

排出厌氧富磷污水生物化学除磷脱氮 ERP-SBR 系统研究

吉芳英, 罗固源

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: ERP-SBR 工艺采用循环污泥技术借助化学方法固定厌氧富磷污水中的磷酸盐, 将排除活性污泥的传统生物除磷模式变为排除富磷污水, 消除了生物除磷脱氮过程中控制污泥龄时存在的矛盾, 使生物除磷脱氮系统可以在较长污泥龄条件下获得优异的同时除磷脱氮效果。试验结果表明当 SRT 为 50~80d、进水 TN 为 28.6~58.3mg/L、TP=5.5~13.25mg/L 时, ERP-SBR 处理出水 COD < 34mg/L、TN < 6.02mg/L、 PO_4^{3-} < 0.23mg/L, 富磷污水化学固磷所需药剂用量为传统化学除磷法的 5%, 所得化学污泥含磷量为 12~15%, 可实现磷资源的回收。

关键词: 生物处理; 循环污泥; 除磷脱氮; 同时硝化反硝化; 厌氧富磷污水

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

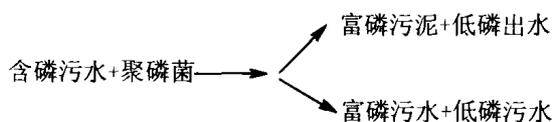
文章编号: 1000-3770(2005)01-0057-05

传统生物除磷技术是通过排除富磷污泥的方式来实现污水中磷的有效去除, 除磷效果和富磷污泥含磷率以及排放量有关, 短的污泥龄被认为是保证系统具有良好除磷效果的前提^[1]。实质上在聚磷菌的作用下磷酸盐可以富积在厌氧污水中, 用化学方法固定厌氧富磷污水中的磷酸盐从理论上讲也可以实现污水处理系统磷的有效去除。本文对这种除磷新方法进行系统研究。

1 厌氧富磷污水生物化学除磷技术

1.1 理论基础

根据生物除磷理论, 在厌氧/好氧交替变化的环境中, 聚磷菌可以将污水中的磷酸盐分别富积在好氧污泥或厌氧污水中, 该过程可表示为:



1.2 ERP-SBR 生物除磷脱氮工艺

为了对厌氧富磷污水固磷除磷模式进行研究, 我们提出了 ERP-SBR 生物除磷新工艺^[2], 即好氧污

泥外循环 SBR (External recycle processes of aerobic sludge in the sequencing batch reactor system), 其试验装置和工艺流程见图 1。从图可以看出该系统包括了 3 个主要的反应器: SBR 主反应器、厌氧释磷池和化学除磷池。在运行过程中, SBR 主反应器采用传统的生物除磷脱氮工艺运行, 但在周期结束时排出部分吸磷污泥于厌氧释磷池强化释磷, 然后将释磷结束后的污泥再泵回 SBR 系统参与磷的好氧吸收过程, 同时将厌氧富磷上清液导入化学除磷池进行磷的化学固定, 除磷后的上清液汇入试验污水再进入 SBR 反应器去除 COD 和 NH_3-N 。

2 试验条件和试验方法

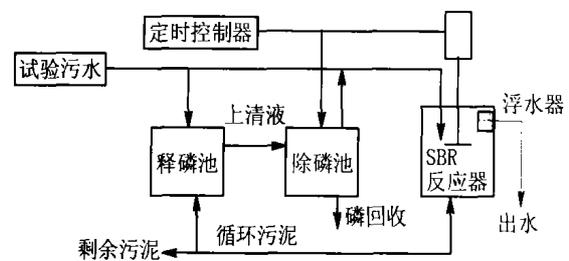


图 1 ERP-SBR 系统流程示意图

2.1 试验水质

ERP-SBR 系统采用学校校园生活污水作为试验研究用水,根据水质的具体情况分别加入淀粉、葡萄糖、奶粉以及 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 使其接近中等浓度城市污水水质的情况。试验阶段水质指标见表 1。

2.2 测试方法

表 1 试验污水水质

水质指标	COD(mg/L)	TN(mg/L)	$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	TP(mg/L)	pH(mg/L)	温度(°C)
变化范围	238~694	28.6~58.3	20.6~51.4	5.5~13.25	7~8	22~30

HACH-COD 测定仪(美国)测定 COD; YSI 5100 DO 测定仪(美国)测定耗氧速率 OUR 和 DO; $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 消解-抗坏血酸-钼酸铵比色法测定污泥的含磷率。

其他指标的测定参照《水和废水分析测试分析方法》(第三版)。

2.3 ERP-SBR 试验装置和运行工艺

ERP-SBR 系统试验装置及流程见图 1,其中主反应器 SBR 的有效容积为 18L,在反应过程中采用小砂头充氧曝气、机械方式搅拌,利用微电脑定时控制器实现曝气、搅拌以及沉淀过程的自动切换;释磷池有效容积为 3L,释磷过程在磁力搅拌器作用下进行;化学除磷池有效容积为 2L。

SBR 系统采用间歇进水、间歇排水方式运行,充水比为 0.61,反应周期 8h。运行工况:进水厌氧 2h→好氧 3h→缺氧搅拌 1.5h→后曝气 0.5h→沉淀排水和闲置 1h。在试验运行过程中每天只有两个周期进行好氧污泥外循环,循环污泥量为反应器固体总量的 1/16,加入释磷池的试验污水为 2L。排入化学除磷池的富磷上清液一般控制在 1.5~2L 范围内。

ERP-SBR 系统在运行过程中一直没有排泥,系统污泥的损失来自于指标的测试,预计系统 SRT 为 50~80d。稳定运行时系统污泥浓度保持在 6.5~7.5g/L,污泥负荷为 0.10~0.13kgCOD/kgMLSS·d。

3 试验结果分析与讨论

3.1 有机物 COD 的去除能力

SBR 反应器 COD 历时变化过程和 ERP-SBR 系统对 COD 的去除效果分别见图 2、图 3。

从图 2 可以看出约 68% 的 COD 在厌氧段被去除,尽管 ERP-SBR 系统 SRT 为 50~80d,但这一试验结果仍和常见的短污泥龄生物除磷工艺 COD 去除方式和去除能力一致^[3,4]。这些被去除的 COD 以 PHB 的形式储存在细胞内,在好氧呼吸和反硝化过程中被

进一步用作碳源。由图 3 可以看出 ERP-SBR 系统的 COD 具有较好的去除能力,在进水 COD 为 238~694mg/L (均值 459.3mg/L) 的情况下,出水 COD 始终 ≤ 34 mg/L (均值 22.0mg/L),COD 的平均去除率达到了 95.08%。

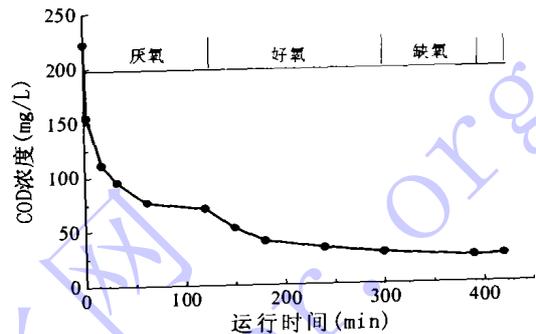


图 2 8h 周期系统 COD 历时变化曲线

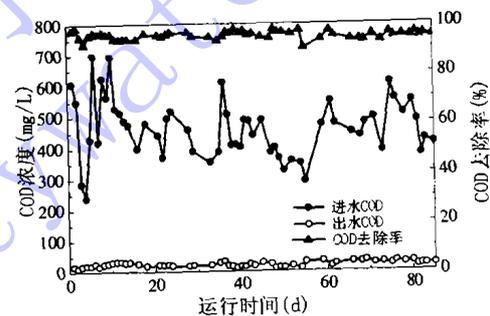


图 3 ERP-SBR 系统的 COD 去除效果

3.2 氮的转化和去除效果

DO 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 在运行过程中的周期变化规律以及 ERP-SBR 系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的去除效果分别见图 4、图 5。

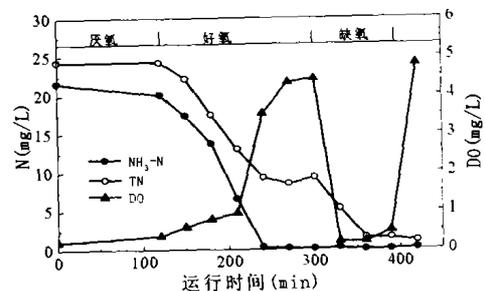


图 4 N 和 DO 的周期历时变化曲线

从图可以看出:(1)曝气初期 DO 随着曝气时间增加上升缓慢,曝气 90~120min 时 DO 仍然 < 1 mg/L,可以认为系统处于氧限制状态,而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度则

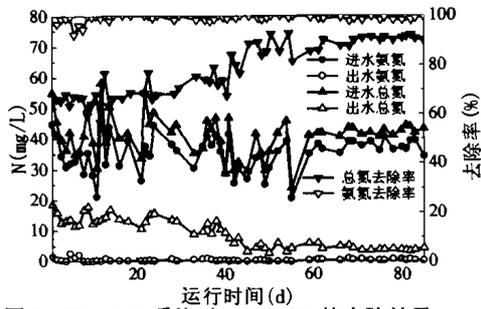


图5 ERP-SBR系统对NH₃-N、TN的去除效果

在这种氧限制状态下急剧下降直至趋近于零，此后DO才快速上升。(2)68%的总氮TN损失发生在好氧曝气阶段初期的氧限制时段，且随NH₃-N浓度下降同步进行，在NH₃-N浓度趋于零之后的继续曝气过程中TN处于相对稳定的状态。因此，ERP-SBR系统中存在明显的好氧反硝化现象。(3)缺氧阶段是保证良好总氮去除效果不可缺少的环节，从图5可以看出，没有设置缺氧段(0~34d)的ERP-SBR系统出水TN为8.67~18.5mg/L，TN平均去除率约68.3%；在设置1h缺氧段时(35~41d)系统出水TN=5.9~13.2mg/L，TN平均去除率约75.7%；当缺氧时间为1.5h时(41~85d)系统出水TN为1.06~6.02mg/L，平均值为3.98mg/L，平均去除率达到了89.8%。

3.3 磷的转化和去除效果

SBR主反应器厌氧释磷、好氧吸磷过程以及ERP-SBR系统对磷的去除效果分别见图6、图7。

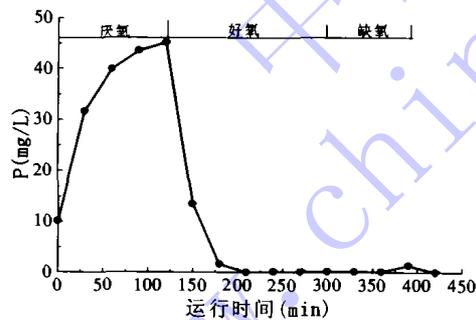


图6 厌氧释磷、好氧吸磷过程曲线

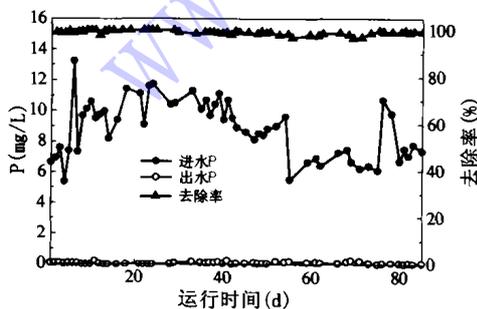


图7 ERP-SBR系统除磷效果

从图6可以看出经过1h厌氧释磷后磷的释放速率已明显减小，而在曝气初期尽管DO很低，但磷却以1mg/min速率急剧下降，吸磷速率达到了10.68~12.32 mg P/g VSS·h，明显高于传统好氧、缺氧的吸磷速率2.7~7.07 mg P/g VSS·h^[1]。试验发现ERP-SBR系统曝气1h时溶液中磷酸盐浓度已小于1mg/L，在后续曝气过程中几乎趋近于零。在为期三个月的稳定运行过程中，从图可以看出在进水PO₄³⁻为5.5~13.25mg/L的情况下，出水PO₄³⁻常趋近于零，最大值为0.23mg/L，平均值仅0.08mg/L，去除率达到了98.8%。

3.4 化学固磷过程

在化学除磷池中厌氧富磷污水和化学固磷剂石灰反应生成羟基磷灰石沉淀，在生成羟基磷灰石的同时伴生碳酸钙，固磷剂投加量取决于污水中磷酸盐和碳酸盐浓度(在城市污水中以污水碱度的形式表示，单位：mgCaO/L)。在对城市污水(即低磷污水)进行化学除磷时，通常认为固磷剂的投加量取决于污水碱度而不是磷酸盐浓度^[5]，药剂的有效利用率低、费用高，从而阻碍了化学除磷系统在实际工程中的应用。但在富磷污水的化学固磷过程中药剂利用率得到显著提高，试验结果见图8、图9。

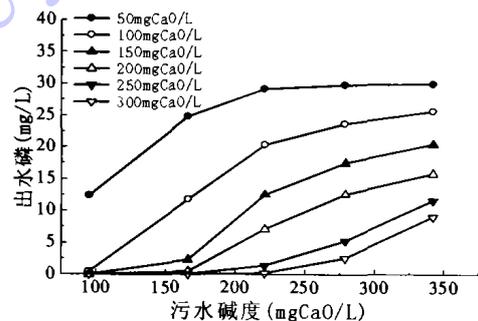


图8 污水碱度对厌氧富磷污水化学除磷的影响(厌氧富磷污水PO₄³⁻=52mgP/L)

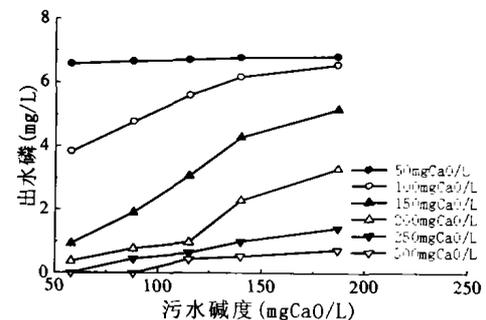


图9 污水碱度对低磷污水化学除磷的影响(低浓度含磷污水PO₄³⁻=7mgP/L)

从图8、图9可以看出：(1)当污水碱度不同时，

对同一浓度含磷污水欲达到相同的处理效果需要投加的石灰的量是不同的, 碱度越大需要量就越多。(2) 试验发现在厌氧富磷污水中, 投加低剂量石灰就可以产生明显的化学沉淀物, 在常规城市污水碱度条件下 (100~150mgCaO/L), 将富磷污水的磷从 52mg/L 降至 5mg/L 时, 每立方米富磷污水需投加 100~150g CaO, 若降至 0.5mg/L 时需 200~250g; 而用化学法直接将低磷污水降至 0.5mg/L 时, 由于过饱和作用的影响药剂投加量将进一步增加, 达到了 250~300g。(3) 通过对厌氧释磷过程的强化, 富磷污水除磷系统只需对部分厌氧污水 (约相当于污水总量的 10%) 实施化学固磷, 而且这部分污水固磷后尚需进入 SBR 系统参与生化反应过程, 因此可以将固磷后溶液中磷浓度控制在 5mg/L (不是 0.5mg/L) 左右, 这样可以减少固定单位磷需要化学药剂的量。因此, 按处理每立方米原污水计仅需 CaO 10~15g, 只相当于低磷污水化学除磷用药量的 5%。(4) 试验发现富磷污水化学固磷产生的纯化学污泥含 P 量高达 12%~15% (以 P₂O₅ 计为 28%~35%), 这种高含磷的纯化学污泥可直接作为磷资源加以回收利用。

4 ERP-SBR 系统影响因素分析

4.1 ERP-SBR 系统的好氧反硝化

在 ERP-SBR 系统中生物脱氮总量的 68% 是通过好氧反硝化方式进行的。试验发现提高曝气强度, 系统的好氧脱氮能力将迅速下降甚至消失, 控制曝气强度使 SBR 系统 DO 在曝气 1.5~2h 的时段内仍能小于 1mg/L 是获得理想好氧脱氮效果的关键。近年来大量的研究都证实了限氧状态有利于好氧反硝化过程的进行。Muller^[6] 认为在好氧反硝化菌作用下, NH₃-N 的好氧硝化和好氧反硝化是相伴发生的, 当 DO 高时硝化能力强, 产品主要为 NO₃-N, 当 DO 受限制时则生成更多的 N₂。目前好氧反硝化菌被认为是世代时间较长的一种自养微生物^[7], 通常存在于生物膜中。本研究表明 ERP-SBR 系统长的污泥龄、高的污泥浓度既有利于好氧反硝化菌的积累, 又有利于在曝气初期形成限氧状态。因此, 在悬浮活性污泥系统中也可以获得好的好氧反硝化效果, 结合图 6 还发现这种长污泥龄、低 DO 环境并不影响磷的好氧吸收。

4.2 化学除磷池固磷程度

ERP-SBR 系统通过化学固磷方式来实现污水处

理系统磷的有效去除, 固磷程度直接影响污水生物处理系统的代谢能力和除磷效果。过量固磷导致生物系统聚磷逐渐减少, 聚磷菌的贮能能力减弱、活性变差; 固磷过低则使生物系统聚磷逐渐增加, 致使吸磷平衡时污水中具有较高的磷酸盐浓度。为了保证生物活性, 在稳定运行过程中化学除磷池的固磷程度宜按磷的物料平衡式确定:

进水 = 出水 + 剩余污泥含磷 + 化学固磷

$$P = Q \cdot C_{T0} - Q \cdot C_{eff} - \frac{X \cdot Q \cdot C_s \times 10}{\theta_c \cdot \lambda \cdot n}$$

式中: P-周期化学固磷总量 g; C_{T0}、C_{eff}- 进出水总磷浓度 mg/L; C_s- 剩余污泥含磷%; Q-周期进水量 m³; X 污泥浓度 g/L; λ- 充水比; θ_c- 污泥龄 (d); n 每天运行周期数。

显然在 ERP-SBR 系统中通过剩余污泥排磷已显得不再重要, 因此可以通过提高系统污泥龄来获得更好的硝化反硝化效果。ERP-SBR 系统的试验结果表明在超长污泥龄系统 (SRT=50~80d) 中聚磷菌依然具有好的吸磷能力, 并有利于好氧反硝化过程的进行, 可以同时获得最佳除磷和脱氮效果。

4.3 厌氧释磷能力的强化

为了保持 ERP-SBR 系统磷的平衡, 排入化学除磷池的厌氧富磷污水的量随磷酸盐浓度的增加而减少, 因此提高污泥厌氧释磷能力可以降低系统的运行费用。通常认为厌氧释磷能力取决于食料(污水)的性质而不是厌氧状态的本身, 因此污水中低分子有机物的含量直接影响了富磷污水中磷酸盐的浓度, 如果污水具有较高浓度的低分子有机物, 那么在 SBR 反应器中就可以产生高浓度厌氧富磷污水, 此时可直接将部分厌氧富磷污水排入化学除磷池, 使运行变得简单。如果污水中低分子有机物浓度较低, 此时将部分好氧污泥循环至厌氧释磷池可以方便地通过投加富含低分子有机物的初沉污泥或者 HAc 实施部分污泥的强化厌氧释磷, 以保证需要进行化学处理的部分厌氧污水具有高的 PO₄³⁻ 浓度。

5 结论

ERP-SBR 系统采用厌氧富磷污水化学固磷技术替代传统的生物固磷除磷模式, 消除了生物除磷脱氮过程控制污泥龄时存在的矛盾。试验结果表明厌氧富磷污水化学固磷系统 SRT 为 50~80d、进水 TN 为 28.6mg/L、TP 为 5.5~13.25mg/L 时处理出水 TN ≤ 6.02mg/L、TP ≤ 0.23mg/L, 获得比一般生物除磷

脱氮系统更加优越的同时除磷脱氮效果。

ERP-SBR 系统特有的长污泥龄、高污泥浓度有利于形成低 DO 的限氧环境,当 SBR 反应器在曝气初期 1.5~2.0h 时段内 $DO \leq 1\text{mg/L}$ 时,系统中 68% 的氮将按照好氧反硝化的方式进行脱氮转化。

ERP-SBR 系统采用全部污泥厌氧和对部分污泥强化厌氧的操作方式,有利于提高需要进行化学固磷的厌氧富磷污水的磷酸盐浓度,同时全部污泥的厌氧/好氧历程强化了聚磷菌的活性和好氧吸磷能力,使 ERP-SBR 系统好氧吸磷速率高达 $10.68 \sim 12.32 \text{ mg P/gVSS}\cdot\text{h}$ 。

ERP-SBR 系统化学除磷药剂的用量仅为直接处理低磷污水药剂量的 5%,极大地提高了化学药剂的效率,且产生的化学污泥含磷量高达 12~15%,有利于磷的回收利用。

参考文献:

- [1] 郑兴灿,李亚新.污水除磷脱氮技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [2] 吉方英,罗固源,等.活性污泥外循环 SBR 系统的生物除磷能力中国给水排水,2002,18(5):1-5.
- [3] Fukase T, et al. The role of anaerobic stage on biological phosphorus removal[J]. Wat. Sci. Tech., 1985, 17: 69.
- [4] 刘延华,冯生华,等.厌氧-好氧活性污泥快速低耗氧去除 COD 的机理初探[J],给水排水,1997,23(6):12-15.
- [5] Henze M, Harrenmoes P, Jansen J L C, Arvin E. Wastewater Treatment / Biological and Chemical Processes[M]. 2nd Edition. New York: Springer, 1997.
- [6] 赵宗升,等.高浓度氨氮废水的高效生物脱氮途径[J].中国给水排水,2001,17(5):24-28.
- [7] M Strous, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. Microbial Biotechnol, 1998, 50(4): 549-596.

ERP-SBR BIO-CHEMICAL PROCESS FOR NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL BY DRAINING OUT ANAEROBIC RICH PHOSPHATE SUPERNATANT

Ji Fang-ying, Luo Gu-yuan

(Institute of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University Chongqing 400045, China)

Abstract: ERP-SBR process adopting the circulating sludge technique and chemical method was used for fixing phosphorus in anaerobic phosphorus-enriched sewage to change traditional biological mode of phosphorus removal for draining out active sludge into draining out phosphorus-enriched sewage, eliminate the contradiction existing in controlling sludge age in the course of biological phosphorus removal and de-nitrogen and make the system of biological phosphorus removal and de-nitrogen obtain excellent effect of concurrent phosphorus removal and de-nitrogen under the condition of longer sludge age. The experimental results showed that, when SRT was 50~80d, the influent water TN, 28.6~58.3mg/L, TP, 5.5~13.25mg/L, the effluent water's COD \leq 34mg/L, TN \leq 6.02mg/L and PO $_4^{3-}$ \leq 0.23mg/L; the usage of chemicals for chemically fixing phosphorus in phosphorus-enriched sewage was 5% of that for traditional chemical phosphorus removal; the phosphorus content of chemical sludge obtained was 12~15%, thus the reclamation of phosphorus resource can be realized.

Key words: biological process; external recycle; nitrogen and phosphorus removal; simultaneous nitrogen and phosphorus removal; anaerobic phosphate-richened supernatant

举办 2005 年全国《水处理技术培训班》的通知

中国海水淡化与水再利用学会和浙江省膜学会,将于 2005 年 4 月份在浙江省杭州市联合举办 2005 年全国《水处理技术培训班》。培训班聘请有扎实理论基础和实践经验的专家任教,讲授内容为膜法水处理技术,包括海水淡化、苦咸水脱盐、纯水制备等,学习时间 8 天。欢迎有关膜技术研究、产、应用、设计、管理等单位的人员参加学习,欲参加者请于 3 月 10 日前与学会秘书处报名联系。

联系地址: 杭州市文华路 50 号
电 话: 0571-88935348

中国海水淡化与水再利用学会秘书处
传 真: 0571-88935339

邮 编: 310012
联系人: 周晓定

中国海水淡化与水再利用学会 浙江省膜学会