

# SBR 法反硝化过程模糊控制器的设计和碳源投加方式的选择

高景峰, 彭永臻, 王淑莹 (北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

**摘要:**在大量试验的基础上构建了 SBR 法反硝化过程的模糊控制器, 并进行了 3 种碳源投加方式的实时控制试验. 结果表明, 按较小的速率连续投加碳源是最佳投加方式, 它不仅可以满足反硝化速率上的要求, 还可以尽量地减少再曝气时间. 以 pH 和 ORP 作为 SBR 法反硝化时间和碳源投加的在线模糊控制参数是可行的和可靠的.

**关键词:**模糊控制; SBR; 反硝化; 碳源投加方式

## The construction of fuzzy controller of denitrification in SBR process and the choice of carbon addition method

GAO Jingfeng, PENG Yongzhen, WANG Shuying (College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

**Abstract:** On the basis of the fundamental experiments, the fuzzy controller of denitrification in SBR was constructed, and the on-line fuzzy control experiments comparing three methods of carbon addition were carried out. The results showed a continuous carbon addition at a low rate was the best method, as it can not only give higher denitrification rate but also reduce the re-aeration time as much as possible. It appeared promising that pH and ORP were used as fuzzy control parameters to control the denitrification time and the carbon addition.

**Keywords:** fuzzy control; SBR; denitrification; carbon addition method

污水生物处理系统具有多变量、高度非线性、大滞后、不确定的动力学模型、缺乏可靠的实时监测仪器等特性, 因此其自动控制效果一直不十分理想, 但是模糊控制可以达到较好的效果. 迄今为止, 模糊控制在美国、欧洲、日本的给水处理、污水生物处理、污水的物理化学处理中都有成功的应用. 1980 年 R. M. Tong<sup>[1]</sup>首次将模糊控制应用于污水生物处理中, 解决了英国 Norwich 怀特林汉污水处理厂的污泥膨胀和二沉池污泥上浮问题. 其后, 许多研究者陆续将模糊控制应用于污水生物处理中<sup>[2-7]</sup>. 反硝化是污水生物脱氮的关键步骤, 必须准确地控制碳源投加和反硝化时间. 有关反硝化碳源投加的过程控制, 只见 S. H. Isaacs<sup>[8]</sup>等人针对 BIO-DENITRIFICATION 过程应用前馈控制来投加碳源, 以保证出水  $\text{NO}_x^-$ -N 足够低. SBR 法脱氮运行操作复杂, 实现其智能控制意义重大. 本研究在前期试验<sup>[9-12]</sup>的基础上, 对 SBR 法反硝化过程建立了模糊控制器, 并依此通过实时控制试验比较了 3 种碳源投加方式的优劣.

### 1 SBR 法反硝化模糊控制器的设计

模糊控制器是模糊控制的核心, 主要由 4 部分组成: 输入量的模糊化、知识库(数据库和模

收稿日期: 2002-10-14; 修订日期: 2003-01-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50138010); 北京市自然科学基金项目(8002005)

作者简介: 高景峰(1974—), 男, 讲师(工学博士) E-mail: brady009@vip.sina.com

糊控制规则)、模糊推理、输出量的去模糊化。SBR 反硝化模糊控制的目的是:(1)动态控制碳源投加的数量,保证碳源足够而又不过量引起出水水质恶化;(2)实时控制反硝化时间。投加碳源的方式有 3 种:(1)一次投加过量碳源;(2)分批多次投加碳源;(3)按一定的速率连续投加碳源。对 1、3 这两种碳源投加方式只存在对反硝化时间的控制,而对第 2 种投加方式则不仅存在对反硝化时间的控制,还存在对碳源再次投加的控制。根据这 2 个控制目的设计了 2 个模糊控制器,同时运行,分别完成反硝化碳源投加和反应时间的实时控制。

在大量试验的基础上<sup>[9-12]</sup>选择 ORP 的偏差(用  $E_{ORP}$  表示,指以反硝化开始的  $ORP_s$  为标准值,在线检测的  $ORP_{OFF}$  与  $ORP_s$  的差作为 ORP 的偏差);ORP 的导数: $d(ORP)/dt$ (用  $CE_{ORP}$  表示);pH 的导数: $d(pH)/dt$ (用  $CE_{pH}$  表示);以及 pH 的二阶导数: $d^2(pH)/dt^2$ (用  $C2E_{pH}$  表示)作为模糊控制的输入变量。输出变量有两个:(1)搅拌(Mix),用  $U_M$  表示;(2)投加碳源(Dose),用  $U_D$  表示。 $U_M$  只有 2 种选择:继续搅拌或结束搅拌。 $U_D$  也只有 2 种选择:维持原状态,无动作或是按批量再次投加碳源。

将  $E_{ORP}$ 、 $CE_{ORP}$ 、 $CE_{pH}$  和  $C2E_{pH}$  分别非均匀量化为离散的整型变量  $X_{ORP}$ 、 $CX_{ORP}$ 、 $CX_{pH}$  和  $C2X_{pH}$ 。采样周期为 0.5—1 min。模糊变量的隶属函数为三角形。 $X_{ORP}$  和  $CX_{ORP}$  的模糊集分别为 {NB, NM, NS}; {NB, NM, NS, NO};  $CX_{pH}$  的模糊集为 {NB, NS, NO, PO, PS, PB};  $C2X_{pH}$  的模糊集为 {N, O, P}。在大量试验的基础上<sup>[9-12]</sup>,建立了以模糊语言表示的模糊控制规则,限于篇幅,对关键规则简述如下:

对反硝化时间的控制而言,模糊控制规则为:当  $X_{ORP}$  达到 NM 或 NB,并且  $CX_{ORP}$  达到 NM 或 NB,同时  $CX_{pH}$  达到 NO 或 NS,此时才能结束反硝化。通过设定“ $X_{ORP}$  达到 NB 或 NM”这一条件,避免了反硝化初始,若投加酸性碳源则很容易误判为应该结束反硝化的这种情况。通过设定“ $CX_{ORP}$  达到 NM 或 NB”这一条件,避免了若再次投加酸性碳源则很容易误判为应该结束反硝化的这种情况。此规则就是同时应用 ORP 和 pH 曲线的特征点<sup>[9-12]</sup> 共同进行反硝化时间的模糊控制。

对反硝化过程中,针对碳源不足需要再次投加而言,其模糊控制规则为:当  $CX_{pH}$  为 NO 或 PO,并且  $C2X_{pH}$  达到 O 时,就按照一定的批量再次投加碳源。反硝化结束后进行再曝气,去除多余的 COD,并吹脱  $N_2$ ,此阶段以 DO 和 ORP 作为模糊控制参数进行控制<sup>[9,12]</sup>。

模糊推理方法采用 MIN-MAX 法。由于本模糊推理系统为零阶的 Sugeno 模糊模型,模糊部分只在前件中,无需进行耗时的后件去模糊化过程,更适合于实际应用。

## 2 SBR 法反硝化模糊控制实例以及碳源投加方式的选择

进行了啤酒废水为碳源的 3 种投加方式的在线模糊控制试验,以此来分析比较哪种碳源投加方式最优,达到以尽量快的速度尽量适量的碳源完成反硝化。在模糊控制试验时,同时检测  $NO_3^- - N$  的变化,以便验证模糊控制的可靠性和准确性。

### 2.1 污泥和污水

试验所用污泥接种于某啤酒废水处理厂。试验用水为啤酒加适量自来水稀释,为避免试验用水在配水池内发生显著降解,现用现配;投加  $NH_4Cl$  和  $KH_2PO_4$  作为氮源、磷源;投加  $NaHCO_3$  调整 pH 和碱度。

## 2.2 试验装置

试验所用 SBR 装置如图 1. 反应器高 70 cm, 直径 30 cm, 总有效容积 38 L, 有机玻璃制, 采用鼓风机曝气, 用转子流量计调节曝气量. 反应器中设有搅拌器, 在非曝气状态或曝气量很小时, 保持泥水混合均匀. 温控仪和加热器用于调控水温. 为了实现生物脱氮, SBR 法的运行方式为: 瞬间进水, 曝气(好氧去除有机物、硝化), 停止曝气投加碳源并搅拌(反硝化), 停止搅拌短时间曝气, 去除多余的 COD 并吹脱  $N_2$ . 根据 DO、ORP 和 pH 的变化情况控制各反应段的时间和采样.

## 2.3 检验分析项目

在线检测的项目有 DO、ORP、pH 和温度. DO 和温度: YSI MODEL 50B 溶解氧测定仪. pH: pHS-3C 型精密酸度计, 外加上海雷磁仪器厂生产的 E-201 型 pH 复合电极. ORP: pHS-3C 型精密酸度计, 外加美国分析传感公司生产的 E-414Q 型 ORP 电极.  $COD_{Cr}$ : 兰州炼化生产的 5B-1 型化学需氧量快速测定仪. MLSS: 滤纸重量法;  $NO_2^- - N$ : N-(1-萘基)-乙二胺光度法;  $NO_3^- - N$ : 酚二磺酸光度法;  $NH_4^+ - N$ : 纳氏试剂光度法;  $PO_4^{3-} - P$ : 氯化亚锡还原光度法<sup>[13]</sup>.

## 2.4 试验方案

维持 MLSS 在 4000 mg/L 左右, 反应初始  $NH_4^+ - N$ 、 $COD_{Cr}$  和  $PO_4^{3-} - P$  分别维持在 60 mg/L、300 mg/L 和 12 mg/L 左右, 废水 C:N:P = 25:5:1, 硝化反应结束后, 投加啤酒废水进行反硝化. 试验分为 3 种不同碳源投加方式进行: (1) 一次投加足量碳源进行反硝化. 投加过量啤酒废水使混合液初始  $COD_{Cr}$  为 379 mg/L; (2) 分批投加碳源. 每次投加的碳源量 ( $COD_{Cr}$ ) 分别为 1018 mg/次 (26.8 mg/L) 和 1920 mg/次 (50.5 mg/L); 依靠 pH 斜率的变化模糊控制碳源分批投加, 按 pH 和 ORP 的共同特征模糊控制反硝化时间. (3) 用蠕动泵按 3 种速率模糊控制连续投加碳源. 投加  $COD_{Cr}$  的速率分别为  $v_1 = 206$  mg/min (5.42 mg/(L·min)),  $v_2 = 269$  mg/min (7.08 mg/(L·min)),  $v_3 = 440$  mg/min (11.6 mg/(L·min)). 结果见图 2—图 7 和表 1.

## 2.5 结果和讨论

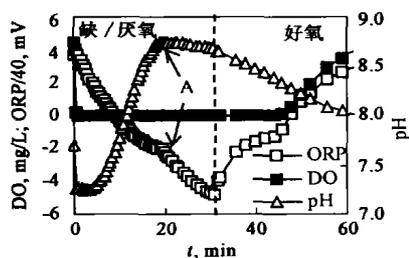


图 2 SBR 法反硝化开始时一次投加足量啤酒废水 ( $COD = 379$  mg/L), DO、ORP 和 pH 的变化曲线  
Fig. 2 Profiles of DO, ORP and pH during denitrification in SBR process (Adding once at the beginning with  $COD = 379$  mg/L)

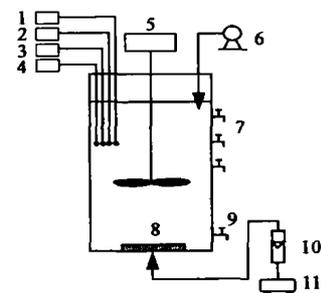


图 1 SBR 试验系统示意图  
1. ORP 测定仪 2. pH 测定仪  
3. DO 测定仪 4. 温控仪  
5. 搅拌器 6. 进水泵 7. 排水口  
8. 曝气器 9. 排泥管  
10. 空气转子流量计 11. 空气压缩机

Fig. 1 Schematic of the SBR system

模糊控制试验结果表明一次投加足量碳源时(见图 2), DO 和 ORP 的变化遵循典型规律, 再曝气去除多余的有机物耗时 15 min, 可见碳源是过量的. 在进行模糊控制试验时, ORP 和 pH 的特征点(见图 2 中点 A)出现数 min 后, 才停止反硝化过程, 以避免发生误控制.

分批多次投加碳源时, 投加量为 1018 mg/次的试验过程中共投加了 7 次(见图 3, 图 4), 再曝气的时间基本为 0 min, 可以说投加的碳源都被利用了, 基本没有多余; 投加量为 1920 mg/次 (50.5 mg/L) 的试验过程中共投加了 4 次(见图 5), 再曝气的时间为 8 min.

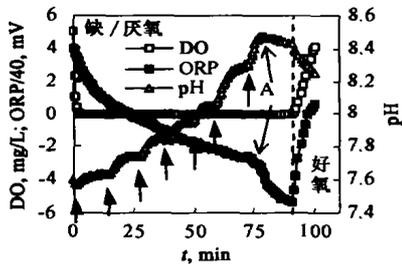


图 3 每次投加 COD = 1018 mg/L,反硝化过程中 DO、ORP 和 pH 的变化规律

Fig.3 Profiles of DO,ORP and pH during denitrification in SBR process(Adding brewery wastewater in batch fashion, COD/batch = 1018 mg/L, denoted by the arrows)

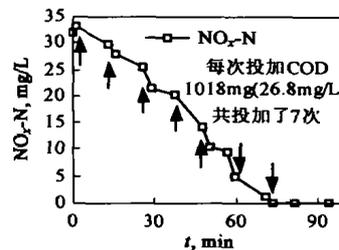


图 4 每次投加 COD = 1018 mg/L,反硝化过程中 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的变化规律

Fig.4 Dynamics of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N during denitrification in SBR process(Adding brewery wastewater in batch fashion, COD/batch = 1018 mg/L, denoted by the arrows)

用蠕动泵连续投加碳源的模糊控制试验时, pH 变化曲线没有出现上升速率变缓的现象. 而且反硝化结束时所投加的碳源也基本都被利用, 不需要再曝气. 投加速率为  $v_1$  的试验结果见图 6. 3 种速率投加碳源时, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 随时间的变化过程见图 7.

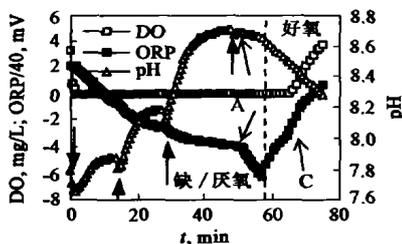


图 5 每次投加 COD = 1920 mg/L,反硝化过程中 DO、ORP 和 pH 的变化规律

Fig.5 Profiles of DO,ORP and pH during denitrification in SBR process (Adding brewery wastewater in batch fashion) (COD/batch = 1920 mg/L, denoted by the arrows)

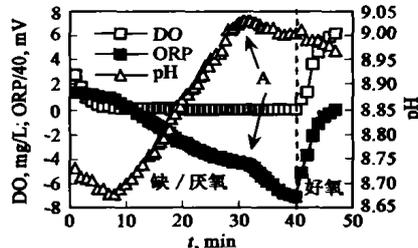


图 6 以 COD = 206 mg/min 的速度连续投加啤酒废水, 反硝化过程中 DO、ORP 和 pH 的变化曲线

Fig.6 Profiles of DO,ORP and pH during denitrification in SBR process(Adding brewery wastewater in continuous fashion: COD = 206 mg/min)

由图 2—图 7 和表 1 可知, 本研究以 pH 和 ORP 的变化特征建立的模糊控制规则来控制反硝化时间, 同时控制碳源投加的时机和数量, 其控制结果是可靠的. 一次过量投加碳源和以较大的速率连续投加碳源时反硝化速率最快. 分批投加碳源时, 反硝化速率最小, 并且单次投加量越小, 反硝化时间越长, 因为每次投加的碳源都被充分消耗并且反映在 pH 的变化上后, 这时才进行再次投加碳源. 但是相对而言连续投加碳源可以说是一种比较优秀的投加方式, 因为投加的碳源都能被充分利用, 表现在图 6 中为: pH 的上升没有出现速率变小的现象. 连续

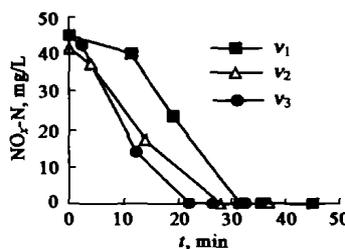


图 7 啤酒废水不同投加速度条件下, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 变化曲线  
投加 COD 的速度:  $v_1$ : 206 mg/min(5.42 mg/L/min);  $v_2$ : 269 mg/min(7.08 mg/L/min);  $v_3$ : 440 mg/min(11.6 mg/L/min)

Fig.7 Dynamics of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N during denitrification in SBR process at different brewery wastewater dosing rates

投加碳源不论在反硝化速率方面还是在碳源的适量投加上都是令人满意的。

表 1 不同碳源投加方式下 SBR 法反硝化特性的比较

Table 1 Comparison of characteristics of denitrification in fuzzy control experiments

投加方式	碳源总量, mg	初始 $\text{NO}_3^-$ -N 浓度, mg/L	反应时间, min	再曝气时间, min	反硝化速率 <sup>①</sup>
一次过量	14400	32.6	20	15	0.41
每次 1018 mg, 共 7 次	7123	33.3	73.5	0	0.11
每次 1920 mg, 共 4 次	7680	34.3	49.5	8	0.17
$v_1$ : 206 mg/min, 共 34min	7004	44.9	34	0	0.33
$v_2$ : 269 mg/min, 共 28min	7532	41.5	28	0	0.37
$v_3$ : 440 mg/min, 共 22min	9680	45.2	22	0	0.51

① 反硝化速率指单位时间内单位质量的活性污泥所去除的  $\text{NO}_3^-$ -N 的量, 单位:  $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{min})$

### 3 结论

反硝化开始时,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度和所需碳源的量都是未知的, 通过模糊控制, 可以适量地投加所需的碳源并及时地结束反硝化, 不需建立任何数学模型. 若以提高反硝化速率为目的则选取一次足量投加或以较大的批量分批投加或以较高速率连续投加碳源; 若以节约碳源和减少再曝气的时间为目的则选择以较小的批量分批投加或以较小的速率连续投加. 而按较小的速率连续投加碳源可以说是最优的一种投加方式, 它不仅可以满足反硝化速率上的要求, 还可以尽量地减少再曝气时间.

#### 参考文献:

- [1] Tong R M, Beck M B, Latten A. A fuzzy control of the activated sludge wastewater treatment process[J]. *Automatica*, 1980, 16(6): 695—701
- [2] Tsai Y P, Ouyang C F, Wu M Y, et al. Effluent suspended solid control of activated sludge process by fuzzy control approach[J]. *Water Environmental Research*, 1996, 68(6): 1045—1053
- [3] Yin M T, Stenstrom M K. Fuzzy logic process control of HPO-AS process[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1996, 122(6): 484—492
- [4] Muller A, Marsili-libelli S, Aivasidis A, et al. Fuzzy control of disturbances in a wastewater treatment process[J]. *Water Research*, 1997, 31(12): 3157—3167
- [5] Fu C S, Poch M. Fuzzy model and decision of COD control for an activated sludge process[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 93: 281—292
- [6] Manesis S A, Sapidis D J, King R E. Intelligent control of wastewater treatment plants[J]. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1998, 12(3): 275—281
- [7] Tay J H, Zhang X Y. A fast predicting neural fuzzy model for high-rate anaerobic wastewater treatment systems[J]. *Water Research*, 2000, 34(11): 2849—2860
- [8] Isaacs S H, Henze M, Sørensen H, et al. External carbon source addition as a means to control an activated sludge nutrient removal process[J]. *Water Research*, 1994, 28(3): 511—520
- [9] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹, 等. 以 DO、ORP、pH 控制 SBR 法的脱氮过程[J]. *中国给水排水*, 2001, 17(4): 6—11
- [10] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. 以 pH 和 ORP 作为 SBR 法反硝化模糊控制参数的基础试验研究[J]. *环境科学*, 2002, 23(1): 39—44
- [11] Peng Y Z, Gao J F, Wang S Y, et al. Use pH and ORP as fuzzy control parameters of denitrification in SBR process[J]. *Water Science & Technology*, 2002, 46(4-5): 131—137
- [12] 高景峰. SBR 法去除有机物和脱氮除磷在线模糊控制的基础研究[D]. (学位论文) 哈尔滨工业大学, 2001
- [13] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第三版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989