

餐厨垃圾与市政污泥协同厌氧的工程应用 ——以辽宁省某地为例

张 翼

中城院(北京)环境科技股份有限公司, 北京

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年5月26日; 发布日期: 2025年6月4日

摘 要

本研究以辽宁省某地餐厨垃圾与市政污泥协同处理项目为研究对象, 针对传统单独处理工艺存在的效率低、能耗高、二次污染风险等问题, 提出基于协同厌氧发酵的资源化技术路线。工程实践验证, 通过协同厌氧, 可实现餐厨垃圾与污泥处理的有机整合, 厌氧产气率及综合利用率均较单独处理有显著提高。该项目所采用的协同处理模式为我国高寒地区有机废弃物协同治理提供了宝贵的工程实践经验。

关键词

餐厨垃圾, 市政污泥, 协同处理, 厌氧消化

Engineering Application of Anaerobic Synergy of Food Waste and Municipal Sludge —Taking a Place in Liaoning Province as an Example

Yi Zhang

Zhongcheng Academy (Beijing) Environmental Technology Co., Ltd, Beijing

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: May 26th, 2025; published: Jun. 4th, 2025

Abstract

This study takes the coordinated treatment of food waste and municipal sludge in a certain place in Liaoning Province as the research object. Aiming at the problems of low efficiency, high energy consumption and secondary pollution risk of traditional separate treatment processes, a resource-based technology route based on coordinated anaerobic fermentation is proposed. Engineering practice has verified that through coordinated anaerobic treatment, the organic integration of food

waste and sludge treatment can be achieved, and the anaerobic gas production rate and comprehensive utilization rate are significantly improved compared with separate treatment. The coordinated treatment model adopted by this project provides valuable engineering practice experience for the coordinated management of organic waste in my country's high-altitude cold regions.

Keywords

Food Waste, Municipal Sludge, Co-Treatment, Anaerobic Digestion

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 工程背景概述

随着城市化进程加速,我国餐厨垃圾与市政污泥产量激增。据统计,2022年全国餐厨垃圾年产量达1.2亿吨[1],市政污泥年产量2025年将突破超9000万吨[2]。传统处理方式如填埋、焚烧等存在环境污染与资源浪费问题。近年来,基于生物转化的协同厌氧技术因其高效节能、环境友好等特点受到关注[3]。

餐厨垃圾富含蛋白质、脂肪及碳水化合物,是优质的厌氧发酵原料;市政污泥则含有大量有机物与微生物菌群,可增强发酵稳定性。两者协同处理可通过物质互补与微生物协同作用,提升整体代谢效率。研究表明,协同厌氧系统中COD去除率可达90%以上,产气量较单独处理提高20%~30%[4]。

辽宁省某地作为典型工业城市,餐厨垃圾与污泥处理面临双重压力。2019年数据显示,该地区餐厨垃圾日均产量达150吨,污泥日均产量超300吨,传统填埋方式导致土地资源紧张与环境污染风险加剧。在此背景下,本研究提出餐厨垃圾与污泥协同厌氧处理技术,旨在实现废弃物资源化与无害化目标。

2. 工艺设计

2.1. 协同厌氧原理

市政污泥与餐厨垃圾在理化性质上具有互补性:

(1) 碳氮比(C/N)互补:餐厨垃圾C/N较高(约20~30),富含易降解的碳水化合物、脂肪和蛋白质;市政污泥C/N较低(约6~10),含较多微生物菌体、纤维素等难降解物质。混合后可将C/N调整至适宜厌氧消化的范围(15~25),避免单一原料因C/N失衡导致的氨抑制或酸化问题。

(2) 缓冲能力互补:餐厨垃圾酸化快,易导致pH骤降;污泥中含较多碱性物质(如 NH_3 、碳酸盐),可中和酸化过程,维持系统pH稳定(6.8~7.5),保障产甲烷菌活性。

(3) 营养与微生物协同:污泥中的微生物群落(如水解菌、产甲烷菌)与餐厨垃圾中的高浓度有机底物结合,可加速代谢过程;餐厨垃圾中的油脂和糖类提供能量,污泥中的微量元素(Fe、Ni、Co等)促进酶活性。

2.2. 工艺流程

(1) 污泥预处理系统

污泥预处理系统中污泥的预处理是确保后续厌氧发酵效率的关键环节。污泥(含水率约80 wt%)由运

输车运至厂区后,首先经过称重计量单元进行称重和数据记录,采用两座 40 吨规格的电子汽车衡。随后,污泥进入物料接收单元,通过三个 15 立方米的接收料仓进行存储,并由出料螺旋输送至浆化单元。

在浆化及除砂单元,污泥通过引入毗邻的污水处理厂未脱水污泥进行稀释,将其含固率调整至 2% 左右。稀释后的污泥进入水力旋流除砂器,利用离心力和重力去除重物质如玻璃碎片、陶瓷碎片、砂石和小块金属。经过除砂的污泥通过机械浓缩机进行浓缩,部分物料经调浆后进入超声破壁单元。超声破壁设备通过高频振动破坏污泥的胞外聚合物结构,改善其厌氧产沼气性能,并提高厌氧后沼渣的脱水性能。这一系列预处理措施旨在优化污泥的物理和化学性质,以提高厌氧发酵效率和资源化利用效果。主要设备包括浆化调质一体机、污泥切割机、污泥浆化搅拌机、污泥转移泵、旋流除砂器和带式压滤机等。

(2) 餐厨垃圾预处理系统

餐厨垃圾收运车在通过称重计量系统后进入预处理车间,卸料至卸料斗中。卸料斗底部的出料螺旋将垃圾输送至下一工序,过程中产生的沥液通过多孔钢板渗入沥液收集池。

餐厨垃圾首先经过大物质分选单元,利用机械振动筛选将大杂固体杂质与有机固液物分离。分选设备最大处理能力为 20 吨/小时,筛孔直径为 60 毫米。随后,垃圾进入分选制浆单元,通过分离压榨装置和粉碎制浆装置进行进一步的分离和粉碎,以提高物料的接触面积和处理效果。

湿热处理单元采用外盘管加热方式,将餐厨垃圾浆液加热至适宜温度,以提高油脂回收效率和溶解性固性物的量。湿热处理后的物料通过三相分离单元进行固液油脂分离,分离后的固体残渣和油脂分别进行资源化利用和外售。油脂回收单元通过过滤设备进一步净化油脂,确保油脂质量后外售。整个预处理系统通过多级处理和分离,确保餐厨垃圾的有效处理和资源化利用。主要设备包括卸料斗、分选机、粉碎制浆装置、湿热反应釜、三相离心设备和油脂过滤设备等,以实现高效、稳定的预处理效果。

(3) 厌氧消化系统

经过除渣的有机料液通过厌氧进料泵提升进入中温 CSTR 厌氧反应器,反应器采用溢流出料方式,底部排渣,确保物料的均匀分布和充分发酵。CSTR 厌氧反应器通过机械搅拌器的罐顶搅拌设计,促进料液的均匀混合,提升厌氧发酵效率。发酵产生的沼液进入厌氧出水罐,后续可进入后续处理单元或资源化利用,而排渣装置则将反应器底部的固体残渣定期排出,保证反应器的运行稳定性。

厌氧消化系统的主要设备包括 5 座有效容积为 4000 立方米的厌氧罐,每座罐配备一台机械搅拌器和配套的进料泵,确保物料的均匀混合和连续进料。厌氧进料泵采用螺杆泵,具有流量稳定、扬程适中的特点,能够满足系统的进料需求。此外,每座厌氧罐还配备排渣装置和阻火器,前者用于定期排出反应器底部的固体残渣,后者则用于防止因料液回流引发的火灾隐患,进一步保障系统的安全性。

(4) 沼气处理及利用系统

该系统主要包括沼气脱硫净化、贮存和发电三个部分。

沼气脱硫净化单元采用湿法和干法相结合的脱硫工艺,处理量为 $16,850 \text{ Nm}^3/\text{d}$,进气 H_2S 含量为 5000 ppm,出气 H_2S 含量降至 10 ppm 以下。湿法脱硫通过脱硫塔将 H_2S 含量降至 200 ppm 以下,再通过干法脱硫进一步降至 10 ppm 以下。脱硫后的沼气进入沼气储柜储存,并设置封闭式火炬作为应急处理手段。

沼气贮存单元采用双膜贮气柜,容积为 2000 m^3 ,具有占地面积小、投资节省、施工周期短等优点。双膜贮气柜通过内外膜的充气调压,确保沼气的稳定储存,并设有防爆鼓风机以保持气压稳定。贮气柜还具备低位报警和高位启停信号功能,确保系统的安全运行。

沼气发电单元选用一台 600 kW 的燃气活塞发电机,年发电量为 $48 \times 10^5 \text{ k} \cdot \text{Wh}$ 。发电机组配备余热回收装置,利用高温缸套水和中冷器加机油冷却器的热量,回收效率达 45%。高温烟气通过余热锅炉进一步回收热量,产生高温蒸汽供用户使用。通过这一系统,不仅实现了沼气的有效利用,还提高了整体

能源利用效率，减少了环境污染。

(5) 固渣分离及沼渣脱水系统

厌氧反应器排出的消化液和污水处理系统产生的污泥进入该系统后，通过高压隔膜压滤机进行脱水处理，脱水后沼渣含水率降至 60%以下，外运至填埋场进行填埋处理。

高压隔膜压滤机由机架、滤板、滤布、冲洗水系统、进料系统、卸料系统和自控系统组成，采用 PLC 控制，实现拉板、压紧、进料、二次压榨、卸料和冲洗的全自动化操作，运行高效且无需人工值守。其过滤原理为：消化泥浆通过进料泵压力在滤室内堆积压实，当进料压力达到 0.6~1.0 MPa 时停止进料，随后向隔膜滤板内通入高压水或空气进行二次压榨，压榨压力为 1.4~1.6 MPa，进一步降低沼渣含水率。

为提高脱水效果，在压滤前对污泥进行调理，添加石灰和三氯化铁。三氯化铁促进污泥絮凝，石灰提高絮体刚度并改善沼渣结构，从而显著提升脱水效率。系统主要设备包括低压压滤机供料泵、高压压滤机供料泵、压滤机、液压站、输送带、翻板接液装置、清洗小车、压榨泵、清洗滤布泵及配套水箱等，确保系统高效稳定运行。通过这一工艺，不仅实现了沼渣的高效脱水，还为后续资源化利用提供了保障，充分体现了协同处理工艺的环保与经济效益。

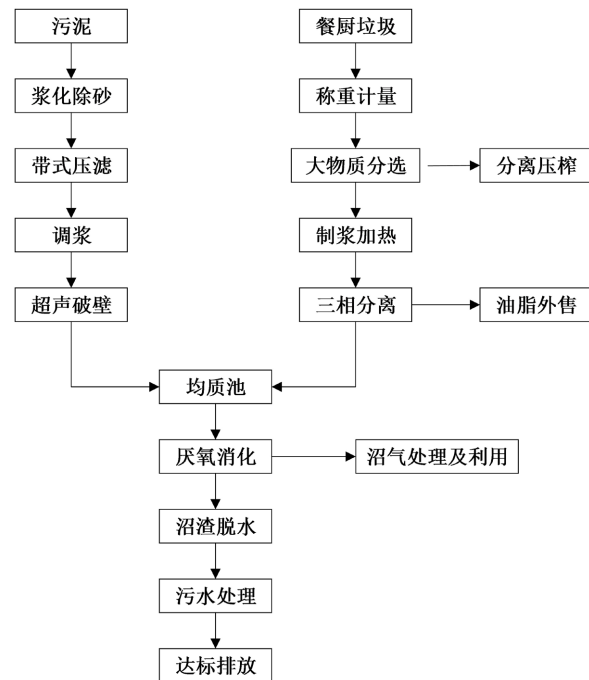


Figure 1. Process flow chart
图 1. 工艺流程图

(6) 污水处理系统

污水处理设计规模为 550 m³/d。进水水质复杂，主要污染物包括高浓度 COD、BOD、SS、油脂、NH₃-N 和 TN，处理后需达到《污水综合排放标准》(GB8978-1996)三级标准。

工艺流程采用“预处理 + 膜生物反应器(MBR)+ 纳滤”的组合工艺。预处理阶段采用絮凝沉淀与浮选工艺，降低 SS 浓度并去除油脂。MBR 系统通过外置式膜生化反应器进行生化处理，去除可生化有机物并进行生物脱氮。超滤单元进一步分离泥水混合物，确保出水水质。纳滤系统作为深度处理单元，去除剩余 COD 和色度，浓缩液采用催化氧化工艺处理，以高效降解难生化有机物并降低色度。

生化系统采用一级 A/O 工艺，分为两线处理，每线处理能力为 200 t/d。反硝化池和硝化池的设计参数确保了高效的脱氮效果。超滤单元设计参数优化了膜通量和循环流速，以提高处理效率。纳滤单元则通过错流过滤形式，截留分子量为 100 kDa，确保污染物的高效去除。

(7) 除臭系统

除臭工艺采用“生物除臭 + 化学除臭”结合“植物液喷淋”的综合处理方式。臭气收集采用吸气捕气装置和吹吸式捕集装置相结合的形式，在重点臭气产生区域(如卸料区)设置半密闭式吸入式集气罩，通过抽吸形成微负压，防止臭气外逸；在一般区域则通过吸入式管道连接设备排气孔，确保臭气及时排出。主体运行设备如分选制浆机、三相分离机等因密封性较好，仅需连接吸气管道即可。

化学除臭装置通过化学反应去除臭气中的 H_2S 和 NH_3 ，生物除臭装置则利用微生物降解臭气成分，植物液喷淋装置通过喷洒植物液进一步中和残留臭气，确保排放气体达标。主要设备包括一套化学除臭装置、一套生物除臭装置和一套植物液喷淋装置，设备风量均为 120,000 Nm^3/h 。

项目工艺流程见图 1。

3. 工程运行效果

项目运行后，对实测数据进行分析，市政污泥与餐厨垃圾协同厌氧的单位有机物分解率平均为 63.59%，较单独污泥厌氧消化时提升了 15.2%；单位干固体沼气产量平均为 571 m^3/tds ，较单独污泥厌氧消化时提升了 31%。分解单位有机物的沼气产量平均为 1.41 $m^3/kgvs$ ，较单独污泥厌氧消化时提升了 5.2%。

4. 原理分析

污泥 C/N 比较低，降解速率慢，污泥单独厌氧发酵时易产生氨氮的抑制，而餐厨垃圾 C/N 则比较高，却会因餐厨垃圾厌氧消化速度与产甲烷菌生长速度不均衡而引起挥发性有机酸等中间代谢产物积累，甚至引起系统酸化。故两者联合厌氧，即可以调节 C/N，提高厌氧系统的生物降解性，从而改善污泥的降解速率，又可以使产生的挥发性有机酸与氨氮等中间代谢产物进行部分中和反应，避免挥发性有机酸等中间代谢产物的积累，调节厌氧过程中的 pH 值，防止厌氧消化系统的酸化失效，维持厌氧系统的稳定运行。

污泥中含有大量微生物，适合作为厌氧消化的菌种来源，而餐厨垃圾含有丰富的可溶糖，可生物降解性较好，非常适合作为厌氧消化的底物，故两者联合厌氧可以促进厌氧消化优势菌种的形成，有助于混合底物厌氧消化过程的进行，以缩短厌氧消化时间。

餐厨垃圾和污泥进行联合厌氧消化可以补充各自成分中缺少的营养物质，使厌氧消化底物中的营养成分达到较好的平衡。

5. 结论与展望

本研究通过对辽宁省某地餐厨垃圾与市政污泥协同处理项目的深入分析，验证了基于协同厌氧发酵的资源化技术路线的有效性。该项目成功实现了餐厨垃圾与污泥的有机整合，达到了显著的工程应用效果。

在处理规模方面，项目实现了 150 吨/天的餐厨垃圾和 300 吨/天的市政污泥的处理能力。通过协同厌氧发酵技术，厌氧产气率及有机物分解率均有显著提升，表明该技术在提高资源化利用效率方面具有显著优势。

在技术层面，本研究提出的协同厌氧原理，通过物质互补和微生物协同作用，显著提升了整体代谢效率。实验结果表明，协同厌氧系统中 COD 去除率可达 90%以上，产气量较单独处理提高 20%~30%。这为未来同类项目的设计和实施了重要的技术参考。

尽管本研究取得了明显的有机物协同厌氧效果，但仍有进一步优化的空间。未来的研究可以集中在以下几个方面：

- (1) 提高产气效率：通过优化工艺参数和设备配置，进一步提高厌氧产气效率，降低能耗。
- (2) 拓展应用范围：探索该技术在更多地区和不同废弃物类型中的应用可能性，扩大其应用范围。

参考文献

- [1] 王雨. 零价铁耦合碱预处理强化餐厨垃圾干发酵产酸研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [2] 周夏松. 生物炭对城市污泥堆肥腐殖化过程与氮转化的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2024.
- [3] 石川, 李坤, 边潇, 等. 餐厨垃圾厌氧处理“碳中和”综合效益评价[J]. 中国环境科学, 2023, 43(1): 436-445.
- [4] Prabhu, M.S. and Mutnuri, S. (2016) Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge and Food Waste. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, **34**, 307-315. <https://doi.org/10.1177/0734242x16628976>