

好氧/缺氧循环 SBR 工艺的脱氮研究

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: 当原水碱度不足时, 针对 SBR 工艺, 采用好氧/缺氧循环的运行方式进行脱氮性能及其过程控制的研究。结果表明, 通过在线监测 pH 值的变化可以判断硝化反应过程中碱度是否充足、氨氮是否全部被氧化, 相应的控制策略为: 如果好氧/缺氧的循环次数超过 2 次, 那么第一次硝化反应以 pH 值下降 0.4 ~ 0.5 来控制好氧时间, 中间的每一次硝化反应以 pH 值下降 0.8 ~ 1.0 来控制好氧时间, 最后一次硝化过程根据 DO 与 pH 值变化曲线上的跃升点控制反应时间; 每次的缺氧反硝化都根据 ORP 与 pH 值曲线上拐点的出现来控制缺氧时间。与传统运行方式相比, 采用好氧/缺氧循环运行方式及上述控制策略可使脱氮效率得到明显提高。

关键词: SBR; 好氧/缺氧循环; 脱氮; 控制策略

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2006)17-0034-04

Study of Alternating Aerobic/Anoxic SBR Process for Nitrogen Removal

ZENG Wei, PENG Yong-zhen, WANG Shu-ying

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Under deficient source water alkalinity, the capabilities and the procedure of the alternating aerobic/anoxic SBR process for nitrogen removal were studied. Results show that the online monitoring of pH variations during nitrification can indicate whether the alkalinity is sufficient and whether all ammonia is oxidized. If the alternating aerobic/anoxic cycles surpass more than 2 times, the reaction time of the first nitrification is controlled with pH fall of 0.4 - 0.5, the reaction time of each middle nitrification is controlled with pH fall of 0.8 - 1.0, and the reaction time of the last nitrification is controlled with the breakpoints on DO and pH profiles. Each anoxic duration for denitrification is controlled with the breakpoints on ORP and pH profiles. Compared to the conventional SBR process, the alternating aerobic/anoxic process based on the above control strategy can improve the nitrogen removal efficiency significantly.

Key words: SBR process; alternating aerobic/anoxic; nitrogen removal; control strategy

在污水的生物处理中, 为达到脱氮的目的将好氧/缺氧循环运行方式应用于连续流工艺的研究较多, 而应用于间歇式活性污泥法 (SBR 工艺) 的较少。对于 SBR 脱氮工艺, 传统的运行方式是进水后依次进行好氧硝化和缺氧反硝化, 其缺点是当原水

碱度不足时硝化反应易受到抑制, 导致出水氨氮浓度达不到排放标准。课题组的前期研究表明: 当原水碱度不足时, 好氧/缺氧循环的运行方式能最大限度地节省碱度投加量, 并可降低处理成本, 提高处理效率^[1]。但这种运行方式使处理过程的控制

变得复杂,因此重点研究了一些可以在线监测的参数(能对脱氮反应过程起指示作用的),以便为好氧/缺氧循环 SBR 脱氮工艺的应用提供技术支持。

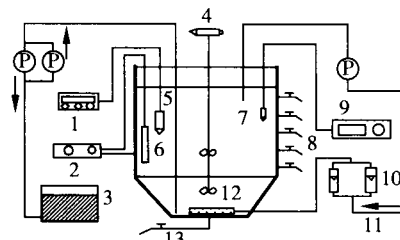
1 试验材料与方法

1.1 废水来源与接种污泥

采用某化工厂排放的废水作为原水,废水中含有乙酸、偏苯三酸及苯酚等多种有机化合物。由于试验重点研究的是脱氮性能,因此根据试验条件通过投加 NH_4Cl 等控制反应器进水氨氮浓度为 $50 \sim 150 \text{ mg/L}$, COD 为 $100 \sim 300 \text{ mg/L}$, 碱度(以 CaCO_3 计)为 $200 \sim 750 \text{ mg/L}$ 。接种污泥来自实验室培养的具有脱氮性能的污泥。

1.2 试验装置与分析方法

SBR 装置如图 1 所示。



1. ORP 测定仪 2. 温控仪 3. 污泥池 4. 搅拌器 5. ORP 传感器
6. 温度传感器 7. 溶解氧仪传感器 8. 排水口 9. 溶解氧仪
10. 转子流量计 11. 压缩空气 12. 曝气器 13. 排泥管

图 1 SBR 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of SBR experimental system

反应器的总有效容积为 38 L , 通过温控仪与加热器控制水温为 $28 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用鼓风曝气, 以空气流量计控制曝气量和 DO 浓度; 采取瞬间进水、限制曝气方式。对于好氧/缺氧循环运行方式, 进水后依次进行曝气、搅拌、再曝气、再搅拌、短时曝气吹脱氮气(3 min)、沉淀、排水; 对于传统运行方式, 进水后依次进行曝气、搅拌、短时曝气吹脱氮气(3 min)、沉淀、排水。周期内各个好氧、缺氧阶段的反应时间根据 DO、ORP、pH 参数的特征变化进行实时控制。

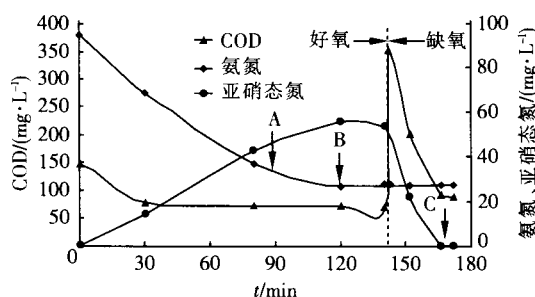
采用溶解氧仪与溶解氧探头在线检测 DO 值, 以 pH-3C 型精密酸度计和 E414-Q 型 ORP 复合电极在线检测 ORP。定期取样以标准方法测定氨氮、亚硝态氮、硝态氮、碱度(均以 CaCO_3 计)、COD 及 MLSS 等指标。

2 试验结果与分析

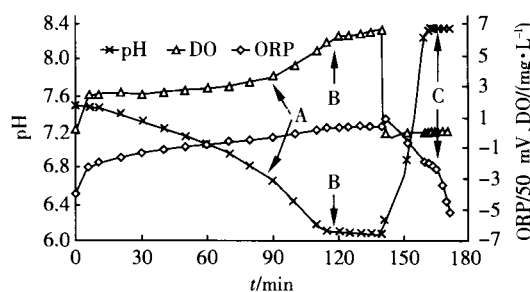
2.1 传统运行方式下的工艺性能及过程控制

试验方案: 原水 COD 浓度为 150 mg/L , 氨氮浓

度为 95 mg/L , 碱度为 450 mg/L ; MLSS 浓度为 $3000 \sim 3100 \text{ mg/L}$, 水温为 $28 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 硝化反应过程中的曝气量恒定在 $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 。在硝化过程中每氧化 1 mg/L 的氨氮为硝态氮要消耗 7.07 mg/L 的碱度, 因此去除原水中氨氮所需碱度的理论值为 672 mg/L , 而实际值为 450 mg/L , 可以判断原水碱度不足。原水进入 SBR 反应器后, 依次进行曝气(去除有机物及硝化)、搅拌(反硝化)、短时曝气吹脱氮气(3 min)、沉淀(0.5 h)和排水。结果如图 2 所示。



a. COD、氨氮、亚硝态氮浓度的变化



b. pH、DO、ORP 值的变化

图 2 传统运行方式下的试验结果

Fig. 2 Results of conventional SBR process

如图 2(a) 所示, 当硝化反应进行到第 120 min 时, 由于原水碱度不足硝化反应无法继续进行, 直到反应结束时氨氮始终维持在 27 mg/L 。将好氧硝化的 140 min 划分为 3 个时段进行讨论, 即 $0 \sim 90 \text{ min}$ (A 点之前)、 $90 \sim 120 \text{ min}$ (A 点与 B 点之间) 和 $120 \sim 140 \text{ min}$ (B 点之后)。由图 2(b) 可知, 第一时段碱度充足, 硝化反应快速进行, DO 浓度缓慢上升, 这是由于随着氨氮浓度的降低, 硝化反应速率和硝化菌的耗氧速率均逐渐减小。与此同时, pH 值因硝化反应消耗碱度、产生 H^+ 而缓慢下降。至第二时段系统中的碱度已降到 100 mg/L 以下, 从 A 点开始 DO 的上升速率和 pH 值的下降速率明显快于第一时段。这是由于碱度不足, 导致硝化反应速率和硝化菌的耗氧速率均快速下降, 同时碱度过低也使系统的缓冲能力变差。进入第三时段后碱度已完全

被耗尽, pH 降到最低值并趋于稳定, DO 浓度也逐渐稳定在一个较高的范围内。此时系统中仍剩余 27 mg/L 的氨氮, 即使继续曝气, 由于系统内没有碱度, 硝化反应也无法进行。在这种情况下, 或者停止曝气进行反硝化, 或者补充碱度促使硝化反应继续进行。综上所述, 在硝化过程中如出现 pH 值突然快速降至较低值并趋于稳定, 而 DO 值迅速升高并稳定在一个较高范围的情况, 则说明碱度不足, 可以停止曝气或是补充 HCO_3^- 碱度。ORP 在硝化反应过程中一直在缓慢升高, 对硝化反应过程的指示作用不是很明显, 因而无法单独作为控制参数。试验中在硝化反应停止后补充了碳源, 反硝化过程中 ORP 和 pH 值的变化规律与课题组的前期研究结果一致, 即 ORP 和 pH 变化曲线上的拐点 (C 点) 指示了反硝化过程的结束, 可以作为反硝化结束的实时控制信号^[2]。

2.2 好氧/缺氧循环下的工艺性能及过程控制

试验方案: 原水水质及试验条件与 2.1 节的完全相同, 只是采取了好氧 1、缺氧 1、好氧 2、缺氧 2 的循环运行方式。试验结果如图 3 所示。

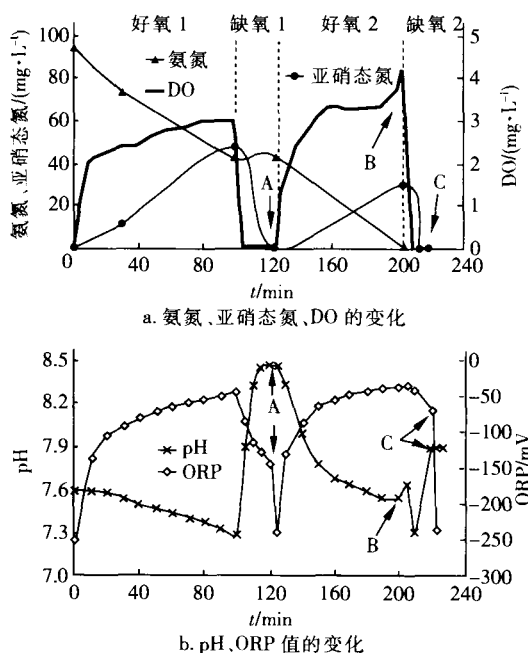


图 3 好氧/缺氧循环运行方式下的试验结果

Fig. 3 Results of alternating aerobic/anoxic process

从图 3 可以看出, 在缺氧 2 结束时氨氮、亚硝态氮浓度都降低到检出限以下, 出水水质较传统运行方式的有明显提高, 这主要是由于缺氧 1 阶段产生的碱度恰好可以被后续的好氧 2 阶段所利用, 从

而弥补了原水碱度不足的弊端。在前 100 min 即好氧 1 阶段, 氨氮浓度逐渐减少, 亚硝态氮浓度逐渐增加, DO 浓度与 ORP 缓慢升高, pH 值则缓慢下降。在第 100 min 时停止曝气并开始搅拌, 由于此时的混合液中还含有大量的氨氮 (44 mg/L), 因此在好氧 1 阶段结束前, DO 与 pH 值曲线上没有特征点出现, 只能人为地停止曝气, 开始缺氧 1 阶段的反硝化。反硝化开始后 DO 值迅速降为零, ORP 也快速下降, 反硝化产生的碱度使 pH 值快速升高。当好氧 1 阶段产生的亚硝态氮全部被还原时, ORP 迅速大幅度下降 (出现拐点 A), 同时 pH 值保持稳定, 指示反硝化结束。然后又开始曝气进入好氧 2 阶段, 直到氨氮全部被氧化。由于此前缺氧 2 的反硝化过程弥补了原水中碱度的不足, 因此在好氧 2 的硝化过程中, 当氨氮浓度降至零时混合液中仍有剩余碱度, 继续曝气会吹脱 CO_2 而引起 pH 值突然升高, DO 浓度也大幅度升高, 即 DO 与 pH 值曲线上同时出现跃升点 (图 3 中的 B 点), 指示氨氮已全部被氧化。比较图 2 与图 3 硝化过程中 pH 值的变化可以看出: 在传统运行方式下, 当硝化反应停止时系统中仍剩余大量氨氮, pH 则快速降低到最低值并趋于稳定; 而在好氧/缺氧循环的运行方式下, 好氧 2 阶段结束时氨氮已全部被氧化且系统中有剩余碱度, 此时 pH 值由前期的降低突然变为升高。因此, 通过 pH 值的特征变化不仅可以确定硝化反应的结束点, 还可以判断硝化反应过程中碱度是否充足以及氨氮是否全部被氧化。

试验中还发现, 与好氧 1 阶段的硝化反应相比, 在好氧 2 阶段的硝化过程中 pH 值下降的幅度明显加大 (两者的降幅分别为 0.3 和 0.9), 下降的速度明显加快, 这是由于好氧 2 阶段的 HCO_3^- 碱度比好氧 1 阶段的低。在缺氧 2 阶段的反硝化过程中, 当亚硝态氮浓度达到零时, ORP 与 pH 曲线上均出现拐点 C, 指示反硝化结束, 可停止搅拌, 至此好氧/缺氧循环的整个反应过程结束。上述 4 个反应阶段结束时的碱度情况见表 1。

综合上述分析, 由于在碳源充足时反硝化时间相对较短, 所以决定好氧/缺氧循环总反应时间的主要是硝化反应。每次的反硝化都是到亚硝态氮全部被还原后才停止搅拌, 因此无论好氧/缺氧循环几次, 每次的反硝化都可以根据 ORP 与 pH 曲线上拐点的出现来控制反硝化时间; 而对于硝化反应, 只有

最后一次是使氨氮全部被氧化,即 DO 与 pH 变化曲线上出现跃升,故可以根据跃升出现的时间控制最后一次硝化反应的时间。在此之前的硝化反应,可根据反应过程中 pH 值的下降幅度来控制反应时间:第一次硝化反应的 pH 值下降幅度可选择为 0.4~0.5,即硝化反应开始后,pH 值下降 0.4~0.5 时停止曝气,开始进行反硝化;如果好氧/缺氧的循环次数超过 2 次,由于中间每一次硝化反应的 pH 值下降速度都较大,因此 pH 值下降幅度可选择为 0.8~1.0,以此控制中间硝化反应的时间。

表 1 好氧/缺氧循环运行方式下的碱度变化

Tab. 1 Alkalinity variations in alternating aerobic/anoxic process $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	好氧 1	缺氧 1	好氧 2	缺氧 2
碱度	200	360	155	300

2.3 实时控制效果的验证

采用 COD 为 130 mg/L、氨氮为 65 mg/L 的原水验证控制策略的可靠性,结果如图 4 所示。

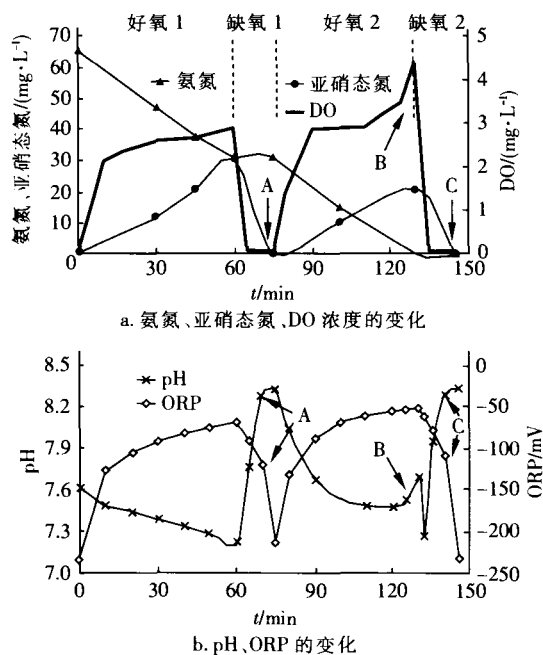


图 4 循环好氧/缺氧运行方式的实时控制

Fig. 4 Real-time control of alternating aerobic/anoxic process

在好氧 1 阶段,当 pH 值由 7.63 降至 7.23 时(下降 0.4)停止曝气,此时系统中剩余 30 mg/L 的氨氮;在缺氧 1 的反硝化过程中,当检测到 ORP 与

pH 值曲线上出现拐点 A 时停止搅拌,此时系统中的亚硝态氮浓度降低到检测水平以下;在好氧 2 的硝化过程中,当检测到 DO 与 pH 值曲线上出现拐点 B 时停止曝气,此时系统中的氨氮全部被氧化, pH 值下降了 0.85;在缺氧 2 的反硝化过程中,当检测到 ORP 与 pH 值曲线上出现拐点 C 时停止搅拌,此时系统出水中的氨氮、亚硝态氮浓度均降低到检出限以下。由此可见,采取这种实时控制策略可有效控制好氧/缺氧循环各个阶段的反应时间,并能保证脱氮效果良好。

3 结论

① 当原水碱度不足时, SBR 系统如采用传统的硝化反硝化运行方式,则硝化反应易受到抑制,出水氨氮浓度达不到排放标准,而采用好氧/缺氧循环的运行方式则可使脱氮效果得到显著提高。

② 好氧/缺氧循环 SBR 工艺可采用如下控制策略:最后一次硝化反应根据 DO 与 pH 变化曲线上的跃升点控制反应时间,在此之前的硝化反应则根据反应过程中 pH 值的下降幅度来控制反应时间,其中第一次硝化反应的 pH 值下降幅度选择为 0.4~0.5,即 pH 值下降 0.4~0.5 时停止曝气,开始进行反硝化;如果好氧/缺氧的循环次数超过 2 次,则选择 pH 值下降幅度为 0.8~1.0,据此控制中间每一次硝化反应的时间。对于反硝化而言,皆根据 ORP 与 pH 值曲线上拐点的出现来控制反硝化时间。

参考文献:

- [1] 曾薇,彭永臻,王淑莹. SBR 工艺交替硝化反硝化运行方式的可行性研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 576-580.
- [2] 曾薇,彭永臻,王淑莹. 以 DO、ORP、pH 作为两段 SBR 工艺的实时控制参数[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 252-256.

作者简介:曾薇(1974-),女,黑龙江哈尔滨人,博士、副教授,研究方向为污水生物处理及其过程控制。

电话:(010)67392627

E-mail: zengwei_1@263.net

收稿日期:2006-03-20