

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.08.017

# 餐厨垃圾全物料湿式厌氧消化产沼技术的工程应用

王华金

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘 要:** 杭州市萧山区某餐厨垃圾厌氧消化处理项目设计处理能力为餐厨垃圾 200 t/d、地沟油 20 t/d。采用预处理+厌氧消化+沼气利用的主流工艺路线。根据功能定位,系统分为预处理系统、地沟油提纯系统、厌氧消化及脱水系统、污水处理系统、沼气净化及利用系统以及辅助生产系统等 6 大系统。餐厨垃圾通过预处理后形成油脂、有机浆液、固渣三股物料,油脂与地沟油提纯后的油脂作为毛油对外销售;有机浆液与固渣一并进行厌氧消化;厌氧消化产生的沼气在厂内净化后部分用作锅炉燃料,部分发电上网。项目工程总投资 15 386.43 万元,约合 69.8 万元/t。项目达产后,运行效果良好,CSTR 湿式厌氧消化运行稳定,全量厌氧时产气率高、出水水质好。

**关键词:** 餐厨垃圾; 地沟油; 厌氧消化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)08-0095-06

## Engineering Application of Wet Anaerobic Digestion and Biogas Production Technology for Full-scale Food Waste

WANG Hua-jin

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A food waste anaerobic digestion treatment project in Xiaoshan District, Hangzhou City was designed to dispose the municipal waste of 200 t/d food waste and 20 t/d gutter oil. The mainstream process route of pre-treatment + anaerobic digestion + biogas utilization was adopted in the project. According to the functional requirement, the project was divided into six major systems: pre-treatment system, gutter oil purification system, anaerobic digestion and dewatering system, sewage treatment system, biogas purification and utilization system, and auxiliary production system. After pre-treatment, food waste was divided into three streams of materials: oil, organic slurry and solid slag. Oil extracted from food waste and gutter oil was sold as crude oil. The organic slurry and solid slag was treated by anaerobic digestion. Biogas produced from anaerobic digestion was partially used as boiler fuel after purification in the plant, and the rest part was used for the generation of electricity power. The total investment of the project was 153.864 3 million yuan, and the investment per ton was approximately 698 000 yuan. The operation exhibited good performance and was well controlled. CSTR anaerobic digestion process showed stable operation performance with high production rate of biogas and high quality of effluent.

**Key words:** food waste; gutter oil; anaerobic digestion

随着我国社会经济的快速发展和人民生活水平的提高,餐厨垃圾产生量与日俱增,已成为影响人居环境的重要污染源<sup>[1]</sup>。餐厨垃圾成分复杂,是油、

水、果皮、蔬菜、米面、鱼、肉、骨头以及废餐具、塑料、纸巾等多种物质的混合物<sup>[2]</sup>,具有水分高、油脂含量高、有机物和杂质较多等特点,极易腐烂变质,滋

生细菌和传播病毒<sup>[3-5]</sup>。若不对其进行统一管理和处置,不仅会造成严重的环境污染,而且会严重威胁市民的身体与健康与生命安全<sup>[3]</sup>。根据《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》,到“十三五”末,力争新增餐厨垃圾处理能力 $3.4 \times 10^4$  t/a,城市基本建立餐厨垃圾回收和再利用体系。

## 1 项目概况

杭州市萧山区某餐厨垃圾厌氧消化处理项目,用地面积约为20 000 m<sup>2</sup>(合30亩)。设计处理能力为餐厨垃圾200 t/d、地沟油20 t/d。采用预处理+厌氧消化+沼气利用的主流工艺路线。根据实际调研数据,餐厨垃圾组分分析见表1、2。

表1 餐厨垃圾组分

Tab.1 Components of food waste %

项目	食物残渣	油脂	纸类	金属	骨贝类	塑料	竹木	织物	玻璃陶瓷
数值	90.9	3.0	0.9	0.1	3.0	0.9	0.9	0.1	0.2

表2 餐厨垃圾理化性质

Tab.2 Physical and chemical properties of food waste

项目	含水率/%	含油率/%	TS/%	VS:TS/%	容重/(N·m <sup>-3</sup> )
数值	82.5	3.0	17.5	80	9 700~10 100

## 2 总体设计

### 2.1 项目建设目标

项目从可持续发展战略角度出发,设计采用可靠的工艺、先进的技术、优质的设备和方便的控制模式,以提升设计品位,最大限度地减小对周边的负面影响,力争建设成为“现代、先进、环保、集约”的现代化餐厨垃圾资源化处置中心。

预处理残渣:经运渣车运送至杭州天子岭静脉产业园进行安全填埋。

厌氧沼渣:经处理后由运渣车运送至杭州天子岭静脉产业园进行安全填埋。

污水处理:生产废水经污水处理系统处理后排入市政污水管网,排放标准执行《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)三级标准。

沼气处理:部分沼气用于蒸汽锅炉,蒸汽供餐厨垃圾提油及地沟油提纯过程使用,剩余沼气用于沼气发电。

废气处理:产生的臭气由风管收集后经除臭系统集中处理后排放。厂界恶臭污染物排放满足《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)二级标准。

废油处理:餐厨垃圾分离出的油脂,与地沟油提纯的油脂合并对外销售,毛油纯度 $\geq 98\%$ 。

噪声控制:厂界噪声满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348—2008)3类标准。

### 2.2 总体工艺流程

根据功能定位,总体工艺分为预处理系统、地沟油提纯系统、厌氧消化及脱水系统、污水处理系统、沼气净化及利用系统以及辅助生产系统等6大系统。

总体工艺流程见图1。

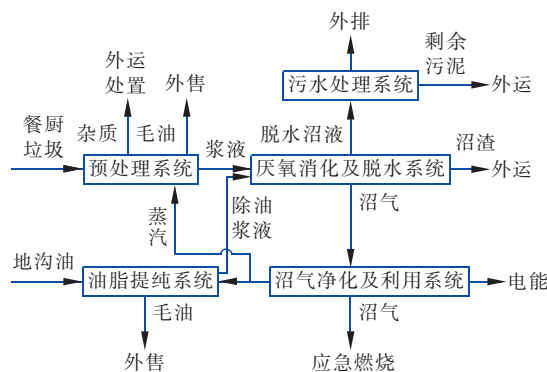


图1 总体工艺流程

Fig.1 Overall process flow

① 餐厨垃圾预处理系统:餐厨垃圾经收集后运至餐厨垃圾预处理车间,分离油水、残渣等,达到厌氧发酵的原料要求。

② 地沟油提纯系统:地沟油经除渣及提纯后获得纯度98%以上的毛油,与餐厨预处理分离的毛油一并销售给有资质的生物柴油企业或化工企业。

③ 厌氧消化及脱水系统:经预处理后的垃圾浆液进入厌氧消化罐进行厌氧消化,有效利用餐厨垃圾中的有机质生产沼气,回收资源,消化沼液经脱水后沼渣外运处置。

④ 污水处理系统:脱水沼液及其他生产废水经收集后进入厂内污水处理系统,处理后出水满足排放要求。

⑤ 沼气净化及利用系统:厌氧消化产生的沼气通过净化装置后,达到锅炉及发电机组用气要求。锅炉产生蒸汽供餐厨垃圾预处理系统提油及地沟油提纯使用,剩余沼气进行沼气发电,同时考虑应急火炬燃烧系统。

⑥ 辅助配套系统:为满足生产需求,配备除臭系统、地磅等辅助配套设施。

### 2.3 总平面布置

总平面布置见图2。根据各工艺段工艺特点,全厂总平面分为垃圾预处理区、厌氧消化及污水处理区、沼气净化及利用区、毛油暂存区、综合管理区等5个功能区。

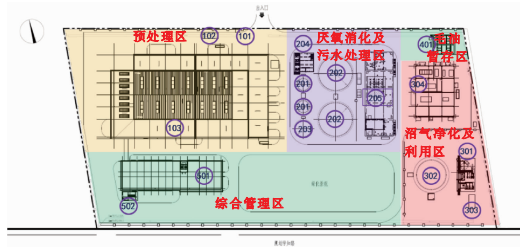


图2 总平面布置

Fig. 2 General plane layout

预处理区包括岗亭、地衡、预处理车间。厌氧消化及污水处理区包括厌氧进水罐、厌氧罐、厌氧出水罐、初期雨水事故池、一体化组合池及池顶气浮装置,该区紧邻预处理车间。沼气净化及利用区包括沼气净化设备、沼气柜、应急火炬及锅炉与发电机房。毛油暂存区包括埋地毛油罐。综合管理区为综合楼及景观区。

根据杭州市常年的主导风向,综合管理区布置在厂区南侧,位于主导风向的上风向,确保办公人员良好的工作环境,同时争取最优的采光面;生产作业区域布置在厂区西北侧,靠近厂区出入口,便于物流的运输。厌氧消化及污水处理区位于预处理车间东侧,紧邻预处理车间,便于物料的输送。厂区东侧布置油罐区和沼气净化及利用区,将易燃易爆的装置及设备集中布置,便于管理,并保证与管理区的安全距离。

## 3 各子系统设计

### 3.1 预处理系统

预处理系统工艺流程见图3。餐厨垃圾经地磅称质量后进入卸料大厅,将餐厨垃圾卸至接收料斗。接收料斗中的餐厨垃圾经螺旋输送机提升进入分选制浆系统。分选制浆系统分离出的大件杂质和无机固渣外运处置,分离出的有机浆状物与料斗沥水经过除砂除渣后输送至浆料加热系统,通过蒸汽直接加热至80℃,加热后的浆料通过三相分离器分离出毛油、残渣(固相)、水相三种物料,其中固相和水相混合后进行后续厌氧发酵,毛油暂存后对外销售。

预处理餐厨垃圾能力为200 t/d,每天工作时间

8 h,为了适应高峰流量的冲击负荷,预处理系统共设置2条预处理线,单线20 t/h,满足高峰期3 h内60%处理量需求。同时考虑处理设备检修情况,每条预处理线配置一个容积75 m³的接收料斗,用于满足一天的缓冲能力。

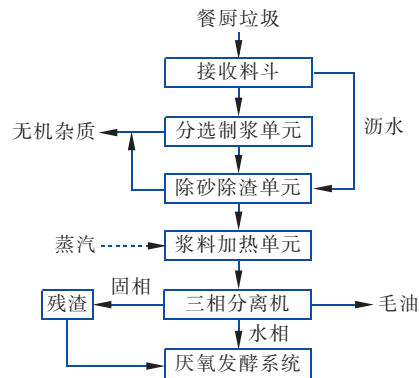


图3 预处理系统工艺流程

Fig. 3 Process flow chart of pretreatment system

预处理车间为一座局部两层的一体化综合处理车间,包括卸料大厅、餐厨垃圾及地沟油处理间、出渣间、沼渣/污泥脱水间、污水膜处理间以及辅助配套的变配电间、辅助办公区;同时在二楼设置专用的参观廊道。处理间集中布置便于巡视管理以及臭气的集中收集处置。

### 3.2 地沟油提纯系统

地沟油提纯系统工艺流程见图4。

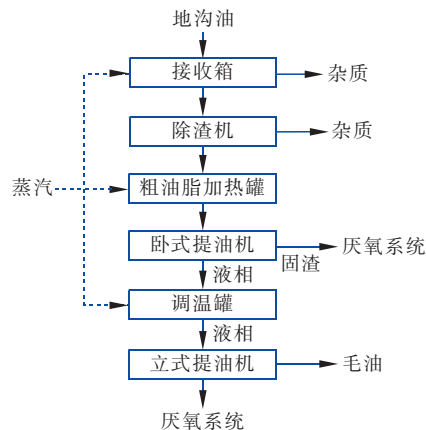


图4 地沟油提纯系统工艺流程

Fig. 4 Process flow chart of gutter oil purification system

地沟油收运车辆经地磅称质量后进入卸料大厅,将地沟油倾倒入地沟油接收箱,地沟油在接收箱内进行粗过滤,过滤后的地沟油再经螺旋除渣机除杂后进入粗油脂加热罐,在加热罐内加热至65℃后泵送入卧式提油机进行油脂初步提取,产生的油水

混合物在调温箱内进行二次加热,加热至 80 ℃ 后,采用立式提油机进行再次提纯,最终得到纯度 ≥ 98% 的毛油,进行暂存。

预处理车间内设置一套地沟油接收及提纯系统,处理能力为 20 t/d,设置 1 座有效容积为 2 m<sup>3</sup> 地沟油接收箱、2 座 15 m<sup>3</sup> 的油脂加热罐以及 1 座 8 m<sup>3</sup> 调温罐;卧式提油机的处理能力为 8 m<sup>3</sup>/h,立式提油机的处理能力为 3 m<sup>3</sup>/h。

### 3.3 厌氧消化及脱水系统

厌氧消化及脱水系统工艺流程见图 5。设计参数见表 3。

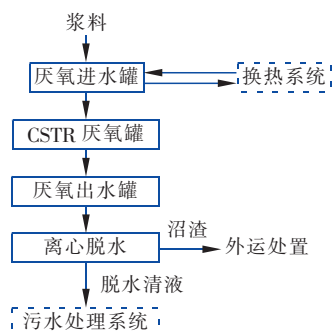


图 5 厌氧消化及脱水系统工艺流程

Fig. 5 Process flow chart of anaerobic digestion and dewatering system

表 3 厌氧消化系统主要工艺设计参数

Tab. 3 Main process design parameters of anaerobic digestion system

项 目	参 数	结构形式
厌氧形式	全混式厌氧消化罐	
进水罐	2 座 (Ø6 m × 12 m)	Lipp 罐
出水罐	1 座 (Ø8 m × 15 m)	Lipp 罐
消化罐数量/座	2	
发酵罐	Ø16.8 m × 21 m (单座)	Lipp 罐
发酵罐容积/m <sup>3</sup>	有效容积为 2 × 4 430	
水力停留时间/d	43	
设计温度/℃	35 (中温厌氧)	
反应器形式	钢结构密闭池体	
容积负荷/(kgCOD · m <sup>-3</sup> · d <sup>-1</sup> )	3.5	
沼气产量/(m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	14 200	

预处理后的有机浆液经泵送至厌氧进水罐,以保证厌氧消化罐的稳定进料。厌氧进水罐设有换热系统,以调节物料的温度,通过均料和控温后(40 ℃)的有机物料由厌氧进料泵提升入厌氧消化器,设计采用中温(35 ± 2) ℃ 厌氧,消化器采用完全混

合式反应器(CSTR 反应器),物料在厌氧反应器内充分混合搅拌,停留时间为 43 d,经过厌氧发酵后的沼液经厌氧消化罐排入厌氧出水罐,进行脱水前的暂存,然后泵送至沼液脱水系统。

本项目沼液脱水系统采用离心脱水机进行,脱水后的沼渣含水率在 75% ~ 80% 之间,沼渣由建设单位外运处置。离心脱水系统设计采用两台离心脱水机(1 用 1 备),单台  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。脱水系统配套 PAM/PAC 投加装置。

### 3.4 污水处理系统

项目生产废水主要为厌氧沼液脱水清液、除臭废液及生产冲洗水等。污水处理系统采用预处理系统 + MBR + NF 工艺,排放标准执行《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 三级标准。污水处理系统设计进、出水水质见表 4。

表 4 污水处理系统设计进、出水指标

Tab. 4 Design influent and effluent indices of sewage treatment system

项目	pH 值	COD/(mg · L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	SS/(mg · L <sup>-1</sup> )	TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> - N/(mg · L <sup>-1</sup> )
进水	6 ~ 9	12 000	4 500	4 000	3 800	3 200
出水	6 ~ 9	500	300	400	150	35

污水处理系统工艺流程见图 6。

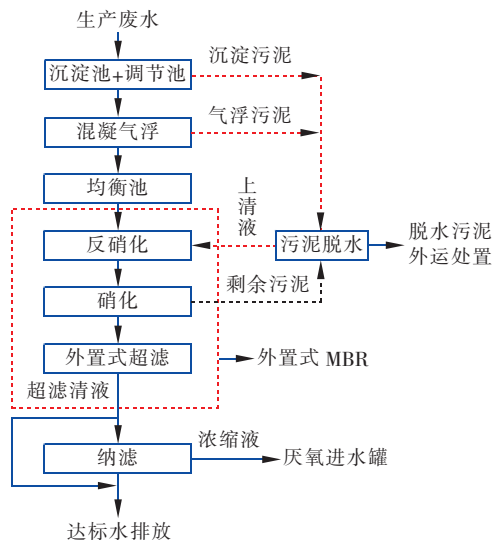


图 6 污水处理系统工艺流程

Fig. 6 Process flow chart of sewage treatment system

厂区生产废水首先经过沉淀池,然后进入调节池,而后泵送至混凝气浮系统;经过沉淀及气浮预处理后的污水泵送至均衡池,经泵提升至袋式过滤器过滤处理后进入膜生化反应器 MBR 系统。MBR 出



水氨氮、SS 等指标均能达到排放要求,但超滤出水 COD 仍存在超标风险,故设置  $150 \text{ m}^3/\text{d}$  的纳滤系统,部分超滤出水经纳滤处理后与超滤出水合并后混合排放,确保出水满足排放要求。纳滤浓缩液回流至厌氧系统循环处理。MBR 剩余污泥与沉淀、气浮泥渣合并后进行离心脱水处置,脱水污泥外运处置。

项目污水处理系统设计规模为  $220 \text{ m}^3/\text{d}$ 。设计设置一座组合池,包括沉淀池、调节池、均衡池、反硝化池、硝化池、出水池、污泥池。MBR 池有效水深  $8 \text{ m}$ ,系统污泥负荷  $0.15 \text{ kgCOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,理论前置反硝化回流比 30,设计反硝化速率  $0.065 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,设计硝化速率  $0.03 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。反硝化池 1 格,池容  $780 \text{ m}^3$ ,停留时间  $3.55 \text{ d}$ ;硝化池 2 格,总池容  $1560 \text{ m}^3$ ,停留时间  $7.09 \text{ d}$ 。设计一座污水处理间,与预处理车间合建。内设 1 套  $220 \text{ m}^3/\text{d}$  超滤系统及 1 套  $150 \text{ m}^3/\text{d}$  纳滤系统。

### 3.5 沼气净化及利用系统

沼气净化及利用系统工艺流程见图 7。

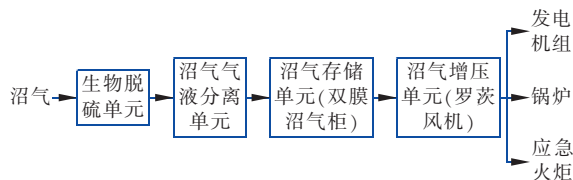


图 7 沼气净化及利用系统工艺流程

Fig. 7 Process flow chart of biogas purification and utilization system

沼气净化及利用系统主要由沼气生物脱硫单元、沼气和液分离单元、沼气存储单元、沼气增压单元以及沼气利用单元等组成。厌氧消化产生的沼气通过生物脱硫去除沼气中的硫化氢,脱硫后沼气通过过滤器、冷干机等气液分离单元将沼气中的水分离出来,达到脱水目的,然后进入双膜气柜进行存储,再通过罗茨风机进行增压,使沼气压力满足后续

用气单元(发电机组、锅炉以及应急火炬)对沼气压力的要求。

项目餐厨垃圾处理沼气总产量约  $14\,200 \text{ m}^3/\text{d}$ ,考虑到沼气产率的高峰系数(本工程沼气高峰系数取 1.4)及处理设备的富余能力等因素,沼气净化系统设计规模  $850 \text{ m}^3/\text{h}$ ,设置 1 座双膜沼气柜,有效容积为  $2\,000 \text{ m}^3$ 。

项目设置 1 座锅炉及发电机房,车间内设置 1 套沼气锅炉系统、1 套沼气发电系统;同时设置 1 套应急火炬系统室外装置。锅炉采用燃气燃油两用锅炉,锅炉技术参数为:额定蒸发量  $6 \text{ t/h}$ ,额定蒸汽温度  $145 \text{ }^\circ\text{C}$ ,额定压力  $0.4 \text{ MPa}$ 。经核算,本项目的日发电量约为  $21\,920 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{d}$ ,设计配置 1 套发电机组,考虑一定安全余量,设计其输出功率为  $1.2 \text{ MW}$ 。设置一套  $850 \text{ m}^3/\text{h}$  的应急燃烧火炬(暗火火炬)。

### 3.6 除臭设计

项目臭气主要来自卸料大厅、餐厨垃圾预处理区、出渣间、沼液脱水车间及剩余污泥脱水间。臭气的主要成分为  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{NH}_3$ ,还有少量有机气体如甲硫醇、甲胺、甲基硫等。为了减少臭气对环境的影响,结合项目特点,采用前端植物液喷淋+负压收集+酸碱化学洗涤+光催化组合方式进行恶臭控制。首先对各臭气产生源头进行封闭处理,在卸料大厅等臭气浓度较高区域设置植物液喷淋进行臭气控制;对卸料大厅、预处理设备、脱水间、出渣间区域进行负压收集,收集的臭气经酸碱化学洗涤塔和光催化反应处理达标后通过  $15 \text{ m}$  烟囱高空排放。

项目末端除臭设施(化学洗涤塔和光催化反应)处理总气量为  $80\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。由于项目用地紧张,末端除臭设施设置在预处理车间屋顶。

### 3.7 主要建(构)筑物参数

本工程主要建(构)筑物参数见表 5。

表 5 主要建(构)筑物参数

Tab. 5 Parameters of main buildings and structures

项 目	占地面积/ $\text{m}^2$	建筑面积/ $\text{m}^2$	层数/层	几何参数/ $(\text{m} \times \text{m} \times \text{m})$	结构形式
预处理车间	3 148	4 012	2	$77.6 \times 41.6 \times 13.6$	框架,局部钢屋面
一体化组合池	609	44	1	$41.9 \times 15.1 \times 10.3$	钢混
锅炉及发电机房	498	498	1	$25.5 \times 19.5 \times 9.9$	框架
综合楼	711	1 491	2	$49.6 \times 14.2 \times 9.9$	框架

## 4 项目投资及经济分析

项目工程总投资为  $15\,386.43$  万元(不含征地

费),其中建安工程费用  $4\,255.38$  万元,设备购置费  $8\,891.83$  万元,工程建设其他费用  $1\,440.04$  万元,

工程因素预备费 727.86 万元,铺底流动资金 71.32 万元。项目建设成本合 69.8 万元/t。项目单位处理总成本 340.04 元/t,单元经营成本 266.48 元/t。

## 5 运行效果

项目达产后,各工艺段运行稳定。

餐厨垃圾经预处理后,进入厌氧消化系统有机浆料的 COD 约为 180 000 mg/L,TS 约为 10%,VS 约为 85%。厌氧消化后沼液出水 COD 约为 22 000 mg/L,TS 约为 3.2%,VS 约为 50%,平均产气率约为 14 700 m<sup>3</sup>/d,经复核,餐厨垃圾平均沼气产量约为 74 m<sup>3</sup>/t,CH<sub>4</sub> 含量约为 56%,COD 产气率 0.47 m<sup>3</sup>/kgCOD,VS 产气率 1.06 m<sup>3</sup>/kgVS。

沼气净化及利用系统运行良好,厌氧消化产生的沼气中 H<sub>2</sub>S 浓度约为 1 500 mg/m<sup>3</sup>,经净化处理后,沼气中 H<sub>2</sub>S 浓度约为 15 mg/m<sup>3</sup>,满足后续热电联产沼气发电机组及锅炉的使用要求。

污水处理系统运行稳定,超滤出水 COD 约为 350 mg/L,TN 约为 150 mg/L,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 约为 5 mg/L。

## 6 结语

餐厨垃圾处理项目采用预处理+厌氧消化+沼气利用的主流工艺路线。经过近 1 年的运行,工艺段运行稳定、处理效果良好。该工艺适用于大中规模餐厨垃圾的处理处置,对类似餐厨垃圾项目的设计具有较好的借鉴意义。

在类似项目的设计过程中,如用地较紧张,可采用一体化处理车间的布置形式,将不同功能的车间进行组合,减少独立车间消防间距的要求;同时利于除臭风管的布置,避免除臭风管横跨厂区,影响美观。

在类似项目总图的布置过程中,可将易燃易爆的装置及设备集中布置,设置集中的防爆区,做好警示标识,也可设置独立围墙,将该区域进行物理分隔,便于集中管理。

## 参考文献:

- [1] 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(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(7): 1735-1742 (in Chinese).

- [2] 班福忱,孙晓昕,刘鑫,等. 自动分选+固液分离+油水分离工艺餐厨垃圾处理工程[J]. 环境工程,2016,34(8):145-148.

BAN Fuchen, SUN Xiaoxin, LIU Xin, et al. Introduction to a food waste treatment project with automatic sorting, solid-liquid separation, and oil-water separation process[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(8): 145-148 (in Chinese).

- [3] 刘家燕,赵爽,姜伟立,等. 餐厨垃圾厌氧消化处理技术工程应用[J]. 环境科技,2016,29(5):43-46.

LIU Jiayan, ZHAO Shuang, JIANG Weili, et al. Application of anaerobic digestion in kitchen wastes treatment project[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 29(5): 43-46 (in Chinese).

- [4] 张瑞青,杜鹏,梁恒,等. 餐厨垃圾厌氧发酵+好氧发酵处理技术工程应用[J]. 环境卫生工程,2018,26(4):90-93.

ZHANG Ruiqing, DU Peng, LIANG Heng, et al. Application of anaerobic digestion and aerobic fermentation in kitchen waste treatment technology project[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018, 26(4): 90-93 (in Chinese).

- [5] 钟庆有. 餐厨垃圾油水分离过程探讨[J]. 绿色科技, 2014(4):257-258.

ZHONG Qingyou. Discussion on oil-water separation process of kitchen waste[J]. Journal of Green Science and Technology, 2014(4): 257-258 (in Chinese).

**作者简介:**王华金(1985-),男,湖北襄阳人,硕士,工程师,主要从事餐厨垃圾处理、建筑垃圾处理、渗滤液处理、生活垃圾转运等设计研究工作。

**E-mail:** wanghuajin001@163.com

**收稿日期:**2020-04-25

**修回日期:**2020-05-06

(编辑:孔红春)