

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.02.013

分类湿垃圾协同全量厌氧消化工程设计

屈阳¹, 左武¹, 徐丽丽², 单君³, 杭建强³, 阎浩伦⁴

(1. 江苏省环境工程技术有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 上海环境卫生工程设计院有限公司, 上海 200232; 3. 维尔利环保科技集团股份有限公司, 江苏 常州 213125; 4. 上海环云再生能源有限公司, 上海 201603)

摘要: 《上海市生活垃圾管理条例》实施后,湿垃圾终端处理面临巨大挑战。上海市某湿垃圾资源化处理工程项目湿垃圾处理量为500 t/d(其中餐饮垃圾150 t/d、厨余垃圾350 t/d)、废弃食用油脂为30 t/d,总体工艺路线采用垃圾协同预处理+联合湿式厌氧消化+沼气综合利用+污水协同处理组合工艺。餐饮、厨余垃圾预处理后的物料协同水解酸化形成中低温液相,厨余垃圾沥水、餐饮垃圾废水和废弃油脂协同提油后形成高温液相,两股浆液协同进行厌氧产沼发电,油脂外售。污水处理系统处理规模为1 200 m³/d,采用两级AO+外置式超滤+NF+RO组合工艺,通过餐饮垃圾废水、湿垃圾离心沼液、焚烧厂渗滤液和渗滤液厌氧沼液的合理调配,系统进水碳氮比不低于9.9:1,无需外加碳源。项目总投资约8.73亿元,约合164.7万元/t。湿垃圾预处理和污水处理均高效协同,运行稳定,出水达标排放。

关键词: 湿垃圾; 协同处理; 厌氧消化; 污水处理; 碳源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)02-0075-07

Design of Cooperative Total Anaerobic Digestion Engineering for Classified Wet Waste Treatment

QU Yang¹, ZUO Wu¹, XU Li-li², SHAN Jun³, HANG Jian-qiang³, YAN Hao-lun⁴

(1. Jiangsu Environmental Engineering Technology Co. Ltd., Nanjing 210019, China;
2. Shanghai Environment Sanitation Engineering Design Institute, Shanghai 200232, China;
3. Welle Environmental Group Co. Ltd., Changzhou 213125, China; 4. Shanghai Huanyun Renewable Energy Co. Ltd., Shanghai 201603, China)

Abstract: The terminal treatment of wet waste is facing great challenges after the implementation of *Shanghai Municipal Solid Waste Management Regulations*. The wet waste recycling project in Shanghai has a treatment capacity of 500 t/d for wet waste (including 150 t/d food waste and 350 t/d kitchen waste) and 30 t/d for waste edible oil. The combined process consists of collaborative pretreatment, combined wet anaerobic digestion, comprehensive utilization of biogas and collaborative sewage treatment. The products generate from the pretreated food waste and kitchen waste are hydrolyzed and acidified synergistically to form a medium-low temperature liquid, and the kitchen waste leachate, food waste sewage and waste oil are extracted synergistically to form a high temperature liquid. The two kinds of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC190120603); 江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BA2020035)
通信作者: 屈阳 E-mail: 258831798@qq.com

liquids are digested synergistically to produce biogas and generate electricity, and the extracted oil is sold. The treatment capacity of the sewage treatment system is 1 200 m³/d, using a two-stage AO, external ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis combined process. Through the reasonable allocation of food waste sewage, wet waste centrifugal biogas slurry, incineration plant leachate and leachate anaerobic biogas slurry, the influent C/N ratio is no less than 9.9 : 1, and there is no need to supplement additional carbon source. The total investment of the project is about 873 million yuan, and the unit investment is approximately 1.647 million yuan/t. The wet waste pretreatment and wastewater treatment are highly cooperative, and the effluent quality stably meets the limit specified in the discharge standard.

Key words: wet waste; collaborative treatment; anaerobic digestion; sewage treatment; carbon source

上海市于2019年7月开始实施《上海市生活垃圾管理条例》，要求对生活垃圾进行强制分类处理。该条例中，将垃圾主要分为干垃圾、湿垃圾、可回收垃圾和有害垃圾^[1]，其他垃圾量减少，湿垃圾、可回收垃圾量增加是垃圾分类的目标和趋势^[1]。湿垃圾主要包括餐饮垃圾和厨余垃圾，实施强制垃圾分类后，厨余垃圾组分变化较大，含杂率明显降至4%~7%，含水率显著增至80%~90%^[2]，与餐饮垃圾性状相似。预处理+厌氧消化+沼气利用是成功应用于餐饮垃圾处理的主流工艺^[3]，其同样适用于分类较好的城市湿垃圾处理。

污水处理单元是湿垃圾处理工艺的重要组成部分。餐厨垃圾废液预处理可使溶解性碳源反硝化潜能有所提升^[4]，另外，厌氧沼液等废水进入生化处理单元前需要去除SS等预处理^[5]。本项目对湿垃圾沼液进行预处理，出水与焚烧厂渗滤液及沼液协同处理，并利用餐饮垃圾除油废水为碳源，合理调配，实现了湿垃圾污水处理系统的稳定运行。

随着我国垃圾分类工作的深入开展，包括上海在内的湿垃圾面临终端合理处理的挑战^[6]，城市餐厨厨余协同处理的需求会越来越大，本工程实例旨在为湿垃圾协同处理提供参考。

1 项目概况

上海市某湿垃圾资源化处理工程项目的用地面积为57 483.2 m²，总体工艺路线采用垃圾协同预处理+联合湿式厌氧消化+沼气综合利用+污水协同处理组合工艺。预处理及厌氧消化处理系统的主要处理对象为湿垃圾及废弃食用油脂，设计湿垃圾处理量为500 t/d（其中餐饮垃圾150 t/d、厨余垃圾350 t/d）、废弃食用油脂为30 t/d。

餐饮垃圾、厨余垃圾和废弃油脂的基本性质如表1所示。

表1 餐饮垃圾、厨余垃圾、废弃油脂的理化性质
Tab.1 Physicochemical properties of food waste, kitchen waste and waste oil

项目	含水率/%	含油率/%	含盐率/%	固渣占比/%	VS: TS/%	易腐类有机物占比/%	容重/(N·m ⁻³)
餐饮垃圾	85.3	4.2	2.1		83.2		9 500~10 200
厨余垃圾	80.2	2.1	1.2		78.2	86.2	
废弃油脂	39.3	52.1		8.6			

2 工艺设计

2.1 建设目标与边界条件

该项目建成投运后，与周边生活垃圾焚烧发电等项目充分开展协同管理与资源共享，与大园区系统中的能量流、物质流与信息流充分融合，实现蒸汽共享、沼气共用、废水与废渣共治、管理与信息数据共享的全过程清洁生产。

①餐饮厨余残渣和沼渣：进入隔壁焚烧厂焚烧处置；②沼气处理：沼气经过净化后通入内燃机发电机组燃烧进行热电联产，产生的热能用于厂区工艺系统，产生的电能自用，余电上网；③油脂处理：提取的粗油脂送至上海市指定的废弃油脂深加工企业生产生物柴油或工业产品，进行资源化利用；④污水处理：湿垃圾处理厂厌氧出水经过离心处理后与焚烧厂渗滤液、部分除油后的餐饮浆液协同进入配套的污水处理系统，排放标准执行上海市《污水综合排放标准》(DB 31/199—2018)表2中的三级标准和《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)表3中的排放浓度限值；⑤臭气处理：臭气经

管路收集,集中处理后排放。

2.2 湿垃圾协同处理工艺流程及优势

餐饮和厨余分类湿垃圾协同处理,总体工艺分为餐饮厨余垃圾预处理系统、废弃食用油脂处理系统、厌氧消化和脱水系统、沼气净化和利用系统、污水调配和处理系统及配套辅助系统,见图1。

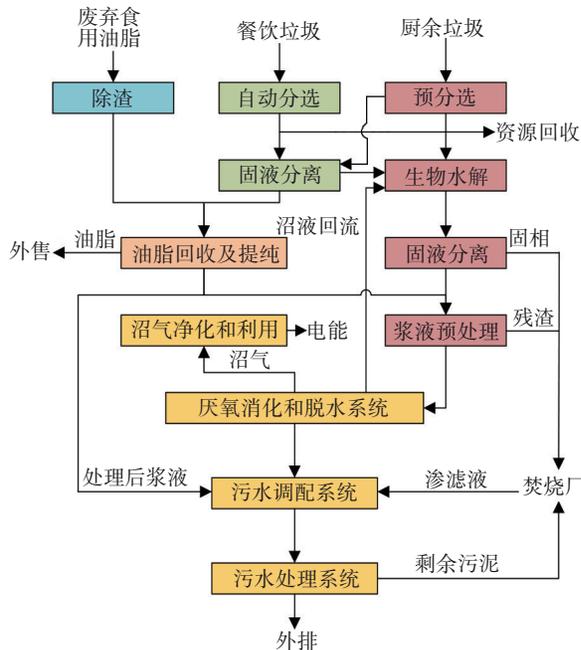


图1 总体工艺流程

Fig.1 General technological process

基于湿垃圾的特点,考虑到周边焚烧厂的处理设施,实现湿垃圾液、固相的分离,且分离后的两相均可以进行资源化利用是本项目的重点和难点。

上海厨余垃圾虽然含有园林垃圾、食品加工废物,但易腐类有机物占比、含水率等指标与餐饮垃圾相差不大,也含有一定的油脂。两类湿垃圾和废弃油脂单独处理,会造成整体工艺流程复杂、占地面积大、总投资和运行成本高等问题。采用协同处理,则可充分利用各种废弃物的特点进行优势互补。

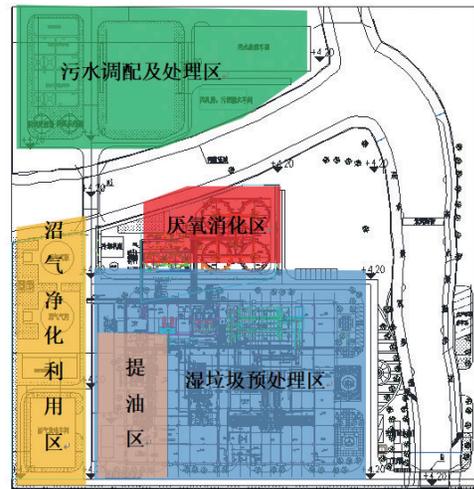
本项目通过协同预处理工艺将湿垃圾中的有机质和油分提取出来,同时去除湿垃圾中的惰性干扰物。预处理后的有机浆液进入厌氧消化系统产生沼气,获得清洁能源;剩余的固渣含水率大大降低,垃圾量有效减少,热值显著提高,可以直接送至焚烧厂。固渣和污水处理系统的剩余污泥进入周边焚烧厂协同处理,同时可利用焚烧厂多余的蒸

汽,使综合投资和运营成本降低。

厌氧沼液碳氮比很低,需要部分高碳氮比浆液和焚烧厂渗滤液来平衡,无需再外购碳源,污水处理系统可以平稳运行。混合污水进入污水处理系统,达标处理后排放。

2.3 总平面布置

总平面布置见图2。全厂总平面布置分为湿垃圾预处理区、提油区、厌氧消化区、沼气净化利用区和污水调配及处理区。两类湿垃圾协同处理,相关功能区高效协作。



a. 工艺分区



b. 现场鸟瞰

图2 总平面布置

Fig.2 General layout plan

湿垃圾预处理区与关联单元合并布置,集中除臭,可降低投资和运行成本。厌氧消化区与预处理车间相邻布置,便于物料输送。沼气净化利用区包括沼气净化设备、气柜、应急火炬和发电机房。提油区包括湿垃圾提油及废弃食用油脂提油两部分,储油罐与沼气净化利用区相邻布置,便于安全管理。

3 主要子系统设计

3.1 湿垃圾预处理系统

生物水解反应器作为系统的核心设备,其工艺

原理是在反应器内控制厌氧回流、搅拌强度和温度等条件,经过 2~3 d 水力、机械和生物水解的作用,使垃圾中的易降解有机质充分水解成小分子有机物进入液相,是厌氧消化的基础保障。餐饮固渣进入生物水解反应器协同处理,携带的有机质进一步水解利用,增加沼气产量。同时,经水解后的餐饮固渣也更容易进行固液分离,提高最终固渣的热值。

预处理工艺流程如图 3 所示。餐饮垃圾与厨余垃圾的预处理车间紧邻布置。餐饮垃圾称质量后倒入料斗,沥水后的固相进入自动分选机制浆分选。浆料经过加热后固液分离,固相与混合渣进入生物水解反应器进一步处理,而液相与餐饮沥水和厨余沥水经除渣除砂后协同加热进行三相提油。部分提油后浆液经过精细去除 SS 和有机氮后进入污水调配系统补充碳源。

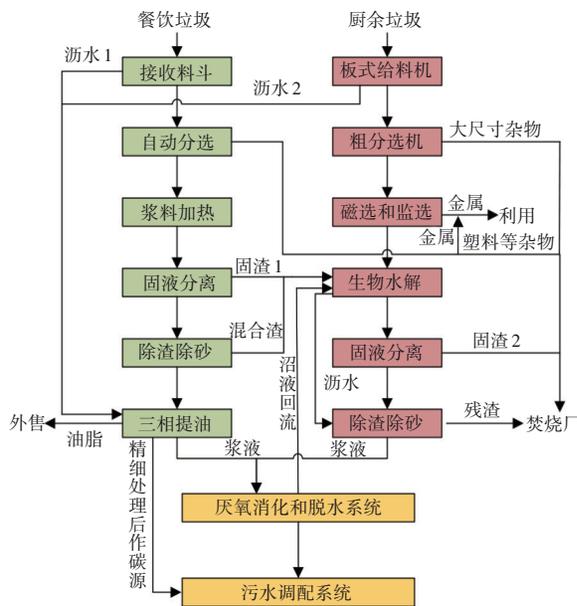


图 3 湿垃圾预处理系统工艺流程

Fig.3 Process of wet waste pretreatment system

厨余垃圾被卸入带料斗板式给料机内,经链板和皮带输送至粗分选机、磁选和分工分选,分出的杂物及餐饮杂物一起外运焚烧,金属进行资源化利用,厨余分选后物料和餐饮固渣等进入生物水解反应器。反应完成后,通过固液分离作用实现有机浆液和高热值固渣分离。固渣外运焚烧,浆液除渣除砂后与餐饮浆液混合进行厌氧消化产沼。

本项目餐饮、厨余各 2 条生产线,设计生物水解反应器 3 座,每座反应器的有效容积为 450 m³,工作时间为 24 h/d。其余设计参数见表 2。

表 2 预处理系统设计参数

Tab.2 Design parameters of pretreatment system

项目	单料斗容积/m ³	处理能力/(t·d ⁻¹)	分选杂物比例/%	杂质去除率/%	出渣含水率/%
餐饮	100	≥20	≤20	≥95	≤62
厨余	200	≥45	≤30	≥95	≤62

3.2 废弃食用油脂处理系统设计

废弃食用油脂在接收料斗内通过筛网进行粗过滤,过滤后的混合物自流进入旋转筛分机进行杂物筛选。除杂后的液相泵送进入浆液加热罐加热到 75~80 °C 后再进行提油,最终得到纯度≥97% 的毛油。提油后混合液体与湿垃圾浆液一起进入厌氧系统产沼。

该系统共 2 条工艺线,单线处理能力≥15 t/d。2 台筛分机对应 8 台 10 m³ 的浆料加热罐,同时配置 3 台处理能力为 8 m³/h 的三相提油机。

3.3 厌氧消化及脱水系统设计

相较于高固相全混式的厌氧反应器,上流式污泥床-过滤器(UBF)具有厌氧沼渣产量少、COD 降解率高、容积负荷高、停留时间短和占地面积小等优势,且特别适用于高浓度有机废水处理。

由于生物水解需要厌氧回水,厨余浆液经稀释后 COD 较低,设计两类浆液协同处理可有效解决餐饮浆液 COD 过高引起的厌氧易酸化问题。另外,25~30 °C 的厨余预处理浆液、70 °C 的餐饮浆液和冲洗废水混合后,进水温度为 40~42 °C,协同进入厌氧反应器,可省去厨余浆液升温 and 餐厨浆液降温的过程,节省投资,缩短工艺流程。

厌氧罐设计进水量为 903.5 t/d,进料 TS 为 8.17%,进料 COD 为 85 000 mg/L。厌氧消化及脱水系统工艺流程和设计参数分别见图 4 和表 3。

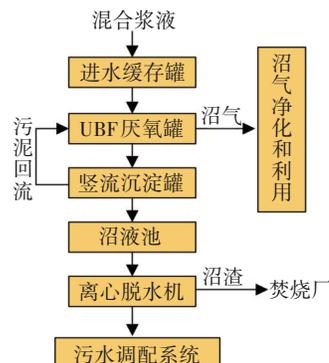


图 4 厌氧消化及脱水系统工艺流程

Fig.4 Process of anaerobic digestion and dewatering system

表 3 厌氧消化和脱水系统工艺设计参数

Tab.3 Process design parameters of anaerobic digestion and dewatering system

项目	数值
反应温度/°C	37±2
水力停留时间/d	16
上升流速/(m·h ⁻¹)	0.7~0.9
有机物转化率/%	≥80
沼气产量/(m ³ ·d ⁻¹)	32 000
甲烷占比/%	≥55
厌氧罐容积/m ³	4×4 200
污泥床容积占比/%	40
COD 容积负荷/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	6.5
处理能力/(m ³ ·h ⁻¹)	20~40
脱水 PAM 加药量/(kg·t ⁻¹ DS)	≤8
FeCl ₃ 加药量/(kg·t ⁻¹ DS)	≤80
脱水沼渣含水率/%	≤65

3.4 沼气净化和利用系统设计

沼气净化及利用系统工艺流程见图 5。厌氧消化产生的沼气先进行湿法脱硫,脱硫后的沼气进行精细过滤,接着进入气液分离单元,在水-沼气换热器中进行降温,产生大量的冷凝水排出。净化后的沼气于气柜暂存,而后增压进行发电利用。

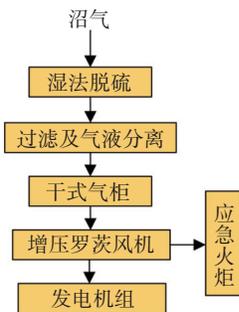


图 5 沼气净化和利用系统工艺流程

Fig.5 Process of methane purification and utilization system

脱硫系统设计处理量为 1 500 m³/h,进、出气中硫化氢浓度分别为 16 687、152 mg/m³。沼气过滤及气液分离设计处理量为 1 500 m³/h。干式气柜共 2 台,单台容积 3 000 m³。沼气发电机共 4 台,单台功率 1 560 kW,设计进气滤后压力为 8~13 kPa。

3.5 污水调配及处理系统设计

餐饮三相提油后的浆液经专用技术可以去除 SS 和大部分影响污水处理总氮控制的有机氮和氨氮,碳源碳氮比为 106:1;焚烧厂新鲜渗滤液预处理后浆液碳氮比为 24:1;而湿垃圾厌氧处理后的离心

沼液和焚烧厂渗滤液沼液碳氮比分别仅为 2:1 和 5:1,碳氮比失衡。餐饮三相提油出水为优质碳源,结合部分焚烧厂渗滤液原液等,设计协同进入污水生化系统,可调节碳氮比为 9.9:1,节省大量碳源费用。

污水处理系统采用两级 A/O+外置式超滤+NF+RO 组合工艺达标纳管排放。各类水基本指标见表 4,其中前 4 项的水量分别约为 50、520、150、320 m³。污水调配和处理工艺流程见图 6。

表 4 污水调配和处理系统相关指标

Tab.4 Indicators related to sewage allocation and treatment system

项目	pH	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)
餐饮垃圾废水	3~4	120 000	78 400	0	1 130	800
湿垃圾离心沼液	6~9	7 400	3 000	2 850	3 500	2 770
焚烧厂渗滤液	3~5	58 000	31 500	9 300	2 355	1 360
渗滤液沼液	6~9	12 500	5 500	8 000	2 450	1 830
调配后实际进水	6~8	26 620	14 760	5 570	2 700	2 010
污水系统设计进水	6~9	20 000	10 000	5 000	3 000	2 800
污水系统设计出水	5~7	500	350	400	70	45

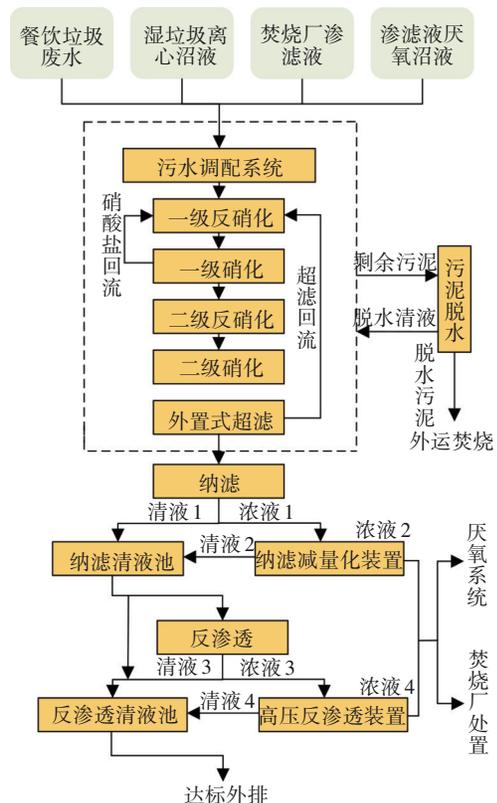


图 6 污水调配和处理系统工艺流程

Fig.6 Process of sewage allocation and treatment system

由图6可知,4种来水在污水调配系统内混合,经均衡池后泵送进入污水处理系统,处理工艺无需额外碳源。根据出水指标情况调控部分纳滤出水与反渗透出水混合达标排放;纳滤浓液和反渗透浓液经过纳滤减量化装置和高压反渗透装置进一步浓缩,浓缩液部分回流至厌氧消化系统循环处理,大部分输送至焚烧厂石灰制浆单元;剩余污泥离心脱水后外运焚烧。

污水调配和处理系统设计规模为1 200 m³/d,超滤段设计规模为1 100 m³/d,并考虑15%的超负荷处理能力。污泥设计负荷为0.146 kgCOD/(kgMLSS·d),设计反硝化速率为0.128 kgNO₃⁻-N/(kgMLSS·d),设计硝化速率为7 mgNH₄⁺-N/(gMLSS·h)。二级反硝化池池容共计5 790 m³,停留时间为4.83 d;二级硝化池池容共计10 895 m³,停留时间为9.08 d;纳滤浓液池和反渗透浓液池分别为280和356 m³。超滤集成设备4套,合计处理量1 100 m³/d;纳滤集成设备2套,合计处理量1 100 m³/d;纳滤减量化设备1套,合计处理量190 m³/d;反渗透集成设备4套,合计处理量500 m³/d;高压反渗透设备1套,合计处理量320 m³/d。

3.6 主要建(构)筑物设计参数

主要建(构)筑物均为钢筋混凝土结构形式,其设计参数见表5。

表5 主要建(构)筑物设计参数

Tab.5 Design parameters of main buildings (structures)

项目	尺寸/(m×m×m)	层数/层
卸料大厅	109.5×21.6×15.0	2
餐饮预处理间	45.0×23.9×15.0	1
厨余预处理间	55.5×21.6×15.0	1
油脂处理间	41.0×16.0×15.0	1
生物水解间	43.0×25.2×17.0	1
挤压脱水间	25.2×23.0×17.0	1
出杂间	25.2×18.1×17.0	1

4 项目投资及运行效果

该湿垃圾处理项目投资规模约8.73亿元,建设成本为164.7万元/t,直接运行成本为324.4元/t。

由近2年运营数据可知,餐饮厨余预处理系统的杂物去除率为96.7%,餐饮油脂提取率为93.6%,餐饮厨余最终混合渣含水率为60.8%,厨余垃圾粗分选大尺寸杂物的进料占比为2.1%(设计值为10.9%)。

该项目厨余垃圾处理单元设计完成时上海尚未全面开展垃圾分类工作,项目建成后垃圾性状发生了很大改变,有机物含量大幅增加、杂物量显著降低,由于厌氧系统和污水处理系统在设计时已考虑足够余量以应对冲击负荷,降低了项目运营风险。厌氧混合进水COD约为152 000 mg/L(设计值为85 000 mg/L),TS为10.9%,COD降解率为84.3%,COD容积负荷为6.2 kg/(m³·d),水力停留时间为24.7 d(设计值为16.0 d),平均产气量为66.2 m³/t(设计值为60.4 m³/t),垃圾发电量为131.8 kW·h/t(其中约65%自用),脱水沼渣含水率为64.8%。

总排气口臭气平均浓度为480,低于上海地标要求。污水处理系统无需外购碳源,最终外排水COD为140.6 mg/L,TN为38.5 mg/L,NH₄⁺-N为2.8 mg/L。

5 结论与建议

针对上海分类较好的厨余垃圾,沥水含油率均值为1.8%,应加强厨余沥水收集与餐饮协同提油。粗分选时可以选择小型设备,同时应尽量缩短工艺链,降低运营风险和成本。

生物水解反应器的优势在于无论分类好坏都能使易降解有机物充分水解,协同处理餐饮固渣和预处理后的厨余垃圾,提高有机物利用率,但针对分类好的垃圾应大幅降低厌氧回流量(均值降低58.8%)。另外,湿垃圾预处理和厌氧段协同可以降低投资成本,同时降低人工、能耗等运营成本。

餐饮三相提油出水经过膜处理等措施可作优质碳源,同时结合部分焚烧厂渗滤液原液等,可调节污水系统进水碳氮比为9.9:1,无需外购碳源。

参考文献:

- [1] 张涛,白冬锐,孙煜璨,等. 全过程管理视角的上海市垃圾分类回顾与展望[J]. 环境工程, 2022, 40(3): 173-180.
ZHANG Tao, BAI Dongrui, SUN Yucan, et al. Review and prospect of municipal solid waste classification in Shanghai from the perspective of integrated management [J]. Environment Engineering, 2022, 40(3): 173-180 (in Chinese).
- [2] 胡愈之,楼紫阳,陈芳源,等. 湿垃圾集中处理技术的困境分析及发展建议[J]. 环境污染与防治, 2021, 43

- (12): 1620-1624.
- HU Yuzhi, LOU Ziyang, CHEN Fangyuan, *et al.* The dilemma and development trend of centralized treatment technology for household food waste [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43 (12): 1620-1624 (in Chinese).
- [3] 王华金. 餐厨垃圾全物料湿式厌氧消化产沼技术的工程应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(8): 95-100.
WANG Huajin. Engineering application of wet anaerobic digesting and biogas production technology for full-scale food waste [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(8): 95-100 (in Chinese).
- [4] 柯水洲, 莫祺扬, 马晶伟, 等. 餐厨垃圾废水预处理发酵回收溶解性碳源的研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(17): 1-8.
KE Shuizhou, MO Qiyang, MA Jingwei, *et al.* Pretreatment of kitchen waste wastewater and recovery of soluble carbon source by fermentation [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(17): 1-8 (in Chinese).
- [5] 李义烁, 梁远, 颜莹莹, 等. 餐厨垃圾/市政污泥/城市粪便联合厌氧消化沼液处理设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(14): 56-62.
LI Yishuo, LIANG Yuan, YAN Yingying, *et al.* Design of treatment process of biogas slurry from anaerobic co-digestion of kitchen waste/municipal sludge/urban excrement [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (14): 56-62 (in Chinese).
- [6] 奚慧. 上海市生活垃圾全程分类体系建设现状分析及对策建议[J]. *环境卫生工程*, 2020, 28(3): 80-85.
XI Hui. Analysis on the construction status and countermeasures and suggestion of whole-process classification system of MSW in Shanghai [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020, 28 (3): 80-85 (in Chinese).

作者简介: 屈阳(1985-), 男, 江苏邳州人, 硕士, 正高级工程师, 固体部固废处理处置技术负责人。发表专业相关论文9篇, 授权发明专利、实用新型专利等6项, 负责开发且经过鉴定的新技术、新工艺2项。获评2021年度江苏省科技进步一等奖、2020年度中国石油和化学工业联合会科技进步一等奖、2022年度江苏省常州市十大科技人物。主要从事餐厨垃圾、厨余垃圾、渗滤液等相关固废、污水处理处置研究工作。

E-mail: 258831798@qq.com

收稿日期: 2022-12-25

修回日期: 2023-04-03

(编辑: 沈靖怡)

**积极践行人与自然和谐共生理念
全面加强水生态文明建设**