

# 一种处理高氨氮有机废水改良 SBR 反应器的性能研究

张克强<sup>1,2</sup>, 季 民<sup>1</sup>, 雷英春<sup>1</sup>, 孙文君<sup>3</sup>, 沈 跃<sup>2</sup>, 李 野<sup>4</sup>

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 农业部农业环境与食品安全重点实验室, 天津 300191;  
3. 津南国家农业科技园区, 天津 300350; 4. 四川农业大学资源与环境学院, 四川 雅安 625014)

**摘 要:** 采用改良 SBR 处理人工模拟高氨氮有机废水, 在不同硝化液内循环比条件下, 比较  $\text{NH}_3 - \text{N}$  和  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除效果, 同时研究了改良 SBR 反应器的污泥特性。结果表明, 在曝气时间为 3 h、水力停留时间为 8 h、进水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  为  $1\,000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、回流比为 200% 条件下,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率达到 89.7%,  $\text{NH}_3 - \text{N}$  去除率达到 73.6%。通过试验研究出 MSBR 活性污泥产率系数  $Y$  与活性污泥微生物的自身氧化率  $K_d$  分别为 0.895 2 和 0.052 7。

**关键词:** 改良 SBR; 高氨氮有机废水; 内循环; 污泥特性

**中图分类号:** X703.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672 – 2043(2004)05 – 1009 – 05

## The Capability of a Modified SBR for the Treatment of Organic Wastewater Containing Ammonia.

ZHANG Ke-qiang<sup>1,2</sup>, JI Min<sup>1</sup>, LEI Ying-chun<sup>1</sup>, SUN Wen-jun<sup>3</sup>, SHEN Yue<sup>2</sup>, LI Ye<sup>4</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Lab of Agro – environment and Production Safety, M. O. A, Tianjin 300191, China; 3. Jinnan National Agriculture Science & Technology Zone, Tianjin 300350, China; 4. School of Resource and Environment, Sichuan Agriculture University, Ya’an 625014, China)

**Abstract:** A Modified SBR, divided into two parts including anaerobic selection zone and aerobic reaction zone, is different from normal SBR or CAST from the view of reactor structure. Inner circulation of nitrification liquid was enhanced for MSBR that adopted the mode of continuous wastewater inlet and intermittent outlet. When the simulated high strength wastewater with high ammonia was treated with modified SBR, the removal rates of  $\text{NH}_3 - \text{N}$  and  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  were compared under different inner circulation ratio of nitrification liquid and different HRT (hydraulic retention time), the sludge characteristic of MSBR was also studied. The experimental result showed that the removal rates of  $\text{NH}_3 - \text{N}$  and  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  reached up to 89.7% and 73.6% respectively under  $\text{HRT} = 8\text{ h}$ , aeration time = 3 h,  $\text{COD}_{\text{Cr}} = 1\,000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , inner circulation ratio of nitrification liquid = 200%. The sludge production coefficient ( $Y$ ) and sludge microbial oxygenation ratio ( $K_d$ ) were 0.8952 and 0.0527 respectively. MSBR was available for the treatment of organic wastewater containing ammonia.

**Keywords:** MSBR (Modified Sequencing Batch Reactor); capability; organic wastewater containing ammonia; inner circulation; sludge characteristic

作为一种典型的高氨氮有机污水, 畜禽废水的污染与危害日趋严重。目前, 我国畜禽养殖业废水处理率很低, 如广州市只有 20% 畜禽场建有废水处理设施, 其余畜禽场的废水都是不处理就排放的, 全国范围内处理率更低。其中一个重要原因是现有的处理工艺往往只重视  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS 等有机物的去除而忽

视了 N、P 的去除<sup>[1,2]</sup>。就畜禽养殖业而言, 大多数企业受到自然与市场的双重风险影响不可能投入很多资金用于处理废水, 所以猪场废水处理难度很大。因此, 研究开发、引进一种低成本、高效率的处理猪场废水工艺具有十分重要的现实意义。

国内外规模化猪场废水的处理, 主要采用厌氧 + 好氧 + 生物净化组合工艺。其中好氧处理形式有很多种, 好氧 SBR (Sequencing Batch Reactor) 亦称序批式活性污泥法或间歇式活性污泥法, 是一种利用微生物

在反应器内按照一定的时间顺序间歇式操作的污水处理技术。由于 SBR 具有投资省, 处理成本低等特点, 因此, 在高氨氮有机废水处理中经常采用。SBR 有多种改进形式, 例如 ICEAS(Intermittent Cyclic Extended Aeration System) 间歇式循环延时曝气活性污泥法, ICEAS 的最大特点是增加了一个预反应区, 且连续进水, 间歇排水, 但要脱氮除磷需要延长周期, 加大排水设备, 增加搅拌。CASS(Cyclic Activated Sludge System) 或 CAST ( - Technology) 或 CASP( - Process) 工艺全称为循环式活性污泥法。其前身为 ICEAS 工艺, 两者均是由美国的 Goronszy 教授开发而成的, 并于 1984 年和 1989 年分别在美国和加拿大取得专利(CASS)。其主要特点是脱氮除磷效果好, 但池容较大, 利用率低<sup>[3-5]</sup>。

本研究提出的 MSBR(Modified SBR) 主要结合 ICEAS 和 CASS 的优点, 采用连续进水, 间歇排水形式, 反应池设计为生物缺氧选择区和主反应区两部分, 内设硝化液回流。在设计上充分考虑到预反应区容积如 ICEAS 那样较大, 可以保证相对长的停留时间, 使进来的原污水和回流的硝化液能够与微生物充分接触反应; 预反应区又如 CASS 那样不曝气, 形成一个缺氧区, 在这里可以使回流的确态氮反硝化, 同时还能使饱食磷的聚磷菌实施释磷过程。另外, 污泥在这种环境下可以对丝状菌的生长起到有效的抑制作用, 有效防止污泥膨胀。在这个区域内, 还发生着由于微生物通过酶的快速转移机理而迅速吸附水中大部分可溶性有机物这样一个高负荷的基质快速积累过程, 这对进水水质、水量、pH 值和有毒有害物质有很好的缓冲作用, 因而具有较强的耐冲击负荷能力。本文对采用 MSBR 反应器处理高氨氮有机废水的性能进行了探索性研究。

1 材料与方法

1.1 废水来源及性质

人工模拟废水, 该配方满足猪场污水成分配比。配方如表 1 所示。

1.2 分析测试项目及方法

需要测试的项目有 COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>3</sub> - N, DO, MLSS,

表 1 人工模拟猪场废水的配方

Table 1 Simulated formulation of piggery wastewater

| 成分                                    | 含量/mg · L <sup>-1</sup> |
|---------------------------------------|-------------------------|
| 葡萄糖                                   | 1 000                   |
| NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub>      | 538.57                  |
| K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>       | 17.857                  |
| MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O | 14.286                  |
| MnSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O | 2.142 9                 |
| CaSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O | 0.714 29                |
| CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O | 0.017 857               |
| FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O | 3.5714                  |

pH, SS。分别采用重铬酸钾法, 纳氏比色法, 膜电极法 JPB - 607, 重量法, 玻璃电极法 WTW inLab pH 和重量法。

1.3 MSBR 反应装置

采用玻璃材料制作, MSBR 长 500 mm, 宽 100 mm, 高 500 mm, 有效容积 20 L。采用曝气头进行曝气, 通过空气流量计进行控制。反应装置结构示意图见图 1。

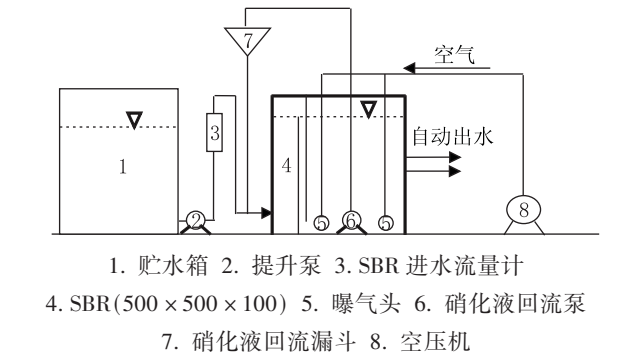


图 1 MSBR 结构示意图

Figure 1 Structure diagram of MSBR

1.4 试验内容

MSBR 的启动运行: 取天津市纪庄子污水处理厂硝化池回流污泥驯化后接种, 在常温, 溶解氧控制在 0.2 mg · L<sup>-1</sup> 左右, pH 值在 6 ~ 9 之间条件下, 按图 2 安排的周期以循环方式进行运行, 即进水(同时曝气)2 h 55 min、沉淀 1 h、排水 5 min。

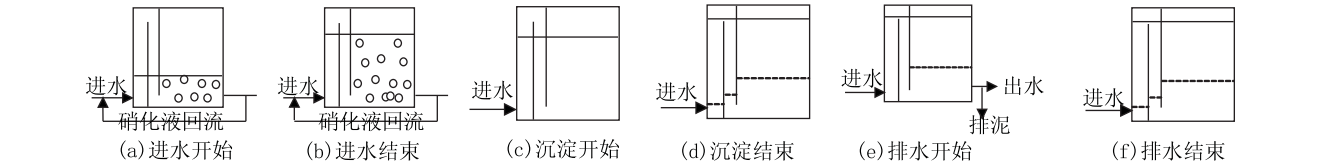


图 2 MSBR 运行工艺流程图

Figure 2 Flow diagram of MSBR operating

在 MSBR 正常运行情况下,设计 10 组不同进水浓度,每个周期进行 2 个重复,对 MSBR 污泥产率动力学参数进行了研究。

设计进水浓度分别为 800、1 000、1 200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  前提下,硝化液回流比为 200%,500% 时  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的去除率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 MSBR 的启动运行

采取自动控制方式,将模拟废水(COD 浓度为 1 000  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )直接引入 MSBR 反应器,并按间歇进水方式操作进行污泥培养驯化。结果 1 个周期下来,就发现污泥大量增殖。到 3 个周期结束时,SV 可达 60%,MLSS 在 5 000 ~ 6 000  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,沉降过程中观察污泥性状,可见到污泥呈黄褐色,絮凝体大而具有清楚边缘,充分说明长势良好。COD 去除率达到 87.6% 以

上,MSBR 启动结束,进入正常运行阶段。MSBR 的运行结果见图 3、图 4。

MSBR 进行生物降解的阶段,曝气时间和有机负荷的关系密切,同时受到满足需氧速率能力的影响。如果有硝化要求,则曝气时间的长短更为重要,同时要考虑充水比对污泥沉降性能的影响。由于系统类似于 CAST 是变容积运行的,边进水边曝气。本试验比较了曝气时间分别为 1、2、3 h 下 COD 的去除率见图 5。结果表明,在曝气 3 h 时, $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率达到 90% 以上,说明有机底物降解已基本完成。

为了取得较高的脱氮率,硝化反应历时一般不低于 6 h。比较了两个水力停留时间下的、回流比为 200%、沉淀时间为 0.5 h 不同进水基质浓度下  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  的去除效果见表 2。结果表明,若进水基质浓度为 1 000  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的话,其  $N_s$  值为 0.8  $\text{kgBOD}_5 \cdot \text{kg}^{-1}\text{MLSS} \cdot \text{d}^{-1}$ ,超过了一般活性污泥法所要求的经验值 0.3 ~ 0.5

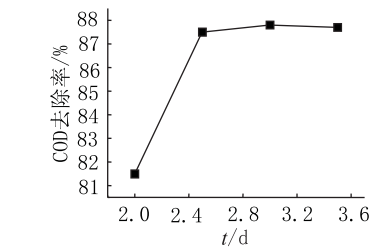


图 3 出水 COD 去除率历时曲线

Figure 3 Temporal changes of COD removal rates of effluent

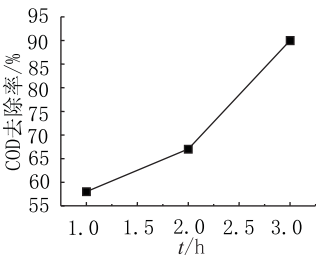


图 5 不同曝气时间下的 COD 去除率

Figure 5 COD removal rates under different aeration times

$\text{kgBOD}_5 \cdot \text{kg}^{-1}\text{MLSS} \cdot \text{d}^{-1}$ , 这样不仅影响了  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的降解效果,而且影响了  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的去除效果。因为硝化菌对环境变化非常敏感,如此高的负荷,使系统中保持一个高的底物含量,而硝化菌是自养型细菌,有机底物并不是它的生长限制因素,故在硝化反应过程中,混合液中的含碳有机底物浓度不应过高,一般  $\text{BOD}_5$  值应在 20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下。若  $\text{BOD}_5$  浓度过高,会使增殖速率较高的异养型细菌迅速增殖,从而使自养型的硝化菌得不到优势,不能成为优势菌属,硝化反应无法进行<sup>[2,3]</sup>。

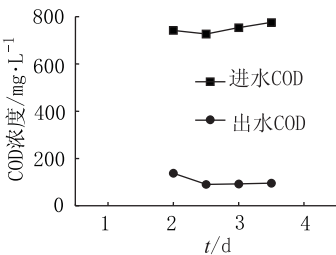


图 4 进水出水 COD 浓度历时曲线

Figure 4 Temporal changes of COD concentration in inlet and outlet water

表 2 不同水力停留时间下的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率

Table 2  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  removal rates under different hydraulic retention times

| 水力停留时间/h | $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 去除率/%      |                                       |                                       |
|----------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|          | 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 1 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 1 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ |
| 8        | 89.4                                | 89.7                                  | 77.5                                  |
| 5        | 82.0                                | 77.9                                  | 72.5                                  |

表 3 不同水力停留时间下的  $\text{NH}_3 - \text{N}$  去除率

Table 3 Removal rates of  $\text{NH}_3 - \text{N}$  under different hydraulic retention times

| 水力停留时间/h | $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率/%      |                                       |                                       |
|----------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|          | 800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 1 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 1 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ |
| 8        | 74.0                                | 73.6                                  | 74.4                                  |
| 5        | 59.7                                | 65.6                                  | 28.3                                  |

### 2.2 污泥产率动力学参数

活性污泥产率系数  $Y$  与活性污泥微生物的自身氧化率  $K_d$ , 是反映 MSBR 污泥活性并决定剩余污泥排放量的重要参数。活性污泥中微生物的增殖是生物

合成与内源呼吸同步进行的结果,因此,在单位反应器容积内,其净增殖速率为:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_g = \left(\frac{dX}{dt}\right)_s - \left(\frac{dX}{dt}\right)_e \tag{式 1}$$

式中: $\left(\frac{dX}{dt}\right)_g$  为活性污泥微生物净增殖速率;

$\left(\frac{dX}{dt}\right)_s$  为活性污泥微生物合成速率,其值为:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_s = Y\left(\frac{dX}{dt}\right)_u;$$

$\left(\frac{dX}{dt}\right)_u$  为活性污泥微生物对有机底物的利用(降解)速率;

$Y$  为产率系数,即微生物每代谢 1 kgBOD<sub>5</sub> 所合成的 MLSS 千克数;

$\left(\frac{dX}{dt}\right)_e$  为活性污泥微生物内源代谢速率,其值

为: $\left(\frac{dX}{dt}\right)_e = K_d \cdot X_v$ ;

$K_d$  为活性污泥微生物的自身氧化率, d<sup>-1</sup>, 亦称为衰减系数;

$X_v$  为 MLVSS。

$$\frac{\Delta X}{X_v \cdot V} = Y \frac{QS_r}{X_v \cdot V} - K_d \tag{1}$$

式中: $\frac{QS_r}{X_v \cdot V} = \frac{Q(S_o - S_e)}{X_v \cdot V} = N_s$  为污泥负荷率, kgBOD<sub>5</sub> · kg<sup>-1</sup>MLVSS · d<sup>-1</sup>;

$$\frac{\Delta X}{X_v \cdot V} = \frac{1}{\theta_c};$$

$\theta_c$  为污泥龄, d。

将此式按直线方程  $y = kx + b$  考虑, 以  $\frac{\Delta X}{X_v \cdot V}$  为纵轴, 以  $\frac{Q(S_o - S_e)}{X_v \cdot V}$  为横从标, 将数据点入, 则可得到一条直线, 其斜率为  $Y$ , 其在纵轴上的截距绝对值为  $K_d$ 。按此作法, 实验得到的结果如图 5、表 4 所示。于是得到:  $Y = 0.8952$ ,  $K_d = 0.0527$ 。

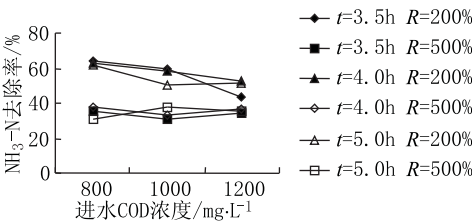
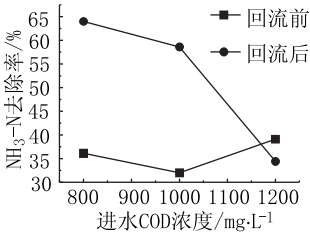


图 7 回流前后(左)及不同停留时间与不同回流比(右)NH<sub>3</sub>-N 去除率的变化  
Figure 7 Changes of NH<sub>3</sub>-N removal rates before and after inner circulation (left)  
and different hydraulic retention times and inner circulation ratios

表 4  $\frac{Q(S_o - S_e)}{X_v \cdot V}$  与  $\frac{\Delta X}{X_v \cdot V}$  之值

| Table 4 Values of $\frac{Q(S_o - S_e)}{X_v \cdot V}$ and $\frac{\Delta X}{X_v \cdot V}$ |           |           |           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\frac{Q(S_o - S_e)}{X_v \cdot V}$                                                      | 0.599 077 | 0.565 098 | 0.543 792 | 0.386 267 |
| $\frac{\Delta X}{X_v \cdot V}$                                                          | 0.481 928 | 0.454 438 | 0.434 958 | 0.292 683 |

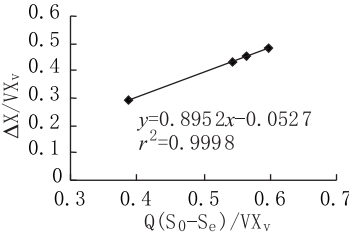


图 6  $Y$  与  $K_d$  求解曲线  
Figure 6 Evaluation curves of  $Y$  and  $K_d$

2.3 不同进水 COD 回流前后及不同回流比下氨氮去除率

从 MSBR 的结构型式来看,基本上属于一个 A/O 脱氮系统,即前置反硝化。对具有前置反硝化形式的各种脱氮工艺而言,混合液的回流是使工艺获得脱氮效果的先决条件,而混合液的回流比的大小是直接影响脱氮效果好坏的重要因素,其作用是向反硝化反应器内提供硝态氮,使其作为反硝化反应的电子受体,从而达到脱氮的目的。内循环回流比大小不仅影响脱氮效果,也影响到工艺系统的动力消耗,是一项非常重要的参数。经验证明,循环比在 50% 以下,脱氮率很低;循环比在 200% 以下,脱氮率随循环比增高而显著上升;而当循环比大于 200% 后,脱氮率提高就比较缓慢了,一般循环比取值不宜低于 200%<sup>[1,5]</sup>。本试验比较不同进水基质浓度下,回流前后及不同回流比下的 NH<sub>3</sub>-N 的去除率见图 7、图 8。结果表明,当进水 COD 的浓度在 800 ~ 1 200 mg · L<sup>-1</sup> 范围内变化时,循环比为 200% 的 NH<sub>3</sub>-N 的去除率明显高于循环比为 500%。但是,随着进水浓度的不断升高,NH<sub>3</sub>-N 的去除率呈下降趋势。可能因为循环比过高,严重增加

缺氧区的容积负荷和停留时间,降低反硝化的效果<sup>[4]</sup>。

### 3 结论

(1)以猪场废水为代表的畜禽养殖废水,属于高氨氮的有机污水。综合考虑各种变形 SBR 的优缺点<sup>[6]</sup>,独创了一种集 ICEAS、CASS 特点于一身的反应器,称为 MSBR。实验证明,MSBR 既能高效地使有机物浓度达标,还有好的脱氮效果。

(2)MSBR 最佳工艺状态是:HRT = 8 h,进水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  为  $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,沉淀时间为 1 h,回流比为 200%, $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率为 89.7%, $\text{NH}_3 - \text{N}$  去除率为 73.4%。

(3)由于增加了硝化液内循环,提高了脱氮效果,MSBR 的生物选择区与主反应区的最佳比例有待于进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 邓良伟. 水解—SBR 工艺处理规模化猪场粪污研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(3), 8 – 11.
- [2] 于金莲, 阎 宁. 畜禽养殖废水处理方法的探讨[J]. 给水排水, 2000, 26(9), 44 – 47.
- [3] G. Lettinga, J. Field. J. van Lier, Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future[J]. *Wat. Sci. Tech*, 1997, 35(10): 5 – 8.
- [4] Fernandes, L., and E. McKyes. Theoretical and experimental study of a sequential batch reactor treatment of liquid swine manure[J]. *Trans Am Soc Agr Eng*, 1991, 34(2): 597 – 602.
- [5] Ra, C. S., K. V. Lo and D. S. Maviniv. Real – time control of two – stage SBR system for the treatment of animal wastewater[J]. *Environmental Technology*, 1998, 19: 343 – 356.
- [6] 杨去龙, 陈启斌. SBR 工艺现状与发展[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(2): 1 – 3.