

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.036

连续干式厌氧发酵中试系统设计与试验*

景全荣 黄希国 吴丽丽 刘天舒 燕晓辉 李道义

(中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

【摘要】 设计了以卧式浆叶轴机械搅拌厌氧发酵罐为核心的干式发酵技术与成套装备。利用该技术建成干式厌氧发酵中试工程。工程包括预处理及进料系统、厌氧发酵系统、沼气净化与贮存、增温保温系统、出料系统等。工艺方案中克服了干式厌氧发酵进出料困难、传质传热不均的难题,实现了连续高温干式厌氧发酵产沼气。中试结果表明,系统运行稳定,产气效果较好,平均有效容积产气率达 $3.0\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

关键词: 干式厌氧发酵 沼气 工艺设计 中试试验

中图分类号: TK6; S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0186-04

Design and Experiment of Dry Anaerobic Digestion Pilot Plant for Biogas Producing

Jing Quanrong Huang Xiguo Wu Lili Liu Tianshu Yan Xiaohui Li Daoyi

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

A pilot plant of dry anaerobic digestion was constructed in the dairy farm of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences. The plant included pretreatment system, solid feed-in system, horizontal anaerobic reactor, biogas storage and purification system, insulation warming system, and digestate discharging system. Specially designed low-speed horizontal rod-gear agitators used in the horizontal anaerobic reactor enhanced mass and heat transfer efficiency and overcame high solid feedstock feeding and discharging difficulties. Pilot-scale experiment of continuous dry thermophilic anaerobic digestion of dairy manure was conducted in the pilot plan. The experiment results showed that the pilot plant could efficiently dispose high solid dairy manure, and average volume biogas production was $3.0\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$.

Key words Dry anaerobic digestion, Biogas, Process design, Pilot-scale experiment

引言

我国是农业废弃物产出量最大的国家,畜禽粪便排放量 26.1 亿 t/a,农作物秸秆 7.0 亿 t/a,蔬菜废弃物 1~1.5 亿 t/a^[1]。这些有机废弃物若不及时处理,不仅污染环境,也是一种资源浪费。在有机废弃物的处理方法中,干式厌氧发酵具有产能高、有机负荷高、污水产生量少等特点而受到广泛关注^[2~3]。

但国内现有干式厌氧发酵工艺主要采用批式中温发酵工艺,批次进出料方式不能实现连续进出料,处理效率较低。本文设计一种可连续进出料的新型厌氧生物反应器——卧式浆叶轴机械搅拌厌氧发酵罐,以其为核心,开发出连续干式厌氧发酵技术和中试成套装备,在北京市沙河王庄建设干式厌氧发酵中试工程。以牛粪为发酵原料,采用连续高温厌氧发酵工艺,进行中试试验,以期干式厌氧发酵技术与

收稿日期: 2012-06-30 修回日期: 2012-07-16

* 国家国际科技合作项目(2010DFB60680)

作者简介: 景全荣,研究员,主要从事生物质能工程技术研究,E-mail: jingquanrong@sina.com

通讯作者: 黄希国,研究员,主要从事生物质能工程技术研究,E-mail: huangxg315@163.com

装备的开发和推广提供依据。

1 工艺方案

干式厌氧发酵制沼气中试工程工艺流程如图 1 所示。发酵原料输送至预热混合器进行预热、接种、搅拌混合等预处理后,由螺杆泵输送至干式厌氧发酵装置进行厌氧发酵并产生沼气。干式发酵装置为卧式桨叶轴机械搅拌厌氧发酵罐,采用 55℃ 高温发酵工艺。发酵后的物料经固液分离后,固态部分用于堆肥,渗滤液除部分作为接种物回用外,其余进入液体储存罐进行再次发酵。从储存罐出来的沼液作为液态有机肥用于农业生产。所产出的沼气均暂存于液体储存罐顶部的膜式储气柜中,净化后供沼气锅炉或厂区使用。

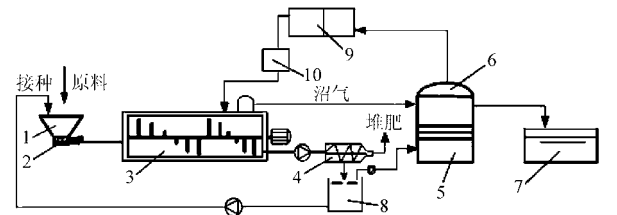


图 1 干式厌氧发酵工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of dry anaerobic digestion

1. 预热混合器 2. 螺杆泵 3. 卧式厌氧发酵罐 4. 固液分离机
5. 立式储存罐 6. 膜式储气柜 7. 沼液池 8. 渗滤液暂储罐
9. 沼气净化系统级沼气锅炉 10. 热水储罐

2 主要工艺单元

干式厌氧发酵中试工程主要包括:预处理及进料系统、厌氧发酵系统、沼气净化储存及增温保温系统、出料系统等。

2.1 预处理及进料系统

预处理的主要目的是使原料和接种物在厌氧发酵前充分混合并加热至预设温度。高温厌氧发酵过程中,温度波动对产气效果和系统稳定性影响非常大,设计应保证发酵罐的温度波动尽可能小^[4]。原料初始温度与发酵罐运行温度相差较大时,会使发酵罐发生比较大的温度波动。需要对物料进行预热,避免因温差过大对发酵罐运行温度产生冲击。高固含量物料流动性差、传热慢,需要强制搅拌以促进传热,预处理系统采用双螺旋带搅拌以强化传热。畜禽粪便通常呈现假塑性流体性质,预热和搅拌有助于降低物料的粘稠度,利于物料输送。

干式厌氧发酵时,基质和微生物接触困难,需对其进行预接种。通过发酵物回流接种,能促进物料和微生物充分接触,加速厌氧发酵进程,提高产气效果。接种物的浓度一般较进料浓度低,因此,接种还

可以起到调节水分的作用。预处理后的物料由带螺旋喂料装置的单螺杆泵泵入卧式厌氧发酵罐。预热混合器的集料罐容积为 0.5 m³,螺杆泵额定流量为 1.0 m³/h。

2.2 干式厌氧发酵罐

厌氧发酵是整个工艺的核心,沼气在此阶段产生。根据厌氧发酵理论,稳定的温度、适宜的碳氮比和 pH 值、合适的搅拌和良好的厌氧条件是厌氧发酵效果的保证。因此,设计过程需重点考虑发酵系统的密封性、搅拌效果和温度稳定性。

厌氧发酵罐为卧式,总容积为 7.96 m³。罐内设有螺旋桨叶轴机械搅拌装置,桨叶在轴上按螺旋线排列。特殊设计的螺旋桨叶轴可实现物料的搅拌、推流。物料受螺旋桨叶的推流作用,在发酵罐内呈随时间推移的塞流式运动,解决了物料逐步向发酵罐出料端推进难题,实现连续进出料,连续发酵产沼气。同时搅拌强化了反应物料内部的传质传热,解决了因物料粘稠、致密所导致的传质传热困难、沼气难以逸出等问题,加快了厌氧反应速度,提高了发酵罐处理效率。当处理质量分数为 20% 左右的物料时,无需添加新鲜水。

2.3 出料系统

卧式厌氧发酵罐出料经泵送至螺旋挤压固液分离机进行固液分离。固体相堆肥处理,渗滤液除部分用于接种物经泵回流至预处理工段外,其余送入储存罐。储存罐为一体式厌氧发酵罐,渗滤液中未完全发酵的物料在此进行进一步发酵产气,并起到储存沼液和沼气的作用。立式储存罐容积 9.0 m³。

2.4 沼气净化储存

沼气暂储于一体式厌氧发酵罐顶部的双层膜式储气柜,容积约为 10 m³。其中外膜为保护并维持储气柜的结构,内膜收集并储存沼气。通过支撑鼓风机的充气,调整并维持内外膜之间夹层中的空气压力,并将内膜内的沼气送入输气管道。储气柜内沼气经过输气管道进入沼气净化系统。沼气净化系统包括脱水、脱硫及沼气除杂^[5]。由于工程规模较小,采用 2 个化学脱硫罐进行沼气脱硫。

2.5 保温系统

厌氧发酵过程受温度影响很大,高温厌氧发酵其最佳温度为 55℃ 左右^[6]。为满足高温干式厌氧发酵对温度的要求,在发酵罐外壁设置加热盘管,并采用岩棉材料进行强化保温。加热盘管内的热水来自热水储罐。热水储罐容积为 1.0 m³,热源由沼气锅炉提供。

3 中试及结果

3.1 材料与方法

中试以奶牛干清粪为发酵原料。牛粪取自中国农机院良种奶牛繁育中心,TS 质量分数为 $(19.5 \pm 2.2)\%$,VS/TS 为 $(80.1 \pm 2.2)\%$ 。启动用接种物为从试验基地周边沼气站获取的鸡粪中温厌氧发酵沼液,TS 质量分数为 2.8%,氨氮质量浓度为 3 450 mg/L,pH 值为 8.2。

试验装置与工艺流程见图 1。将启动接种物泵入卧式厌氧反应器内,使反应器逐渐升温,并维持在 55℃。搅拌条件设定为 3.85 r/min 连续搅拌,反应物体积设定为 4.5 m³。根据反应物料 pH 值变化和系统产气情况,加入适量牛粪(预热至约 55℃),逐渐提高发酵浓度,直至系统稳定产气并达到合适发酵浓度。待系统成功启动并进入稳定运行阶段后,保持每日牛粪进料量为 300 kg/d,此时水力停留时间(HRT)为 15 d。测定每日沼气产量和气体组分,并取样分析物料 pH 值等指标。

反应物料质量分数采用干燥法测定,pH 值用 pH 计测定,沼气产量利用膜盒流量计测定,甲烷含量参照文献[7]方法进行测定。

3.2 中试结果

启动 1 周内反应器内温度的变化曲线见图 2。加入 4.8 m³ 鸡粪沼液后,第 5 天反应器从初始的 17℃ 上升至 54.5℃。至温度达到 55℃ 后,每日温度波动范围在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内。可见,反应器表现出了非常好的升温能力和较高的温度稳定性,能够满足后期试验需求。

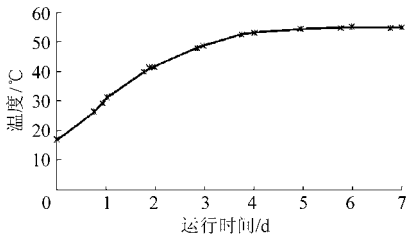


图 2 启动初期反应器温度变化曲线

Fig. 2 Temperature changes during start-up period

启动阶段的产气情况如图 3 所示,第 14 ~ 18 天,所产气体中的甲烷体积分数小于 30%,同时 pH 值也相对较低(6.5 ~ 6.8)。可见,此时反应以水解酸化反应占主导地位,挥发性脂肪酸在此阶段累积,导致 pH 值降低。为防止发生酸败,在第 16 和 18 天未进料。在减少进料后,甲烷含量得到了迅速提高,至第 22 天,即达到 55%,pH 值也开始缓慢上升。至第 41 ~ 44 天,日产气量约为 13 m³/d,甲烷体积分数在 56.5% 左右,反应器内物料 TS 质量分

数约为 13.4%,pH 值稳定在 7.5 左右。可以判断,此时反应器已经达到稳定发酵阶段。启动区间,平均挥发性干物质产气率为 160 L/kg。虽然产气率水平较低,但平均甲烷体积分数指标较好(53.6%)。

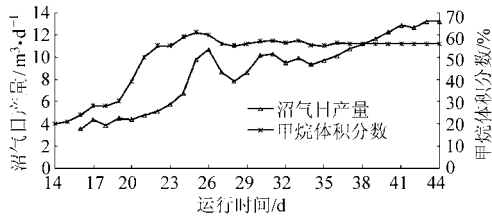


图 3 启动阶段沼气日产量和甲烷体积分数变化曲线

Fig. 3 Daily biogas production and methane content during start-up period

牛为反刍动物,饲料经过牛胃肠道中菌群的降解和消化,易腐成分降低,使得牛粪的产酸水平较低。同时,鸡粪沼液中有较高浓度的氨、氮,对系统的 pH 值起到了很好的缓冲作用。另外,反应器运行情况良好,具有稳定的反应温度和适宜的机械搅拌,使微生物保持了比较高的活性,并能充分和物料接触,挥发性脂肪酸也能及时扩散,防止了酸的局部累积。因此,本次试验的启动过程未出现酸败现象,实现了快速启动。

系统成功启动并进入稳定运行阶段后,设定进料量为 300 kg/d,有机负荷为 10.4 kg/(m³·d),HRT 为 15 d。稳定运行阶段沼气日产量和甲烷体积分数变化如图 4 所示,沼气日产量为 13.5 ~ 15.0 m³/d,有效容积产气率为 2.7 ~ 3.1 m³/(m³·d)。所产出的沼气质量较高,甲烷体积分数维持在 56% 左右。此阶段反应器的平均有效容积产气率、平均挥发性干物质产气率和平均甲烷体积分数分别为 3.0 m³/(m³·d)、299 L/kg 和 56.1%。表明该干式厌氧发酵中试系统运行稳定、处理效率高,并可获得较好产气效果。

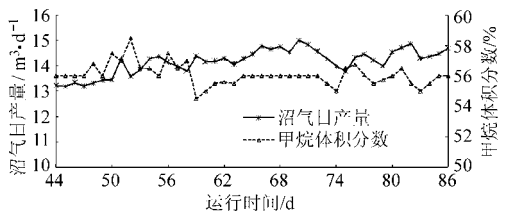


图 4 稳定运行阶段沼气日产量和甲烷体积分数变化曲线

Fig. 4 Daily biogas production and methane content during stable-running period

中试采用干清粪直接进料,工艺操作简单、方便,运行稳定,需水量少,沼液产生量少,后处理工艺简单,不易产生浮渣或沉淀等问题。与传统湿式工艺相比,干式工艺适应范围更广,可处理多种固态有机废弃物,如农作物秸秆、畜禽粪便、城市垃圾、餐厨

垃圾等,具有较好推广应用前景。

4 结论

(1)采用螺旋桨叶轴机械搅拌的新型卧式厌氧发酵罐,解决了干式发酵出料难题和牛粪厌氧发酵过程中由于粘稠、致密抑制沼气的释放等难题,加快了厌氧发酵反应速度,提高了发酵罐处理效率。

(2)建设了干式厌氧发酵中试系统,各项指标和功能满足生产要求,实现了连续干式厌氧发酵产气,为干式沼气工业化提供了新模式。

(3)中试试验表明系统运行稳定,产气效果较好,平均有效容积产气率为 $3.0\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,平均甲烷体积分数为 56.1% 。反应器保温增温性能较好,进出料流畅。

参 考 文 献

1 陈智远,石东伟,王恩学,等. 农业废弃物资源化利用技术的应用进展[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(12):112~117.
Chen Z Y, Shi D W, Wang E X, et al. Development of the application of resource utilization technology in agricultural waste [J]. China Population Resources and Environment, 2010, 20(12):112~117. (in Chinese)

2 韩捷,向欣,李想. 覆膜槽沼气规模化干法发酵技术与装备研究[J]. 农业工程学报,2008,24(10):100~104.
Han J, Xiang X, Li X. Technology and equipment of large scale biogas dry fermentation in membrane covered trough [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(10):100~104. (in Chinese)

3 Couto S R, Sanroman M A. Application of solid-state fermentation to food industry[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3): 291~302.

4 钱靖华,田宁宁. 牛场沼气工程设计中的关键问题研究[J]. 中国沼气,2009,27(1):20~23.
Qian J H, Tian N N. Key problems existing in biogas project design for cattle farms[J]. China Biogas, 2009, 27(1): 20~23. (in Chinese)

5 田晓东,张典,俞松林,等. 沼气工程技术讲座(三):沼气工程的技术设计[J]. 可再生能源,2011,29(3):157~159.
Tian X D, Zhang D, Yu S L, et al. Lecture on biogas engineering technology (Ⅲ): the technology design of biogas engineering [J]. Renewable Energy, 2011, 29(3): 157~159. (in Chinese)

6 赵立欣,董保成,田宜水,等. 大中型沼气工程技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.

7 刘广青. 高温厌氧消化厨余和庭院废弃物性能研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.

(上接第 197 页)

2 江淑琴. 生物质燃料的燃烧与热解特性[J]. 太阳能学报,1995(1):15~20.
Jiang Shuqin. The combustion and pyrolysis property of biomass[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1995(1):15~20. (in Chinese)

3 谭丕强,胡志远,楼狄明,等. 非直喷式增压柴油机燃用生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机学报,2006,24(2):110~115.
Tan Piqiang, Hu Zhiyuan, Lou Diming, et al. Performance and emissions of IDI turbocharged diesel engines fuelled with biodiesel fuels[J]. Transactions of CSICE, 2006,24(2):110~115. (in Chinese)

4 宋天一,雷廷宙,王志伟,等. 生物柴油—柴油混合燃料性能和排放的实验研究[J]. 河南科学,2012,30(3):70~75.
Song Tianyi, Lei Tingzhou, Wang Zhiwei, et al. Performance and emission tests of biodiesel-diesel blends [J]. Henan Sciences, 2012, 30(3):70~75. (in Chinese)

5 吴创之. 生物质燃气净化技术[J]. 可再生能源,2003(4):55~56.

6 张素平,颜涌捷,李庭琛,等. 生物质裂解焦油的燃烧特性及动力学模型[J]. 华东理工大学学报,2002,28(1):104~106.
Zhang Suping, Yan Yongjie, Li Tingchen, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of bio-oil from flash pyrolysis of biomass[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2002, 28(1): 104~106. (in Chinese)

7 GB/T 6072.1—2008 往复式内燃机性能第1部分:功率燃料消耗和机油消耗的标定及试验方法 通用发动机的附加要求[S]. 2008.

8 刘鹏. 微型汽车发动机及整车热平衡试验系统开发[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
Liu Peng. Development of mini vehicle engine and vehicle heat balance test system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)