

# 厨余垃圾含固率对干式厌氧发酵工艺在实际工程应用中的影响及控制

吴靖宇\*, 张爱军, 杨吉祥, 李保光, 戴小东  
(北京首创环境科技有限公司, 北京 100037)

**摘要:** 随着垃圾分类政策在全国各城市开始实施, 厌氧发酵处理逐渐成为厨余垃圾处理的主流工艺投入使用。主要介绍了干式厌氧发酵工艺在厨余垃圾处理工程实践中的设计参数和运行情况。近 2 年的实际运行结果表明, 干式厌氧发酵系统在高有机负荷、高含固率物料下可以稳定运行, VS 降解率、产气率等运行指标都能达到设计水平, 但是干式厌氧发酵系统对于原料的含固率和 VS 都有相应要求。通过对运行数据的整理分析, 经过物料衡算建立了物料平衡方程, 计算出了干式厌氧发酵系统处理厨余垃圾的污泥产率, 为项目的稳定运行和今后同类型项目的设计提供了理论设计依据和工程实践参考。

**关键词:** 厨余垃圾; 干式厌氧发酵系统; 含固率; 污泥产率; VS 降解率

**中图分类号:** X703; X933.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2024)01-0070-05

**DOI:** 10.20022/j.cnki.1000-1166.2024010070

**Influence and Control of Solid Content of Kitchen Waste on Dry Anaerobic Fermentation Process in Practical Engineering Application / WU Jingyu\*, ZHANG Aijun, YANG Jixiang, LI Baoguang, DAI Xiaodong / (Beijing Capital environmental Technology Co Ltd, Beijing 100037, China)**

**Abstract:** With the implementation of waste classification policies in cities across the country, anaerobic fermentation processing has gradually become the mainstream process for kitchen waste treatment. This paper describes the design parameters and operation conditions of dry anaerobic fermentation process in the engineering practice of kitchen waste treatment. The actual operation results of the past two years indicate that the dry anaerobic system can operate stably in materials with high organic load and high solid content, the operating indicators such as VS degradation rate and gas production rate can reach the design level. However, the dry anaerobic system has corresponding requirements for the TS and VS of raw materials. Through sorting out and analyzing the operation data, the material balance equation is established through material balance calculation, and the sludge yield of dry anaerobic system for kitchen waste treatment is calculated, which provides theoretical design basis and engineering practice reference for the stable operation of the project and the design of similar projects in the future.

**Key words:** kitchen waste; dry anaerobic fermentation system; solid content; sludge yield; VS degradation rate

国家住建部在《关于进一步推进生活垃圾分类工作的若干意见》中指出, 力争再用 5 年左右的时间, 在地级及以上城市基本建立生活垃圾分类投放、分类收集、分类运输、分类处理系统, 并首次提出到十四五末全国城市生活垃圾回收利用率达到 35% 以上的总体目标, 补齐厨余垃圾和有害垃圾处理设施短板, 鼓励各地因地制宜选用厨余垃圾处理工艺<sup>[1]</sup>。

厌氧发酵处理技术指在无氧或缺氧环境下对有

机物进行转化, 最终生成沼气、沼液和沼渣的过程, 是当前主流的集中式厨余垃圾处理技术<sup>[2]</sup>。根据发酵底物的含固率, 厌氧发酵处理工艺可分为干式(含固率 > 15%) 发酵系统和湿式(含固率 < 15%) 发酵系统。干式厌氧发酵工艺因其处理量较大、占地面积较少、单位产气率较大、沼液产量较低, 在厌氧发酵工程上被广泛应用<sup>[3]</sup>。

在实际工程应用中, 由于实际厌氧发酵反应器的体积通常比较大, 保证反应器内部各处物料的均

收稿日期: 2023-06-29 修回日期: 2023-08-15

作者简介: 吴靖宇(1987-), 男, 汉, 湖北荆门人, 硕士, 主要从事废弃物处理及资源化利用等方面的工作, E-mail: wujy@cehl.hk

通信作者: 吴靖宇, E-mail: wujy@cehl.hk

匀性,提高反应器整体传热与传质的效率是保障反应过程平稳高效的基础<sup>[4]</sup>。而对于干式厌氧发酵工艺,发酵过程中的物料含固率的调控是项目稳定运行的关键参数之一。

本文通过工程实例,详细介绍了干式厌氧发酵用于厨余垃圾处理的工艺设计,同时根据系统运行的实际数据,通过对物料平衡的分析与核算,计算出干式厌氧发酵微生物的污泥产率,从而为干式厌氧发酵的运行模拟、趋势判断以及同类型新建项目的技术方案确定提供一定的理论支撑,以期为厨余垃圾的干式厌氧发酵处理系统设计和应用提供借鉴。

表1 项目所在地的厨余垃圾成分特性

(%)

易腐类	软杂质(可燃物)			硬物质(惰性物)			金属	有害垃圾	含水率
	塑料织物	纸类	木竹类	玻璃类	陶石类	贝壳			
66.5	9.82	9.43	6.56	1.52	0.48	5.43	0.19	0.07	73.55

## 1.2 工艺流程

主工艺设计采用“预处理+干式厌氧发酵+沼气发电”,辅助工艺为“沼渣堆肥+污水处理+臭气处理”。预处理系统在去除干扰物和惰性物的同时,最大程度的分离出有机物料。厌氧发酵过程产生的沼气经过生物脱硫净化后进入内燃发电机组发电,产生的电能并入国家电网。脱水残渣采用好氧堆肥技术进一步转化为腐殖质,作为市政绿化的营养土或有机肥的原料。全厂的生产污水统一收集后进入污水处理系统,经处理后排入园区渗滤液处理站再进行深度处理。

## 1.3 干式厌氧发酵系统

本项目选用的厌氧发酵工艺是单相干式厌氧发酵工艺,原料通过螺旋进料器给发酵罐进料,从方形发酵罐的一侧进入,物料是以平推流的方式移动,罐内有数个机械搅拌器,方形发酵罐的另一侧采用真



图1 本项目厌氧发酵罐体外形实体照片

## 1 工程概况

### 1.1 处理规模与垃圾成分

工程为福建省某地区厨余垃圾处理项目,总设计规模  $800 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,分期建设,其中一期建设规模为  $400 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。采用“厨余垃圾预处理+干式厌氧发酵+沼气净化发电+好氧堆肥+污水处理”的处理工艺,其中厌氧发酵反应器为干式多轴机械搅拌厌氧反应器。根据项目化验室对于进场厨余垃圾的阶段性采样分析,项目所在地厨余垃圾的垃圾成分特性如表1所示。

空抽吸出料,项目一期设2座厌氧发酵发酵罐,罐体为高抗渗钢筋混凝土材质,发酵罐外形结构如图1所示。

厨余垃圾经过破袋、一级滚筒筛(筛分粒径  $100 \text{ mm}$ )筛分及二级滚筒筛(筛分粒径  $60 \text{ mm}$ )筛分,将粒径超过  $60 \text{ mm}$  的大尺寸杂质进行分离后,通过螺旋给料器输送进发酵罐内。发酵罐侧壁及底部墙体预埋循环水管路,通过热水循环维持罐内发酵温度,发酵温度控制在中温区(即  $35 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )。发酵罐的有效容积为  $3200 \text{ m}^3$ ,其中有效液位  $7.2 \text{ m}$ ,单罐设计负荷  $120 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ,停留时间为  $26 \text{ d}$ 。由于是干式厌氧发酵工艺,罐内运行物料的设计含固率为  $19\% \sim 21\%$ ,容积负荷为  $7 \sim 10 \text{ kg VS} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 。采用均匀半连续进料与出料的运行模式,进出料时间为  $16 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ ,两座发酵罐交替进料,每次进料时长  $2 \text{ h}$ 。

## 2 干式厌氧发酵系统运行及分析

### 2.1 厌氧发酵系统的启动

干式厌氧发酵系统在2020年9月底安装完毕,11月试运行,根据干式厌氧发酵运行时罐内物料TS的要求,启动时通过添加污水处理厂产生的脱水后剩余污泥(TS为35%左右)作为接种污泥,同时添加生产用水和少许破碎后的园林垃圾(TS为75%左右),混合后的启动物料TS为15%左右,通过高压柱塞泵泵入罐内,启动液位控制在  $5 \text{ m}$  左右,经过  $50 \text{ d}$  的运行,系统达到  $100 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  处理规模,进入连

续性生产阶段。

## 2.2 运行参数检测与分析

在运行过程中,项目公司通过一周两次检测罐内物料含固率(TS)、进料物料含固率(TS)、罐内物料 pH 值等指标,统计进料量、停留时间、日产气量来观察分析罐内物料的动态变化情况,从而推导出最接近实际情况的物料平衡以及罐内 VS 降解率与厌氧发酵微生物污泥产率。

取样及检测方法如下:

每座发酵罐设 3 处取样点,沿着发酵罐长度方向等距离纵向布置,距离罐底 1.8 m。每次取样通过装载机接取物料,首先放出 2 m<sup>3</sup> 物料,消除取样管内死区物料的干扰,然后再进行取样。每个取样点取出 20 kg 物料,倒入均质桶内搅拌均匀后从该桶内取两个独立的平行样品进行分析。

进料垃圾从设备落料口进行取样,当设备稳定运行后开始取样,每次取样 10 kg,间隔 2 小时后在同样取样点再取样 10 kg,将两次取样后的样品均匀混合后作为最终样品进行分析。

TS 采用烘干法测定;VS 采用灼烧法测定,烘干设备为电热鼓风干燥箱(LC-101-3B,力辰科技),灼烧设备为箱式电阻炉(SX2-8-10LT,力辰科技);pH 值采用台式酸度计(PHS-3E,上海雷磁)直接检测。

3~5 月份的日进料量、进料含固率以及罐内物料含固率数据整理如图 2 所示,根据数据不难发现,经过预处理分选后的物料进料含固率为 24%~28%,在此进料含固率的水平下,平均每日进料量在 100 t 左右,停留时间在 25~31 d,罐内物料含固率维持在 14.5%~17.5%,与设计含固率 19%~21% 还有一定的差距,同期进料物料 VS、罐内物料 VS 以及 VS 降解率如图 3 所示,其中厨余垃圾 VS 在 75%~88% 范围内波动,经过物料在罐内将近 28 天的降解,罐内物料的 VS 稳定在 51%~60%,而 VS 降解率也保持在 44%~64% 以内(平均 VS 降解率为 55.77%),同国内同类型厨余垃圾干式厌氧发酵项目相比较,VS 降解率在行业内处于正常水平,发挥出了干式厌氧发酵在厨余垃圾处理中的理想效果<sup>[5]</sup>。

## 3 干式厌氧发酵系统物料与能量平衡

根据干式厌氧反应的反应特点,不难得出,物料进入发酵罐内,通过微生物进行水解酸化、产酸产氢以及最终产甲烷的过程,一部分物料转化成为微生

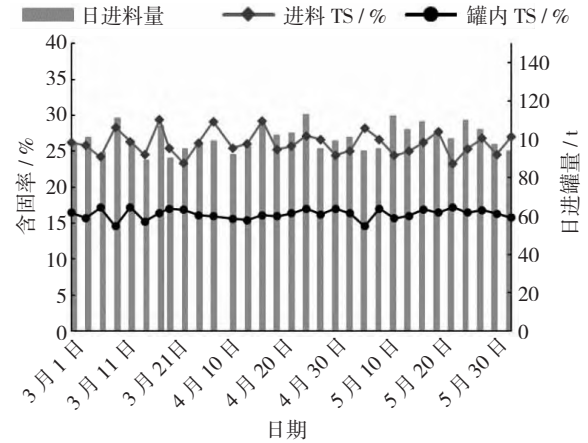


图2 进料含固率、进料量与罐内物料含固率的变化

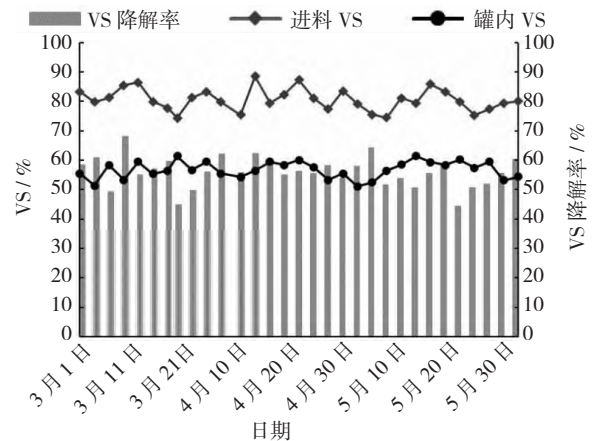


图3 进料 VS、罐内物料 VS 以及 VS 降解率的变化

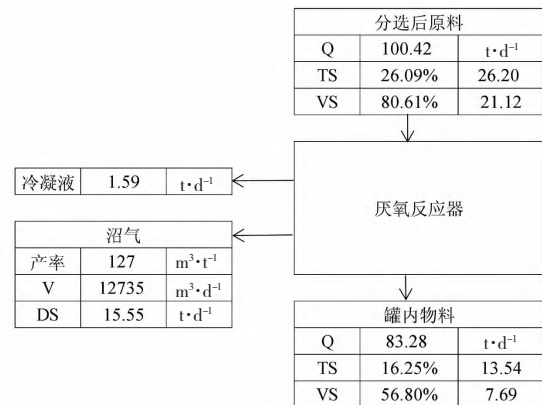


图4 实际运行状态下厌氧发酵反应物料平衡

物新陈代谢的产物——甲烷和二氧化碳而被释放出来,同时微生物在新陈代谢过程中得到生长繁殖,则罐内物料含固率的变化,除了跟进料量、进料含固率以及甲烷产率有关外,还与罐内微生物菌群的生长速率有关。该项目的厌氧发酵反应过程物料平衡如图 4 所示(图内数值取至上述数据的平均值),沼气的密度按照 1.221 kg·m<sup>-3</sup> (甲烷含量 60%,二氧化

碳含量 40%) 计算,随沼气携带出系统的冷凝水的质量按照沼气质量的 1.02‰ 计算。系统产生的沼气进入沼气发电机组进行发电(如图 5 所示),发电余热通过热交换器加以回收利用,产生的蒸汽和热水供厂内使用。

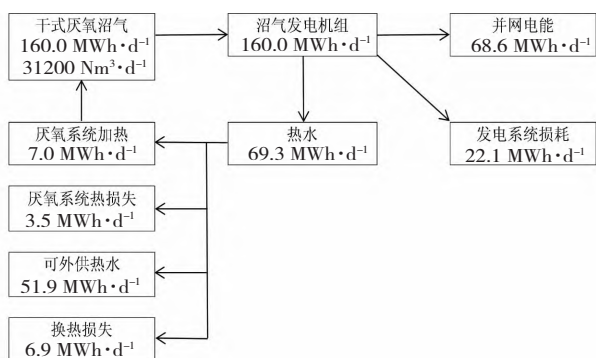


图 5 实际运行状态下厌氧发酵反应能量平衡

其中,厌氧反应新增微生物的干物质的量为:

$$13.54 - (26.20 - 15.55) = 2.89 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$$

转化成 VS 的量为:

$$2.89 \times 56.80\% = 1.64 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$$

每日降解掉的 VS 的量为:

$$21.12 \times 55.77\% = 11.78 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$$

最终得出干式厌氧发酵系统污泥产率为:

$$1.64 / 11.78 = 0.14 \text{ kg VS} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ VS} \cdot \text{d}^{-1}$$

根据计算出的干式厌氧发酵污泥产率可以推导出如果要满足罐内物料 20% 的设计含固率,当系统达到设计满负荷(即 120 t·d<sup>-1</sup>) 时,进料含固率必须达到 28.75% 以上,相关物料平衡如图 6 所示。

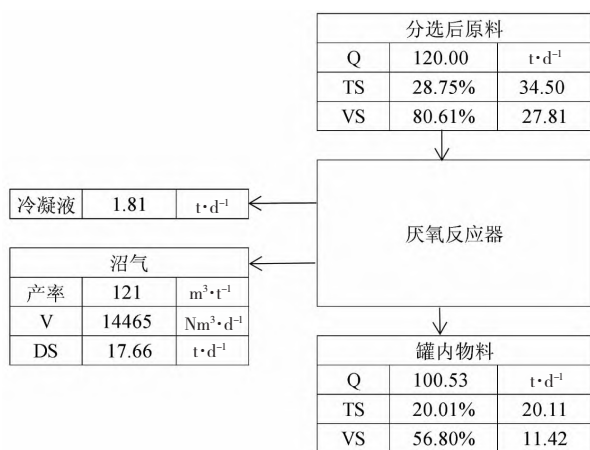


图 6 推导后的物料平衡

项目在此物料平衡模型的基础上针对前端垃圾预分选系统进行了技术改造,在预处理系统的末端增加一台螺旋挤压设备(装机功率 37 kW,挤压筛板

空隙为 2 mm),经过预分选的物料通过螺旋挤压机的处理将多余水分进行分离,进料物料平均含固率由原先的 26.09% 提升至 30.5%,通过 3 个月连续运行,罐内物料逐渐达到设计水平,在稳定运行状态下,进料含固率、罐内物料含固率以及物料 VS 降解率如图 7 所示,进料含固率从 12 月一直至 3 月份维持在 28% ~ 32%,平均进料含固率为 30.2%,罐内含固率也稳定在 18.8% ~ 21.5% 的范围内,平均罐内含固率为 19.6%。将实际运行数据带入物料平衡模型进行套算,计算出的理论罐内含固率为 21.52%,与实际运行数据相差稍微偏高,同时发现进料含固率提升之后 VS 降解率有所下降,由原来的 55.77% 降至 47.78%。分析其可能的原因是:物料含水率降低的同时,会有大量的溶解态及悬浮态有机物随着挤压出的沥液流失,而这些溶解态及悬浮态的有机质更容易降解,对 VS 降解率的贡献较大,而随着这些物质的流失,VS 降解率也相应降低。单位进料量的产气率同比也有所下降,由原来的 127 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> 变为 121 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,这是由于进料含水率的降低,不利于有机物水解酸化的进行,从而降低了甲烷的转化率<sup>[6]</sup>。

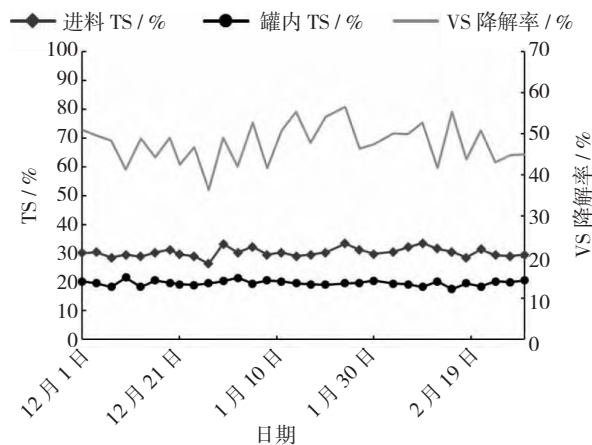


图 7 技术改造后的进料 TS、罐内 TS 及 VS 降解率的变化

#### 4 干式厌氧工程经济性分析

本项目所采用干式厌氧发酵系统直接运行费用主要包含以下 4 个方面:电耗、水耗、人工费以及维修保养费。

每套发酵罐配置 1 台 15 kW 螺旋给料器(平均运行负荷 85%,每日运行时长为 16 h)。10 台 11 kW 搅拌机(平均运行负荷为 70%,5 台为一组交替运行,24 h 运行)。后端出料系统采用真空出料系统,两套发酵罐共配置 1 台真空泵(7.5 kW,平均运



行负荷 70%, 每日累计运行时长 8 h) 和 1 台空压缩机 (30 kW, 平均运行负荷 65%, 每日累计运行时长 6 h), 此外冬季配置 1 台热水循环泵 (5.5 kW) 为发酵罐供热, 折合每日运行时长 7.2 h。厌氧系统每日电耗:  $15 \times 85\% \times 16 \times 2 + 5 \times 11 \times 70\% \times 24 \times 2 + 7.5 \times 70\% \times 8 + 30 \times 65\% \times 6 + 5.5 \times 7.2 \times 2 = 2494.2 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

系统所需冲洗水主要用于真空出料系统冲洗和日常设备冲洗, 平均为:  $8.3 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

人员配置为四班三倒, 每班 1 名运行人员, 总共 4 名。

本项目干式厌氧发酵系统 2022 年度维修保养费用为: 138000 元。

本项目干式厌氧发酵系统直接运行费用如表 2 所示, 总运行成本为  $2188.33 \text{ 元} \cdot \text{d}^{-1}$ , 年运行成本为 79.84 万元, 其中电耗费用占比 71.12%, 维修费用占比 17.37%, 人工费用 9.87% 占比, 水耗费用占比 1.70%。

表 2 干式厌氧发酵系统直接运行费用分项明细

成本因素	日消耗量	成本单价	日运行费用/(元·d <sup>-1</sup> )	吨垃圾费用/(元·t <sup>-1</sup> )
电耗/(kWh·d <sup>-1</sup> )	2494.2	0.65/(元·kWh <sup>-1</sup> )	1556.23	3.89
水耗/(t·d <sup>-1</sup> )	8.3	4.5/(元·t <sup>-1</sup> )	37.35	0.093
人工费用	4	6500(元·人 <sup>-1</sup> 月 <sup>-1</sup> )	216.67	0.54
维修费用	—	—	378.08	0.95
合计	—	—	2188.33	5.47

## 5 结论

本工程经过近 2 年半的实际运行, 证明干式厌氧发酵工艺在处理厨余垃圾过程中有稳定的运行效果, 体现了干式厌氧发酵工艺产气率高、沼液产生小、占地小等优势。根据本项目数据得出的干式厌氧发酵处理厨余垃圾的污泥产率为  $0.14 \text{ kgVS} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ VS} \cdot \text{d}^{-1}$ , 进料 TS 需保证在 30% 左右, VS 在 75% 以上方能使得干式厌氧发酵系统稳定高效运行。同类型项目在引入干式厌氧发酵工艺作为主工艺路线的同时, 必须对所在地的厨余垃圾做充分的取样分析, 使原始数据最贴近于实际情况, 然后根据实际调研数据选择合理的预处理工艺, 使分选后的厨余垃圾满足干式厌氧发酵的运行条件, 从而保证生产的高效稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 住建部, 等. “十四五”全国城市基础设施建设规划, 2022 [EB/OL]. [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202207/20220729\\_767388.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202207/20220729_767388.html), 2022-07-29.
- [2] 蒋建国, 耿树标, 罗维, 等. 2020 年中国垃圾分类背景下厨余垃圾处理热点回眸 [J]. 科技导报, 2021, 39(1): 261-274.
- [3] 王炯科, 汤晓玉, 王文国. 餐厨垃圾干式厌氧发酵研究进展 [J]. 中国沼气, 2021, 39(3): 35-41.
- [4] ABUBACKAR H N, KIESKIN T, ARSLAN, et al. Effects of size and autoclavation of fruit and vegetable wastes on biohydrogen production by dark dry anaerobic fermentation under mesophilic condition [J]. Pergamon, 2019, 44(33): 17767-17780.
- [5] 许国栋, 闫园园, 李彩斌, 等. 干式厌氧发酵反应器的中试研究 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(5): 36-38.
- [6] 瞿贤, 何晶晶, 邵立明, 等. 含水率对生活垃圾甲烷化过程的影响 [J]. 环境科学, 2009, 30(3): 918-923.