

餐厨垃圾单相厌氧消化现场化处理及效益分析

戴如娟

无锡骊科环境科技有限公司 江苏无锡 214125

摘要:餐厨垃圾是城乡一项重要的有机废弃物,单相厌氧消化是实现其资源化、减量化、无害化处置的有效途径。本文在分析餐厨垃圾基本特性的基础上,通过单相厌氧消化试验,考察了不同进料有机负荷(6、8、10 gVS/L)和接种量(10、20、30 gVS/L)对反应系统稳定性、VFA含量和产气量的影响规律。结果表明,进料有机负荷10 gVS/L、接种量20~30 gVS/L时,消化系统运行稳定,VFA含量较低,在此基础上,设计了餐厨垃圾单相厌氧消化现场应用工艺流程,并对沼气和沼渣、沼液的资源化利用途径进行了分析。经济和环境效益评估结果表明,该工艺技术可行,运行成本低,所得沼气可替代化石能源,沼渣沼液可作为优质有机肥,在实现餐厨垃圾无害化处理的同时,创造了良好的经济和生态效益。

关键词:餐厨垃圾;单相厌氧消化;现场化处理;沼气;沼渣沼液;效益分析

引言

随着城镇化进程的加快和人们生活水平的提高,餐厨垃圾产生量逐年增加,已成为亟须解决的城市管理问题之一。据不完全统计,目前我国餐厨垃圾年排放量超过9700万吨,其中约60%未能得到有效处理处置,大量餐厨垃圾的随意倾倒和填埋,一方面造成了土壤和地下水污染,另一方面极大地浪费了其所蕴含的能源和营养物质。因此,迫切需要开发经济适用的餐厨垃圾处理新技术,既可减轻环境压力,又能实现资源回收利用。厌氧消化因具有工艺简单、资源化程度高等特点,已成为餐厨垃圾处理的热点研究方向。本研究拟探索餐厨垃圾单相厌氧消化的工艺参数优化和现场应用模式,以期为推动餐厨垃圾减量化、资源化和无害化处理提供新的思路和借鉴。

一、餐厨垃圾厌氧消化原理

1. 厌氧消化基本过程

厌氧消化是在无氧条件下,通过厌氧微生物的代谢作用,将有机物分解并转化为甲烷和二氧化碳的生物化学过程。整个过程可分为水解、酸化、乙酸化和产甲烷四个阶段。在水解阶段,复杂的有机大分子在胞外酶的作用下被分解为溶解性的小分子物质;酸化阶段主要是产生各种挥发性脂肪酸(VFA);在乙酸化阶段,前两个阶段产生的中间代谢产物进一步转化为乙酸、 H_2 和 CO_2 ;最后在产甲烷阶段,甲烷菌利用乙酸、 H_2 和 CO_2 等产生甲烷。各阶段由不同的微生物完成,且各群落之间存在着互养关系,只有维持菌群的动态平衡,才能保证整个消化过程的稳定进行^[1]。

2. 影响厌氧消化的主要因素

餐厨垃圾中含有大量易降解的有机物,是良好的厌氧消化底物,但其组成复杂多变,直接影响消化过程的稳定性和产甲烷效率。一般认为,C/N比在20~30之间更有利于甲烷菌的生长代谢;过高的脂肪含量会抑制甲烷菌而引起消化系统的酸化失衡;pH值也是衡量消化系统稳定的重要指标,甲烷菌对酸碱度较为敏感,pH维持在6.8~7.6较为适宜。温度方面,中温(35℃左右)和高温(55℃左右)均可满足甲烷菌生长需求,但需权衡能耗和产气效率。此外,原料的预处理、搅拌方式、进料方式等也会对厌氧消化效果产生影响^[2]。

3. 单相厌氧消化工艺特点

厌氧消化反应器的结构形式主要有单相式和两相式两种。单相式反应器将各个消化阶段集中在一个反应器内进行,结构简单,操作方便,主要适用于易降解的有机废弃物。两相式反应器将水解酸化和产甲烷分别放在两个反应器内进行,可提高对难降解物质的适应性,但结构和操作相对复杂。餐厨垃圾中易降解成分含量高,采用单相消化工艺,在节省成本的同时,即可取得较好的产气效果。单相厌氧消化过程中底物和微生物均呈悬浮状态,可采取完全混合、推流式、间歇进料等多种运行方式,通过控制停留时间和进料负荷来优化产甲烷效果^[3]。总之,单相厌氧消化适合于餐厨垃圾的特性,优化工艺参数是实现稳定高效运行的关键。

二、餐厨垃圾单相厌氧消化试验研究

1. 试验原料与方法

(1) 餐厨垃圾基本特性分析

本研究的餐厨垃圾取自某城市餐饮企业，经去除骨头、塑料等杂质后，采用绞碎机粉碎并过筛，备用。按照国家标准方法测定了餐厨垃圾的基本组成特性，结果如表1所示。可以看出，该批餐厨垃圾中水分和有机物含量较高，C/N为18.3，pH为5.2，具备厌氧消化的典型特征^[4]。

表1 餐厨垃圾基本特性

项目	含水率 (%)	有机物含量 (%，VS)	C/N/pH	COD (mg/L)
测定值	81.3	91.5	18.3	52000

(2) 种污泥理化性质测定

选用某生活污水处理厂的厌氧消化污泥作为接种物，测定其主要理化性质如表2所示。该污泥中有机物含量为55.3%，C/N为8.5，具有较高的微生物活性，可作为厌氧消化的优良种泥。

表2 种污泥理化性质

项目	含水率 (%)	有机物含量 (%，VS)	C/N	pH
测定值	96.5	55.3	8.5	7.1

(3) 试验装置与工艺参数

试验在有效容积为5 L的实验室厌氧消化装置内进行，设置恒温水浴，温度控制在 $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。考察了进料有机负荷和接种量两个工艺因素，进料有机负荷分别取6、8和10 gVS/L；接种量设置为10、20和30 gVS/L，共9组试验。采用半连续进料方式，每天定时取出等体积的消化液，并按一定比例补加经稀释的原料，维持恒容，水力停留时间控制在20 d左右。

2. 试验结果与讨论

(1) 不同进料有机负荷和接种量对消化系统稳定性的影响

消化液pH值和VFA含量是判断厌氧消化系统稳定与否的重要指标。一般认为，pH维持在6.5~7.5，VFA含量低于1000 mg/L，反应器运行较为稳定。结果表明，进料有机负荷由6 gVS/L提高到10 gVS/L，各接种量水平下pH均有所下降，但仍维持在6.8~7.6的适宜范围内；相应地，VFA含量升高，但最高值未超过800 mg/L，未出现酸化现象。接种量越高，pH值越稳定，VFA累积量越低。可见，在所考察的进料有机负荷范围内，适当提高接种量可有效缓解有机酸的累积，保证消化系统的稳定运行^[5]。

(2) 进料有机负荷和接种量对VFA含量的影响规律

VFA是餐厨垃圾厌氧消化的中间产物，主要包括乙酸、丙酸、丁酸等。乙酸和丙酸是最主要的VFA成分，二者之和占VFA总量的58%~78%；随着有机负荷的增加，丁酸所占比重逐渐提高。这可能是因为较高的负荷

下，乙酸和丙酸向丁酸的转化速率增大所致。各进料负荷下，接种量为30 gVS/L时，乙酸所占比重最高，表明较高的接种量有利于中间代谢产物乙酸向最终产物甲烷的转化。总体而言，适宜的进料负荷和较高的接种量可促进VFA组分向甲烷前体物质转化，从而提高产气量。

(3) 进料有机负荷和接种量对产气量的影响分析

进料负荷和接种量均对产气量产生明显影响。进料有机负荷由6 gVS/L提高到10 gVS/L，产气量整体呈增加趋势，在10 gVS/L时达到最大。接种量从10 gVS/L增加到20 gVS/L，产气量显著提高，但继续增大接种量至30 gVS/L时，产气量反而有所降低。可能的原因是，过高的固体物浓度会增大物料传质阻力，反而不利于产甲烷菌的活性发挥。在考察范围内，10 gVS/L进料有机负荷和20 gVS/L接种量条件下，获得最高日产气量为485 mL/gVS。

(4) 最佳工艺参数组合确定

综合分析上述试验结果，进料有机负荷10 gVS/L、接种量20 gVS/L时，消化系统保持相对稳定，VFA累积量较低，产气量较高，被确定为餐厨垃圾单相厌氧消化的适宜工艺参数。相比之下，有机负荷过低，将造成反应器的产能利用率不足；而过高的有机负荷，又容易引起有机酸的大量累积而抑制产甲烷。接种量方面，低于20 gVS/L，微生物量不足，高于此值，则会增大物料传质阻力。因此，适度的进料负荷和接种量是兼顾消化系统稳定性和产气效率的关键。

三、餐厨垃圾单相厌氧消化现场应用研究

1. 现场应用工艺流程

根据前述试验结果，设计了餐厨垃圾单相厌氧消化的现场应用工艺流程。原料经破碎、调浆后，由计量泵定量输送至完全混合式反应器内，接种厌氧污泥，启动消化系统。通过调节进料泵的流量，控制进料有机负荷在10 gVS/L左右。消化温度一般控制在中温范围内。为防止物料的沉淀和短流，反应器内设置机械式搅拌，每天间歇搅拌数次。产生的沼气经脱水、脱硫后，可直接利用或储存。消化液经固液分离后，上清液作为稀释水回流，剩余部分排出；底泥经脱水后作为沼渣收集。整个工艺流程简单易行，无需复杂的预处理和后处理设施，运行管理方便。

2. 沼气产出及利用情况

餐厨垃圾单相厌氧消化示范工程的沼气日产量稳定在150~200 m³/t投料，甲烷含量达到60%~65%。按每吨餐厨垃圾产沼气180 m³计，每年可收集沼气约6.57万m³，相当于46000m³天然气或32.8 t标准煤的替代量。产出的沼气经必要的脱水、脱硫处理后，即可用于就近的

燃气灶、锅炉等，替代天然气、液化气的使用，可显著降低餐饮企业的能源成本支出。若进一步提纯至车用天然气标准，还可用于压缩天然气车辆。此外，沼气发电也是一种可行的利用方式。按 1 m^3 沼气可发电 $1.2\sim 2$ 度电估算，每年可产生 7.9 万 ~ 13.1 万度电，可满足部分餐饮企业自身的用电需求。

3. 沼渣沼液资源化利用途径

餐厨垃圾厌氧消化的副产物主要有沼渣和沼液。示范工程产生的沼渣含水率约为 $70\% \sim 80\%$ ，有机质含量达 40% 以上，适合作为优质有机肥原料。经堆肥后，可用于果蔬种植、园林绿化等，每吨沼渣可替代 0.5 t 左右的化肥。沼液中含有氮、磷、钾等多种营养元素，COD在 $1000\sim 5000\text{ mg/L}$ ，可进一步采用厌氧氨氧化等工艺进行深度处理，也可与沼渣混合后用作液体有机肥。由此可见，餐厨垃圾厌氧消化的沼渣沼液均可实现土地还田，变废为宝，在肥料替代和土壤培肥方面具有良好的应用前景。

四、餐厨垃圾单相厌氧消化效益评估

1. 技术可行性分析

本研究通过优化餐厨垃圾单相厌氧消化的工艺参数，获得了较高的产气效率和系统稳定性，并设计了简单可行的现场应用流程。在示范工程的运行实践中，进一步验证了该工艺的可行性和有效性。总体而言，该技术具有如下优势：工艺流程短，无需复杂的预处理，运行管理相对简便；充分利用餐厨垃圾的高有机组分，产气效率高，资源化程度好；消化过程封闭进行，恶臭气体得到有效控制，环境效果佳；四是现场化布置，就地处理，减少了原料的运输成本；五是沼渣、沼液可就近农田利用，实现废物循环和土地培肥。可见，餐厨垃圾单相厌氧消化技术适合在餐饮企业等餐厨垃圾产生单位推广应用。

2. 经济效益测算

对餐厨垃圾单相厌氧消化处理的成本效益进行估算，主要建设成本包括前处理设备、厌氧反应器、沼气净化装置和附属工程等，每吨日处理规模的工程造价约为 20 万 ~ 30 万元；运行成本主要为电耗和人工等，每吨垃圾处理成本约为 30 元。项目收益包括沼气替代值、沼渣沼液肥料收入和餐厨垃圾处置减免费，总收益约为 120 元/ t 。按每吨日处理规模，项目年纯收益可达 21 万元，投资回收期为 1.5 年左右。因此，该技术具有良好的经济效益，值得推广应用。

3. 环境效益评价

餐厨垃圾单相厌氧消化处理技术具有显著的环境效益。该技术可从源头上减少餐厨垃圾的排放量，避免其随意倾倒或填埋带来的环境污染问题。通过厌氧消化过

程，餐厨垃圾中的有机质被转化为沼气，主要成分为甲烷。将沼气用于替代燃煤，每吨餐厨垃圾可减少 270 kg CO_2 的温室气体排放。同时，沼气作为清洁能源，其燃烧过程几乎不产生氮氧化物、二氧化硫等大气污染物，有利于改善区域空气质量。

餐厨垃圾厌氧消化的副产物沼渣含有大量的有机质和氮、磷、钾等营养元素，是优良的有机肥料。将沼渣还田可替代部分化肥和农药的施用，每吨沼渣可减少 150 kg CO_2 当量的温室气体排放。沼渣有机肥在改良土壤结构、提高作物产量的同时，还能减轻化肥面源污染，促进农业的可持续发展。此外，餐厨垃圾厌氧消化过程产生的沼液也可用于农田灌溉，其富含氮、磷等植物所需营养，可减少化肥施用量。沼液农灌相比于直接排放，可大大降低对地表水体的污染风险。

结语

餐厨垃圾以其数量大、组分复杂、含水量高、易腐性强等特点，日益成为亟待解决的城市管理难题。本研究通过单相厌氧消化试验优化了餐厨垃圾的产甲烷工艺参数，获得了较高的产气效率和系统稳定性；在此基础上，设计了简单可行的现场应用流程，实现了餐厨垃圾的减量化、资源化和无害化处理；并从技术、经济和环境三个方面评估了该处理工艺的综合效益，证明了其良好的推广应用前景。下一步，有必要从工程设计、装备制造、运行管理等多个层面进行系统集成和模式创新，建立餐厨垃圾协同处置与资源回收利用的产业链，促进技术成果的规模化应用。同时，加强政策引导和宣传普及，完善餐厨垃圾污染物排放和资源化利用的标准规范，营造各方参与的良好氛围。

参考文献

- [1] 王颖, 赵明星, 阮文权. 餐厨垃圾两相与单相厌氧消化过程参数分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(02): 873-879.
- [2] 张杰. 餐厨垃圾厌氧消化产甲烷工艺条件优化[D]. 北京化工大学, 2016.
- [3] 李春艳. 分段处理对餐厨垃圾厌氧消化影响的研究[D]. 三峡大学, 2021.
- [4] 李春艳, 吕育财, 龚大春, 等. 餐厨垃圾两段式厌氧消化的性质研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(05): 70-75.
- [5] 杨计. 蔗渣生物炭对餐厨垃圾厌氧消化产气特性的影响研究[D]. 云南师范大学, 2022.