

# MBR / PAC 组合工艺处理污水厂尾水的中试研究

朱 亮<sup>1</sup>, 朱凤春<sup>1</sup>, 许旭昌<sup>2</sup>, 徐伟欣<sup>1</sup>, 王占生<sup>3</sup>, 顾军农<sup>4</sup>

(1. 河海大学 环境科学与工程学院, 江苏 南京 210024; 2. 南通规划设计有限公司, 江苏 南通 226000; 3. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 4. 北京自来水集团, 北京 100038)

**摘 要:** 在 MBR 中试的基础上, 向 MBR 反应器中投加 40 g/L 粉末活性炭 (PAC) 构成 MBR / PAC 组合工艺并处理污水厂尾水。试验结果表明: MBR / PAC 系统的出水 BOD<sub>5</sub> 4 mg/L、COD 18 mg/L、氨氮 0.3 mg/L、浊度 0.2 NTU, 处理效果优于 MBR 系统。PAC 能吸附并降解易引起膜污染的有机物, 有效降低了膜污染, 减缓了过膜压力的增长趋势, 保护了膜组件, 并且运行效果好。通过气洗和反冲洗能很好地维持膜的透过性能, 离线清洗可基本恢复膜的透过性能。

**关键词:** 膜生物反应器 (MBR); 粉末活性炭 (PAC); 污水厂尾水

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000 - 4602(2009)05 - 0059 - 04

## Combined Process of MBR and PAC for Treatment of Tailwater from WWTP

ZHU Liang<sup>1</sup>, ZHU Feng-chun<sup>1</sup>, XU Xu-chang<sup>2</sup>, XU Wei-xin<sup>1</sup>, WANG Zhan-sheng<sup>3</sup>,  
GU Jun-nong<sup>4</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;  
2. Nantong Urban Planning and Design Co. Ltd, Nantong 226000, China; 3. Department of  
Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Beijing  
Waterworks Group, Beijing 100038, China)

**Abstract:** On the basis of MBR pilot test, a combined process of MBR and PAC (40 g/L) was composed to treat tailwater from WWTP. The results show that the BOD<sub>5</sub>, COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and turbidity in the effluent of the combined process are equal to or less than 4 mg/L, 18 mg/L, 0.3 mg/L and 0.2 NTU respectively. Its treatment efficiency is better than that in MBR alone. PAC can degrade organic compounds which easily result in membrane fouling, thus reducing membrane fouling, alleviating the increasing trend of transmembrane pressure and protecting membrane module. The practical operation shows a good effect. Air wash and backwash can maintain high permeability of membrane. Its permeability can be recovered mainly by off-line wash.

**Key words:** membrane bioreactor (MBR); powdered activated carbon (PAC); tailwater from WWTP

膜生物反应器 (MBR) 是将膜分离技术与传统的活性污泥生物处理技术相结合的一种新型、高效的污水处理工艺, 具有处理效率高、出水水质好、工艺流程短、占地面积小、产泥量低、易于实现自动控制等优点<sup>[1~5]</sup>。活性炭具有巨大的比表面积和发达

的内部孔隙, 适合微生物的附着、固定和生长, 利用其良好的吸附性能和微生物降解作用可有效去除可溶性有机物。向膜生物反应器中投加活性炭净化微污染源、处理回用水和生活污水成为近年来水处理领域的研究热点之一<sup>[6~10]</sup>。

试验以门头沟污水厂的二级出水为原水,在 MBR 中试的基础上,向 MBR 系统中投加粉末活性炭 (PAC),构成 MBR/PAC 组合工艺,并对 MBR、MBR/PAC 组合工艺的处理效果进行比较,为 MBR/PAC 组合工艺应用于污水处理厂尾水的深度处理提供参考。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验装置

试验工艺流程如图 1 所示。

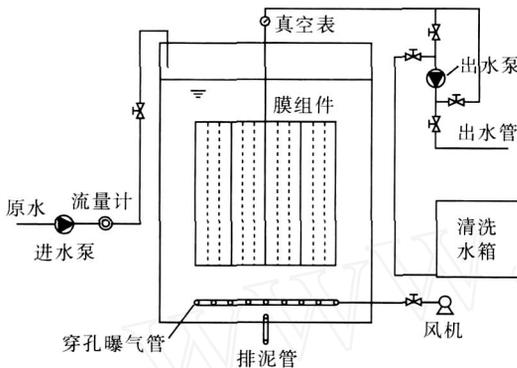


图 1 试验流程

Fig 1 Flow chart of treatment process

反应器为长方体容器,外观尺寸为 80 cm × 120 cm × 160 cm,有效容积为 1.2 m<sup>3</sup>。配备一套自动控制系统,可以根据时间和反应器内的液位高度控制进、出水泵的开关以使水位保持恒定,系统采用全自动连续运行方式。曝气机通过设置在膜组件底部的穿孔管连续曝气,以提供微生物降解有机物所需的溶解氧,并在膜表面形成剪切流,减轻污泥在膜表面的沉积。

采用 FP-A1 型聚偏氟乙烯 (PVDF) 中空纤维膜,单片外形尺寸为 520 mm × 1 010 mm,平均孔径为 0.22 μm,单片有效膜面积为 12.5 m<sup>2</sup>,产水量为 0.125 m<sup>3</sup> / (h · 片),整套膜组件共有 7 片膜。

#### 1.2 原水水质

试验原水为北京门头沟污水厂的二级出水,该厂采用 SBR 工艺处理生活污水,四座反应池轮流排水,出水水质较差。具体的水质情况见表 1。

表 1 试验进水水质

Tab 1 Quality of influent

项目	COD / (mg · L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> / (mg · L <sup>-1</sup> )	氨氮 / (mg · L <sup>-1</sup> )	TN / (mg · L <sup>-1</sup> )	TP / (mg · L <sup>-1</sup> )	水温	浊度 / NTU
范围	30 ~ 342	28 ~ 100	4.3 ~ 92	48.6 ~ 146	4.7 ~ 11	13 ~ 21.6	6.5 ~ 315
均值	92	46	19.6	82.3	7.07	18.6	34

#### 1.3 试验操作条件

系统处理水量为 300 L/h;采用全曝气间歇出水模式运行,泵抽 10 min、停 2 min;HRT 为 4 h;气水比为 30 : 1。

试验采用 MBR、MBR/PAC 两套系统平行运行。连续运行时,MBR 反应器内的 MLSS 在 4 500 mg/L 左右,DO > 1.8 mg/L。MBR/PAC 系统的 PAC 投量为 40 g/L,MLSS 在试验开始阶段为 7 800 mg/L 左右,长期运行期间维持在 9 000 ~ 13 000 mg/L;反应器内混合液的 pH 值维持在 6.7 ~ 8.0,DO 为 1 ~ 2.5 mg/L。

#### 1.4 污泥培养

向反应器中投加 40 g/L PAC,加入原水后形成黑色泥水混合液,然后将膜组件放入反应器内开始试验。运行一周后发现极少量的絮状体和低等微生物,两周后有大量的菌胶团与活性炭结合,可看到少量的轮虫和钟虫,运行效果基本稳定。反应器内微生物不断得到驯化,适应于该种污水水质的菌种不断富集,出水水质随反应器运行时间的延长逐渐变好,反应器的处理能力不断加强,此时可认为污泥培养成功。

#### 1.5 分析项目及方法

COD: 重铬酸钾法;氨氮: 纳氏试剂比色法;硝酸盐氮: 酚二磺酸分光光度法;总氮: 碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法;MLSS: 重量法;浊度: HACH 浊度仪; pH: 玻璃电极法; DO: HACH 便携式溶解氧仪。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 对主要污染物的去除效果

##### 2.1.1 对 BOD<sub>5</sub>、COD 的去除效果

MBR、MBR/PAC 两系统对 BOD<sub>5</sub>、COD 的去除效果分别见图 2、3。

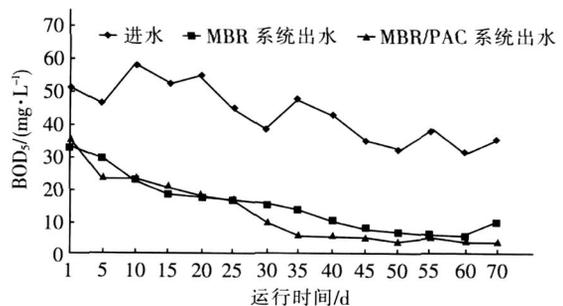


图 2 MBR 和 MBR/PAC 对 BOD<sub>5</sub> 的去除效果

Fig 2 BOD<sub>5</sub> removal effect by MBR and MBR/PAC

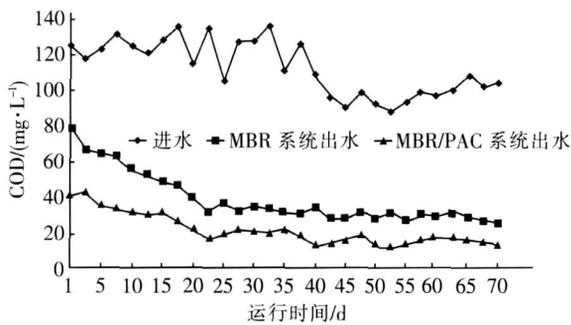


图 3 MBR和 MBR/PAC对 COD 的去除效果

Fig 3 COD removal effect by MBR and MBR/PAC

由图 2 可知, MBR 系统的出水  $BOD_5$  在  $7 \text{ mg/L}$  左右、MBR/PAC 系统的出水  $BOD_5 < 4 \text{ mg/L}$ 。试验初期, MBR/PAC 系统对  $BOD_5$  的去除主要依靠 PAC 对有机物的吸附, 出水水质较差; 但随着试验的进行, 微生物不断增殖, 系统的处理能力不断加强, 出水  $BOD_5$  迅速降低。

由图 3 可知, MBR 系统的出水 COD  $30 \text{ mg/L}$ 、MBR/PAC 系统的出水 COD  $18 \text{ mg/L}$ 。试验初期, MBR/PAC 系统对 COD 的去除主要依靠 PAC 的吸附作用; 当污泥培养成熟时, 微生物发挥其降解作用, 且含有 PAC 的滤饼层附着在膜表面上, 因为滤饼层具有复杂的微生物结构, 强化了对有机物的去除, 尤其是对不易降解有机物的去除<sup>[11]</sup>, 保证了出水水质 (对 COD 的去除率  $> 80\%$ )。

### 2.1.2 对氨氮、总氮的去除效果

MBR、MBR/PAC 系统对氨氮的去除效果如图 4 所示。

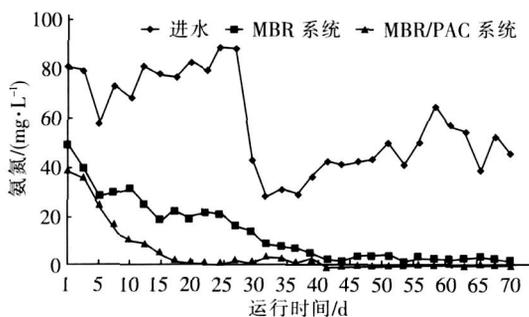


图 4 MBR和 MBR/PAC对氨氮的去除效果

Fig 4  $\text{NH}_3\text{-N}$  removal effect of MBR and MBR/PAC

由图 4 可知, MBR 系统的出水氨氮在  $3 \text{ mg/L}$  左右、MBR/PAC 系统的出水氨氮  $< 0.3 \text{ mg/L}$ 。由于氨氮在水中是以水和氨离子形式存在, 属于无机小分子, 膜微孔拦截和 PAC 吸附对其去除效果很有限, 故在试验初期两个系统的出水氨氮均较高; 但当

活性污泥培养成熟后, 投加的 PAC 成为硝化菌吸附生长的载体, MBR/PAC 系统中硝化菌的数量高于 MBR 系统中的, 故对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除效果更好、更稳定。

试验结果表明, MBR/PAC 系统对总氮的去除率可达  $30\%$ , 较 MBR 系统 (对总氮的去除率为  $15\%$ ) 有所提高。MBR/PAC 反应器内较高的污泥浓度阻碍了溶解氧向菌胶团内部传递, 在不排泥的情况下, 无机物的积累和微生物的增殖使得由 PAC 形成的大菌胶团较为密实, 氧在菌胶团内部分布不均, 表面为好氧状态, 内部却为缺氧的微环境, 故系统中具备了同步硝化反硝化的条件, 对总氮起到了一定的去除作用; 但是 PAC 上并不能形成很厚的生物膜, 反硝化作用并未因此而增加, 故系统对总氮的去除效果仍不理想。随着 MBR/PAC 系统运行时间的延长、污泥浓度的增加, 硝化菌和反硝化菌在反应器内得到积累, 反应器内的硝化能力加强。当运行到第 30 天时, 反应器中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的浓度已接近总氮的浓度。

### 2.1.3 对浊度的去除效果

试验结果表明, MBR 系统的出水浊度在  $0.4 \text{ NTU}$  左右、MBR/PAC 系统的出水浊度  $< 0.2 \text{ NTU}$ 。由于产生浊度的颗粒粒径大于膜孔孔径, 大部分颗粒可以通过膜的截留作用去除; 此外, PAC 对颗粒物质的吸附作用使 MBR/PAC 系统的出水浊度更低。

## 2.2 对膜性能的影响

### 2.2.1 减缓过膜压力的效果

MBR、MBR/PAC 系统的过膜压力在试验中的变化见图 5。

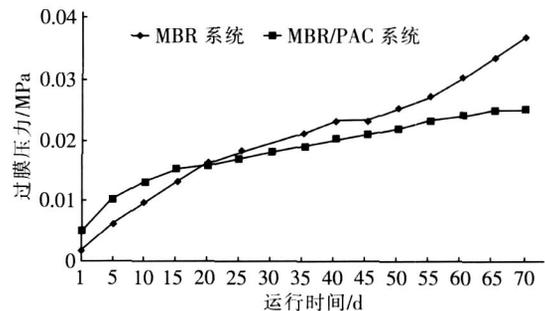


图 5 MBR和 MBR/PAC过膜压力的变化

Fig 5 Variation of transmembrane pressure of MBR and MBR/PAC

由图 5 可知, 在运行初期, MBR/PAC 系统中过

膜压力的增加比 MBR 系统的更迅速,但随着时间的延长,MBR/PAC 反应器中过膜压力的增长趋势减缓,17 d 后,MBR/PAC 系统的过膜压力明显低于 MBR 系统的。这是因为,在试验初期投加的 PAC 迅速附着到膜表面,且投加 PAC 后 MLSS 显著增加,混合液的密度增大,膜上滤饼层形成的速度加快,导致 MBR/PAC 系统的过膜压力高于 MBR 系统的;但随着时间的延长,PAC 颗粒与污泥絮体之间相互作用,形成粒径更大、粘性更小的絮体颗粒,污泥的沉淀性能和过滤性能更好,减缓了膜表面泥饼的生成及由其产生的膜阻力的增长趋势。

### 2.2.2 MBR/PAC 系统的膜清洗效果

MBR/PAC 系统在运行过程中膜清洗的主要方法是在线气洗、出水反冲洗,必要时采用离线水洗和药洗。运行过程中一直有高强度的曝气,并且在间歇运行的每个周期中有 2 min 的气洗,每周还进行 8 h 的空曝气。

当过膜压力增加到临界压力 (0.06 MPa) 附近时,先利用出水进行反冲洗,然后再进行正洗,将残留在膜表面的杂质清洗干净。反冲洗和正洗用水均采用膜过滤出水。

试验结果表明,系统在长期运行过程中,反冲洗效果下降,当过膜压力过大时,需进行离线水洗和药洗。即先用一定压力的清水冲洗,去除膜丝间夹带的污泥,然后再用 0.5% 的 NaClO 和 1% 的 NaOH 浸泡后清洗,膜的透过性能得到恢复。

从清洗效果来看,曝气清洗的效果不显著,对膜通量的恢复作用较小,说明曝气可去除的膜面污染物已在间歇抽吸过程中得到了充分的清除;出水反冲洗短期内效果显著,过膜压力较反冲洗前迅速降低,但反冲洗数次后过膜压力较前几次仍呈上升趋势,这说明反冲洗对部分难去除污染物的清除效果不佳;离线水洗和药洗效果最佳,可使膜通量基本恢复,但是操作复杂,对膜组件损害较大。

### 3 结论

相比于 MBR 工艺,MBR/PAC 组合工艺对污水处理厂尾水的处理效果更好:出水  $BOD_5$  4 mg/L、COD 18 mg/L、氨氮 0.3 mg/L、浊度 0.2 NTU。

PAC 与污泥相互作用形成生物活性炭

(BAC),很好地吸附并降解了易引起膜污染的有机物,有效地降低了膜污染的程度,减缓了过膜压力的增长趋势,对膜组件起到了很好的保护作用。通过气洗和反冲洗能很好地降低过膜压力,离线清洗可使过膜压力值基本恢复至初期运行水平。

### 参考文献:

- [1] Chaize S, Huyard A. Membrane bioreactor on domestic wastewater treatment sludge production and modeling approach[J]. Water Sci Technol, 1991, 23 (7 - 9): 1591 - 1600.
- [2] G ünder B, Krauth K. Replacement of secondary clarification by membrane separation—results with tubular, plate and hollow fiber modules[J]. Water Sci Technol, 1999, 40 (4 - 5): 311 - 320.
- [3] 胡保安,连立国,陈卓,等. MBR 和 UF 深度处理石化废水的比较研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22 (15): 80 - 82.
- [4] 白晓琴,赵英,张颖,等. 好氧 MBR 与序批式 MBR 处理生活污水的比较[J]. 中国给水排水, 2006, 22 (3): 28 - 31.
- [5] 陈卫文,顾平,刘锦霞. MBR 对不同分子质量有机物的去除规律[J]. 中国给水排水, 2003, 19 (2): 43 - 45.
- [6] 孔祥辉,刘红,张山立,等. 低温下膜—生物活性炭工艺深度处理回用水的试验研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27 (7): 481 - 484.
- [7] 刘红,何韵华,张山立,等. 膜—粉末炭反应器净化微污染源水[J]. 中国给水排水, 2004, 20 (7): 54 - 55.
- [8] 李军,江定国,刘红,等. 复合式膜生物反应器处理生活污水[J]. 中国环境科学, 2006, 26 (3): 271 - 274.
- [9] 罗虹,顾平. 投加粉末活性炭对膜阻力的影响研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17 (2): 1 - 4.
- [10] 姜成春,王志军. 高锰酸钾与粉末活性炭联用处理微污染源水[J]. 中国给水排水, 2001, 17 (3): 12 - 15.
- [11] 迟娟,张国照,李敏哲,等. 膜生物反应器处理生活污水的试验研究和工程设计[J]. 水处理技术, 2005, 31 (10): 76 - 78.

电话: 15952008606

E-mail: zhufengchun0314@hhu.edu.cn

收稿日期: 2008 - 10 - 11