

# 以 DO、ORP、pH 作为两段 SBR 工艺的实时控制参数

曾 薇, 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:**介绍了在传统 SBR 脱氮工艺的基础上,开发的用于处理 COD 和氮浓度较高的工业废水的两段 SBR 系统(TSSBR)。根据传统 SBR 工艺在反应过程中,当 COD 不再被降解,而硝化反应又没有开始时,DO 迅速大幅度升高以及 pH 曲线上出现的拐点,可以将 COD 降解与硝化反应分割开,先后在不同的反应器内进行,分别命名为 SBR1 和 SBR2,避免高 COD 浓度对硝化反应的冲击,提高处理效率。利用在线检测的 DO、ORP 和 pH 参数实时控制 SBR1、SBR2 各个生化过程的反应时间,解决了两段 SBR 系统的自动控制问题,可以使系统长期稳定运行,保证出水水质,节约能耗。采用实时控制策略,并控制系统温度在 30℃ 左右,可将 SBR2 的硝化反应控制在亚硝酸型硝化结束。采用该工艺处理石化废水,COD 去除率达到 90%~95%,30℃ 时的比硝化反应速率达到 0.3 kg(NH<sub>4</sub>-N)/(kg(MLSS)·d),出水已检测不出氨氮和硝态氮。

**关键词:**TSSBR 工艺; DO; ORP; pH

## Application of DO, ORP and pH as on-line control parameters in a two-stage SBR process

ZENG Wei, PENG Yongzhen, WANG Shuying (School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

**Abstract:** The application of a two-stage SBR (TSSBR) based on a single SBR nitrogen removal system for the treatment of a petrochemical industrial wastewater containing high COD and nitrogen concentration was studied. According to DO going up rapidly and the breakpoint on the pH curve at the removal of readily biodegradable substrate and nitrification transition in a single SBR nitrogen removal reactor, substrate degradation and nitrification could be divided and occurred sequentially in the different reactors, named as SBR1 and SBR2, respectively. In a TSSBR system, the negative impact of the higher influent COD on nitrification could be avoided and treatment efficiency improved because the heterotrophic bacteria for substrate degradation and autotrophic nitrifier existed in the different reactors. The problem of the automatic control for TSSBR process could be solved by using the on-line monitored DO, ORP and pH to real-time control the duration of the different biochemical reactions, which provided great process flexibility and stability, and saved the energy consumption. SBR2 nitrification was controlled to nitrite-type nitrification by using real-time control strategy and controlling wastewater temperature 30℃. Stable and high COD removal efficiency reached to 90%~95% and the specific nitrification rate at 30℃ was 0.3 kg(NH<sub>4</sub>-N)/(kg(MLSS)·d). Ammonia, nitrate and nitrite in the effluent were reduced to detection level.

**Keywords:** a two-stage SBR process; DO; ORP; pH

SBR 工艺的显著特点就是可以在同一个反应器内完成多种生化反应,简化处理流程,节省基建投资,在工业废水的处理中得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>。通常原水 COD 浓度在 200~300 mg/L 较低范围内,可以取得较好的脱氮效果。但工业废水的水质水量变化较大,某些工业废水中 COD 和氨氮浓度较高,高 COD 浓度导致硝化反应速率降低,出水氨氮达不到排放标准。两段 SBR 工艺

收稿日期:2002-01-17;修订日期:2002-09-16

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50138010)和北京市自然科学基金项目(8002005)

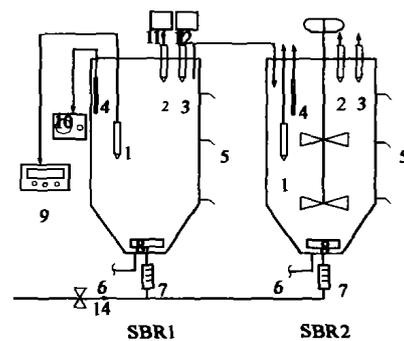
作者简介:曾 薇(1974—),女,博士 Email: zengwei-1@263.net

就是用于处理 COD 和氮浓度较高的工业废水,使具有不同作用的两大类微生物群体存在于不同的反应器内,提高处理效率.SBR 的自动控制问题是 SBR 工艺进一步推广应用的关键.目前,研究都是集中在以 DO、ORP 和 pH 这些可以在线检测的参数作为各个生化过程的控制参数<sup>[3-5]</sup>.因此,本文系统研究了两段 SBR 工艺的过程控制,保证系统的稳定运行.

## 1 材料和方法

采用哈尔滨石油化工总厂三酸车间的洗釜废水作为处理对象,废水中含有乙酸、偏苯三酸及苯酚等多种有机化合物.原废水呈酸性,进入反应器前投加 NaOH 调节 pH 值.

两段 SBR 系统由两套相同的 SBR 反应器串联构成,分别命名为 SBR1 和 SBR2.反应器试验装置如图 1 所示,有效容积 38L,采用鼓风曝气,转子流量计调节曝气量控制 DO 浓度,温控仪和加热器控制水温 30℃左右.原废水首先进入 SBR1,进水时采取瞬间进水,限制曝气方式.SBR1 主要去除 COD,进水后依次进行曝气、沉淀、排水.排放的水再进入 SBR2,SBR2 以脱氮为主.先好氧硝化,然后缺氧搅拌,通入原化工废水作为反硝化碳源.反硝化结束后曝气 5~10 min 吹脱氮气,最后沉淀排水.至此,完成两段 SBR 的一个反应周期.根据试验需要,可灵活确定闲置期的长短,然后开始下一个循环处理周期.反应过程中在线检测 DO、ORP 和 pH,并根据参数的变化在一定的时间间隔取样测定 COD、氨氮、硝态氮、MLSS 等指标.各项水质指标的测定方法均根据国家环保局规定的标准方法<sup>[6]</sup>.



1. ORP 探头 2. DO 探头 3. pH 探头 4. 温度传感器 5. 排水口 6. 排泥管 7. 气体流量计 8. 曝气器 9. ORP 仪 10. 温控仪 11. DO 仪 12. pH 计 13. 搅拌器 14. 压缩空气

图 1 TSSBR 试验系统与控制示意图

Fig. 1 TSSBR experimental system

## 2 结果与分析

### 2.1 两段 SBR 系统的启动

两段 SBR 工艺是将传统 SBR 脱氮工艺的有机物降解和硝化反应两个过程分开,在不同的反应器内进行.传统 SBR 去除有机物和脱氮的整个反应过程中,无法通过在线监测 COD、氨氮和硝态氮浓度来确定反应进程,只能通过在线监测的一些控制参数间接判断反应进程.因此,研究传统 SBR 反应过程中 DO、ORP、pH 控制参数的变化规律,可以为两段 SBR 系统的启动和运行提供指导作用.

采用一个 SBR 反应器,一次性进水后开始曝气,去除 COD 和硝化反应.然后缺氧反硝化,最后沉淀、排水.在上述传统 SBR 脱氮工艺的一个反应周期,DO、ORP、pH 及各污染物浓度的典型变化如图 2 所示,原石化废水的 COD 浓度 500 mg/L,氨氮 60 mg/L,MLSS 浓度 3000 mg/L.

从图中可以看出,首先进行的是去除 COD 的反应,在降解 COD 的过程中,DO 趋于稳定,ORP 和 pH 缓慢上升.采用 SBR 工艺处理工业废水,当反应进行到一定程度时,即使延长曝气时间,有一少部分有机物也不能进一步被降解,这部分有机物称为该条件下难降解 COD 浓度.当 COD 达到难降解浓度,而硝化反应又没有开始时,DO 迅速大幅度升高(如图 2b 中的箭头 A),这是由于此时 COD 降解结束,耗氧速率迅速降低.之后继续曝气进入硝化反应阶段,DO 在较高值的基础上缓慢攀升.pH 值由于硝化反应消耗碱度而开始下降,pH 曲线上出现拐点(图

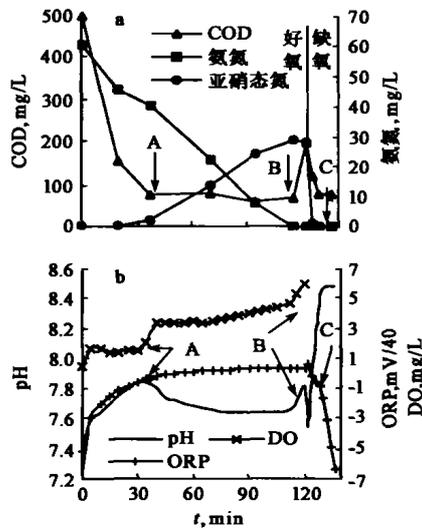
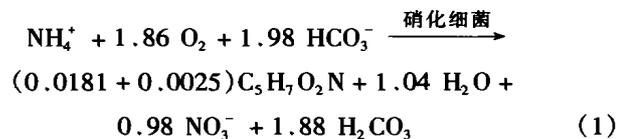


图2 传统 SBR 试验结果  
Fig.2 Experimental results in SBR

2b 中箭头 A 所示). 传统 SBR 反应器内 COD 降解与硝化反应在时间上的先后次序性, 以及 DO 控制参数在两阶段反应过渡期的迅速大幅度升高和 pH 曲线上拐点的出现, 使得两种反应分段独立进行, 培养各自独特的微生物群体成为可能.

根据传统 SBR 过程控制参数的变化特点, 在有机物降解过程中, 当 DO 迅速大幅度升高和 pH 曲线上出现拐点时, 结束此阶段(SBR1) 的反应, 静止沉淀后出水进入第二个反应器(SBR2). SBR1 出水的 COD 浓度较低, 氨氮浓度较高, 进入 SBR2 继续曝气, 延长反应时间, 创造有利于硝化菌生长的环境条件. 控制 SBR2 的温度在 28 ~ 32℃, DO 浓度 2 mg/L 以上. 根据公式(1)适当地调节 pH 值, 保证 SBR2 硝化反应所需的  $\text{HCO}_3^-$  碱度充足.



式中  $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$  为硝酸细菌和亚硝酸细菌的细胞. 每氧化 1 mg  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 需要消耗碱 7.07 mg (以  $\text{CaCO}_3$  计). 由于 SBR2 内 COD 浓度低, 污泥龄长, 可以满足硝化菌较长生长周期的要求. SBR2 硝化反应结束后停止曝气, 开始搅拌, 进入缺氧反硝化阶段. 根据公式(2)计算的反硝化碳源的量, 在反硝化开始时一次性投加原石化废水作为反硝化碳源<sup>[7]</sup>.

$$C_m = 2.86[\text{NO}_3^- - \text{N}] + 1.71[\text{NO}_2^- - \text{N}] + \text{DO} \quad (2)$$

式中  $C_m$  为需要的有机物量, mg/L;  $[\text{NO}_3^- - \text{N}]$  为硝态氮浓度, mg/L;  $[\text{NO}_2^- - \text{N}]$  为亚硝态氮浓度, mg/L; DO 为污水中溶解氧浓度, mg/L.

按上述方法培养驯化半个月, 在 SBR1 反应器内没有检测出硝态氮和亚硝态氮, 说明没有硝化反应发生, 主要是去除 COD. 这是由于在反应前期 COD 浓度较高, 增殖速率较高的异养菌迅速增殖, 抑制自养型硝化菌发挥作用, 硝化反应无法进行. 反应后期当 COD 降到较低水平或不再降解时, 及时停止曝气. SBR1 内原有的硝化菌也由于剩余污泥的大量排放而流失. SBR2 以脱氮为主, 同时也去除少部分 SBR1 难以降解的有机物, 进一步降低出水 COD 浓度. 两阶段反应成功的分割开来, 培养出各自独特的微生物群体, COD 降解速率和硝化反应速率明显提高. 在原水 COD 浓度 1150 mg/L, 氨氮 105 mg/L 的条件下, 采用两段 SBR 工艺后, COD 的比降解速率由传统 SBR 的 6.1 kg(COD)/(kg(MLSS)·d) 提高到 8.7 kg(COD)/(kg(MLSS)·d), 比硝化反应速率也由 0.19 kg( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )/(kg(MLSS)·d) 提高到 0.3 kg( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )/(kg(MLSS)·d).

## 2.2 两段 SBR 系统的过程控制

两段 SBR 系统成功启动后, 其有机物降解、硝化、反硝化的过程控制问题是两段 SBR 工艺能否推广应用的关键. 研究中发现 DO、ORP 和 pH 控制参数在 SBR1、SBR2 反应过程中独特的变化规律, 为两段 SBR 系统的过程控制提供可靠依据, 使系统能够长期稳定运行. DO、ORP、pH 及各污染物浓度在两段 SBR 反应过程中的典型变化如图 3, 图 4 所示, 原石化废水的 COD 1120 mg/L, 氨氮 113 mg/L, SBR1、SBR2 的 MLSS 均为 3000 mg/L, 水温 28 ~ 32℃.

SBR1 的试验结果如图 3 所示,氨氮浓度的降低是由于降解 COD 的异养菌同化作用的结果.因为 SBR1 反应器内始终没有检测到  $\text{NO}_2^-$ ,而且去除的  $\text{BOD}_5$  与减少的氨氮浓度的比例近似于 100:5. SBR1 内 COD 正常降解过程中,DO 趋于稳定.当 COD 达到难降解浓度时(图 3a 箭头 A 所示),微生物的耗氧速率迅速降低,使混合液的 DO 浓度迅速大幅度升高(图 3b 箭头 A 所示).ORP 在有机物降解过程中逐渐升高,这是还原态污染物氧化分解的结果.当 COD 降解结束时,DO 迅速大幅度升高引起 ORP 的相应变化.因此,COD 达到难降解浓度时,DO 与 ORP 迅速大幅度升高(图 3b 箭头 A)可以作为结束 SBR1 反应的控制信号,能够准确的标示出 SBR1 与 SBR2 在反应时间上的切换点.

SBR1 出水进入 SBR2 继续曝气,如图 4a 所示,在反应的前 30 min 内,COD 浓度进一步降低.对于 TSSBR,大部分易生物降解的低分子脂肪酸在 SBR1 内去除,使 SBR1 内的微生物容易出现“葡萄糖效应”<sup>[8]</sup>,即使延长曝气时间,剩余的少量难生物降解的有机底物的降解速率极慢,甚至不再被降解,使 SBR1 出水 COD 浓度较高,有时达不到排放标准.而 SBR2 内的异养菌不会产生“葡萄糖效应”.在 SBR2 较长时间的曝气过程中,异养菌只有少量难生物降解的有机底物可供利用.经过一段时间培养驯化,SBR2 内的异养菌适应于难降解的底物.由于这部分底物浓度较低,并不影响硝化反应的进行,因此,SBR2 的曝气过程中,在硝化菌进行硝化反应的同时,异养菌又可利用少量的难降解底物,使最终出水的 COD 浓度较低.SBR2 曝气过程主要进行硝化反应,如图 4b 所示,DO 在硝化过程中缓慢升高,这是由于随着氨氮浓度的减少,硝化反应速率与硝化菌的耗氧速率逐渐降低.当氨氮接近于 0 mg/L 时,DO 升高的速率和幅度增大(图 4b 中 B 点),表明硝化反应的结束.这是微生物进入内源呼吸期,耗氧速率突然降低的结果.pH 值在硝化过程中缓慢下降,在硝化结束时突然升高(图 4b 中 B 点).硝化反应由于消耗碱度,产生  $\text{H}^+$  而使 pH 值下降.当硝化反应结束时,不再消耗碱度,而且系统内有剩余碱度,继续曝气吹脱了  $\text{CO}_2$ ,使 pH 突然升高.因此,DO、pH 的突然升高可以作为 SBR2 硝化反应结束的控制信号.在传统 SBR 系统中,如图 2b 中 B 点所示,硝化反应结束时 DO 和 pH 也出现了类似现象.

SBR2 的硝化反应并不是设定固定的水力停留时间(HRT),而是根据原水氨氮浓度的变化在线控制反应时间.实际上,SBR2 内的硝化反应并没有彻底完成,氨氮被

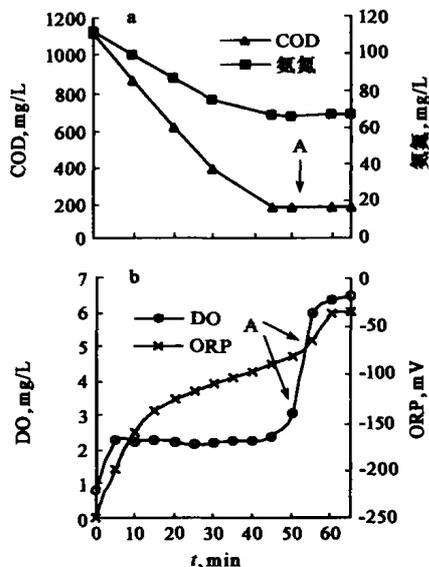


图 3 SBR1 内 COD、氨氮、DO、ORP 变化  
Fig.3 COD,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , DO, ORP in SBR1

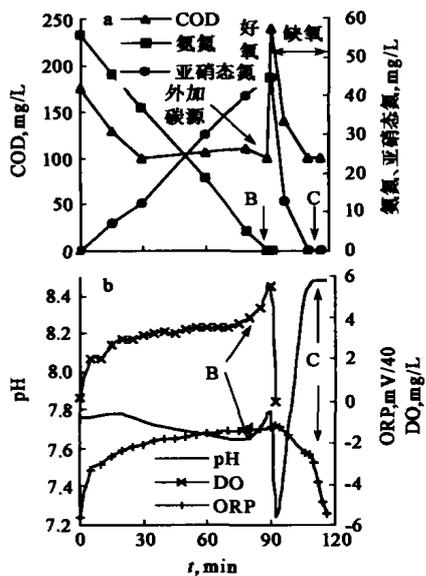


图 4 SBR2 试验结果  
Fig.4 Experimental results in SBR2

亚硝化菌氧化为亚硝态氮的过程已彻底完成,而亚硝态氮被硝酸菌氧化为硝态氮的过程并没有彻底完成.如果延长曝气时间,累积的亚硝酸盐必将被氧化为硝酸盐,在系统内培养出硝酸菌.因此,只有采取上述实时控制方法,及时结束 SBR2 的曝气过程,并将水温控制在 30℃ 左右,避免在系统内培养出硝酸菌.经过一个月的培养,亚硝化菌占绝对优势,SBR2 硝化反应过程中  $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NO}_2\text{-N}$  始终在 5% 以下,成功地将硝化反应控制在亚硝酸型硝化结束,实现了短程硝化反硝化.

SBR2 硝化反应结束后,就进入缺氧反硝化阶段,通入原污水作为反硝化碳源.如图 4 所示,在反硝化开始时,系统突然停止曝气,DO 迅速降为 0 mg/L,由好氧状态进入缺氧状态,使 ORP 突然大幅度下降;随着反硝化的进行,氧化态的硝态氮逐渐被还原为氮气,ORP 开始缓慢下降;当反硝化结束时,系统内不存在分子氧和  $\text{NO}_2^-$ ,微生物由缺氧呼吸状态进入厌氧状态,引起 ORP 又一次大幅度下降,使 ORP 曲线上出现拐点(图 4b 中的点 C),表明反硝化结束.反硝化产生碱度,pH 值在反硝化过程中持续升高.反硝化结束后,pH 趋于平稳.继续搅拌,一些兼性异养菌开始产酸发酵,pH 有下降的趋势.因此,pH 曲线上也出现拐点(图 4b 中的点 C),表明反硝化结束. ORP 和 pH 可以作为 SBR2 反硝化结束的控制信号.

### 3 结论

(1)根据传统 SBR 脱氮系统在反应过程中 DO、ORP 和 pH 的变化规律,当 COD 不再被降解,而硝化反应又没有开始时,DO 迅速大幅度升高以及 pH 曲线上出现的拐点,可将 COD 降解与硝化反应分割开,先后在不同的反应器内进行,避免高 COD 浓度对硝化反应的抑制,提高处理效率,尤其是提高硝化反应速率.

(2)通过 DO、ORP 和 pH 在两段 SBR 反应过程中的变化规律,可以控制有机物去除、硝化和反硝化各个阶段的反应时间,解决了两段 SBR 的自动控制问题,对于保证出水水质、节省能耗具有重要意义.采取实时控制策略,并控制水温 30℃ 左右,可将 SBR2 硝化反应控制在亚硝酸型硝化结束,实现短程硝化反硝化.

(3)在线实时控制 SBR1 和 SBR2 的反应时间,可以使去除有机物的异养菌和硝化菌存在于不同的反应器内,保证两段 SBR 系统长期稳定运行.如果 SBR1 反应时间控制不当,过长或过短,都将破坏两个反应器的微生物组成,使两段 SBR 脱氮工艺失去意义.

#### 参考文献:

- [1] Rodrigues Ana C, Antonio G Brio, Melo Luis F. Posttreatment of a brewery wastewater using a sequencing batch reactor[J]. Water Environment Research, 2001, 73(1): 45 ~ 51
- [2] Pierson John A, Pavlostathis Spyros G. Real-time monitoring and control of sequencing batch reactors for secondary treatment of a poultry processing wastewater[J]. Water Environment Research. 2000, 72(5): 585 ~ 592.
- [3] 曾薇,彭永臻,王淑莹,等.以溶解氧浓度作为 SBR 法模糊控制参数[J].中国给水排水,2000,16(4):6 ~ 10
- [4] Lefevre F, Audic J M, Bujon B. Automatic regulation of activated sludge aeration-single-tank nitrification-denitrification[J]. Wat Sci Tech, 1993, 28(10): 289 ~ 299
- [5] 彭永臻,王宝贞,王淑莹.活性污泥法的多变量最优控制 I.基础理论与 DO 浓度对运行费用的影响[J].环境科学学报.1998,18(1):11 ~ 19
- [6] 国家环保局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1989.246 ~ 286
- [7] 章非娟.生物脱氮技术[M].北京:中国环境科学出版社,1992.21
- [8] 彭永臻,高凯,余政哲.两段 SBR 法处理石油化工废水[J].给水排水.1996,22(6):26 ~ 28