

# 膜吸附生物反应器(MABR)用于饮用水去除有机物

田家宇<sup>1</sup>, 徐勇鹏<sup>1</sup>, 潘志辉<sup>1</sup>, 芦 澍<sup>2</sup>, 李圭白<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, tjy800112@163.com;  
2. 北京建筑材料科学研究总院, 北京 100041)

**摘 要:** 为更加有效地制备优质饮用水, 考察了膜吸附生物反应器(MABR)强化去除水中有机污染物的效能. 结果表明, 当粉末活性炭(PAC)投加量为 8 mg/L 时, MABR 对进水中 TOC、COD<sub>Mn</sub>、DOC、UV<sub>254</sub> 以及 BDOC 和 AOC 的去除率分别达 41.3%、59.4%、36.7%、53.5%、67.9% 和 44.0%. 在 MABR 中, 膜的物理截留作用、生物降解作用以及 PAC 的吸附作用协同完成对溶解性有机污染物的去除; 就 DOC 而言, 3 种作用的贡献分别为 11.1%、7.6% 和 18.0%. 微观分析结果表明, MABR 中膜表面的动态污泥层能强化膜对混合液中溶解性有机物的截留. 考虑到 0.5 h 的短水力停留时间, MABR 无论是从技术上还是从经济上考虑都有着很好的应用前景.

**关键词:** 饮用水处理; 膜吸附生物反应器; 粉末活性炭; 有机物

**中图分类号:** TU991.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2010)10-1568-04

## Membrane adsorption bioreactor (MABR) for organics removal in drinking water treatment

TIAN Jia-yu<sup>1</sup>, XU Yong-peng<sup>1</sup>, PAN Zhi-hui<sup>1</sup>, LU Shu<sup>2</sup>, LI Gui-bai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, tjy800112@163.com; 2. Beijing Building Materials Academy of Sciences Research, Beijing 100041, China)

**Abstract:** To produce high quality drinking water more effeciently, a submerged membrane adsorption bioreactor (MABR) was evaluated for enhanced removal of organic matter from contaminated raw water. The results showed that the MABR was able to decrease influent TOC, COD<sub>Mn</sub>, DOC and UV<sub>254</sub>, as well as BDOC and AOC by 41.3%, 59.4%, 36.7%, 53.5%, 67.9% and 44.0%, respectively, when powdered activated carbon (PAC) was dosed in the reactor at 8 mg/L. In the MABR, physical separation by the membrane, biodegradation by microorganism and adsorption by PAC were identified to jointly contribute to the removal of dissolved organic matter, with the respective contribution of 11.1%, 7.6% and 18.0% in terms of DOC removal. However, enhanced separation effect on dissolved organic matter in the mixed liquor was observed for the membrane in MABR, which was attributed to a dynamic sludge layer formed on the membrane surface based on microscopic analysis. Taking into account of the short hydraulic retention time (0.5 h), MABR technology may be both technically and economically promising for application in drinking water treatment.

**Key words:** drinking water treatment; membrane adsorption bioreactor (MABR); powdered activated carbon (PAC); organic matter

近年来, 低压膜滤技术在水处理领域中得到

空前发展, 被认为是常规澄清过滤工艺的替代工艺<sup>[1]</sup>. 也有人对膜滤与活性污泥的组合工艺, 即膜生物反应器在饮用水处理中的应用进行了研究<sup>[2-4]</sup>, 但是由于水源水中的有机物以难生物降解有机物为主, MBR 通常要与臭氧、粉末活性炭(PAC)等联用, 才能取得较好的处理效果. MBR 与 PAC 的组合工艺是一项很有前景的饮用水深

收稿日期: 2009-01-21.

基金项目: 国家“水体污染控制与治理科技重大专项”项目(2008ZX07423-002-4); 中国博士后科学基金面上项目(20100471074); 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金项目(QA201017).

作者简介: 田家宇(1979—), 男, 博士, 讲师;  
李圭白(1931—), 博士生导师, 中国工程院院士.

度处理技术. 粉末炭能够通过其强大的吸附功能去除水中难生物降解有机物质, 并为反应器内微生物的生长繁殖提供载体<sup>[5-6]</sup>. 在一体化 PAC/MBR 系统中, PAC 吸附、生物降解以及膜分离等单元过程可在同一个反应器中完成, 显著简化了工艺. 另外, 有研究表明, 在 MBR 反应器中投加 PAC 还能有效减缓膜污染, 减少膜的清洗频率<sup>[7]</sup>.

相对于 MF 膜, UF 膜的一个突出优点就是能够完全截留细菌. 本研究针对微污染水源水, 考察了短水力停留时间(0.5 h)条件下超滤膜-粉末炭吸附生物反应器(MABR)去除有机污染物的效能, 并对其机理进行了探讨.

## 1 试验

### 1.1 试验装置与运行条件

试验装置主要由一组浸没式 MBR 组成. 其中的超滤(UF)膜组件为束状中空纤维膜, 由海南立升净水科技实业有限公司提供, 聚氯乙烯(PVC)材质, 膜孔径 0.01  $\mu\text{m}$ , 膜面积 0.4  $\text{m}^2$ . MBR 的运行方式为抽吸 8 min、停抽 2 min. 空气泵连续向反应器内曝气以提供溶解氧、进行搅拌混合并清洗膜丝表面, 气水比为 20:1. 本试验中膜通量控制在 10  $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . 反应器有效容积为 2 L, 相应的水力停留时间(HRT)为 0.5 h. 反应器内固体停留时间控制在 20 d, 剩余污泥通过污泥阀排出.

本试验开始之前, 该 MBR 已经稳定运行 6 个月. PAC 投加量为 10  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  原水, 采用间歇投加方式, 每天分 2 次投加到 MBR 反应器当中(构成 MABR). 试验结束之后, 将反应器内污泥清出, 进行单独的超滤试验, 其他运行条件完全相同. 通过 UF、MBR、MABR 的运行效果比较从而确定 UF、生物降解和 PAC 吸附 3 种机理在 MABR 除有机污染中所起的作用.

### 1.2 模拟微污染水源水

按 30:1 的比例将当地(哈尔滨)自来水与生活污水混合, 同时加入 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的腐殖酸, 以模拟微污染水源水. 该模拟水源水先在室温下稳定 2 d 后再供给 MABR 使用. 试验期间平均水温为 (16.9  $\pm$  1.5)  $^{\circ}\text{C}$ , pH 7.14  $\pm$  0.14.

### 1.3 检测方法

原水水样直接进入 TOC 分析仪(TOC - VCPH, Shimadzu, Japan)测定 TOC 值; 先经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤之后测定 DOC 值. MABR 出水已经经过反应器中 UF 膜(0.01  $\mu\text{m}$ ) 过滤, 所测 TOC 值即 DOC 值. 对于反应器内混合液, 则首先

在 5 000  $\text{r}/\text{min}$  下离心 5 min, 然后经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤, 进而测定混合液的 DOC 值. 常规水质指标  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  按标准方法进行测定.  $\text{UV}_{254}$  采用紫外可见分光光度计(UV754, CANY, CHINA)进行测定. 扫描电镜型号为 HITACHI S4800 HSD, Japan. AOC 采用刘文君等建立的方法进行测定<sup>[8]</sup>; BDOC 的测定是根据 Servais 等人建立的方法<sup>[9]</sup>, 培养方式为 22  $^{\circ}\text{C}$  培养 3 d.

## 2 结果与讨论

### 2.1 MABR 去除有机污染物效能

#### 2.1.1 DOC 和 $\text{UV}_{254}$ 的去除

水源水中的有机污染物大体可分为颗粒性有机物和溶解性有机物两大类, 其中颗粒性有机污染物可较容易地为水处理工艺所分离去除, 而溶解性有机物因危害较大、难于去除而成为关注的焦点. MABR 对溶解性有机污染物的去除情况如图 1 所示. 试验期间原水中 DOC 和  $\text{UV}_{254}$  分别为 (5.635  $\pm$  0.321)  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 (0.075  $\pm$  0.004)  $\text{cm}^{-1}$ , MABR 对这两个指标的去除率分别达到 36.7% 和 53.5%, 出水中浓度低至平均 (3.558  $\pm$  0.492)  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和 (0.035  $\pm$  0.006)  $\text{cm}^{-1}$ .

PAC 是一种优良的吸附剂, 在水处理中常被用于去除天然有机物(NOM)以及人工合成有机物(SOCs)<sup>[10]</sup>. MBR 与 PAC 联用具有很多优点, 如反应器内高质量浓度的 PAC 更利于对有机物的吸附, 由于 PAC 表面生长的细菌与吸附的有机物接触时间延长, 更利于对慢速降解有机物的生物降解, 由于 PAC 在反应器内的缓冲作用, 更利于应对有机物冲击负荷获得稳定的处理效果. 另外, 在 MABR 系统中, UF 膜通过其强大的固液分离作用将 PAC 以及吸附的有机物完全截留在反应器内, 通过剩余污泥排放排出吸附饱和的 PAC.

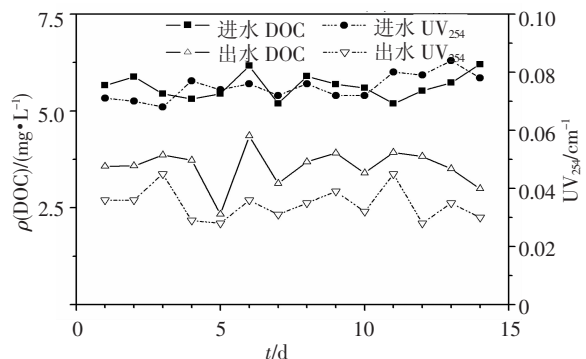


图 1 MABR 去除 DOC 和  $\text{UV}_{254}$  效能

#### 2.1.2 TOC 和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除

TOC 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  作为综合性有机污染指标广泛应用于我国饮用水处理领域. 如图 2 所示, 试验

期间原水中 TOC 和 COD<sub>Mn</sub> 的平均质量浓度分别为  $(6.099 \pm 0.496) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(4.22 \pm 0.43) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 经 MABR 处理后, 出水中质量浓度降低至  $(3.558 \pm 0.492) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(1.69 \pm 0.24) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别达到 41.3% 和 59.4%. MABR 工艺表现出良好的去除水中综合有机污染物的效能.

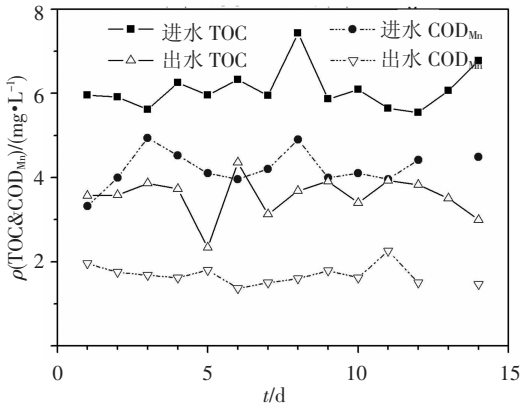


图2 MABR 去除 TOC、COD<sub>Mn</sub> 效能

### 2.1.3 BDOC 和 AOC 的去除

本研究中 MABR 去除 BOM 的效能也进行了研究, 结果如图 3 所示. MABR 将 BDOC 由原水中的  $(0.710 \pm 0.296) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低到出水中的  $(0.199 \pm 0.016) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率高达 67.9%. 另一方面, 原水中 AOC 平均质量浓度为  $(560.7 \pm 206.3) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 经 MABR 处理后, 出水中质量浓度降低至  $(309.7 \pm 125.1) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率为 44.0%. 由于可生物降解有机物的分子量普遍较小, 可认为 MABR 对其的去除主要是通过生物降解作用完成的.

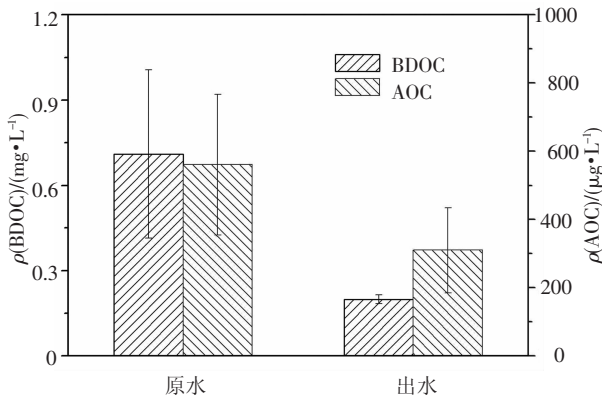


图3 MABR 去除 BDOC 和 AOC 效能

## 2.2 MABR 去除有机污染物的机理

### 2.2.1 3 种单元作用的贡献

在 MABR 系统中, 3 种单元作用协同完成对有机污染物的去除, 一是 UF 膜的截留作用; 二是反应器内微生物的降解作用; 三是 PAC 的吸附作用. 为了定量考察 3 种作用在 MABR 去除有机物

中所做的贡献, 在相同的试验装置和试验条件下进行了单独 MBR 及单独 UF 的实验, 结果如表 1 所示.

表1 UF、MBR 和 MABR 去除 DOC 效能的比较

种类	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	去除率/%
UF	$5.945 \pm 0.712$	$5.275 \pm 0.562$	$11.1 \pm 2.4$
MBR	$5.635 \pm 0.321$	$4.576 \pm 0.343$	$18.7 \pm 6.4$
MABR	$5.635 \pm 0.321$	$3.558 \pm 0.492$	$36.7 \pm 9.0$

由表 1 可见, 单独 UF 对进水 DOC 的平均去除率为  $(11.1 \pm 2.4)\%$ , 而 MBR 对 DOC 的去除率平均达  $(18.7 \pm 6.4)\%$ . 这意味着生物降解作用对 DOC 去除的贡献约为 7.6%. 另一方面, 当 PAC 投加到系统中后, MABR 对 DOC 的去除率增加到  $(36.7 \pm 9.0)\%$ , 较之 MBR 增加了 18.0%. 可认为这部分去除是由于 PAC 的投加造成的.

以上 3 种单元作用对 MABR 去除有机物的贡献是在对比单独 UF、MBR 和 MABR 的有机物去除效率的基础上得出的. 在 MABR 系统中, 3 种作用是相互影响、相互促进的. 例如, PAC 投加到 MABR 中后, 能改变膜表面污泥层的特性, 强化 UF 对有机物的截留; PAC 不但能为反应器中的微生物生长提供很好的载体, 还能吸附大量的有机物; 而 PAC 上高质量浓度的有机物又促进了其表面生物膜的生长和对有机物的代谢, 恢复 PAC 的吸附能力. 从而使 MABR 表现出比各种单独作用更优越的去除有机物效能.

### 2.2.2 膜表面污泥层对有机物的强化过滤作用

除了进出水外, 对 MABR 反应器内混合液中的溶解性有机物也进行了检测. 如图 4 所示, 混合液中 DOC 和 UV<sub>254</sub> 分别为  $(7.681 \pm 1.615) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(0.084 \pm 0.017) \text{ cm}^{-1}$ , 比出水中的浓度分别高了 114% 和 140%. 而在 2.2.1 中已经确定单独超滤膜对 DOC 的截留率较低, 平均仅为 11.1%. 很显然, MABR 中超滤膜对溶解性有机物的截留能力较之常规超滤膜有了显著提高.

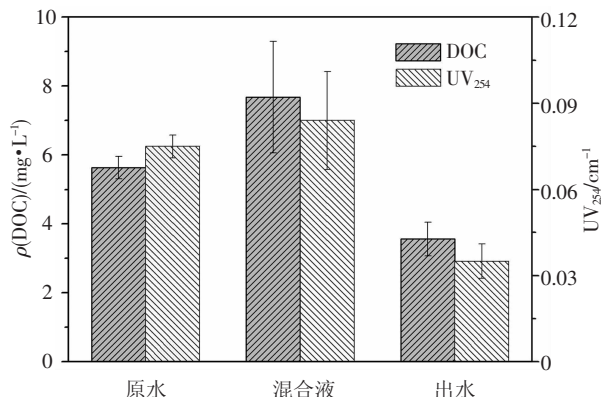


图4 MABR 进水、混合液以及出水中的 DOC 与 UV<sub>254</sub> 比较

为了更透彻地了解其中的原因,对 MABR 中的超滤膜样品以及新膜样品进行了扫描电镜分析,结果如图 5 所示.由图 5(a)、(b)可见,MABR 中膜断面与新膜断面在内部结构上没有显著的差别,膜污染主要形成在膜丝的外表面.这表明反应器中 UF 膜对混合液中有机物的强化截留作用并不是由于污染物在膜孔道内部沉积,导致孔道内径减小而造成的.另一方面,由图 5(c)可以看到新膜表面比较干净平滑,而 MABR 中的膜丝表面(图 5(d))则覆盖着一层不规则的污泥层.这层污泥层很可能对混合液中的溶解性有机物提供了附加的过滤作用.另一方面,混合液中细小的 PAC 颗粒本身也构成污泥层的一部分(肉眼可见),通过吸附和空间排阻协同截留混合液中的有机物,使之停留在反应器中,以待反应器内微生物进一步的降解.

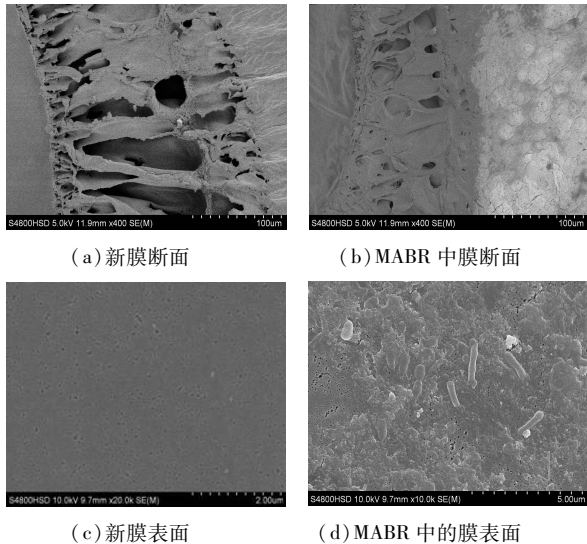


图 5 新膜、MABR 中膜断面,以及新膜和 MABR 中膜表面的 SEM 照片

## 4 结 论

1) 当 PAC 投加量为 8 mg/L 时, MABR 对 TOC、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DOC、 $\text{UV}_{254}$  以及 BDOC 和 AOC 的去除率分别为 41.3%、59.4%、36.7%、53.5%、67.9% 和 44.0%,表现出较好的去除有机污染物效能.

2) 在 MABR 系统中,超滤膜的截留、反应器内的生物降解以及 PAC 的吸附 3 种作用协同完成对溶解性有机污染物的去除,就 DOC 而言,三者的贡献分别为 11.1%、7.6% 和 18.0%.

3) SEM 分析表明 MABR 内的超滤膜表面覆

盖着一层污泥层,这层污泥层能对混合液中的溶解性有机物提供附加的过滤作用.

4) 由于 PAC 的投加,使得 MABR 较之常规处理工艺表现出多方面的优点.考虑到仅为 0.5 h 的水力停留时间, MABR 无论是从技术上还是从经济上考虑都有着很好的应用前景.

## 参 考 文 献:

- [1] CHOI K Y J, DEMPSEY B A. In-line coagulation with low-pressure membrane filtration [J]. *Water Res*, 2004, 38(19): 4271–4281.
- [2] LI X Y, CHU H P. Membrane bioreactor for drinking water treatment of polluted surface water supplies [J]. *Water Res*, 2003, 37(19): 4781–4791.
- [3] SAGBO O, SUN Y X, HAO A L, *et al.* Effect of PAC addition on MBR process for drinking water treatment [J]. *Sep Purif Technol*, 2008, 58(3): 320–327.
- [4] WILLIAMS M D, PIRBAZARI M. Membrane bioreactor process for removing biodegradable organic matter from water [J]. *Water Res*, 2007, 41(17): 3880–3893.
- [5] LESAGE N, SPERANDIO M, CABASSUD C. Study of a hybrid process: Adsorption on activated carbon/membrane bioreactor for the treatment of an industrial wastewater [J]. *Chem Eng Process: Process Intensification*, 2008, 47(3): 303–307.
- [6] GUO W S, VIGNESWARAN S, NGO H H. Comparison of the performance of submerged bioreactor (SMBR) and submerged membrane adsorption bioreactor (SMABR) [J]. *Bioresource Technol*, 2008, 99(5): 1012–1017.
- [7] AKRAM A, STUCKEY D C. Flux and performance improvement in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) using powdered activated carbon (PAC) [J]. *Process Biochem*, 2008, 43(1): 93–102.
- [8] LIU W, WU H, WANG Z, *et al.* Investigation of assimilable organic carbon (AOC) and bacterial regrowth in drinking water distribution system [J]. *Water Res*, 2002, 36(4): 891–898.
- [9] SERVAIS P, BILLEN G, HASCOËT M C. Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters [J]. *Water Res*, 1987, 21(4): 445–450.
- [10] LEE J J, WALKER H W. Effect of process variables and natural organic matter on removal of microcystin-LR by PAC-UF [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(23): 7336–7342.

(编辑 刘 彤)