

厨余垃圾湿式厌氧发酵无害化处理技术研究

文 / 胡沛青 宣城市住房和城乡建设局环境卫生管理处

摘要：随着城市化进程的加速和人们生活水平的提高，厨余垃圾的产量急剧增加，给城市环境管理带来了巨大挑战。厨余垃圾，作为城市生活垃圾的主要组成部分，具有含水量高、有机物含量高、易腐烂发臭等特点，若处理不当，不仅会对环境造成污染，还可能成为疾病传播的源头。因此，如何高效、无害化处理厨余垃圾，实现资源的循环利用，成为当前亟待解决的问题。

关键词：厨余垃圾；湿式厌氧发酵；无害化处理技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.09.119

引言

厨余垃圾是城市生活垃圾的重要组成部分，通常含有丰富的有机物，如碳水化合物、蛋白质和脂肪等。随着城市化进程的加快和人们生活水平的提高，厨余垃圾的产量不断攀升。若对厨余垃圾处理不当，不仅会占用大量土地资源，还会产生恶臭、滋生蚊虫，传播疾病，对环境和人体健康造成严重危害。湿式厌氧发酵技术作为一种环境友好型的处理方法，在厨余垃圾无害化处理和资源化利用方面展现出巨大潜力。通过厌氧微生物的作用，厨余垃圾被分解转化为沼气等清洁能源和有机肥料，实现了资源的有效回收和利用，符合可持续发展的理念。因此，深入研究厨余垃圾湿式厌氧发酵无害化处理技术具有重要的现实意义。

一、湿式厌氧发酵技术原理

湿式厌氧发酵是在厌氧条件下，利用多种厌氧微生物的协同作用，将厨余垃圾中的有机物质逐步分解转化为甲烷、二氧化碳等气体和稳定的有机残渣的过程。这一过程主要包括以下四个阶段：

（一）水解阶段

在这个阶段，厨余垃圾中的大分子有机物，如多糖、蛋白质和脂肪等，在水解酶的作用下，被分解为小分子的糖类、氨基酸和脂肪酸等。这些水解酶由厌氧微生物分泌，它们能将复杂的有机物分解成微生物可以利用的形式。

（二）酸化阶段

水解产物在发酵细菌的作用下进一步转化为挥发性脂肪酸（VFAs）、醇类、二氧化碳和氢气等。发酵细菌利用这些底物进行代谢活动，产生能量供自身生长繁殖。在微生物代谢过程中，发酵液的pH值通常会下降，因为产生的挥发性脂肪酸会使体系呈酸性。

（三）乙酸生产期

在产乙酸细菌的作用下，上一阶段产生的醇类和氢气等被进一步转化为乙酸。乙酸是产甲烷阶段的重要底物，同时，产乙酸细菌还可以将一些长链脂肪酸进行β-氧化，生成乙酸。

（四）产甲烷阶段

产甲烷菌利用乙酸、氢气和二氧化碳等作为底物，将其转化为甲烷。产甲烷菌是一类严格厌氧的微生物，对环境条件非常敏感，如温度、pH值和氧化还原电位等。

甲烷是一种清洁能源，具有较高的热值，可以作为燃料用于发电、供热等。

二、厨余垃圾湿式厌氧发酵工艺流程

在城市化快速推进和居民消费能力增强的背景下，厨余垃圾的排放量显著增长。厨余垃圾若处理不当，不仅会占用大量土地，还会对环境造成严重污染。湿式厌氧发酵作为一种高效的厨余垃圾处理技术，具有诸多优势。它不仅能有效减少厨余垃圾的体积，还能将其转化为可利用的能源和肥料，实现废物的资源化转化。接下来，将详细介绍厨余垃圾湿式厌氧发酵工艺流程如图1所示。

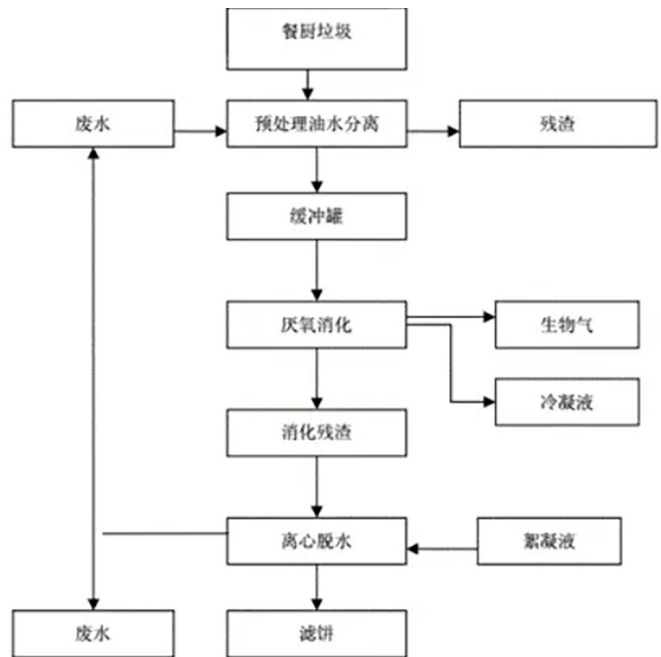


图1 厨余垃圾湿式厌氧发酵工艺流程

（一）预处理

预处理是厨余垃圾湿式厌氧发酵的重要开端。厨余垃圾来源复杂，夹杂的塑料、玻璃、金属等杂质会干扰后续处理流程。机械分选可凭借设备高效去除大部分明显杂质，人工分选则能对机械遗漏的细微杂质进行精准清理，二者结合确保杂质无残留。破碎处理能极大增加厨余垃圾的比表面积，让微生物与底物接触更充分。而调配浆液浓度是关键一步，将总固体含量控制在8%-15%，为后续厌氧发酵创造良好条件。

（二）厌氧发酵

厌氧发酵是整个工艺的核心环节。预处理后的厨余垃圾浆液进入密封的厌氧发酵罐，接种厌氧活性污泥等接种物后，发酵正式开启。温度对厌氧微生物的活性影响显著，不同菌群有适宜的温度区间。pH 值也至关重要，过酸或过碱都会抑制微生物生长。搅拌速度则关系到物料混合均匀程度。在 15-30 天的发酵时间里，这些参数相互配合，保障厌氧微生物将厨余垃圾转化为富含能量的产物。

（三）气液固分离

气液固分离是对发酵产物进行初步分类处理的关键步骤。发酵结束后，发酵产物呈现出复杂的混合状态。三相分离器等设备发挥重要作用，能精准地将沼气、发酵液和固体残渣分离开来。分离出的沼气蕴含着大量能量，是潜在的优质能源；发酵液富含氮、磷、钾等营养物质，具备成为液体肥料的潜力；固体残渣也并非无用之物，后续可通过堆肥处理转化为有机肥料，实现资源的最大化利用。

（四）沼气净化与利用

从发酵罐产出的沼气虽蕴含能量，但二氧化碳、硫化氢、水蒸气等杂质的存在，限制了其直接利用。物理吸收法利用物质的溶解性差异，化学吸收法借助化学反应去除特定杂质，生物脱硫法依靠微生物的代谢作用脱硫。经过这些净化方法处理后，沼气的品质大幅提升。净化后的沼气用途广泛，可用于发电满足部分用电需求，供热为生产生活提供热能，还能制成压缩天然气用于交通运输，真正实现厨余垃圾的资源化。

（五）发酵液与固体残渣处理

发酵液与固体残渣的处理是实现厨余垃圾全流程资源化的重要部分。发酵液中的有机物和氮、磷、钾等营养元素，通过沉淀、过滤、膜生物反应器等技术处理，去除杂质和部分有机物后，能达到排放标准或符合液体肥料要求，实现变废为宝。固体残渣的堆肥处理同样关键，在适宜的温度、湿度、通风条件下，微生物充分分解固体残渣，使其进一步腐熟，制成的有机肥料能有效改善土壤结构，提高土壤肥力。

三、影响厨余垃圾湿式厌氧发酵的关键因素

（一）温度

温度在厨余垃圾湿式厌氧发酵中扮演着举足轻重的角色。不同温度区间适配不同的厌氧微生物菌群，低温条件下发酵反应虽可持续，但微生物代谢速率较为迟缓；高温发酵效率高，却对设备的耐高温和保温性能要求苛刻。中温发酵平衡了效率与设备成本，成为实际应用的热门选择。不过，发酵过程中温度哪怕是细微的剧烈波动，都可能打乱微生物的正常代谢节奏，破坏发酵的稳定性，所以严格控温是保障发酵效果的关键。

（二）pH 值

pH 值对厌氧发酵进程的影响不容小觑。产酸菌与产甲烷菌对 pH 值的适应范围存在差异，产酸菌适应区间相对较宽，而产甲烷菌更为“挑剔”。在发酵时，产酸阶

段大量挥发性脂肪酸的生成会使 pH 值降低，一旦 pH 值超出产甲烷菌适宜范围，其活性便会受到抑制，发酵效率随之大打折扣。

（三）底物浓度

底物浓度是影响厌氧发酵成效的核心要素之一。在合理范围内提升底物浓度，意味着为微生物提供更充足的“食物”，能有效提升沼气产出量，提高资源利用率。但如果底物浓度过高，就如同给微生物“喂食过量”，超出其处理能力，有机酸会大量积聚，微生物的生长和代谢就会受到抑制，发酵效率反而下降。

（四）接种物

接种物堪称厌氧发酵启动的“钥匙”。优质接种物犹如一座微生物宝库，富含多样且活跃的厌氧微生物群落，它们能迅速在新的发酵环境中“安营扎寨”，快速启动发酵进程。厌氧活性污泥、消化后的沼渣等作为常见接种物，为发酵注入了关键动力。接种量的确定需结合实际情况，通常在 10%-30% 区间。接种物质量优劣与接种量多寡，直接决定了发酵启动的快慢以及最终发酵效果的好坏，是发酵成功的关键环节。

（五）搅拌

搅拌在厌氧发酵过程中发挥着多方面重要作用。一方面，它如同“系统均衡器”，促使发酵底物与微生物均匀混合，让微生物能充分接触和分解底物，大大提高了底物的利用效率，进而提升发酵效率。另一方面，搅拌有效避免了发酵体系中分层和沉淀现象的出现，维持了体系的均匀性。

四、国内典型的湿式厌氧发酵项目案例（山东某大型有机废弃物处理项目）

（一）项目背景

随着城市化进程加快和农业现代化发展，有机废弃物的处理成为环保与资源利用的关键问题。山东该项目所在地周边有大量畜禽粪便、农作物秸秆等有机废弃物，不仅污染环境，还造成资源浪费。在此背景下，项目于 2021 年启动，旨在实现有机废弃物的无害化处理与资源化利用。

（二）项目工艺

1. 预处理阶段

首先对收集来的畜禽粪便和农作物秸秆进行预处理。通过机械破碎设备将秸秆粉碎至 2-5cm 小段，以便后续更好地与粪便混合及微生物分解。同时，利用除砂设备去除粪便中的砂石等杂质，避免影响后续发酵设备的正常运行。

2. 混合调配阶段

按照一定比例将预处理后的秸秆和粪便进行混合，控制碳氮比在 20-30:1 之间，以满足厌氧微生物生长需求。添加适量的水，将物料含水率调整至 80%-85%，形成适合湿式厌氧发酵的均匀物料。

3. 厌氧发酵阶段

混合物料进入大型厌氧发酵罐，罐内温度控制在 35℃ - 38℃（中温发酵），通过罐体的搅拌系统，使物料与接种的厌氧微生物充分接触。发酵周期设定为 25-

30 天,在此过程中,有机物质在厌氧微生物作用下分解产生沼气。

4. 沼气净化与利用阶段

发酵产生的沼气首先经过脱硫、脱水等净化处理,去除其中的硫化氢、水分等杂质,使沼气纯度达到 90% 以上。净化后的沼气一部分用于项目自身的发电系统,配备的发电机组总装机容量为 1000kW,年均可实现清洁电力产出 730 万千瓦时;同时,通过高效提纯工艺将另一部分沼气转化为车用级生物甲烷,年供应量可满足 50 万立方米的绿色燃气需求。

5. 沼渣沼液处理阶段

发酵后的沼渣和沼液经过固液分离,沼渣经过进一步处理后可制成有机肥料,年生产有机肥料 5000 吨;沼液则进行深度处理,达标后用于周边农田的灌溉,每年能提供大概 8 万立方米符合灌溉标准的沼液用于循环利用。

(三) 项目独特优势

该项目优势显著。在规模上,每日可处理畜禽粪便 200 吨、农作物秸秆 80 吨,是当地最大的有机废弃物综合处理项目,解决周边污染问题。新技术应用方面,采用先进智能监控系统实时监测调控发酵参数,新型罐体材料和结构设计提升性能。资源综合利用率高,通过湿式厌氧发酵,沼气用于发电和外用,有机肥料满足周边农田需求。经济效益也十分可观,通过发电上网、销售产品,每年收入 1500 万元。

五、厨余垃圾湿式厌氧发酵无害化处理技术的应用效果

(一) 无害化处理效果

湿式厌氧发酵在厨余垃圾无害化处理方面成效显著。在发酵过程中,微生物对有机物质的分解活动营造了特殊环境,使得病原菌、寄生虫卵等有害生物难以生存。适宜发酵条件下,经过特定时长的发酵,大肠杆菌、沙门氏菌等常见病原菌数量大幅下降。严格的检测数据显示,其数量远低于无害化处理标准。

(二) 资源化利用效果

厨余垃圾湿式厌氧发酵的资源化利用成果令人瞩目。大量沼气的产生是其突出优势,依据不同的垃圾成分与发酵条件,沼气产量处于 150-300m³/t(干物质计)区间。这一清洁能源在发电、供热领域发挥重要作用,创造可观经济价值。

六、国内厨余垃圾处理现状及技术瓶颈

(一) 现状

在我国,城市化进程的加速与居民生活水平的显著提升,使得厨余垃圾产量呈现出持续攀升的态势。以具体数据为例,2019 年我国厨余垃圾产量为 6300 万吨;到了 2020 年,这一数字增长至 6800 万吨;2021 年,产量进一步增至 7400 万吨。而 2022 年,厨余垃圾产量达到了 8100 万吨,2023 年更是攀升至 8800 万吨。如此快速增长,无疑对厨余垃圾处理技术提出了更高的要求。厨余垃圾自身特性复杂,其含水量在 70%-85% 之间,pH

值处于 4.5-6.5 呈弱酸性,富含碳水化合物、蛋白质、脂肪等,同时也含有纤维素、矿物质以及塑料等杂物。这种复杂的成分使得厨余垃圾极易滋生细菌并产生异味,因此在处理前必须进行杂物分离。

(二) 技术瓶颈

1. 预处理成本高

设备购置费用高昂,相关预处理设备价格不菲,给企业带来较大资金压力。运行维护成本巨大,需投入大量资金用于设备保养、维修等。厨余垃圾质量差异大,成分复杂且不稳定,进一步增加了预处理难度与成本。

2. 发酵效率亟待提高

发酵耗时久,较长的发酵过程限制了整体处理效率,无法满足日益增长的处理需求。沼气产量不稳定,波动幅度较大,严重影响能源回收利用的效率与质量。

3. 沼渣沼液处理难度大

若处理方式不恰当,沼渣沼液中的有害物质极易渗入土壤、流入水体,对生态环境构成严重威胁。

七、发展方向与建议

我国厨余垃圾处理面临诸多挑战,需多管齐下加以应对。在预处理工艺上,要集中科研力量研发分拣、粉碎、除杂于一体的高效设备,优化结构与运行模式,引入智能控制系统,降低成本并提升质量。发酵过程中,培育高效接种物,借助先进设备精准调控参数,提高发酵效率与稳定性。对于沼渣沼液,加大深度处理技术研发投入,转化为高附加值产品并探索新兴应用领域,实现综合利用。此外,加强公众宣传和政策支持也至关重要。通过多种媒体普及知识,提高公众认知与参与度;政府完善政策体系,给予企业优惠支持,激发企业推广先进技术的动力,推动厨余垃圾处理走向产业化、规模化。

结语

厨余垃圾湿式厌氧发酵无害化处理技术作为一种有效的厨余垃圾处理方式,具有无害化、资源化的显著优势。然而,该技术在实际应用中还面临着一些挑战和技术瓶颈。通过优化预处理工艺、强化发酵过程控制、拓展沼渣沼液综合利用途径以及加强公众宣传和政策支持等措施,可以进一步提升处理效率,实现厨余垃圾资源化利用和无害化处理。

参考文献

- [1] 孙燕华. 厨余垃圾厌氧处理工艺影响因素和适应性研究 [J]. 绿色矿冶, 2024, 40(06): 101-107.
- [2] 林奋. 厌氧发酵技术在厨余垃圾资源化中的应用分析 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(06): 247-249.
- [3] 李天水. 厨余垃圾干式厌氧发酵与湿式厌氧发酵技术分析 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(03): 49-53.
- [4] 陈严华, 曾蒸, 廖德荣, 等. 厨余垃圾干式厌氧发酵酸化失稳调控及微生物群落分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(18): 116-118.
- [5] 林艺平. 厨余垃圾厌氧发酵启动的接种物试验研究及工程建议 [J]. 环境卫生工程, 2020, 28(04): 27-31.