

MBR 工艺在污水处理中的膜污染控制与维护策略研究

张文燕, 陈彩萍, 杨勇

太原市城市排水管理中心, 山西 太原 030006

摘 要 : MBR 工艺中常面临膜孔堵塞、表面沉积等膜污染问题。为探讨其膜污染控制与维护策略, 本文从 MBR 工艺原理、膜污染形成机理、影响因素出发, 分析 MBR 工艺在污水处理中的膜污染控制与维护策略, 并从 MBR 工艺结构选择、临界值控制、工艺流程设计、混合液调控、清洗维护以及试验分析与数学模拟等角度进行阐述。

关 键 词 : MBR 工艺; 膜污染; 控制与维护

Study On Membrane Pollution Control And Maintenance Strategy Of Mbr Process In Wastewater Treatment

Zhang Wenyan, Chen Caiping, Yang Yong

Taiyuan city drainage management center, Taiyuan, Shanxi 030006

Abstract : In MBR process, membrane pollution problems such as hole blockage and surface deposition are often faced. In order to discuss the membrane pollution control and maintenance strategy, this paper analyzes the membrane pollution control and maintenance strategy of MBR process in wastewater treatment from the perspectives of MBR process structure selection, critical value control, process design, mixed liquid regulation, cleaning and maintenance, experimental analysis and mathematical simulation.

Keywords : MBR process; membrane contamination; control and maintenance

引言

城市污水主要包括工业废水、城市生活污水以及医疗卫生机构产生的各种污水等, 其处理方式主要采用物理方法去除污水中的悬浮固体和漂浮物质, 采用生物处理氧化降解各种复杂的有机物质, 采用混凝、过滤、离子交换、反渗透等物理和化学综合的方法去除污水中难溶的有机物、磷、氮等营养性物质等进行三级污水处理^[1]。因污水中物质组成的复杂性和差异性, 常需要基于污水特点, 污水处理要求等, 采取多种工艺技术, 并逐层、逐要素地进行污水分离与处理。

MBR 工艺作为城市污水处理的重要技术之一, 因其出水质量好, 运行可靠稳定等优点, 在城市污水处理中占据一席之地。但由于 MBR 工艺污水处理过程中容易发生膜孔堵塞、表面沉积等膜污染问题, 需要基于 MBR 工作原理, 采取必要的膜污染控制与维护策略降低膜污染问题, 提升城市污水处理效能。

一、MBR 工艺概述

(一) 膜技术

膜技术利用膜材料的特殊结构实现物质的高效分离, 涉及膜材料、膜分离相关的多种技术, 膜技术具有设备紧凑、操作方便、节能高效、易与其他技术集成等优点, 广泛应用于食品生产、饮料加工、工业污水处理、大规模空气和工业气体分离、湿法冶金、气体和液体燃料的生产以及石油化工制品生产等领域^[2]。

(二) 膜生物反应器 MBR

膜生物反应器 MBR 工艺是将膜分离技术与生物反应器的生物降解作用有机结合的污水生化处理系统, 采用微滤膜系统或超滤膜系统作为活性污泥混合液的固液分离手段, 利用物理方式对

细菌、病毒和各种微生物细颗粒进行高效率去除, 并截留长世代周期的细菌以维持生化系统稳定的硝化与反硝化能力, 且具有极强的抗冲击负荷保证出水稳定能力, 其出水水质好, 且出水能力稳定^[3]。

二、MBR 膜污染问题分析

(一) 膜污染问题特点

MBR 运行中, 由于混合液中的污泥絮体、胶体粒子、溶解性有机物或无机盐类等与膜存在物理化学相互作用或机械作用, 容易在膜面上产生吸附与堆积, 或在膜孔内吸附造成膜孔径变小或堵塞, 形成膜污染表现出膜通量下降、跨膜压差升高等现象。膜污染问题不但会降低 MBR 工艺不但会使水的通过能力和系统过滤

性能下降，而且也会提升其维护成本。一旦膜发生严重污堵，整个 MBR 系统便不能出水。跟随膜过滤过程中过滤阻力的不断增加，其 TMP 不断升高，次临界通量下运行时，TMP 呈现出三阶段规律，阶段Ⅰ初始污染情况下，主要表现为膜材料和混合液中污染物间、胶体和有机物间引起的被动吸附和膜孔堵塞问题，与膜孔径、膜材料等因素关系较大；在阶段Ⅱ缓慢污染阶段，在次临界通量运行条件按下，覆盖在膜表面的微生物代谢产物会促进生物微粒和胶体在膜表面的进一步附着，溶解性有机物的吸附延伸到膜表面，且呈现出不均匀现象；在阶段Ⅲ快速污染阶段，一般出现在超临界量条件下，由于膜孔组建通量的不均性以及膜孔通量与临界通量的关系变化等，膜表面出现明显的污泥沉积，形成滤饼层污染。

根据污染的可清洗性，膜污染分为可逆污染（暂时污染）、不可逆污染（长期污染）和不可恢复污染（永久污染）。广义膜污染包括浓差极化、膜孔堵塞、表面沉积等问题，如表1所示。

表1 膜污染类型

类型		形成原因	解决办法
浓差极化		浓度边界层	跟随过滤活动而呈现，过滤停止而消失
膜孔堵塞		污染物的结晶、沉淀与吸附	不可逆
漂浮物污染		头发、纸屑等纤维状物质被膜丝缠绕	
表面沉积	泥饼层	火星污泥絮体沉积、微生物附着	疏松的：曝气、水反冲等物理清洗，可逆 致密的：不可逆污染
	凝胶层	溶解性大分子有机物的浓差极化、吸附或过饱和沉积	碱洗或酸洗等化学清洗 一般认为不可逆
	无机污染层	溶解性无机物过饱和沉积	

（二）膜污染影响因素

膜污染的影响因素众多，主要可分为三类：膜材料与膜组件特性、污泥混合液特性以及系统操作条件^[9]，

（三）膜污染的控制与维护要素

基于 MBR 工艺技术特点、膜污染的形成的变化过程、以及膜污染影响因素的多样性和复杂性，膜污染控制与维护常需要考虑膜工艺自身、污染膜日常维护要求、以及需要处理的污水特点等，进行全要素、全过程的综合考量。通过提升膜性能和优化工艺操作条件、调控活性污泥混合液性质以及脱污染清洗等进行综合控制与维护，膜污染的调控要素可以归结为表3。

表3 MBR 膜污染控制与维护要素

控制类型		调控要素
提升膜性能和优化操作条件	膜材料选择	高强度、高通量、抗污染等
	膜组件选择	抗污堵、节能等
	优化操作条件	通量、曝气量和曝气方式；过滤模式等
调控活性污泥混合液性质	控制生物工艺条件	改善污泥龄、污泥浓度、污泥负荷等
	调控混合液过滤性	投加混凝剂、投加其他调控剂等
	做好预处理	去除漂浮物、去除油脂等

控制类型		调控要素
膜污染清洗	物理清洗	水冲洗、擦洗、水/气反冲洗、曝气吹扫（间歇过滤）、两者结合、超声清洗等
	化学清洗	恢复性清洗、化学强化反冲洗、维护性清洗（在线清洗）、强化性清洗（在线清洗）、恢复性清洗等
	生物清洗	群体猝灭细菌清洗等

三、MBR 工艺膜污染控制与维护策略研究

（一）选择适宜的 MBR 结构形式

MBR 结构原理直接决定了膜污染的处理方式。其重要结构形式包括外置式、浸没一体式、浸没分体式等不同的结构技术原理。其中，外置式将 MBR 生物反应池和膜组件分开，反应池内混合液采用泵增压进入膜组件，并在压力作用下完成污水处理，固形物、大分子物质等被膜截留，随浓缩液回流至生物反应池；浸没式一体式和浸没分体式 MBR 把模组浸没于生物反应池或膜池之中，通过混合液中的活性污泥分解污染物，通过水头差或是抽吸泵提供膜过滤动力，膜组件下设置曝气系统。

由于外置式动力能耗较高且泵运转对某些微生物活性有所影响，在城镇污水处理工程中应用较少，但因其膜组件易于清洗、更换和增减，在膜污染处理方面具有天然优势；浸入式 MBR 工艺结构主要利用曝气系统产生的水流以及气泡的冲刷阻碍污泥絮体等的膜沉积，以减缓膜污染的发展，在城镇污水处理工程中应用较多。在其他条件不变的情况下，显然膜组件的单独设置更有利于膜污染的控制和维护。在容易发生膜污堵的场合，可以选择和创新独特的构型形式来提升膜污染控制与维护能力。

（二）科学调控临界值

从微观上来讲，MBR 污水处理系统中，受曝气强度、错流流速等影响，膜污染表面层正向的过滤拽力以及反向迁移力之间的平衡，使得过滤通量可以处在一定的临界值范围内，以防范膜污染的持续发展。一旦超过临界值，膜污染就会迅速恶化。

基于 MBR 膜污染的临界值特点，一方面，MBR 工艺更多适用于处理水流量稳定、处理水量不发生季节性断流、以及水量相对稳定，日处理量超过1000m³等特点的污水处理条件，需要根据污水处理特点确定是否选用 MBR 工艺；一方面在需要 MBR 工艺应用过程中，根据污水处理要求与特点，科学设计膜污染处理系统，确保污水处理膜的过滤通量、曝气强度、错流流速等符合临界值要求，留有足够的膜过滤通量余量，延缓膜污染的发展；同时，还需采取必要的监测、分析与控制手段等，加强对系统膜过滤通量、污染物浓度、错流流量、曝气强度等指标的监测与预警，通过及时、低成本的膜污染控制措施和定期清洗维护等，避免严重膜污染问题的发生。

（三）建构高效的 MBR 工艺流程

从 MBR 工艺流程角度来讲，在污水进入膜设备间之前，需要经过格栅处理、生反系统处理等流程，以获得有利于膜分离与膜污染防治的混合液，再经膜分离和消毒生成再生水。膜污染控制

需要从前期混合液处理的设计出发,通过科学设置沉淀区、膜池泥斗、填料床以及改变生物区水利负荷方式等改善工艺模式、改善混合液的污泥浓度、颗粒物颗粒分布状态,进而提升膜过滤的条件,降低混合液对膜污染的影响。

(四) 混合液调控

在其他条件一定的情况下,膜池中污泥浓度过高或是溶解性微生物的代谢产物浓度累积过高时,也会加剧膜污染,影响膜过滤性能。对混合液污泥浓度、混合液黏度、溶解性微生物代谢产物浓度等的调节可以采用物化和生化法进行调控。比如,物化调控方面,投加悬浮载体、吸附剂、混凝剂、氧化剂等;在生化调控方面,调整污泥龄、排泥量和回流比等。在混合液调控过程中,需要基于膜污染特点匹配适宜的调控方式,比如泥饼层膜污染较为严重、凝胶层污染、系统环境温度变化、系统受到冲击负荷等情况下,膜孔堵塞污染较严重等情况下,选择和匹配适宜的调控剂改善混合液组成,减缓膜污染发生。

但需要注意的是,由于混合液中的污泥絮体、胶体粒子、溶解性有机物或无机盐类等与膜存在较为复杂的物理和化学作用,混合液的调控有正面和负面的作用,为保证混合液体调控能够发挥抑制膜污染的功​​效,需要采用系统分析、运用定量的数学模型和数字化模拟工具等进行分析,并需要基于试验和经验等进行科学调控。

(五) 清洗维护

在延缓膜污染发展的同时,还需定期进行膜清洗来处理膜污染问题。根据污染物的去除机制,膜清洗主要分为物理、化学和生物清洗^[6],如表3中所示。由于MBR工艺结构差异、污水性质、体量等不同,需要根据MBR系统设计要求以及清洗成本等匹配合适的清洗方法,制定定期清洗计划,并根据实际运行中膜污染状态变化等调整清洗策略。

(六) 试验分析与数模模拟

从系统论的角度来讲,MBR工艺处理过程是一个多要素、

具有一定规律性、且较为复杂、动态的、存在临界范围的多元系统,膜污染受到膜材料、膜组件等自身条件,混合液组成结构,混合液流速、曝气系统等影响,且存在复杂的物理、化学、生化等方面的复杂变化。伴随传感器技术、计算机自动控制技术等的发展,基于生反池控制系统、膜控制系统等可以实现MBR系统的参数化调控和自动调控,减缓膜污染,提升污水处理的效能。

基于GPS-X等污水处理厂模拟平台以及AFS、SEM、EDX、STEM、UV-Vis DRS、AES等试验监测方法,MBR工艺污水处理中的膜污染控制与维护常采用数学建模和工艺模拟,对膜污染特性特性进行分析研究来探讨膜污染的控制与维持策略,为MBR系统工艺设计与优化、控制方案优化、运行方案评估、实时控制等提供有利支持。

由于MBR工艺中HRT和SRT的分离效应,颗粒性物质基本为零,微生物代谢作用以及溶解性微生物产物对膜污染的影响等,使得MBR工艺的数学模型与传统的污水处理数学模型存在一定的差异性。主要采用微生物动力学模型、膜污染模型以及二者的混合模型进行分析,其中微生物动力学模型又可分为活性污泥模型ASM,SMP模型及二者的混合模型^[7]。

总结

综上所述,MBR工艺污水处理过程中,必然面临膜污染问题。由于膜污染发展具有一定的规律性,且受到MBR工艺设备本身、处理液体组份以及清洗技术等影响,在膜污染控制与维护过程中,需要基于膜污染形成机理,一方面通过系统的工艺、结构设计及优化等,尽可能阻止污染物堆积,延缓膜污染发展;一方面需要通过物理、化学或是生物学等方法去除膜污染物,或是更换膜组件,以确保污水处理效能。

参考文献:

- [1] 康凯,李艳军. 城市污水的分类处理与再生利用刍议[J]. 才智, 2011,(03):51.
- [2] 邓麦村金万勤膜技术手册(上册)[M]. 化学工业出版社. 2020.12
- [3] 郭向东膜生物反应器设计与应用[M]. 化学工业出版社. 2021.06
- [4] 吴梦菲. 膜生物反应器(MBR)非典型工况下膜污染的机制及控制研究[D]. 浙江师范大学, 2022.
- [5] 邓麦村金万勤膜技术手册(下册)[M]. 化学工业出版社. 2020.12
- [6] 施春红,江嘉诚,张玉琦,等. MBR处理农村生活污水及膜污染控制研究进展[J]. 水处理技术, 2024,50(02):20-25.
- [7] 王永宁. MBR污水处理工艺运行条件优化及膜清洗方法研究[D]. 华南理工大学, 2017.