溶解氧对氧化沟生物脱氮除磷的影响*

郭昌梓[1,2] 程 飞[2] 孙根行[2]

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院，西安 710055; 2. 陕西科技大学资源与环境学院，西安 710021)

摘要: 采用有效容积为240 L的中试 Carrousel 氧化沟处理模拟生活污水，研究了溶解氧对氧化沟同步硝化反硝化脱氮和除磷效果的影响。结果表明: 溶解氧的变化对系统中有机物的去除影响不显著; 过高或过低的溶解氧均会降低系统总氮和总磷的去除率，溶解氧控制在 1.0 ~ 1.5 mg/L，系统可获得较高的氨氮和总氮去除率，当溶解氧为1.5 mg/L时，总磷去除率达最高，为 71.00%; 溶解氧对污泥沉降性能影响显著，低溶解氧运行易引起污泥膨胀。

关键词: Carrousel 氧化沟; 同步硝化反硝化; 脱氮除磷; 溶解氧

EFFECT OF DISSOLVED OXYGEN ON NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL IN OXIDATION DITCH

Guo Changzi[1,2] Cheng Fei[2] Sun Genxing[2]

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi´an University of Architecture and Technology, Xi´an 710055, China; 2. College of Resource and Environment, Shaanxi University of Science & Technology, Xi´an 710021, China)

Abstract: A pilot-scale Carrousel oxidation ditch with effective volume of 240 L was used for simulating wastewater treatment. The influence of dissolved oxygen(DO) on simultaneous nitrification and denitrification(SND) and phosphorus removal in the Carrousel oxidation ditch was investigated. The result shows that the effect of DO on the removal of organic substance in the system is not significant. Too high or too low DO would reduce the total nitrogen and total phosphorus removal rate. By controlling DO at 1.0 ~ 1.5 mg/L, the system can obtain higher ammonia nitrogen and total nitrogen removal rate. When DO is 1.5 mg/L, the total phosphorus removal rate is the highest at 71.00%. DO is the key factor affecting sludge performance, and sludge bulking can easily incur by low DO.

Keywords: Carrousel oxidation ditch; simultaneous nitrification and denitrification; nitrogen and phosphorus removal; dissolved oxygen

氧化沟在我国环保行业的应用日益广泛，但是氧化沟脱氮除磷的效果仍有待大力提升[1]，特别是很难达到同步高效脱氮和除磷的效果。这是因为硝化菌、反硝化菌和聚磷菌生长速率不协调，对环境条件的要求也不同，难以在时间和空间上统一，使处理出水的氮、磷含量不能同时达标[2]。溶解氧是控制氧化沟内发生同步硝化反硝化脱氮的最关键控制条件[3]，同时也影响除磷效果及污泥沉降性能。目前国内外对于氧化沟中溶解氧对生物脱氮除磷的影响，主要集中于生物脱氮，很少系统研究对生物脱氮除磷的影响以及对污泥沉降性能的影响[4-7]。

试验采用有效容积为240 L的 Carrousel 氧化沟模型处理模拟生活污水，以反应器内的氨氮去除率、总氮损失和总磷去除率为同步硝化反硝化脱氮和除磷效果的评价指标[8]，对溶解氧对氧化沟内同步硝化反硝化生物脱氮和除磷以及污泥沉降性能的影响进行了分析，旨在为城市污水处理厂的优化脱氮除磷和节能运行提供参考。

1 试验

氧化沟中试试验系统主要由 1 个典型的 Carrousel 氧化沟(见图 1)和 1 个竖流式沉淀池组成，氧化沟前设置 1 个进水水箱。反应器由不锈钢制成，氧化沟的有效容积为 240 L，二沉池有效容积为 100 L。氧化沟中试系统的曝气方式与实际氧化沟完全相同，采用的是表面曝气机，由曝气机实现沟内的曝气和推流过程(进水处的曝气机主要起曝气作用，

* 陕西科技大学自然科学基金(ZX09-04)。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

后两个曝气机主要起推流作用)，曝气机通过电机控制器进行控制，实现对系统曝气量和沟内混合液推流程度的控制。氧化沟中试系统采用兰格蠕动泵实现连续进水和二沉池污泥回流，流量可以在一定幅度范围内连续调节，污泥回流比为 100%，二沉池沉淀后的上清液通过溢流堰直接外排。中试系统采用间歇排泥，在运行期间每日定时排除一定量的剩余污泥，维持污泥龄为30 d左右。

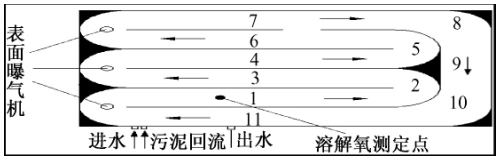

图 1 Carrousel 氧化沟平面及测点分布

试验用水采用生活污水加自配废水组成，自配废水水质参考城市污水水质。自配废水以葡萄糖和淀粉的混合物为有机碳源，氮、磷分别采用氯化铵、磷酸二氢钾进行配制，同时向配水中加入一定量的微量元素，以补充微生物新陈代谢所需的营养元素。试验用水ρ(COD)为400 mg/L，ρ(氨氮)为40 mg/L，ρ(总磷)为4 mg/L，水温为20 ℃左右，pH 为 7.3～7.6。

试验采用 24 h 连续进、出水的方式运行，运行过程中，根据试验进展情况不定期地监测沟道中的温度、pH 值、溶解氧和氧化沟内的 MLSS。在系统调试运行后，分别取原水、氧化沟出水和二沉池出水水样进行分析，测定指标包括 COD、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、SV_{30}和 MLSS。每一工况的水质测定前系统皆达到稳定状态，并且以下数据均为系统相对稳定时的监测数据。

2 结果与分析

2.1 污泥的培养与驯化

试验接种污泥取自西安市某污水处理厂二沉池回流污泥，首先将污泥闷曝 1 周左右，消除污泥原有菌群特征对试验的影响，然后再将污泥移入反应器，通过连续进、出水进行培养，经过20 d培养驯化，系统运行稳定并进入试验研究阶段。

2.2 溶解氧对脱氮的影响

试验过程中，只改变氧化沟系统的溶解氧浓度，保持系统的其他运行条件不变，ρ(COD)为400 mg/L，ρ(氨氮)为40 mg/L，ρ(总磷)为4 mg/L，水力停留时间为28 h，温度为20 ℃，pH 为 7.3～7.6，控制污泥浓度在2.0 g/L左右。分别调节溶解氧浓度为0.2，0.5，1.0，1.5，2.0 mg/L，在系统运行稳定后每天取水样进行测定分析。

如图 2—图 4 所示，DO 浓度为0.2 mg/L时，由于氧化沟内溶解氧浓度太低，在图 2 中溶解氧梯度分布没有画出，氧化沟内硝化不完全，出水氨氮浓度很高，去除率为 28.58%，总氮去除率为 19.40%；溶解氧浓度为0.5 mg/L时，氧化沟内溶解氧浓度普遍较低，导致氧化沟内硝化不完全，氧化沟出水氨氮浓度较高，硝态氮浓度低，进而成为同步硝化反硝化的限制因素，总氮去除效果较差；溶解氧浓度为 1.5，2.0 mg/L时，氧化沟内溶解氧浓度普遍较高，在1.0 mg/L以上，宏观上没有出现适宜反硝化的缺氧区段或区域，碳化作用和硝化作用增强，可被利用的碳源非常有限，反硝化过程受到溶解氧和碳源的双重抑制，难以促成反硝化反应的发生，出水中硝态氮浓度高，总氮去除率低当溶解氧为2.0 mg/L时，氧化沟出水总氮高达27.29 mg/L；而溶解氧浓度为1.0 mg/L时，氧化沟出水总氮为13.89 mg/L，同步硝化反硝化效果最佳，在表曝机推流运动中形成宏观溶解氧浓度的梯度分布，营造了良好的好氧缺氧交替工作环境[9-10]，好氧区和缺氧区的比例大约为 2∶1，为同步硝化反硝化过程的发生创造了很好的条件，其总氮去除率最高，为65.28%。由图 3 同时可观察到，在氧化沟内以不同的溶解氧浓度运行的过程中，亚硝酸盐氮浓度一直很低，并没有出现明显的亚硝酸盐氮积累现象，最高亚硝酸盐氮浓度出现在溶解氧浓度为1.5 mg/L时，亚硝酸盐氮浓度为0.96 mg/L，表明系统内没有发生短程硝化反硝化现象。

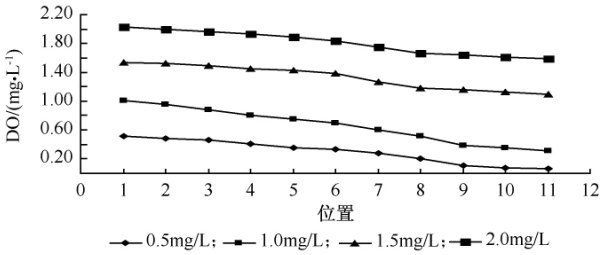

图 2 不同溶解氧浓度条件下溶解氧梯度分布

由图 3 和图 4 可看出：溶解氧变化对 COD 的去除率影响较小，最终出水 COD 基本维持在20 mg/L，COD 去除率均超过 90%；当溶解氧浓度从0.2 mg/L到2.0 mg/L逐步增加时，其硝化和反硝化作用变化显著，随着溶解氧的增加硝化效率不断提高。当溶解氧浓度达到1.5 mg/L时，硝化效率达 100%。试验结果表明溶解氧浓度在 1.0～1.5 mg/L变化可确保氧化

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

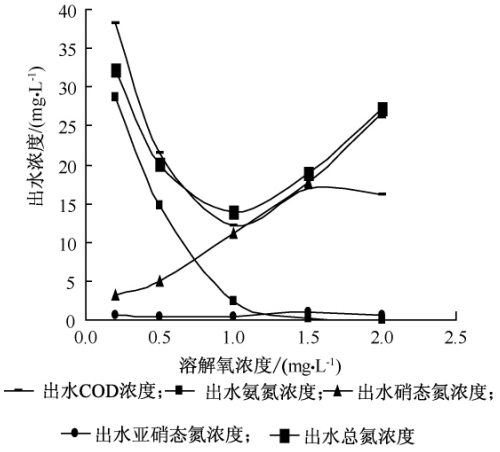

图 3 不同溶解氧浓度条件下的各指标出水浓度

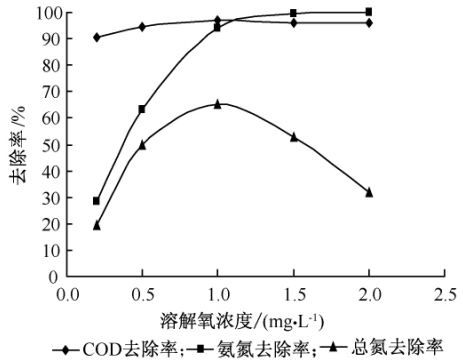

图 4 不同溶解氧浓度条件下的去除率

沟中的硝化作用。同时,溶解氧浓度对反硝化过程的影响符合传统的脱氮理论,随着溶解氧浓度的升高,反硝化效率逐渐降低,当溶解氧条件满足实现较好的硝化过程时(DO 浓度为1.5 mg/L),反硝化过程由于受溶解氧的抑制,总氮去除率仅为 50%,甚至在溶解氧为 2.0 mg/L 时,氧化沟出水硝态氮浓度高达 26.62 mg/L。因为反硝化菌是异养兼性厌氧菌,适宜反硝化的溶解氧应在0.5 mg/L以下,如果沟内溶解氧较高,使得反硝化菌利用氧进行呼吸,抑制了反硝化菌体内硝酸盐还原酶的合成[11]。而当溶解氧条件能够满足反硝化过程达到较高的去除率时(溶解氧浓度为0.5 mg/L),又由于溶解氧条件的限制而使得硝化过程的效果受到较大的影响,其去除率下降,因为在低溶解氧条件下硝化菌的生长速率较低。因此,在同一个溶解氧环境条件下,溶解氧很难满足硝化和反硝化过程的要求,在实际运行过程中,要提高同步硝化反硝化过程的发生效果,就要使得溶解氧条件能够同时满足硝化和反硝化过程的要求,尽量降低满足硝化效果的溶解氧水平,提高反硝化过程的发生效率,以协调二者之间的矛盾。

2.3 溶解氧对除磷的影响

如图 5 和图 6 所示,当溶解氧为0.2 mg/L时,总磷去除率仅为 16.50%,这是由于溶解氧过低使得好氧聚磷菌的活性受到抑制,此时主要是活性污泥中的反硝化聚磷菌利用反应过程中产生的硝酸盐进行反硝化除磷。溶解氧浓度从0.2 mg/L到1.5 mg/L逐步增加时,总磷的去除率逐渐增加,回流污泥中的硝态氮浓度也逐渐增加。当溶解氧达到2.0 mg/L时,总磷去除率却下降,这主要是因为此时氧化沟内硝化很完全,而反硝化过程已经由于受到溶解氧的抑制,总氮去除率仅达 30%,氧化沟中存在大量的硝态氮,并且回流污泥中的硝态氮浓度也迅速增加,达23.0 mg/L,氧化沟中高浓度的硝态氮抑制了聚磷菌对总磷的去除。因为硝态氮可以作为电子受体,硝态氮的存在破坏了生物除磷的厌氧状态[12],而且硝态氮的反硝化过程对厌氧释磷过程产生竞争性抑制[13],其次此时氧化沟内溶解氧浓度普遍较高,无法营造一个良好的厌氧工作环境,聚磷菌厌氧释磷受到严重影响。当溶解氧为1.5 mg/L时,虽然此时氧化沟内溶解氧浓度较高,但总磷去除率达到最高,为 71.00%,这可能是因为活性污泥形成了絮体外的好氧区和絮体内的缺氧区、厌氧区,从而实现聚磷菌厌氧释磷、好氧吸磷过程。为了加强磷的去除,需要在氧化沟前设置厌氧池,增强聚磷菌的厌氧释磷,还可以在氧化沟前设置缺氧池,消除回流污泥中硝态氮对除磷的影响。

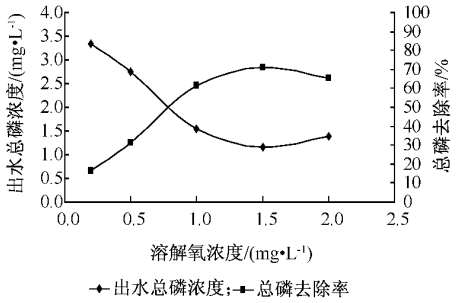

图 5 不同溶解氧浓度条件下的出水总磷浓度及去除率

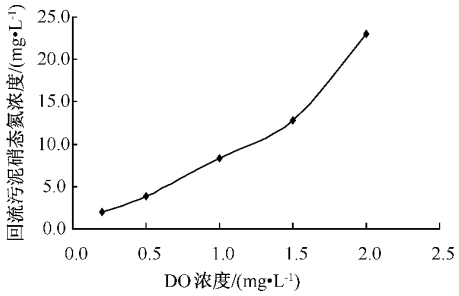

图 6 不同溶解氧浓度条件下的回流污泥硝态氮浓度

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 5 可知：本试验总磷的去除效果不好，去除率在 30% ~60%，甚至低于 20%，出水磷的浓度介于 1.0 ~ 1.5 mg/L，远高于0.5 mg/L的排放标准。总磷的去除率不高的原因是因为本试验采用的是完全混合系统，反应器内污泥处于完全相同的生活环境，在同一反应器内很难同时发生厌氧释磷和好氧吸磷的作用，即使形成厌氧区，也是在氧化沟的局部。硝化过程产生的硝酸盐，消耗掉生物降解基质，聚磷菌的竞争优势得不到发挥。此外，在试验期间由于氧化沟中污泥龄高达30 d，而生物除磷污泥龄要求在 15 ~20 d，磷的去除主要靠微生物的同化作用和剩余污泥的排放去除，而同化作用主要是用来维持微生物生长所需的营养，去除率自然不会很高，这跟一般的完全混合活性污泥系统的除磷情况基本相同。为了弥补长污泥龄对除磷的不足，可以辅以化学除磷。

2.4 溶解氧对污泥沉降性能的影响

溶解氧对污泥沉降性能的影响见表 1。

表 1 不同溶解氧浓度条件下的污泥沉降性能

DO/(mg·L^{-1})	MLSS/(g·L^{-1})	SV_{30}/%	SVI/(mL·g^{-1})
0.2	1.924	58	301
0.5	1.835	46	251
1.0	1.968	33	168
1.5	1.816	25	138
2.0	1.952	20	102

低溶解氧通常被认为是污泥膨胀的重要诱因之一。由表 1 可见，当 DO < 1.0 mg/L时，污泥沉降性能差，发生膨胀。随着溶解氧浓度逐步增加，SVI 值逐渐降低。当 DO 在 1.0 ~ 1.5 mg/L 时，SVI 值一般为 140 ~ 170 mL/g，镜检发现大量的钟虫和一定数量的累枝虫，活性较好。试验 Carrousel 氧化沟采用三廊道串联布置方式，一方面使氧化沟体现出推流式反应器的特征，即每个廊道可以构建不同的生化环境实现不同的功能；另一方面，系统总体是一个完全混合系统，第一廊道较高的溶解氧抑制了弯道低溶解氧对于污泥性状的负面影响，保持了污泥良好的沉降性能。

当溶解氧在 1.0 ~ 1.5 mg/L时，对污泥进行的镜检结果发现，污泥中仍然含有较多的丝状菌，处于轻微膨胀状态[14]。为了降低低溶解氧运行引起污泥膨胀的风险，可以在氧化沟前设置生物选择器，抑制丝状菌的过度生长和繁殖，提高污泥的沉降性能，从而控制污泥膨胀的发生和发展。

3 结论

1) 溶解氧对 COD 的去除影响不大，COD 去除率均超过 90%；过高或过低的溶解氧均会降低总氮的去除率，将溶解氧控制在 1.0 ~ 1.5 mg/L，系统可获得较高的氨氮和总氮去除率。

2) 过高或过低的溶解氧均会降低总磷的去除率，当溶解氧为1.5 mg/L时，总磷去除率达到最高，为 71.00%。

3) 溶解氧对污泥沉降性能影响显著，低溶解氧运行容易引起污泥膨胀的发生。

参考文献

[1] 高守有，彭永臻，胡天红，等. 氧化沟工艺及其生物脱氮原理 [J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版)，2005，21(4)：435-439.

[2] 林金銮，张可方，方茜，等. DO 对同步硝化反硝化协同除磷的影响 [J]. 化工环保，2009，29(2)：109-112.

[3] 刘艳臣，范茏，王志强，等. Carrousel 氧化沟内特性参数的分布 [J]. 中国环境科学，2007，27(6)：792-796.

[4] 杨青，刘遂庆，甘树应. Carrousel 氧化沟中的同时硝化/反硝化(SND)现象研究 [J]. 环境科学，2002，23(S)：40-43.

[5] 殷芳芳. Carrousel 氧化沟强化生物脱氮研究 [D]. 北京：北京工业大学，2009.

[6] Yanchen Liu, Hanchang Shi, Lan Xia, et al. Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a Carrousel oxidation ditch for domestic wastewater treat-ment [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(3): 901-906.

[7] Abusam A, Keesman K J, Spanjers H, et al. Benchmarking procedure for full-scale activated sludge plants [J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(3): 315-322.

[8] 高守有，彭永臻，王淑莹，等. Orbal 氧化沟生物脱氮的中试研究 [J]. 中国给水排水，2005，21(8)：5-9.

[9] Ingo Schmidt, Olav Sliekers, Markus Schmid, et al. Aerobic and anaerobic ammonia oxidizing bacteria-competitors or natural partners? [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, 39(3): 175-181.

[10] 范茏，王志强，罗彬，等. 污水处理厂脱氮效果及相关参数的分析 [J]. 环境工程学报，2007，1(6)：1-5.

[11] Mike S M. Jetten, Markus Schmid, et al. Improved nitrogen removal by application of new nitrogen-cycle bacteria [J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2002, 1(1): 51-63.

[12] Jens Meinhold, Eva Arnold, Steven Isaacs. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphorus removal activated sludge [J]. Water Research, 1999, 33(8): 1871-1883.

[13] 行智强，陈银广，杨海真. 影响强化生物除磷的关键因素研究进展 [J]. 环境保护科学，2006，32(1)：31-33.

[14] Youngchul Kim, Wesley O Pipes, Paul-Gene Chung. Control of activated sludge bulking by operating clarifiers in a series [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(8-9): 1-8.

作者通信处 郭昌梓 710021 陕西省西安市未央大学园区陕西科技大学资源与环境学院 853 信箱

E-mail guochangzi@163.com

2010 - 12 - 03 收稿

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net