

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.014

焚烧耦合厌氧的厨余垃圾深度协同处理工艺设计

王 玥¹, 杨 波², 李 彪², 常宝军¹, 张云霞¹

(1. 天津市政工程设计研究总院有限公司 天津市基础设施耐久性企业重点实验室,
天津 300000; 2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100010)

摘 要: 为系统性地推动厨余垃圾处理技术的提质增效,增强大型城市多元固废协同处置项目的技术韧性,以天津市某大型城市废弃物综合处置项目为例,提出焚烧耦合厌氧的厨余垃圾深度协同处理技术框架。分析了物料、能量、环境控制及空间布局等深度协同关键要素,介绍了焚烧耦合厌氧处理工艺的总体流程,阐述了以“多级柱塞挤压预处理技术+内外循环高效厌氧技术”为核心的协同工艺详细设计。结果表明,该协同工艺能够充分实现厨余垃圾的生物质分离与能源转化,并有效降低处置成本。预处理后固渣含固率可提升至36.9%,有机浆料COD约113 000 mg/L;厌氧消化系统COD去除率约89.5%,沼气中甲烷含量约61.6%;单位处理成本约231.7元/t。

关键词: 厨余垃圾; 焚烧耦合厌氧; 深度协同处理; 柱塞挤压; 厌氧消化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0099-06

Design of Deep Collaborative Treatment Process for Kitchen Waste through Incineration Coupled with Anaerobic Technology

Wang Yue¹, Yang Bo², Li Biao², Chang Baojun¹, Zhang Yunxia¹

(1. Tianjin Enterprise Key Laboratory of Infrastructure Durability, Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300000, China; 2. China Harbour Engineering Company Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: To systematically promote the quality improvement and efficiency enhancement of kitchen waste treatment technology and enhance the technical resilience of large-scale urban multi-solid-waste collaborative disposal projects, a large urban comprehensive waste disposal project in Tianjin is taken as an example to propose a deep collaborative treatment technology framework for kitchen waste through incineration coupled with anaerobic digestion. The key elements of deep collaboration, including materials, energy, environmental control, and spatial layout, are analyzed. The overall process of the incineration coupled with anaerobic digestion treatment technology is introduced, and the detailed design of the collaborative process centered on “multi-stage plunger extrusion pretreatment technology + inter and outer circulation high-efficiency anaerobic technology” is elaborated. The results show that this collaborative process can effectively achieve biomass separation and energy conversion of kitchen waste, and significantly reduce disposal costs. After pretreatment, the solid content of solid residue can be increased to 36.9%, and the COD of organic slurry is approximately 113 000 mg/L. The COD removal rate of the anaerobic digestion system is approximately 89.5%, and the methane content in biogas is approximately 61.6%. The unit treatment cost is approximately 231.7 CNY/t.

通信作者: 王玥 E-mail: wangyuenmg@126.com

Keywords: kitchen waste; incineration coupled with anaerobic technology; deep collaborative treatment; plunger extrusion; anaerobic digestion

随着我国经济社会发展进入新阶段,人民生活水平不断提高,生活垃圾的产生总量与人均产量均显著上升。伴随垃圾分类工作的持续推进,城市生活垃圾的成分与结构发生了较大变化^[1],其中最为突出的是厨余垃圾与其他垃圾的分离比增大,导致其产量迅速攀升^[2]。相关数据显示,相较于垃圾分类政策实施前,北京市厨余垃圾分出量增加约12.7倍,上海市分出率提升了27%^[3]。厨余垃圾作为城市生活垃圾的重要组成部分,主要由蔬菜、食物残渣、果皮、蛋壳、骨头及贝类等组成,有机成分含量高,极易腐败变质,在收集、运输和储存过程中可能造成二次污染,其中滋生的病原体、寄生虫及虫卵等还会对人体健康产生不利影响^[4]。

在碳达峰碳中和战略背景下,厨余垃圾的无害化、减量化、资源化技术得到进一步发展,多元化特征日趋显著^[5]。常见的厨余垃圾处理技术包括填埋、焚烧、好氧堆肥、厌氧消化、生物转化及定向产酸等。其中,填埋与焚烧属于相对简单的传统处理方式,存在资源浪费、选址困难及废气产生等问题;好氧堆肥回收利用率高,具有良好的资源化属性^[6];生物转化技术具有成本低、资源化效率高、无二次污染等优势,能够实现厨余垃圾中干物质、粗蛋白、粗纤维等资源的循环利用,并带来较好的环境与经济效益^[7];定向产酸技术可利用厨余垃圾中糖类、蛋白质等水解产生挥发性脂肪酸,作为生物柴油、聚羟基脂肪酸酯等高附加值产品的生产原料^[8]。然而,好氧发酵、生物转化及定向产酸技术由于自身的局限性,难以适应大型城市的集中处理场景。厌氧消化因具备能源回收、适合规模化处理及低碳排放等特点,逐步成为我国大中型厨余垃圾处理项目的主流技术,在已建项目中占比达76.1%^[9]。然而,专业化厨余垃圾厌氧消化工程普遍存在沼液与沼渣处理困难、运营成本高问题。

本文以天津市某大型城市废弃物综合处置项目为例,提出焚烧耦合厌氧的厨余垃圾处理技术框架,介绍了焚烧耦合厌氧处理工艺的总体流程,分析了深度协同的关键要素,阐述了以高效厌氧消化系统为核心的协同工艺详细设计,并基于实际运行

数据分析了工艺技术的适应性,相关经验可为同类项目的设计与建设提供借鉴。

1 工程概况

天津市某城市废弃物综合处理厂是为积极落实垃圾分类政策而建设的重大民生基础设施项目。该项目主要服务范围 of 天津市部分中心城区,总投资约21.97亿元,总占地面积约36.27 hm²。建设规模如下:其他垃圾焚烧处理能力为3 750 t/d,其中一期配置3×750 t/d炉排型焚烧炉和2×30 MW抽凝式汽轮发电机组,二期配置2×750 t/d炉排型焚烧炉和1×40 MW抽凝式汽轮发电机组;厨余垃圾处理能力为200 t/d,粪便综合处理能力为300 t/d,均一次建成;同时配套建设飞灰填埋场,一期有效库容约72万m³。

2 总体设计思路

2.1 原料条件

根据项目所在地的实际调研数据,天津市生活垃圾成分如下:食品废弃物56.9%、纸类15.3%、竹木1.6%、织物3.9%、塑料16.9%、渣石2.9%、玻璃1.6%、金属0.7%。综合考虑垃圾分类的现状与未来发展趋势,并结合其他城市类似项目的经验,综合确定一期工程设计原料条件,具体如表1所示,其中VS为挥发性固体,TS为总固体。

表1 一期工程设计原料条件

项目	处理量/(t/d)	含水率/%	低位热值/(kJ/kg)	VS:TS/%
其他垃圾	2 250	60	7 357	
厨余垃圾	200	85		80
城市粪便	300	90		75

2.2 设计思路

依据上述垃圾原料条件,3类垃圾的物理构成及化学成分存在显著差异,应采用不同的处理工艺:其他垃圾有机成分较低、热值较高,适宜采用焚烧方式处置;厨余垃圾及城市粪便有机成分较高,适宜采用厌氧消化方式处置。由于不同垃圾的处理工艺之间存在交叉互补的要素,因此提出基于焚烧耦合厌氧的厨余垃圾协同处理工艺,其主要技术框架如下:

① 物料协同。厨余垃圾预处理产生的杂物

直接输送至料坑,与其他垃圾协同入炉焚烧;厨余垃圾预处理后的有机浆料与其他垃圾在料坑储存过程中产生的大量渗滤液,以及粪便预处理形成的有机废水共同调质后,协同进入高效厌氧消化系统。通过物料协同,可有效降低厨余垃圾分选杂物的处理成本,并提高厌氧消化的综合效能。

② 能量协同。厨余垃圾处置过程所需热量品质较低,因此可直接利用焚烧发电系统产生的乏汽废热。所产沼气可作为垃圾焚烧炉的助燃气体入炉焚烧,随后通过蒸汽锅炉及汽轮机转化为电能,从而有效降低厨余垃圾处置过程中的能耗成本,并显著提升发电系统的经济效益。同时,还可利用焚烧发电的烟气脱硫系统同步脱除沼气燃烧产生的二氧化硫。

③ 环境控制协同。环境控制协同重点体现在臭气控制方面。厨余垃圾处置过程中的臭气主要来自预处理工序。常规工艺因采用大量螺旋输送机、分拣机等非密闭设备,难以在源头对臭气进

行控制,需要在预处理车间内设置多次数、大体量的空间臭气收集装置,处理难度大、成本高。该协同工艺采用以柱塞挤压为核心的预处理装置,利用剩余柱塞压力将破碎后的物料通过全程密闭管道输送至垃圾料坑,并将预处理装置区的空间换气作为焚烧系统一次风的组成部分,送入炉内焚烧,从而在源头、收集及处置全流程改善臭气控制效果,大幅降低运行成本。

④ 空间协同。在厨余垃圾预处理环节,由于采用高压柱塞式挤压工艺,物料可通过管道输送至料坑。相较于传统的多级螺旋输送方式,可有效利用空间高度,节约用地面积。在厌氧消化环节,预处理后的厨余浆料、渗滤液及城市粪便废水经协同均质后,可采用内外循环(IOC)厌氧消化反应器替代传统连续搅拌厌氧反应器,获取更大的高径比和负荷能力,从而有效提升厌氧效能并节约用地。

3 工艺流程

焚烧耦合厌氧工艺流程如图 1 所示。

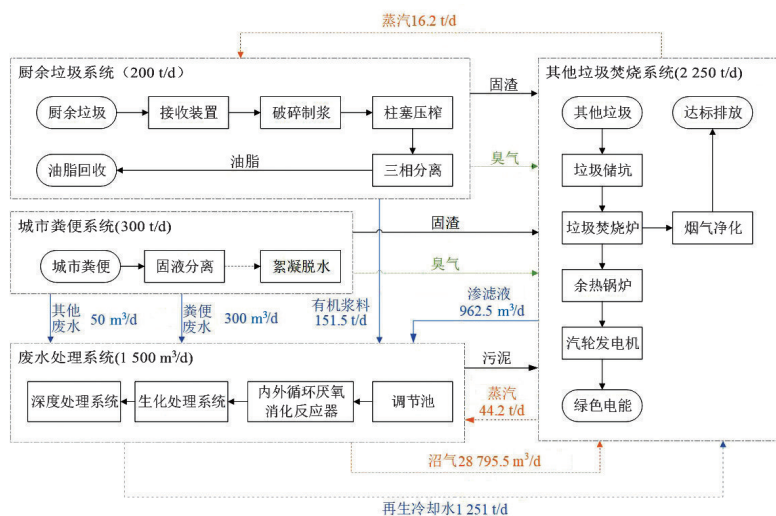


图1 焚烧耦合厌氧工艺流程

厨余垃圾预处理采用“破碎+多级柱塞挤压+三相提油”工艺,具体流程如下:厨余垃圾经料斗接收后,进入一体式双轴破碎制浆机,随后通过柱塞泵输送至一级柱塞挤压机。经高压挤压后,固相利用剩余柱塞压力由管道输送至垃圾储坑,液相输送至二级柱塞挤压机;经二次挤压后,固相利用柱塞压力由管道输送至垃圾储坑,液相则形成均一化有机浆料。有机浆料经来自焚烧系统的乏汽加热至 80℃,进行油、水、渣三相分离,油脂回收储存,液相

输送至厌氧消化系统。

其他垃圾在垃圾储坑内停留 7 d,经重力压实后送入焚烧发电系统,渗滤液通过储坑内的坑道收集并输送至厌氧消化系统。根据国内生活垃圾焚烧项目的运行经验,渗滤液处理能力往往是制约焚烧系统高效稳定运行的关键因素。根据项目建设地的垃圾分类情况,结合雨季期间渗滤液的产生峰值,按相对不利条件预测渗滤液产生量,以提高项目的处理韧性及处理能力的保障水平。

城市粪便经专用料斗接收后,进行固液分离及絮凝脱水,固相输送至垃圾储坑协同焚烧,液相输送至厌氧消化反应器。厨余垃圾预处理后的有机浆料、垃圾渗滤液及城市粪便废水进入初级沉淀池,进行除砂和初级沉淀,将悬浮物(SS)浓度控制在厌氧消化反应器允许的范围内。随后进入调节池均质并初步水解,再通过螺杆泵输送至厌氧消化反应器,进行有机物去除并回收沼气。沼气经双膜气柜缓冲,再经沼气风机增压后入炉焚烧。

处理后的废水进入废水处理系统,采用“膜生物反应器(MBR)+化学软化+管式微滤膜(TMF)+反渗透(RO)”工艺,出水水质达到《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)中敞开式循环冷却水系统补充水标准,作为焚烧系统的冷却塔补水。为避免内外循环厌氧消化反应器过度去除有机物而导致后续生化系统碳氮比失衡,在调节池至生化池之间设置超越管道,用于超越厌氧系统,并根据运行情况补充脱氮所需碳源。

预处理车间的臭气作为焚烧炉一次风的补充,入炉焚烧。为应对焚烧炉的周期性检修,设置活性炭吸附装置作为臭气处理的应急措施。

4 主要处理单元及设计参数

4.1 其他垃圾焚烧系统

项目一期工程设置3台处理规模为750 t/d的焚烧炉,设计低位热值为7 357 kJ/kg,炉膛出口烟气温度≥850 ℃,烟气在850 ℃以上的停留时间≥2 s;炉渣热灼减率<3%,漏渣率<0.5%,有机质含量≤0.1%。此外,配套设置2台抽凝式汽轮发电机组,单台额定功率为30 MW。

4.2 城市粪便处理系统

城市粪便处理系统设计规模为300 t/d,采用“固液分离+絮凝脱水”工艺。配置一体化固液分离装置2套,具备大块分拣、转鼓细格栅等功能,单套处理能力为20 t/h;同时配置螺压式污泥浓缩脱水装置2套,单套处理能力为10 m³/h,脱水后污泥含水率≤80%。

4.3 厨余垃圾预处理系统

① 设计参数

厨余垃圾预处理系统处理规模为200 t/d,共设置2条生产线,单线处理能力为10 t/h。系统设计物料平衡如表2所示。

表2 厨余垃圾预处理系统设计物料平衡

输入			输出		
项目	数量/(t/d)	TS/%	项目	数量/(t/d)	TS/%
餐厨垃圾	200.00	20.00	有机浆料	151.53	8.90
冲洗水	10.00		分选杂物	68.92	
蒸汽	16.02		回收油脂	5.57	
合计	226.02		合计	226.02	

② 主要设备参数

接收环节设置接料装置2套,料斗容积为40 m³,底部配套双螺旋输送机,螺旋直径为500 mm。

粉碎制浆环节设置全物料双轴粉碎制浆机2套,单套处理能力为10 t/h,粉碎粒径≤30 mm;配套挤压机球阀柱塞泵4套,单套处理能力为5 t/h,进料含固率≤25%,进料粒径≤30 mm,采用液压驱动。

生物质分离环节设置一级柱塞挤压机4套,单套处理能力为6 t/h,进料含固率≤25%,进料粒径≤30 mm,筛孔直径12 mm(可调),挤压压力3.5~6.0 MPa,剩余固相输送压力0.4 MPa。

油脂回收环节设置卧式三相分离机3套,2用1备,单套处理能力10 t/h,油脂回收率90%,油脂纯度97%,配套物料加热罐、毛油罐及输送泵等设备。

4.4 高效厌氧消化系统

① 设计参数

厨余垃圾有机浆液、生活垃圾渗滤液、城市粪便废水及其他废水经协同均质后,进入高效厌氧消化系统,以实现有机物的大幅去除并回收沼气。系统设计规模1 500 m³/d,设计水量和水质见表3。

表3 高效厌氧消化系统设计进料参数

项目	流量/(m³/d)	COD/(mg/L)	氨氮/(mg/L)	总氮/(mg/L)
有机浆液	151.50	120 000	1 000	2 000
渗滤液	962.50	60 000	2 000	2 500
城市粪便废水及其他废水	350.00	600	45	70
综合计算	1 464.00	52 009	1 430	1 867
设计值	1 500.00	60 000	2 000	2 500

基于上述进料参数,高效厌氧消化系统的设置如下:总有效容积为15 000 m³,共6座;COD去除率为90.0%;消化温度35 ℃;水力停留时间为10.0 d;有机负荷约6.0 kgCOD/(m³·d);容积产气率为1.92 m³/(m³·d);甲烷含量为55%~60%。

为应对均质后有机废水在调试期间或进水量波动所导致的沼气产量不足情况,厌氧消化系统选

用IOC厌氧消化反应器,即在内循环反应器的基础上增设外循环泵,以补充内循环动力,保证稳定的上升流速,从而改善传质效率。

② 主要设施参数

进水预处理环节设置正方形竖向沉淀池2座,表面水力负荷为 $0.7\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,单座尺寸为 $7.50\text{ m}\times7.50\text{ m}\times7.50\text{ m}$ (有效沉淀高度 2.50 m),出水 $\text{SS}\leq 8\,000\text{ mg/L}$ 。设置调节池1座,水力停留时间为 7 d ,有效容积约 $10\,500\text{ m}^3$,有效水深 8.00 m ,单座尺寸为 $28.30\text{ m}\times23.25\text{ m}\times8.00\text{ m}$ 。配套设备包括:自清洗过滤器3台、袋式过滤器4台、排泥泵2台、厌氧系统进料泵3台。

厌氧环节设置IOC厌氧消化反应器6套,单套有效容积 $2\,500\text{ m}^3$,高径比为 1.9 。配置循环泵8台,4用4备,单台 $Q=350\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=9\text{ m}$;配置排泥泵2台,单台 $Q=40\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=14\text{ m}$;配置封闭式应急火炬1座, $Q=1\,200\text{ m}^3/\text{h}$ 。

4.5 废水处理系统

① 设计参数

厌氧消化后的废水进入生化及深度处理系统;污泥处理采用“板框脱水+离心脱水”组合工艺,脱水后入炉焚烧;反渗透浓缩液采用碟管式反渗透(DTRO)系统进一步回收减量。生化及深度处理系统工艺流程见图2。

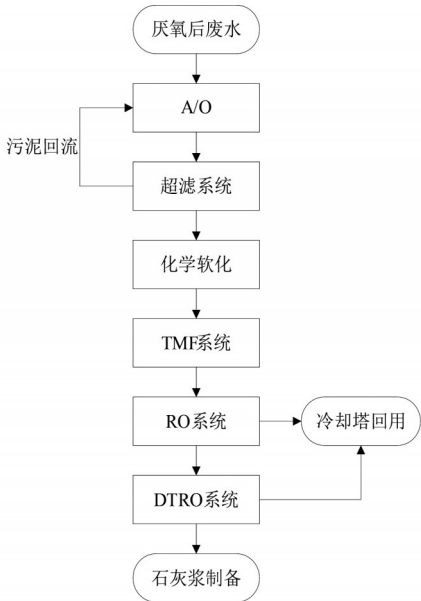


图2 生化及深度处理系统工艺流程

生化及深度处理系统的主要污染物设计进、出水浓度及各工序去除预测如表4所示。

表4 生化及深度处理系统主要污染物设计进、出水浓度及各工序去除预测

项目	进水	MBR出水	软化+TMF出水	RO出水	最终出水
COD	7 000	500	350	50	≤ 60
BOD ₅	1 425	20	15	5	≤ 10
氨氮	1 400	20	18	5	≤ 10
总氮	1 800	200	180	70	—
SS	4 000	5	5	0	≤ 20

② 核心设施参数

生化处理环节设置A/O池2座,总容积约 $13\,500\text{ m}^3$,有效水深 8 m ,水力停留时间 9 d 。设置MBR系统1套,型式为外置式管式超滤膜,膜管直径为 8 mm ,设计膜通量 $65\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。配套超滤进水泵8台, $Q=125\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=30\text{ m}$;循环泵8台, $Q=270\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=50\text{ m}$;冲洗泵2台, $Q=125\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=30\text{ m}$ 。

深度处理环节设置化学软化系统,在反应罐中投加石灰及少量次氯酸钠,通过机械搅拌反应,溢流水至浓缩水池后进入膜系统。配置反应槽搅拌器1套,转速为 60 r/min ;石灰加药系统1套,含 50 t 料仓、溶解槽、加药槽及加药泵等;管式微滤膜系统1套,膜管直径 12.5 mm ,设计膜通量 $35\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;RO系统1套,型式为卷式RO膜,产水率为 70% ;DTRO系统1套,型式为碟管式RO膜,设计膜通量 $12\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,设计回收率 50% 。配套设备包括产水泵及抽真空装置、回流泵、污泥排放泵、反洗装置、化学清洗装置及计量泵、压缩空气系统及仪表自控系统等。

污泥处理环节设置污泥池1座,总容积 400 m^3 ,配置搅拌器1台,搅拌功率约 11 kW ;配置挤压式污泥脱水机3台,单台 $Q=16\text{ m}^3/\text{h}$;污泥输送螺杆泵3台,单台 $Q=4\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=36\text{ m}$;配套絮凝剂配置及投加系统1套,最大投加能力为 $2\,000\text{ L/h}$ 。

5 结果与讨论

5.1 运行效果分析

本项目于2020年12月正式投入商业运行。根据2021年的周平均运行效果可知,厨余垃圾处理系统运行状态良好。数据显示,进场厨余垃圾的平均含固率为 21.8% ;经柱塞挤压后,固相含固率提升至 36.9% ;经加热及油脂回收后,有机浆料平均含固率为 9.0% ,COD平均浓度 $113\,000\text{ mg/L}$ 。这表明柱塞挤压工艺可利用封闭腔体的高压环境将厨余垃圾中的有机成分有效转移至浆液中,为后续高效

厌氧消化工艺提供有利条件。此外,高效厌氧消化系统的平均 COD 去除率为 89.5%,沼气中甲烷含量为 61.6%。这表明该系统对均质后的混合有机废水适应性较好,能够高效、稳定地去除有机物并转化甲烷。在项目调试期间,厨余垃圾总进料量为 6 427.84 t,总固渣量为 2 129.86 t、总产油量为 164.92 t、产水量为 4 767.14 t。

5.2 技术经济分析

经分析,稳定运行期间厨余垃圾协同处置系统的年平均消耗量如表 5 所示。

表 5 主要消耗一览

项目		年平均消耗量
外购燃料及动力	电/(kW·h)	3 689 400
	自来水/t	8 710
	蒸汽/t	11 800
外购原材料	消泡剂/t	12.10
	聚合氯化铝(PAC)/t	24.21
	聚丙烯酰胺(PAM)/t	9.61
	酸清洗剂/t	1.61
	碱清洗剂/t	4.84
	30% 盐酸/t	387
	30% 液碱/t	1.10
	还原剂/t	3.22
	阻垢剂/t	3.58
	活性炭/m ³	140
	乙二胺四乙酸(EDTA)/t	4.08
	膜更换费用/项	1
	人工成本/人	46
次生污染物处置/t		21 581
其他成本费用/项		1
年平均处理量/万 t		6

经测算,协同工艺的单位处置成本约 231.7 元/t,其中,动力成本约 48.4 元/t,原辅料成本约 51.8 元/t,人工成本约 92.0 元/t,次生污染物处置费用约 29.5 元/t,其他成本费用约 10.0 元/t。若考虑与生活垃圾焚烧一体化运行所带来的成本分摊效应,单位处置成本可降至 180.0 元/t。

6 结语

工程实践表明,以“多级柱塞挤压预处理技术+内外循环高效厌氧技术”为核心的深度协同处理工艺,能够充分实现厨余垃圾的生物质分离与能源转化,并有效降低处置成本。在焚烧耦合厌氧处理工艺条件下,预处理后固渣的含固率可提升至

36.9%,有机浆料 COD 浓度约 113 000 mg/L,厌氧消化系统 COD 去除率约 89.5%,沼气中甲烷含量约 61.6%。单位处置成本约 231.7 元/t,在与生活垃圾焚烧系统一体化运行的核算口径下,处置成本可降至 180.0 元/t。焚烧耦合厌氧处理工艺对分类后的厨余垃圾具有良好的技术适应性与经济优越性,可为多元城市废弃物协同处置的设计运行提供参考。

参考文献:

[1] 葛佳音,吴冰思,单福征,等. 上海生活垃圾理化性质演变与径向基函数神经网络模型预测:兼论垃圾分类的影响[J]. 环境污染与防治, 2023, 45 (9) : 1195-1207.

[2] 田启欢,高彦达,宫亚斌,等. 厨余垃圾中高温高效厌氧产沼中试研究[J]. 环境卫生工程, 2024, 32 (2) : 39-45.

[3] 孙文瑾,王雪梅,李子富. 厨余垃圾厌氧发酵定向产酸的影响因素[J]. 化工进展, 2024, 43 (10) : 5778-5790.

[4] 王玥,张云霞,常宝军,等. 基于“干湿协同”的厨余垃圾厌氧消化工艺设计[J]. 中国给水排水, 2024, 40 (24):64-68.

[5] 靳晨曦,孙士强,盛维杰,等. 中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J]. 中国环境科学, 2022, 42 (3) : 1240-1251.

[6] 迟孟浩,杨帆,李旺旺,等. 厨余垃圾堆肥间歇通风方式的可行性研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40 (8) : 917-921.

[7] 杨光,史波芬,周传斌. 我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价[J]. 环境科学, 2023, 44 (6) : 3024-3033.

[8] 赵宋敏,李定龙,戴肖云,等. 温度对厨余垃圾厌氧发酵产酸的影响[J]. 环境污染与防治, 2011, 33 (3) : 44-47.

[9] 杨梦霞,沈鹏飞,陈小欢. 以产物为导向的厨余垃圾厌氧发酵方式分析与建议[J]. 环境工程, 2024, 42 (10):140-146.

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

E-mail:wangyuenmg@126.com

收稿日期:2025-02-25

修回日期:2025-06-24

(编辑:沈靖怡)