

研究论文

## 高亚硝态氮钝化清洗废水的生物处理及过程控制

董怡君, 王淑莹, 张宇坤, 彭永臻

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京市污水脱氮除磷处理与过程控制工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:** 钝化清洗废水含有高浓度亚硝态氮, 采用普通活性污泥难以进行生物处理。采用亚硝态氮废水富集亚硝态氮氧化菌 (NOB), 以富含 NOB 污泥的 SBR 装置处理模拟化学清洗钝化废水, 并提出了该处理工艺的过程控制策略。结果表明: 该工艺可以在 300 min 内完全氧化亚硝态氮浓度高达  $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的钝化废水, 高浓度亚硝态氮没有对生物降解过程产生明显抑制; 反应过程中 DO 浓度的变化与亚硝态氮氧化过程存在相关性, 溶解氧浓度的移动斜率变化(DO-MS)可作为亚硝态氮氧化过程控制参数; 当 DO-MS > 0.02 时, 亚硝态氮氧化过程结束, 此时可停止曝气。批次试验结果显示在不同曝气量 ( $0.02 \sim 0.125 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) 和不同温度条件 ( $15 \sim 30^\circ\text{C}$ ) 下, DO-MS 指数均可有效指示亚硝态氮氧化终点。

**关键词:** 废水; 亚硝态氮; SBR; DO-MS; 过程控制; 曝气; 温度

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.08.043

中图分类号: X 703

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 08—3164—06

## Biological treatment of high concentration $\text{NO}_2^-$ -N in passivation washing wastewater and process control strategy

DONG Yijun, WANG Shuying, ZHANG Yukun, PENG Yongzhen

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Engineering Research Center of Beijing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Biological treatment of high concentration  $\text{NO}_2^-$ -N in passivation washing wastewater is difficult. In this paper nitrite oxidizing bacteria (NOB) was enriched by feeding  $\text{NO}_2^-$ -N wastewater, NOB-rich activated sludge was used in an SBR system to treat simulated passivation washing wastewater, and a process control strategy was put forward. The results showed that using the process passivation washing wastewater with  $\text{NO}_2^-$ -N concentration  $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  could be totally oxidized within 300 min. The nitrite oxidation process was not inhibited by the high  $\text{NO}_2^-$ -N concentration. Furthermore, this process had a correlation with the variation of DO concentration during reaction. DO-MS, a parameter of the process control strategy, indicated the end of the reaction when it was more than 0.02. The results of batch tests showed that the DO-MS could indicate the end of the nitrite oxidation process both in different aeration rates ( $0.02 \sim 0.125 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) and different temperature ( $15 \sim 30^\circ\text{C}$ ).

**Key words:** wastewater; nitrite; SBR; DO-MS; process control; aeration; temperature

2013-10-28收到初稿, 2014-02-17收到修改稿。

联系人: 王淑莹。第一作者: 董怡君 (1987—), 女, 硕士研究生。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2012AA063406); 北京市教委科技创新平台项目。

**Received date:** 2013-10-28.

**Corresponding author:** Prof. WANG Shuying, wsy@bjut.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National High Technology Research and Development Program of China (2012AA063406) and the Project of Scientific Research Base and Scientific Innovation Platform of Beijing Municipal Education Commission.

## 引 言

钝化清洗废水是一种化学清洗废水<sup>[1]</sup>, 化学清洗过程一般包括水洗、碱洗、酸洗、漂洗和钝化。钝化过程是在锅炉金属表面上建立人工的钝化膜, 避免酸洗后处于活化的金属表面发生二次锈蚀。钝化剂成分有磷酸盐(聚、偏)、碳酸盐、亚硝酸钠、联胺等<sup>[2-5]</sup>。亚硝酸钠能在金属表面形成保护性钝化膜, 且形成的钝化膜优于碳酸盐、磷酸盐、联胺等钝化膜<sup>[5-6]</sup>。由此产生的钝化无机废水, 含大量磷酸盐(聚、偏)、碳酸盐、亚硝态氮、联胺等<sup>[2-5]</sup>。

亚硝酸盐属于致癌物质, GB 3838—1988《地面水环境质量标准》对亚硝酸盐氮的高标准要求是 $\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 低标准是 $\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 需经处理后排放。现阶段采用的化学处理钝化废水的方法主要有次氯酸钠法、尿素分解法、氯化铵分解法、氨基磺酸分解法等<sup>[1,7]</sup>, 而化学处理方法往往存在降解不够彻底、设备投资以及操作费用较高等不足。生物处理主要依靠亚硝态氮氧化菌(NO<sub>B</sub>)将亚硝态氮氧化为硝态氮, 具有效率高、花费少、可循环利用等优点。NO<sub>B</sub> 适宜生长的条件为: 温度 25~30℃、pH 范围 7.5~8.0、亚硝态氮浓度为 2~30 mmol · L<sup>-1</sup>; 直接采用普通污泥处理高浓度的亚硝态氮废水可能会造成处理效率低下等问题, 这可能是由于游离亚硝酸(FNA)对 NO<sub>B</sub> 有抑制作用<sup>[8-9]</sup>。目前采用生物方法处理高亚硝态氮钝化清洗废水还未见报道。本试验拟采用 SBR 装置富集 NO<sub>B</sub>, 利用富含 NO<sub>B</sub> 的污泥处理高浓度亚硝态氮钝化清洗废水, 同时对其过程控制特性进行研究, 以便节省能源, 降低费用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 接种污泥及试验用水

接种污泥取自某成功富集 NO<sub>B</sub> 的小试 SBR 系统, 该系统能够处理亚硝态氮浓度约为 2000 mg · L<sup>-1</sup> 的污水; 污泥浓度约为 8000 mg · L<sup>-1</sup>, 经 FISH 分析, 其 NO<sub>B</sub> 占细菌菌群总数的 80% 以上。

试验用水为模拟亚硝酸钠钝化废水<sup>[6]</sup>, 进水亚硝态氮浓度为 2000 mg · L<sup>-1</sup>; 每升配水中, 其他成分如下: 0.4 g NaHCO<sub>3</sub>, 1 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 1.31 g K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 以及 2 ml 的微量元素溶液。每升微量元素溶液成分为<sup>[10-11]</sup>: 1.25 g EDTA, 0.55 g ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O, 0.4 g CoCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O, 1.275 g MnCl<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O, 0.4 g CuSO<sub>4</sub> · 4H<sub>2</sub>O, 0.05 g Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O, 1.375 g

CaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O, 1.25 g FeCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O, 44.4 g MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O。

### 1.2 试验装置及运行方式

采用小试 SBR 处理模拟亚硝酸钠钝化废水, 反应器容积为 12 L, 其有效容积为 8 L, 反应器密封。装置每天运行 4 个周期, 每个周期时间为 6 h, 其中进水 10 min, 曝气并搅拌 5 h, 沉淀 40 min, 排水 10 min。每次进水 2 L, 水力停留时间为 20 h, 温度及曝气量根据运行方式作适当调整, 搅拌转速为 185 r · min<sup>-1</sup>; 反应过程中不控制 pH。

### 1.3 试验方案

试验共进行 35 d, 0~18 d 为稳定运行时期, 进水亚硝酸盐氮浓度为 2000 mg · L<sup>-1</sup>, 温度控制在 (25 ± 1)℃, 曝气量恒定为 0.12 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>, 监测运行过程中的 DO、pH 参数变化(每 5 min 计数一次), 并逐时取样测定反应器中 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度; 19~35 d 为批次试验时期, 分别考察不同温度条件和不同曝气量条件下各参数的变化情况。

不同曝气量条件的试验方法为: 在小试 SBR 反应器中进行, 底物浓度为 500 mg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N · L<sup>-1</sup>, 温度设定为 25℃, 试验期间不控制 pH, 试验分 7 组进行, 曝气量分别设为 0.125、0.1、0.08、0.05、0.04、0.03、0.02 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>; 试验期间, 实时监测反应器中 DO、pH 变化情况, 并逐时取样测定其 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度, 其中 DO 和 pH 值为每分钟计数一次。不同温度条件的试验方法为: 从母反应器中取 500 ml 泥水混合物于 500 ml 锥形瓶中, 加入亚硝酸钠使其底物浓度为 500 mg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N · L<sup>-1</sup>, 曝气量恒为 0.12 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>, 温度分别设为 15、20、25、30℃, 每组试验设置 3 个平行试验; 试验期间所测参数与不同曝气量试验相同。试验期间反应器运行方式与稳定运行期间的运行方式相同, 曝气时间的长短根据试验条件的不同而变化。

### 1.4 检测指标及分析方法

温度、pH 值和 DO 采用德国 WTW Multi 340i 及相应传感器在线检测。NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、MLSS、MLVSS 等指标均采用国家规定的标准方法测定<sup>[12]</sup>; 通过 FISH 分析对 NO<sub>B</sub> 以及全菌进行鉴定。按照 Amann 等<sup>[13]</sup>的操作方法进行 FISH 分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 稳定运行过程中典型周期的各参数变化情况

本试验接种污泥取自某成功富集 NO<sub>B</sub> 的小试

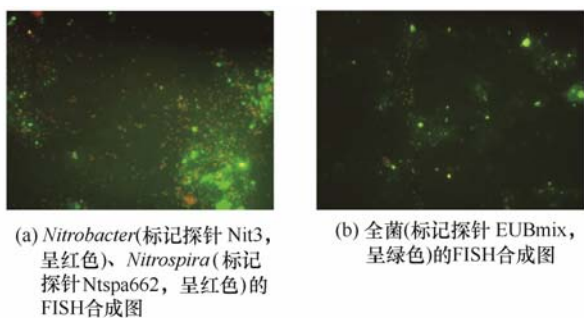


图 1 试验接种污泥的 FISH 分析图

Fig.1 FISH analysis of inoculum

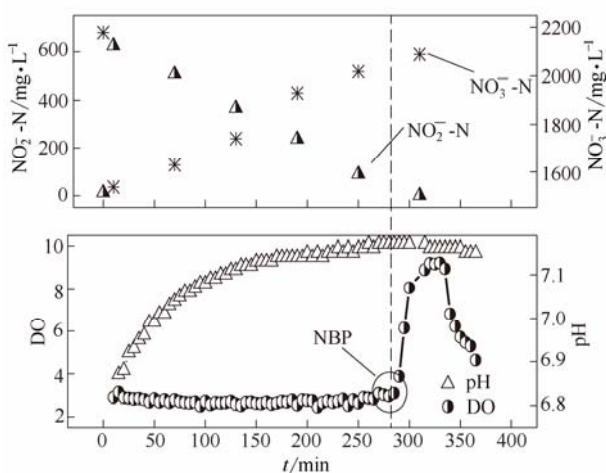


图 2 第 7d 第 2 周期的 NO<sub>x</sub> 浓度、pH 及 DO 的变化情况  
Fig.2 Variations of NO<sub>x</sub> concentration, pH and DO at the second cycle of 7th day

SBR 系统，经 FISH 分析检测发现，该污泥中 NOB 占细菌菌群总数的 80% 以上，如图 1 所示。

由图 2 中可以看出，pH 值在整个反应周期内由 6.87 逐渐上升至 7.16 并趋于平稳，这是由于 NOB 为自养生长，以 CO<sub>2</sub> 为唯一碳源，生长过程中不断利用 CO<sub>2</sub>，而系统中又有 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 存在，导致化学反应式 (1) 发生，使反应过程中的 pH 值呈上升趋势。



$$\rho = -2.23t + 632.7 \quad (R^2=0.998) \quad (2)$$

式中  $\rho$  为系统 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度，mg · L<sup>-1</sup>； $t$  为反应时间，min。

式 (2) 为此周期内亚硝态氮的降解曲线方程，由方程可看出亚硝态氮氧化过程为零级反应，为方便分析，将亚硝态氮降解完成的点称为亚硝态氮拐点 (nitrite break point, NBP)。由图 2 可看出，从进水结束后至出现 NBP 时，DO 基本保持平衡，这是由于亚硝态氮氧化过程为零级反应，亚硝态氮几乎一直以最大速率被氧化，速率不变导致耗氧速率不变，而供氧速率也不变，因而 DO 基本上没有变化；

而当出现 NBP 点后，DO 出现大幅度的上升，直至 DO 达到饱和。因此，可根据 DO 提出亚硝态氮氧化的过程控制策略。

## 2.2 基于 DO-MSC 的过程控制策略的提出

选取连续的 3 个周期，其整个过程中监测的 DO 浓度及对其处理后的数据变化趋势如图 2 所示。从图中可以看出，每个周期 DO 浓度的变化规律都相似，在 NBP 出现时，DO 浓度都会有明显跃升 [如图 3 (a) 所示]。目前，针对数据变化趋势，文献中多采用求导来对数据进行处理 [14-18]。从图 3 (b) 中可以看出，dDO/dt 在出现 NBP 时也会有明显跃升，然而 dDO/dt 随时间变化的曲线在反应器进水阶段波动较大，会影响判断，并不能用于指示亚硝态氮氧化过程的结束。移动斜率变化 (move slope change, MSC) 是一种较新的数据处理方法 [18]。本文对上述数据的溶解氧移动斜率变化 (DO-MSC) 的分析结果如下：仍采用上述 3 个周期，每 10 min 计算一次 DO 的平均值，并参考文献 [19] 对其进行 MSC 处理 (r=5)。由此得出 DO-MSC 随时间的变化曲线 [如图 3(c) 所示]，其每周期的变化规律为先升高后逐渐趋于平稳，然后跃增至最大值，后又降低趋于平稳直至曝气结束。在其跃增时，NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的浓度恰好降为 0，曲线平滑、杂峰较少，利于判断亚硝态氮氧化过程的终点。因此，可利用 DO-MSC 作为亚硝态氮氧化过程控制策略的参数。

经过多个周期分析比较发现，出现 NBP 时前一个点的 MSC 值小于 0.02 而 NBP 后一个点的 MSC 值则会大于 0.02。因此，可将 0.02 设为亚硝态氮降

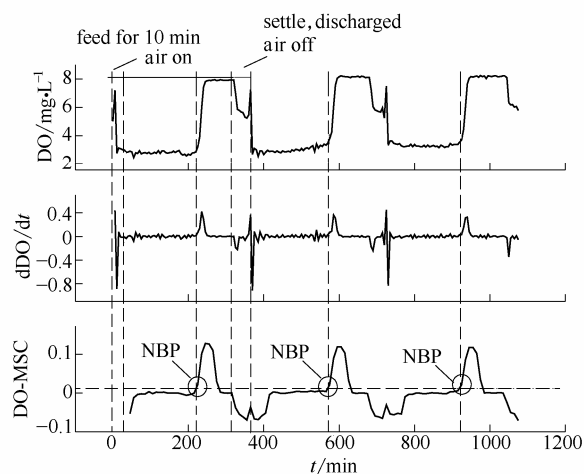


图 3 3 个周期的 DO、dDO/dt 以及 DO-MSC 的变化情况  
Fig.3 Variation of DO, dDO/dt and DO-MSC during three cycles

解完成的信号值，即当  $DO-MSC > 0.02$  时，则指示亚硝态氮降解完成，随即停止曝气。因此，可根据  $DO$  提出一种恒定曝气量条件下， $SBR$  工艺处理亚硝酸钠钝化废水的过程控制策略（图 4）。根据该控制策略运行反应器，能够减少曝气量，节省能源。

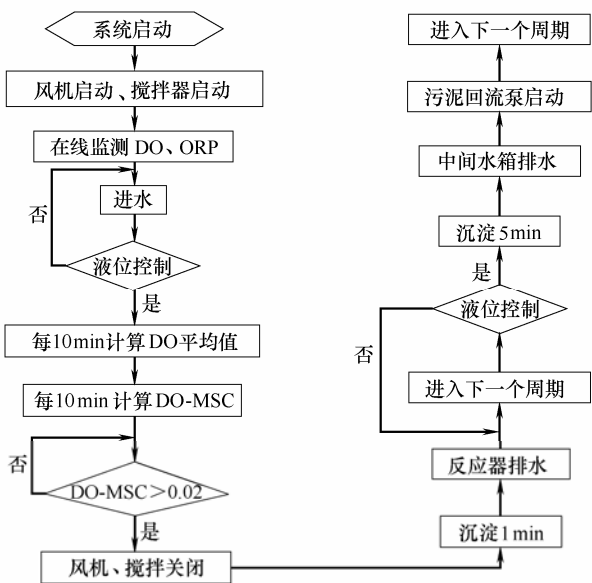


图 4 基于  $DO$  的  $SBR$  工艺处理亚硝酸钠钝化废水的过程控制策略

Fig.4 Process control strategy based on  $DO$  for pilot-scale  $SBR$  treating  $NO_2^-$ - $N$  wastewater

### 2.3 不同曝气量和不同温度条件下 $DO-MSC$ 参数的变化

曝气量和温度能够影响反应器中  $DO$  的浓度，因此，分别设计不同的批次试验考察曝气量和温度是否会影响控制策略的使用。

从相同温度不同曝气量试验中选取其中 3 个周期，曝气量分别为  $0.02$ 、 $0.08$ 、 $0.125 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，其反应过程中  $DO$ 、 $dDO/dt$  及  $DO-MSC$  的变化情况如图 5 所示。由图 5 可以看出，曝气量越大， $dDO/dt$  的最大值越大，且  $dDO/dt$  随时间变化的曲线波动较大，并不能作为指示反应结束的参数。而  $DO-MSC$  指数最大值保持稳定，且曲线平滑，在  $DO-MSC > 0.02$  时反应结束，可有效指示亚硝态氮氧化过程结束点，其稳定性较好。

从相同曝气量不同温度试验中选取两个周期，温度分别为  $15$ 、 $30^\circ\text{C}$ ，其反应过程中  $DO$ 、 $dDO/dt$  及  $DO-MSC$  的变化情况如图 6 所示。从图 6 可以看出，温度不同，反应过程中溶解氧的浓度不同，这

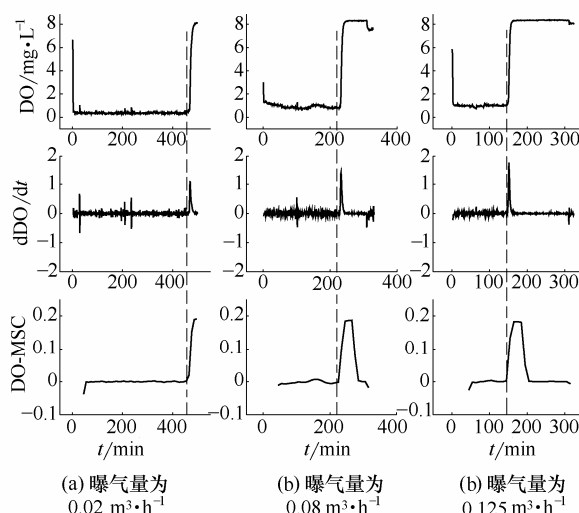


图 5 不同曝气量条件下亚硝态氮氧化过程中  $DO$ 、 $dDO/dt$  及  $DO-MSC$  的变化情况

Fig.5 Variation of  $DO$ ,  $dDO/dt$  and  $DO-MSC$  during reaction in different aeration rates

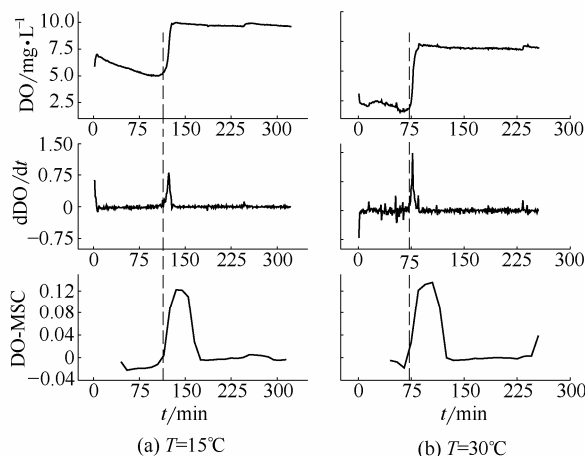


图 6 不同温度条件下亚硝态氮氧化过程中  $DO$ 、 $dDO/dt$  及  $DO-MSC$  的变化情况

Fig.6 Variation of  $DO$ ,  $dDO/dt$  and  $DO-MSC$  during reaction in different temperatures

与不同温度水中饱和溶解氧浓度不同有关。相同曝气量不同温度小试中， $DO$ 、 $dDO/dt$  及  $DO-MSC$  随时间变化的曲线与稳定运行期间描述的规律并不完全相同，但并不影响采用  $DO-MSC$  曲线来指示氧化反应的结束，同样是在  $DO-MSC > 0.02$  时反应结束，因此  $DO-MSC$  指数受温度变化影响小，适合作为亚硝态氮氧化过程控制参数。

由小试试验得知，温度和曝气量条件虽然会影响水中  $DO$  的浓度，但并不影响控制策略的使用。因此，该控制策略可用于  $SBR$  工艺处理亚硝酸钠钝化废水，并不局限于一定温度和一定曝气量，可根

据溶解氧和反应时间来调整曝气量，以节省能源，提高处理效率。

### 2.4 不同曝气量条件的能耗分析

图 7 为不同曝气量批次试验的平均溶解氧、曝气总量、反应时间及污泥氮负荷的变化情况。如图 7 所示，在曝气量小于  $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时，随着曝气量的增大，反应所需的曝气总量逐渐增加，每天的污泥氮负荷也逐渐增加；而在曝气量大于  $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时，随着曝气量的增大，曝气总量基本不变，每天的污泥氮负荷仍逐渐增加。这可能与 NOB 的氧气半饱和常数  $K_O$  有关。Rechard 等<sup>[20]</sup>测得 NOB 的  $K_O$  为  $(1.69 \pm 0.96) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随着曝气量的增加，反应过程中的平均溶解氧逐渐增加，而批次试验平均溶解氧的最大值为  $0.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，小于  $K_O$  值的 2 倍，这说明试验设定的最大曝气量并不能使亚硝态氮氧化反应以最大速率进行；当溶液中溶解氧浓度在  $0.35 \sim 0.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  范围时，随着溶液中溶解氧浓度的增大，反应时间逐渐减少，污泥氮负荷逐渐增加。

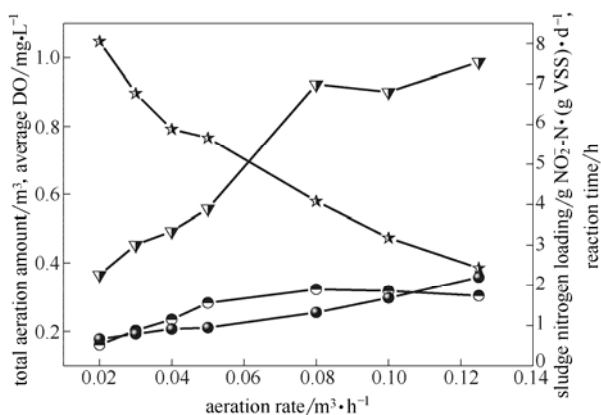


图 7 不同曝气量条件下的平均溶解氧、曝气总量、反应时间及污泥氮负荷情况

Fig.7 Variation of average DO, total aeration amount, reaction time and sludge nitrogen loading in different aeration rates

▽ average DO ● total aeration amount  
● sludge nitrogen loading ★ reaction time

## 3 结 论

(1) 采用生物法处理亚硝态氮浓度达  $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的钝化清洗废水是可行的，FNA 浓度为  $0.45 \text{ mg HNO}_2\text{-N} \cdot \text{L}^{-1}$  时未对亚硝态氮氧化过程产生抑制。

(2) pH 不能指示亚硝态氮氧化过程的终点； $d\text{DO}/dt$  曲线波动大，容易误判，不适合作为亚硝态

氮氧化过程控制参数；而 DO-MSC 曲线平滑，出峰稳定，可将 DO-MSC 作为亚硝态氮氧化过程的控制参数；当  $\text{DO-MSC} > 0.02$  时，亚硝态氮氧化过程结束，可及时停止曝气。

(3) 溶解氧浓度为  $0 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  范围内时，提高溶解氧浓度可有效提高污泥氮负荷，减少反应时间，提高处理效率。

## References

- [1] Wang Qiang(王强), Li Zhu(李竹). The treatment of power plant chemical washing wastewater[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*(内蒙古石油化工), 2012(18): 40-43
- [2] Guidelines for the chemical cleaning of boiler in thermal power plant[S]. DL/T 794—2001(57)
- [3] Liang Zhiqi(梁治齐). Handbook of Utility Cleaning Technology (实用清洗技术手册)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 471-472
- [4] Dou Zhaoying(窦照英). Handbook of Utility Chemical Cleaning Technology(实用化学清洗技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998: 155
- [5] Qin Guozhi(秦国治), Tian Zhiming(田志明). Handbook of Industry Cleaning and Application(工业清洗及应用实例)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 54-57
- [6] Zhou Ping(周萍), Ma Zheng(马政). Optimization of passivation techniques of sodium nitrite[J]. *Cleaning World*(清洗世界), 2006, 22(10): 21-23
- [7] Gao Lixin(高立新), Zhang Xinsheng(张新胜), Zhang Daquan(张大全). Treatment and recycle-utilization of waste-water in chemical cleaning of thermal power equipment[J]. *Cleaning World*(清洗世界), 2008, 24(9): 18-22
- [8] Han Xiaoyu(韩晓宇), Zhang Shujun(张树军), Gan Yiping(甘一萍), Wang Hongchen(王洪臣), Peng Yongzhen(彭永臻). Start up and maintain of nitrification by the inhibition of FA and FNA[J]. *Environmental Science*(环境科学), 2009, 30(3): 809-814
- [9] Shi Dan(史丹), Zhang Yi(张轶), Lei Zhongfang(雷中方), Yu Xiaonan(于小囡), Lin Lin(林琳). Effects of DO and influent pH on shortcut nitrification and partial nitrification effluent quality[J]. *Journal of Fudan University*(复旦学报), 2012, 51(3): 349-356
- [10] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, et al. The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched nitro bacter culture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(14): 4442-4448
- [11] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, et al. Stoichiometric and kinetic characterisation of nitro bacter in mixed culture by decoupling the growth and energy generation processes [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, 94(6): 1176-1188
- [12] State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and Analysis Method of Water and Waste Water(水和废水监测分析方法)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 252-354
- [13] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental-studies in microbiology [J]. *Journal of Bacteriology*, 1990, 172(2): 762-770

- [14] Gao Dawen(高大文), Peng Yongzhen(彭永臻), Wang Shuying(王淑莹), Liang Hong(梁红). Temperature effects on DO and ORP in the wastewater treatment[J]. *Environmental Science(环境科学)*, 2003, **24**(1): 63-69
- [15] Yang Qing(杨庆), Peng Yongzhen(彭永臻), Wang Shuying(王淑莹), Gu Shengbo(顾升波), Liu Xiuhong(刘秀红), Li Lingyun(李凌云). Analysis and establishment of control modes of advanced nitrogen removal via nitrite in SBR[J]. *Environmental Science(环境科学)*, 2009, **30**(4): 1084-1089
- [16] Gu Shengbo(顾升波), Wang Shuying(王淑莹), Li Xiyao(李夕耀), Yang Qing(杨庆), Li Lingyun(李凌云), Yang Pei(杨培), Li Lun(李论). The achievement of real-time control strategy in pilot-scale SBR process at the conditions of low temperature and fixed dissolved oxygen by applying frequency conversion technology[J]. *Journal of Beijing University of Technology(北京工业大学学报)*, 2011, **37**(3): 425-432
- [17] Gao Dawen(高大文), Peng Yongzhen(彭永臻), Wang Shuying(王淑莹), Liang Hong(梁红). Using ORP and pH value to control treatment of soybean wastewater[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology(哈尔滨工业大学学报)*, 2003, **35**(6): 647-650
- [18] Gao Jingfeng(高景峰), Peng Yongzhen(彭永臻), Wang Shuying(王淑莹), Zeng Wei(曾薇), Sui Minghao(隋铭皓). Using dissolved oxygen, oxidation reduction potential and pH value for control nitrogen removal in SBR process[J]. *China Water & Wastewater(中国给水排水)*, 2001, **17**(4): 6-11
- [19] Ga C H, Ra C S. Real-time control of oxic phase using pH (mV)-time profile in swine wastewater treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(1): 61-67
- [20] Blackburne Rechard, Vadivelu Vel M, Yuan Zhiguo, *et al.* Kinetic characterisation of an enriched nitrospira culture with comparison to nitrobacter[J]. *Water Research*, 2007, **41**(14): 3033-3042