

科研与开发

# 膜生物反应器臭氧化同步污泥减量 新工艺的研究

吴声东<sup>1</sup>, 江水英<sup>1</sup>, 王金保<sup>2</sup>, 王 嵘<sup>3</sup>

(1. 南昌大学科学技术学院, 江西 南昌 330029; 2. 南昌大学环境科学与工程学院, 江西 南昌 330031;  
3. 江西农业大学国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045)

**摘要:**提出将臭氧直接充入到 MBR 中的同步臭氧化污泥减量新工艺, 考察了同步臭氧化对 MBR 污泥产率及出水水质的影响。结果表明臭氧投加量为 0.025 gO<sub>3</sub>/gVSS 时, 同步臭氧化对 MBR 具有显著的污泥减量效果, 污泥产率系数  $Y_{obs}$  为 0.0096 g (MLSS)/g(COD), 而对比工艺污泥产率系数  $Y_{obs}$  为 0.1147 g (MLSS)/g(COD), 同时对 COD 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率分别维持在 91% 和 95.7% 以上。

**关键词:**污泥减量; 同步臭氧化; MBR

**中图分类号:** X703.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2009)04-0037-03

## A new process concept of in-situ ozonation for sludge reduction in membrane bioreactor (MBR)

WU Sheng-dong<sup>1</sup>, JIANG Shui-ying<sup>1</sup>, WAN Jin-bao<sup>2</sup>, WANG Rong<sup>3</sup>

(1. College of Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330029, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

3. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** A new process concept of in-situ ozonation for sludge reduction in membrane bioreactor (MBR) is proposed to investigate the effects of in-situ ozonation on sludge production rate and effluent quality of MBR, which makes the MBR exposed to ozone at a dose of 0.025 gO<sub>3</sub>/gVSS directly. The results show that in-situ ozonation is able to reduce markedly the sludge production rate of the MBR, with a sludge production rate of 0.0096 gMLSS/gCOD but the sludge production rate of the contrast process is 0.1147 gMLSS/gCOD, and the removal rates of COD and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N are above 91% and 95.7% respectively.

**Key words:** sludge reduction; in-situ ozonation; MBR

活性污泥法产生大量剩余污泥的处理和处置成本较高, 占污水处理厂总运行费用的 25% ~ 60%<sup>[1]</sup>。在各种污泥减量技术中(改变工艺运行条件、物理化学法强化隐性生长、解偶联代谢及微型动物捕食等), 臭氧因其污泥减量效果好、无二次污染、易于与现行的污水处理工艺相结合等特点, 具有广阔前景<sup>[2]</sup>。当前关于臭氧化污泥减量技术的研究基本认同臭氧对污泥减量具有很好的效率, 但其经济性一直限制着该技术的工业化应用。在所见报道中, 未见将臭氧直接加入到生物反应器中进行污泥减量的研究, 而是通过一个臭氧接触器后再将污泥回流至生物反应器<sup>[2]</sup>。为节约该技术的投资和运行成本, 受吴金玲、B. Schlichter 和 B. S. Karnik 等的启

发<sup>[3-10]</sup>(都是将臭氧与 MBR 联用), 笔者将臭氧直接加入膜生物反应器中进行同步污泥减量实验, 实验表明, 该方法成本更低, 具有兼容性和推广价值。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验装置

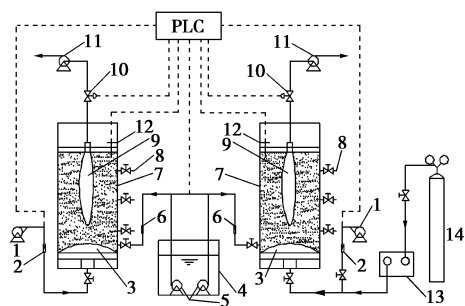
实验装置如图 1 所示。2 个相同的 MBR 反应器同时运行, 一个作为对照系统, 一个作为同步臭氧化系统。反应器均用有机玻璃自制而成, 尺寸为 200 mm × 700 mm, 有效体积 13 L, 底部装有孔径为 200 μm 的半刚玉微孔曝气头, 由空气压缩机进行曝气。

污水由潜水泵 5 打入反应器 7 中, 空气和臭氧各自由鼓风机 1 和臭氧发生器 13 通过微孔曝气头 3

收稿日期: 2008-12-16

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2007BAB23C02); 中德国际科技合作项目(2006DFB91920)

作者简介: 吴声东(1981-), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向为水污染控制及资源化技术、污泥减量, wsd10162003@yahoo.com.cn。



1—鼓风机;2—气体流量计;3—微孔曝气头;4—废水箱;  
5—潜水泵;6—液体流量计;7—反应器(左边为对照系统 A,  
右边为同步臭氧化系统 B);8—取样口;9—尾式膜组件;  
10—电磁阀;11—蠕动泵;12—液位计;13—臭氧发生器;  
14—氧气罐

图 1 实验装置示意图

进入反应器中与活性污泥进行反应,水力停留时间为 6 h,出水由蠕动泵 11 将水从尾式膜组件 9 中抽出,并利用一套自制的 PLC 自动控制装置将膜控制为出水 8 min,间歇 3 min 以减缓膜污染。

该实验处理废水为人工模拟配制,以葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾等营养源按 BOD<sub>5</sub>/N/P 为 100:5:1 之比配制,并投加适量微量元素。人工配制的生活污水水质和微量元素组分见表 1。

表 1 人工配水水质及微量元素组成

指标	水质/ mg·L <sup>-1</sup>	质量	
		微量元素 浓度/ g·L <sup>-1</sup>	微量元素 浓度/ g·L <sup>-1</sup>
COD	500 ~ 600	CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O 7.34	ZnSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O 0.015
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	50 ~ 60	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O 25.07	CuCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O 0.112
TP	4 ~ 6	MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O 1.03	NaMnO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O 0.0025

注:1 L 污水加入配水中微量元素的量为 0.1 mL。

## 1.2 实验方法

采用完全同步运行的 2 个 MBR 系统,其中一个直接投加剂量为 0.025 g/g<sup>[11]</sup> 的臭氧进行同步臭氧化减量实验,而另一个则作为对比工艺,不充入臭氧。分析同步臭氧化对 MBR 污泥产率和出水水质的影响。用污泥产率系数  $Y_{obs}$  来表示污泥的减量效果,污泥产率系数  $Y_{obs}$  定义为微生物降解单位质量的化学需氧量(COD)所产生的悬浮固体(SS)的量(mg)<sup>[12]</sup>。出水 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 指标的测试方法参见文献[13]。

## 2 结果与讨论

### 2.1 同步臭氧化对污泥产率的影响

两系统 MLSS 的变化如图 2 所示,在对比工艺

中,污泥浓度增长迅速,而投加臭氧的同步减量工艺污泥质量浓度在 60 d 天内只增长了 513 mg/L。

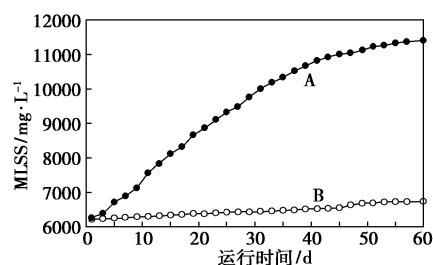


图 2 A、B 两反应器污泥的变化

用污泥产率系数  $Y_{obs}$  来表征污泥减量的效果。A、B 两反应器在 60 d 内的  $Y_{obs}$  见图 3。A 反应器中的污泥产率系数  $Y_{obs}$  为 0.1147 g(MLSS)/g(COD), B 反应器的污泥产率系数  $Y_{obs}$  为 0.0096 g(MLSS)/g(COD),均大大小于传统的活性污泥工艺的污泥产率系数<sup>[14-15]</sup>,且 B 反应器接近于污泥零排放,这可能与该实验的实验条件有利于提高臭氧的利用率,特别是利用微孔曝气头进行充入臭氧等因素有关。

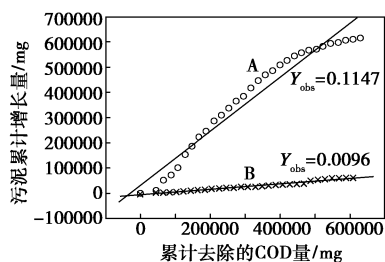
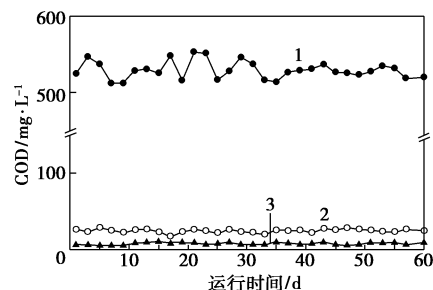


图 3 A、B 两反应器污泥表观产率系数图

### 2.2 同步臭氧化出水水质的影响

#### 2.2.1 同步臭氧化对出水 COD 的影响



1—进水;2—B 出水;3—A 出水

图 4 进水和出水 COD 的变化

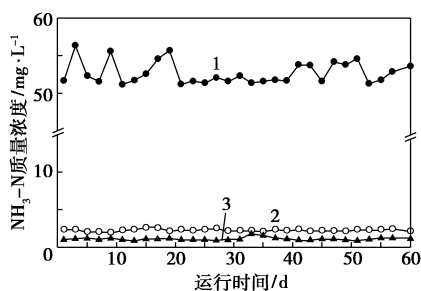
图 4 给出了污泥同步减量工艺及对比工艺进水和膜出水 COD 的变化。两反应器进水水质一致,控制在 500 ~ 600 mg/L 内,在运行 60 d 的过程中,A 反应器的出水水质较好,COD 在 25 mg/L 左右,去除率

稳定在94%以上。这得益于膜的高去除效率,且该实验所用的反应器为圆柱形,底部用半刚玉曝气头密封。曝气启动后,整个反应器内气流均匀,没有污泥闲置死角,这种结构优于传统反应器曝气装置的设置。所以COD去除效果高于已见的文献报道<sup>[16]</sup>,当然这也可能与反应条件有关。

B反应器出水COD较A反应器有所升高,这是因为臭氧的强氧化性将部分污泥絮体结构和微生物细胞破坏,使得污泥中的有机物浓度高于对比系统,换言之,B反应器的有机负荷高于A,高出的部分等于系统减少的COD和被臭氧直接氧化的COD之和。所以臭氧化污泥同步减量工艺的出水COD随有机负荷的升高而略有增加。尽管如此,但B反应器出水COD都维持在50 mg/L以下,去除率稳定在91%以上。加入臭氧后并未导致出水COD含量的显著增加,可见臭氧化对系统的出水COD没有明显的影响,这更体现了MBR系统的稳定性。

#### 2.2.2 同步臭氧化对出水氨氮(NH<sub>3</sub>-N)的影响

臭氧化污泥同步减量工艺和对比工艺进水和膜出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度如图5所示。未加臭氧的对比工艺A中,MBR表现出较稳定的NH<sub>3</sub>-N去除效果,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N质量浓度一直保持在1.78 mg/L以下,平均去除率为97.9%。较高的硝化能力主要因为污泥停留时间较长,有利于硝化菌的生长。投加臭氧的B反应器出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N质量浓度保持在3.0 mg/L以下,平均去除率为95.7%。这较对比工艺,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度有一定升高,去除率下降了2.2%,可见臭氧化对系统的出水水质影响不大,且能满足出水的要求。



1—进水;2—B出水;3—A出水

图5 进水和出水NH<sub>3</sub>-N的变化

在水处理中,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N等污染物的去除属于专属细菌的作用所致。在臭氧化过程中臭氧会杀死污泥中部分硝化细菌<sup>[17]</sup>,这样硝化菌在污泥系统中的存活时间(SRT)就大大缩短,这对系统的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除效果有一定的影响。但该实验中臭氧化对系统的

硝化能力基本没有影响,可能是因为反应器中污泥长时间的停留弥补了硝化菌SRT的减小<sup>[18]</sup>。且该实验中A反应器的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率高于蒋铁锋等<sup>[16]</sup>的研究结论(其实实验得到的去除率为95.48%),这可能与该实验的污泥停留时间较长有关。

### 3 结语

臭氧能够促进细胞溶解,通过强化系统中细菌的隐性生长而实现污泥减量,但在低臭氧浓度下,并不会对整个微生物系统造成破坏性的影响。在臭氧投加量为0.025 g(O<sub>3</sub>)/g(VSS)时,直接投加臭氧对MBR系统具有较好的污泥减量效果,也并不会对系统的出水水质形成太大的影响,出水COD去除率稳定在91%以上,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率较对比工艺只下降了2.2%。

#### 参考文献

- [1] Liu Y. Chemically reduced excess sludge production in the activated sludge process[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 1-7.
- [2] 王金保,吴声东,江水英. 臭氧化污泥减量技术的研究进展[J]. *化工进展*, 2007, 26(11): 1583-1586.
- [3] 吴金玲,汪诚文,黄霞. 臭氧作用改善膜-生物反应器混合液膜过滤性[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(4): 427-431.
- [4] Schlichter B, Mavrov V, Chmiel H S. Study of a hybrid process combining ozonation and membrane filtration-filtration of model solutions[J]. *Desalination*, 2003(156): 257-265.
- [5] Karnik B S, Davies S H, Chen K C, et al. Effects of ozonation on the permeate flux of nanocrystalline ceramic membranes[J]. *Water Research*, 2005, 39: 728-734.
- [6] 孙培毅. 反渗透膜的污染及在线清洗[J]. *工业水处理*, 2000, 20(6): 34-36.
- [7] 隋鹏哲. 厌氧膜生物反应器中超声控制膜污染的方法和机理研究[D]. 北京:清华大学, 2005.
- [8] 赵坤宇,吴晓龙,朴尚宪. 超声清洗MBR生物膜:臭氧化技术在中水回用中的应用[J]. *环境科学与管理*, 2006, 31(1): 118-121.
- [9] 刘昕,陈福泰,黄霞,等. 在线超声对膜生物反应器膜污染的控制[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(6): 517-521.
- [10] 康华,何文杰,王胜江,等. PVDF膜污染及清洗试验研究[J]. *给水排水*, 2008, 34(4): 12-16.
- [11] 王嵘,王金保,吴声东,等. 臭氧化对活性特性的影响[J]. *化工进展*, 2008, 27(5): 773-794.
- [12] Egemen E, Corpening J, Padilla J, et al. Evaluation of ozonation and cryptic growth for biosolids management in wastewater treatment[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(10/11): 155-158.
- [13] 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.

得到电流,进而得到极化曲线。功率密度通过  $P_V = UI/V(\text{mW}/\text{m}^3)$  计算,其中  $V$  为反应液体积,  $\text{m}^3$ 。

阳极室测定对硝基苯酚和 COD 的采样频率为每天 1 次。每次采完水样,以测定后的有机物及对硝基苯酚浓度配置废水,及时补充到阳极室内,保证阳极室内溶液体积恒定。COD 采用重铬酸钾法测定;对硝基苯酚浓度采用紫外分光光度法测定。

## 2 结果与讨论

在实验室以前运行的以葡萄糖溶液为燃料的 MFC 中,加入葡萄糖和对硝基苯酚混合溶液进行 MFC 的运行,研究对硝基苯酚在 MFC 中的降解情况,并考察 MFC 的产电性能。

### 2.1 MFC 中对硝基苯酚的降解

以葡萄糖和不同量的对硝基苯酚混合溶液作为 MFC 的燃料,考察初始质量浓度分别为 22.5、71.5、113.0、400.0  $\text{mg}/\text{L}$  的对硝基苯酚的降解情况, MFC 中对硝基苯酚的降解随时间的变化如图 1 所示。随着 MFC 运行时间的增长,对硝基苯酚的浓度逐渐降低,其去除率不断增加。在 22.5 ~ 400.0  $\text{mg}/\text{L}$  较宽的范围内, MFC 对对硝基苯酚的去除均有较好的

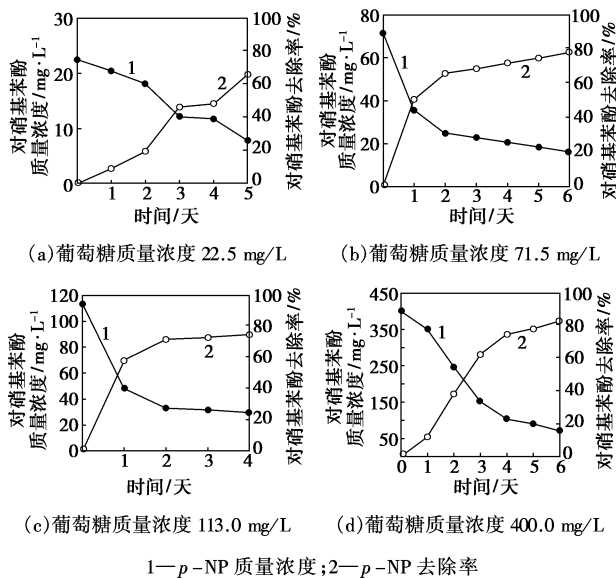


图 1 以葡萄糖和不同浓度的  $p$ -NP 为混合燃料时 MFC 中  $p$ -NP 的降解随时间的变化

效果,证明了 MFC 降解对硝基苯酚的可行性,同时该技术具有一定的耐冲击负荷能力,这为酚类及其他难生物降解化合物的处理提供了新的思路。

### 2.2 MFC 的产电特性

#### 2.2.1 MFC 的输出电压

加入葡萄糖和对硝基苯酚(400  $\text{mg}/\text{L}$ )混合溶液为燃料,在外接电阻 1 000  $\Omega$  条件下,采用间歇方式运行, MFC 的输出电压和电池中混合液的 COD 质量浓度随时间的变化如图 2 所示。加入混合燃料后, MFC 输出电压随时间的变化情况可以分为以下几个过程:①开始加入混合燃料后, MFC 的输出电压迅速增加,在短时间内达到最高值 0.293 V,这是因为加入燃料后,微生物所需的营养物质充足,其降解有机物的速率较高;②达到最高值后, MFC 的电压在 0.29 V 左右稳定输出近 3 h,但随后 MFC 的输出电压快速下降到 0.27 V 左右;③ MFC 的输出电压随着时间的增加缓慢下降,到运行 135 h 左右时, MFC 的输出电压降至 0.2 V,运行至近 144 h,电压降至 0.18 V。

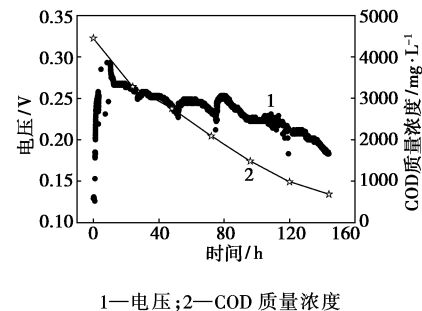


图 2 MFC 输出电压和 COD 质量浓度随时间变化

另外,由图 2 中 COD 质量浓度随时间的变化曲线可以看出,随着运行时间的增加,阳极液中 COD 的质量浓度不断降低,运行 144 h, COD 的质量浓度由 4 450  $\text{mg}/\text{L}$  降低到 682  $\text{mg}/\text{L}$ ,去除率为 85%。从 MFC 阳极室中有机物总量(COD)来看,有机物(即混合燃料中的对硝基苯酚和葡萄糖)在阳极室微生物的作用下基本可实现完全分解。

#### 2.2.2 MFC 的极化曲线和功率曲线

加入葡萄糖与对硝基苯酚(400  $\text{mg}/\text{L}$ )混合燃料,

(上接第 39 页)

- [14] 何圣兵.膜生物反应器在生活污水回用与污泥减量中的实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
- [15] 魏源送,樊耀波.污泥减量技术的研究及其应用[J].中国给水排水,2001,17(7):23-26.
- [16] 蒋轶锋,王琳,王宝贞,等.污泥臭氧化对 MBR 运行效能的影响

[J].中国环境科学,2005,25(5):519-522.

- [17] Böhler M, Siegrist H. Partial ozonation of activated sludge to reduce excess sludge, improve denitrification and control scumming and bulking [J]. Water Science and Technology, 2004, 49(10): 41-49.
- [18] 王丽,王琳,王宝贞.污泥臭氧化对淹没式生物膜工艺运行效能的影响[J].现代化工,2007,27(1):36-39. ■