

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.020

厌氧发酵+A/O大循环处理生猪养殖粪污工程实例

马骏涛¹, 于建海¹, 宫亚斌^{1,2}

(1. 杭州能源环境工程有限公司, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省生物燃料利用技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 中粮家佳康(赤峰)有限公司四期900 m³/d生猪养殖废弃物资源化利用项目,采用“减负还田”的工艺路线,养殖粪污经浓稀分流后,浓液进行厌氧发酵产沼利用,沼液用于灌溉;稀液经UASB+A/O大循环为主的生化处理后,可达到《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)的旱作标准和《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),处理成本约9.25元/m³。该生化工艺具有占地面积小、二次提升能耗低、脱氮除磷效率高的特点,出水水质稳定,可为类似猪粪水处理项目提供参考。

关键词: 养殖废水; 沼气工程; A/O大循环; 浓稀分流

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0121-05

A Case of Anaerobic Fermentation and A/O Large Cycle Treatment Process for Pig Breeding Waste

MA Jun-tao¹, YU Jian-hai¹, GONG Ya-bin^{1,2}

(1. Hangzhou Energy & Environmental Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310020, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Biofuel, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Taking a pig breeding waste utilization project with the capacity of 900 m³/d operated by COFCO Joycome Co., Ltd. in Chifeng as a case, the process of gravitational settling system is introduced for reducing the burden and returning to the field. The concentrated liquid is treated by anaerobic fermentation for biogas utilization and circular irrigation system of biogas slurry. Meanwhile the dilute liquid is biochemically treated by UASB and A/O large cycle process to meet the dry land crops criteria in *Standards for Irrigation Water Quality* (GB 5084-2021) and the *Discharge Standard of Pollutant for Livestock and Poultry Breeding* (GB 18596-2001). The treatment cost is about 9.25 yuan/m³. The process has the characteristics of small footprint, low energy consumption for secondary lifting, high nitrogen and phosphorus removal efficiency, and stable effluent quality, which can provide reference for similar pig manure water treatment projects.

Key words: swine wastewater; biogas project; A/O large cycle; gravitational settling

作为猪肉生产和消费大国,我国养殖废弃物的数量日益增长,特别是养猪废水已成为部分地区的

主要污染源^[1]。2020年发布的《第二次全国污染源普查公报》显示,规模化养殖场各类水污染物排放量

基金项目: 2022年度浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C02015)

通信作者: 宫亚斌 E-mail: gongyabin@heee-biogas.com

占畜禽养殖业水污染物排放量的60.45%~67.17%^[2]。同时,生猪养殖废弃物处理费用高^[3],常规生化效果不理想,可能增加周边水体的硝酸盐含量^[4]。

中粮家佳康(赤峰)有限公司四期 55.2 万头生猪养殖废弃物资源化利用项目将浓液进行厌氧产沼气、资源化利用,降低了后端生化处理的负荷,对稀液进行生化处理,主要降解废水中的 COD、氨氮、总磷等污染物,最终出水水质执行《农田灌溉水质

标准》(GB 5084—2021)的旱作标准和《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)。

1 项目概况

该养殖废弃物资源化利用项目坐落于翁牛特旗梧桐花镇元宝洼村,养殖废水处理规模为 $900\text{ m}^3/\text{d}$,养殖场清粪工艺为水(尿)泡粪,泡粪时间约 7 d 。根据现场水样检测结果,主要进水水质和处理后排放标准水质如表1所示。

表1 粪污废水设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of pig breeding wastewater

项目	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	总氮/ (mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	pH	水温/ ℃
设计进水	≤25 000	≤11 250	≤2 400	≤2 500	≤300	≤15 000	7~8	5~15
达标出水	≤200	≤100	≤80	≤200	≤8	≤100	6~9	

2 工艺流程及主要构筑物

2.1 工艺流程

工艺流程如图1所示。

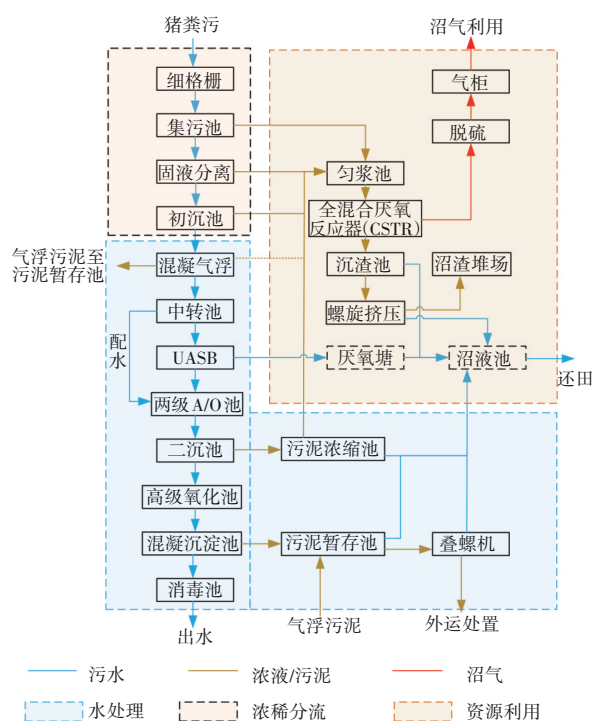


图1 废水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

该项目以“减负还田”为宗旨设计生猪养殖场粪污处理工艺路线,原水经预处理浓稀分离后,处理难度较低的清液遵循“预处理+UASB+两级 A/O 大循环+深度处理”的工艺路线,资源化价值高的浓液及部分污水处理产生的污泥采用“CSTR 厌氧发酵”

工艺路线,厌氧出料经固液分离后,液相进入沼液池进一步稳定化处理,待用肥季节还田使用;固相沼渣作为固态有机肥原料外运处置。

① 浓稀分离单元。场区产生的养殖污水经细格栅过滤去除大块杂物后进入集污池,池内设搅拌装置与污水提升泵,污水经泵提升至资源利用单元(用于配水)及固液分离机,将大颗粒悬浮物、饲料残渣、粪渣、猪粪浆等分离至资源利用单元;固液分离后的污水自流至初沉池,未分离出的粪渣、残渣和猪粪浆等沉淀后泵送至资源利用单元;初沉池出水泵入污水处理单元。

② 资源利用单元。浓稀分离单元中分离出的高浓度物料、部分集污池配水及后续污水处理单元产生的剩余污泥进入资源利用单元的匀浆池进行混合、搅拌,经由进料泵送入 CSTR 进行厌氧发酵,厌氧后物料由出料泵送入沉渣池,经螺旋挤压后,沼渣进入堆场待出售或利用。厌氧发酵产生的沼气经过脱硫净化后暂存于双膜储气柜,通过锅炉进行沼气利用,热能回用为系统增温保温。厌氧发酵产生的沼液可作为周边农田沼肥综合利用。

③ 水处理单元。浓稀分离单元中分离出的污水泵入气浮机,通过投加高分子物质去除胶体和溶解性SS,减少对后续生化工艺的冲击负荷,产生的气浮污泥泵入污泥暂存池;气浮出水自流至中转池(内设搅拌机、污水提升泵、液位开关等设备),由提升泵送入UASB或超越配水至两级A/O大循环单元。污水经由两级A/O后溢流进入二沉池进行泥水分离,产生的生化污泥进入污泥浓缩池,经浓缩后

泵入资源利用单元的匀浆池。出水溢流至高级氧化池经芬顿处理后,进入絮凝沉淀池进一步除磷,所产生的污泥泵入污泥暂存池,待叠螺机进行脱水处理,脱水后的污泥进行外运处置。絮凝沉淀池出水经消毒池消毒达标后用于农业灌溉。

2.2 各工段处理目标

各工段的污水处理目标去除率如表 2 所示。

表 2 各工段污水处理目标去除率

Tab.2 Target removal rate of sewage treatment in each section %

处理单元	污染物目标去除率					
	COD	BOD ₅	氨氮	总氮	总磷	SS
浓稀分离	>30	>30	0	0	>10	>60
预处理系统	>30	>30	0	0	>30	>70
UASB	>50	>50	0	0	0	>50
两级 A/O	>90	>90	>95	>90	>20	>80
深度处理	>40	>30	0	0	>95	>30

2.3 主要构筑物及工艺参数

① 集污池。1 座,半地上式钢混结构,用于接收猪场粪污,有效容积 918 m³,HRT 为 24.48 h。池内设置潜水搅拌机 2 台,单台搅拌机功率 4 kW;配置提升泵 2 台,单泵 Q=45 m³/h;配 3 台水力筛,筛网间隙 0.45 mm,单台处理量 20~25 m³/h。

② 初沉池。1 座,半地上式钢混结构。采用平流式沉淀池,表面负荷 0.8 m³/(m²·h),HRT 为 7.6 h。同时,预留混凝剂、絮凝剂投加管道。集水区配置提升泵 2 台,单泵 Q=45 m³/h。

③ 中转池。1 座,半地上式钢混结构,有效容积 236 m³,HRT 为 7.87 h。池内设置潜水搅拌机 1 台,搅拌机功率 4 kW。配置提升泵 2 台(1 用 1 备),单泵 Q=45 m³/h。

④ UASB。1 座,焊接钢罐结构,有效容积 1 394 m³,HRT 为 3.87 d。罐外设置自循环泵(Q=40 m³/h),罐内设置枝状布水。罐内上升流速 0.6 m/h。

⑤ 两级 A/O 池。1 座,半地上式钢混结构,总有效容积 5 619 m³,HRT 为 7.18 d。一级 A 池有效容积 957 m³,HRT 为 1.33 d;一级 O 池有效容积 2 512 m³,HRT 为 3.49 d。其中,一级 A 池配置搅拌机 2 台,功率 4 kW。AO 池的硝化液回流采用气提方式,可实现 10~20 倍的调节。O 池采用板式曝气器,氧转移效率≥35%。二级 A 池有效容积 850 m³,HRT 为 1.18 d;二级 O 池有效容积 850 m³,HRT 为

1.18 d。其中,二级 A 池配置搅拌机 1 台,功率 4 kW。二级 A 池与 O 池均布置板式曝气器。生化单元设计有机负荷为 1.3 kgCOD/(m³·d),氨氮负荷为 0.04 kgNH₃-N/(m³·d),硝酸盐氮负荷为 0.24 kgNO₃⁻-N/(m³·d),设计 MLSS 为 8 g/L,MLVSS/MLSS≈0.7。经校验后,污泥负荷为 0.16 kgCOD/(kgMLSS·d)、0.04 kgNH₃-N/(kgMLSS·d)、0.27 kgTN/(kgMLSS·d)。同时,针对该高浓度污水,设计一级 A/O 系统溶解氧控制在 0.5~1.0 mg/L,二级 A/O 系统溶解氧控制在 1.0~3.0 mg/L,维持一级生化系统具有一定的短程硝化反硝化效果,从而实现设备投资和运行电能的节约。两级 A/O 池工艺亮点如下:

a. 池体一体化结构。A/O 大循环工艺(见图 2)将生物选择、除碳、脱氮、除磷及沉淀等单元有机组合在一起,同时也可与生产辅助设施合建;结构紧凑,有效节省了占地面积,简化了工艺流程,大幅削减了系统水头损失,能充分利用一次提升势能完成污水在整个系统的输送,有效降低污水提升能耗,减少土建、管道及厂区占地投资,且大大缩短了巡检路线,操作效率高,建成后运营管理工作量减小。

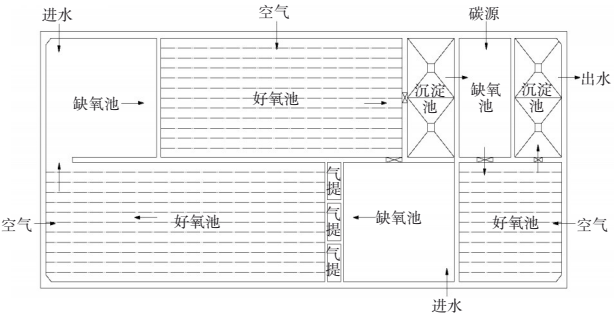


图 2 A/O 大循环工艺

Fig.2 A/O large cycle process

b. 气提设计。气提装置如图 3 所示。

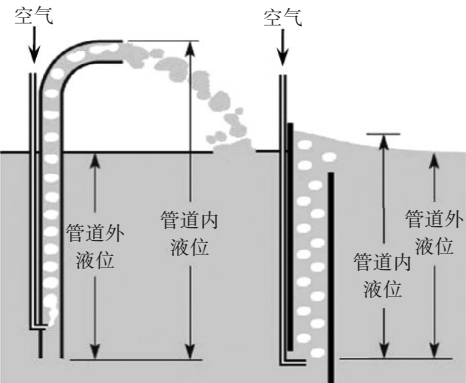


图 3 气提装置示意

Fig.3 Schematic diagram of airlift device

控制气提装置工作液面提升扬程小于50 mm,在低能耗基础上,实现几十倍的全液回流。将气提装置安装在一级O池末端,使一级O池出水和一级A池的进水充分混合,稀释倍数控制在20~40倍,COD、氨氮等高浓度污染物瞬间得到稀释,避免了对微生物的抑制作用,微生物活性增强,处理效率极高。

c. 可提升式曝气软管。曝气软管由聚氨酯制成,耐酸、耐腐蚀,耐压强度高。采用双层布置,可实现曝气管的自清洗。在曝气方式上,通过压低其通气量,扩大气泡在水体中的滞留时间,进而扩大氧利用率、节省曝气费用。曝气原理如图4所示。

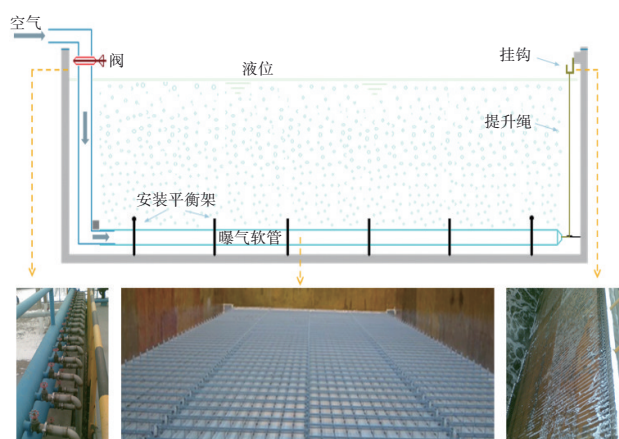


图4 可提升式曝气示意

Fig.4 Schematic diagram of liftable aeration hose

⑥ 高级氧化池。1座,半地上式钢混结构。采用芬顿工艺,总HRT为6.93 h。加酸池、催化池、延迟反应池、加碱池各配有1台1.1 kW搅拌机。该芬顿工艺主要用作应急措施,通过物化方式保障出水水质正常。

⑦ CSTR。1座,焊接钢罐结构,总有效容积3 600 m³, HRT为20 d。罐体工艺采用环套环模式,外环 $\varnothing 23\text{ m} \times 9\text{ m}$,内环 $\varnothing 16\text{ m} \times 9\text{ m}$ 。外环采用潜水搅拌,搅拌器2台,功率15 kW;内环采用中心顶搅拌,搅拌器1台,功率7.5 kW。物料先进入外环发酵后,经泵送至内环进行二次发酵。

⑧ 沼液池。3座,单座容积40 000 m³,总容积120 000 m³,用于沼液存储及进一步稳定化处理。

⑨ 加药间。PAC加药系统2套,用于气浮、混凝沉淀单元PAC添加,规格为1 000 L/h;设脉冲加压泵3台(2用1备)。阴离子PAM加药系统1套,用于气浮单元PAM添加,规格为500 L/h;设脉冲加药

泵2台(1用1备)。阳离子PAM加药系统1套,用于混凝沉淀单元以及叠螺机的PAM添加,规格为300 L/h;设脉冲加药泵3台(2用1备)。硫酸亚铁加药系统1套,用于高级氧化单元药剂的添加,规格为1 000 L/h;设脉冲加药泵1台(1用1备)。片碱加药系统1套,用于高级氧化单元药剂的添加,规格为500 L/h;设脉冲加药泵2台(1用1备)。次氯酸加药系统1套,用于消毒池药剂的添加,规格为300 L/h;设脉冲加药泵2台(1用1备)。

⑩ 风机房。1座,框架结构,房间尺寸8 m \times 7 m,配置3台空气悬浮风机,单台风量45 m³/min,功率70 kPa,为生化池曝气系统、气体系统供气。

⑪ 沼气净化储存系统。设生物脱硫系统1套,处理量300 m³/h。该系统硫化氢去除率可达99%,且基本无其他污染物产生,排出少量废液可直接进入污水处理系统处置。设干式双膜气柜1套,储气量1 500 m³,储气压力1.2 kPa。

2.4 减负还田

目前,该项目已在污水处理厂周边配套约200 hm²农田进行处理后的沼液还田试验研究。还田系统主要通过铺设在试验田的管道进行喷灌,喷灌量计算根据农业农村部的《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》中的区域畜禽粪污土地承载力测算方法。

减负还田过程还应考虑当地的气候和农作物生长条件进行相应的操作。根据赤峰的春冬季多风干燥少雨,降水集中在夏季的气候条件,喷灌周期和种植周期在每年的5月—11月进行。前期种植抗旱性强的饲料经济作物(紫花苜蓿)。紫花苜蓿具有固氮和改善土壤结构的作用,经过多轮种植后可进行玉米等作物的轮种。

减负还田过程中沼液的氮磷营养物和有机物(腐殖质)等能够增强土壤的肥力,改善土壤环境,同时可避免过量施用化肥导致的生态环境污染和食品安全等问题。

3 实际运行效果

该项目于2022年8月完成竣工验收,粪污水处理量为900 m³/d,经浓稀分离后,约300 m³/d浓液进入资源化利用单元处理,剩余部分进入污水达标处理单元处理。资源利用单元和污水达标处理单元运行情况分别见表3、4,实际运行中药剂消耗情况见表5。

表3 资源利用单元 30 d 平均产气指标
Tab.3 Average 30 d gas production index of resource utilization unit

CSTR	数值
进水量/(m ³ ·d ⁻¹)	300
沼气产量/(m ³ ·d ⁻¹)	6 068.3
沼气净化后硫化氢/(mg·m ⁻³)	259.5
沼液氨氮/(mg·L ⁻¹)	880
沼液总磷/(mg·L ⁻¹)	130

表4 污水处理单元日常运行进、出水平均指标
Tab.4 Daily average influent and effluent quality of wastewater treatment unit

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	总氮/(mg·L ⁻¹)	总磷/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	pH
夏季进水	30 000	2 600	2 800	300	30 000	7~8
冬季进水	35 000	2 600	2 800	330	30 000	7~8
出水	188.0	11.9	175.1	0.32	75.4	6~9

表5 污水处理单元日常运行药剂消耗平均指标
Tab.5 Daily consumption indicators of chemicals of wastewater treatment unit

投加位置	药剂	计量泵流量/(L·h ⁻¹)	运行时间/(h·d ⁻¹)	投加量/(kg·d ⁻¹)
气浮机	PAC	245	24	490.0
	阴离子PAM	265	24	12.7
高级氧化池	漂白粉	100	24	20.0
除磷池	PAC	140	24	280.0
	阴离子PAM	180	24	8.6
叠螺机	阳离子PAM	200	0	0

4 结论

厌氧发酵+A/O大循环处理生猪养殖粪污工程运行稳定高效,验证了“减负还田”工艺路线的可行性,生猪养殖粪污中甲烷回收用于猪场供热,同时降低了出水污染物指标,减少了污水处理单元的投资和运行成本,也有效减少了生猪养殖粪污对生态环境的负载,并降低了所需的消纳土地量。

该项目粪污废水处理量为900 m³/d,抗冲击负荷能力强,出水指标满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)和《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)。该项目总投资约为2 200万元,总工期约180 d,处理成本约9.25元/m³(平均30 d)。

由于项目所在地区夏季炎热,需考虑池体散热,防止好氧池内温度过高;冬季寒冷,地面以上的管道需要全部做保温措施,组合水池需要加盖处理。

参考文献:

[1] 邓良伟,操卫平,孙欣,等. 原水添加比例对猪场废水厌氧消化液后处理的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 588-593.
DENG Liangwei, CAO Weiping, SUN Xin, *et al.* Impact of proportion of adding raw wastewater on post-treatment of digested piggery wastewater [J]. Environmental Science, 2007, 28(3): 588-593 (in Chinese).
[2] 陈磊,刘真,谢彦娇,等. 规模化猪场废水处理技术研究进展[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(3): 83-90.
CHEN Lei, LIU Zhen, XIE Yanjiao, *et al.* Research progress on wastewater treatment technology of large-scale pig farms [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2022, 43(3): 83-90(in Chinese).
[3] 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(农业与生命科学版), 2004, 30(6): 628-634.
DENG Liangwei, ZHENG Ping, CHEN Zi' ai. Technological and economical potential of anaerobic-adding raw wastewater-intermittent aeration process for treatment of piggery wastewater [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2004, 30(6): 628-634(in Chinese).
[4] 赵方圆. 规模化养猪场废水处理分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(3): 202-204.
ZHAO Fangyuan. Analysis of wastewater treatment in large-scale pig farms [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(3): 202-204 (in Chinese).

作者简介:马骏涛(1990—),男,浙江绍兴人,大学本科,工程师,主要研究方向为沼气工程。

E-mail:majuntao@heee-biogas.com

收稿日期:2022-12-08

修回日期:2023-04-25

(编辑:衣春敏)