

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.24.010

基于“干湿协同”的厨余垃圾厌氧消化工艺设计

王 玥^{1,2}, 张云霞^{1,2}, 常宝军^{1,2}, 李阳青^{1,2}, 于 淼^{1,2}

(1. 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300392; 2. 天津市基础设施耐久性企业重点实验室, 天津 300392)

摘 要: 以安徽地区某大型厨余垃圾处理项目为例,介绍了餐厨垃圾与厨余垃圾协同厌氧消化工艺的应用情况。该工艺设计将餐厨垃圾的分选固渣与厨余垃圾滤液在湿式厌氧消化及干式厌氧消化中交叉协同处理,利用物料多元性所带来的强化效应提升总体厌氧消化效能与稳定性,其中湿式厌氧采用CSTR工艺,干式厌氧采用卧式多轴搅拌工艺。协同后湿式厌氧消化的平均单位产气率为85 m³/t,干式厌氧消化的平均单位产气率为140 m³/t,沼气中甲烷含量平均为60.50%,平均单位产气率均处于行业内较高水平。

关键词: 厨余垃圾; 厌氧消化; 协同效应; 多元混合; 中温

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0064-05

Design of Anaerobic Digestion Process for Kitchen Waste Utilizing a “Dry-Wet Coordination” Approach

WANG Yue^{1,2}, ZHANG Yun-xia^{1,2}, CHANG Bao-jun^{1,2}, LI Yang-qing^{1,2}, YU Miao^{1,2}

(1. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300392, China;

2. Tianjin Enterprise Key Laboratory of Infrastructure Durability, Tianjin 300392, China)

Abstract: Using the large-scale kitchen waste treatment project in Anhui Province as a case study, this paper introduces the application of a collaborative anaerobic digestion process for kitchen waste management. The process design adopts a cross-coordinated manner to treat the separation of solid residues from kitchen waste and kitchen filtrate within both wet and dry anaerobic digestion systems. This approach leverages the enhanced effects of material diversity to improve overall efficiency and stability of anaerobic digestion. The wet anaerobic digestion uses the continuous stirred tank reactor (CSTR) process, while the dry anaerobic digestion uses a horizontal multi-axis stirring process. Following collaborative efforts, the average unit gas production rate of wet anaerobic digestion is 85 m³/t, while the average unit gas production rate of dry anaerobic digestion is 140 m³/t. The average methane content in biogas is measured at 60.50%, and the average unit gas production rate remains high within industry standards.

Key words: kitchen waste; anaerobic digestion; synergistic effect; multivariate mixing; moderate temperature

餐厨垃圾与厨余垃圾有机物含量均较高,是理想的厌氧消化基质,产生的甲烷是友好的生物燃

料,有助于“双碳”目标的实现^[1],故厌氧消化已成为厨余垃圾处理的主流技术。但是我国餐厨垃圾与

通信作者: 王玥 E-mail: wangyuenmg@126.com

厨余垃圾的产生源头及收运体系存在明显差异,导致两种垃圾组分差异较大,适宜采用不同的厌氧消化技术。餐厨垃圾具有高含水率、高含油率及低杂质率等特点^[2],适宜采用湿式厌氧消化技术;厨余垃圾具有低含水率、低含油率及高杂质率等特点,适宜采用干式厌氧消化技术。

多元化物料协同处置对厌氧消化的产气效能、运行稳定性与资源化率等方面有着明显的强化效应^[3-4]。基于此理论,设计了餐厨垃圾与厨余垃圾协同厌氧消化的技术路线,并在安徽某大型有机垃圾资源化处理厂项目予以实施,取得了稳定的运行效果,其经验可为同类项目的设计与建设提供参考。

1 工程概况

安徽某大型厨余垃圾处理项目为某市落实垃圾分类政策建设的重大配套末端处置设施项目,旨在实现分类后有机垃圾无害化及资源化。项目服务3个行政区及1个功能区,服务总人口约为550万人,总占地面积约为6.67 hm²(100亩)。建设规模为餐厨垃圾200 t/d、厨余垃圾400 t/d,主体工艺路线为“预处理+协同厌氧消化+沼气综合利用”。该项目于2020年开工建设,2022年竣工投产,是安徽省首个利用沼气发电并网项目。

2 总体设计方案

2.1 垃圾原料条件

① 餐厨垃圾成分

食物残渣:87.60%,竹木:0.90%,塑料:0.90%,织物:0.10%,纸类:1.20%,骨贝类:5.20%,金属:0.20%,油:3.50%,其他杂质:0.40%。

② 厨余垃圾成分

易腐类:66.2%,纸张:10.0%,塑料:8.0%,织物:3.0%,木竹:0.1%,玻璃:2.0%,金属:1.0%,砖瓦陶瓷:1.0%,其他杂质:8.7%。

为匹配厌氧消化工程化设计,对上述垃圾成分进行归纳,得到物料设计条件,具体如表1所示。

表1 物料设计条件

Tab.1 Material design conditions

项目	处理量/(t·d ⁻¹)	TS浓度/%	VS/TS
餐厨垃圾	200	15.0	0.80
厨余垃圾	400	25.0	0.60

2.2 总体设计思路

根据前述物料条件可知,餐厨垃圾与厨余垃圾

的理化特性存在较大差异,餐厨垃圾含水率较高,适宜采用湿式厌氧消化工艺。厨余垃圾含水率较低、杂物含量种类多且成分复杂,油脂含量很少,适宜采用多级破碎筛分等机械预处理+干式厌氧消化工艺。因此,该项目采用以干式厌氧消化为核心的协同处置工艺,利用干式厌氧消化工艺对物料的适应性,将餐厨垃圾预处理分选工序的固渣与预处理后的厨余垃圾浆料混合送至干式厌氧消化系统,同时,将厨余垃圾预处理系统中螺旋挤压工序的液相与餐厨垃圾预处理后的浆料混合送至湿式厌氧系统。该方案一方面利用干式厌氧工艺对物料的广泛适应能力,充分回收餐厨垃圾分选固渣中的有机质;另一方面利用湿式厌氧工艺在低含固率物料条件下反应的充分性及运行稳定性,提升厨余垃圾挤压后液相的产沼效能,从而在总体上提升垃圾处置的资源化水平及经济效益。

2.3 总体工艺流程

餐厨垃圾预处理采用“大物质分选+精分制浆+除砂除杂+三相提油”工艺,厨余垃圾预处理采用“板式給料+粗破碎+滚筒筛分+螺杆筛分+螺杆挤压”工艺。协同工艺如下:首先,在餐厨垃圾预处理系统中,将精分制浆机分选的杂物汇总收集,通过螺旋输送机送至干式厌氧消化系统中的有机质暂存仓,与厨余垃圾预处理后的有机浆料混合,通过双螺旋输送机及大跨度密封皮带输送机送至厌氧消化罐;第二,将厨余垃圾系统中产生的挤压浓液输送至餐厨垃圾浆料暂存池,充分搅拌后,通过螺杆泵输送至湿式厌氧消化系统的均质罐;第三,餐厨垃圾分选固渣的导入增大了干式厌氧消化液的含油量,在脱水清液暂存池内设置回流泵,定期将积累油脂的上部清液回流至浆料加热池,进行油脂回收。

协同厌氧消化工艺具体流程如图1所示,总体物料平衡如图2所示。

根据物料平衡,餐厨垃圾预处理固渣理论计算产气量约为3 852 m³/d,约占干式厌氧系统总产气量的16.62%;厨余垃圾预处理浆料理论计算产气量约为3 022 m³/d,约占湿式厌氧系统总产气量的17.52%。餐厨垃圾与厨余垃圾协同处理后所产生的沼渣后续采用蒸汽干化方式将含水率降至60%,然后外运焚烧处置,待后续条件成熟后实施资源化处置。

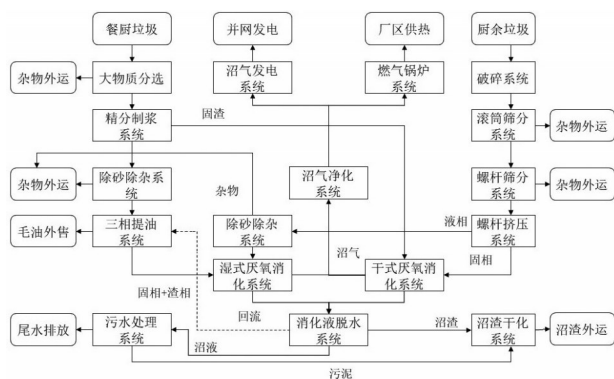


图1 协同厌氧消化工艺流程

Fig.1 Flow chart of collaborative anaerobic digestion process

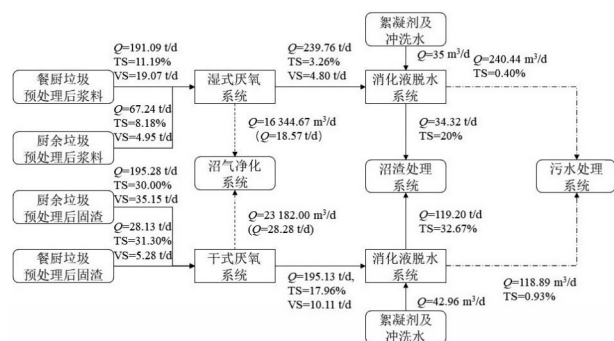


图2 协同厌氧消化工艺物料平衡示意

Fig.2 Schematic diagram of material balance of collaborative anaerobic digestion process

表3 湿式厌氧消化工艺设计参数

Tab.3 Design parameters of wet anaerobic digestion process

项目	有效容积/ m^3	进料含固 率/%	发酵温度/ $^{\circ}\text{C}$	水力停留时 间/d	有机容积负荷/ $(\text{kgVS} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$	容积产气率/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$	PAM投加量/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1} \text{DS})$	脱水后污泥含 水率/%
数值	8 000	约10	35 ± 2	约30	2.0~2.5	2.1	3	80

3.1.3 设备配置

① 均质罐2座,单罐有效容积 600 m^3 ($\varnothing 8 \text{ m} \times H13 \text{ m}$),罐体材质为不锈钢复合板,内层为316L不锈钢。采用桨叶式搅拌器, $N=7.5 \text{ kW}$ 。

② 厌氧消化罐3座(2用1备),单罐有效容积 $4\,000 \text{ m}^3$ ($\varnothing 16.8 \text{ m} \times H19 \text{ m}$),材质为碳素合金钢Q345R。采用304不锈钢桨叶式搅拌器, $N=15 \text{ kW}$ 。

③ 消化液暂存罐2座,单罐有效容积 600 m^3 ($\varnothing 8 \text{ m} \times H13 \text{ m}$),罐体材质为不锈钢复合板,内层为316L不锈钢。采用304不锈钢桨叶式搅拌器, $N=7.5 \text{ kW}$ 。

④ 厌氧罐循环泵4台(3用1备),选用渣浆泵, $Q=150 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=100 \text{ kPa}$, $N=11 \text{ kW}$ 。

⑤ 卧式离心脱水机3台(2用1备), $Q=15\sim 20$

3 厌氧消化工艺设计

3.1 湿式厌氧消化工艺

3.1.1 进料条件

根据项目实际确定湿式厌氧消化系统进料条件,具体见表2。

表2 湿式厌氧消化系统进料条件

Tab.2 Feed conditions of wet anaerobic digestion system

项目	规模/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	TS/%	粒径/ mm	水相含 油率/%	有机 质/%
数值	≥ 260	10	≤ 8	≤ 1	≥ 90

3.1.2 设计参数

综合考虑与进料含固率的匹配性、运行管理的可靠性和技术经济的合理性,湿式厌氧消化系统采用完全混合式厌氧反应器(CSTR),反应温度为中温,搅拌形式为顶装式机械搅拌。工艺流程为预处理后的有机浆料经螺杆泵输送至湿式厌氧消化系统的均质罐内,完成均质及初步水解后输送至厌氧消化罐,经微生物消化后,输送至消化液暂存罐,后经离心脱水机完成脱水,脱水清液送至污水处理系统,脱水固相部分回流厌氧罐调节污泥浓度,其余外运处置。

湿式厌氧消化工艺设计参数见表3。

m^3/h , $N=37 \text{ kW}+7.5 \text{ kW}$ 。

3.2 干式厌氧消化工艺

3.2.1 进料条件

干式厌氧消化系统进料条件见表4。

表4 干式厌氧消化系统进料条件

Tab.4 Feed conditions of dry anaerobic digestion system

项目	规模/ $(\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	TS/%	粒径/ mm	有机质/%
数值	≥ 220	25~35	≤ 50	≥ 60

3.2.2 设计参数

采用卧式方形多轴干式发酵系统,发酵温度为中温。卧式方形多轴干式发酵系统是基于一种塞流式、水平推流的水平容器,使用搅拌器对物料进行独立的局部搅拌,反应器在水平方向上有数个横

向搅拌器,交替重叠搅拌,保证了有针对性的物料局部混合以及气泡的最佳释放,能够有效避免浮渣层和沉积层的形成。工艺流程为有机物料经双螺旋输送机、密封皮带输送机及螺旋进料器输送至厌氧消化罐,然后由多组径向慢速搅拌器以栓塞流的形态推送至发酵罐尾端,同步实现微生物消化过

程。发酵罐尾端设置真空出料装置,将消化后的物料送至螺杆挤压脱水机进行一级脱水,脱水清液进入振动筛脱水机进行二级脱水,振动清液送至离心脱水机再次脱水,脱水清液送至污水处理系统,各级脱水固相外运处置。干式厌氧消化系统设计参数见表5。

表5 干式厌氧消化系统设计参数

Tab.5 Design parameters of dry anaerobic digestion system

项目	有效容积/ m^3	进料含固率/%	发酵温度/ $^{\circ}\text{C}$	水力停留时间/d	有机容积负荷/ $(\text{kgVS}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1})$	容积产气率/ $(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1})$	PAM投加量/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}\text{DS})$	脱水后污泥含水率/%
数值	4 800	25~35	35±2	约22	约10	约4.8	约5	80

3.2.3 设备配置

① 有机质暂存仓2座,单座有效容积100 m^3 。

② 厌氧消化罐2座,单座有效容积2 400 m^3 ($W\times H\times D=43.1\text{ m}\times 8.9\text{ m}\times 8.1\text{ m}$),钢筋混凝土结构。采用横向空心轴搅拌器(推流慢速搅拌,沿物料推动方向运行,奇偶序列间歇运行方式), $N=15\text{ kW}$,单座厌氧罐配置8台,搅拌器转速:(1±0.1) r/min。

③ 真空出料系统2套,出料罐有效容积3.3 m^3 。采用水环式真空泵, $Q=180\text{ m}^3/\text{h}$, $N=4\text{ kW}$ 。

④ 螺杆压榨脱水机2套(1用1备), $Q=15\sim 17\text{ m}^3/\text{h}$, $N=37\text{ kW}$,出口固相含水率60%。

⑤ 振动筛脱水机2套(1用1备), $Q=12\sim 20\text{ m}^3/\text{h}$, $N=2\times 2.2\text{ kW}$,出口固相含水率75%。

⑥ 卧式离心脱水机2台(1用1备), $Q=15\sim 20\text{ m}^3/\text{h}$, $N=45\text{ kW}+11\text{ kW}$ 。

⑦ 微滤机2台(1用1备), $Q\geq 25\text{ m}^3/\text{h}$,转鼓转速2~10 r/min,滤网孔径:内网60目,外网4目。

3.3 重点与难点

3.3.1 干式厌氧系统的工艺选择

餐厨垃圾与厨余垃圾协同厌氧消化工艺的核心重点在于干式厌氧,其对物料含固率的广泛适应能力为厨余垃圾分类进一步提升后的处理提供了更多技术组合的可能性,但其建设投资与运行难度也明显高于湿式厌氧。该项目厨余垃圾成分相对较差,含水率较低,故选择卧式多轴搅拌厌氧工艺,同时匹配高通过率预处理系统,合理控制进入厌氧系统的物料粒径,利用多轴搅拌混合形成栓塞流流态,避免物料分层,充分发挥干式厌氧消化工艺的效能优势。在未来项目设计中,应充分考虑当地厨余垃圾组分情况,有条件的情况下先进行小试,审慎选择合适的干式厌氧工艺。

3.3.2 多元化物料协同造成的次生问题

① 餐厨垃圾固渣携带油脂。由于废弃油脂的附着性,餐厨垃圾分选后的固渣会携带少量油脂,然后随厨余垃圾有机浆料共同进入干式厌氧消化系统,最终进入污水处理系统,对后续污水生化处理造成不利影响。针对此种情况,可在脱水清液池设置溢流回收装置,溢流浆料回流至三相分离系统进行油脂回收。

② 厨余垃圾挤压浆料杂物较多。因厨余垃圾挤压浆料中的杂物较多,纤维状细杂物和颗粒物随餐厨垃圾有机浆料进入湿式厌氧消化系统后会间接进入污水处理系统,从而对超滤膜组件造成堵塞。针对此种情况,可在调节池后增设微滤级转盘过滤装置,以有效去除纤维状细杂物,改善膜组堵塞。

4 项目投资

该项目投资规模为7.08亿元,单位建设成本约为100万元/t。厌氧系统总体投资约9 800.00万元,其中湿式厌氧系统约2 800.00万元,干式厌氧系统约7 000.00万元。

该项目2021年投入运行,平均处置成本为281元/t,其中能源及动力成本约101.85元/t,药剂及辅料成本约58.96元/t,人工成本约60.53元/t。同时,该项目每年可提供 $2\,400\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的清洁能源,相当于年节约标准煤2 950 t,二氧化碳减排量约7 900 t/a。

5 运行成效分析

为评价该工艺系统的运行效果,分析了其2021年的周平均单位产气率和单位产气甲烷含量,结果分别见图3、4。

数据显示,餐厨垃圾与厨余垃圾协同处置后湿式厌氧消化工艺的平均单位产气率为85 m^3/t ,干式

厌氧消化工艺的平均单位产气率为 $140 \text{ m}^3/\text{t}$, 沼气中甲烷含量平均为 60.50%, 其反映出: ①干式厌氧消化有机负荷明显高于湿式厌氧系统, 其单位产气率具有明显优势; ②餐厨垃圾与厨余垃圾协同发酵后, 平均单位产气率均处于行业内较高水平^[5], 在一定程度上验证了多元有机物料协同消化所带来的强化效应。

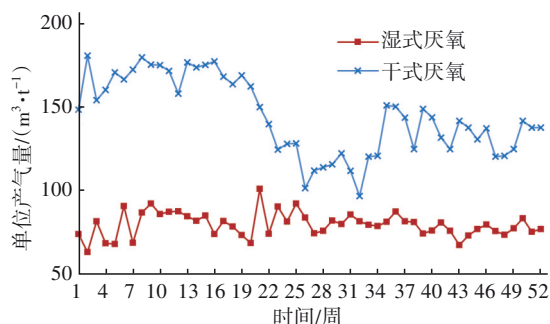


图3 湿式厌氧及干式厌氧工艺单位产气率示意

Fig.3 Gas production rate per unit waste of wet anaerobic and dry anaerobic processes

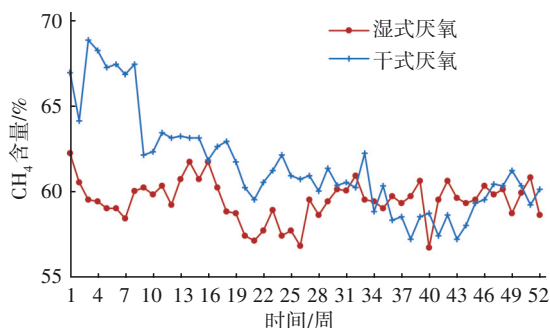


图4 湿式厌氧及干式厌氧单位产气甲烷含量

Fig.4 Methane content per unit gas produced by wet anaerobic and dry anaerobic processes

6 结论

实际运行数据表明, 对多元有机物料进行协同处置后, 湿式厌氧消化工艺及干式厌氧消化工艺单位产气率均得到一定程度的提高, 验证了细分差异物料协同处置对厌氧产气效能的强化作用。该工艺方案在实际项目中运行稳定, 经济效益良好, 可供行业内参考。

参考文献:

[1] 李晨曦, 王铭娅, 吴春东, 等. 餐厨垃圾厌氧消化残余

物的利用现状及展望[J]. 中国沼气, 2023, 41(2): 3-8.

LI Chenxi, WANG Mingya, WU Chundong, *et al.* Utilization status and prospect of anaerobic digestion residue of food waste[J]. China Biogas, 2023, 41(2): 3-8(in Chinese).

[2] 屈阳, 左武, 徐丽丽, 等. 分类湿垃圾协同全量厌氧消化工程设计[J]. 中国给水排水, 2024, 40(2): 75-81.

QU Yang, ZUO Wu, XU Lili, *et al.* Design of cooperative total anaerobic digestion engineering for classified wet waste treatment[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(2): 75-81(in Chinese).

[3] 李金平, 崔维栋, 黄娟娟, 等. 多元混合物料协同厌氧消化产甲烷性能研究[J]. 中国沼气, 2018, 36(3): 58-63.

LI Jinping, CUI Weidong, HUANG Juanjuan, *et al.* Synergistic effect of multiple raw materials on methane production performances of anaerobic digestion[J]. China Biogas, 2018, 36(3): 58-63(in Chinese).

[4] 宋晓雅, 张建新, 张荣兵, 等. 北京高安屯餐厨协同污泥厌氧消化生产性试验[J]. 中国给水排水, 2024, 40(4): 99-106.

SONG Xiaoya, ZHANG Jianxin, ZHANG Rongbing, *et al.* Productive experiment of kitchen waste and municipal sludge anaerobic co-digestion in Beijing Gao'antun sludge treatment center[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(4): 99-106(in Chinese).

[5] 王凯军, 王婧瑶, 左剑恶, 等. 我国餐厨垃圾厌氧处理技术现状分析及建议[J]. 环境工程学报, 2020, 14(7): 1735-1742.

WANG Kaijun, WANG Jingyao, ZUO Jian'e, *et al.* Analysis and suggestion of current food waste anaerobic digestion technology in China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(7): 1735-1742(in Chinese).

作者简介: 王玥(1989-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士, 高级工程师, 主要从事环卫工程、给排水工程设计与研究工作。

E-mail: wangyuemg@126.com

收稿日期: 2024-03-06

修回日期: 2024-05-12

(编辑: 丁彩娟)