

以 pH 作为 SBR 法硝化过程模糊控制参数的基础研究*

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 为实现 SBR 法处理啤酒废水硝化时间的在线模糊控制,系统地研究了不同碱度类型和浓度对 SBR 法硝化过程中 pH 变化规律的影响,同时考察了 DO 和 ORP 的变化规律.结果表明,硝化过程中 pH 的变化可以分为下降型和上升型.下降型有 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 适量和不足两种情况. $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 适量时, pH 在硝化结束时由下降转为上升; $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 不足时, pH 在硝化结束时下降速率变小;根据 pH 这些变化特征控制硝化终点;下降型是最普遍的情形.上升型是 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 过分充足的情况,在硝化过程和硝化结束之间, pH 一直呈现上升趋势,不能根据 pH 的变化来控制硝化时间,若 φ (曝气量) 适宜,可以通过 DO 来判断硝化终点;上升型在实际中很少出现. pH 以上变化规律不仅可以判断硝化时间,还可以判断硝化反应过程中 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 充足与否.在此基础上,建立了 SBR 法硝化时间的模糊控制规则. 图 7 表 1 参 16

关键词 碱度;硝化; pH; DO; SBR; 模糊控制

CLC X703

USE OF pH AS FUZZY CONTROL PARAMETER
FOR NITRIFICATION IN SBR PROCESS*

GAO Jingfeng, PENG Yongzhen** & WANG Shuying

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

Abstract In order to achieve fuzzy control of nitrification in Sequencing Batch Reactor (SBR), brewery wastewater was used as the substrate. The effect of alkalinity on pH variation during nitrification was systematically studied, at the same time the variations of DO and ORP were investigated. According to the results, variation of pH could be divided into rising type and descending type. When $\rho(\text{HCO}_3^-)$ was deficient or sufficient, descending type happened. If $\rho(\text{HCO}_3^-)$ was deficient, the pH decreasing rate got slower when nitrification nearly stopped; if $\rho(\text{HCO}_3^-)$ was sufficient, at the end of nitrification pH turned from decrease to increase. This was the most common situation and pH could be used to control the end of nitrification. When $\rho(\text{HCO}_3^-)$ was excessive, rising type happened, pH was increasing at nearly a constant rate during and after nitrification and could not be used to control the nitrification time, but if the φ (aeration rate) was moderate DO could be used to control the nitrification time. This situation seldom happened. Therefore, the variation of pH could not only be used to control the nitrification time but also to judge whether $\rho(\text{HCO}_3^-)$ was enough or not. On the basis of this, the fuzzy controller of nitrification in SBR was constructed. Fig 7, Tab 1, Ref 16

Keywords alkalinity; nitrification; pH; DO; SBR; fuzzy control

CLC X703

SBR 法运行操作复杂,实现 SBR 法的自动控制是提高其运行效率的关键.应用数学模型进行控制因其许多过程控制参数都不能在线检测而难以付诸实践.一些研究者探索开发在线检测仪器实现对污水生物处理过程的自动控制^[1,2].大多数研究者使用 DO、ORP 和 pH 这些价格便宜、精度高、又便于与计算机接口的仪器来实现污水生物处理的自动控制. DO 只适用于在好氧条件下使用; ORP、pH 在好氧、缺氧、厌氧条件下都可以应用,例如,在生物脱氮反硝化过程中,反硝化结束时 ORP 出现“硝酸盐膝”, pH 出现“硝酸盐峰”^[3-6],并且当反硝化碳源不足时, pH 的上升速度还会明显下降,依此还可以调控碳源的投加^[7-9].对于硝化过程而言,切实有效地自动控制方法并不多,大多使用 ORP 的绝对值来实现控制^[10,11],但是由于影

响 ORP 绝对值的因素较多,依此来控制硝化过程的终点不够精确,而且对好氧过程曝气量的调控 ORP 不及 DO.此外,由于 pH 的变化直接与硝化、反硝化过程相关,因此,有研究者建议使用 pH 来控制污水脱氮除磷过程,但是不够系统^[12,13].针对污水生物处理过程具有多变量、时变性、非线性等特点.许多研究者将模糊控制应用于污水生物处理过程中^[14,15]. SBR 法的时间程序控制,存在极大的浪费,为实现 SBR 法硝化过程的模糊控制,达到节能和在线判断生化反应进程并及时停止反应的目的.本文系统详尽地研究了 SBR 法硝化过程中不同碱度类型和浓度对 pH 变化规律的影响,同时考察了 DO 和 ORP 的变化规律.

1 试验材料和方法

1.1 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,现用现配,投加 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 作为氮源、磷源,投加 NaHCO_3 或 NaOH 调整 pH 和碱度.除去污泥培养驯化,本试验历时 7 mo.

收稿日期: 2002-09-11 接受日期: 2002-12-02

* 国家自然科学基金重点项目 (No. 50138010)、北京市自然科学基金项目 (No. 8002005) Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50138010) and the Municipal Natural Science Foundation of Beijing, China (No. 8002005)

** 通讯作者 Corresponding author (E-mail: waterbrady@sohu.com; Tel: 010-67392627)

1.2 试验装置

试验用 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 φ (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, 使温度维持在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。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), 投加碳源并搅拌 (反硝化), 停止搅拌短时间曝气并吹脱 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。

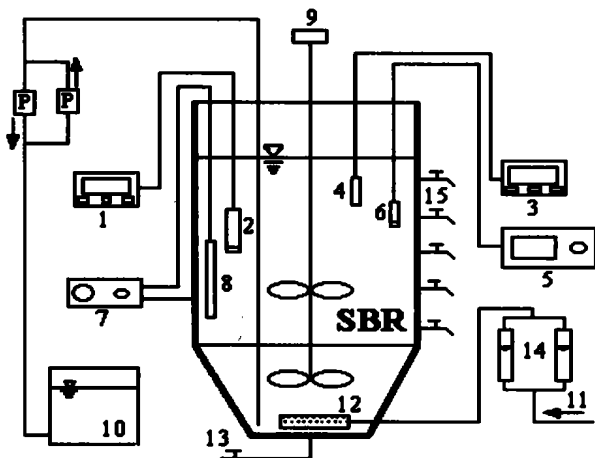


图 1 SBR 试验系统示意图
Fig 1 Schematic of the SBR system

1. ORP 测定仪 ORP meter; 2. ORP 传感器 ORP probe; 3. 酸度计 pH meter; 4. pH 传感器 pH probe; 5. DO 测定仪 DO meter; 6. DO 传感器 DO probe; 7. 温控仪 Temperature controller; 8. 温度传感器 Temperature probe; 9. 搅拌器 Mixer; 10. 污泥池 Sludge tank; 11. 压缩空气 Compressed air; 12. 曝气器 Diffuser; 13. 排泥管 Waste sludge; 14. 空气转子流量计 Air flow meter; 15. 排水口 Outlet.

1.3 检验分析项目

在线检测的项目有 DO、ORP、pH、温度。DO、温度: YSI MODEL 50B 溶解氧测定仪; pH: E201 型 pH 探头; ORP: E-414Q 型 ORP 探头; pH、ORP: PHS-3C 型精密酸度计。COD_{Cr}, MLSS, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P, 碱度按标准分析方法^[16]进行检验分析。

1.4 试验方案

为探求 SBR 法硝化过程的控制参数, 所有试验好氧过程中均维持 φ (曝气量) 恒定在 $0.8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; 使进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 分别维持在 60 mg L^{-1} 和 300 mg L^{-1} 左右; 投加同量的 KH_2PO_4 , 使 $\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$ 适量, 尽量减少好氧吸磷对参数变化的影响; $\rho(\text{MLSS})$ 维持在 4000 mg L^{-1} 左右。试验中对污水碱度和 pH 的调整有三种方法: 用 NaHCO_3 调整进行了 5 个水平; 用 NaOH 调整进行了 2 个水平; 原水不投加任何碱度作为一个方案单独进行。后两种试验条件下, 污水的 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 不足, 为了使试验具有可比性, 避免造成 NH_4^+-N 积累, 每个反应周期结束之后对剩余混合液都进行了淘洗。每个水平的试验都运行 15~20 个周期以上才进行 2~3 次跟踪检测。

2 结果和讨论

2.1 不同 NaHCO_3 投加量调整碱度时, 硝化过程中 pH、DO、ORP 的变化规律

此系列试验反应开始时混合液 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ (以 CaCO_3 计, 后同) 分别为 586 mg L^{-1} 、 1163 mg L^{-1} 、 1707 mg L^{-1} 、 3163 mg L^{-1} 、 5146 mg L^{-1} 。因为初始混合液 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 60 mg L^{-1} , 若不计去除有机物所需的 NH_4^+-N , 则硝化所需的 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 424 mg L^{-1} 。此系列试验初始的 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 分别为所需的 1.37 倍、2.74 倍、4.03 倍、7.46 倍和 12.1 倍。

2.1.1 初始混合液为 586 mg L^{-1} 此实验条件下 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为所需的 1.37 倍。试验结果见图 2。去除 COD 过程中, pH 不断大幅度上升; 当 COD 去除停止进入硝化阶段时, pH 曲线转而不断下降 (图 2a, 点 A), 硝化反应结束时 (图 2a, 点 B, 第 155 min), pH 会迅速上升, 依此可以判断硝化的终点。反硝化结束时, pH 曲线出现“硝酸盐峰” (图 2a, 点 C), 指示反硝化的结束。

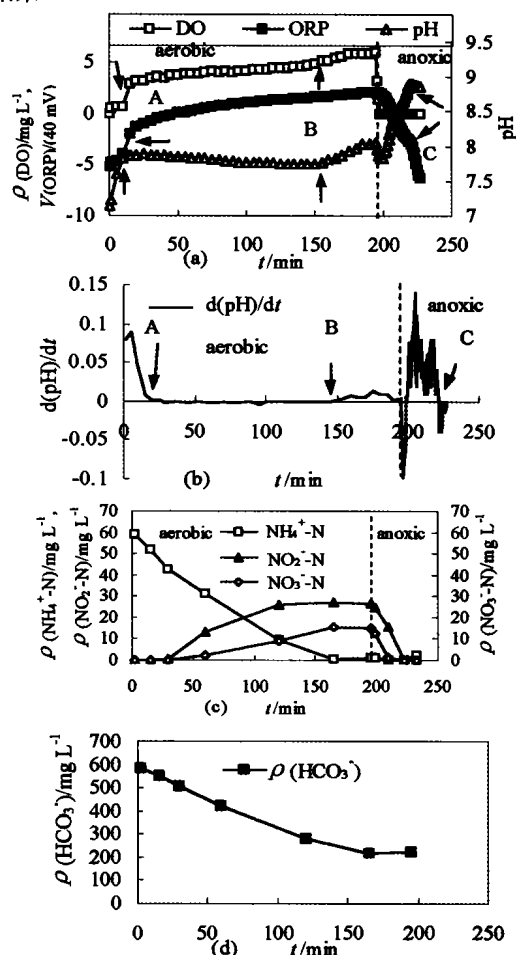


图 2 初始 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 586 mg L^{-1}
SBR 法脱氮过程一个反应周期跟踪检测结果
Fig 2 Track study results of nitrogen removal,
 $\rho_0(\text{HCO}_3^-) = 586 \text{ mg L}^{-1}$

(a): DO、ORP、pH 变化规律 Profiles of DO, ORP and pH; (b): $d(\text{pH})/dt$ 变化规律 $d(\text{pH})/dt$ profile; (c): NH_4^+-N , NO_2^--N , NO_3^--N 的变化规律 Dynamics of NH_4^+-N , NO_2^--N , NO_3^--N ; (d) 硝化过程中重碳酸盐碱度的变化规律 Dynamics of bicarbonate alkalinity during nitrification

在图 2b 中, $d(\text{pH})/dt$ 的变化曲线上同样展示了这几个特征点; COD 去除结束硝化反应开始时, $d(\text{pH})/dt$ 由正变负 (点 A); 硝化反应结束时, $d(\text{pH})/dt$ 由负变正 (点 B); 反硝化结束时, $d(\text{pH})/dt$ 由正变负 (点 C)。pH 的这些特征点可以用来控

制 SBR 法去除有机物和脱氮。硝化过程中 pH 的变化是曝气吹脱 CO_2 和硝化消耗 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 这两个因素共同作用的结果。在 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 足够且不是非常过量 (586 mg L^{-1} , 1.37 倍) 的情况下, 硝化反应产酸占主导地位, pH 在硝化过程中一直下降; 硝化反应结束时, 曝气吹脱 CO_2 占优势, pH 会突然上升, 指示硝化反应的结束。这种情况是实际处理中最普遍的。去除有机物过程中, $\rho(\text{DO})$ 出现平台, $V(\text{ORP})$ 缓慢上升。这是因为在恒定 φ (曝气量) 的条件下, 微生物降解有机物过程的 $\rho(\text{OUR})$ 基本不变。当 COD 去除至难降解部分时 (图 2a, 点 A; 第 25 min), 恒定供氧量的条件下, 供氧大大高于耗氧, $\rho(\text{DO})$ 突然迅速大幅上升, 对应着 $V(\text{ORP})$ 也大幅上升 (图 2a, 点 A)。在硝化过程中, $V(\text{ORP})$ 和 $\rho(\text{DO})$ 不断上升, 硝化反应结束时 (图 2a, 点 B; 第 150 min), $\rho(\text{DO})$ 上升的速率加快 (图 2a, 点 B), 最后出现平台, 依此可控制硝化终点; 与之相对应, $V(\text{ORP})$ 在第 180 min 出现平台 (图 2a, 点 B)。当反硝化结束时 (图 2a, 点 C), ORP 曲线出现“硝酸盐峰” (图 2a, 点 C), 此点可以作为反硝化结束的标志。ORP 在好氧、缺氧全过程都可以给出控制信息。而 DO 在缺、厌氧过程中无法给出任何过程信息。由图 2c 和图 2d 可知 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 的变化与 pH 和 DO 的特征点对应的很好。因此在这种 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 条件下, pH 和 DO 可以作为硝化时间的控制参数。有关不同碳源投加量、不同种类碳源、不同碳源投加方式对反硝化的影响以及 ORP 和 pH 的变化规律另有详述^[7-9]。

2.1.2 初始混合液 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 $1\ 163 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $1\ 707 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $3\ 163 \text{ mg L}^{-1}$ 和 $5\ 146 \text{ mg L}^{-1}$ 这些实验条件下, COD 去除结束以及反硝化结束时, pH、DO 和 ORP 的变化特征与前述相同, 不再赘述。这些试验在硝化阶段过程中, $V(\text{ORP})$ 都表现为缓慢上升, 最后达到平台, 不再赘述。进水 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 $1\ 163 \text{ mg L}^{-1}$ 的试验结果见图 3a。硝化过程中 pH 没有一直下降而是呈现缓慢地上升, $d(\text{pH})/dt$ 维持在 0.001 min^{-1} 左右, 当反应进行至第 140 min 时, pH 上升的速率加快, $d(\text{pH})/dt$ 在 0.006 min^{-1} 左右, 是硝化过程中的 6 倍, 依此上升速率的差别可以判断硝化过程结束与否。硝化过程中 $\rho(\text{DO})$ 的导数维持在 $0 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$ 左右; 当反应进行至第 140 min 时, $\rho(\text{DO})$ 上升速率开始加快, $\rho(\text{DO})$ 的导数达到 $0.02 \sim 0.046 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$, 依此特点可以判断硝化反应的终点。DO、pH 在此条件下仍可以作为 SBR 法硝化时间的控制参数。

进水 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 $1\ 707 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $3\ 163 \text{ mg L}^{-1}$ 的试验过程中 DO、ORP 和 pH 变化与进水 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 $1\ 163 \text{ mg L}^{-1}$ 的试验结果类似。只是 DO、ORP 和 pH 的特征点都有不同程度的提前, 并且硝化反应结束时 pH 上升速率的差别越来越小。进水 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 $5\ 146 \text{ mg L}^{-1}$ 的试验结果见图 3b。随着进水 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 的增加 (2.74 倍、4.03 倍、7.46 倍) 在硝化反应过程中, 曝气吹脱 CO_2 使 pH 上升逐渐占主导地位, pH 不再下降, 而是逐渐由较平 (2.74 倍), 变得不断的上升, 并且上升的速率越来越快, 但是在硝化结束时, 还是会出现 pH 以更快的速率上升的现象, 仍可以指示硝化过程的终止。但是当进水 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 达到一定的程度时 (12.1 倍), 硝化过程和硝化结束之间在 pH 上表现不出任何信号, pH 只是一直以某一速率上升。这种情况下, pH 已经不能作为硝化过程的控制参数, 但是

由图 3b 可见, $\rho(\text{DO})$ 从第 150 min 开始上升的速率加快, DO 仍可以作为硝化时间的控制参数。因此只要 φ (曝气量) 不是过高, 而是处于适宜的水平, 仍可利用 DO 判断硝化的终点。

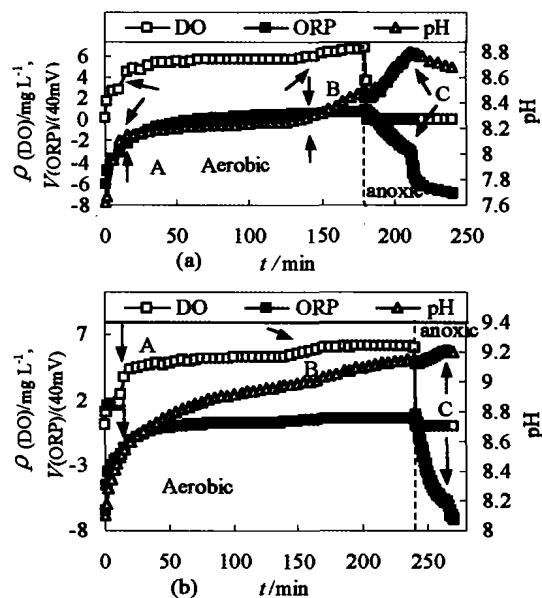


图3 初始 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 $1\ 163 \text{ mg L}^{-1}$ 和 $5\ 146 \text{ mg L}^{-1}$, SBR 法一个反应周期内 DO、pH、ORP 的变化规律

Fig 3 Profiles of DO, ORP and pH of nitrogen removal in SBR process

(a): $\rho_0(\text{HCO}_3^-) = 1\ 163 \text{ mg L}^{-1}$; (b): $\rho_0(\text{HCO}_3^-) = 5\ 146 \text{ mg L}^{-1}$

2.2 原水不投加任何物质调整碱度时, 硝化过程中 pH、DO、ORP 的变化规律

试验结果见图 4。pH 在好氧硝化开始之后, 一直下降, $d(\text{pH})/dt$ 的平均值在 -0.010 min^{-1} , 但是在第 120 min 之后, $d(\text{pH})/dt$ 在 $-0.003 \sim 0 \text{ min}^{-1}$, 从 pH 的变化曲线可以清晰的辨识 pH 下降速率变缓。图 4b 表明在第 120 min 之后硝化反应基本不再进行。在整个硝化过程中, pH 的范围在 $5.75 \sim 7.13$, 在正常范围 $7.5 \sim 8.6$ 之外。以上结果说明在不投加任何物质调整原水碱度和 pH 的情况下, 如果原水本身的 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 不足, 以及硝化过程中 pH 不断下降, 两者共同导致硝化速率较低、硝化反应无法进行完全, 并且最后会剩余一定量的 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 无法利用。因此在硝化反应初期, pH 值以较快的速率下降, 在硝化反应的后期, pH 下降速率明显变慢。pH 的这种变化一方面指示出硝化反应的终点, 另一方面也说明 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 不足, 应该及时补充, 促进硝化反应进行彻底。

由图 4a 可见, $\rho(\text{DO})$ 在硝化过程中不断地上升, 从第 100 min 以后 $\rho(\text{DO})$ 的导数就一直维持在 $0 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$ 左右, $\rho(\text{DO})$ 在硝化基本停止时没有跃升或者以较快的斜率上升, 而是呈现为一个平台, 这是因为硝化细菌由于 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 不足以及 pH 下降的较低而活性减弱, 呼吸速率较小, 供氧与耗氧达到平衡的原因, $\rho(\text{DO})$ 的平台可以指示硝化反应已经停止。 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 不足的情况下, 硝化结束时, 这 3 个参数的特征点比较模糊, 并且存在提前或滞后, 虽然这不利于传统的自动控制,

但是这正适合于用模糊控制来实现对反应过程的控制。

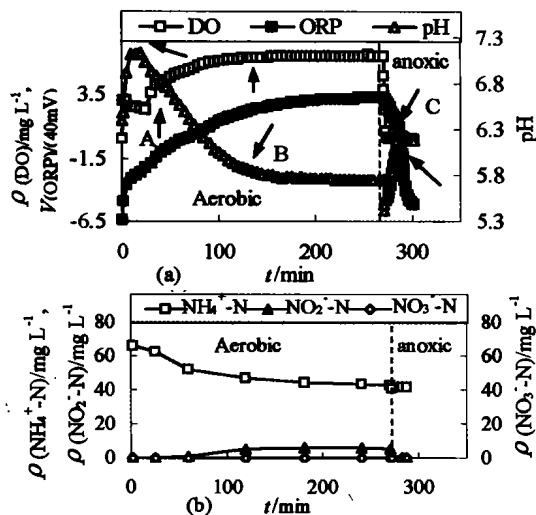


图4 原水碱度不投加任何物质进行调节, SBR法脱氮过程一个反应周期跟踪检测结果

Fig 4 Track study results without adjusting alkalinity (a): DO, ORP, pH 的变化规律 Profiles of DO, ORP and pH; (b): NH_4^+-N , NO_2^--N , NO_3^--N 的变化规律 dynamics of NH_4^+-N , NO_2^--N , NO_3^--N

2.3 投加 NaOH 调整碱度, 硝化过程中 pH、DO、ORP 的变化规律

反应开始时混合液中的 pH 分别为 7.68 和 9.01。试验结果见图 5。结果表明, 试验过程中 DO、ORP 的变化规律与不投加任何物质调整污水碱度的情形类似, 唯一不同的是 pH 在去除有机物的过程中, 没有上升, 而是不断地下降。并且 DO 和 pH 的特征点都滞后 40~60 min。为了使 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 增加, 加大了 NaOH 的投加量, 使得反应初始混合液的 pH 为 9.01。但从图 5(b) 中发现 仍然不足, 因此以 NaOH 调节原水碱度和 pH 的试验只进行了这两个水平。

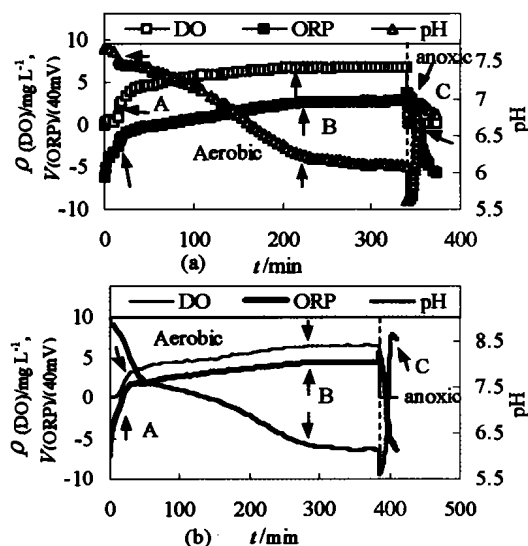


图5 初始 pH 为 7.68 和 9.01, SBR 法一个反应周期内 DO、pH、ORP 的变化规律

Fig 5 Profiles of DO, ORP and pH of nitrogen removal in SBR process (a): $\text{pH}_0 = 7.68$ (b): $\text{pH}_0 = 9.01$

根据以上试验结果可以将硝化过程分为下降型和上升型。下降型分为 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 足够和不足两种情况, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 足够型可以用 pH 来判断终点, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 不足型, 可以用 pH 来判断 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 是否充足并补充之。这是最普遍的情形。上升型是 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 过分充足的情况, 不能用 pH 来判断终点, 但是只要维持合适的 φ (曝气量), 利用 DO 仍然可以判断硝化的终点; 上升型在实际中发生的很少。应用 pH 在硝化反应过程中的变化规律, 不仅可以预测和控制硝化时间, 还可以判断污水中 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 充足与否。DO 是曝气量即能耗的指标, 也可以作为过程控制变量; 可以联合 DO 和 pH 来进行反应时间、曝气量、碱度的控制。

模糊控制理论的核心是建立模糊控制器, 而模糊控制规则又是模糊控制器的核心。在对大量有效数据进行整理的基础上, 选择 $d(\text{pH})/dt$ (用 CE_{pH} 表示), T_{pH} (pH 下降速率变缓至硝化停止这段时间) 作为输入变量, 输出变量为曝气量 U_A 。模糊控制器包括输入变量的模糊化、确定各逻辑变量的隶属函数、建立模糊控制规则和输出变量的反模糊化。对控制硝化时间而言, 当重碳酸盐碱度充足但不过量时, 模糊控制规则为: IF (如果) CE_{pH} 从 Negative (N) 转变为 Positive (P), THEN (那么), 停止曝气; IF CE_{pH} 从 Negative 转变为 zero, 并且 T_{pH} 为 Positive Big (正大), THEN 停止曝气。关于应用 pH 和 DO 作为 SBR 法硝化时间和曝气量的模糊控制参数详见 [7]。

2.4 pH、碱度、硝化速率之间的关系

表 1 为本文所有试验硝化反应过程中 pH 的变化范围以及 NH_4^+-N 去除率、硝化速率。对本试验废水而言, 用 NaHCO_3 调节碱度比用 NaOH 调节碱度更有利于硝化反应的进行, 当然对于 $\text{pH} = 2 \sim 3$ 的废水, 还是得先用强碱进行调节, 然后再用 NaHCO_3 或 Na_2CO_3 将 pH 调节至适宜的范围。图 6、7 为 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 和反应过程 pH (用 NaHCO_3 调整 pH 的试验) 对硝化反应速率的影响。由此可以看出 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 1707 mg L^{-1} (为所需量的 4.03 倍), 反应过程中平均 pH 为 8.37 时, 硝化反应速率最快。并且只要 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 充足, NH_4^+-N 去除率都在 98% 以上, pH 对 NH_4^+-N 去除率的影响不大。

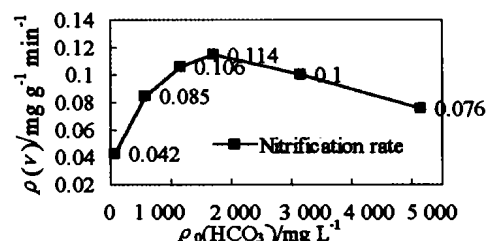


图6 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 对硝化速率的影响

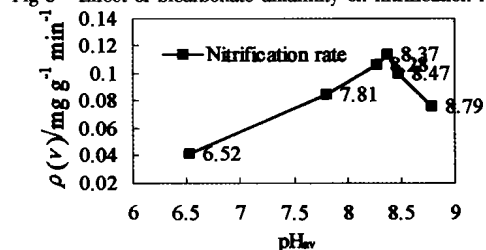


图7 pH 对硝化速率的影响 [$\rho(\text{HCO}_3^-)$ 充足]
Fig 7 Effect of pH on nitrification rate when $\rho(\text{HCO}_3^-)$ was sufficient

表 1 不同碱度类型及含量条件下,硝化反应过程中 pH 的变化

Tab 1 Dynamics of pH during nitrification in SBR process under different patterns and different quantities of alkalinity

调节方式 Adjusting method	$\rho_0(\text{HCO}_3^-)$ /mg L ⁻¹	pH ₀ Initial pH of aerobic reaction	硝化过程的 pH Range of pH during nitrification	pH _{av} Average pH during nitrification	pH _{end} pH at the end of nitrification	氨氮去除率 Efficiency of ammonia removal ($R_d/\%$)	硝化速率* Nitrification rate $\rho(v)/\text{mg g}^{-1}$ min^{-1}
不调节 Without	75.7	6.4	7.13 ~ 5.9	6.52	5.9 ~ 5.75	33.3	0.042
NaHCO ₃	586	7.15	7.87 ~ 7.75	7.81	7.77 ~ 8.05	98.5	0.085
	1 163	7.62	8.11 ~ 8.28	8.28	8.31 ~ 8.52	99.2	0.106
	1 707	7.66	8.26 ~ 8.48	8.37	8.50 ~ 8.79	99.1	0.114
	3 163	7.84	8.29 ~ 8.65	8.47	8.65 ~ 8.74	99.5	0.100
	5 146	8.11	8.52 ~ 9.06	8.79	9.06 ~ 9.15	99.3	0.076
NaOH	183	7.67	7.47 ~ 6.18	6.83	6.19 ~ 6.09	59.0	0.040
	96	9.01	8.51 ~ 6.29	7.40	6.26 ~ 6.07	85.3	0.044

* 硝化速率:指单位质量的微生物在单位时间内所去除的氨氮量

一般关于污水生物脱氮的论著上谈到硝化细菌正常生长的 pH 范围时,都没有谈及这种 pH 的污水其碱度组成如何,通过本试验研究可以看出,在谈及 pH 对硝化反应速率的影响时,必须同时提供污水中碱度的组成,而不能简单地谈论 pH 对硝化反应速率或硝化细菌的增长速率有什么影响,否则都是以偏概全的。

3 结论

通过试验,本研究提出了可以将 SBR 法硝化过程中 pH 的变化分为下降型和上升型。下降型是 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 适量和不足两种情况, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 适量时,硝化结束时, pH 会快速上升; $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 不足时,硝化结束时, pH 下降速度明显变缓;下降型可以用 pH 来判断终点。上升型是 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 过分充足的情况,硝化过程和硝化结束之间 pH 一直在上升,不能用 pH 的变化来判断终点,但是如果 φ (曝气量)适宜可以通过 DO 来判断硝化终点。

pH 在硝化过程中的变化规律不仅可以控制硝化过程,还可以判断硝化反应过程中 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 是否充足。DO 可以用来模糊调控曝气量和硝化反应时间。

$\rho(\text{HCO}_3^-)$ 充足的条件下, $\text{pH} = 8.37$ [$\rho(\text{HCO}_3^-)$ 为 $1\ 707\ \text{mg L}^{-1}$] 时,硝化速率最大。在论及 pH 对硝化反应的影响时,一定要同时说明污水中碱度的组成,单纯讨论 pH 对硝化的影响是片面的。在某种程度上,碱度对硝化速率的影响更重要。

References

- Ingildsen P, Olsson G. Exploiting online in-situ ammonium, nitrate and phosphate sensors in full-scale wastewater plant operation. *Water Sci & Technol*, 2002, 46(4~5): 139~147
- Olsson G, Newell B. Wastewater Treatment Systems: Modeling, Diagnosis and Control. London: IWA Publishing, 1999
- Wareham DG, Hall KJ, Mavinic DS. Real-time control of aerobic-anoxic sludge digestion using ORP. *J Environ Eng*, 1993, 119(1): 120~136
- Paul E, Plisson-Saune S, Mauret M, Cantet J. Process state evaluation

of alternating oxic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO. *Water Sci & Technol*, 1998, 38(3): 299~306

- Cho BC, Liaw SL, Chang CN, Yu RF, Yang SJ, Chiou BR. Development of a real-time control strategy with artificial neural network for automatic control of a continuous-flow sequencing batch reactor. *Water Sci & Technol*, 2001, 44(1): 95~104
- Gao JF(高景峰), Peng YZ(彭永臻), Wang SY(王淑莹), Sui MH(隋铭皓). Control of nitrogen removal in SBR process by controlling DO, ORP, and pH. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(4): 6~11
- 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: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001
- Gao JF(高景峰), Peng YZ(彭永臻), Wang SY(王淑莹). Characters of fuzzy control parameters pH and ORP of denitrification in SBR Process. *Chin J Environ Sci*, 2002, 23(1): 39~44
- Peng YZ, Gao JF, Wang SY, Sui MH. Use pH and ORP as fuzzy control parameters of denitrification in SBR process. *Water Sci & Technol*, 2002, 46(4~5): 131~137
- Charpentier J, Florentz M, David G. Oxidation-reduction potential regulation: a way to optimize pollution removal and energy savings in the low load activated sludge process. *Water Sci & Technol*, 1987, 19: 645~655
- Tomlins Z, Thomas M, Keller J, Audic JM, Urbain V. Nitrogen removal in a SBR using the OGAR process control system. *Water Sci & Technol*, 2002, 46(4~5): 125~130
- Al-Ghusain IA, Hao OJ. Use of pH as control parameter for aerobic/anoxic sludge digestion. *J Environ Eng*, 1995, 121(3): 225~235
- Chang CH, Hao OJ. Sequencing batch reactor system for nutrient removal: ORP and pH profiles. *J Chem Technol & Biotechnol*, 1996, 67(1): 27~38
- Fu CS, Poch M. Fuzzy model and decision of COD control for an activated sludge process. *Fuzzy Sets & Systems*, 1998, 93: 281~292
- Tong RM, Beck MB, Latten A. Fuzzy control of the activated sludge wastewater treatment process. *Automatica*, 1980, 16(6): 695~701
- 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会编著. 水和废水监测分析方法. 第 3 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989