

分体式膜-生物反应器在废水处理中的工艺条件

吕红, 徐又一*, 朱宝库, 徐志康, 谢柏明 (浙江大学高分子科学与工程学系, 杭州 310027)

摘要: 对分体式膜-生物反应器 (RMBR) 处理废水进行了研究. 进水 COD_{Cr} : 312 ~ 584 mg/L, RMBR 的出水 COD_{Cr} 在运行 4d 后 < 15 mg/L 并稳定. 向生物反应器添加 0.5g/L (混合液) 的粉末活性炭 (PAC) 后出水 COD_{Cr} < 4.22 mg/L. 膜侧污水流速在 0.9 ~ 1.9 m/s 范围内, 临界膜通量随膜侧污水流速的增大而增大. 添加 PAC, 组合添加 PAC 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ 均可有效提高临界膜通量. 在膜侧流速 1.9 m/s 的条件下, 临界膜通量从 $72 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 分别增至 $76 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $81 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 在 $22^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 范围内, 每升高 1°C 可提高膜通量 1.9%. 在连续运行 100d 中, RMBR 可在无任何物理、化学清洗的条件下运行 14d 而透膜压力无增大, 膜通量不降低. 对于已污染的膜, 水清洗、水碱共同清洗、水碱酸共同清洗可分别恢复至新膜膜通量的 47%、83%、94%.

关键词: 分体式膜-生物反应器; 污水处理; 膜污染; 临界膜通量

中图分类号: X703.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)03-04-0061

Processing Conditions of Recirculated MBR for Wastewater Treatment

Lü Hong, Xu Youyi, Zhu Baoku, Xu Zhikang, Xie Boming (Department of Polymer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In this paper, wastewater was treated with Recirculated Membrane Bio Reactor (RMBR) and effluent quality became stable after four days running continuously. Critical membrane flux was increased with increasing crossflow velocity between 0.9 ~ 1.9 m/s. Under crossflow velocity of 1.9 m/s, critical membrane flux was enhanced from $72 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ to $76 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ or $81 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ respectively when powdered activated carbon (PAC) or both PAC and alum were added to the system. Between $22^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$, the flux was elevated 1.9% per 1°C increased. Fouling materials were removed efficiently through cleaning physically or/and chemically with flux recovery of 47% ~ 94%.

Keywords: recirculated membrane bioreactor; wastewater treatment; membrane fouling; critical membrane flux

膜-生物反应器 (Membrane Bio Reactor, MBR) 是将膜和活性污泥相结合的一种污水处理技术. 同传统的活性污泥法相比, MBR 具有许多优点^[1~4]. 按膜和生物反应器的位置关系可将 MBR 分为分体式 and 一体式 2 种. 分体式膜-生物反应器 (Recirculated Membrane Bio Reactor, RMBR) 是将膜组件与生物反应器分置, 由泵将混合液加压送至膜组件, 浓缩液循环回生物反应器, 滤过液作为出水; 一体式膜-生物反应器 (Submerged Membrane Bio Reactor, SMBR) 是将膜组件浸没于生物反应器中, 通过负压抽吸或虹吸得到过滤液. 在 RMBR 中, 为了延缓膜污染, 膜侧废水流速一般为 2 ~ 5 m/s, 导致其能耗较高 ($4 \sim 12 \text{ k W} \cdot \text{h}/\text{m}^3$), 应用受到限制^[1,2,5,6]. 本文研究了 RMBR 的运行条件, 临界膜通量及提高膜通量的方法.

1 试验装置

1.1 装置

RMBR 试验装置见图 1, 主要由生物反应器和膜组件 2 部分组成. 生物反应器是活性污泥曝气池, 有效容积 25 L. 膜组件为内压式聚丙烯中空纤维微滤膜 (杭州浙大凯华膜技术有限公司生产), 纤维内径 $300 \mu\text{m}$, 壁厚 $40 \mu\text{m}$, 平均孔径 $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$, 有效膜面积 0.087 m^2 . 污水从原水箱进入生物反应器, 泥水混合液从生物反应器经循环泵送入膜组件, 浓缩液循环回生物反应器, 滤过液作为出水.

1.2 试验用水

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59833120)

作者简介: 吕红 (1972 ~), 男, 硕士生, 工程师, 主要从事污水处理与高分子材料方面的研究.

收稿日期: 2002-06-27; 修订日期: 2002-09-16

* 通讯联系人

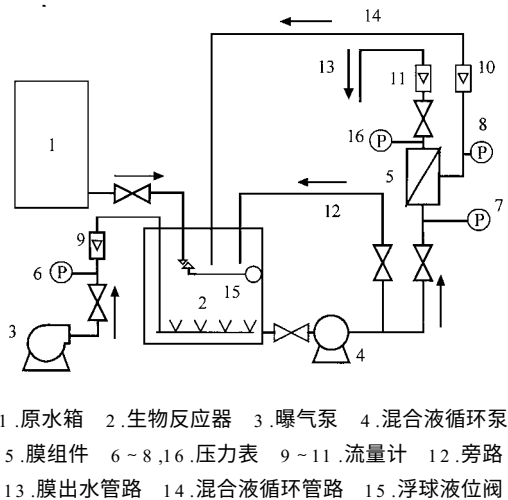


图 1 RMBR 工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of recirculated membrane bioreactor

表 1 RMBR 主要工艺参数
Table 1 RMBR running parameters

水力停留时间 (HRT)/h	污泥龄 (SRT)/h	透膜压力 (TMP)/kPa	悬浮污泥浓度 (MLSS)/g·L ⁻¹	溶解氧 (DO)/mg·L ⁻¹	循环比 ¹⁾	温度/℃
5.5	25	70~140	2.1~3.6	3~4	25~60	22~34

1) 循环比指经过膜组件的循环流量与膜通量之比。

去除效果的影响。向生物反应器中添加粉末 PAC (<120 目) 的量为 0.5 g/L, 操作中损失的 PAC 都及时补充以维持混合液中 PAC 的浓度不变。PAC 在加入生物反应器以前用混合液进行了曝气培养。第 4 阶段(06-03 ~ 06-19), 考察同时添加 PAC 及硫酸铝 (Al₂(SO₄)₃·18 H₂O) 对临界膜通量, 临界循环比及 COD 去除效果的影响。PAC 加入生物反应器中, 添加量同第 3 阶段; 硫酸铝加入原水中, 添加量为 0.1 mmol/L。

2 结果分析与讨论

2.1 RMBR 处理效果及添加 PAC 和硫酸铝的影响

RMBR 出水在运行 4d 后达到稳定(图 2), COD 去除率在第 4 天已达 96.5%。这是由于膜的截留作用使微生物在反应器中富集, 同时膜表面凝胶层的形成也起到了一定的截留作用。在长期运行中, 即使进水 COD_{Cr} 在 312 ~ 584 mg/L, 膜通量在 35 ~ 85 L/(m²·h) 的范围内变化, 出水 COD 数值也较稳定, 始终低于 15 mg/L, 表现出良好的稳定性和抗冲击负荷能

试验用模拟废水, 由奶粉、可溶性淀粉、Na₂HPO₄·12H₂O、CO(NH₂)₂、Na₂CO₃ 等配制而成, COD_{Cr}: 312 ~ 584 mg/L, NH₃-N: 16 ~ 40 mg/L (C:N:P 约 100:5:1)。

1.3 试验方法

本试验从 2002-02-25 开始污泥曝气培养(污泥取自杭州中策啤酒厂废水处理车间), 03-13 日开始连续运行。试验主要工艺参数见表 1。

试验共分 4 个阶段。第 1 阶段(03-13 ~ 04-03), 考察 RMBR 运行效果及温度对膜通量的影响。第 2 阶段(04-04 ~ 05-07), 考察各膜侧流速条件下的临界膜通量及不同清洗方法对受污染膜的清洗效果。第 3 阶段(05-08 ~ 06-02), 考察添加 PAC 对临界膜通量, 临界循环比及 COD

力(图 3)。添加 PAC 后出水 COD 降低, COD_{Cr} < 4.22 mg/L, COD 去除率增至 98.9% ~ 99.9% (图 3)。这一方面是由于 PAC 的吸附作用; 另一方面, 添加 PAC 后, 污泥絮体结构松散, 难以沉降, 也可能造成 COD 去除效果的增强^[7]。但同时添加 PAC 和硫酸铝对 COD 去除效果的提高却不明显。同时添加 PAC 和硫酸铝时, 污泥絮凝性变好, 沉降比 (SV) 降至 36% ~ 54%。COD 去除效果虽然下降, 但仍然比未添加时高。

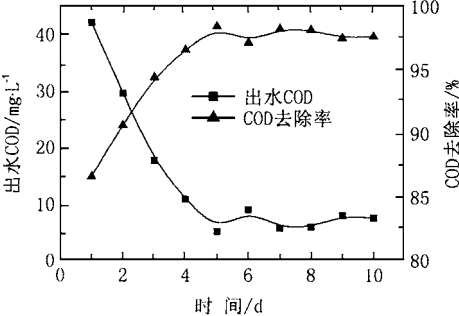


图 2 运行初期膜出水 COD 及 COD 去除率
Fig.2 COD_{effluent} and COD_{removal} at first days

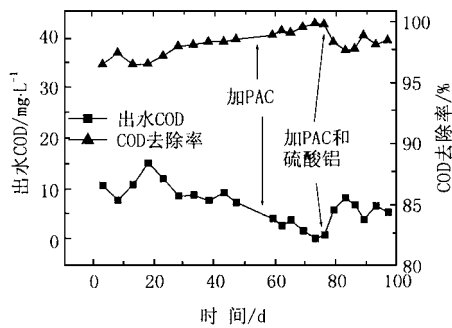


图 3 长期运行 COD 及 COD 去除率

Fig. 3 COD_{effluent} and COD_{removal} in long running

2.2 NH₃-N 浊度和 SS 的去除

RMBR 对 NH₃-N 具有良好的去除效果,这得益于膜的截留使世代周期长的硝化菌得以富集.出水无色、无味,SS 未检出,浊度也很低(表 2),显示出膜对胶体和微生物的完全截留.但硫酸铝的加入使出水 NH₃-N 增至 2.46 ~ 3.23 mg/L,这可能是硫酸铝的加入抑制了硝化作用.

表 2 RMBR 对 NH₃-N 浊度和 SS 的去除情况

Table 2 NH₃-N, turbidity and SS in effluent

项 目	NH ₃ -N / mg·L ⁻¹	浊度 / NTU	悬浮固体 (SS)
原 水	16 ~ 40	> 99	
出 水	0 ~ 1.53 (未加硫酸铝) 2.46 ~ 3.23 (添加硫酸铝)	0.10 ~ 0.42	未检出

2.3 临界膜通量及添加 PAC 和硫酸铝的影响

临界膜通量 (Critical Membrane Flux, CMF) 指不随时间下降的平衡膜通量.在该条件下,粒子脱离膜表面的速率与沉积速率相等,达成动态平衡.本试验中,每次考察临界膜通量时,先让清洗过的膜在该流速下以低膜通量运行 2 ~ 3 h,稳定后调节至考察的膜通量,连续运行 1 d,如果透膜压力不增大,膜通量下降不大于 2.5 %,则把该通量作为膜的平衡通量,其最大值即临界膜通量.从图 4 可见,临界膜通量随膜侧污水流速的增大而增大.添加 PAC 后,膜侧流速在 0.9 ~ 1.9 m/s 时,临界膜通量比未添加时高出约 4 ~ 10 L/(m²·h).添加 PAC,组合添加 PAC 和硫酸铝可有效提高临界膜通量.在 1.9 m/s 的膜侧流速下,临界膜通量可从 72 L/(m²·h) 分别增至 76 L/(m²·h) 和 81 L/(m²·h).

添加 PAC 后,PAC 粒子增强了循环液对膜表面的剪切、擦洗作用,延缓了膜污染的形成.另外,PAC 的吸附作用不仅减少了微生物对膜的污染,而且作为有机大分子胶粒(团)和微生物的载体,也使微细粒子的数目减少,而小粒径粒子比大粒径粒子更易造成膜孔堵塞^[8],这在一定程度延缓了污染物在膜表面的形成,提高了临界膜通量.同时添加 PAC 和硫酸铝时,由于硫酸铝的絮凝作用,体系中的小粒径粒子数目进一步减少,膜污染得到进一步的延缓,临界膜通量也进一步增大.

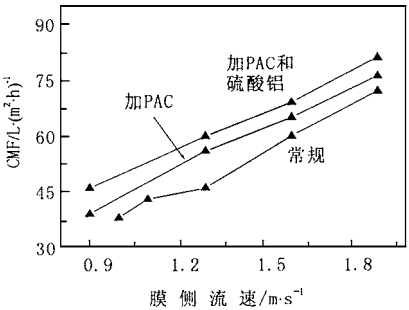


图 4 添加 PAC 及硫酸铝对临界膜通量的影响

Fig. 4 Influence of PAC and alum on CMF

2.4 临界循环比及添加 PAC 和硫酸铝的影响

定义临界循环比为经过膜组件的循环水量与临界膜通量之比,它反应了膜的透水能力与体系的能耗,循环比值越低,能耗也越低.在临界循环比下,体系的能耗已降至最低程度.添加 PAC 及组合添加 PAC 和硫酸铝时临界循环比比未添加时分别低约 10 %和 20 % (图 5).

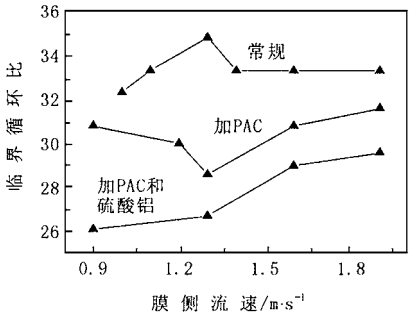


图 5 添加 PAC 及硫酸铝对临界循环比的影响

Fig. 5 Influence of PAC and alum on CRR

2.5 温度对出水通量的影响

随着温度的升高,泥水混合液粘度降低,膜

通量随之升高(见图 6).在温度 22℃~30℃,透膜压力 70kPa,膜侧流速 1.3 m/s 的条件下,每增大 1℃,膜通量增大 1.9%.

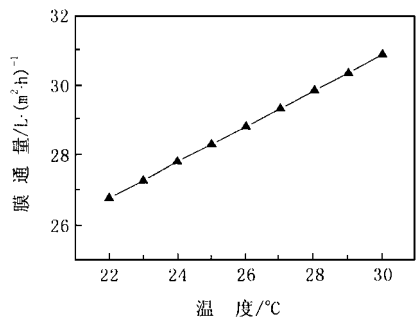


图 6 温度对膜通量的影响

Fig. 6 Dependence of flux on temperature

2.6 膜的清洗

经过一段时间运行,透膜压力升高,膜通量下降,这表明膜已污染.膜污染是由于微粒、胶体粒子或溶质大分子在膜表面和膜孔吸附、沉积,造成孔径变小或堵塞.本试验用 3 种方法对已污染的膜进行清洗:水洗,水+碱洗,水+碱洗+酸洗.水洗是用自来水从膜出水侧进行反冲洗至基本无污染物流出;水+碱洗是水洗后用 1%(W)的 NaOH 溶液浸泡 1h,再水洗;水+碱洗+酸洗是水+碱洗后用 0.5%(W) HCl 溶液浸泡 1h,再水洗.对于已污染的膜,水清洗,水+碱洗,水+碱+酸洗可使膜通量分别恢复至新膜的 47%、83%、94%(图 7).在本试验连续运行的 100d 中,RMBR 可在无任何清洗的条件下连续运行 14d[透膜压力 65kPa,膜侧流速 1.3 m/s,膜通量 35 L/(m²·h)]而膜未污染.更长的运行时间或操作条件的变化可能会导致膜逐渐污染,定期对膜进行清洗可有效去除膜污染,增大通量,降低能耗.

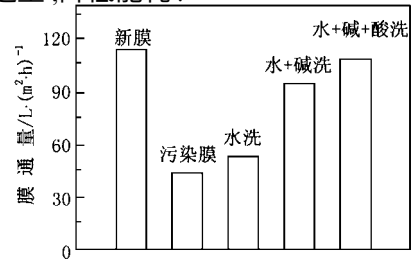


图 7 各种膜清洗方法效果比较

Fig. 7 Flux recovery and cleaning methods

3 结论

(1) RMBR 处理废水可长期稳定运行,在废水水质为 COD_{Cr}:312~584 mg/L, NH₃⁻ N:16~40 mg/L,出水 COD_{Cr}在运行 4d 后 <15 mg/L 并稳定, COD 去除率 > 96.5%, 浊度 < 0.17 NTU, SS 未检出, NH₃⁻ N < 1.53 mg/L.

(2) 向生物反应器添加 PAC 0.5 g/L(混合液)可提高出水水质,出水 COD_{Cr} < 4.22 mg/L, COD 去除率增至 98.9%~99.9%.

(3) 废水膜侧流速在 0.9~1.9 m/s 范围内,临界膜通量随膜侧流速的增大而增大.添加 PAC,组合添加 PAC 和 Al₂(SO₄)₃·18 H₂O 可提高临界膜通量.在膜侧流速 1.9 m/s 下临界膜通量可从 72 L/(m²·h) 分别增至 76 L/(m²·h) 和 81 L/(m²·h),临界循环比比未添加时分别低约 10% 和 20%.

(4) 在温度 22℃~30℃,透膜压力为 70kPa,膜侧流速为 1.3 m/s 的条件下,膜通量随温度的增加而线性增加,温度每升高 1℃,膜通量增大 1.9%.

(5) 对于已污染的膜,水清洗,水碱共同清洗,水碱酸共同清洗可分别使膜通量恢复至新膜的 47%、83%、94%.

参考文献:

- Adham S, Gagliardo P, Boulous L et al. Feasibility of the membrane bioreactor process for water reclamation. Wat. Sci. Tech., 2001, 43(10): 203~209.
- Gander M, Jefferson B, Judd S. Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations. Separation Purification Technology, 2000, 18: 119~130.
- Heiner G, Bonner F. Is the MBR process suited to your treatment plant? Pollut. Eng., 1999, 31(13): 64~67.
- 殷峻,陈英旭.膜生物反应器中的膜污染问题.环境污染治理技术与设备,2001,2(3): 62~68.
- Côté P, Thompson D. Wastewater treatment using membranes: the North American experience. Wat. Sci. Tech., 2000, 41(10-11): 209~215.
- Visvanathan C, Aim R B et al. Membrane separation bioreactors for wastewater treatment. Critical Reviews in Environmental Sci. and Tech., 2000, 30(1): 1~48.
- 田口广(著),孙玉修,蔡汉弟(译).活性污泥膨胀与控制对策.北京:中国建筑工业出版社,1982. 8~20.
- Choo K H, Lee C H. Hydrodynamic behavior of anaerobic biosolids during crossflow filtration in the membrane anaerobic bioreactor. Wat. Res., 1998, 32(11): 3387~3397.