

# 大中型沼气工程二次厌氧发酵工艺应用探讨

张 锋<sup>1</sup> 王 浩<sup>2</sup>

1. 中城院(北京)环境科技股份有限公司 北京 100000

2. 台州福星生态环保科技有限公司 浙江 台州 318000

**摘 要:** 在生物质能源利用领域,二次厌氧发酵工艺是提升大中型沼气工程效能的核心技术,但系统稳定性不足、经济性欠佳等问题制约其推广。传统单反应器发酵存在微生物代谢冲突,而二次发酵通过“分段调控”优化反应环境。本文阐述该工艺四阶段理论与技术内涵,分析系统构成及关键参数,剖析技术瓶颈、经济挑战与实操问题。研究提出技术参数精准调控、设备系统集成优化、经济可行性提升及运维体系完善等策略,为推动二次厌氧发酵工艺规模化应用、提升生物质能源转化效率提供参考。

**关键词:** 大中型沼气工程;二次厌氧发酵工艺;应用

**引言:** 随着畜禽养殖、餐厨垃圾等有机废弃物排放量激增,资源化利用需求迫切,大中型沼气工程成为能源回收与环保治理的重要载体。传统厌氧发酵工艺因反应过程耦合,常出现酸积累抑制、产气效率低等问题,难以适配大规模处理需求。二次厌氧发酵通过拆分反应阶段实现精准调控,为突破上述局限提供新路径。然而该工艺在实际应用中,面临难降解底物处理、系统失衡、成本高企等诸多难题。基于此,本文系统研究二次厌氧发酵工艺的理论与实践,探寻优化方案,助力其在生物质能源领域发挥更大价值。

## 1 大中型沼气工程二次厌氧发酵工艺的核心理论基础

### 1.1 二次厌氧发酵的基本原理与四阶段特性

二次厌氧发酵是兼性厌氧和厌氧微生物群体在无氧环境下,将有机物质转化为甲烷、二氧化碳等产物的生物降解过程。该过程具有鲜明的四阶段特性,各阶段环环相扣且由特定微生物主导。第一阶段为水解,碳水化合物、蛋白质等复杂有机物在水解细菌作用下,分解为单糖、氨基酸等可溶性小分子;第二阶段是酸化,小分子物质经产酸细菌代谢,生成挥发性脂肪酸、醇类及少量气体,这些产酸细菌对环境适应性强,是厌氧发酵中的基础功能菌群;第三阶段为产氢产乙酸,上述产物在产氢产乙酸细菌作用下转化为乙酸、氢气和二氧化碳,这类细菌与后续产甲烷菌形成紧密的共生关系,其代谢产物是产甲烷过程的核心底物;第四阶段即产甲烷,产甲烷古菌将乙酸和氢气进一步分解,最终生成以甲烷为主的沼气,完成能量转化闭环。

### 1.2 二次厌氧发酵工艺的技术内涵

二次厌氧发酵工艺核心是将传统单反应器的四阶段过程,拆分至两个独立反应器中分步完成,实现“分段

调控、精准优化”。第一阶段反应器聚焦水解与酸化过程,通过控制温度、搅拌强度等参数,为水解菌和酸化菌创造适宜环境,加速有机底物分解为小分子酸类;第二阶段反应器则专门优化产甲烷条件,维持稳定的中温或高温环境,保障产甲烷古菌活性,高效转化乙酸和氢气为沼气。两反应器通过物料输送系统衔接,第一阶段的产物作为第二阶段的精准底物,形成功能互补的连续反应体系,打破单反应器内微生物代谢冲突。

### 1.3 二次厌氧发酵的核心技术优势

该工艺的优势源于对发酵过程的精准拆分。一是提升产气效率,分段优化使各阶段微生物活性最大化,相比传统工艺产气量可显著提高,同时缩短整体反应周期,有机负荷承载能力提升数倍。二是增强过程稳定性,第一阶段产生的有机酸可在第二阶段被及时消耗,避免单反应器内酸积累抑制产甲烷菌的问题,降低工艺波动风险。三是优化底物降解,两阶段分工使复杂有机物分解更彻底,有机残渣含量大幅降低,既提升能源回收率,又减轻后续残渣处理压力。四是适应原料多样性,通过调整两段反应器参数,可高效处理畜禽粪污、餐厨垃圾等不同特性的有机原料,提升工程适用范围<sup>[1]</sup>。

## 2 大中型沼气工程二次厌氧发酵工艺的系统构成与关键参数

### 2.1 工艺系统的核心构成

二次厌氧发酵工艺系统以“分段代谢、高效转化”为核心设计逻辑,由原料预处理单元、两级串联发酵单元、气液固分离单元及辅助保障系统四部分构成。预处理单元通过破碎、筛分去除杂质,同时调节原料总固体浓度(TS%)与碳氮比(C/N),为微生物代谢提供均衡底物。两级发酵单元形成功能分工:一级反应器聚焦易

降解有机物的快速水解酸化，二级反应器则针对难降解底物进行深度甲烷化，大幅提升原料利用率。分离单元通过三相分离器实现沼气、沼液与沼渣的高效分离，辅助系统包含搅拌、换热、气体净化及自控模块，其中搅拌系统保障物料均匀混合，换热系统维持稳定反应温度，共同确保系统连续运行。

## 2.2 关键工艺参数体系及调控逻辑

工艺参数调控以“维持产酸菌与产甲烷菌代谢平衡”为核心逻辑，核心参数涵盖温度、pH值、有机负荷率(OLR)、C/N及挥发性脂肪酸(VFA)浓度。温度控制分为中温(35-37℃)与高温(55℃)两种模式，需通过换热系统将波动控制在±2℃内，避免抑制微生物活性。pH值应稳定在6.8-7.5的适宜区间，当VFA积累导致pH低于6.3时，需投加碳酸氢盐补充碱度，防止系统酸化。OLR需根据反应器类型匹配，一级发酵通常控制在3-5kgCOD/m<sup>3</sup>·d，二级发酵降至1-2kgCOD/m<sup>3</sup>·d，通过阶梯式负荷调整避免冲击。C/N以20-30:1为宜，可通过秸秆与畜禽粪便配比调节；VFA作为核心预警指标，乙酸需控制在800mg/L以内，超标时需降低负荷并强化搅拌。

## 2.3 反应器类型及选型适配性分析

反应器选型需基于原料特性与运行需求精准匹配。连续搅拌式反应器(CSTR)适合湿法发酵，通过机械搅拌实现物料均质化，适配畜禽粪便等液态原料，但其能耗较高且需配套高效沼液处理设施。厌氧升流式污泥床(UASB)依托颗粒污泥层实现高效反应，抗冲击负荷能力强，甲烷产率高，适用于高浓度有机废水类原料。卧式推流式反应器则针对干法发酵设计，通过强制推料解决高TS物料输送难题，适配秸秆、餐厨垃圾等固态原料，容积利用率可达85%以上。选型时需遵循三大原则：高氨氮原料优先选用CSTR稀释毒性，纤维性原料适配卧式反应器强化降解，水资源短缺地区优先采用干法系统；规模化处理时可采用“UASB+卧式反应器”组合工艺，兼顾效率与经济性<sup>[2]</sup>。

## 3 大中型沼气工程二次厌氧发酵工艺的应用分析

### 3.1 技术层面核心瓶颈

二次厌氧发酵工艺的技术瓶颈集中体现在系统稳定性与物料转化效率两方面。在物料降解环节，初次发酵后残留的底物多为木质纤维素等难降解成分，其结构致密导致微生物分解难度大，若未进行针对性预处理，易造成二次发酵池内底物滞留，降低容积利用率。同时，二次发酵过程中沼液回流虽能减少处置成本，但长期高比例回流会引发系统失衡，表现为铵态氮含量骤降、金属离子积累，最终导致产气率下降。微生物群落调控难

度大也是核心问题。二次发酵对菌种活性要求更高，而发酵环境波动(如pH值、温度变化)易导致产甲烷菌数量减少，甲烷纯度波动。此外，不同原料配比会显著影响发酵效果，秸秆与粪污混合发酵时，若碳氮比控制不当，会出现挥发性脂肪酸积累，抑制微生物代谢，而当前缺乏精准的参数调控模型支撑动态调整。

### 3.2 经济层面可行性挑战

成本高企是制约工艺推广的首要经济因素，其中原料成本占总支出的47%-70%，成为最大成本项。生物质资源分散性强，收储运环节需投入大量人力物力，尤其在偏远地区，运输成本可占原料成本的30%以上。二次发酵需额外建设专用反应池及配套搅拌设备，初期投资比单次发酵高25%-40%，且设备维护费用随运行时间逐年增加。收益端的局限进一步加剧了经济性压力。沼气及副产品(沼肥、沼渣)的市场接受度不足，沼肥因标准缺失导致农民使用意愿低，而沼气提纯成本较高，终端售价普遍高于常规天然气，缺乏市场竞争力。部分项目产能利用率不足60%，加之二次发酵能源消耗比单次发酵高15%左右，形成“高成本、低收益”的恶性循环，导致投资回报周期普遍超过8年，资本吸引力较弱。

### 3.3 工程应用中的实操问题

原料预处理环节的实操缺陷较为突出。大中型工程处理量庞大，若秸秆等原料粉碎不彻底，会造成二次发酵池进料口堵塞，增加清理成本；而过度粉碎则会提升能耗，形成成本与效率的矛盾。物料输送系统也易出现问题，粘稠的发酵底物会附着在管道内壁，长期积累导致输送效率下降，需定期停机清理，影响连续生产。运行监控与运维管理存在明显短板。二次发酵过程需实时监测产气率、甲烷含量等多项指标，但部分工程监测设备精度不足，数据滞后达2-4小时，无法及时应对系统波动。运维人员专业能力参差不齐，对发酵异常判断不准确，如将产气下降简单归因于原料不足，忽视盐分积累等隐性问题，导致故障处理周期延长。此外，沼渣沼液的后处理处置面临困境，深度处理技术操作复杂、成本高，简易堆放则易引发环境问题，形成二次污染风险<sup>[3]</sup>。

## 4 大中型沼气工程二次厌氧发酵工艺的优化路径

### 4.1 技术参数优化策略

技术参数的精准调控是二次厌氧发酵的核心，需根据原料特性实现全流程适配。温度控制上，一级发酵侧重有机物分解，中温工艺宜稳定在35℃±2℃，若原料温度高于50℃则选用55℃±2℃的高温工艺，二级发酵聚焦甲烷化，温度波动需严控在±2℃内。水力停留时间应分段设定，一级发酵宜缩短以加速酸化，二级发酵需延长

至15-20天,确保甲烷菌活性稳定。容积有机负荷需按降解阶段差异化配置,一级发酵可设定较高负荷以快速分解易降解有机物,二级发酵则降低负荷至1.5-2.0kgCOD/(m<sup>3</sup>·d),避免有机酸积累抑制菌群活性。pH值控制采用阶梯调节方式,一级发酵维持6.0-6.5促进酸化菌繁殖,二级发酵通过回流沼液将pH值稳定在7.0-7.5,保障甲烷化效率。

#### 4.2 设备与系统集成优化

设备选型与系统集成需以工艺匹配度和运行稳定性为核心。反应器选择应兼顾原料特性,一级发酵采用完全混合式反应器强化物料扰动,二级发酵选用升流式厌氧污泥床反应器,通过三相分离器实现气固液高效分离,斜板与水平面夹角宜设为55°-60°提升沉淀效果。搅拌与换热系统需协同优化,一级发酵采用沼气搅拌方式,通过均匀布置的配气环管保证物料混合均匀;二级发酵选用机械搅拌,搅拌器半径按罐体尺寸匹配为3-6m,直径较大时需多组均匀布置。换热装置总换热面积应预留10%-20%余量,采用罐壁保温与内部盘管结合的方式,选用阻燃环保保温材料控制热量损耗。气体收集系统需设置稳压装置,集气管距液面不小于1000mm,管径经水力计算确定以减少阻力损失。

#### 4.3 经济可行性提升方案

经济可行性提升需通过成本控制与资源增值实现平衡。原料预处理环节采用格栅-沉砂-匀浆一体化设备,减少后续设备磨损,降低维护成本。能源回收系统优化聚焦沼气利用效率,通过脱硫净化装置降低气体杂质含量,配套余热回收设备将发电余热用于发酵加热,减少外部能源消耗。副产品资源化提升附加值,厌氧消化液经固液分离后,采用膜处理技术浓缩制成液体有机肥,脱水污泥含水率控制在80%以下,加工为固体有机肥。设备选型优先采用模块化设计,实现一级与二级反应器的灵活切换,提高设备利用率,同时选用Q235或Q345钢制反应器,通过防腐处理延长使用寿命,降低更换成本<sup>[4]</sup>。

#### 4.4 运维管理体系优化

构建全流程标准化运维体系是工艺稳定运行的保障。建立原料检测机制,通过在线监测设备实时获取原料含量等指标,动态调整进料量与参数设置。设备维护实施分级管理,搅拌器、换热器等关键设备建立运行台账,定期检查密封性能与运行噪音,配气环管每季度进行疏通防堵塞。菌群调控采用定期监测与定向培养相结合的方式,通过微生物测序技术跟踪菌群结构变化,当甲烷菌活性下降时,补充颗粒污泥或营养添加剂。安全管理重点强化气体监测,在反应器上部设置正负压保护装置与低压报警系统,集气管路定期检测密封性,避免沼气泄漏风险。建立数据追溯系统,实时记录温度、pH值等运行参数,通过数据分析优化工艺调控策略。

结束语:二次厌氧发酵工艺凭借分段调控优势,为大中型沼气工程提质增效奠定基础,其发展契合环保与能源双重战略需求。本文梳理该工艺的理论体系、系统特性与应用瓶颈,提出的多维度优化策略,可有效提升工艺稳定性与经济性。未来,需进一步强化微生物调控机制研究,结合智能监测技术构建动态优化模型。同时,应完善副产品利用标准与政策支持,降低投资风险。相信通过技术创新与产业协同,二次厌氧发酵工艺将在有机废弃物资源化领域实现更广泛、高效的应用。

#### 参考文献:

- [1]鲍家泽,王如平,马玉银等.工程应用视域下农业生物质厌氧发酵资源化技术综述与建议[J].浙江农业科学,2022,63(06):1309-1313+1331.
- [2]马元元,吴瑒,王朴淳,等.低碳背景下剩余污泥厌氧共发酵产酸研究进展[J].环境工程,2024,42(01):102-109.
- [3]马厚龙,刁若梦,代战永,等.我国餐厨垃圾资源化利用技术现状分析及建议[J].黑龙江农业科学,2023,(07):108-112.
- [4]李晨曦,赵宇彭,兰珊,等.餐厨垃圾厌氧消化技术研究现状及展望[J].热带农业工程,2022,46(06):140-142.