

两级 A/O 工艺处理生活污水脱氮除磷试验

张杰¹, 刘年丰², 王琪², 丁峰³

(1. 黄石理工学院, 湖北 黄石 435003; 2. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 武汉 430074;

3. 贺州市环境监测站, 广西 贺州 542800)

摘要: 针对传统 A²/O 工艺存在的泥龄矛盾, 将脱氮和除磷分置于前后 2 套不同的 A/O 系统中, 第一级 A/O 采用活性污泥法除磷; 第二级 A/O 采用生物膜法脱氮。以生活污水为处理对象进行试验研究。结果表明, 在泥龄为 6 d、水温为 22 ~ 28 ℃, 进水 NH₃-N、TP、COD 的质量浓度分别为 40 ~ 70、2.0 ~ 6.0、150 ~ 320 mg/L 条件下, 出水 NH₃-N、TP、COD 的平均质量浓度分别为 5.9、1.0、40 mg/L, 均达到了城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)中的一级排放标准, 其去除率分别为 82.5%、69.7%、83.1%。

关键词: 两级 A/O 工艺; A²/O 工艺; 生物脱氮除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2455(2007)01-0035-05

Nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage by two-stage A/O process

ZHANG Jie¹, LIU Nian-feng², WANG Qi², DING Feng³

(1. Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Hezhou Environmental Monitoring Station, Hezhou 542800, China)

Abstract: To solve the SRT contradiction existed in the traditional A²/O process, technologies for nitrogen removal and phosphorus removal were used separately in two different A/O systems. Phosphorus was removed in the first A/O process with activated sludge technology, and then, nitrogen was removed in the second A/O process with biological film technology. A study was carried out with domestic sewage as treatment object, the results showed that, under the condition that, the SRT was 6 d, the temperature was 22 - 28 ℃, the mass concentration of NH₃-N, TP, COD in influent water were 40 - 70, 2.0 - 6.0, 150 - 320 mg/L respectively, the mass concentration of NH₃-N, TP, COD in effluent water were 5.9, 1.0, 40 mg/L in average respectively, which met the specification for grade 1 in Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant(GB 18918-2002), the removal rate of the above three pollutants were 82.5%, 69.7%, 83.1% respectively.

Keywords: two-stage A/O process; A²/O process; nitrogen and phosphorus removal by biological process

传统 A²/O(Anaerobic-Anoxic-Oxic) 工艺由于能在同一系统中完成脱氮除磷功能, 流程简单, 运行管理方便, 因而得到广泛应用, 是目前生物脱氮除磷的主流工艺^[1]。但面临着碳源、硝酸盐、泥龄等方面的矛盾, 脱氮除磷效果难以同步提高。其结果往往是脱氮超过了标准, 除磷却达不到要求^[2]。

鉴于生物脱氮和除磷是由不同的微生物执行的生化过程, 它们对环境因素的要求各异; 为分别满足除磷菌、硝化菌、反硝化菌各自的生长条件及对

泥龄的不同要求, 将传统 A²/O 工艺改为两级 A/O 工艺, 并运用该工艺进行生活污水处理试验, 检验脱氮除磷的效果。

1 试验装置和方法

1.1 装置及工艺流程

试验装置及工艺流程见图 1, 各构筑物有效容积或尺寸见表 1。

收稿日期: 2006-05-29; 修回日期: 2006-10-30

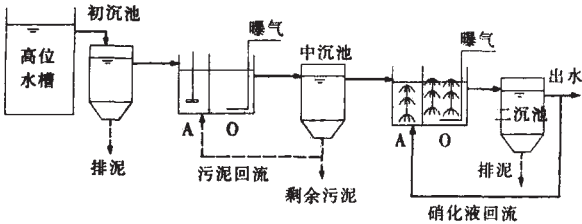


图 1 两级 A/O 工艺试验装置

Fig. 1 Test equipments of two-stage A/O process

表 1 构筑物有效容积或尺寸

Tab. 1 Effective capacity and size of constructions

高位水槽	初沉池	第一级 A/O		中沉池	第二级 A/O		二沉池
		A1 池	O1 池		A2 池	O2 池	
50 L	D = 380 mm H = 500 mm	4.5 L	13.5 L	36 L	9 L	27 L	D = 380 mm H = 500 mm

1.2 工艺特点

硝化菌繁殖速度慢，世代时间较长，对应的泥龄较大(一般建议大于 11 d)；聚磷菌多为短世代微生物，泥龄很短。此外，生物除磷的唯一渠道是排除剩余污泥。为了保证系统的除磷效果就不得不维持较高的污泥排放量，系统的泥龄也不得不相应地降低。显然长泥龄对脱氮有利，而短泥龄对除磷有利。针对泥龄矛盾，将脱氮除磷过程分开，使不同泥龄的微生物居于前后两级是一种有效途径^[3]。

2 套 A/O 装置前后串联，各自回流，相互独立。通过选定不同的工艺参数，使两级 A/O 系统分别承担不同的功能。

第一级 A/O 采用活性污泥工艺，其主要功能是除 COD 和磷。如果系统泥龄较短，污泥中的硝化菌会流失，硝化反应减弱，回流污泥中也就不会或很少携带 NO₃⁻ 至厌氧池^[4]，这对除磷是有利的。本阶段的泥龄为优化除磷效果，拟采用短泥龄运行。

第二级 A/O 采用生物膜工艺，其主要功能是脱氮。生物膜法适合世代时间长的硝化菌生长，在硝化池中添加载体，可保持硝化菌的高浓度提高硝化效果；同样，在缺氧段添加载体，可提高反硝化菌浓度增强脱氮效果^[4]。考虑到硝化菌的增殖速率是除磷菌的一半(20 条件下)，设计第二级 A/O 容积为第一级 A/O 容积的 2 倍。使用的组合填料单挂容积为 1.26 L，A2 池和 O2 池共 8 挂，填料容积约 10 L。组合填料容积为池容积的 30%。

1.3 试验用水

试验用水为某教学楼生活污水，其水质见表 2。从表 2 可以得知： $m(\text{COD})/m(\text{TN}) = 3 \sim 3.5$ ， $m(\text{COD})/m(\text{TP}) = 53 \sim 75$ 。碳氮比偏低，不利于反硝化脱氮。因此第一级 A/O 应尽量减少 COD 的消耗，可以采取适当降低 O1 池中 DO 的方法。

表 2 试验污水水质

Tab. 2 Influent water quality during the experiment

$\rho(\text{COD}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_3 \cdot \text{N}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TN}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值	水温 /
150 ~ 320	2.0 ~ 6.0	40 ~ 70	50 ~ 90	7 ~ 8	22 ~ 28

1.4 污泥培养

以武汉水质净化厂活性污泥作为菌种。

第一级 A/O 活性污泥培养：在试验污水中添加适当磷盐和葡萄糖后投入 A1 池，溢流进入 O1 池，再流进中沉池。沉淀的活性污泥送回 A1 池，培养期间不排泥。普通活性污泥中磷的质量分数为 2% ~ 4%(干基)，而富磷活性污泥中的磷的质量分数为 3% ~ 7%(干基)，大大高于前者^[5]，因此可定期检测污泥的磷量来判断是否含除磷菌。启动 1 个月后，监测污泥 TP 的质量分数达到 3% 以上，表明污泥的除磷菌已培养成功。

第二级 A/O 生物膜培养：采用活性污泥挂膜法。在试验污水中添加适当铵盐、硝酸盐和葡萄糖后投入 A2 池，溢流进入 O2 池，再流进二沉池，经沉淀后用回流泵送回 A2 池。培养 50 d 以后，O2 池氨氮去除率大于 60%，同时 A2 池中 TN 的去除率大于 60%，表明硝化菌和反硝化菌启动完成。

2 试验结果与讨论

2.1 第一级 A/O 去除 COD 及脱氮除磷效果

试验过程研究以下因素对除磷、除 COD 效果的影响。试验工况条件见表 3。

泥龄。确定 6、5、3 d 三种工况，其值可通过排放剩余污泥量来控制。

回流比。在一般的 A²/O 工艺中，无硝化的活性污泥法污泥回流比 R 不超过 100%，通常 R 不超过 80%^[2]。在本试验中选择 30%、50%、70%。

HRT。吸磷厌氧池最小实际 HRT(包括回流污泥在内)不小于 0.75 h，一般介于 0.75 ~ 1.0 h。HRT 的大小可根据进水量来控制。

DO。考虑到第二级 A/O 反硝化过程要消耗

表 3 第一级 A/O 工况条件
Tab. 3 Running conditions of first stage A/O process

工况 序号	泥龄/ d	进水量/ (L·h ⁻¹)	回流比/ %	ρ(MLSS)/ (mg·L ⁻¹)	污泥负荷/(kg[COD]· kg ⁻¹ [MSLL]·d ⁻¹)	ρ(DO)/(mg·L ⁻¹)		HRT/h	
						A1 池	O1 池	A1 池	O1 池
1	6	4.6	30	1 850	0.08 ~0.16	< 0.5	1.8 ~2.0	0.75	2.25
2	5	4.0	50	2 700	0.06 ~0.11	< 0.5	1.8 ~2.0	0.75	2.25
3	3	2.6	70	3 100	0.06 ~0.11	< 0.5	1.8 ~2.0	1.0	3.0

碳源, 第一级 A/O 应不消耗过多 COD, 控制 O1 池 DO 的质量浓度在 1.8 ~2.0 mg/L。

2.1.1 除 COD 效果

图 2 显示工况 1 ~3 条件下第一级 A/O 对 COD 的去除效果。

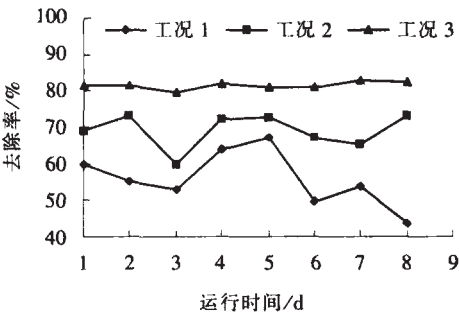


图 2 COD 去除效果
Fig. 2 Removal rate of COD

3 种工况下 COD 的平均去除率分别为 60.0%、69.2%、81.2%，低于一般好氧活性污泥法工艺的去除率，这主要是因为 O1 池 DO 的质量浓度控制在 1.8 ~2.0 mg/L，限制了好氧异养菌的新陈代谢。

2.1.2 除氨氮效果

图 3 显示工况 1 ~3 条件下第一级 A/O 对氨氮的去除效果。

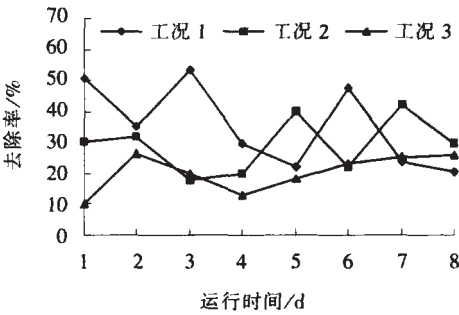


图 3 氨氮去除效果
Fig. 3 Removal rate of NH₃-N

3 种工况下氨氮的平均去除率分别为 37.7%、29.5%、19.6%，去除率均很低，即硝化率低下，这主要是因为泥龄短，不利于硝化菌生长繁殖。

2.1.3 除磷效果

图 4 ~图 6 显示工况 1 ~3 条件下第一级 A/O 对 TP 的去除效果。

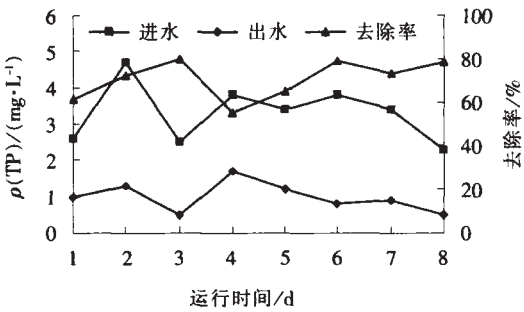


图 4 泥龄为 6 d 时 TP 的去除效果
Fig. 4 Removal effect of TP when SRT was 6 d

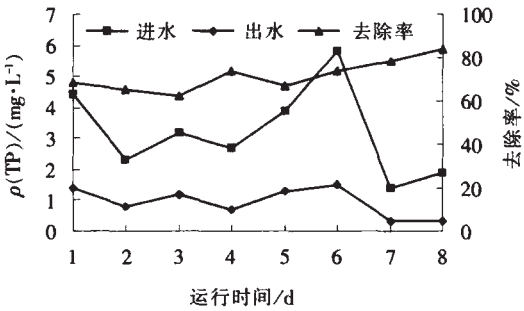


图 5 泥龄为 5 d 时 TP 的去除效果
Fig. 5 Removal effect of TP when SRT was 5 d

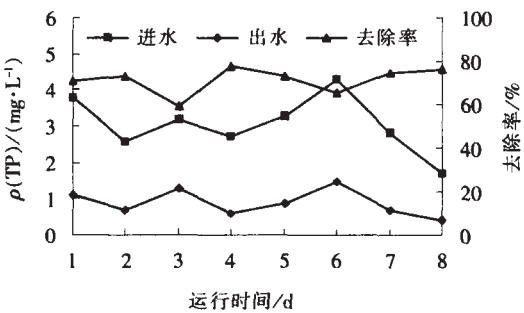


图 6 泥龄为 3 d 时 TP 的去除效果
Fig. 6 Removal effect of TP when SRT was 3 d

工况 1 条件下, 进、出水 TP 的平均质量浓度分别为 3.3、1.0 mg/L, 平均去除率为 69.7%。虽然去除率不高, 但是由于进水 TP 不高, 出水的

TP在大多数情况下是能够达到城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918- 2002)中的一级排放标准的。此外试验期间水温常在 22 ~28℃，在此水温条件下可能泥龄偏长，维持较长的泥龄使系统剩余污泥排量较少，从而影响生物除磷效果。

工况 2 条件下，进、出水 TP 的平均质量浓度分别为 3.1、0.9 mg/L，平均去除率为 70.9%，略高于工况 1。一方面回流量的提高增加了除磷菌浓度，另一方面增加了系统的排量，缩短了污泥龄，随泥排出的磷也必然多于工况 1。

表 4 第二级 A/O 工况条件
Tab. 4 Running conditions of second stage A/O process

工况 序号	进水量 / (L·h ⁻¹)	回流比 / %	容积负荷 / (g[COD]·m ⁻³ ·d ⁻¹)	ρ(DO)/(mg·L ⁻¹)		HRT/h	
				A2 池	O2 池	A2 池	O2 池
1	2.25	100	1 486	<0.5	3.0~4.0	2.0	6.0
2	1.5	200	704	<0.5	3.0~4.0	2.0	6.0
3	1.2	300	480	<0.5	3.0~4.0	2.0	6.0

注：第二级 A/O 系统的进水为中沉池出水、出水为二沉池进水；容积负荷中的 m³系指每立方米填料。

回流比。在一般的 A²/O 工艺中，混合液回流比 R = 100% ~300%，在本试验中选择 100%、200%、300%。

HRT。对于活性污泥 A/O 脱氮工艺，一般反硝化 HRT 在 2 h 以内，硝化 HRT 在 6 h 以上，即两者之比以 1: 3 为宜。

DO。降解 1 kg BOD 需氧不超过 1.4 kg，而硝化 1 kg 氨氮需氧 4.57 kg，可见硝化工艺比去除有机物时需要大得多的反应池容积和供氧量^[2]。该阶段控制 DO 的质量浓度 O2 池在 3.0 ~4.0 mg/L，A2 池在 0.5 mg/L 以下。

2.2.1 除 COD 效果

3 种工况条件下第二级 A/O 池 COD 进水的平均质量浓度依次为 104、70、44 mg/L，出水分别为 40、27、36 mg/L，COD 的平均去除率分别为 61.5%、61.4%、21.4%，结合第一级 A/O 系统的平均去除率 60.0%、69.2%、81.2%，因此总平均去除率分别为 83.1%、88.1%、84.8%。

2.2.2 氨氮去除效果

图 7 ~图 9 显示工况 1、工况 2、工况 3 条件下第二级 A/O 对氨氮的去除效果。

工况 1 条件下，进、出水 NH₃-N 的平均质量浓度分别为 21.0、5.9 mg/L，平均去除率为 71.9%，结合第一级 A/O 系统(去除率 37.7%)，总

工况 3 条件下，进、出水 TP 的平均质量浓度分别为 3.2、0.9 mg/L，平均去除率为 71.9%，略高于其它 2 种工况，但提高幅度很小。表明本工艺处理含磷较低的生活污水，70% 的除磷率是阈值，再缩短泥龄及提高回流比对除磷的意义不大。

2.2 第二级 A/O 去除 COD、脱氮效果

生物膜法的泥龄很长且无法人为调整，故该阶段不选泥龄为运行参数。由于第一级 A/O 出水 TP 的质量浓度在 1 mg/L 以下，因此本阶段试验只研究去除 COD 及脱氮效果。工况条件见表 4。

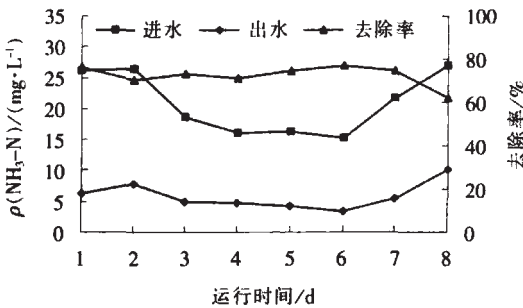


图 7 回流比为 100% 时氨氮的去除效果
Fig. 7 Removal effect of NH₃-N when reflux ratio was 100%

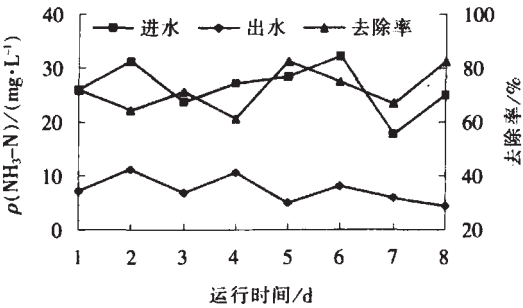


图 8 回流比为 200% 时氨氮的去除效果
Fig. 8 Removal effect of NH₃-N when reflux ratio was 200%

平均去除率为 82.5%。从第二级 A/O 去除率远高于第一级 A/O 去除率可知，第二级 A/O 系统中存在的硝化菌浓度远高于第一级 A/O 系统，说明生物填料对于固定硝化菌是有效的。

工况 2 条件下，进、出水 NH₃-N 的平均质

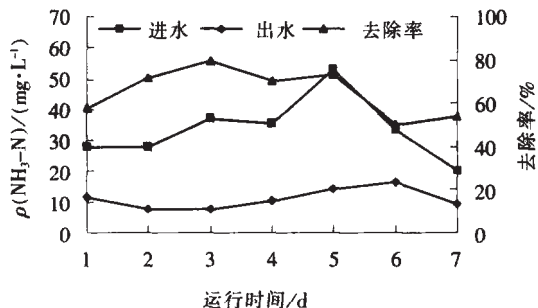


图9 回流比为300%时氨氮的去除效果

Fig. 9 Removal effect of $\text{NH}_3\text{-N}$ when reflux ratio was 300%

量浓度分别为 26.5、7.4 mg/L , 平均去除率为

72.1%, 结合第一级 A/O 系统(去除率 29.5%), 总平均去除率为 80.3%。提高回流比以后, 硝化率也随之提高。

工况 3 条件下, 进、出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均质量浓度分别为 31.3、11.1 mg/L , 平均去除率为 64.3%, 结合第一级 A/O 系统(去除率 19.6%), 总平均去除率为 71.3%。回流比提高到达 300% 以后硝化率呈下降趋势, 可能是水力负荷过大引起的。

2.3 工艺参数优化

上述工况条件下的试验运行参数及各污染物去除率情况见表 5。

表 5 工艺参数及去除率
Fig. 5 Technical parameters and removal rates

运行条件	A1/O1 工艺参数					A2/O2 工艺参数			平均去除率/%		
	泥龄/d	HRT _总 /h	R/%	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{MLSS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	HRT _总 /h	R/%	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	COD	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$
1	6	3	30	1.8 ~ 2.0	1 850	8	100	3.0 ~ 4.0	83.1	69.7	82.5
2	5	3	50	1.8 ~ 2.0	2 700	8	200	3.0 ~ 4.0	88.1	70.9	80.3
3	3	4	70	1.8 ~ 2.0	3 100	8	300	3.0 ~ 4.0	84.8	71.9	71.3

从表 5 可以看出, 第 1 种运行条件下硝化率最高, COD 去除率和除磷效率较其它 2 种工况略低, 但出水 COD 和 TP 还是能够达到城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)中的一级排放标准的。更重要的是该条件下的回流比最低, 意味着能耗最低。因此在本试验中, 工况 1 是最优的。

3 结论

2 套 A/O 装置前后串联, 各自回流, 相互独立。第一级 A/O 运用活性污泥工艺除磷, 选定较短的泥龄和水力停留时间, 能有效抑制硝化菌驻留于系统, 避免硝酸盐对厌氧释磷的影响; 第二级 A/O 运用生物膜工艺脱氮, 使得硝化菌附着在填料上, 延长了泥龄, 从而取得良好的硝化效果。

两级 A/O 工艺系统在有效去除 COD 的同时, 可以较好解决生物法同步脱氮除磷泥龄矛盾。在试验条件下已进行的各个工况的运行中, 系统出水的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 指标达到或接近城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)中的一级排放标准。

试验条件下, 优化的运行参数为: 第一级 A/O 的泥龄 6 d、MLSS 的质量浓度为 1 850 mg/L 、回流比 30%、总停留时间 3 h、溶解氧的质量浓度

为 1.8 ~ 2.0 mg/L ; 第二级 A/O 的回流比 100%、总停留时间 8 h、溶解氧的质量浓度为 3.0 ~ 4.0 mg/L 。

原水的碳氮比偏低, 造成反硝化效率低。可以考虑适当外加碳源补充。

系统的构筑物较多, 流程较长, 管理难度较大。

参考文献:

- [1] 高廷耀, 顾国维. 水污染控制工程(下册)(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [2] 周震. 活性污泥工艺简明原理及设计计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 华光辉, 张波. 城市污水生物除磷脱氮工艺中的矛盾关系及对策[J]. 给水排水, 2000, 26(12): 1-2.
- [4] 李军, 杨秀山, 彭永臻. 微生物与水处理工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [5] 曹国民, 赵庆祥, 高广达. 城市污水 A²/O 法除磷脱氮技术研究[J]. 江苏石油化工学院学报, 1995, 7(2): 9-15.

作者简介: 张杰(1967-), 男, 湖北黄石人, 讲师, 主要从事污水处理工程教学与研究工作, (电话)0714-6367636(电子信箱)zj-1967@163.com.