

内置转盘式膜-生物反应器处理污水的工艺条件研究

吴桂萍^{1,2}, 杜春慧², 徐又一^{2*}

(1. 华中科技大学环境科学研究所, 武汉 430074; 2. 浙江大学高分子科学与工程系, 杭州 310027)

摘要: 对内置转盘式膜-生物反应器(SRMBR)处理污水工艺进行了研究. 进水 COD 160~368 mg/L 时, 出水 COD 在运行 1d 后降低到 20 mg/L 以下, 去除率大于 90%; 转盘式膜组件的转速在 0~25 r/min 范围内, 平衡膜通量随转速增大而快速增加, 继续增大转速则平衡膜通量的增加变得不显著; 在一定范围(0~1min)内延长停抽时间有助于缓解膜污染; SRMBR 在较低的气水比(15:1)下运行, 也可达到较高的平衡膜通量. 研究表明, SRMBR 在最佳组合操作条件(转速为 25r/min, 抽/停为 9min/1min, 气水比为 15:1, 抽吸压力为 25kPa)下运行, 其平衡膜通量高达 53.75 L/(m²·h).

关键词: 内置转盘式膜-生物反应器; 膜污染; 平衡膜通量

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)11-2217-05

Study on the Process for Wastewater Treatment in Submerged Rotating Membrane Bioreactor

WU Guiping^{1,2}, DU Chunhui², XU Youyi²

(1. Institute of Environmental Science, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Department of Polymer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The process for wastewater treatment in submerged rotating membrane bioreactor (SRMBR) was studied. It was found that the effluent COD reduced to 20 mg/L after one day running when the influent COD varied from 160 mg/L to 368 mg/L. The equilibrium membrane flux increased rapidly with increasing rotation speed of membrane in the range of 0 to 25r/min. Within one minute, the increase of suspended suction time could alleviate the membrane fouling. Moreover, higher membrane flux could be reached even at lower aeration/water ratio (15:1) in SRMBR process. The optimum processing condition was suggested as follows: the rotation speed was 25r/min, suction time/suspended time was 9min/1min, aeration/water ratio was 15/1, and operation pressure was 25kPa. Under this condition, the equilibrium membrane flux could reach 53.75 L/(m²·h).

Key words: submerged rotating membrane bioreactor; membrane fouling; equilibrium membrane flux

膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)以膜过滤替代传统活性污泥法中的二沉池, 实现了水力停留时间与污泥龄的彻底分离, 具有处理效率高、出水水质好; 设备紧凑、占地面积小; 易实现自动控制、运行管理简单等优点^[1~4]. MBR 在废水回用方面具有诱人的潜力, 但是与其他工艺一样, 其发展不仅取决于工艺本身, 还取决于其经济可行性. MBR 工艺的费用主要包括膜的价格、膜的更换频率和能耗需求. 随着膜的制作水平的提高, 膜的价格已大大降低, 而膜污染是影响膜的更换频率的一个决定性因素^[5], 因此, 寻求膜污染防治措施和降低能耗是当前 MBR 研究的一个重要方向.

目前, 国内外膜污染防治技术主要集中在: 对料液的预处理、膜材料的改性、操作条件优化、膜污染后的清洗等几个方面, 其中有关操作条件(抽停比、操作压力、曝气量等)优化的研究尤为活跃. 本文应用自行设计的新型的内置转盘式膜-生物反应器(submerged rotating membrane bioreactor, SRMBR)

处理污水, 研究其特性并优化了工艺条件.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置见图 1, 主要由生物反应器、膜组件和传动装置 3 部分组成. 生物反应器有效容积 80L. 污水从进水箱进入生物反应器, 经微生物生化反应, 在自吸泵的抽吸作用下经膜出水, 自吸泵由时间控制器自动控制开停. 安装在传动轴上的圆形膜组件(2 个), 在可调速的电机带动下以一定的转速旋转. 由曝气泵经安装在反应器底部的曝气头向反应器内提供空气, 曝气量由转子流量计计量及调节.

1.2 实验用膜

实验用膜采用浙江大学高分子科学研究所研制的聚醚砜/磺化聚醚砜共混平板复合膜, 以无纺布为

收稿日期: 2005-10-23; 修订日期: 2005-12-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA601230); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB615705)

作者简介: 吴桂萍(1975~)女, 讲师, 主要研究方向为污水处理.

* 通讯联系人, E-mail: opfyyxu@zju.edu.cn

支撑层,其主要参数见表 1,膜表面扫描电镜照片见图 2. 将复合膜粘接在圆形的具有集水通道的 PVC 板上做成膜组件,一个组件的有效膜面积为 0.12m².

1.3 实验用水

实验用模拟污水由奶粉、葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钠等配制而成, COD 为 160~368 mg/L, C/N/P 约 100/5/1.

1.4 实验方法

本实验取杭州青春宝公司污水处理站污泥浓缩池污泥进行曝气培养,1 周后开始运行,实验主要工艺参数见表 2. 分析项目及方法: COD 采用重铬酸钾法 (GB11914-89); 浊度采用浊度仪 (WTW-Turb555IR); 膜通量采用体积法.

实验共分 4 个部分. ①考察 SRMBR 对污水的处理效果. ②考察膜组件旋转速度对控制膜污染的影响. ③考察抽/停时间控制膜污染的效果. ④考察曝气量对膜污染的影响.

2 结果与讨论

2.1 SRMBR 处理效果

SRMBR 运行初期膜出水 COD 偏高,其原因是在制膜过程中,用 15% 甘油对膜进行了亲水化处

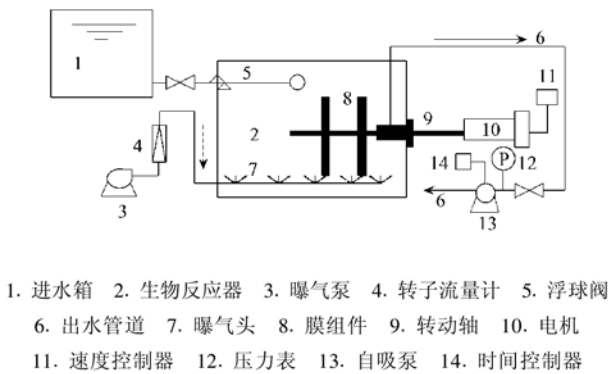


图 1 SRMBR 工艺流程

Fig. 1 Flow process diagram of SRMBR

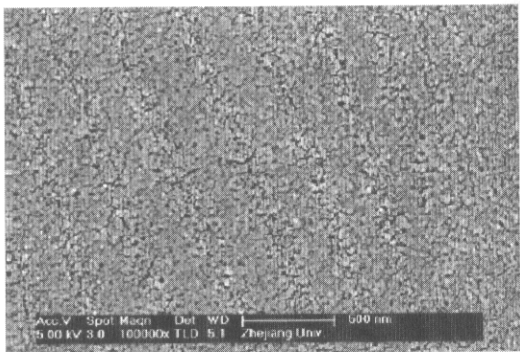


图 2 膜的扫描电镜照片

Fig. 2 SEM photo of the membrane

表 1 实验用膜基本性能

Table 1 Fundamental properties of the membrane

制膜液组成(质量分数)/%	纯水通量 ¹⁾ /L·(m ² ·h) ⁻¹	膜厚/μm	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	接触角 ²⁾ /(°)
PES/SPES/PVP/DMAc= 8/2/5/85	875	164	29.68	32.22	71.9

1) 纯水通量测定仪器: SCM-300 杯式超滤器; 方法: 150kPa 预压 30min, 100kPa 压力下测定; 2) 接触角测定仪器: Dataphysics OCA20, Germany

表 2 SRMBR 主要工艺参数

Table 2 Main Processing parameters of the SRMBR

抽吸压力/kPa	水力停留时间 (HRT)/h	污泥龄(SRT)/d	污泥浓度(MLSS) /g·L ⁻¹	溶解氧(DO) /mg·L ⁻¹	温度/℃
20~35	6~8	30	2~4	0.4~2.5	22~26

理,运行初期一部分甘油随水流失而造成膜出水 COD 偏高. 运行 3h 后,膜出水 COD 达到较低水平 (42.36 mg/L) (图 3). 运行 1d 之后, COD 去除率达 90% 以上. 在长期运行中,虽然进水 COD 在 160~368 mg/L 范围内波动,同时由于膜通量的变化而导致有机负荷变化,膜的出水 COD 一直处于较低 (< 20 mg/L) 水平 (图 4). 比较膜出水与上清液 (反应器内混合液静沉 1h 取上清液) 的 COD 可以看出 (图 4),膜出水 COD 比上清液 COD 低,且第 6d 到

第 9d,由于污泥沉降性能变差而导致上清液 COD 偏高 (27.4~76.9 mg/L),出水 COD 也一直比较稳定,说明膜本身以及运行中形成的凝胶层对有机物的去除起到一定的作用. 膜出水无色无味, SS 未检出,出水浊度在反应器运行 3min 后即达到稳定 (图 5),长期运行中出水浊度一直保持较低水平 (< 0.5NTU).

2.2 转速对膜通量的影响

通过速度控制器调节转盘式膜组件的旋转速度

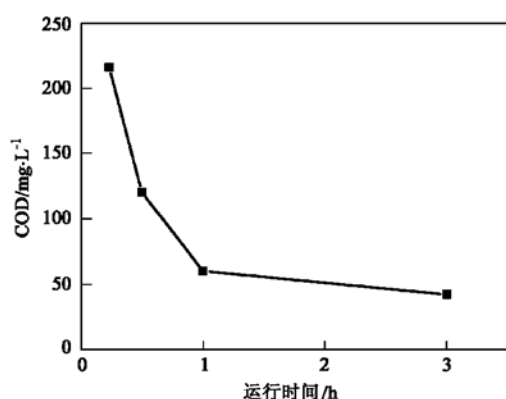


图3 运行初期出水 COD

Fig. 3 Effluent COD in the initial process of MBR running

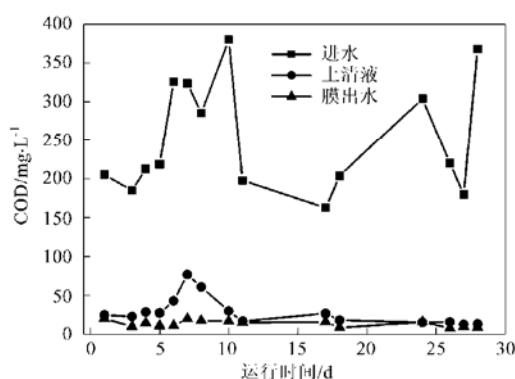


图4 长期运行进水、出水及上清液 COD

Fig. 4 COD of influent, effluent and upper-liquid during a long running time

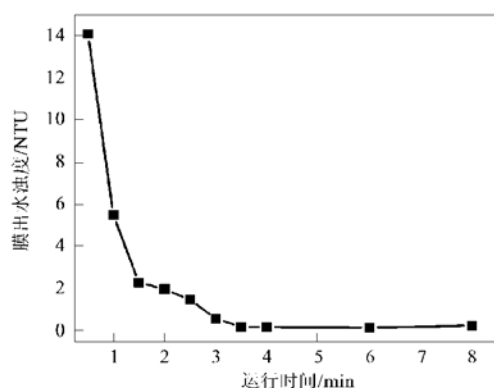


图5 出水浊度与运行时间的关系

Fig. 5 Relationship between the effluent turbidity and running time

分别为 0 r/min, 15 r/min, 25 r/min, 40 r/min 和 55 r/min, 考察不同转速下膜通量的变化, 结果见图 6. 在不同转速条件下, 其出水膜通量的变化趋势相同. 运行初期出水膜通量迅速下降, 30min 后膜通量衰减逐渐变缓, 运行 10h 左右, 膜通量基本稳定.

从图 6 可以看出, 运行初期膜通量的衰减并没有因转速不同而有所区别, 这是因为运行初期的污染主要来自于膜孔堵塞, 增大转速并不能缓解膜孔堵塞导致的膜污染. 随着运行时间的延长, 膜通量的变化因转速不同而有所不同, 转速越快, 通量衰减越缓慢, 其原因是膜组件旋转加速了混合液与膜表面的相对运动, 提高了混合液作用于膜表面的剪切力, 使污染物不容易附着在膜表面, 同时也加速膜表面污染物的脱离, 能在一定程度上减缓凝胶层的形成及有效防止膜表面滤饼层的形成, 减轻膜污染. 图 7 是运行相同时间(60h)的污染膜照片, 可以看出转速为 0 r/min(即膜组件不旋转)的膜表面有明显的棕黄色滤饼层, 而转速为 25 r/min 的膜表面仅有浅颜色凝胶层, 这进一步说明了膜组件旋转能有效减缓凝胶层的形成. 控制滤饼层的形成从而减缓膜污染提高膜通量. 从图 8 可以看出, 平衡膜通量随着转速的增大而增大, 转速从 0 r/min 增大到 25 r/min, 平衡膜通量从 10.5 L/(m²·h) 增大到 22.5 L/(m²·h), 继续增大转速, 平衡膜通量的增加有限. 转速越大, 能耗越高, 对转动轴的要求也越高, 因此, 转速并不是越大越好, 运行过程中存在一个临界转速, 低于临界转速, 平衡膜通量随转速增大而快速增大, 高于临界转速, 平衡膜通量的增加有限, 本研究中的临界转速是 25 r/min.

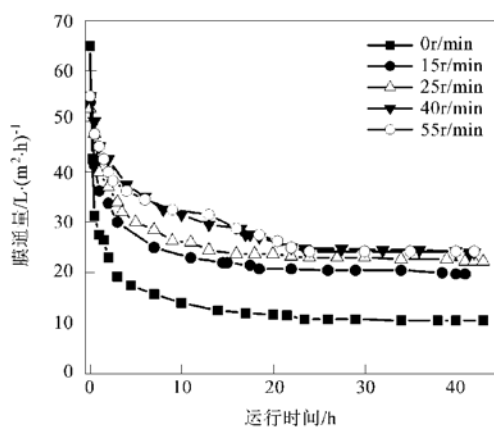


图6 转速对膜通量的影响

Fig. 6 Effect of rotation speed on membrane flux

2.3 抽/停比对膜通量的影响

调整自吸泵的抽吸停抽时间比(简称: 抽停比)分别为 10min/0min、9min/30s、9min/1min 和 8min/2min, 考察不同抽停比条件下出水膜通量的变化, 结果见图 9. 在初始 1h 内膜通量衰减趋势基本相同, 说明调整抽停比并不能消除膜在运行之初

的污染(主要是膜孔堵塞及凝胶层的形成). 随着运行时间的延长, 停抽时间越长(抽停比越小)出水膜通量衰减越慢. 分析其原因有 2 个, 一是因为 SRMBR 在自吸泵产生的负压下出水, 停抽时, 膜组件内负压突然消失, 因负压而停留在膜表面的污染物质会从膜表面脱离并被水流带走; 二是因为停抽时间越长, 运行中空曝比例增加, 会使膜表面的污染物质的脱落更为完全^[6]. 因此, 抽吸/停抽交替有利于缓解污染物在膜表面的积累和形成较薄的凝胶

层, 使通量稳定在一个相对较高的水平. 从实验结果可知, 抽/停交替比连续运行的平衡通量要高, 并且, 平衡通量随着停抽时间的增长而增大. 停抽时间从 0 增大到 1min, 平衡通量从 $27.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增大到 $37 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 继续增大停抽时间至 2min, 其平衡通量 $[38 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 并没有显著增加. 说明在一定范围内, 延长停抽时间(或是减小抽停比)有利于污染物脱离膜表面, 但停抽时间增长到一定程度后, 效果会变得不显著.

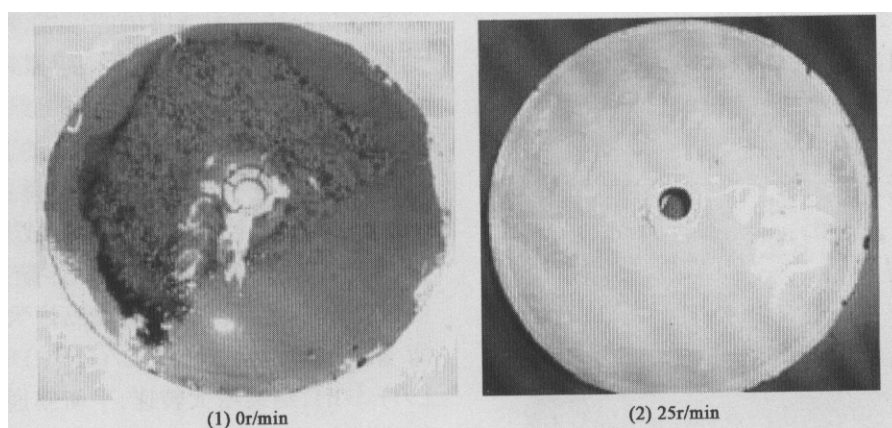


图 7 不同转速下得到的污染膜照片

Fig. 7 Photos of fouling membranes at different rotation speeds

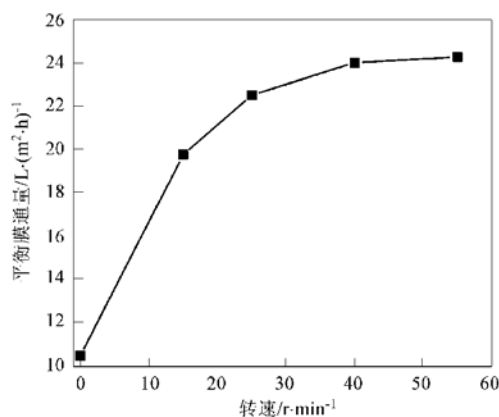


图 8 转速与平衡膜通量的关系

Fig. 8 Relationship between rotation speed and equilibrium membrane flux

2.4 曝气量对膜通量的影响

传统膜生物反应器中, 曝气的目的除了为微生物供氧之外, 还能通过上升的气泡及其产生的紊动水流清洗膜表面而在一定程度上缓解膜污染, 保持膜通量的稳定. 实验中考察曝气量对膜通量的影响时, 反应器底部曝气头的安置方式有 2 种, 一是将曝气头安置在耗氧生化反应区下方, 这时, 曝气对膜面

的清洗作用很小. 第 2 种方式是将曝气头安置在膜组件的正下方, 调节曝气量分别为 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$, $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$, 考察曝气量对出水膜通量的影响, 结果见图 10. 实验过程中也监测了反应器中混合液的溶解氧浓度, 结果见表 3.

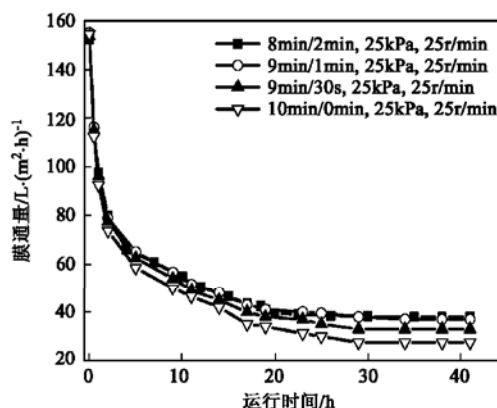


图 9 抽停比对膜通量的影响

Fig. 9 Effect of suction time/suspended time ratio on membrane flux

由图 10 可见, 将曝气头安置在膜组件的正下方, 可以有效提高出水的平衡通量, 当从无曝气调节

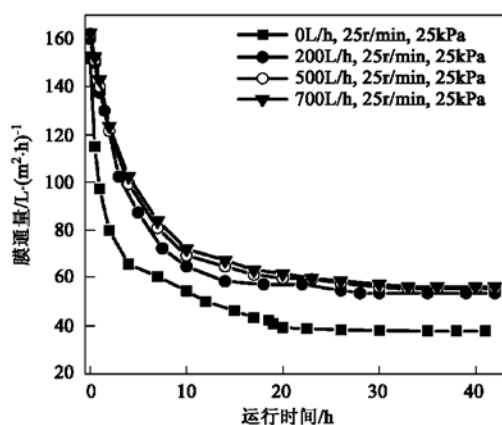


图 10 曝气量对膜通量的影响

Fig. 10 Effect of aeration rate on membrane flux

到曝气量为 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 平衡膜通量从 $38 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增加到了 $53.75 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 进一步增加曝气量到 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$, 膜通量增加效果不明显, 此时的膜通量分别为 55.63 和 $56.50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 说明在 SRMBR 中, 其临界曝气量为 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ (此时气水比约为 15:1). 曝气量为 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 反应器内混合液的溶解氧仅为 $0.4 \sim 0.5 \text{ mg/L}$, 低于传统活性污泥工艺. 因此, SRMBR 运行过程中, 不需要通过额外提高曝气量来缓解膜污染.

表 3 不同曝气量情况下混合液的溶解氧浓度

Table 3 DO of mixed liquid at different aeration rate

曝气量 ¹⁾ / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0	0.2	0.5	0.7
溶解氧 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	—	0.4~0.5	1.2~1.5	2.2~2.4

1) 曝气量为 0 是指曝气头没有安置在膜组件正下方时的情况

传统的 MBR 工艺为了缓解膜污染, 保持膜通量稳定, 往往需要提高曝气量, 气水体积比为 20~40, 明显高于传统活性污泥法处理工艺. 增加曝气量一方面增加能耗; 另一方面, 曝气量过大可能会导致混合液粒径减小, 影响膜过滤^[7]. 与传统 MBR 工艺相比, SRMBR 工艺对曝气量的需求较低, 降低了能耗, 且避免了因曝气过度而带来的混合液粒径减小等问题, 体现出其优势.

3 结论

(1) SRMBR 处理废水可以长期稳定运行, 废水

COD 在 $160 \sim 368 \text{ mg/L}$ 波动时, 出水 COD 在运行 1d 后降低到 20 mg/L 以下, COD 去除率大于 90%, SS 未检出, 出水浊度在运行 3min 后即达到稳定 ($< 0.5 \text{ NTU}$).

(2) 增大膜组件转速可以增大 SRMBR 的平衡膜通量, 转速从 0 r/min 增大到 25 r/min , 平衡通量从 $10.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增大到 $22.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 继续增大转速, 膜通量增大不显著.

(3) 在一定范围内, 延长停抽时间 (或是减小抽停比) 有利于污染物脱离膜表面而减缓膜污染. 停抽时间从 0 增大到 1min, 平衡通量从 $27.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增大到 $37 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 继续增大停抽时间至 2min, 其平衡通量并没有显著增加.

(4) SRMBR 工艺的临界曝气量为 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (此时气水比约为 15:1), 运行过程中, 不需要通过额外提高曝气量来缓解膜污染, 降低了能耗, 且避免了因曝气过度而带来的混合液减小等问题, 体现出其优势.

(5) 本实验条件下, SRMBR 工艺的最佳组合操作条件为: 操作压力 25kPa, 转速 25 r/min , 抽/停比 9min/1min, 气水比 15:1. 在此条件下, SRMBR 的平衡膜通量高达 $53.75 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

参考文献:

- [1] Brindle K, Stephenson T. Application of membrane biological reactors for the treatment of wastewaters[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, **49**(6): 601~610.
- [2] Knoblock M D, Sutton P M, Mishra P N, *et al.* Membrane biological reactor system for treatment of oily wastewaters[J]. *Water Environment Research*, 1994, **66**(2): 133~139.
- [3] Ueda T, Hata K, Kikuoka Y. Treatment of domestic sewage from rural settlements by a membrane bioreactor[J]. *Water Science Technology*, 1996, **34**(9): 189~196.
- [4] Wisniewski C, Grasmick A. Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling[J]. *Colloids and Surfaces*, 1998, **138**: 403~411.
- [5] 刘振龙, 陈绍伟, 吴志超. 一体式平片膜-生物反应器运行过程中膜性能的研究[J]. *环境工程*, 2003, **21**(2): 7~10.
- [6] 刘锐, 黄霞, 王志强, 钱易. 一体式膜-生物反应器的水动力学特性[J]. *环境科学*, 2000, **21**(5): 47~50.
- [7] Tardieu E, Grasmick A, Geaugey V, *et al.* Hydrodynamic control of bioparticle deposition in a MBR applied to wastewater treatment[J]. *Journal of Membrane Science*, 1998, **147**: 1212~1218.