

餐厨垃圾厌氧发酵产沼气工艺优化与效能分析

张 锋¹ 沈安全²

1. 中城院(北京)环境科技股份有限公司 北京 100000

2. 中国船舶集团环境发展有限公司 北京 100000

摘要:餐厨垃圾因高有机质含量具备厌氧发酵产沼气潜力,但高油脂、高盐分等特性限制其适配性。本文系统分析餐厨垃圾的组分构成、理化性质及对厌氧发酵的适配性,阐述厌氧发酵产沼气的基本原理、核心环节与生成机制。从原料预处理、发酵参数调控、系统结构优化及过程运行优化四个维度提出工艺优化方向,并围绕沼气生成、餐厨垃圾降解及发酵系统运行稳定性开展效能分析,为提升餐厨垃圾资源化利用效率提供理论支持。

关键词:餐厨垃圾;厌氧发酵;沼气生成;工艺优化;效能分析

引言:随着城市化进程加快,餐厨垃圾产量持续增长,传统填埋与焚烧处理方式易引发二次污染,资源化利用需求迫切。厌氧发酵技术通过微生物代谢将餐厨垃圾中的有机物转化为沼气,兼具废弃物减量与能源回收双重优势,成为当前研究的热点。然而,餐厨垃圾的高油脂、高盐分及碳氮比失衡等特性,导致发酵过程中易出现浮渣层、微生物活性抑制等问题,影响沼气产率与系统稳定性。因此,需系统分析餐厨垃圾特性与厌氧发酵的适配性,优化工艺参数与系统结构,以提升资源化利用效能。

1 餐厨垃圾的特性

1.1 餐厨垃圾的组分构成

餐厨垃圾主要由食物残余、烹饪废料及少量包装材料组成,其有机物含量显著高于其他生活垃圾^[1]。从化学组成看,碳水化合物、蛋白质与脂肪是核心成分,三者占比随饮食结构差异呈现波动。碳水化合物以淀粉类为主,来源于米饭、面食等主食残渣;单糖与双糖则分布于水果、甜点等易腐食品中。蛋白质成分涵盖动物蛋白与植物蛋白,动物蛋白主要来自肉类加工废弃物,植物蛋白多存在于豆制品及谷物残渣。脂肪类物质以动物油脂与植物油为主,高油脂含量常见于餐饮行业废料,易在厌氧环境中形成油膜,阻碍微生物与底物接触。无机物组分包括盐分、矿物质及微量重金属,其中氯化钠含量受地域饮食习惯影响显著,高盐环境可能抑制产甲烷菌活性。此外,餐厨垃圾中常混入少量不可降解杂质,如塑料碎片、玻璃渣及金属制品,需通过预处理环节分离以避免干扰发酵过程。

1.2 餐厨垃圾的理化性质

含水率是餐厨垃圾最显著的物理特征,通常维持在75%至90%之间,高水分含量虽有利于微生物代谢活动,

但过高的含水率会导致发酵体系容积负荷过大,增加渗滤液处理成本。粒度分布方面,未经处理的餐厨垃圾粒径差异较大,大块食物残渣需通过破碎工艺减小尺寸,以提升比表面积,促进水解阶段反应效率。pH值动态变化反映发酵进程,初始阶段酸性物质积累导致pH下降,产甲烷阶段需维持中性环境(pH6.8-7.2)以保障甲烷菌活性。氧化还原电位(ORP)是判断厌氧状态的关键指标,需控制在-300mV以下以抑制好氧微生物生长。生物降解性方面,餐厨垃圾中易降解组分占比高,但脂肪与长链纤维素的分解速率较慢,可能延长水力停留时间。

1.3 餐厨垃圾对厌氧发酵的适配性

餐厨垃圾的组分与理化性质决定具备较强的厌氧发酵适配性,高有机质含量为厌氧微生物代谢提供充足底物,可通过微生物协同作用分解转化为沼气。易生物降解的特性能够缩短厌氧发酵周期,提升发酵过程的效率,其中碳水化合物、蛋白质与油脂可被厌氧微生物逐步分解,释放甲烷等可燃气体。但自身存在的特性也会限制适配性,高油脂含量可能在发酵过程中形成浮渣层,阻碍传质过程,高盐分含量则可能抑制厌氧微生物活性,导致发酵效能下降。碳氮比偏低的问题会影响微生物代谢平衡,需通过物料调配等方式优化。通过合理的预处理与工艺参数调控,可改善餐厨垃圾厌氧发酵适配性,充分发挥其资源潜力,实现能源回收与废弃物减量化的协同目标。

2 厌氧发酵产沼气的基本工艺

2.1 厌氧发酵的基本原理

厌氧发酵产沼气是微生物在无氧环境下将有机底物分解转化为可燃气体的生物化学过程,该过程依赖多种厌氧微生物的协同代谢作用,整个反应过程遵循生物代谢热力学规律,属于复杂的多步酶促反应^[2]。厌氧发酵过

程无需氧气参与,微生物通过无氧呼吸将有机物质逐步降解,最终生成沼气、消化液和消化污泥。参与反应的微生物主要包括水解酸化菌、产氢产乙酸菌及产甲烷菌,各类微生物分工明确且相互依存,共同完成有机底物的转化。水解酸化菌负责将复杂有机大分子分解为小分子有机酸、醇类等易降解物质;产氢产乙酸菌将上述小分子物质进一步转化为乙酸、氢气和二氧化碳;产甲烷菌则利用乙酸、氢气等底物合成甲烷,构成完整的代谢链条。反应过程需维持适宜的环境条件,确保各类微生物活性,进而保障发酵过程稳定推进,该原理是餐厨垃圾厌氧发酵产沼气工艺设计与优化的理论基础,相关研究已在环境工程领域形成成熟理论体系。

2.2 餐厨垃圾厌氧发酵的核心环节

餐厨垃圾厌氧发酵的核心环节围绕有机底物的降解与气体生成展开,各环节紧密衔接,共同构成完整的发酵体系。首先是水解环节,餐厨垃圾中的复杂有机组分在水解菌作用下,打破大分子结构,转化为可被微生物进一步利用的小分子物质,该环节是整个发酵过程的起始步骤,直接影响后续反应效率。随后进入酸化环节,小分子物质在酸化菌作用下发生酸化反应,生成乙酸、丙酸等挥发性脂肪酸,同时释放少量氢气和二氧化碳,酸化程度需控制在合理范围,避免挥发性脂肪酸过度积累对产甲烷菌产生抑制。接下来是产甲烷环节,这是沼气生成的关键环节,产甲烷菌在无氧环境下利用酸化产物合成甲烷,该环节对环境条件要求严苛,温度、酸碱度等参数的波动都会影响产甲烷菌活性。最后是固液分离环节,将发酵后的消化液与消化污泥分离,消化液可经处理后资源化利用,消化污泥则可进一步处置或回用,各核心环节的稳定运行是保障发酵效能的关键。

2.3 沼气的生成机制

沼气的生成是厌氧微生物代谢作用的直接结果,其核心成分是甲烷和二氧化碳,同时含有少量氢气、氮气等微量气体,生成机制与厌氧发酵各阶段的微生物代谢密切相关。甲烷的生成主要有两条路径,一条是乙酸分解路径,产甲烷菌通过酶促反应将乙酸分解为甲烷和二氧化碳,该路径是甲烷生成的主要途径,贡献了发酵过程中大部分甲烷产量;另一条是氢气还原二氧化碳路径,产甲烷菌利用发酵过程中产生的氢气,将二氧化碳还原为甲烷,该路径在氢气充足的条件下可显著提升甲烷产量。二氧化碳主要来源于酸化环节的有机酸分解和产甲烷过程的副反应,其含量受发酵环境与底物组分影响存在差异。沼气生成速率与微生物活性、底物特性及环境参数密切相关,适宜的温度、酸碱度和营养条件可促进

微生物代谢,加快沼气生成速率,而底物中有害物质的积累则会抑制沼气生成,相关机制已通过微生物代谢学研究得到明确阐释。

3 餐厨垃圾厌氧发酵产沼气工艺的优化方向

3.1 原料预处理工艺优化

原料预处理是提升餐厨垃圾厌氧发酵产沼气效能的前置关键环节,优化重点集中于杂质去除、物料改性及可生化性提升^[3]。预处理需先去除餐厨垃圾中混杂的塑料、骨头等无机杂质,通过破碎处理调控物料粒径,保障底物均一性以适配后续发酵需求。可采用热水解耦合pH调节的预处理方式,根据发酵目标优化温度与酸碱度条件,促进餐厨垃圾中大分子有机物高效增溶,减少难降解副产物生成。同时调控物料总固体含量与含水率,平衡底物特性与微生物代谢需求,为后续厌氧发酵构建稳定的底物环境,提升有机组分的转化效率,该优化思路契合有机固废资源化处理的技术研究方向。

3.2 发酵参数调控优化

发酵参数调控优化是保障厌氧发酵过程稳定、提升沼气产率的核心手段,需围绕微生物代谢特性精准调控各项关键参数。pH值需采用在线监测与自动调节相结合的方式实现全程稳定控制,根据发酵体系代谢方向维持适宜区间,激活功能菌群活性并抑制杂菌繁殖。温度调控需贴合功能菌群生长需求,采用分级调控模式,适配不同发酵阶段菌群的最适生长温度,强化菌群代谢效能。氧化还原电位需通过高纯氮气吹扫与过程调控维持严格厌氧环境,规避不适宜区间对发酵过程的抑制作用。此外需优化碳氮比与有机负荷率,平衡菌群生长与代谢需求,减少氨抑制、酸抑制等问题出现,相关调控方法已在多项厌氧发酵研究中得到验证。

3.3 发酵系统结构优化

发酵系统结构优化聚焦于反应器设计与组件适配,核心目标是提升物料混合效率与发酵稳定性。优化反应器罐体结构设计,合理布局搅拌装置与换热组件,减少物料沉积与局部反应不均现象,强化底物与微生物的接触效率。可借鉴先进反应器设计理念,优化进出料口布局与尺寸,实现物料连续稳定输送,降低运行阻力。同时完善保温与换热结构,维持发酵体系温度稳定,减少能量损耗。通过结构优化可缓解高浓度物料发酵时的搅拌困难问题,提升反应器容积利用率,为高效厌氧发酵提供结构支撑,相关设计思路符合厌氧发酵反应器的研发趋势。

3.4 发酵过程运行优化

发酵过程运行优化侧重于流程管控与异常调控,实

现工艺连续稳定运行。建立发酵过程在线监测体系,实时追踪温度、pH值、氧化还原电位等关键指标,及时识别发酵异常并采取针对性调整措施。优化搅拌频率与强度,适配物料特性与发酵阶段需求,避免过度搅拌造成的能量浪费与菌群损伤^[4]。合理调控水力停留时间,贴合底物代谢动力学特征,保障底物充分降解的同时提升工艺运行效率。此外可通过接种污泥预处理与生物强化手段,优化菌群结构,提升体系抗干扰能力,减少发酵过程中的抑制现象,推动工艺运行效能持续提升,契合厌氧发酵工业化应用的实际需求。

4 厌氧发酵产沼气的效能分析

4.1 沼气生成情况分析

沼气生成情况是衡量厌氧发酵工艺效能的核心指标,其分析围绕生成速率、组分构成及生成总量展开,相关分析方法已在环境工程与生物能源领域形成标准化体系。沼气生成速率反映发酵过程中气体产生的快慢,受底物特性、发酵参数及微生物活性共同影响,速率波动可直观体现发酵过程的稳定性,速率过高或过低均表明发酵系统存在异常。沼气组分以甲烷和二氧化碳为主,甲烷含量是决定沼气能源价值的关键,其含量高低与产甲烷菌活性、底物组分及发酵环境密切相关,正常厌氧发酵条件下,甲烷含量需维持在合理区间才能保障沼气的后续利用。沼气生成总量与餐厨垃圾投加量、有机质降解率直接相关,通过生成总量分析可评估工艺对原料的利用效率,为工艺优化提供数据支撑,同时也能反映发酵系统的整体转化能力。

4.2 餐厨垃圾降解情况分析

餐厨垃圾降解情况分析聚焦有机组分的分解转化程度,是评估工艺资源利用效率的重要依据,主要通过降解率及降解速率开展分析。降解率用于衡量餐厨垃圾中可降解有机质的分解比例,核心针对碳水化合物、蛋白质、油脂等主要有机组分,不同组分降解率存在差异,碳水化合物降解速率较快,油脂降解速率相对较慢,降解率高低直接反映底物与微生物的适配性及工艺的合理性。降解速率体现有机组分分解的快慢,受预处理效果、发酵参数及微生物群落结构影响,降解速率过低会延长发酵周期,增加运行成本。降解情况分析需结合发酵周期,通过监测不同阶段底物组分变化,明确降解规律,同时

判断是否存在底物降解不完全的问题,为原料预处理优化及发酵参数调整提供方向,确保餐厨垃圾资源得到充分利用。

4.3 发酵系统运行稳定性分析

发酵系统运行稳定性分析是保障工艺长期高效运行的重要前提,主要围绕环境参数、微生物群落及系统运行状态开展,依托长期监测数据实现精准分析^[5]。环境参数稳定性分析重点关注温度、酸碱度、碳氮比等关键参数的波动范围,参数波动过大会破坏微生物代谢平衡,导致发酵效能下降甚至系统崩溃,稳定的环境参数是微生物正常代谢的基础。微生物群落稳定性分析聚焦各类功能微生物的数量及比例变化,功能微生物群落失衡会导致代谢链条断裂,影响有机底物转化与沼气生成。系统运行状态分析包括反应器运行畅通性、沼气收集效率、固液分离效果等,反应器堵塞、沼气泄漏等问题会直接影响系统稳定性。通过运行稳定性分析,可及时发现系统运行中的异常隐患,采取针对性调控措施,维持系统长期稳定运行,保障工艺效能持续发挥。

结束语

餐厨垃圾厌氧发酵产沼气工艺通过原料预处理优化、发酵参数精准调控、系统结构改进及过程运行管理强化,可显著提升沼气生成效率与餐厨垃圾降解率,同时保障发酵系统长期稳定运行。研究结果表明,针对高油脂、高盐分等特性采取针对性优化措施,能够有效克服传统工艺的局限性,实现餐厨垃圾资源化利用的高效化与可持续化。

参考文献

- [1]纪栋,姚志松,张陈,等.餐厨垃圾厌氧发酵产沼气过程中的微生物群落结构解析[J].太阳能学报,2022,43(9):354-362.
- [2]肖扬帆,孙仕善,李昭君,等.餐厨垃圾中温湿式厌氧发酵产沼气的研究[J].中国资源综合利用,2021,39(6):32-34,38.
- [3]陈细妹.进料负荷调整对餐厨垃圾厌氧发酵酸化及恢复的影响研究[J].环境卫生工程,2025,33(5):27-34.
- [4]林炳荣.城市餐厨垃圾厌氧发酵段微生物多样性的动态分析[J].智能城市,2024,10(10):85-89.
- [5]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.