

文章编号:1007 - 8924(2007)01 - 0035 - 06

# 微污染水处理中投加粉末炭减缓膜污染的机理研究

郝爱玲, 陈永玲, 顾 平

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 采用 MBR(膜生物反应器)及 MBR - PAC(PAC,粉末活性炭)组合工艺处理微污染湖水. 试验考察了各工艺条件下的膜污染状况,发现投加 PAC 降低了膜阻力,利于减缓膜污染. 为了进一步研究相应的机理,采用空间排阻液相色谱(SEL C)法对粉末炭投加前后膜污染物的分子量分布(MWD)进行了直接和间接的测定. 结果表明,在 MBR 应用于微污染湖水处理时,小分子物质是一类重要的膜污染物质. PAC 对大量小分子污染物( $M_w < 3\ 000$ )的有效吸附去除是投加 PAC 后膜污染状况改善的重要原因.

**关键词:** 微污染地表水; MBR - PAC 组合工艺; 膜污染; 分子量分布

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A

作为一项处理微污染水源水的新技术,MBR 工艺在近几年倍受瞩目. 有研究证实采用 MBR 及其组合工艺处理微污染原水可以获得优质的出水<sup>[1,2]</sup>.

很多学者的研究表明,对于处理地表水的 MF 或 UF 膜工艺来说,天然有机物(NOM)是一种主要的污染物质<sup>[3,4]</sup>. Sundaramoorthy 等<sup>[5]</sup>研究发现,不同形态的 NOM 对 MF/UF 的膜污染会产生不同的影响,胶体状有机物最容易造成膜的不可逆污染. Lin 等<sup>[6]</sup>还对腐殖酸的分子量、亲水性、不同的官能团对膜的污染程度进行了分析,发现小分子物质中亲水性的部分截留率很低,但对通量的下降比疏水性部分所产生的影响更大. 这些研究都表明单纯依靠膜截留去除有机物的膜污染风险很高,可以考虑采用膜组合工艺以降低膜污染. Jacangelo 等<sup>[7]</sup>通过试验证实在 UF 系统中投加 PAC 能够提高膜系统的通量,大大延缓膜阻力的增加, PAC 吸附了水中的有机物质,尤其是溶解性有机物质,防止了膜的有机污染. 董秉直等<sup>[8]</sup>采用粉末活性炭与超滤膜联合技术处理黄浦江原水,得出了相同的结论. 分析认为,当进水 NOM 的组成不同,所用的膜组件孔径不同、材质不同时,膜污染的具体情况会有差异. 在微

污染水源水处理中,投加 PAC 对膜污染的影响需要具体分析.

本文进行了单独 MBR 及 MBR - PAC 组合工艺处理实际微污染湖水的对比试验,重点探讨膜污染问题. 试验中,我们采用 SEL C 法测定各 MBR 工艺中膜污染物的 MWD,比较它们在 PAC 投加前后的变化. 从 MWD 的角度入手,来进行投加 PAC 改善膜污染状况的机理研究.

目前 SEL C 法多被用于测定进出水水样的 MWD,来考察不同工艺的处理效果或是间接地推测膜污染状况<sup>[9]</sup>. 像本试验这样应用 SEL C 法直接对膜污染物进行 MWD 测定的研究未见报道.

## 1 试验装置与方法

### 1.1 工艺流程及参数

图 1 所示为试验的工艺流程图.

反应器全天运行,24 h 连续曝气,连续进水间歇出水,出水 8 min,停 2 min. 所用中空纤维膜组件为 0.75 m<sup>2</sup> 的聚偏氟乙烯(PVDF)U 型膜,膜孔径 0.22 μm. MBR 的流量控制在 12 L/h,水力停留时间 2 h,泥龄 30 d,气水比 20:1. 当采用 MBR - PAC 工艺时,在运行之初向反应器内一次性投加 PAC

收稿日期:2005 - 04 - 25; 修改稿收到日期:2006 - 05 - 25

基金项目:教育部天南大合作项目

作者简介:郝爱玲(1980 - ),女,博士.

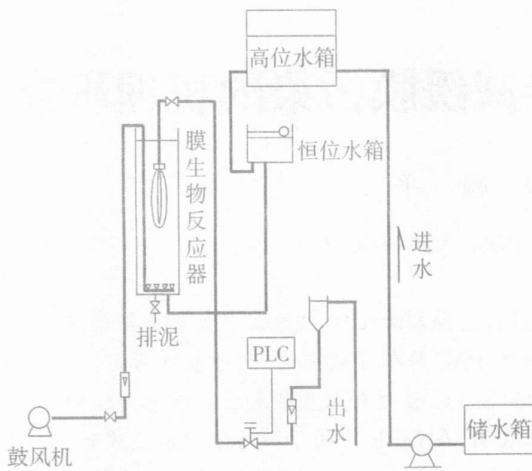


图1 试验工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of the test unit

48 g,之后每天定量排泥的同时补投新炭,维持 PAC 在反应器中的浓度为 2 g/L. 所用 PAC 为分析纯,平均粒径 150 目(约 90  $\mu\text{m}$ ),购于天津科威化学试剂公司.

### 1.2 进水水质

试验中,同一反应器分别采用 MBR 和 MBR - PAC 工艺处理微污染湖水,各自运行了 47 天和 78 天,在运行期间没有进行膜清洗. 进水为天津大学青年湖水,各工艺的进水水质大致相同,以  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为评价指标,进水属于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定的 Ⅲ类水. 具体水质情况如下:浊度为 7.28~26.43 NTU,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为 6.17~9.44 mg/L,  $\text{UV}_{254}$  为 0.084~0.112  $\text{cm}^{-1}$ ,氨氮为 0.381~0.719 mg/L,水温为 12~20  $^{\circ}\text{C}$ ,pH 值为 7.98~8.12.

### 1.3 分析项目及方法

试验中采用 SELC 法对水样进行了 MWD 的测定. 与现阶段国内较常采用的分子过滤(超滤和纳滤)法相比,从分析化学领域引入的 SELC 法具有测定迅速的优势. 预处理对水样的干扰少,并且可以得到水样 MWD 的连续曲线,更为形象直观.

试验所用高效液相色谱是安捷伦 1100 系列,尺寸排斥色谱柱(PL aquagel - OH, 300 mm  $\times$  7.5 mm, 8  $\mu\text{m}$ )配以示差折光检测器. 柱温 25  $^{\circ}\text{C}$ ,流动相为超纯水,流速 1 mL/min. 试验中使用安捷伦公司提供的由 4 个不同分子量的氧化聚乙烯(Polyethylene oxide)纯物质组成的混合标样,所绘制的标准曲线能测定分子量在  $10^2 \sim 10^7$  Dalton 之

间的物质. 进行 MWD 测定时,待测样在进入色谱柱之前要经过 0.22  $\mu\text{m}$  的醋酸纤维滤芯过滤,故而试验测定的主要是溶解态有机物对膜的污染情况.

试验可获得各水样的 MWD 图,其横坐标为保留时间,纵坐标为示差折光检测器在每一出峰时刻的响应值. 由于分子量不同的物质保留时间不同,且某一分子量的物质含量越高,检测器的响应值就越高,所以可根据标准样的保留时间来划分某一分子量段物质的保留时间范围,对照标样的保留时间段来确定试样中该分子量段物质是否存在,并通过响应值的大小确定各个分子量段的物质含量的多少. 本试验用某一确定保留时间段内响应值与横坐标轴围成的面积(定义为响应面积)来度量与该时段相对应的某一分子量段物质的含量. 类似于用  $\text{UV}_{254}$  描述水中有机物浓度,它可以作为一个综合指标来表征水中某一分子量段物质的相对含量.

## 2 试验结果

### 2.1 膜污染状况

试验中,膜污染状况由膜两侧的压差和膜通量的变化间接反映,它们与膜阻力的关系由式(1)和(2)确定<sup>[10]</sup>:

$$J = \frac{p}{\mu \cdot R_t} \quad (1)$$

$$R_t = R_m + R_c + R_f \quad (2)$$

式中, $J$  是膜通量,  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $p$  是膜两侧的压差, Pa;  $\mu$  是透过液的黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $R_t$ ,  $R_m$ ,  $R_c$  和  $R_f$  分别代表膜过滤过程中的总阻力、膜固有阻力、沉积阻力和污染阻力,  $\text{m}^{-1}$ .

将式(1)变形后,可得到膜比通量  $SF$  的定义式:

$$SF = \frac{J}{p} = \frac{1}{\mu \cdot R_t} \quad (3)$$

#### 2.1.1 膜比通量的下降

在反应器运行过程中,膜污染的出现导致了膜比通量的下降,表 1 列出了两个工艺在运行之初和运行结束时的膜比通量,分别为  $SF_0$  和  $SF_t$ . 由表 1 可以看出两个工艺的  $SF_0$  相近,与 MBR 工艺相比,MBR - PAC 工艺在运行较长的时间、处理了较多的水量后,  $SF_t$  仍维持较高的数值. 这表明 PAC 的投加有效地延缓了膜通量的衰减,减少了膜污染.

#### 2.1.2 各工艺处理微污染水的膜阻力分布

应用公式(1)、(2),通过测定新膜的清水通量和

表 1 各工艺的膜比通量和处理水量

Table 1 Membrane specific flux and treated water quantity of each process

试验编号	MBR	MBR - PAC
$S F_0 / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$1.02 \times 10^{-6}$ (100 %)	$0.99 \times 10^{-6}$ (100 %)
$S F_t / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$3.21 \times 10^{-7}$ (31.5 %)	$4.29 \times 10^{-7}$ (43.3 %)
累计处理水量/ $\text{m}^3$	10.8	18.0
单位膜面积处理水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$	14.4	24.0

注:括号内为各膜比通量占初始比通量的百分比。

$p$  求  $R_m$ , 测定运行结束时膜的清水通量和  $p$  求  $R_t$ , 然后用自来水洗去膜组件的泥饼层, 即去除  $R_c$ , 由清洗后膜的清水通量和  $p$  求  $R_m + R_f$ . 根据上述数值即可分别求出  $R_t$ ,  $R_m$ ,  $R_c$  和  $R_f$ , 各工艺的膜阻力分布如表 2 所示。

表 2 膜阻力分布

Table 2 Distribution of membrane resistances

试验编号	for each process $\times 10^{12} \text{ m}^{-1}$					
	$R_t$	$R_m$	$R_c$	$R_f$	$R_c^*$	$R_f^*$
MBR	2.47	0.98	1.01	0.48	0.070	0.033
MBR - PAC	1.92	1.00	0.52	0.40	0.021	0.017

\* 注:  $R_c$  和  $R_f$  的单位为  $\times 10^{12} \text{ m}^{-1} / \text{m}$ .

本试验中,  $R_c$  是由泥饼层的形成而产生,  $R_f$  主要由膜的吸附污染和膜孔堵塞所造成. 膜污染程度与单位膜面积处理水的体积(即流过膜面的水柱长度)有关. 对于阻力项  $R_f$  而言, 流过膜面的水柱长度越长, 膜遭受污染的机会越多; 分析阻力项  $R_c$ , 它由泥饼层的产生而形成, 膜出水会导致泥饼层的形成, 曝气产生的气液两相流的冲刷会导致其脱落, 两种作用综合的结果使膜面形成一层相对稳定的泥饼层. 泥饼层由不同粒径的颗粒组成, 它的形成是一个选择性的过程. 一般来说, 小颗粒容易在膜表面附着, 并且附着较牢不易被曝气吹脱; 而大颗粒则相反, 难附着却又易被吹脱. 所以在曝气强度恒定的情况下, 运行时间越长, 膜出水量越多, 泥饼层中小颗粒组分的含量就越多, 这增加了泥饼层的致密性,  $R_c$  相应增加. 基于以上分析, 考虑到试验中各工艺的处理水量不同, 为了使  $R_c$  或  $R_f$  的数值具有可比性, 将它们都除以各工艺中流过膜面的水柱长度, 得到  $R_c$  和  $R_f$ , 来描述污染阻力。

从表 2 可以看出, 投加 PAC 后,  $R_c$  和  $R_f$  分别降至原 MBR 工艺的 30.0 % 和 51.5 %. 可见 PAC 的

加入对  $R_c$  和  $R_f$  的减少都有贡献, 从而显著减少了膜污染。

## 2.2 膜污染物的分子量分布(MWD)

通过讨论 PAC 投加对膜污染物 MWD 的影响, 可以进一步研究投加 PAC 降低膜阻力、减少膜污染的机理。

本试验中测定的膜污染物由 3 部分组成, 分别为: 泥饼层污染物、可逆污染物和不可逆污染物. 它们的定义与其测定方法相关: 在各工艺运行的最后一天, 截取 1 m 长的膜纤维, 用清水冲洗掉表面附着的污泥, 进行泥饼层污染物的测定; 随后将膜纤维剪碎, 放入 20 mL 超纯水中浸泡, 充分振荡后, 取浸泡液进行可逆污染物的测定; 将上述在超纯水中经充分振荡的膜纤维取出, 再用 20 mL 0.1 mol/L NaOH 进行预处理<sup>[11]</sup>, 取处理后的浸泡液进行不可逆污染物的测定。

由膜污染物的测定方法认为泥饼层污染物含量与  $R_c$  相关, 而可逆污染物和不可逆污染物的含量影响着  $R_f$  的大小。

### 2.2.1 泥饼层污染物的 MWD

各工艺泥饼层污染物的 MWD 如表 3 所示. 由表 3 可以看出, 投加 PAC 时, 膜表面通过单位长度水柱后,  $M_w > 10^4$  的大分子有机物的含量减少了 20.9 %, 同时  $M_w < 10^4$  的有机物含量降低更为显著, 与 MBR 工艺相比平均减少了 72.5 %. 有研究表明, 有机物的存在能够将固体颗粒粘合成紧密的滤饼层<sup>[12]</sup>, 同时小分子物质可能被吸附在滤饼层的空隙内, 使其更加密实<sup>[13]</sup>, 从而增加了膜过滤阻力. 所以认为 MBR - PAC 工艺中 PAC 的投加减少了泥饼层中小分子有机物的含量, 利于  $R_c$  的降低。

表 3 通过单位长度水柱时膜表面泥饼层的分子量分布

Table 3 MWD of cake layer when water column with unit length passing through membrane surface

$M_w / \text{Da}$	$\times 10^4 \text{ nRIU} \cdot \text{min} \cdot \text{m}^{-1}$		
	$< 3\ 000$	$3\ 000 \sim 10\ 000$	$> 10\ 000$
MBR	1.47(100 %)	0.60(100 %)	6.69(100 %)
MBR - PAC	0.57(38.8 %)	0.09(15.0 %)	5.29(79.1 %)

### 2.2.2 可逆污染物和不可逆污染物的 MWD

图 2 表示了各工艺中可逆污染物和不可逆污染物的 MWD。

对比图 2(a)、(b) 的虚线和实线可以清楚地看

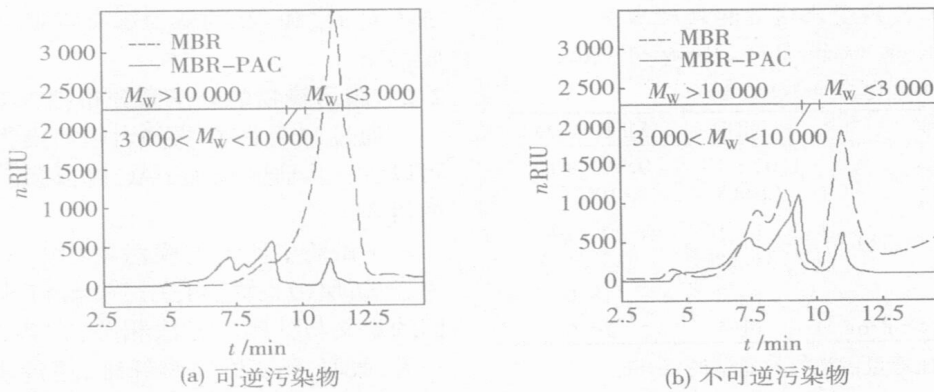


图2 膜污染物的分子量分布

Fig. 2 MWD of membrane pollutants

出投加 PAC 后,膜污染物的总量减少.其中可逆膜污染物含量的减少最明显,主要集中在  $M_w < 10^4$  的分子量段上.不可逆膜污染物含量在大部分分子量段范围内都有减少,同样以小分子有机物的减少最多.需要注意的是,图2显示的试验结果还尚未考虑各工艺处理水量的不同,这足以证明在 PAC 投加后,小分子膜污染物含量的减少是相当可观的.这利于 MBR - PAC 工艺中  $R_f$  的降低.

### 2.3 混合液的分子量分布(MWD)

由于反应器内的混合液是与膜直接接触的,所以混合液的组成与变化必然与形成膜表面的泥饼层以及造成膜孔内的吸附和沉积污染有密切的关系.在很大程度上混合液的性质影响着膜污染的状况,良好的混合液性质可以使  $R_c$  和  $R_f$  都有所降低<sup>[6]</sup>.为此试验还测定了各工艺中反应器内混合液的 MWD,从这一角度进一步考察投加 PAC 减少膜污染的机理.

试验的测定结果见表4.表4中给出的是各工艺在一段稳定运行区间内多次取样的平均测定值(MBR 工艺在第27~32天,MBR - PAC 工艺在第42~48天,每天取样,并且在运行区间内,MBR 工艺的进水水质参数与 MBR - PAC 工艺几乎相同,波动不大于5%).

由表4中直接测定的试验结果可以看出,在进行微污染水处理时,无论 MBR 还是 MBR - PAC 工艺,其混合液组成都以  $M_w < 3000$  的小分子物质为主.与 MBR 工艺相比,投加 PAC 以后,MBR - PAC 工艺中混合液的累积在各分子量段范围内都是降低的,其中  $M_w < 3000$  的小分子有机物减少最多,达到17.4%.由于较低的混合液累积利于降低膜污

染<sup>[11]</sup>,有助于减少  $R_c + R_f$ ,所以上述试验结果间接证实了在本试验条件下投加 PAC 利于减缓膜污染.

表4 混合液的分子量分布

		Table 4 MWD of mixed liquor $\times 10^4$ nRIU · min			
		$M_w$	< 3 000	3 000 ~ 10 000	> 10 000
直接测定	MBR		13.8	3.51	8.38
	MBR - PAC		11.4	3.39	7.67
预处理后	MBR		13.6	14.4	24.8
	MBR - PAC		16.7	8.07	14.8

除了直接测定外,试验中还同样的混合液进行了加碱预处理(加入0.1 mol/L NaOH,冷冻2h),这一对比测定结果也在表4中列出.对比表4中各工艺预处理前后的 MWD 会发现,预处理后 MBR - PAC 工艺中  $M_w < 3000$  的有机物含量增加了,而 MBR 工艺中这部分物质的含量基本保持不变.分析原因认为是加碱预处理使吸附在 PAC 上的物质脱附<sup>[14]</sup>,从而增加了它们在混合液中的含量.这证明 PAC 对于  $M_w < 3000$  的有机物的去除主要是通过吸附作用.此外,加碱预处理也会造成活性污泥菌胶团间的一些胞外聚合物(EPS)等大分子物质溶出,进入到混合液的液相中<sup>[11]</sup>.这同表4中的另一个试验现象相吻合,即各工艺混合液中  $M_w > 3000$  的有机物含量在预处理后明显增加.比较而言,预处理后 MBR 工艺中这部分物质含量的增加要比 MBR - PAC 工艺明显,这说明 MBR - PAC 工艺中 EPS 等大分子物质的含量低于 MBR 工艺.这很可能是由于投加 PAC 减少了 EPS 等大分子物质的分泌所致. Kim 等人<sup>[15]</sup>的研究就曾证实这一结论.

从上面的分析可以看出,PAC 的投加可以减少混合液中各分子量段物质的含量,降低  $R_c + R_f$ ,但

具体来说对不同分子量段物质的去除 PAC 所起的作用是不同的。

### 3 讨论

在 MBR 运行过程中,溶解性有机物是一类重要的膜污染物质<sup>[2]</sup>。其中大分子物质(如 EPS)早已被很多试验证实是造成膜污染的主要物质<sup>[16]</sup>。而小分子物质虽然从尺寸上推测不易被膜截留,但是它们易于吸附在膜孔内造成膜吸附污染;并且还可能沉积在膜表面使泥饼层更加密实。因此小分子物质的大量存在同样会对膜的稳定工作造成不利影响。传统的 MBR 工艺应用于污水处理,原水中以大分子物质的含量居多,如试验测定生活污水中  $M_w > 10^4$  的物质含量占 70.3%,相应的大分子污染物是膜污染的主体,小分子污染与之相比几乎可以忽略<sup>[17]</sup>。而微污染湖水则不同,本试验中进行了进水 MWD 的测定,结果表明进水中 56.1% 的有机物  $M_w < 3\ 000$ ,并且这些小分子物质不容易被生物降解(试验测得进水的  $BOD_5/COD_{Cr} < 0.1$ ),因此不同于污水处理,将 MBR 应用于微污染水源水处理时由小分子物质造成的膜污染状况不容忽视。这已经由上面的试验所证实。

同时,正是由于原水水质的不同,使得投加 PAC 减缓膜污染的机理不同,或者说在 PAC 减缓膜污染的各种作用中谁是主导作用在很大程度上与原水水质相关。从 MWD 的角度分析,在 MBR 应用于污水处理时,PAC 的存在对膜污染物质的去除主要是显著降低了大分子污染物的分泌,很多研究都支持这一结论<sup>[6,15]</sup>。而本文证实,当 MBR 应用于微污染水源水处理时,PAC 对小分子污染物的良好吸附去除作用对减轻膜污染有重要贡献。

### 4 结论

1) MBR 及 MBR - PAC 工艺处理微污染湖水的对比试验证实,投加 PAC 可以降低膜阻力  $R_c$  和  $R_f$ ,从而有效地延缓了膜通量的衰减,减少了膜污染。

2) 对各工艺的泥饼层污染物、可逆污染物和不可逆污染物进行 MWD 测定表明,在微污染湖水处理中,小分子有机物是膜污染物的重要组成。投加 PAC 可以降低各部分膜污染物的含量。并且与 MBR 工艺相比,PAC 的投加显著减少了  $M_w < 10^4$

的小分子有机物的含量,这利于 MBR - PAC 工艺中  $R_c$  和  $R_f$  的降低。

3) PAC 的投加减少了 MBR 混合液中各分子量段物质的含量,也利于  $R_c + R_f$  的降低。其中,PAC 对于  $M_w < 3\ 000$  的有机物的去除主要是通过吸附作用;而同时投加 PAC 还部分减少了 EPS 等大分子物质的分泌,对  $M_w > 3\ 000$  的有机物实现了一定的去除。

### 参 考 文 献

- [1] 王琳,王宝贞. 饮用水深度处理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [2] 董秉直,陈艳,高乃云,等. 粉末活性炭-超滤膜处理微污染原水试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005,33(6):777-780.
- [3] Yuan W, Zydney A L. Humic acid fouling during ultrafiltration[J]. Environ Sci Technol, 2000, 34(23): 5043-5050.
- [4] Yuan W, Zydney A L. Humic acid fouling during microfiltration[J]. J Membr Sci, 1999,157(1):1-12.
- [5] Sundaramoorthy K, Brügger A, Panglisch S, et al. Studies on the minimisation of NOM fouling of MF/UF membranes with the help of a submerged "single" capillary membrane apparatus[J]. Desalination, 2005,179(1-3): 355-367.
- [6] Lin Cheng - Fanga, Lin Tze - Yaoa, Hao O J. Effects of humic substance characteristics on UF performance [J]. Wat Res, 2000,34(4):1097-1106.
- [7] Jacangelo J G, Lañón M, Cummings E W, et al. UF with pretreatment for removing DBP precursors [J]. J AWWA, 1995, 87(3): 100-112.
- [8] 董秉直,曹达文,范瑾初. 粉末活性炭-超滤膜处理黄浦江原水的研究[J]. 上海环境科学, 2003,22(11): 731-733,737.
- [9] Li Chi - wang, Chen Yi - shiou. Fouling of UF membrane by humic substance: Effects of molecular weight and powder - activated carbon (PAC) pre - treatment [J]. Desalination, 2004, 170: 59-57.
- [10] Lim A L, Bai R. Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater[J]. J Membr Sci, 2003, 216:279-290.
- [11] 顾国维,何义亮. 膜生物反应器—在污水处理中的研究和应用[M]. 北京:化学工业出版社,2002: 309-310.
- [12] Schäfer A I, Schwicker U, Fischer M M, et al. Microfiltration of colloids and natural organic matter [J]. J

- Membr Sci, 2000, 171(2): 151 - 172.
- [13] Kuberkar V T, Davis R H. Modeling of fouling reduction by secondary membrane[J]. J Membr Sci, 2000, 168(1 - 2): 243 - 258.
- [14] 周云, 何义亮. 微污染源净水技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 7: 131.
- [15] Kim Jae - Sok, Lee Chung - Hak, Chun Hee - Dong. Comparison of ultrafiltration characteristics between activated sludge and BAC sludge [J]. Wat Res, 1998, 33(11): 3443 - 3451.
- [16] Lee Wontae, Kang Seoktae, Shin Hangsik. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors[J]. J Membr Sci, 2003, 216(1 - 2): 217 - 227.
- [17] 张颖. 膜生物反应器中延缓膜污染技术的研究[D]. [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2004: 12.

## Influence of PAC addition on membrane fouling control in micro - polluted water treatment

*HAO Ailing, CHEN Yongling, GU Ping*

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In this experiment membrane bioreactor (MBR) and its hybrid process (MBR - PAC) were used to treat micro - polluted lake water. The influence of PAC addition on membrane fouling was investigated. It was found that PAC addition helped to reduce the membrane resistance and relieve membrane fouling. In order to understand its mechanism, steric exclusion liquid chromatogram (SELC) was applied to measure the molecular weight distribution (MWD) of membrane pollutants. Comparing the MWD analysis results of different processes it was proved that small molecule organic matters ( $M_w < 3\ 000$ ) were the main membrane pollutants of MBR process in micro - polluted lake water treatment. The membrane fouling was relieved for reason of the effective adsorption of a large number of small molecule pollutants by PAC.

**Key words:** micro - polluted surface water; MBR - PAC hybrid process; membrane fouling; molecular weight distribution

(上接第 34 页)

## Preparation and characterization of novel microporous silicon carbide ceramic membrane tube

*LIU Youzhi, SHI Guoliang, GUO Yu, ZHANG Hongyu*

(Technology and Research Center of Chemical Engineering, North of China University, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The single - channel microporous ceramic substrate was prepared via liquid phase sintering technique by using SiC as aggregate and eutectic mixture as sintered aids, and then the  $Al_2O_3$  membrane was made on the substrate by dip coating method. The effects of the coating layer and sintering temperature on the pore size distribution of the substrate and air flux were also investigated. The results show that the membrane pore size distribution is narrower than that of the SiC substrate while the air flux decreased. The porosity and air flux of the SiC substrate were decreased, the pore size distribution and average pore size of it were increased with the increasing of sintering temperature.

**Key words:** SiC; microporous ceramic membrane; sintered aids; characterization