

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.07.011

氧化沟型 A²/O 工艺脱氮除磷性能评价

崔涛¹, 李胜¹, 田敏¹, 吕恺², 彭党聪²

(1. 西安污水处理有限公司, 陕西 西安 710024; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过测定沿程氮磷去除效果、污泥的硝化活性以及聚磷和释磷活性,并利用荧光原位杂交技术分析西安市某城市污水处理厂氧化沟型 A²/O 工艺和典型 A²/O 工艺的脱氮除磷性能。结果表明,氧化沟型 A²/O 工艺中污泥的硝化活性较高,好氧池存在显著的同步硝化反硝化现象,具有更高的脱氮性能;污泥中聚磷菌的含量、活性和除磷能力与典型 A²/O 工艺相近,其作为一种新型的城市污水脱氮除磷工艺具有推广应用价值。

关键词: 氧化沟型 A²/O 工艺; 脱氮除磷; 硝化菌; 聚磷菌

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)07-0075-05

Evaluation of Nitrogen and Phosphorus Removal Performance in an Oxidation Ditch Based A²/O Process

CUI Tao¹, LI Sheng¹, TIAN Min¹, LÜ Kai², PENG Dang-cong²

(1. Xi'an Sewage Treatment Co. Ltd., Xi'an 710024, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The removal of nitrogen and phosphorus along the process, the activity of nitrification, phosphorus accumulation and phosphorus release of sludge in an oxidation ditch based A²/O process and a typical A²/O process in a municipal wastewater treatment plant in Xi'an were measured, and the performances of the two processes for nitrogen and phosphorus removal were compared by fluorescence *in situ* hybridization (FISH). In the oxidation ditch based A²/O process, the nitrification activity of sludge was higher, and significant simultaneous nitrification and denitrification took place in the aerobic tank, indicating that higher nitrogen removal performance was obtained. The abundance, activity and phosphorus removal capacity of phosphorus accumulating organisms (PAO) in sludge from the oxidation ditch based A²/O process were similar to those from the typical A²/O process. As a new municipal wastewater denitrification and phosphorus removal process, oxidation ditch based A²/O process has the value for extension and application.

Key words: oxidation ditch based A²/O process; nitrogen and phosphorus removal; nitrifying bacteria; phosphorus accumulating organisms (PAO)

A²/O 是目前城市污水脱氮除磷的主流工艺,其将脱氮与除磷进行了有机结合,并取得了较好的效

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF06-05)

通信作者: 彭党聪 E-mail: dcpeng@xauat.edu.cn

果。典型A²/O工艺中的生物反应池(厌氧、缺氧和好氧池)均采用推流式,从而形成相应的浓度梯度,以保证污泥中各功能菌(聚磷菌PAO、硝化菌和反硝化菌等)在反应池中充分发挥功能^[1]。随着对各功能菌增殖动力学及反应动力学的深入研究发现,对于城市污水而言,相应基质浓度下,功能微生物(尤其是硝化菌)的基质饱和常数较小,其增殖和降解速率与基质浓度相关性很小,因此其他池型的反应器开始出现在A²/O工艺中。其中,结构简单、机械设备少、易于维护的氧化沟形式的反应器成为首选,即采用氧化沟型反应器替代A²/O中的推流式反应器,形成了氧化沟型A²/O工艺。氧化沟型A²/O工艺继承了A²/O和氧化沟两个工艺的优点,不仅厌氧、缺氧、好氧各区明确,工艺灵活,而且通过内回流和外回流可控制整个系统的脱氮除磷效率。丹麦的Kruger公司首先将氧化沟引入A²/O工艺,其后将Bardenpho工艺中的好氧池改为氧化沟。2008年建成的西安市第四污水处理厂,其A²/O工艺的厌氧池和缺氧池均采用氧化沟。当A²/O工艺中全部生物反应器均采用氧化沟时,称之为全程氧化沟型A²/O工艺;当A²/O工艺中的一个或两个反应池采用氧化沟时,称之为部分氧化沟型A²/O工艺。一般认为,部分氧化沟型A²/O工艺中至少好氧池采用氧化沟时,才可称之为氧化沟型A²/O工艺。

针对西安市某污水厂氧化沟型A²/O工艺,笔者通过测定污泥的硝化速率和除磷速率,探讨其处理污水的效果及脱氮除磷性能,同时利用荧光原位杂交技术(FISH)测定污泥中的聚磷菌和硝化菌等功能微生物,以此评价氧化沟型A²/O工艺的性能,旨在为该工艺的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 工程简介

西安市某污水处理厂一期工程规模为4×10⁴m³/d,采用两座并行的氧化沟型A²/O工艺,如图1所示。厌氧池水力停留时间(HRT)为1.5h,缺氧池为5.7h,好氧池为8.3h,总水力停留时间为15.5h,污泥龄为20d。厌氧池为多级串联搅拌池,缺氧池为循环跑道式氧化沟,好氧池为Carrousel氧化沟,曝气方式为微孔曝气,曝气区与非曝气区的比值为4:6,水深为6m。

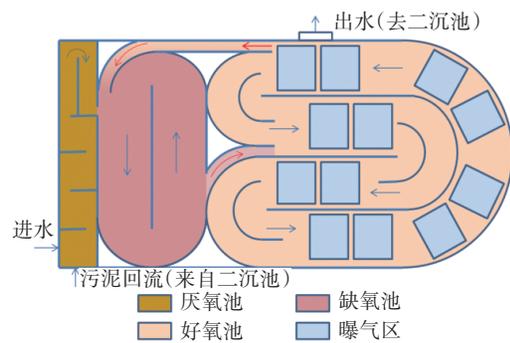


图1 氧化沟型A²/O工艺示意

Fig.1 Schematic diagram of oxidation ditch based A²/O process

1.2 检测项目及方法

NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定;PO₄³⁻-P采用钼锑抗分光光度法测定;TP采用过硫酸钾消解法测定;NO₃⁻-N和TN采用紫外分光光度法测定;MLSS和MLVSS采用重量法测定。

硝化速率的测定:硝化速率采用氧吸收速率法进行测定。在好氧池中取一定量混合液,充分曝气(6h),然后分别取1000mL置于三个配有搅拌器和溶解氧测定仪的完全混合式反应器中,记录各反应器内溶解氧随时间的变化,以此计算各反应器的氧利用速率(OUR)。1号反应器没有添加任何基质,作为基准反应器,用于测定微生物的内源呼吸速率(ERR);2号反应器中加入NH₄Cl(20mg/L)和NaClO₃(0.02mol/L),用于测定氨氧化速率(AUR);3号反应器中加入NaNO₂(20mg/L),用于测定亚硝酸盐氧化速率(NUR)。相关计算见式(1)~(3)。

$$ERR = OUR_1 \quad (1)$$

$$AUR = (OUR_2 - ERR)/3.42 \quad (2)$$

$$NUR = (OUR_3 - ERR)/1.14 \quad (3)$$

式中:OUR₁、OUR₂、OUR₃分别为1号、2号、3号反应器的氧利用速率。

释磷和吸磷速率的测定:活性污泥释磷和吸磷速率采用间歇实验法测定。从氧化沟取1000mL污泥置于完全混合式反应器中,曝气1h,然后用经脱氧处理的自来水淘洗两次,加入无水乙酸钠(100mg/L,以COD计),通入氮气以保证反应器处于厌氧状态,厌氧反应时间为4.5h。关闭氮气,开始曝气(空气流量为60L/h),保持反应器内DO浓度在2mg/L以上,好氧反应时间为5h。在不同时间点取样,测定磷酸盐和乙酸浓度,实验结束后测定混合

液的MLVSS,依据磷和乙酸浓度的历时变化,计算污泥的厌氧释磷速率、乙酸吸收速率、吸收单位乙酸的释磷量和好氧吸磷速率。

荧光原位分析:FISH分析采用Aumman等的方

法^[2-3]。探针的16S rRNA序列及目标微生物见表1。杂交完成后利用激光共聚焦显微镜确定经荧光探针杂交的目标细菌数占同一显微镜视野中微生物数的百分比。

表1 荧光原位杂交实验中所用探针
Tab.1 Probes used in FISH experiments

项目	探针	标记菌属	探针序列(5'-3')
总细菌(EUB)	EUB338	<i>Eubacteria</i>	GCTGCCTCCCGTAGGAGT
	EUB338-Ⅱ	<i>Planctomycetales</i>	GCAGCCACCCGTAGGTGT
	EUB338-Ⅲ	<i>Verrucomicrobiales</i>	GCTGCCACCCGTAGGTGT
聚磷菌(PAO)	PAO462	<i>Accumulibacter</i>	CCGTGATCTACWCAGGGTATTAAC
	PAO651	<i>Accumulibacter</i>	CCCTCTGCCAAACTCCAG
	PAO846	<i>Accumulibacter</i>	GTTAGCTACGGCACTAAAAGG
聚糖菌(GAO)	GB	<i>Competibacter</i>	CGATCCTCTAGCCCACT
氨氧化菌(AOB)	Nso1225	Ammonia-oxidizing bacteria	CGCCATTGTATTACGTGTGA
	NEU	<i>Nitrosomonas</i> spp.	CCCCTCTGCTGCACTCTA
	Cluster6a192	<i>Nitrosomonas oligotropha</i> lineage	CTTTCGATCCCCTACTTTCC
亚硝酸盐氧化菌(NO _B)	Ntspa712	Phylum <i>Nitrospirae</i>	CGCCTTCGCCACCGGCCCTTCC
	Ntspa662	Genus <i>Nitrospira</i>	GGAATTCGCGCTCCTCT
	NIT3	Genus <i>Nitrobacter</i>	CCTGTGCTCCATGCTCCG

2 结果与讨论

2.1 氧化沟型A²/O工艺的脱氮除磷效果

该污水处理厂自2013年投入运行以来,各项水质指标均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。自2018年7月开始试行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水排放标准。2018年10月—2019年2月期间,该氧化沟型A²/O工艺及同时期西安市已运行A²/O工艺

的主要进出水水质见表2。可以看出,两种工艺出水COD、NH₄⁺-N和TP浓度分别小于30、3和0.3 mg/L,均达到了地表水Ⅳ类水质的要求。而对于出水TN,氧化沟型A²/O工艺和典型A²/O工艺对TN的去除量分别达到40.05和36.06 mg/L。可见,氧化沟型A²/O工艺和A²/O工艺对有机物和磷的去除效果相当,但前者对TN的去除量高于后者,表明氧化沟型A²/O工艺更具脱氮优势。

表2 进出水水质

Tab.2 Quality of influent and effluent

mg·L⁻¹

项目		COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	SS
氧化沟型A ² /O工艺	进水	339.23±122.66	45.85±11.90	50.59±12.15	4.39±0.94	241.19±120.78
	出水	19.19±4.15	0.54±0.36	10.54±1.94	0.20±0.07	6.60±1.30
A ² /O工艺	进水	249.19±37.63	36.12±5.38	44.36±4.87	3.86±0.68	163.77±37.84
	出水	17.85±3.15	0.32±0.26	8.30±1.26	0.19±0.05	4.43±0.56

2.2 氧化沟型A²/O工艺脱氮性能评价

典型水质条件下,氧化沟型A²/O工艺中各操作单元出水氮磷组分的沿程变化如图2所示。可知,进水TN为37.64 mg/L,由于污泥回流的稀释作用(污泥回流比为90%),厌氧池出水TN为22 mg/L。缺氧池内,由于混合液回流稀释和反硝化作用,TN降至12.52 mg/L。由于硝化作用,好氧池出水氨氮浓度由

9.78 mg/L降为3.45 mg/L,减少了6.33 mg/L;而硝态氮由2.50 mg/L升高为5.24 mg/L,仅增加了2.74 mg/L,氨氮的降低与硝态氮的增加严重不匹配。同时,总氮由12.52 mg/L降至8.78 mg/L,说明好氧池存在同步硝化反硝化反应,其对TN的去除贡献率为41.77%。这一特征类似于氧化沟中的脱氮过程,是氧化沟型A²/O工艺与典型A²/O工艺的区别。

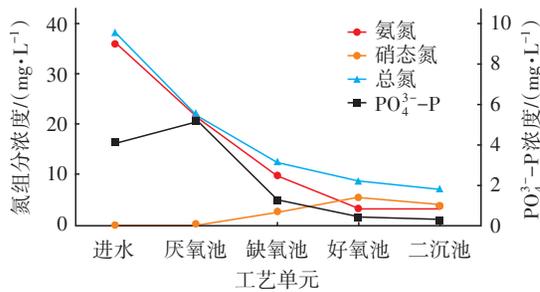


图2 各操作单元出水氮磷组分的沿程变化

Fig.2 Change of nitrogen and phosphorus concentrations along the process

氧化沟型A²/O工艺与典型A²/O工艺存在差异的原因主要与曝气方式有关。氧化沟型A²/O工艺中好氧池采用微孔曝气,曝气器采用集中分组布置,曝气区与非曝气区的比值为4:6,而典型A²/O工艺中好氧区全部为曝气区,这为进行同步硝化反硝化创造了条件。为保证混合液在氧化沟中的循环,必须设置推流器,该污水处理厂每座Carrousel氧化沟设置8台5 kW大叶轮(直径为2.5 m)旋流推进器,折合功率为5.7 W/m³,小于一般氧化沟中的推进功率,但并未发生污泥沉淀,说明部分微孔曝气氧化沟中的流态更有利于污泥悬浮。部分曝气使得氧化沟中污泥絮体的体积明显大于典型A²/O工艺中好氧池的,为氧化沟中的同步硝化反硝化创造了条件,依据沿程氮的变化进行氮平衡分析,好氧段氧化沟对总氮的去除贡献率为20%~40%。

氧化沟型A²/O工艺中的内回流(混合液回流)可利用好氧池出水口与缺氧池进水口之间的液位差自动回流,由于回流水渠的横断面设计较大(宽×深=1.5 m×5.8 m),即使在最小混合液回流速度下(过流阻断阀门关闭,此时的实测流速为0.148 m/s),混合液回流比也高达550%。当达到最大流速时(过流阻断阀门打开,此时的实测流速为0.177 m/s),混合液回流比为650%,即使如此,混合液在回流水渠中仍存在污泥沉淀的风险,需定期进行清理。这一内回流比远高于目前A²/O工艺的内回流比(一般为300%),但远低于缺氧好氧一体式氧化沟的回流比。目前有关氧化沟型A²/O工艺的内回流比尚无相关规范,但与典型A²/O工艺相比,氧化沟型A²/O工艺的内回流比明显偏大,从而造成缺氧池溶解氧浓度较高,一般为0.2 mg/L,局部高达0.5 mg/L,使得缺氧池的脱氮效率降低。因此,如何通过合理的工程措施降低内回流比、减少由于内回流带入缺氧池的

溶解氧、提高缺氧池的脱氮效率,是未来推广应用需要解决的问题。

图3为氧化沟型A²/O工艺污泥硝化活性的变化。可知,氧化沟型A²/O工艺污泥的硝化性能良好,AOB的活性最高为1 mg/(gVSS·h),最低为0.80 mg/(gVSS·h),平均为0.90 mg/(gVSS·h);NOB的活性最高为1.57 mg/(gVSS·h),最低为1.34 mg/(gVSS·h),平均为1.48 mg/(gVSS·h),NOB平均活性约为AOB平均活性的1.64倍。而同时期的A²/O工艺中,AOB和NOB的平均活性分别为0.61 mg/(gVSS·h)和1.93 mg/(gVSS·h),NOB平均活性约为AOB平均活性的3.16倍,这说明氧化沟型A²/O工艺中的硝化活性和A²/O工艺相当。随着生物反应池温度的降低,AOB和NOB活性比较稳定,说明氧化沟型反应器对温度有较好的适应性。

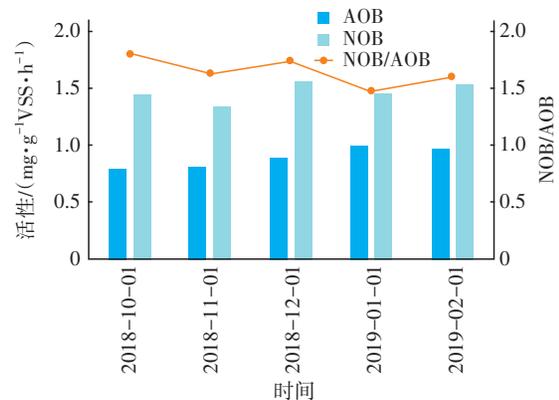
图3 氧化沟型A²/O工艺中污泥硝化活性的变化

Fig.3 Changes of nitrification activity of sludge in oxidation ditch based A²/O process

2.3 氧化沟型A²/O工艺除磷性能评价

氧化沟型A²/O工艺中磷酸盐的沿程变化表明,进水PO₄³⁻-P浓度为4.09 mg/L,由于污泥回流的稀释作用,厌氧池实际进水浓度约为2.15 mg/L,而厌氧池出水PO₄³⁻-P浓度为5.11 mg/L,说明存在着明显的释磷现象,经缺氧处理后,由于混合液的稀释和反硝化聚磷作用,出水PO₄³⁻-P浓度大幅降低,经好氧处理后PO₄³⁻-P浓度小于0.5 mg/L,说明氧化沟型A²/O工艺的除磷特性与A²/O工艺相同。

国际水协会推荐的《生物除磷设计与运行指南》提出,释磷和吸磷速率是评价生物除磷系统的重要参数,若释磷或吸磷速率<3 mg/(gVSS·h),则除磷能力处于较差水平;释磷或吸磷速率在3~7 mg/(gVSS·h),则除磷能力较好;释磷或吸磷速率>7 mg/

(gVSS·h)时,则除磷能力极好。通过对该污水处理厂污泥的厌氧释磷速率、好氧吸磷速率和乙酸吸收速率进行测定,发现氧化沟型A²/O工艺有较好的除磷特性(见图4),污泥厌氧释磷速率最高为7.68 mg/(gVSS·h),最低为5.16 mg/(gVSS·h),平均为7.13 mg/(gVSS·h)。好氧吸磷速率最高为6.39 mg/(gVSS·h),最低为2.74 mg/(gVSS·h),平均为5.58 mg/(gVSS·h)。而在同时期西安已运行的A²/O工艺中,平均厌氧释磷和好氧吸磷速率分别为7.32 mg/(gVSS·h)和6.16 mg/(gVSS·h),表明氧化沟型A²/O工艺的释磷、吸磷活性与A²/O工艺相当。

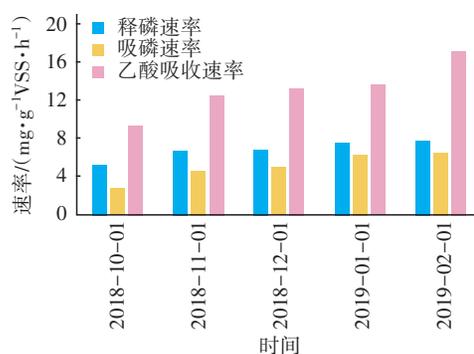


图4 氧化沟型A²/O工艺中污泥的聚磷菌活性变化

Fig.4 Change of PAO activity of sludge in oxidation ditch based A²/O process

虽然氧化沟型A²/O工艺污泥中聚磷菌的活性及含量与典型A²/O工艺差异不大,但实际上好氧池出水磷浓度却较后者略高,即氧化沟型A²/O工艺的除磷能力较典型A²/O工艺低。出现该现象的原因尚不清楚,但由于氧化沟型A²/O工艺内回流比较高,使得缺氧池和好氧池的流态接近于完全混合式,导致部分聚磷菌在缺氧池和好氧池中的停留时间过短,或部分停留时间过长,而无论停留时间过长或过短都将导致聚磷菌的增殖发生缺陷,造成除磷能力下降,使出水总磷浓度超标。为了使出水总磷满足地表水准IV类标准,该污水厂采用在生物池出水中投加除磷剂,保证出水水质满足排放要求。

2.4 污泥中功能菌的群落结构

典型污泥样品中功能菌(硝化菌、聚磷菌和聚糖菌)的菌群结构分析结果表明,在硝化菌构成中,NOB的数量明显高于AOB,前者占总细菌(EUB)的比例为4.69%,而后的占比为2.99%,这一结果与城市污水处理厂营养物去除系统中的种群结构相

似^[4]。较高的NOB数量导致NOB的活性高于AOB,这一结果与硝化活性的测定结果相一致,正是由于较高的NOB占比,保证了NOB较高的活性,从而确保了出水NO₂⁻-N浓度处于极低的水平。

污泥中可检测到大量聚磷菌,其占总细菌的比例约为10%。较高的聚磷菌比例使得该污水厂污泥具有较好的释磷和吸磷活性。同时,检测发现污泥中聚糖菌(GAO)的比例很小(<0.5%),说明该污水厂厌氧池的性能良好。在线ORP测定仪显示,ORP值小于-250 mV,较低的ORP为聚磷菌厌氧释磷和吸收挥发性脂肪酸创造了较好的条件,从而导致GAO的竞争力下降,这一结果也与释磷和吸磷速率的测定结果相一致。

3 结论

氧化沟型A²/O工艺具有较高的脱氮除磷性能,总氮去除率高于A²/O工艺,而磷的去除能力与A²/O工艺相当。其好氧池存在明显的同步硝化反硝化现象,这是该工艺脱氮效率高的原因。氧化沟型A²/O工艺中的聚磷菌含量、活性和除磷能力与典型A²/O工艺相近,其作为一种新工艺具有推广应用的價值。

参考文献:

- [1] BARNARD J L. The development of nutrient-removal processes [J]. Water and Environment Journal, 2007, 12(5): 330-337.
- [2] AMANN R I. *In situ* identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes[J]. Molecular Microbial Ecology Manual, 1995. DOI:10.1007/978-94-011-0351-0_23.
- [3] AMANN R I, LUDWIG W, SCHLEIFER K H. Phylogenetic identification and *in situ* detection of individual microbial cells without cultivation [J]. Microbiological Reviews, 1995, 59(1): 143-169.
- [4] YAO Q, PENG D C. Nitrite oxidizing bacteria (NOB) dominating in nitrifying community in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants [J]. AMB Express, 2017, 7(1): 25-30.

作者简介:崔涛(1978-),男,陕西西安人,本科,工程师,研究方向为污水生物处理与污泥处置技术。

E-mail:314342647@qq.com

收稿日期:2020-11-30

修回日期:2021-01-25

(编辑:任莹莹)