

# 基于膜污染控制的工艺设计与优化

崔耀奎, 刘永臣, 沈佳俊

西安思源学院, 陕西 西安

收稿日期: 2021年12月13日; 录用日期: 2022年1月13日; 发布日期: 2022年1月25日

## 摘要

膜生物反应器(MBR)是一种新型的污水处理技术, 在污水处理领域正在被广泛地使用。但是, 膜污染却是技术上的一大难题, 阻碍技术的推广。现针对膜污染, 找出方法, 为实际运行的MBR工艺的优化及膜污染控制等提供一定的理论依据。

## 关键词

膜生物反应器, 污水处理, 膜污染

# Process Design and Optimization Based on Membrane Fouling Control

Yaokui Cui, Yongchen Liu, Jiajun Shen

Xi'an Siyuan University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 13<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 13<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 25<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Membrane Bioreactor (MBR) is a novel wastewater treatment technology, which is widely used in the field of wastewater treatment. However, membrane fouling is a major technical problem, which hinders the promotion of the technology. In view of membrane fouling, methods are found to provide a theoretical basis for the optimization of the MBR process and the control of membrane fouling.

## Keywords

Membrane Bioreactor (MBR), Wastewater Treatment, Membrane Fouling

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

膜生物反应器(MBR)是一个相对封闭的系统,优点是高效、稳定、去除效果好、明显提高了水质。缺点则是污水生物处理过程中产生的问题,很难及时处理,会在系统中积累下来,进而对系统的工艺、处理后的水质、微生物活性和膜污染等产生影响。

西安思源学院再生水厂 MBR 系统已经运行十一个年头。污水经管道收集,从高到低,以自流的形式经过粗格栅(5 mm)过滤、进入 2000 m<sup>3</sup> 调节池均衡水质,进入气浮池,然后经过内径流格栅再次过滤,而后进入生物池,依次流过厌氧池、缺氧池、好氧池,通过配水渠进入膜池,出水经消毒后进入蓄水池待用。每个膜池中放置 6 个中空纤维柱式膜组件,平均膜孔径为 0.03~0.1 μm。该污水厂平均处理水量为 4000 m<sup>3</sup>/d,膜出水由自吸泵抽吸完成,抽停时间比为 9 min/1 min。膜分离单元采用曝气冲刷和周期性的化学清洗(包括维护性清洗和离线化学清洗)来有效控制膜污染[1]。

膜污染是由于颗粒物、胶体、可溶性有机物、无机物、微生物细胞等沉积在膜的表面、孔隙和孔隙内壁,使得膜孔径变小或者堵塞,从而造成膜通量降低和透膜压差升高的现象[1]。

## 2. 膜污染的诱因

### 2.1. 毛发和棉线等杂质

西安思源学院污水厂 MBR 系统,污水经过粗格栅、调节池、气浮池、内径流格栅,生物池进入配水渠,流入膜池等待进一步的处理。粗格栅,气浮池,内径流格栅虽然会去除大多数毛发棉线等细小杂质,但是,仍然会有大量的毛发棉线等细小杂质进入膜池。膜丝过滤水的过程,是负压的过程。负压使得毛发缠绕在膜丝上,并且时间越久缠绕的越紧,即使膜池一直在曝气,也不能将毛发去除下来。毛发越缠绕越紧,膜丝内径越来越小,承受负压也愈来愈大,直到膜丝断裂。毛发会迅速缠绕在别的膜丝上,越来越紧。而断裂的膜丝会缠绕在别的膜丝上,越来越紧,形成一个恶性循环。

不仅如此,毛发丝和棉线等杂质钻进膜丝缝隙内,形成一个框,杂质钻进框内,越钻越多,会长期污染堵塞膜丝。

虽然气浮池和内径流格栅去除了大量的杂质,但是还有多数毛发等杂质进入了膜池,导致膜丝堵塞断裂。伴随着膜丝堵塞的越来越多,断丝越来越多,最直观的数据就是跨膜压差越来越高。

跨膜压差(TMP)快速升高主要是方向相反的抽吸力和反向扩散力控制污泥组分的沉积过程。简单地说,就是膜丝工作室承受的压力。在污水处理过程中,膜丝受到负压影响胶体颗粒和可溶性有机物等粒径较小,所受反向扩散力较小,因此在负压作用下迅速向膜表面沉积。因此,在污水池里过程中 TMP 是一个缓慢升高的过程,但是被毛发丝缠绕的膜丝,会导致 TMP 急剧升高,即膜丝承受的压力急剧增大,严重影响膜丝寿命。

膜丝被毛发缠绕, TMP 长时间的缓慢上升,反洗不能清洗膜丝,随着运行时间的推移,污泥絮体、胶体颗粒和可溶性有机物等不断在膜表面累计。胶体颗粒和可溶性有机物进一步堵塞孔,进一步 TMP 快速增长以致 MBR 无法正常运行。渐渐失去作用膜丝,污染进一步加剧。

## 2.2. 油脂

西安思源学院再生水厂处理的水主要是从学校过来的生活污水,其中就包括餐厅下水道过来的废水,里面含有大量的油脂。油脂粘性很强,又是液态,很顺利通过粗格栅,内径流格栅进入膜池。一般的生化处理对油脂没有去除效果,油脂黏附于膜组上会极大的降低膜通量,影响出水量及设备的能耗。

## 2.3. 胞外聚合物(EPS)

胞外聚合物(EPS)是污水生物处理中一类极为重要的有机物。它以多糖和蛋白质为主要成分,还包含少量的腐殖质、糖醛酸和 DNA 等[2]。

MBR 中影响 EPS 生成的因素很多,研究主要集中在温度,多糖, SRT 等方面[3]。

当 MBR 中 SRT 由 20 d 增大到 60 d 时, SMP (蛋白质和多糖)对于膜污染的贡献率降低。比较 3 个 SRT 下(10 d、20 d 和 40 d) SMP 的特性,发现低 SRT 更容易导致 SMP 的积累和膜污染的加剧[4]。

温度对 MBR 工艺的影响,发现低温下 MBR 混合液中多糖含量增加会引起膜污染速率的增大。当 SRT 为 13 d 时,低温下(12.7℃)膜污染以物理可恢复污染为主,而高温下(21.7℃)以物理不可恢复污染为主[5]。

## 2.4. 溶解性有机物

溶解性有机物(DOM)指能通过 0.5+微米滤器的有机物质。不稳定有机物来源于海洋生物的排泄物、废弃物以及死亡生物的分解产物,主要多糖、由蛋白质、腐殖酸等复杂的有机物组成[6]。众多研究表明,MBR 污泥混合液中的各种组分(悬浮固体、胶体和 DOM 等)都会导致不同程度和性质的膜污染[7]。

## 3. 目前的优化方案

1) 物理去除污水中的毛发棉线等杂物,尽量避免因负压而缠绕膜丝和杂物聚集,减少内部污染。毛发棉线等杂质对膜丝伤害极大,应当进一步去除。

自制毛发去除设备,根据实际情况,制作当下需要的毛发去除设备,去除污水中的毛发棉线等杂质。为避免毛发进入膜池,在进入膜池之前,就应当去除毛发。应加入到图 1 当中气浮池到内径流格栅之间的配水渠中,能够发挥最大的效用。

2) 将原细格栅由转鼓式格栅更改为内径流格栅

毛发棉线等杂质对膜丝伤害极大,因此需要物理去除污水中的毛发棉线等杂物,尽量避免因负压而缠绕膜丝和杂物聚集,减少内部污染。

为解决原转鼓式格栅因容易漏渣且滤网不容易清洗的问题,将其拆除并增加两台内径流格栅,型号 KDS-05、1000 (m<sup>3</sup>/h),可以拦截并排除水中较小的悬浮及颗粒杂质以及毛发,进一步提升对经过粗格栅、气浮池设备处理后的水源中污染物的清理效果,同时降低格栅清洗用水量和能耗。

3) 在调节池与细格栅之间增加气浮池

气浮用于生化处理之前,去除污水中的悬浮物[8]。利用大量微小气泡与悬浮物结合,使悬浮物上浮到污水表面,然后收集处理这些悬浮物。该方法比沉淀快,去除率高,一定程度上能减少油脂和生物池的生化污泥。因此,增加气浮池可以产生良好的油脂分离效果[9]。

工艺原理:气浮工艺是一项从水及废水中分离固体颗粒高效快速的方法。它的工作原理是处理过的部分废水循环流入溶气罐,在加压空气状态下,空气过饱和和溶解,然后在气浮池的入口处与加入絮凝剂的原水混合,由于压力减小,过饱和的空气释放出来,形成了微小气泡,迅速附着在悬浮物上,将它提升至气浮池的表面。从而形成了很容易去除的污泥浮层,较重的固体物质沉淀在池底,也被去除[10]。

设备选型：2 台型号 GY-100 的气浮池，尺寸为  $9\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2.5\text{ m}$  的 2 座  $100\text{ m}^3/\text{h}$  的钢制箱体，配置  $\Phi 1.2\text{ m} \times 3\text{ m}$  的溶气罐 2 台、容器水泵 2 台。通过气浮效果分离出污水中的乳化油、浮渣达到分离杂质、净化废水的目的。

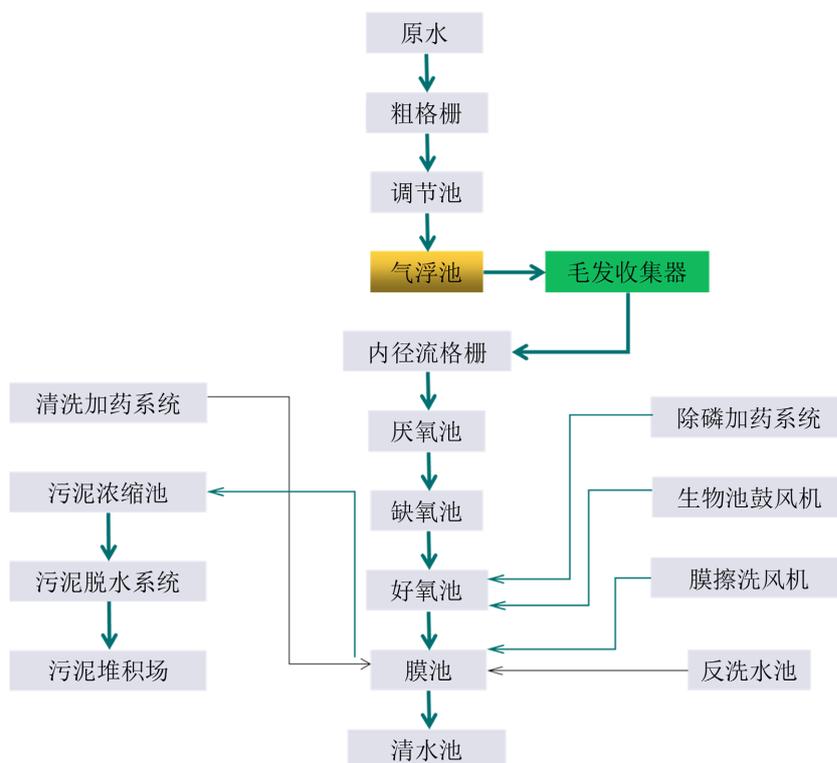


Figure 1. Flowchart of MBR system process for wastewater treatment  
图 1. 污水处理 MBR 系统工艺流程图

4) 调整膜池曝气时间、风量大小以及循环泵大小，降低混合液浓度，尽量减小浓差极化。

膜丝过滤的过程，是负压的过程，水通过膜丝进入膜丝内部，杂质留在膜丝外。部分杂质吸附在膜丝表面，部分混进四周混合液中，导致膜丝周围混合液浓度急剧升高。曝气可以加速水流流动，调节膜池混合液浓度。合理的曝气时间，曝气风量可以有效地调节膜池混合液浓度，减少浓差极化。

随着水处理量的不断提高，膜池的混合液浓度也会不断升高，虽然有新的混合液流入，但是只能改变升高的时间，无法改变结果。通过混合液循环泵可以将混合液重新打入好氧池，重新流入膜池，这样膜池浓度就不会过高。不过，混合液循环泵过小，作用不大；混合液循环泵过大，会导致膜池液位急剧下降，供水不足。

膜池曝气对膜污染也有良好的控制作用。曝气强度对膜渗透过程有显著的影响，过大或过小的曝气强度对膜渗透性都具有负面影响[11]。膜池曝气应当控制好发小，虽然膜池曝气可以有效地冲洗膜丝，减少膜池表面污垢的积累，但是过高的曝气量会导致膜丝的破裂。另外，不同的曝气强度，膜污染也会随之变化， $400\text{ L/h}$  的曝气量的污染程度较低，相比于  $150\text{ L/h}$  和  $800\text{ L/h}$  的污染程度要低很多[12]。

5) 反洗，将清水引进管道，反向进入膜丝，从膜丝内部进入膜池。反洗可以简单快捷的冲洗膜丝表面的污垢。针对膜污染，单次反洗效果并不佳，只能清理膜丝表面污垢。反洗优点，几乎没有准备工作，随时可以进行，可以随时、多次、长时间反洗，有效降低膜污染程度。

6) 调整温度, 增加厌氧消化稳定性。MBR 的操作温度通常需较高, 可以降低溶解性微生物代谢产物(SMP)浓度和粘度, 温度每升高 1℃, 膜通量增加 1%~2%。然而, 也有研究发现, 在常温或低温条件下, 也能够取得较好的处理效果和较大的膜通量[13]。

7) 臭氧, 加入一定量的臭氧, 可以氧化和分解污泥中的胶体、EPS 和 SMP 等物质[14]。

MBR 工艺对低碳氮比值校园生活污水中的 COD、氨、氮、TN 等污染物具有较好的去除效果, 通过运行参数的优化来控制 EPS(胞外聚合物)的浓度, 进而提升工艺的性能和膜污染的控制效果(温度, 污水浊度, 多糖含量都会影响 EPS 含量) [15]。

目前, 西安思源学院再生水厂 MBR 系统每年都要将膜架吊起来, 手工清理上面的毛发等杂质, 每月也要化学清洗, 平时多次反洗, 膜污染程度较低, 使用年限远远超过原定的 5 年寿命。

#### 4. 结论和展望

我们应对膜污染的方法多是从实际应用中总结出来的, 有效减少了膜污染, 但是我们依然受到膜污染的制约。现在, 我们要做的就是尽可能的减少膜污染, 或后期去除膜污染, 延长膜丝寿命。膜丝的更换更是会损失巨大的经济效益, 还有更多的困难需要我们解决。

绿水青山就是金山银山, 科学发展、绿色发展才是长久发展之道, 膜生物反应器的技术就基于此理念。膜污染制约着膜生物反应器的技术, 今后应更加着重于实际应用规模的研究与开发, 有效延长膜丝寿命, 产出更高价值。

#### 基金项目

陕西省水利厅科技计项目经费资助, 合同(任务)书编号 2021slkj-14。

#### 参考文献

- [1] 胡以松, 王晓昌, 张永梅, 等. MBR 工艺处理校园生活污水与回用评价[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 20-22.
- [2] 周小玲, 陈建荣, 余根英, 等. 膜生物反应器中膜污染机理和控制研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 86-91.
- [3] Meng, F.G., Zhang, S.Q., Oh, Y.T., et al. (2017) Fouling in Membrane Bioreactors: An Updated Review. *Water Research*, **114**, 151-180. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.006>
- [4] Zheng, Y., Zhang, W.X., Tang, B., et al. (2018) Membrane Fouling Mechanism of Biofilm-Membrane Bioreactor (BF-MBR): Pore Blocking Model and Membrane Cleaning. *Bioresour Technol*, **250**, 398-405. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.036>
- [5] Le-Clech, P., Chen, V. and Fane, T.A.G. (2006) Fouling in Membrane Bioreactors Used in Wastewater Treatment. *Journal of Membrane Science*, **284**, 17-53. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.08.019>
- [6] Luna, H.J., Baeta, B.E.L., Aquino, S.F., et al. (2014) EPS and SMP Dynamics at Different Heights of a Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor (SAMBR). *Process Biochemistry*, **49**, 2241-2248. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.09.013>
- [7] Zhang, J., Chua, H.C., Zhou, J., et al. (2006) Factors Affecting the Membrane Performance in Submerged Membrane Bioreactors. *Journal of Membrane Science*, **284**, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.06.022>
- [8] 刘琛, 李亮, 钱光升, 等. 膜生物反应器膜污染与控制研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(10): 20-25.
- [9] 毋海燕. 膜生物反应器中膜污染问题的研究新进展[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8): 169-172.
- [10] Shen, L.G., Lei, Q., Chen, J.R., et al. (2015) Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor: Impacts of Floc Size. *Chemical Engineering Journal*, **269**, 328-334. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.002>
- [11] Zhou, Z., Tan, Y., Xiao, Y., et al. (2016) Characterization and Significance of Sub-Visible Particles and Colloids in a Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor (SAnMBR). *Environmental Science & Technology*, **50**, 12750-12758. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03581>
- [12] Cho, B.D. and Fane, A.G. (2002) Fouling Transients in Nominally Sub-Critical Flux Operation of a Membrane Bioreactor. *Journal of Membrane Science*, **209**, 391-403. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00321-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00321-6)
- [13] Lin, H.J., Xie, K., Mahend, R., et al. (2009) Sludge Properties and Their Effects on Membrane Fouling in Submerged

---

Anaerobic Membrane Bioreactors (SAnMBRs). *Water Research*, **43**, 3827-3837.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.05.025>

- [14] Hwang, B., Lee, W., Yeon, K., *et al.* (2008) Correlating TMP Increases with Microbial Characteristics in the Bio-Cake on the Membrane Surface in a Membrane Bioreactor. *Environmental Science & Technology*, **42**, 3963-3968.  
<https://doi.org/10.1021/es7029784>
- [15] 韩永萍, 肖燕, 宋蕾, 等. MBR 膜污染的形成及其影响因素研究进展[J]. 膜科学与技术, 2013, 33(1): 102-110.