

侯红勋, 彭永臻, 叶 柳, 等. 2006 间歇曝气 A^2/C 氧化沟工艺处理城市污水中试研究 [J]. 环境科学学报, 26(5): 740 - 744

Hou H X, Peng Y Z, Ye L, et al. 2006 Intermittent aeration system to treat municipal sewage in a pilot scale anoxic/anaerobic/carrousel oxidation ditch process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(5): 740 - 744

间歇曝气 A^2/C 氧化沟工艺处理城市污水中试研究

侯红勋¹, 彭永臻^{1,*}, 叶 柳¹, 王建龙¹, 周 利²

1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022

2. 青岛理工大学, 山东省环境工程重点实验室, 青岛 266033

收稿日期: 2005-07-05 修回日期: 2006-02-28 录用日期: 2006-03-08

摘要: 为降低氧化沟工艺的运行成本, 研究了连续进水间歇曝气缺氧 (Anoxic) 厌氧 (Anaerobic) -Carrousel 氧化沟 (A^2/C) 工艺. 采用 A^2/C 氧化沟模型运用连续进水间歇曝气模式对城市污水处理进行了研究. 结果表明, 增强外源反硝化是提高脱氮效率的关键. 在一定范围内加大回流比, 能够提高间歇频率, 减小各污染指标在反应系统中的积累. 在曝气 1 h, 停止曝气 3 h, 回流污泥比 200% 的模式下 (模式 II), 出水 COD_{Cr} , NH_4^+-N 和 TN 分别为 $40 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $3.0 \sim 5.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.2 \sim 12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 3 个模式在 1 个周期内平均曝气量分别为连续曝气过程的 66%、50%、44%. 模式 II 中在线监测仪表数据分析显示, 曝气过程中出现 NH_4^+-N 氧化的终点——在 pH 曲线上表现为出现“氨谷”. 若利用在线监测仪表在曝气阶段采用自动控制, 则可避免过量曝气. 采用实际城市污水, 应用中试试验模型, 能够为实际生产提供重要技术参数, 为原有氧化沟工艺技术改造提供支持.

关键词: 间歇曝气; A^2/C 氧化沟; 城市污水; 生物脱氮; 中试

文章编号: 0253-2468(2006)05-0740-05

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

Intermittent aeration system to treat municipal sewage in a pilot scale anoxic/anaerobic/carrousel oxidation ditch process

HOU Hongxun¹, PENG Yongzhen^{1,*}, YE Liu¹, WANG Jianlong¹, ZHOU Li²

1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022

2. Shandong Province Key Lab of Environmental Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033

Received 5 July 2005;

received in revised form 28 February 2006;

accepted 8 March 2006

Abstract: In order to reduce the operational cost of oxidation ditch process, one intermittent aeration anoxic/anaerobic/carrousel (A^2/C) oxidation ditch process with continuous feeding was studied. Enhancing exogenous denitrification was the key to improve biological nitrogen removal in this research. Increasing the sludge recycled (RAS) rate in a certain range increased the intermittent rate, at the same time, the accumulation of pollutions such as ammonia, nitrate decreased. The effluent of COD_{Cr} , NH_4^+ and TN were $40 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $3.0 \sim 5.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $10.2 \sim 12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, in the mode II of the research (1 h airon, 3 h air-off, RAS rate 200%). The average consumption of oxygen in the three modes was as 66%, 50% and 44% as that of continuously aeration system. There was an "ammonia valley" during the course of the aeration stage in the profiles of pH, which can be used as control parameters of nitrification process to avoid excessive aeration. The result obtained in the pilot-scale plant treating the actual municipal wastewater can provide important technological parameters for the practical operation and oxidation ditch process reconstruction.

Keywords: intermittent aeration system; oxidation ditch; municipal sewage; biological nitrogen removal; pilot scale

1 引言 (Introduction)

氧化沟工艺因运行稳定、操作维护方便、出水水质优良且具有较好的脱氮除磷能力, 成为国内外

城市污水处理首选工艺之一. 但该工艺转刷曝气充氧效率较低, 使得该工艺运行电耗较高, 曝气的能耗占水厂总能耗的 80% 以上. 采用间歇曝气可以使氧化沟工艺在较好的脱氮效果下降低电耗. 本研究

基金项目: 国家自然科学基金 (50521140075); 北京市重点实验室开放基金项目

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50521140075); Key Laboratory Open Foundation

作者简介: 侯红勋 (1977—) 男, 博士研究生; * 通讯作者, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

Biography: HOU Hongxun (1977—), male, Ph.D. candidate; * Corresponding author, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

考察了连续进水间歇曝气条件下氧化沟工艺的生物脱氮性能及运行控制条件. 目前间歇曝气氧化沟工艺在国外已有工程实例, 如 NitroxTM 工艺 (Metcalf & Eddy, 2003), 该工艺为传统的氧化沟工艺 (没有前置缺氧区), 局限于进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 不大于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水质, 若进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度太高, 该工艺将满足不了反硝化的要求, 使脱氮效率降低. 日本的 Furukawa (1998). 等人也对间歇曝气氧化沟工艺进行了研究, 发现曝气/停曝比为 1 时脱氮效果最好. 龙腾锐等人采用合建式曝气沉淀池对连续流间歇曝气工艺的脱氮除磷进行了研究 (Long, 2000), 结果表明曝气 3 h, 停曝 3 h 工况下能够达到较好的出水效果. 罗固源等人对组合式连续进水间歇曝气系统进行了研究 (Luo G Y, 1998), 发现该工艺能够节能 24% 左右. 前人研究的间歇曝气氧化沟工艺多为传统的氧化沟工艺, 而目前国内外新建的氧化沟污水处理厂多为前端设置选择区的改良型氧化沟工艺. 改良工艺具有更好的脱氮除磷效果, 故本文选用缺氧 (Anoxic) 厌氧 (Anaerobic) -Carnousel 氧化沟 (A²/C) 为研究对象.

2 实验材料与方法 (Materials and methods)

2.1 实验装置

实验采用 1 套氧化沟模型如图 1 所示, 模型主

要由储水箱、A²/C 氧化沟和二沉池组成. 水箱容积为 330 L, A²/C 氧化沟前端为选择池和厌氧池, 容积为 27 L, 氧化沟有效容积为 273 L, 二沉池有效容积为 57 L, 选择池内和氧化沟内共设 8 台搅拌器, 氧化沟内均匀设置曝气头. 空压机和搅拌器均由程序控制器 (PLC) 控制. 进水、回流污泥、剩余污泥采用保定兰格蠕动泵调节流量, 氧化沟出水口设置溶解氧 (DO)、氧化还原电位 (ORP) 和 pH 在线检测仪.

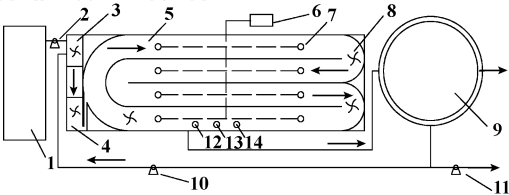


图 1 氧化沟系统试验装置示意图 (1. 储水箱; 2. 进水泵; 3. 缺氧区; 4. 厌氧区; 5. 氧化沟; 6. 空压机; 7. 曝气头; 8. 搅拌器; 9. 二沉池; 10. 回流污泥泵; 11. 剩余污泥泵; 12. DO 仪; 13. ORP 仪; 14. pH 仪)

Fig 1 Schematic diagram of oxidation ditch system

2.2 实验方法

试验原水为北京市某污水处理厂曝气沉砂池出水, 主要成分为生活污水和部分工业废水. 试验污水水质见表 1.

表 1 试验进水水质

Table 1 Concentrations of the influent during the study

COD / (mg·L ⁻¹)	BOD / (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N / (mg·L ⁻¹)	TN / (mg·L ⁻¹)	TP / (mg·L ⁻¹)	pH
260 ~ 430	160 ~ 230	35.5 ~ 51.2	55.4 ~ 66.8	7.1 ~ 8.0	7.4 ~ 7.8

本试验目的是研究确定连续进水间歇曝气氧化沟工艺较佳的运行参数及运行工况. 首先在间歇状况下寻求好氧曝气和缺氧停止曝气阶段的时间搭配, 定性确定曝气时间和停气时间配比; 然后提高停曝期间 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除率. 试验期间分别测定曝气池和二沉池的 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 等指标. 试验水量为 $342 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, 总水力停留时间 21 h, 其中选择池和厌氧池共 1.9 h 氧化沟采用曝气头曝气和搅拌桨搅拌并推流. 曝气阶段采用曝气和推流; 停止曝气阶段采用搅拌和推流. 在氧化沟出水处设置 DO、ORP 和 pH 在线检测仪, 检测点位见图 1. 实验水温 $20.4 \sim 22.6$, 污泥浓度为 $4.0 \sim 5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 污泥龄为 16 ~ 20 d

3 结果与分析 (Results and analysis)

3.1 完全反硝化试验

系统经过连续进水间歇曝气 1 个月驯化过程中, 在曝气 2 h, 停止曝气搅拌 6 h, 回流比为 100% 过程中 ORP 的变化情况如图 2 所示. 在曝气过程中 ORP 升高, 停止曝气后 ORP 降低, 在停止曝气 5 h 时, ORP 发生突变, 此时 NO_x^- 降为 0. 反硝化终点可以通过 ORP 突变指示出来 (图 2).

在 5 h 停气过程中, 氧化沟中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 以 $3 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 的速率升高. 停止曝气时, 氧化沟中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 升高至 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而曝气 1 ~ 2 h, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降低至 0. 硝化速率较快, 能够在 1 ~ 2 h 将系统停

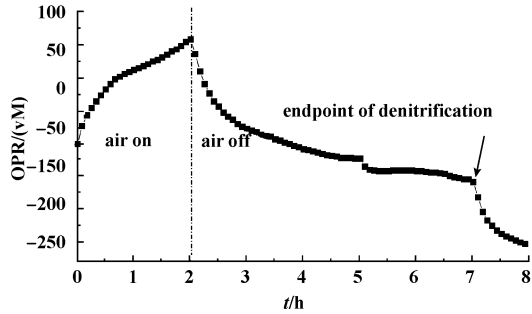


图 2 1个周期 ORP的变化

Fig 2 Variation of ORP in one cycle

气过程 4~6 h内积累的 NH_4^+ 完全硝化.但在停气阶段,反硝化速率较低.尽管 ORP能够很好地指示反硝化终点,本试验综合考虑出水 TN和 NH_4^+ -N,故没有控制停气到反硝化终点.

3.2 不同回流比增强反硝化试验

为充分利用前端缺氧池碳源充足反硝化速率高的特点,采用 3种回流比,研究不同曝气 停气模式下生物脱氮规律.3种模式分别为:模式 I——曝气 2 h,停止曝气 4 h,回流比 100%;模式 II——曝气 1 h,停止曝气 3 h,回流比 200%;模式 III——曝气 40 min,停止曝气 140 min,回流比 300%.

分别采用 3个模式进行试验,出水水质稳定后,1个周期氧化沟出水口处水质检测结果如图 3 所示.

在模式 I下,曝气结束时 ORP升为 70~80 mV,DO为 3~4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH值为 7.30,停气结束时 ORP为 -130 mV,pH值为 7.65.曝气 2 h, NH_4^+ -N降低为 0, NO_3^- -N升至 20~23 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比硝化速率为 0.055 $\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,在停气缺氧阶段结束时, NO_3^- -N降低为 3.5~5.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ 升高至 11.2~13.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

在模式 II下,曝气结束时 ORP升为 64~75 mV,DO为 3.9~4.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH值为 7.35~7.40,停气结束时 ORP为 -120~-130 mV,pH值为 7.62~7.64.1个周期中曝气 1h, NH_4^+ -N降低为 0, NO_3^- -N升至 11~13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比硝化速率为 0.085 $\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$;在停气缺氧阶段结束时, NO_3^- -N降低为 1.0~1.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N升高至 8.5~9.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

在模式 III下,曝气 40 min时 NH_4^+ -N降低为 2.5~4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, NO_3^- -N升至 11~13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,比硝化速率为 0.153 $\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,在停气缺氧阶段结

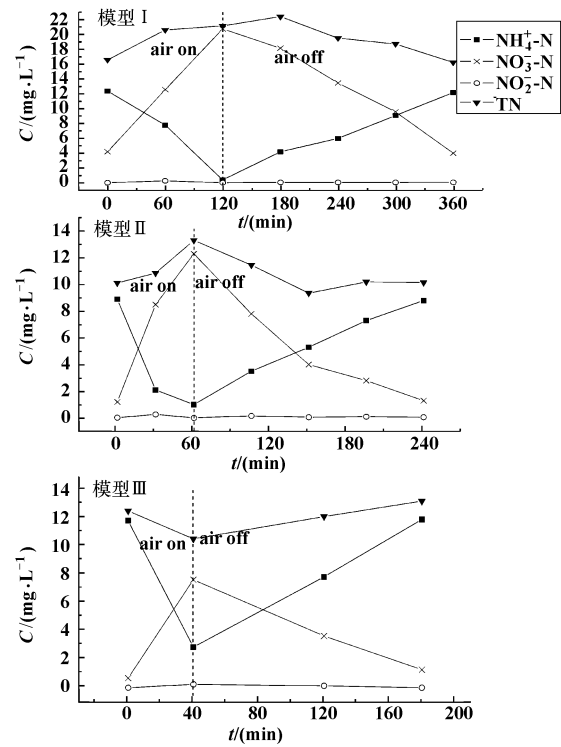


图 3 模式 I~模式 III 时 1个周期 NH_4^+ -N, NH_3 -N, NO_2^- -N 和 TN变化曲线

Fig 3 Profile of NH_4^+ -N, NH_3 -N, NO_2^- -N and TN during one cycle in mode I~III

束时, NO_3^- 降低为 0.5~1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ 升高至 11.5~13.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

图 3中的数据皆为稳定状态下氧化沟出水的各指标的浓度,能够反映间歇曝气过程中各种组分的瞬时变化;而二沉池出水相当于 4h内的混合浓度,该数据能够反映该工艺的实际处理效果.3种模式下的二沉池出水水质结果如表 2所示.在模式 I下,由于反硝化需时较长,使停气阶段 NH_4^+ -N 积累过多,停气结束时出水 NH_4^+ -N 超过 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;采用模式 II时,因回流比加大为 200%,增强了外源反硝化作用,充分利用了进水中的易降解有机碳源,利用 NO_x^- -N 中的化合态氧作为电子受体,降低了氧化沟中有机物负荷,减少了曝气阶段的曝气量.采用模式 III虽然使间歇曝气周期缩短,生物脱氮效果更好,但加大了回流比,使运行成本升高.

本工艺反硝化由 2部分组成,一为氧化沟内缺氧状态下的反硝化,另一为前端选择区的外源反硝化.曝气结束后,易生物降解的耗氧有机物完全被消耗,依靠氧化沟系统较长的污泥龄,大部分粒子型生物降解耗氧有机物也倾向于被完全消耗,故可

被反硝化利用的有机物较少,氧化沟内的反硝化主要为异养菌利用贮存的内碳源或者利用分解的细胞有机物进行,反应速率慢.在缺氧状态下,氧化沟内的平均反硝化速率为 0.023g·(g·d)⁻¹.在前置缺氧区,原水中大量的易生物降解有机物优先被利

用,异养菌利用回流污泥中携带的 NO_x⁻ 作为电子受体,进行快速反硝化,前置缺氧区反硝化速率为 0.22g·(g·d)⁻¹,约为前者的 10倍.3种模式下前置反硝化的贡献率分别为 17%、23%和 30%.

表 2 3种模式二沉池出水 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和 TN浓度对比

Table 2 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N and TN in the effluent during 3 modes

工艺模式	NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N		TN	
	出水/(mg·L ⁻¹)	平均去除率	出水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	平均去除率	
模式	4.2~9.0	76.8%	8.4~12.0	16.2~18.0	44.8%	
模式	3.0~5.7	84.7%	6.4~7.8	10.2~12.5	63.4%	
模式	2.8~4.6	87.0%	6.1~7.3	9.3~11.1	67.1%	

提高前置选择区的反硝化贡献率能够提高总反硝化速率,缩短停止曝气阶段时间,能够防止 NH₄⁺-N在氧化沟内积累;同样,NH₄⁺-N积累少,曝气时间也将缩短,这样,间歇运行过程的周期缩短,各种物质在氧化沟系统中的积累量降低,二沉池出水水质趋于稳定.

3.3 连续曝气和间歇曝气试验曝气量对比试验

在连续曝气试验过程中,曝气量为 0.4~0.6 m³·h⁻¹,总氮去除率为 60%~70%,在模式 、 、 状态下,曝气过程中,平均曝气量分别为 0.33、0.25和 0.22 m³·h⁻¹.模式 、 、 状态下,1个周期内的平均曝气量分别为连续曝气过程的 66%、50%、44%.

3.4 在线监测仪表结果

在时间控制实验的基础上,得到了一系列 DO、ORP、pH在线监测仪检测结果.图 4为模式 中 3个周期中氧化沟中 DO、ORP、pH的检测结果.

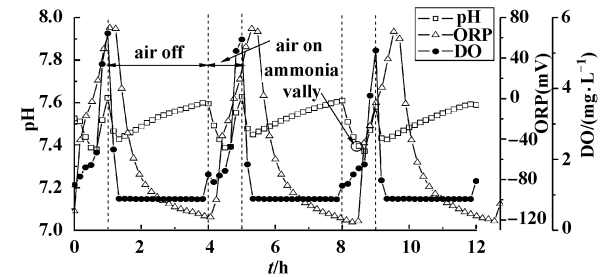


图 4 模式 中 3个周期 pH、ORP和 DO变化曲线

Fig 4 Curves of pH, ORP and DO during 3 cycles in mode

由图 4可知,在曝气过程中,DO由 0上升至 5 mg·L⁻¹,ORP由 -130 mV上升至 70 mV,pH值先由 7.6下降至 7.4(40 min时),然后升至 7.6(60 min

时).在曝气的前 40 min,DO上升缓慢,pH值直线下降,ORP上升;在曝气 40~60 min的过程中,DO很快由 1 mg·L⁻¹升高至 5 mg·L⁻¹以上,而 pH值在该阶段也很快上升,ORP上升速率也加快.在曝气 40min时 NH₄⁺-N已经完全被氧化,此时在 pH值曲线上的最低点被称为“氨谷”.此后氧化沟内需氧量较低,曝气量远大于需氧量,造成 DO急剧上升;曝气还将系统中 CO₂吹脱,使 pH值显著上升.自动控制系统可以很好利用 pH仪在线检测结果中“氨谷”这一显著特征点来控制曝气终点,避免过量曝气;另一方面可以避免过量曝气氧化细胞内含物质,以利于停气阶段进行内源反硝化反应.

在停气阶段,反硝化速率较低,虽然 ORP能够很好地指示反硝化的终点,但在模式 要达到反硝化的终点,需要停止曝气 5 h,这样会使 NH₄⁺-N在氧化沟内过量积累,故试验中没有控制停气到反硝化终点.图 4中没有出现图 2中出现的 ORP的突变.

4 结论 (Conclusions)

1)连续进水间歇曝气氧化沟工艺试验研究表明,该工艺对于城市生活污水具有良好的去除有机物和生物脱氮性能,采用模式 ,曝气 1 h,停曝 3 h,回流比 200%时,其出水 COD_{Cr}小于 40 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N为 3.0~5.7 mg·L⁻¹,TN为 10.2~12.5 mg·L⁻¹.

2)在模式 下,反硝化需时较长,使停曝阶段 NH₄⁺-N积累过多;模式 增强了外源反硝化;可充分利用进水中的易降解有机碳源进行反硝化;利用化合态氧 NO_x⁻ 作为电子受体,降低了有机物负荷和曝气量,达到高效低耗;模式 进一步缩短了间歇

曝气周期,生物脱氮效果更好,但因回流比过大,运行成本相应升高.

3)缺氧状态下前置缺氧区反硝化速率为氧化沟内的反硝化速率的 10倍.增强外源反硝化提高了生物脱氮效率.3种模式增大回流比,前置反硝化的贡献率分别为 17%、23%和 30%.

4)间歇曝气氧化沟工艺能够降低运行成本,在模式 、 、 状态下,1个周期内平均曝气量分别为连续曝气过程的 66%、50%、44%.

5 展望 (Expectation)

间歇曝气如果采用 pH计、ORP仪和 DO仪在线控制曝气和停曝的起止,将时间控制改为在线检测仪自动控制,将会避免了因过量曝气导致细胞内碳源过量消耗使停曝阶段反硝化缺乏电子供体,使间歇曝气在最佳工况下运行,可在提高脱氮效率的基础上进一步降低能耗.该工艺对于生物除磷还有待进一步研究.

References:

- Metcalf & Eddy, Inc. 2003. Wastewater Engineer Treatment and Reuse (Fourth Edition) [M]. New York: McGraw-Hill, 776—779
- Funakawa S, Tokimori K, Hirotsuji J, *et al* 1998. New Operational Support System for High Nitrogen Removal in Oxidation Ditch Process [J]. Wat Sci Tech, 37(12): 63—68
- Long T R, Guo J S, Gao X, *et al* 2000. Research on nitrogen and phosphorus removal through the continuous flow-intermittent aeration technology [J]. China Environmental Science, 20(4): 366—370 (in Chinese)
- Luo G Y, Zhou J, Ji F Y. 1998. Intermittent Aeration System with Continuous Inflow and Outflow to Treat Sewage [J]. Environment Herald, (1): 20—23 (in Chinese)

中文参考文献:

- 龙腾锐,郭劲松,高 旭,等. 2000. 连续流间歇曝气工艺脱氮除磷研究 [J]. 中国环境科学, 20(4): 366—370
- 罗固源,周 健,吉方英. 1998. 间歇曝气连续进出水一池系统处理城市污水 [J]. 环境导报, (1): 20—23