

文章编号: 1009-6094(2015)04-0181-05

厌氧发酵连续运行中有机负荷与工艺参数相互作用研究*

于涛^{1,2}, 黄涛¹, 潘膺希^{1,3}, 杨林海²

(1 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 610031;

2 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050;

3 兰州市环境保护局, 兰州 730030)

摘要: 以餐厨垃圾为研究对象, 在高温(55±1)℃条件下, 采用连续湿式厌氧发酵技术研究发酵过程中进料有机负荷、日产气量、pH值、挥发性有机酸(VFA)质量浓度等参数的变化情况及其相互作用关系。结果表明: 厌氧消化过程中出现了4个阶段, 即适应阶段、提高阶段、稳定阶段和超负荷阶段; 反应达到稳定阶段时, 反应器运行有机负荷为3.9 kg/(m³·d), 系统pH值稳定在7.8左右, 平均产气速率达到5.26 L/d; 负荷达到4.2 kg/(m³·d)时, 对系统产生明显抑制作用。

关键词: 环境工程学; 餐厨垃圾; 厌氧发酵; 有机负荷; 产气量

中图分类号: X705 文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.04.039

0 引言

随着我国经济的快速发展, 城市生活垃圾中以餐厨垃圾为主的易腐性有机垃圾含量不断增加, 造成日益严重的环境污染问题, 成为可持续发展的隐患之一, 引起了全社会的广泛关注。餐厨垃圾是食物垃圾中最主要的一种, 也是生活垃圾的重要组成部分, 包括家庭、学校、食堂及餐饮行业产生的食用残余, 具有含水率高、成分复杂、油脂含量高、高温条件下易腐、散发恶臭且容易产生蚊蝇等特点^[1-2]。

目前国内对餐厨垃圾的主要处理方式依然是填埋或焚烧^[3-7]。填埋处理不仅造成餐厨垃圾中有机成分的损失, 还容易产生温室气体和渗滤液等二次污染, 达不到清洁利用的效果; 而焚烧处理成本昂贵, 易产生二恶英等有害燃烧产物。厌氧处理由于具有节省动力消耗、产生清洁能源、污泥量少等优点越来越受人们的关注和推广。餐厨垃圾有机质含量高、易生物降解的特性为其厌氧消化处理提供了极好的条件, 国外已开始有实际工程应用^[8-9]。我国传统的餐厨垃圾处置方法是直接用作动物饲料和堆肥^[10-15], 或由不法分子用于炼制“泔水油”, 其中饲料化和堆肥处理易造成病菌传播, 而“泔水油”严重威胁人们的身体健康。在餐厨垃圾厌氧消化处理方面, 我国目前处于起步阶段, 还没有成熟的厌氧消化处理工程投入实际运行^[16-22]。究其原因, 除经济因素外, 还因为有机垃圾成分复杂, 缺乏对餐厨垃圾厌氧消化工艺实际运行情况控制技术的系统研究与掌握。

本文以单一的餐厨垃圾为反应底物, 尝试采用单相厌氧

发酵工艺, 逐渐提高发酵系统的有机负荷, 研究有机负荷对高温厌氧发酵产甲烷系统产气量、pH值和挥发性有机酸(VFA)等参数的影响, 以及相互作用关系, 以期为我国餐厨垃圾厌氧消化产甲烷系统实际产业化运行过程中的工艺调控提供理论和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 接种液

试验启动阶段的接种液为已经驯化好的厌氧发酵系统产甲烷阶段的沼液, 为黑色液体, 含有大量产甲烷菌且微生物活性很高。接种液的主要性质见表1。

1.1.2 餐厨垃圾

试验所用餐厨垃圾取自附近餐馆(具体特性见表2), 主要是餐后垃圾, 将其经过简单的人工预处理后进行机械制浆, 破碎为粒径小于10 mm的有机浆料。有机浆料混合均匀后置于4℃冰箱中保存备用。

1.2 试验方法

试验装置如图1所示, 主要由3 L发酵罐和湿式气体流量计两部分组成。

用厌氧消化法处理易降解有机垃圾(VS/TS≥0.85, 如餐厨垃圾或果蔬垃圾), 产甲烷的反应器有机负荷一般为1~4 kg/(m³·d), 不超过4.5 kg/(m³·d)^[23-25]。本文厌氧系统启动时, 将2.4 L接种液和100 mL有机浆料充分混合均匀后投入发酵罐, 密封后置于(55±1)℃恒温培养箱中, 发酵过程产生的气体经由湿式气体流量计计量。根据每日反应器内产气情况、pH值、VFA等指标的变化调整餐厨垃圾投加量。从第2 d开始每天检测发酵罐内产气情况, 并取样测定其pH值; 每隔1 d取样检测VFA等指标的变化, 并在产气量下降或发生酸化现象时回流部分沼液。每24 h进出料1次, 先出料后进料,

表1 接种液主要特性

Table 1 Main features of the inoculum

指标	指标值
COD/(mg·L ⁻¹)	13 190
pH	8.13
总固体 TS 质量分数/%	8.3
(挥发性固体 VS/TS) %	85.6
盐度/%	0.54
VFA 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	6 936
碱度/(mg·L ⁻¹)	12 814.05
电导率/(mS·cm ⁻¹)	12.05
氨氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)	2 639.9

表2 餐厨垃圾主要特性

Table 2 Main features of the food waste

指标	指标值
pH	4.65
TS/%	13.84
(VS/TS) %	85.1
有机质质量分数/%	83.6
C/N	21.5
容重/(kg·L ⁻¹)	1.0

* 收稿日期: 2013-10-22

作者简介: 于涛, 博士研究生, 从事固体废物处理研究; 黄涛(通信作者), 教授, 博士, 从事固体废物处置与资源化、城市垃圾处理理论与技术等研究, taohuang70@126.com。

基金项目: 甘肃省科技厅自然科学基金项目(1010RJZA047); 兰州理工大学博士基金项目(BS05200901)

试验材料入瓶后和每次进料结束后关闭阀门3,打开阀门2,从阀门1向消化瓶通入2 min 氮气,流量为1 L/min,以保持发酵罐内的厌氧环境。出料前应先充分振荡、搅拌沼液,然后由发酵罐底部的采样口排出。

1.3 测定指标及方法

有机质采用重铬酸钾氧化法,总固体(TS)采用烘干法,挥发性固体(VS)采用灼烧法;氨氮、碱度和挥发性有机酸(VFA):在3 200 r/min下离心19 min,取上清液,采用蒸馏滴定法,其中VFA浓度结果以乙酸计。以上测定的具体操作参照《废水的厌氧生物处理》^[26]。COD用实验室智能型5B-6C型三参数COD快速测定仪测定(兰州连华环保科技有限公司)。甲烷气体浓度用GEM2000plus便携式沼气分析仪(深圳市昂为电子有限公司)测得。

2 结果与讨论

2.1 试验结果

试验过程中采取逐步提高反应器有机负荷的进料方式,探索反应器在相应控制参数下稳定运行的最佳负荷。结果表明,试验过程出现了4个阶段(图2),即适应阶段(0~7 d)、提高阶段(8~40 d)、稳定阶段(41~50 d)、超负荷阶段(51~55 d)。

2.2 结果与讨论

2.2.1 适应阶段

在适应阶段,考虑接种液是已经驯化的沼液,沼液中甲烷菌在活性和菌群数目上均占绝对优势,因此第1~2 d选择较高启动有机负荷(VS) 3.0 kg/(m³·d)。该阶段日产气量仅1.5 L,VFA质量浓度基本呈线性增长趋势,pH值处于下降趋势,同时COD和碱度也呈下降趋势(图2)。这主要是因为此阶段产酸菌有丰富的原料进行代谢活动,从而活性较强且数目迅速增多,水解酸化反应进程加快,使VFA质量浓度上升,pH值下降,因与水解酸化产生的酸性物质发生中和反应,碱度降低,该阶段可供甲烷菌直接利用的原料较少,因此,产酸菌在该阶段占主导作用。可见,即使采用已经驯化的沼液启动,较高的启动负荷仍然会对厌氧发酵系统造成较大冲击。

鉴于以上工艺参数的不利变化,第3~7 d将有机负荷(VS)降低为2.4 kg/(m³·d),依靠微生物自身能力调节厌氧系统环境。第4 d时,产气量和pH值均降到最低,分别为1 L和5.65,COD与碱度缓慢下降,VFA质量浓度仍处于增长趋势,这是因为VFA的进一步累积导致pH值下降,此时过低的pH值严重抑制了甲烷菌的活性,造成产气量降至最低。第5~7 d,产气量出现明显的波动,但均低于2 L;pH值开始缓慢增长,第7 d时升至6.25;VFA具有了一定累积效应,在第5 d

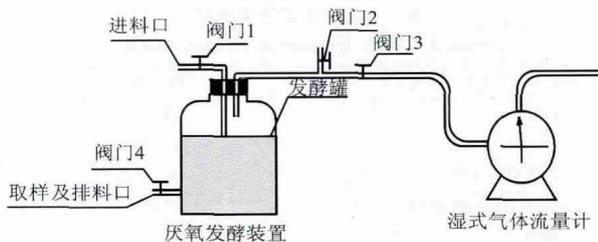


图1 厌氧发酵装置示意图

Fig.1 Schematic of anaerobic fermentation device

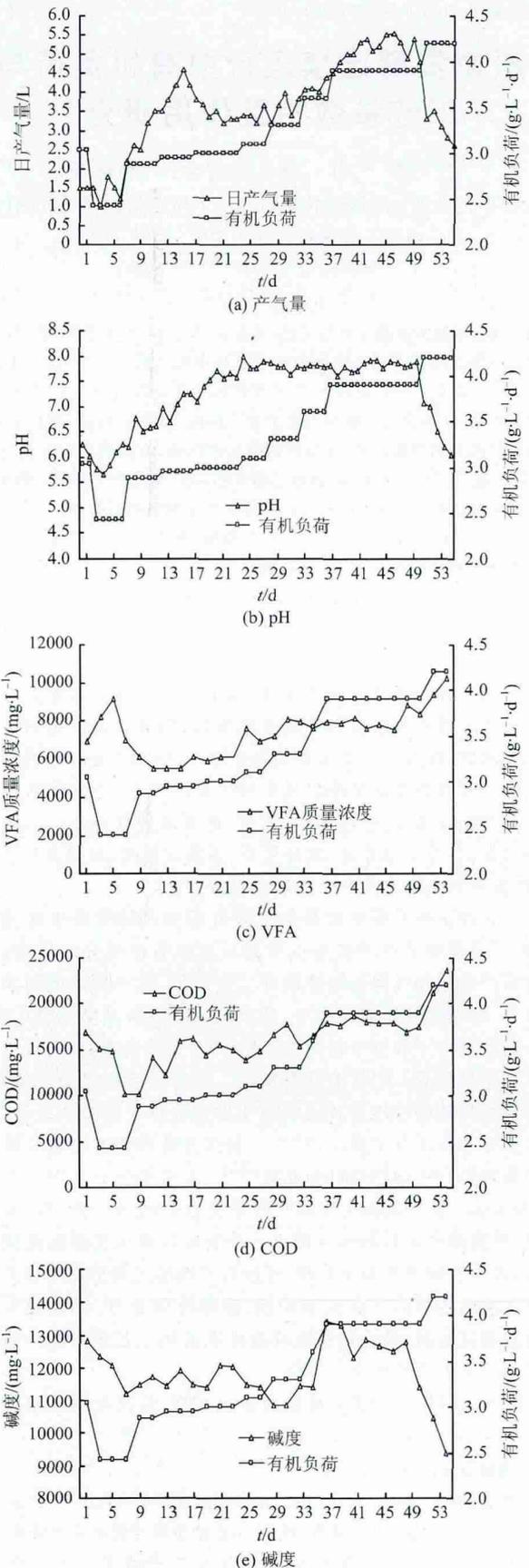


图2 产气量、pH值、VFA质量浓度、COD、碱度随有机负荷的变化
Fig.2 Variations of gas production, pH value, VFA mass concentration, COD and alkalinity with organic load

时出现一个波峰,然后开始迅速下降;COD和碱度均下降,第7 d时COD降至最低值10 160 mg/L,碱度降至11 210 mg/L。pH值的恢复除因VFA发生中和反应而消耗外,还与甲烷菌活性增强、开始大量消耗VFA、缓解了厌氧系统进一步酸化有关,此时COD也不断转化为沼气而消耗。

综上所述,尽管采用沼液作为接种液快速启动,但适应阶段的厌氧发酵系统相对较脆弱,启动负荷过高容易导致系统酸败现象的发生。实际运行中应该根据产气量和pH值等控制指标对厌氧环境的变化作出较为准确的判断,通过控制反应器的有机负荷,避免因酸败致使整个厌氧系统失败。

2.2.2 提高阶段

经过适应阶段后厌氧系统进入提高阶段,如图2所示,第8~40 d反应器有机负荷(VS)由2.4 kg/(m³·d)逐步提升至3.9 kg/(m³·d),产气量和pH值均显著提高。第16 d时,产气量达到峰值4.6 L, pH值恢复至7.25,此时VFA质量浓度降至最低。这是因为随着反应的进行,虽然提高了反应器的有机负荷,但厌氧环境的恢复和可供甲烷菌直接利用的有机质增加促使甲烷菌充分发挥其主导作用,有机酸被快速降解并且其大部分转化为生物气,使出现一个产气高峰,而且随着甲烷菌对VFA的快速消耗,一方面产生较多的碱性物质,另一方面中和反应所需的碱度降低,双重因素作用使得碱度缓慢上升,此时COD基本维持在约15 000 mg/L。由于水解酸化过程产生的VFA满足不了产甲烷菌的消耗,第16~20 d产气量有所下降,第20 d降至3.4 L,第20 d后又开始缓慢上升,所产生的沼气中甲烷气体体积分数也上升至45%~50%;pH值保持在较高水平;VFA质量浓度随有机负荷增加保持在约8 000 mg/L;COD的浮动很小。有机负荷(VS)达到3.3 kg/(m³·d)时对碱度造成了冲击,碱度出现短暂的下降趋势,但未造成厌氧环境其他参数异常,因此不影响厌氧反应的正常进行。这主要是因为反应器内有机酸正被快速生化降解,产甲烷菌与产酸菌逐渐形成共生体系,产甲烷菌对VFA的大量消耗使得水解酸化反应进程加快,使上述试验现象出现^[27-33]。

由上述分析可知,提高阶段的厌氧系统稳定性不佳,有机负荷的缓慢提高仍对厌氧系统造成了一定冲击,但有助于厌氧反应效率的提高,因此,在该阶段根据工艺参数的变化合理调控有机负荷能够加速反应进程。

2.2.3 稳定阶段

有机负荷(VS)提高到3.9 kg/(m³·d)并保持稳定,这时系统进入了稳定阶段,产气量达到整个发酵过程的最高水平且保持稳定,最大日产气量可达到5.52 L,此阶段生物气中甲烷体积分数上升至58.9%~62.3%,pH值保持在约7.7,不再随进料明显下降,VFA质量浓度和碱度的变化平缓,COD变化整体趋于平稳,维持在约18 000 mg/L。可见,此时反应器总体运行状况良好,产气量与有机负荷形成了稳定的对应关系,产酸菌与产甲烷菌已经形成共生体系,水解酸化的VFA一部分被产甲烷菌消耗,一部分在调节pH值的过程中与碱性物质发生中和反应被消耗,系统达到动态平衡,厌氧消化杆菌对有机垃圾消化反应完全适应。

稳定阶段整个反应中产气效果最佳,系统耐冲击负荷能力最强,VFA质量浓度、碱度、pH值等控制参数达到最佳状态,这也是实际工程中应寻求的状态。

2.2.4 超负荷阶段

为进一步探索有机负荷对厌氧消化反应的影响,第51 d时将有机负荷(VS)提高到4.2 kg/(m³·d),持续运行5 d后,日产气量下降至2.6 L,同时此阶段所产生的沼气中甲烷体积分数回落至35%~45%,pH值降至6.04,VFA质量浓度高达10 250 mg/L,碱度陡然下降,而消化液中COD却呈线性增长。造成这一重大变化的主要原因是过高的有机负荷对厌氧反应器造成了较大冲击,而碱度对VFA的缓冲作用不再明显,致使pH值快速下降,而过低的pH值会抑制产甲烷菌活性,导致产甲烷菌对有机酸的分解受到抑制,而大量水解酸化产物使消化液中COD飙升。

超负荷阶段会使整个厌氧系统瘫痪,若酸败不严重,可通过降低负荷或停止进料的方式使系统自动恢复至稳定状态,但这需要较长的恢复时间;如果发生彻底酸败,则需要进行人工干预,如投加一定量的石灰水、碳酸氢钠或草木灰等进行调节;再甚者则需排出酸败液重新接种启动。因此,对一个正常稳定运行的厌氧系统,需要控制其有机负荷稳定,实时监测变化指标,以保持其长期高效稳定运行。

2.3 讨论

国内餐厨垃圾厌氧发酵研究受试验条件等因素的制约,近年来有关优化餐厨垃圾厌氧消化效果、提高有机负荷的研究均集中在序批式厌氧发酵,但这在工程应用中难以实现稳定和持续运行,而模拟实际工程,采用单一餐厨垃圾为原料,在高温下进行连续式厌氧消化的研究少有报道。通过本文研究,初步掌握了逐渐提高厌氧系统有机负荷情况下,单相厌氧系统工艺参数的变化情况,以及有机负荷与pH值、产气量和VFA等工艺参数之间的相互作用关系,为今后我国有机垃圾的工程化厌氧处理提供了一定的理论依据和实践基础。

餐厨垃圾具有产酸速度快、pH值低、含氮高等特点,在厌氧发酵中易出现有机酸或氨氮等代谢物的抑制,因此,本文采用低负荷的启动方式,这种方式下厌氧系统可在较短时间内达到最佳运行状态。当负荷超出厌氧系统可承受的范围时,即使稳定运行的系统也会被破坏,甚至不产气。在实际工程中,采用逐步提高厌氧系统有机负荷的方式可有效避免系统直接进入超负荷阶段,保证高效的处理效果。

3 结论

1) 试验厌氧系统稳定运行的最佳有机负荷(VS)是3.9 kg/(m³·d)。根据反应器运行情况下工艺参数的变化,在时间上将试验分为适应阶段(0~7 d)、提高阶段(8~40 d)、稳定阶段(41~50 d)和超负荷阶段(51~55 d)共4个阶段。

2) 稳定阶段平均产气速率达到5.26 L/d,甲烷气体体积分数上升至58.9%~62.3%。

3) 有机负荷可作为厌氧发酵系统稳定运行的简单、直接控制的工艺参数。将厌氧系统控制在稳定阶段,可提高发酵效率,获得更多的生物质能。

4) 发酵过程中,有机负荷直接反映了有机物料与微生物之间的平衡关系。若有机负荷提高过快或超出反应系统的承受能力而进入超负荷阶段,会对系统造成较大冲击,抑制产甲烷菌的活性,破坏系统的稳定运行,显著降低厌氧消化处理效率。

References(参考文献):

- [1] ZHAO Youcai(赵由才). *Solid waste disposal and resource recovery* (固体废物处理与资源化) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 360.
- [2] ZHAO Mingxing(赵明星), WU Hui(吴辉), TAO Zhiping(陶冶平), et al. Research on the impact of the protein content of food waste anaerobic fermentation [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2013, 13(5): 26-30.
- [3] HAN S K, SHIN H S. Enhanced acidogenic fermentation of food waste in a continuous-flow reactor[J]. *Waste Management and Research*, 2002, 20(2): 110-118.
- [4] XU Xiaojun(徐晓军), GUAN Xijun(管锡君), YANG Yijin(羊依金). *The principle of solid waste pollution control and resource recovery technology* (固体废物污染控制原理与资源化技术) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [5] LI Haihong(李海红). The treatment of city domestic garbage and present problems [J]. *Journal of Northwest University of Light Industry* (西北轻工业学院学报), 2002, 20(5): 86-89.
- [6] CHEN Dexi(陈德喜). Approach of building municipal solid waste incineration plant in China [J]. *Environmental Protection* (环境保护), 2004(1): 48-50, 57.
- [7] YANG Zaipeng(杨再鹏), LIU Jianxin(刘建新), XU Yishan(徐怡珊). On construction of large-scale incinerators in China [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry* (化工环保), 2004, 24(4): 259-261.
- [8] KIM M, AHN Y H, SPEECE R E. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic [J]. *Water Research*, 2002, 36(17): 4369-4385.
- [9] NICHOLS C E. Overview of anaerobic digestion technologies in Europe [J]. *Biocycle*, 2004, 45(1): 47-53.
- [10] YAN Tailong(严太龙), SHI Ying(石英). The present situation and technology of dining & kitchen waste disposal in world [J]. *Municipal Administration & Technology* (城市管理科技), 2004, 6(4): 165-172.
- [11] YANG V B, GOH Y R, ZAKARIA R, et al. Mathematical modeling of MSW incineration on travelling bed [J]. *Waste Management*, 2002, 22(4): 369-380.
- [12] YANG Yanmei(杨延梅), ZHANG Xiangfeng(张相锋), YANG Zhifeng(杨志峰). Turnover and loss of nitrogen compounds during composting of food waste [J]. *Environmental Science & Technology* (环境科学与技术), 2006, 29(12): 54-56.
- [13] ZHAO Youcai(赵由才), SONG Lijie(宋立杰), ZHANG Hua(张华), et al. *Practical environmental engineering handbook of solid waste pollution control and resource recovery* (实用环境工程手册——固体废物污染控制与资源化) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [14] KIM K E. Overview of Korean solid wastes management policies [C]//*Proc of Symposium on Composting Technology of Food and Organic Wastes*. Seoul: Korea Education & Science Press, 1997.
- [15] FORESTI E. Perspective on anaerobic treatment in developing countries [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(8): 141-148.
- [16] MCCARTY P L. The development of anaerobic treatment and its future [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(8): 149-156.
- [17] GILZEN H J. Anaerobic digestion for sustainable development: a natural approach [J]. *Water Science and Technology*, 2002, 45(10): 321-328.
- [18] LEMA J M, OMIL F. Anaerobic treatment: a key technology for a sustainable management of wastes in Europe [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(8): 133-140.
- [19] VAN LIER J B, TILCHE A, AHRING B K, et al. New perspectives in anaerobic digestion [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43(1): 1-18.
- [20] De Baere L. Anaerobic digestion of solid waste state of threat [J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(3): 283-290.
- [21] SUH Y J, ROUSSEAUX P. An LCA of alternative wastewater sludge treatment scenarios [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2002, 35(3): 191-200.
- [22] RED N Q, ZHAI D, CHEIY X L, et al. Mechanism and controlling strategy of the production and accumulation of propionic acid for anaerobic wastewater treatment [J]. *Science in China Series B*, 2002, 45(3): 319-327.
- [23] HABIBA L, HASSIBH M B. Improvement of activated sludge stabilisation and filterability during anaerobic digestion by fruit and vegetable waste addition [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(4): 1555-1560.
- [24] BOUALLAGUI H, LAHDHEB H, BEN ROMDAN E, et al. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(5): 1844-1849.
- [25] WANG X, ZHAO Y C, LI M. Bench scale study of fermentative hydrogen and methane production from food waste in integrated two-stage process [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(1): 245-254.
- [26] HE Yanling(贺延龄). *Anaerobic biological treatment of wastewater* (废水的厌氧生物处理) [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998: 502-537.
- [27] XIAO Bo(肖波), LI Bei(李蓓), LI Bingbing(李冰冰), et al. Research progress of anaerobic digestion of organic solid wastes [J]. *Pioneering with Science & Technology Monthly* (科技创业月刊), 2006(12): 107-109.
- [28] ZHANG Zijie(张自杰). *Drainage engineering* (排水工程) [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 353.
- [29] ZHAO Qingliang(赵庆良), REN Nanqi(任南琪). *Water pollution control engineering* (水污染控制工程) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 222.
- [30] UDO W, IN S C, EVA-MARIA D. *Fundamentals of biological wastewater treatment* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007: 43-67.
- [31] LIU Anbo(刘安波). *Impact of sulfate-reducing effect on the up-flow anaerobic sludge blanket process performance* (硫酸盐还原作用对升流式厌氧污泥床工艺性能影响的研究) [D]. Beijing: Tsinghua University, 1993.
- [32] LI Jianzheng(李建政). *Biological hydrogen production technology by fermentation of organic wastewater* (有机废水发酵法生物制氢技术研究) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000.
- [33] LIU Yanling(刘艳玲). *Two-phase anaerobic systems research on substrate conversion and community succession law* (两相厌氧系统底物转化规律与群落演替的研究) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.

Test of interaction between the organic load and the processing parameters on the continuous operation of anaerobic fermentation

YU Tao^{1,2}, HUANG Tao¹, PAN Ying-xi^{1,3}, YANG Lin-hai²

(1 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2 School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3 Lanzhou Municipal Environmental Protection Bureau, Lanzhou 730030, China)

Abstract: This paper intends to present its study results on the effects of the organic load on the dispose of the organic solid wastes (OSW) based on the so-far gained research results both at home and abroad. As is well known, the anaerobic digestion is a kind of approaches to transforming the organic matters into carbon dioxide and methane gas, which has a lot of advantages, such as less energy consumption, less surplus sludge and great energy-recovering gains. It is just for the above said advantages that it is generally considered to be one of the most promising ways to dispose OSW in the future. However, in this paper, what we would like to do is just to make a practical simulated engineering project by using the continuous dosing material and tracing the parameter changes under various organic loads in the reaction system so as to gradually improve the organic loading condition of the reactor. What is more, we have also managed to perform an experiment of the urban food waste and investigated the wet thermophilic anaerobic digestion in the laboratory condition at $(55 \pm 1)^\circ\text{C}$. In the fermentation process, we have managed to raise the organic load, and analyzed the variations of pH value, VFA concentration and gas production. The experimental test results show that: (1) The anaerobic digestion process may experience four stages, that is, the adaptation stage, the improvement stage, the stabilization stage and the overload stage; (2) When the reaction comes to a stable stage, the average gas production rate should be 5.7 L/d, with pH value keeping stabilized at about 7.8 and coming to the maximum organic load at 3.9 kg/(m³·d); (3) There should come a clear inhibitory effect on the system, on the condition that the organic loading is coming up to 4.2 kg/(m³·d); (4) The interaction among the organic load and the process parameters doesn't tend to be identical. And, therefore, it is of a guiding significance to study the interaction of the organic load and the process parameters to promote the actual engineering application. On the other hand, the stabilization phase is also of great importance for the best production of gas, for the system has the strongest resistance to the impact of the load capacity so as to achieve the best state of the various process parameters and practical engineering status.

Key words: environmental engineering; food waste; anaerobic fermentation; organic load; gas production

CLC number: X705 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2015)04-0181-05

文章编号: 1009-6094(2015)04-0181-06

木薯渣高效降解复合菌系 RXS 的氮源优化*

厉文成^{1,2} 张庆华³ 王柯^{1,2} 毛忠贵^{1,2},
唐蕾^{1,2} 张建华^{1,2} 张宏建^{1,2}

(1 江南大学工业生物技术教育部重点实验室 江苏无锡 214122;
2 江南大学生物工程学院 江苏无锡 214122;
3 江西农业大学生物科学与工程学院 南昌 330045)

摘要: 传统培养木薯渣降解复合菌系的蛋白胨纤维素(PCS)培养基成本较高,其主要成本来源于氮源——蛋白胨和酵母粉,限制了复合菌系的规模化应用。为解决此问题,从对木薯渣降解复合菌系 RXS 生长、产酶及底物降解的影响 3 个方面比较了胰蛋白胨/酵母粉及 8 种廉价氮源。结果表明,比较适宜的廉价氮源为鱼粉和玉米浆。接着探究了二者的复配比例对 RXS 的影响,并获得一种廉价培养基。考虑到为调节 pH 值和促进产酶添加的试剂对甲烷菌的毒害作用,以高温厌氧消化出水作为配料水以调节 pH 值,并比较了 RXS 在廉价培养基和 PCS 培养基上对木薯渣的降解效果。最终所得廉价培养基组成为木薯渣 10 g/L、滤纸 5 g/L、鱼粉 4 g/L、玉米浆 3.5 g/L。高温厌氧消化出水作为配料水。经成本核算,廉价培养基的成本仅为 PCS 培养基的 1/6。并且复合菌系在廉价培养基上对木薯渣的降解率较 PCS 培养基提高了约 37%。就工业化生产而言,该培养基不仅显示了对木质纤维素物质较好的降解效果,还节约了成本和减少了水的用量。

关键词: 环境工程学; 复合菌系; 氮源; 木薯渣; 底物失重率

中图分类号: X798 文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.04.040

0 引言

木质纤维素作为一种可再生资源,在自然界储量丰富,且可被生物转化为生物乙醇、沼气、氢气及生物柴油等具有高热值、环境友好的生物能源^[1],引起广泛关注。但天然木质纤维素物理结构、化学组成及物理化学性质非常复杂,难以被有效水解。木质纤维素的预处理能加速厌氧消化过程并提高沼气产量^[2]。牛潇等^[3]研究表明,与传统的切割机粉碎秸秆(RS-CTM)相比,高效粗磨机粉碎秸秆(RS-HECGM)酸解后的半纤维素降解率提高了 13.23%;厌氧发酵后,RS-HECGM 中纤维素和半纤维素的降解率分别达到 58.85%、48.47%,比 RS-CTM 分别提高了 23.58%、29.15%。牛俊玲等^[4]选育出一组高效棉秆降解复合菌系 ZFC,在 13 d 内其对棉秆中纤维素、半纤维素和木质素的降解率分别达到 21.0%、65.1%和 46.3%。

在前期研究中,何江等^[5]构建了一组木薯渣降解复合菌系 RXS,该菌系能在 10 d 内将木薯渣中的纤维素、半纤维素及木质素分别降解 79.8%、85.9%和 19.4%,并且能在 48 h 内将滤纸完全降解。复合菌系 RXS 具有较好的结构稳定性,在连续传代培

* 收稿日期: 2013-11-03

作者简介: 厉文成,硕士研究生,从事微生物发酵与生态工程学研究;毛忠贵(通信作者),教授,博士生导师,从事下游技术研究,maozg@vip.163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260024);江苏省科技支撑计划项目(BE2011623);江苏省环保科研课题(2012047)