程中,膜污染速度较快,可能需要较频繁的清洗,而在污染较低的情况下,清洗频率则可适当降低。合理的清洗周期有助于减少不必要的清洗操作,降低运营成本,同时确保废水处理系统的高效运行。

5.3 MBR 膜系统的维护挑战与解决方案

MBR 膜系统的维护面临膜污染、膜寿命短、清洗频繁等挑战。为了解决这些问题,可以从优化膜选择、调整操作条件和增强系统监控等方面着手。例如,合理选择膜材料、定期检查膜通量变化、优化系统的运行条件等,都有助于减少膜污染,提高膜的使用寿命。同时,定期进行膜清洗和合理安排膜更换周期也是保障系统长期稳定运行的关键。

6 MBR 膜出水后的中水回用展望

MBR 膜处理后,出水水质通常符合或超过中水回用的标准。中水回用标准的制定主要依据出水的水质要求,包括 COD、氨氮、总磷、浊度等指标。MBR 膜能够有效去除废水中的有机物和悬浮物,从而确保出水的水质达到回用标

准。在工业领域,经过 MBR 膜处理的中水可以用于生产冷却水、清洗水、灌溉用水等;在市政领域,则可以用于城市绿化、道路清洗以及冲厕等。随着技术的进步和管理的完善,MBR 膜处理后的中水回用应用越来越广泛,尤其是在水资源紧张的地区。通过高效的膜分离与生物降解,MBR 膜工艺不仅提升了废水处理的效率,也为水资源的可持续利用提供了技术支持,减少了对自然水源的依赖。

7 结语

通过对 MBR 膜工艺在工业废水深度处理与回用中的应用研究,可以看出该技术具有显著的优势。其高效的有机物去除能力、稳定的水质保障以及出色的膜分离性能,使其在多个行业的废水处理中得到了广泛应用。尤其是在化工、制药、食品加工等行业,MBR 工艺有效解决了传统处理工艺无法满足的高浓度污染物和难降解物质的处理问题。此外,膜污染控制技术的不断进步,如化学清洗与物理反冲的优化策略、膜材料改性等,为系统的稳定运行提供了有力保障。虽然 MBR 工艺在能耗和成本方面存在一定挑战,但其在提升废水回用水质、降低环境污染、促进资源循环利用等方面的巨大潜力,仍然使其成为未来废水处理领域的重要技术。随着技术的进一步发展,MBR 工艺在工业废水回用中的应用前景将更加广阔。

参考文献

- [1] 陈天杭,莫海玲,杨嘉丽.工业污水处理中多模式AO+MBR工艺应用研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(17):5-6+30.
- [2] 刘金星,胡邦,张鑫,李旭,程明涛.多模式AO+MBR工艺在工业污水处理厂中的应用[J].中国给水排水,2023,39(20):83-88.
- [3] 贾海涛,夏静,詹征,吕凤,韩丰泽.MBR-臭氧催化氧化在江苏某工业污水处理厂提标改造工程中的应用[J].给水排水,2023,59(09):63-68.
- [4] 高颖.五段AO-MBR工艺应用于工业污水处理厂升级改造[J].辽宁化工,2023,52(05):678-680+684.
- [5] 李尧丞.工业污水处理厂MBR与人工湿地组合工艺运行效果的分析[J].化工管理,2022,(30):49-52.