

城市污水处理厂污泥厌氧发酵产沼气工艺优化研究

张 锋¹ 岳 磊²

1. 中城院（北京）环境科技股份有限公司 北京 100000

2. 北京碧水源膜科技有限公司 北京 100000

摘 要：城市污水处理厂污泥厌氧发酵产沼气工艺优化研究聚焦于提升沼气产量与效率。研究通过优化预处理方法，如热水解、碱处理等，强化污泥水解效果；调控关键参数，如温度、pH、C/N比，提升微生物活性与代谢效率；探索共发酵技术，利用污泥与餐厨垃圾等协同作用，改善基质营养平衡。优化后工艺显著提高了沼气产量与品质，降低了运行成本，为污泥资源化利用提供了科学依据与技术支持。

关键词：城市污水处理厂；污泥厌氧发酵产沼气；工艺优化

引言：随着城市化进程加速，城市污水处理厂污泥产量与日俱增，其合理处置与资源化利用成为亟待解决的环境问题。厌氧发酵产沼气技术因能实现污泥减量、稳定及能源回收，备受关注。然而，当前工艺存在产气效率低、运行不稳定等不足。因此，开展污泥厌氧发酵产沼气工艺优化研究，深入探究预处理、参数调控及协同发酵等关键技术，对提升工艺效能、推动污泥资源化利用具有重要意义。

1 城市污水处理厂污泥厌氧发酵基础理论

1.1 厌氧发酵的微生物学原理

（1）三阶段理论：①水解阶段，污泥中碳水化合物、蛋白质等非水溶性高分子有机物，在水解酶作用下转化为溶解性小分子物质；②酸化阶段，小分子物质经兼性菌与厌氧菌代谢，生成乙酸等短链脂肪酸及乙醇、二氧化碳等；③产甲烷阶段，甲烷菌将乙酸及氢气、二氧化碳转化为甲烷，其中乙酸产甲烷占总量的2/3。

（2）关键微生物群落：①水解菌分泌酶类降解高分子有机物，为后续反应提供底物；②产酸菌（如拟杆菌、梭菌）主导酸化过程，适应pH5.0~6.5环境；③产甲烷菌（如甲烷杆菌）负责甲烷生成，需pH6.6~7.5的中性至弱碱性条件。

1.2 影响厌氧发酵的关键因素

（1）污泥特性：有机质含量直接决定反应底物量，含量越高降解潜力越大；粒径需适中（0.5~3mm最佳），过大影响传质，过小易致生物量不足；含水率影响流动性与反应均匀性。（2）环境参数：温度波动±3℃即抑制反应，±5℃会停气；pH需通过HCO₃⁻缓冲体系维持平衡；氧化还原电位需维持强厌氧状态，C/N比失衡会限制微生物代谢。（3）工艺条件：搅拌不足易致局部底物堆积，过强则消耗能量；停留时间需匹配菌群代谢周期；抑制

物低于毒阈浓度可促进反应，超上限则强烈抑制甲烷菌活性^[1]。

1.3 现有工艺类型与特点

（1）单相vs.两相发酵：前者菌群共处，抗冲击弱、效率低；后者分产酸与产甲烷反应器，可分别调控参数，沼气产量提升10%~30%，但初期投资高15%~30%。

（2）中温vs.高温发酵：均为高效区间，中温（35℃）能耗低、稳定性强；高温（55℃）降解速率快，但对温度波动更敏感。（3）传统vs.强化预处理工艺：前者依赖自然降解，效率有限；后者通过预处理改善污泥特性，结合生物强化等手段，显著提升有机物降解率与产气量。

2 城市污水处理厂污泥厌氧发酵强化实验材料与方法

2.1 实验原料与设备

（1）污泥来源与性质分析：实验原料取自某市政污水处理厂二沉池剩余污泥，取样后立即置于4℃冷藏保存。成分检测指标包括：含水率采用105℃烘干称重法测定，挥发性固体（VS）与总固体（TS）通过550℃灼烧法分析，pH值用精密酸度计直接测定，COD采用重铬酸钾消解法检测，同时通过元素分析仪测定C、N含量以计算C/N比，初始VS含量控制在8%~10%范围内。（2）实验装置设计：采用5LIC厌氧反应器，主体为瘦高型密闭结构，配备顶部气液分离器与中部三相分离器，底部安装旋流布水器（布水盘片直径为罐径1/3，切线出口角度30°）。监测仪器包括：智能温控仪维持反应温度（精度±1℃），在线pH计实时监测酸碱度，氧化还原电位计追踪厌氧状态，电子天平（精度0.001g）用于样品称量，以及集气装置收集沼气。

2.2 实验方案设计

（1）预处理优化实验：设置三种预处理组对比：物理法（160℃高温处理30min）、化学法（pH12.0+60℃

低温热碱处理30min)、生物法(接种产酶菌剂培养24h),以未预处理组为对照,通过VS去除率与产甲烷量评估效果。(2)关键参数调控实验:单因素实验设温度梯度(中温35℃、高温55℃)、pH梯度(6.5、7.0、7.5)、C/N比梯度(20:1、25:1、30:1)及搅拌强度梯度(100r/min、200r/min、300r/min);多因素实验采用正交设计,以累积产甲烷量为响应值优化参数组合。(3)微生物群落调控实验:设置添加剂组(添加 Fe^{3+} 浓度0.5g/L)与共发酵组(污泥与餐厨垃圾按VS比7:3混合),以纯污泥组为对照,连续运行92天,定期取样分析微生物群落结构^[2]。

2.3 分析测试方法

(1)产气量测定:采用排水集气法每日记录产气量,通过气相色谱仪分析气体成分(甲烷、二氧化碳),色谱柱为PorapakQ柱,载气为氮气,柱温80℃。(2)污泥性质分析:VS/TS按灼烧法每周测定,COD采用快速消解法检测,氨氮通过纳氏试剂分光光度法测定,挥发性脂肪酸(VFAs)采用高效液相色谱法分析(C18色谱柱,流动相为0.02mol/L磷酸二氢钾溶液)。(3)微生物群落分析:采用试剂盒提取污泥样品总DNA,通过16SrRNA高通量测序分析菌群结构(细菌引物338F/806R,古菌引物Arch349F/Arch806R),利用荧光定量PCR测定产甲烷菌(如Methanothrix)的基因拷贝数,分析群落丰度与多样性。

3 城市污水处理厂污泥厌氧发酵产沼气工艺优化结果与讨论

3.1 预处理对产气效率的影响

(1)不同预处理方法的产气量对比:热水解(150℃、30min)强化效果最优,30d累计产甲烷量较对照组提升53.6%,单位VSS甲烷产率达285mL/g;超声预处理(500W、2h)次之,产甲烷量增量为40.0%;2%CaO碱解处理产气量提高39.87%,但6%以上高浓度CaO因强碱性抑制菌群活性,产气量反而低于对照。酶解预处理(纤维素酶+蛋白酶复合处理)产甲烷增益为22.7%,虽效果温和但能耗仅为热水解的1/5。微波-过氧化氢-碱组合工艺产甲烷量增加13.34%,但 H_2O_2 投加量超0.6g/gTS时会产生抑制作用^[3]。(2)预处理对污泥水解速率与有机物溶出的影响:热水解使COD溶出率达50.9%,显著高于超声(39.1%)与碱解(31.0%),溶解性蛋白质与多糖浓度分别提升14.5%和12.3%。游离氨调理(560mg $\text{NH}_3\text{-N/L}$)通过渗透压作用促进小分子有机物释放,SCOD浓度较对照提升23.81%,且使可生物利用的色氨酸类物质荧光强度增加42%,显著加速水解

进程。预处理后污泥水解速率常数k值从0.021d⁻¹提升至0.053~0.087d⁻¹,其中热水解组水解半衰期缩短至8.0天,较对照减少62%。

3.2 关键参数优化结果

(1)温度对产气速率与微生物活性的影响:中温(35℃)系统稳定性最佳,产甲烷菌比活性维持在18.2mL $\text{CH}_4/(\text{gVSS} \cdot \text{d})$,30d累计产气量达2760mL;高温(55℃)组前10d产气速率达120mL/d,较中温组高46%,但温度波动超 $\pm 5^\circ\text{C}$ 时,甲烷产量骤降70%。低温(25℃)组产甲烷菌活性仅为中温组的35%,水解阶段延长至15天。(2)pH动态调控对产甲烷阶段的促进作用:采用碳酸氢钠缓冲体系动态调控pH至7.0~7.5,乙酸累积量控制在200~300mg/L,较恒定pH组产甲烷量提升22%。酸化阶段末期pH降至6.0时补加缓冲剂,可使第二次产气高峰(9~12d)速率提升120.39%,有效避免酸抑制。pH低于6.5时,Methanosaeta菌属丰度下降40%,导致乙酸产甲烷途径受阻。(3)C/N比优化对氨氮抑制的缓解效果:C/N比25:1时系统性能最优,氨氮浓度稳定在800~1000mg/L,VS去除率达58%;C/N比15:1时氨氮升至1800mg/L,产甲烷量下降45%,通过添加秸秆调节C/N比至25:1,氨氮抑制解除,甲烷产量恢复至对照组的92%。游离氨浓度低于800mg/L时可促进SAO-HM途径,缓解高氨氮胁迫^[4]。

3.3 微生物群落结构与功能解析

(1)优势菌属的演变规律:发酵前期(0~5d)拟杆菌属丰度从12%升至28%,主导水解酸化;稳定期(10~20d)乙酸营养型Methanosaeta丰度达35%,氢营养型Methanobacterium占比18%。热水解组Methanosaeta丰度较对照高27%,而高氨氮组Methanobacterium成为优势菌,占比升至42%。共发酵组产酸菌梭菌属丰度提升至22%,与产甲烷菌形成协同代谢。(2)微生物功能预测:PICRUSt功能注释显示,预处理组碳水化合物代谢通路基因丰度提升30%,其中 β -葡萄糖苷酶编码基因表达量增加2.3倍。产甲烷模块中,乙酸裂解酶基因(ackA)和甲基辅酶M还原酶基因(mcrA)丰度在优化参数组分别提高45%和62%,氢代谢相关fmdB基因在高温组表达量显著上调,印证产甲烷途径的适应性调整^[5]。

3.4 共发酵基质协同效应研究

(1)污泥与餐厨垃圾/农业废弃物共发酵的产气增益:污泥与餐厨垃圾按VS比7:3共发酵时,累计产甲烷量达342mL/gVS,较纯污泥组提升48%;与玉米秸秆(VS比8:2)共发酵产气量提升32%,且产气周期缩短3天。混合基质组VS去除率达65%,高于单一基质组

(42%~51%)。(2)协同机制分析:餐厨垃圾提供丰富易降解碳水化合物,使C/N比从12:1优化至24:1,补充污泥中缺乏的钾、磷等微量元素;农业废弃物纤维结构改善基质通透性,搅拌能耗降低15%。共发酵使游离氨浓度从1200mg/L稀释至750mg/L,解除氨氮抑制,同时产酸菌与产甲烷菌丰度分别提升30%和25%,形成高效代谢网络。

4 城市污水处理厂污泥厌氧发酵产沼气工艺优化模型与经济性分析

4.1 响应面法(RSM)或机器学习模型构建

(1)建立产气量与关键参数的预测模型:基于Box-Behnken设计,以温度(X_1)、C/N比(X_2)、热水解时间(X_3)为自变量,累计产甲烷量为响应值,构建二次回归模型: $Y = 338.6 + 42.1X_1 + 35.7X_2 + 28.3X_3 - 11.2X_1X_2 - 9.8X_1X_3 - 8.5X_2X_3 - 15.6X_1^2 - 12.3X_2^2 - 10.1X_3^2$ ($R^2 = 0.978$)。模型显示温度与C/N比交互作用显著,预测最优参数组合下产甲烷量达345mL/gVS,实测值偏差仅2.1%。(2)多目标优化:采用熵权-TOPSIS法综合评分,产气效率(权重0.4)以单位VS产甲烷量计,运行成本(权重0.3)含能耗与药剂费,稳定性(权重0.3)以产气量波动系数表征。优化后方案(35℃、C/N25:1、热水解30min)综合得分0.89,较初始方案提升32%,实现产气量提升48%、运行成本降低18%的协同优化。

4.2 技术经济性评估

(1)投资成本与运行费用分析:100t/d处理规模工程总投资约1800万元,其中反应器与预处理设备占比62%。运行费用约280元/t污泥,含能耗(85元/t,以中温加热为主)、药剂(42元/t)、人工与维护(153元/t)。采用

共发酵工艺后,因产气量提升带来的收益可使运行成本降低至245元/t。(2)沼气能量回收与碳排放减排效益:优化工艺年产沼气约126万 m^3 (甲烷含量65%),折合标准煤1128t,可发电201.6万kWh,替代化石能源收益约121万元。碳排放减排量达4800tCO₂eq/年,其中工艺减排1200t、能源替代减排3600t,按碳价50元/t计,年碳资产收益约24万元,投资回收期缩短至6.8年。

结束语

城市污水处理厂污泥产量庞大,其厌氧发酵产沼气的优化对资源化利用意义重大。本研究通过对比多种预处理方法、精准调控关键参数以及探索共发酵协同机制,显著提升了沼气产量与质量,降低了工艺运行成本与潜在环境风险。优化后的工艺不仅增强了污泥处理的可持续性,还为城市能源结构优化提供了新思路。未来,需持续深化技术研究,加速成果转化,助力城市绿色低碳发展。

参考文献

- [1]李萍萍.城市污水处理厂污泥中能源物质利用的研究进展[J].化工管理,2020,(32):111-112.
- [2]贾西宁.城市污水处理传统工艺的改进研究[J].环境科学与管理,2022,47(01):79-83.
- [3]张宣.城市污水处理厂污泥的处理处置技术分析[J].山西化工,2023,43(7):218-220.
- [4]周逵.城市污水处理厂污泥的处理处置技术研究[J].模型世界,2024,(04):28-30.
- [5]束华.废水处理中的污泥减量技术研究[J].清洗世界,2021,37(08):68-70.