

曝气量对 SBR 工艺同步脱氮除磷的影响研究

彭赵旭¹, 彭永臻², 吴昌永¹, 彭轶¹, 马斌¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 北京工业大学
环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘要: 为了达到同步脱氮除磷的目的, 采用 SBR 反应器处理模拟生活污水, 在厌氧/好氧/缺氧(AOA)的运行方式下, 研究了曝气量对系统脱氮除磷效果的影响。试验结果表明, 当曝气量为 28 L/h 时, 系统对氮、磷及 COD 的去除效果均较佳; 为避免发生二次释磷, 应使缺氧段末期的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度 $> 2.5 \text{ mg/L}$; 系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的冲击负荷有很好的抵抗能力; 采用 pH、ORP 对系统进行实时控制, 可获得较好的脱氮效果, 并降低了能耗。

关键词: SBR 工艺; 同步脱氮除磷; 曝气量; 实时控制

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2008)03-0013-04

Effect of Aeration Rate on Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal in SBR

PENG Zhao-xu¹, PENG Yong-zhen², WU Chang-yong¹, PENG Yi¹, MA Bin¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to realize simultaneous nitrogen and phosphorus removal, the sequencing batch reactor (SBR) was used to treat simulated domestic sewage. The effect of aeration rate on nitrogen and phosphorus removal was studied under the anaerobic, aerobic and anoxic modes. The results show that when the aeration rate is 28 L/h, the better removal effect of nitrogen, phosphorus and COD can be obtained. At the end of the anoxic stage, nitrate concentration should be more than 2.5 mg/L, otherwise the secondary phosphorus release phenomenon will occur. The system has a stronger resistance to ammonia nitrogen shock load. The real time control of the system is performed with pH and ORP, which can have better nitrogen removal effect and reduce energy consumption.

Key words: SBR process; simultaneous nitrogen and phosphorus removal; aeration rate; real time control

随着水体富营养化问题的日益突出以及污水排放标准的不不断提高, 脱氮除磷成为当前污水处理领域的研究热点。随着自控技术的飞速发展, SBR 工艺因其特有的优越性而得到越来越广泛的应用^[1,2]。笔者采用 SBR 工艺处理模拟生活污水, 考

察了曝气量对系统同步脱氮除磷效果的影响。

1 试验材料和方法

1.1 原水水质

模拟生活污水由葡萄糖、 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 和自来水配制而成, 通过投加 NaHCO_3 来补充进水碱度,

以满足硝化反应对碱度的要求;同时,还投加了 MgSO_4 和 CaCl_2 以满足微生物生长对 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的需求。模拟生活污水的水质见表1。

表1 模拟生活污水的水质

Tab. 1 Quality of simulated sewage

项目	范围	均值
pH	6.5 ~ 7.5	6.84
COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	176 ~ 369	276.39
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	32 ~ 69	45.97
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	4 ~ 14	9.27

1.2 试验装置和方法

SBR 装置如图1所示。

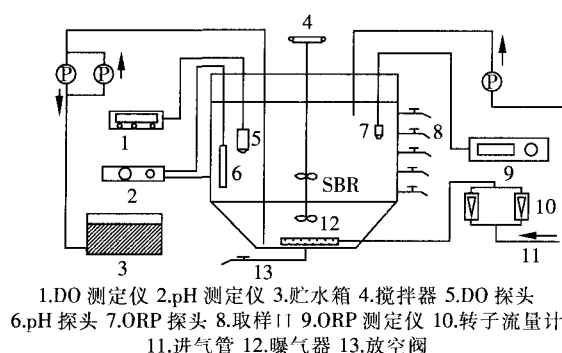


图1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

SBR 反应器由有机玻璃制成,上部为圆柱形,下部为圆台体,高为 700 mm,直径为 200 mm,总有效容积为 12 L,排水体积为 8 L,充水比为 0.75。沿垂直方向在反应器壁上设置一排间距为 10 cm 的取样口,于底部设放空管,用于放空和排泥。以曝气砂头作为微孔曝气器,由转子流量计调节曝气量。pH、DO、ORP 探头置于反应器内,在线监测各指标的变化。试验期间温度稳定在 20 ~ 25 °C 之间。SBR 反应器采用厌氧/好氧/缺氧(AOA)的运行方式,其中厌氧段用于释磷和吸收有机物,好氧段用于分解有机物、硝化和吸磷,缺氧段用于反硝化和进行部分吸磷,以期达到同步脱氮除磷的目的。SBR 反应器的运行周期为 8 h,具体工序为:瞬时进水、厌氧(2 h)、好氧(4 h)、缺氧(1.5 h,初期外加甲醇作碳源)、沉淀(0.5 h)和排水。在缺氧段末期排放一定体积的混合液,以控制系统的污泥龄在 15 ~ 20 d,MLSS 为 2 000 ~ 2 400 mg/L 。分别调节曝气量为 16、28 和 40 L/h,在各工况下均稳定运行约 20 d,研究曝气量对系统脱氮除磷效果的影响。

1.3 分析项目与方法

COD:5B-3 型 COD 快速测定仪; $\text{NO}_3^- - \text{N}$:麝香草酚分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$:N-(1-萘基)-乙二胺光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试剂分光光度法;MLSS、SS:滤纸称重法; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$:钼酸盐分光光度法;微生物相:OLYMPUS BX51/BX52 光学显微镜。

2 结果和分析

2.1 曝气量对硝化效果的影响

曝气量对氨氮去除效果的影响见图2。

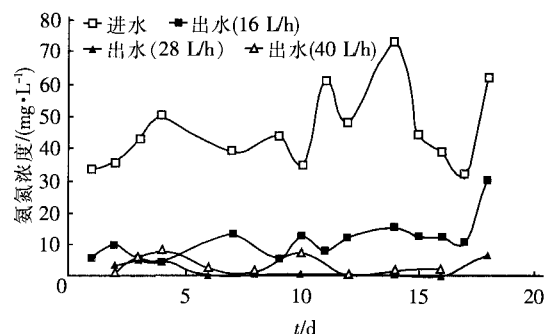


图2 对氨氮的去除效果随曝气量的变化

Fig. 2 Variation of ammonia nitrogen removal with aeration rate

经计算,在曝气量为 16、28 和 40 L/h 的条件下,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别为 75.33%、96.45% 和 95.59%。分析其原因,当曝气量为 16 L/h 时,好氧段的 DO 长期处于 2 mg/L 以下,较低的 DO 影响了系统的硝化效果;而当曝气量为 28 L/h 和 40 L/h 时,好氧段的 DO 长期处于 2.5 mg/L 以上,硝化反应进行得比较彻底。好氧段生成的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可在缺氧段被反硝化掉,甲醇投量可根据硝态氮浓度作适当改变,一般情况下投量宜控制在 0.3 ~ 0.6 mL。

2.2 曝气量对除磷效果的影响

曝气量对除磷效果的影响见图3。

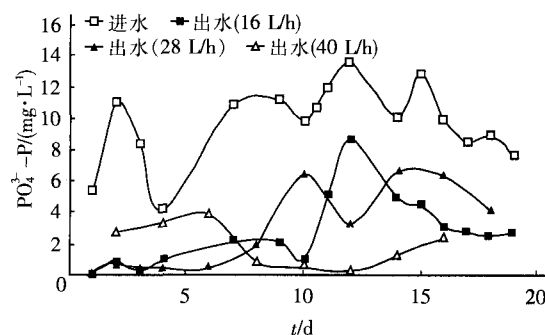


图3 除磷效果随曝气量的变化

Fig. 3 Variation of phosphorus removal with aeration rate

在曝气量为16、28和40 L/h的条件下,对磷的平均去除率分别为70.93%、78.81%和79.71%,表明曝气量对磷的去除率影响不大。试验中除磷率难以提高的原因是采用了葡萄糖作为碳源,原水在水箱中放置时存在酸化效应,致使其pH值仅为6.5~7,这抑制了厌氧释磷反应的进行,导致吸收有机物所需的能量主要由水解细胞内糖元来提供,这在一定程度上强化了聚糖菌(GAO)对聚磷菌(PAO)的竞争力^[3]。另外,原水的碳磷比偏低也是除磷率难以提高的重要原因。

2.3 曝气量对COD去除效果的影响

曝气量对去除COD的影响如图4所示。

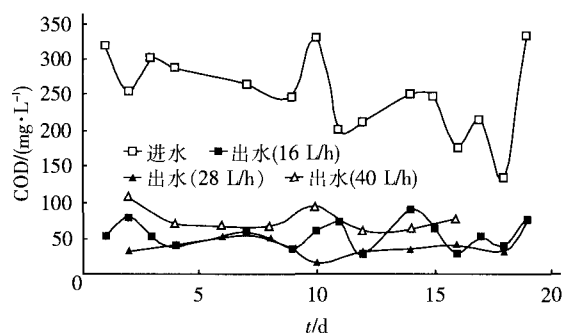


图4 对COD的去除效果随曝气量的变化

Fig. 4 Variation of COD removal with aeration rate

在曝气量为16、28和40 L/h的条件下,对COD的平均去除率分别为77.62%、80.88%和73.05%。从一个周期内系统中COD浓度的变化来看,COD的去除主要发生在进水后的较短时间内,去除的COD占COD总去除量的80%,这是因为经过闲置的活性污泥具有很强的吸附性能,因此曝气量对COD去除率的影响并不显著。在好氧段初期,曝气会冲刷掉吸附在活性污泥表面的部分COD,使COD有小幅度的短暂上升;随着曝气的进行,则COD逐渐降低。在缺氧段初期,外投碳源会使COD出现小幅上升。经计算,反硝化1 g $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 需要1.905 g的 CH_3OH ,为使反硝化能够顺利进行,本试验采用2.5 g来计算 CH_3OH 投量。好氧段结束后, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度一般在10 mg/L左右,因此缺氧段的 CH_3OH 投量约为0.3 mL。

综上所述,在曝气量为28 L/h的条件下,对氨氮、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和COD的去除率均较高。对微生物相的镜检结果显示,当曝气量为16 L/h时,活性污泥中含有少量的丝状菌,但是丝状菌的存在并没有影

响污泥的沉降性能,SVI一直保持在70~90 mL/g;当曝气量为28、40 L/h时,系统中存在轮虫等后生动物,说明出水水质良好。

2.4 ORP、pH的变化规律

典型周期内ORP、pH的变化情况如图5所示。

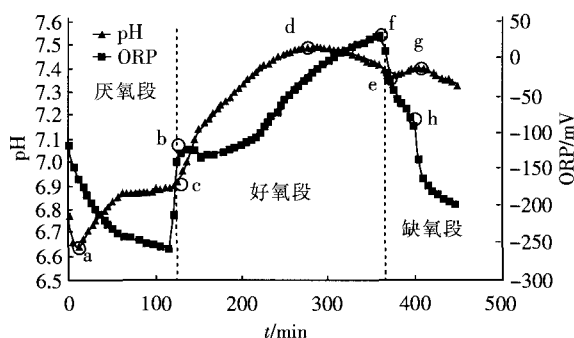


图5 典型周期内ORP、pH的变化

Fig. 5 Variation of ORP and pH in typical period

从图5可以看出,在厌氧段的初期pH值迅速下降,这是由于聚磷菌水解体内的聚磷化合物,释放了大量 H^+ 所致,另外微生物水解葡萄糖也会导致pH值下降,到a点时降至最低。由于活性污泥中存在大量的聚糖菌^[4],它们在厌氧条件下会大量吸收葡萄糖的水解产物——乳酸,所以厌氧段后期的pH值逐渐上升^[5]。由于不断生成还原态物质,所以厌氧段的ORP一直下降。进入好氧段后pH值逐渐升高,这是由于有机物被氧化以及曝气吹脱 CO_2 所致。与之相对应,由于水中的还原态物质不断被氧化,ORP也呈上升趋势。当水中的有机物浓度很低时,开始进行硝化反应,因硝化过程会消耗碱度,故pH值由上升转为下降(出现了拐点d)。随着硝化反应的进行,pH会出现反弹现象,预示着硝化反应的结束(如图5中的e点所示)。之后进入缺氧段,在缺氧段的初期pH值会有短暂的小幅下降,这主要是由于反应产生的 CO_2 无法从水中吹脱所致。外碳源的加入使得反硝化得以顺利进行。由于反硝化反应会生成碱度,故pH值不断上升。试验中发现,若缺氧段末期的硝态氮浓度 < 2.5 mg/L,则系统会发生二次释磷现象,由此导致pH值逐渐下降,出现了拐点g。与之相对应的是水中还原态物质迅速增多,在ORP曲线上出现了转折点h。

2.5 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 冲击负荷对系统硝化性能的影响

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 冲击负荷对系统硝化性能的影响如图6所示。

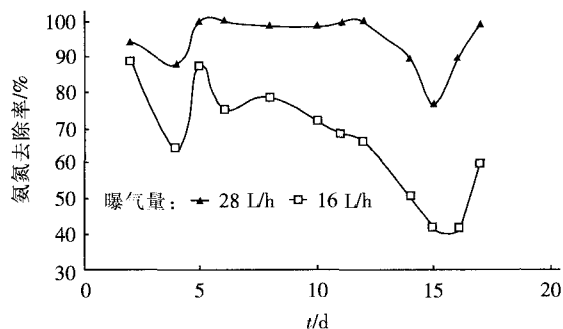


图6 氨氮负荷对其去除率的影响

Fig. 6 Influence of ammonia nitrogen loading on its removal rate

从图6可以看出,前5 d系统对氨氮的去除率不太稳定,之后在不同的曝气量下都达到了稳定状态。14 d时将进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度由 45.97 mg/L 增加到 75 mg/L,两种曝气量下的氨氮去除率都出现了显著的下降。这可能是因为水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度骤增,而碱度还维持在原有水平上,碱度不足影响了硝化反应的充分进行^[6]。该现象在第15天时表现得更为明显。连续两天的冲击负荷过后将进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度恢复至正常水平,从第16天起系统的硝化效果有所改善(曝气量为 28 L/h 时),17 d 时已经完全恢复到以前的水平,这说明系统具有较强的抗 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 冲击负荷能力。

2.6 实时控制下系统的脱氮性能

SBR 工艺的优点之一就是操作灵活多变,定时控制虽然也能达到一定的处理效果,但是对进水水质的适应性还不太理想,而实时控制则能在很大程度上弥补这一缺点。由于系统内存在大量的聚糖菌,致使厌氧段的 pH 值下降趋势不明显,难以做到对释磷的实时控制,因此主要对脱氮性能加以研究。通过研究发现,厌氧的前 30 min 释磷速度较快,可达 0.2 mg/(L·min),约 1 h 释磷就已基本完成,因此在实时控制条件下运行时将厌氧时间确定为 1 h,曝气量设定为 28 L/h,利用 ORP 和 pH 实行联合控制:将 pH 曲线上的氨谷作为曝气结束的标志(图5中的 e 点)^[7],以 pH 曲线上的 g 点和 ORP 曲线上的 h 点联合控制缺氧段的结束,这样就可以有效避免缺氧段发生二次释磷。运行结果表明,系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为 96.0%,对 TN 的去除率达到了 93.4%。

3 结论

① 采用 SBR 工艺处理模拟生活污水,在厌氧/好氧/缺氧的运行方式下,当曝气量为 28 L/h 时,系统对氮、磷及 COD 的去除效果均较好。

② 为避免发生二次释磷现象,应使缺氧段末期的硝态氮浓度 > 2.5 mg/L。

③ 系统对氨氮的冲击负荷具有很好的抵抗能力,当氨氮负荷恢复到正常水平时,系统的硝化效果能在几天之内得到恢复。

④ 采用 pH、ORP 对系统进行实时控制,能获得较佳的脱氮效果,并达到了降低能耗的目的。

参考文献:

- [1] 曾薇,彭永臻,王淑莹. 好氧/缺氧循环 SBR 工艺的脱氮研究[J]. 中国给水排水,2006,19(17):34-37.
- [2] Brdjanovic D, Slamet A, Van Loosdrecht M C M, et al. Impact of excessive aeration on biological phosphorus removal from wastewater[J]. Water Res, 1998, 32(1):200-208.
- [3] Liu Yan, Chen Yinguang, Zhou Qi. Effect of initial pH control on enhanced biological phosphorus removal from wastewater containing acetic and propionic acids[J]. Chemosphere, 2007, 66:123-129.
- [4] Adrian Oehmen, Teresa Vives M, Lu Huabing, et al. The effect of pH on the competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms[J]. Water Res, 2005, 39(15):3727-3737.
- [5] Jeon Che Ok, Park Jong Moon. Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor supplied with glucose as a sole carbon source[J]. Water Res, 2000, 34(7):2160-2170.
- [6] 吴昌永,陈志强,彭永臻,等. 实时控制下短程生物脱氮的实现及其稳定性研究[J]. 中国给水排水,2006,19(11):39-43.
- [7] 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.

作者简介:彭赵旭(1983-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,研究方向为污水脱氮除磷技术。

电话:13654584183

E-mail: pengzhaoxu1983@163.com

收稿日期:2007-10-08