

# Anarwia 工艺处理猪场废水节能效果的研究

邓良伟<sup>1,2</sup>, 郑平<sup>1\*</sup>, 陈子爱<sup>2</sup>

(1. 浙江大学环境工程系, 杭州 310029; 2. 农业部沼气科学研究所, 成都 610041)

**摘要:** 分析比较了厌氧-加原水-间隙曝气(Anarwia)工艺、SBR(序批式反应器)以及厌氧-SBR 工艺处理猪场废水的效果。比较三种工艺处理效果表明: 厌氧-SBR 工艺处理猪场废水, 污染物去除效率低, 出水污染物浓度高, 不适于猪场废水的处理。Anarwia 工艺处理效果与 SBR 工艺相当, 污染物去除率高, 出水 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 浓度低。在此基础上, 以一个日处理 1200 t 猪场废水处理工程为例, 分析比较了 Anarwia 与 SBR 工艺的能耗。就能量消耗有关的工艺参数——污泥量和需氧量而言, Anarwia 工艺分别比 SBR 工艺减少 16.4% 和 95.9%, 此外 Anarwia 工艺每天可产生 2784 m<sup>3</sup> 沼气。Anarwia 工艺增加了废水提升能耗, 但减少了曝气、污泥处理、滗水和搅拌的能耗, 结果 Anarwia 工艺总电耗比 SBR 工艺低 81.0%。Anarwia 工艺产生的沼气用于发电能完全补偿消耗的能量, 并有剩余。

**关键词:** 猪场废水; 厌氧; 序批式反应器; 厌氧-加原水-间隙曝气; 能耗

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)12-0172-04

邓良伟, 郑平, 陈子爱. Anarwia 工艺处理猪场废水节能效果的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 172-175.

Deng Liangwei, Zheng Ping, Chen Zi'ai. Efficiency of energy-saving of anaerobic-adding raw wastewater-intermittent aeration(Anarwia) process for treatment of piggery wastewater[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 172-175. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

猪场废水是一种高氨氮高有机物废水, 蕴含大量能源。一般采用厌氧消化工艺进行前处理, 削减有机污染物负荷, 同时回收能源(沼气)。对于厌氧消化出水, 各地通常因地制宜, 采取不同的处理方法。规模大或土地紧缺的地区, 主要采用好氧工艺处理厌氧消化出水<sup>[1]</sup>。在猪场废水厌氧处理过程中, 由于 COD 与 BOD<sub>5</sub>, 有机污染物与氮、磷降解不同步, 厌氧出水可生化性(BOD<sub>5</sub>/COD 比)以及 BOD<sub>5</sub>/TN 比降低, 致使厌氧消化液好氧后处理过程中 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 去除效果差, 出水浓度较高<sup>[2-6]</sup>。虽然添加外源碱性物质<sup>[5]</sup>或外源有机物质<sup>[7]</sup>可以改善厌氧消化出水好氧后处理效果, 但财力(费用)、物力(设备)和人力(工作量)消耗也随之增大, 因此, 常规厌氧-好氧工艺不适用于处理高氨氮高有机物浓度的猪场废水。基于此, 大多数研究者直接采用好氧工艺处理猪场废水<sup>[8-11]</sup>, 虽然取得了较好的处理效果, 但由于猪场废水的高浓度特性, 直接进行好氧处理必然导致投资、处理能耗和运行费用增加。为了降低处理能耗和运行费用, 邓良伟等<sup>[12,13]</sup>采用在厌氧出水中添加猪场废水的方法, 显著改善了猪场废水厌氧出水好氧后处理效果。在此基础上, 建立了“厌氧-加原水-间歇曝气”(Anarwia)工艺, 即大部分猪场废水先进行厌氧消化, 再与小部分未经厌氧消化的猪场废水混合, 采用序批式

反应器(SBR)进行好氧后处理。挥发性有机酸(VFA)是反硝化过程良好的电子供体<sup>[14]</sup>, 由于猪场废水原水含有高比例的挥发性有机酸, 而其厌氧出水则含量较少<sup>[15]</sup>, 因此厌氧出水中添加猪场废水原水, 可以促进反硝化脱氮效果, 并增加碱度, 不需要添加外源碱性物质或外源有机物质就能维持处理系统稳定<sup>[13]</sup>, 显然 Anarwia 工艺具有优越性。在高氨高有机物浓度废水处理过程中能耗很大(电费占总处理费用的 65% 以上<sup>[16]</sup>), 分析评估 Anarwia 工艺处理猪场废水的节能效益, 对该工艺的推广应用具有重要意义。

## 1 几种工艺对猪场废水处理效果的比较

杭州灯塔养殖总场废水处理工程采用的工艺就是 Anarwia 工艺, 该猪场存栏 12 万头, 排放废水 2000~3000 m<sup>3</sup>/d。处理装置中, 厌氧消化池 6000 m<sup>3</sup>, SBR 池 7200 m<sup>3</sup><sup>[13]</sup>。试验运行结果见表 1。为了便于说明问题, 表 1 也列出了“厌氧-SBR 工艺”和 SBR 工艺直接处理猪场废水的生产性试验结果。Su J J 等<sup>[3]</sup>在台湾省新竹县一个存栏 500 头的猪场进行了厌氧-SBR 处理猪场废水的生产性实验。该工程日处理猪场废水 9.67~16.1 m<sup>3</sup>/d, 建有 576 m<sup>3</sup> 的厌氧处理装置和 49 m<sup>3</sup> 的 SBR。Piccinini 等<sup>[10]</sup>报道了意大利摩德纳市的 Anna 猪场采用 SBR 直接处理猪场废水的工程运行结果。该工程处理猪场废水 150 m<sup>3</sup>/d, 猪场废水经固液分离后直接进入 2 个 SBR 池进行处理。每个 SBR 池容 1250 m<sup>3</sup>, 总有效池容 2500 m<sup>3</sup>, HRT 16.6 d。

从表 1 可以看出, 尽管“厌氧-SBR”处理猪场废水对 COD 的去除取得了比较好的效果, 实际上 COD 大部分去除是在厌氧阶段, SBR 的去除率仅 10.35%~43.6%, 说明 SBR 对 COD 去除贡献很小。问题是该工

收稿日期: 2006-02-21 修订日期: 2006-07-19

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2002BA514A-1-2-4)

作者简介: 邓良伟(1966-), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事废水处理研究与工程设计。杭州 浙江大学环境工程系, 310029。

Email: dlwbrtc@263.net

\*通讯作者: 郑平, 教授, 博士生导师。杭州 浙江大学环境工程系, 310029。Email: pzheng@zju.edu.cn

艺是对 TKN 去除效率比较差, 只有 42.2%~71.1%, 文献中没有具体报道进出水 TKN 浓度, 也没报道进出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度和去除率, 就猪场废水而言, 进出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度和 TKN 浓度很接近, 由此推算, “厌氧-SBR”对  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率只有 40~70%。而 Anarwia 工艺和 SBR 工艺对污染物的去除率和出水水质都优于厌

氧-SBR 工艺, 特别是对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除, 优势更为明显。并且杭州灯塔养殖总场猪场废水处理工程(Anarwia 工艺)的污染物去除效率及出水水质与 Anna 猪场废水处理工程(SBR 工艺)相当, 能满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)。以上事实说明 Anarwia 在技术上是稳定可靠的, 完全能代替 SBR 直接处理工艺。

表 1 三种工艺处理猪场废水效果对比

Table 1 Results of three full-scale processes for treating piggery wastewater

工艺项目	厌氧-SBR <sup>[3]</sup>			Anarwia <sup>[16]</sup>			SBR <sup>[10]</sup>		
	进水*	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%
COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3581.7~5946.5	239.2~505.5	85.9~93.3	4015~14561	216~379	93.1~97.4	6016±1672	356±218	94.1
$\text{NH}_3\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				552~1114	3.5~9.9	98.2~99.5	522.3±119.2	6.4±12.4	98.8
TKN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			42.5~71.1	754	51.8	93.1	681.2±139.5	29.1±22.7	95.7
pH 值		6.85~7.68		7.2~7.5	6.6~7.5				

注: \* 进水是指固液分离后的进水。

## 2 能耗评价的前提条件

采用厌氧-SBR 工艺处理猪场废水, 处理系统运行不稳定, 出水水质不能达到排放标准, 与 Anarwia 工艺和 SBR 工艺不具技术可比性。因此, 下面只对具有技术可比性的 Anarwia 工艺和 SBR 工艺进行能耗分析。

### 2.1 水质水量及工艺流程

对于一个年出栏 10 万头商品猪的大型养猪场, 存栏猪大约 58000 头, 日排放废水大约 1200 t/d。采用 SBR 工艺和 Anarwia 工艺处理的流程参见文献[16]。在 SBR 工艺中, 猪粪水进入集水池, 经过固液分离和调节池均衡后, 直接进入 SBR 池进行好氧处理; 而在 Anarwia 工艺中, 猪粪水进入集水池, 经过固液分离后进入调节池, 调节池的废水 65% 进入厌氧池进行厌氧处理, 35% 进入沉淀配水池与厌氧出水混合, 再进入 SBR 池进行好氧处理。为了具有可比性, 设定两种工艺的进水和出水水质一样。猪粪水的进水水质、各处理单元的去效率及出水水质文献[16]。

### 2.2 工艺设计参数

表 2 中的各处理单元设计参数按文献[16]的水质指标和下列前提条件确定:

- 1) 厌氧处理和好氧处理均在常温(15~25℃)下进行;
- 2) 处理出水的排放标准执行国家《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB18596-2001);
- 3) 厌氧池容积负荷取 2.4 kg(COD)/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ), 厌氧污泥产率取 0.10 (MLSS)/kgCOD 去除(一般范围为 0.025~0.20 kg(MLSS)/kgCOD 去除), 沼气产量取 0.40  $\text{m}^3/\text{kgCOD}$  去除;
- 4) 好氧阶段的负荷取 0.10 kg( $\text{BOD}_5$ )/kg(MLSS)·d(如果需要考虑硝化-反硝化脱氮, 设计中一般不超过 0.15 kg( $\text{BOD}_5$ )/kg(MLSS)·d), 混合液污泥浓度取 5000 mg(MLSS)/L;
- 5) 曝气头在污水中的氧转移效率取 18%;
- 6) SBR 的污泥产量以及氧需要量按《废水处理理论与设计》<sup>[17]</sup>和文献[18]计算。

表 2 Anarwia 工艺和 SBR 工艺主要设计参数

Table 2 Design parameters of treatment processes of Anarwia and SBR

工艺	好氧 HRT /d	总 HRT /d	需氧量 /kg·d <sup>-1</sup>	好氧剩余污泥 /kg·d <sup>-1</sup>	总污泥产量 /kg·d <sup>-1</sup>	沼气产量 /m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
Anarwia	3.9	7.51	5333	1354	3010	2784
SBR	10.0	10.41	10490	2544	3504	

从表 2 可知, 在 SBR 取相同污泥有机负荷(0.10 kg  $\text{BOD}_5/\text{kgMLSS} \cdot \text{d}$ )的条件下, Anarwia 工艺中好氧单元的水力停留时间(HRT)比 SBR 工艺的相应值缩短 156%。尽管前者增加了厌氧处理单元, 但其总 HRT 仍比后者缩短 38.6%。就与能耗密切相关的污泥量、需氧量而言, Anarwia 工艺的分别比 SBR 工艺低 16.4% 和 95.9%。此外, Anarwia 可回收 2784  $\text{m}^3/\text{d}$  沼气。

## 3 能耗评价

### 3.1 装机及其用电量

根据表 2 的工艺设计参数, Anarwia 工艺与 SBR 工艺各单元装机、工作负荷及电耗估算见表 3, 根据表 3 计算的总装机、总电耗及其分类见表 4。由表 4 可知, 就 Anarwia 工艺内部总电耗而言, 曝气电耗占 83.4%, 废水提升占 9.7%, 搅拌与滗水占 1.1%, 污泥处理占 2.6%; 而 SBR 工艺中, 曝气电耗占 92.2%, 废水提升占 2.8%, 搅拌与滗水占 1.6%, 污泥处理占 1.6%。在两种工艺的分类能耗中, 鼓风机占有很大的比例; 与

SBR 工艺相比, Anarwia 工艺鼓风曝气电耗占总电耗的比例降低 8.8%。Anarwia 工艺比 SBR 工艺多一级厌氧进料提升, 废水提升的电耗比 SBR 工艺高 90.9%;

但 SBR 工艺的曝气、污泥处理、滗水及搅拌的电耗较大, 分别比 Anarwia 工艺高 100%、11.5% 和 164%, 结果 Anarwia 工艺的总电耗比 SBR 工艺低 81.0%。

表 3 Anarwia 工艺和 SBR 工艺的装机及其用电量比较

Table 4 Comparison of electric installments and their power consumption for Anarwia and SBR

单元	设备名称	Anarwia				SBR			
		装机容量 /kW	工作负荷 /kW	工作时间 /h	用电量 /kW·h <sup>-1</sup>	装机容量 /kW	工作负荷 /kW	工作时间 /h	用电量 /kW·h <sup>-1</sup>
集水池	潜污泵 AS30-2CB	9	6	12	72	9	6	12	72
调节池	潜污泵 WQ40-15-4	12	8	15	120				
	潜污泵 AS75-2CB		0			22.5	15	4	60
沉淀配水池	潜污泵 AS75-2CB	22.5	15	8	60				
风机房	鼓风机 SSR200	135	90	24	2160	270	180	24	4320
SBR	滗水器 BS-250	2.2	2.2	2.4	5.3	2.2	2.2	2.4	5.3
	搅拌器 QJB4/12-620/3-480s	8	8	3	24	24	23	3	72
污泥贮池	污泥泵	3.0	3.0	6.0	18	3.0	3.0	7	21
污泥脱水机房	带式压滤机 DY-1000	14.4	6.8	7.3	49.6	14.4	6.8	8	54.4
管理房	照明及化验	10	10	8	80	10	10	8	80

表 4 Anarwia 工艺和 SBR 工艺的装机及其用电量分类比较

Table 4 Classified comparison of electric installments and their power consumption for Anarwia and SBR

工 艺	Anarwia	SBR
装机/kW	216.1	323.6
工作负荷/kW	149	225
总电耗/kW·h	2589	4685
废水提升/kW·h	252	132
曝气/kW·h	2160	4320
污泥处理/kW·h	67.6	75.4
滗水及搅拌/kW·h	29.3	77.3
其它/kW·h	80	80

### 3.2 能量回收

在废水好氧处理过程中, 有机污染物的潜能一部分(大约 50%) 被转化成微生物菌体, 另一部分在氧化过程中转化为热能。而在厌氧处理过程中, 有机污染物的潜能小部分(大约 10%) 被转化成微生物菌体, 大部分转化为含能产物(甲烷)。厌氧处理生成的污泥量少, 最后用于污泥处理的能耗和费用也少。保守估计, Anarwia 工艺每天可产生 2784 m<sup>3</sup> 沼气(表 2), 如果按每 m<sup>3</sup> 沼气可发电 1.4 kWh 计算, 则每天可发电 3898 kWh。与表 4 对比可知, Anarwia 工艺回收的电能除补偿整个工程的电耗外, 每天还剩余 1309 kWh。SBR 工艺没有厌氧单元, 也没有能源回收, 所有能耗均需外部输入。

### 3.3 能耗指标

能耗指标是反映废水处理能量消耗和进行经济核算的重要指标。将表 4 的数据除以处理水量、COD 去除量、TN 去除量可得单位能耗指标(从表 5)。从表 5 数据可以看出, 不管是单位污水量能耗、还是单位 COD 去除能耗和 TN 去除能耗, Anarwia 工艺都比 SBR 工艺低 81% 左右。值得特别指出的是, Anarwia 工艺可实现能量完全自给且有余。

表 5 Anarwia 工艺和 SBR 工艺能耗指标

Table 5 Indexes of energy consumption of Anarwia and SBR

工 艺	单位水量总能耗 /kWh·m <sup>-3</sup>	单位 COD 能耗 /kWh·kg <sup>-1</sup> (COD)	单位 TN 能耗 /kWh·kg <sup>-1</sup> TN	能量自给 率/%
Anarwia	2.16	0.223	2.07	150.6
SBR	3.90	0.404	3.75	0

一般城市污水处理的单位污水量能耗为 0.32 kWh/m<sup>3</sup><sup>[19]</sup>, Anarwia 工艺处理猪场废水单位污水量能耗是城市污水处理的 7 倍; 但是猪场废水 COD 和 TN 浓度是城市污水的 30 倍。一般城市污水处理的单位 COD 去除能耗为 1.06 kWh/kg(COD)<sup>[19]</sup>, Anarwia 工艺的相应值仅为前者的 21.0%。从单位 COD 去除能耗看, Anarwia 工艺确实是一种节能型工艺。

## 4 结 论

三种猪场废水处理工艺生产性试验文献报道说明, 厌氧-SBR 工艺处理猪场废水, 污染物去除效率低, 出水污染物浓度高, 不适于猪场废水的处理。Anarwia 工艺的处理效果与 SBR 工艺相当, 污染物去除率高, 出水 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 浓度低。从技术上看, Anarwia 完全能够取代 SBR 工艺。

以一个年出栏 10 万头商品猪的规模化猪场废水处理工程(废水量 1200 t/d) 为例, 对 Anarwia 和 SBR 工艺的能耗进行了对比分析, 得到以下结论:

1) 与 SBR 工艺相比, Anarwia 工艺的所需供氧量和剩余污泥量分别降低 95.9% 和 16.4%, 并可回收能源(沼气 2784 m<sup>3</sup>/d)。

2) SBR 工艺和 Anarwia 工艺的能耗主要用于鼓风曝气, Anarwia 工艺鼓风曝气电耗占总电耗的比例(83.4%) 低于 SBR 工艺(92.1%); Anarwia 工艺增加了废水提升能耗, 但减少了曝气能耗、污泥处理能耗以及滗水和搅拌能耗, 总电耗比 SBR 工艺低 81.0%。

3) Anarwia 工艺消耗的能量可以通过回收沼气进

行发电而获得补偿。

总之,与 SBR 工艺相比,Anarwia 工艺的能耗显著降低,更适宜于猪场废水的处理。

#### [参 考 文 献]

- [1] 邓良伟. 规模化猪场粪污处理模式[J]. 中国沼气, 2001, 19(1): 29-33.
- [2] Bortone G, Malaspina F, Stante L, et al. Biological nitrogen and phosphorus removal in an anaerobic/anoxic sequencing batch reactor with separated biofilm nitrification [J]. Water Sci and Technol, 1994, 30(6): 303-313.
- [3] Su J J, Lian W C, Wu J F. Studies on piggery wastewater treatment by a full-scale sequencing batch reactor after anaerobic fermentation[Z]. Chung-hua Nungxue Huibao, 1999, 188: 47-58.
- [4] Ng W G. Aerobic treatment of piggery wastewater with the sequencing batch reactor[J]. Bio Waste, 1987, 22: 285-294.
- [5] 杨虹, 李道棠, 朱章玉, 等. 集约化养猪场冲栏水的达标处理[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(4): 558-560.
- [6] Poo K M, Jun B H, Lee S H, et al. Treatment of strong nitrogen swine wastewater in a full-scale sequencing batch reactor[J]. Water Science & Technology, 2004, 49(5-6): 315-323.
- [7] Obaja D, Mace S, Costa J, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor treating piggery wastewater[J]. Bioresource Technology, 2003, 87(1): 103-111.
- [8] Bortone G, Gemelli S, Rambaldi A, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphate removal in sequencing batch reactors treating piggery wastewater[J]. Wat Sci Tech, 1992, 26(5-6): 977-985.
- [9] Su J J, Kung C M, Lin J, et al. Utilization of sequencing batch reactor for In situ piggery wastewater treatment [J]. J Environ Sci Health, Part A, 1997, A32(2): 391-4054.
- [10] Piccinini S, Verzellesi F, Mantovi P. Biological nutrient removal in a full sequencing batch reactor treating pig slurry [A]. Proceedings of the 10th international conference of the RAMIRAN network[C]. Strbske Pleso, High Tatras, Slovak Republic, May 14~18, 2002: 391-395.
- [11] Edgerton. Strategies for dealing with piggery effluent in Australia: the sequencing batch reactor as a solution[J]. Wat Sci Tech, 2000, 41(1): 123-126.
- [12] 邓良伟, 蔡昌达, 陈铭铭, 等. 猪场废水厌氧消化液后处理技术研究及工程应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 92-94.
- [13] 邓良伟, 郑平, 李淑兰, 等. 添加原水改善 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液性能[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 107-111.
- [14] 徐亚同. 不同碳源对生物反硝化的影响[J]. 环境科学, 1994, 15(2): 29-32, 44.
- [15] Yo S P. Analysis of volatile fatty acids collected from a pig farm by a solid phase microextraction method [J]. Chemosphere, 1999, 38(4): 823-834.
- [16] 邓良伟, 郑平, 陈子爱. Anarwia 工艺处理猪场废水的技术经济性研究[J]. 浙江大学学报(农业与生物科学版), 2004, 30(6): 628-634.
- [17] 张自杰. 废水处理理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 309, 431.
- [18] 胡大锵. 同步硝化反硝化的总需氧量计算方法探讨[J]. 中国给水排水, 2003, 19(2): 88-90.
- [19] 孟德良, 刘建广. 污水处理厂的能耗与能量的回收利用[J]. 给水排水, 2002, 28(4): 18-20.

## Efficiency of energy-saving of anaerobic-adding raw wastewater-intermittent aeration(Anarwia) process for treatment of piggery wastewater

Deng Liangwei<sup>1,2</sup>, Zheng Ping<sup>1</sup>, Chen Zi'ai<sup>2</sup>

(1. Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;

2. Biogas Scientific Research Institute of the Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The treatment effects of the anaerobic-adding raw wastewater-intermittent aeration(Anarwia), Sequencing Batch Reactor (SBR) and anaerobic-SBR process were compared. Among the three processes, anaerobic-SBR process was not technologically feasible to the treatment of piggery wastewater because of poor removal efficiency of chemical oxygen demand, ammonia nitrogen from wastewater and higher concentration of pollutant remained in the effluent. The treatment efficiency of Anarwia process could reach that of the SBR process with more efficient removal of chemical oxygen demand and ammonia nitrogen and relatively lower concentration of them in the effluent. Taking a plant treating 1200 t/d piggery wastewater as an example, the energy consumption of Anarwia process and SBR process was compared. As for the sludge yield and the oxygen demand that are process parameters interrelated energy consumption, the sludge yield and chemical oxygen demand by Anarwia process are 16.4% and 95.9% lower than those by SBR process. In addition, Anarwia process can produce 2784 m<sup>3</sup>/d biogas. Anarwia process increased energy consumption of pumping wastewater, and decreased that of aeration, sludge treatment, decanting and stirring, resulting in that the total energy consumption of Anarwia process was 81.0% lower than that of SBR process. Moreover, the energy consumed in Anarwia process could be completely compensated by electricity generated from biogas.

**Key words:** piggery wastewater; anaerobic; sequencing batch reactor; anaerobic-adding raw wastewater-intermittent aeration (Anarwia); energy consumption