

牛粪高效厌氧发酵技术*

关正军 毕兰平 李文哲 刘爽 曹亮

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为提高牛粪厌氧发酵的产气效率,采用牛粪发酵前固液分离和分离液中添加猪粪进行混合发酵两种方法。结果表明,对牛粪进行发酵前固液分离,降低了物料的粘度,利于微生物的传质。在牛粪分离液与稀牛粪的对比发酵试验中,分离液较稀牛粪产气量提高 32.68%,甲烷产率也有较大幅度提高。牛粪分离料液和猪粪按一定比例混合可获得较好的产气效果,在试验中总固体(TS)质量分数为 10.49% 的混合料液产气过程稳定,产气周期相对较短,累计产气量最大为 59.8 L,比 TS 质量分数为 8.00% 猪粪组提高了 26.24%,比 TS 质量分数为 8.54% 混合料液组提高了 43.51%。研究表明牛粪分离液与猪粪混合 TS 质量分数为 10.49% 时,可以取得较好的产气效果。

关键词: 牛粪 固液分离 厌氧发酵 猪粪 混合发酵

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0123-04

Technology on Improving Anaerobic Fermentation of Dairy Manure

Guan Zhengjun Bi Lanping Li Wenzhe Liu Shuang Cao Liang

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to improve producing gas efficiency by anaerobic fermentation of the dairy manure, solid – liquid separated pretreatment of dairy manure and anaerobic co-disestion of separation liquid and pig manure were investigated. The results indicated that separation liquid separated pretreatment of dairy manure reduced the material viscosity and favored mass transfer of microorganism. In the comparative fermentation trial of dairy manure separation solution and dilute dairy manure, gas production of separated liquid was increased by 32.68% than that of diluted dairy manure and methane yield was improved by a large margin. In a proper mixture proportion of dairy manure and pig manure, a good fermentation result would be achieved. In the experiment, the process of biogas producing was stable and the cycle was relatively short at 10.49% mixture group. Furthermore, the biggest cumulative biogas production was 59.8 L. It increased by 26.24% compared with pig group (TS is 8.00%) and 43.51% compared with mixture group (TS is 8.54%). The results showed that biogas yield was increased significantly under the condition of mixture composited of dairy manure and pig manure (TS is 10.49%).

Key words: Dairy manure Solid – liquid separation Anaerobic fermentation Pig manure Co-disestion

引言

随着我国畜牧业生产向集约化、规模化发展,畜禽粪尿的处理成为亟待解决的难题,如果处理不当,就会造成严重的环境问题如恶臭和渗滤液的产

生^[1]。厌氧发酵被认为是环境友好型的处理技术,它能够将有机固体废弃物诸如畜禽粪便、食品废弃物、市政垃圾转化为可再生能源——沼气^[2]。在畜禽养殖粪便中,牛粪所占比例较大,约为 70%,但与其他粪便相比,牛粪产气率不高^[3-4]。

收稿日期: 2012-09-13 修回日期: 2012-10-03
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B04)、国际科技合作资助项目(2010DFB606801)和哈尔滨市科技创新人才研究专项资助项目(2011RFLXN021)
作者简介: 关正军,教授,博士,主要从事生物质转化与利用研究,E-mail: zhjguan@163.com

为了提高牛粪发酵的综合利用效率,关正军等开展了鲜牛粪加水固液分离,对分离液进行发酵试验研究^[5-6]。岩淵和則等开展了对牛粪进行直接固液分离,用分离液进行发酵的试验,结果表明分离液可以大幅度提高产气效率^[7]。Callaghan 等研究了牛粪和果蔬废弃物的混合发酵,表明混合发酵比单纯牛粪发酵的甲烷产率要高,具有推广价值^[8]。Amon 等做了玉米与牛粪混合发酵提高发酵系统产甲烷效率的试验^[9]。王晓娇以牛粪、鸡粪和作物秸秆为原料,进行了 3 种原料的混合发酵试验^[10]。刘丹等研究了在牛粪中直接添加猪粪混和厌氧发酵,结果表明与单一原料相比大幅提高产气效率^[11]。

本文利用实验室自制的螺旋压榨固液分离机对新鲜牛粪进行固液分离预处理,并对分离液和稀牛粪的发酵特性进行对比试验;同时为了提高牛粪的

产气效率在分离液中添加猪粪进行混合发酵试验,旨在为提高牛粪厌氧发酵的综合利用效率提供理论依据。

1 材料及试验装置

1.1 发酵物料

固液分离所用的原料为新鲜牛粪;混合发酵试验用的原料为牛粪分离液和猪粪。

牛粪取自哈尔滨市完达山奶牛养殖基地,新鲜牛粪的总固体(TS)质量分数为 16%;猪粪取自哈尔滨市幸福乡某养猪厂;接种液采用实验室经过培育的富含产甲烷菌的发酵后液体。发酵前对原料进行参数测量,包括 TS、VS、木质纤维素、过滤液中化学需氧量(COD)、黏度和碳氮比(C/N),结果如表 1 所示。

表 1 沼气发酵原料参数表
Tab.1 Parameters of raw materials

项目	TS 质量分数/%	VS 质量分数/%	木质纤维素质量分数/%	COD/mg·L ⁻¹	黏度/mPa·s	碳氮比
稀牛粪	5.79±0.12	4.86±0.21	57.66±0.87	18 516±381	237±23	40.12±0.09
分离液	6.60±0.01	4.98±0.09	37.70±1.32	25 265±1 857	182±10	26.00±0.16
鲜猪粪	27.55±0.10	19.00±0.04				13.57±0.13
接种液	4.37±0.03	3.09±0.06	35.38±0.85	11 768±381	124±4	18.26±0.27

1.2 试验装置与仪器设备

中温条件下混合物料的厌氧发酵装置如图 1 所示。采用恒温水浴槽控制发酵温度。发酵罐为带上、下口的玻璃瓶,有效发酵容积 4.5 L,配好料的发酵罐放置在水浴槽内进行发酵。集气罐与发酵罐之间通过乳胶管连接,采用悬浮式排水法收集气体。在集气罐上设有刻度,标识产气量,集气罐自重通过滑轮与配重平衡。

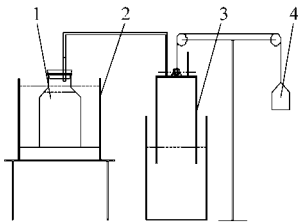


图 1 沼气发酵试验装置
Fig.1 Tester of biogas fermentation
1. 发酵罐 2. 水浴槽 3. 集气罐 4. 配重

牛粪固液分离装置如图 2 所示,由进料斗、榨笼、螺旋轴和出料筒等组成。新鲜牛粪加水稀释后,经固液分离机进行分离,所得的液体即为牛粪分离液。

试验测试所用的主要设备如表 2 所示。

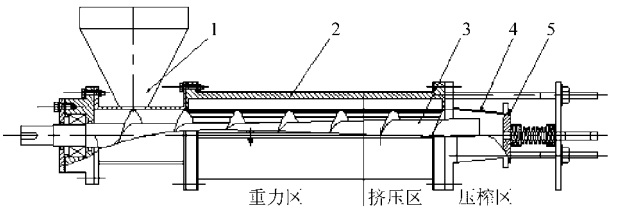


图 2 固液分离装置结构简图
Fig.2 Sketch of solid-liquid separation device
1. 进料斗 2. 榨笼 3. 螺旋轴 4. 出料筒 5. 压榨盘

表 2 试验仪器设备
Tab.2 Experimental apparatus equipments

仪器设备	生产厂家
ALC-4100.1 型电子天平	北京赛多利斯仪器系统有限公司
101-1 型电热鼓风干燥箱	天津市泰斯特仪器有限公司
RJM-28-10 型马弗炉	沈阳市节能电炉厂
Fibertec 1020 型纤维分析仪	丹麦 FOSS 公司
Anke TGL-16G 型高速离心机	上海安亭科学仪器厂
Spectrum 722 型可见分光光度计	上海光谱仪器有限公司
NDJ-8S 型数显黏度计	上海天平仪器厂
Kjeltec2300 型氮分析仪	丹麦 FOSS 公司
liquiTOC 型总有机碳分析仪	德国 Elementar 公司
GC6890 型气相色谱仪	美国 Agilent 公司

2 试验方法

根据发酵温度厌氧发酵分为高温发酵(55 ± 2)℃、中温发酵(35 ± 2)℃和常温发酵(20 ± 2)℃^[12-13]，本试验根据沼气工程实际发酵温度采用(35 ± 2)℃恒温水浴槽中温厌氧发酵。采用一次性接种投料，运转周期内不添加新料液，每天人工振荡搅拌 2 次，并逐日记录累计产气量^[14]。固液分离对比试验采用原牛粪加水稀释与优化分离参数生产的分离液进行对比发酵，考虑到分离液中灰分的质量分数选取 VS 比较接近的稀释牛粪与分离液进行对比试验。提高厌氧发酵的有机负荷可以提高系统的容积产气率，分离液的 TS 质量分数为 6.60%，可以通过添加鲜猪粪提高有机负荷。发酵物料 TS 质量分数为 8.54%、10.49%、8.00%，前两组是牛粪分离液和猪粪以确定的 TS(质量分数为 8.50%、10.50%)混合后实际测得值，第 3 组是由猪粪按比例加水调配的发酵原料。试验都是以质量分数为 30% 接种物接种装罐发酵。自装料后每天记录产气情况。待基本停止产气时结束试验。

3 结果与分析

3.1 沼气发酵对比

图 3 为牛粪分离液和稀牛粪厌氧发酵对比试验结果。从图中可以看出，在发酵原料 TS 相差不大的条件下，与稀牛粪相比，分离液在发酵过程中产气高峰明显提前，高产气周期在第 13 天基本结束；而稀牛粪发酵时间较长，后期产气较分离液多，发酵时间较长。

用气相色谱仪测得一定进样量沼气中甲烷的体积含量，气相色谱图横坐标为出峰时间，纵坐标为电流值，甲烷的体积分数可以用峰面积计算后转换，气相色谱图如图 4、图 5 所示。

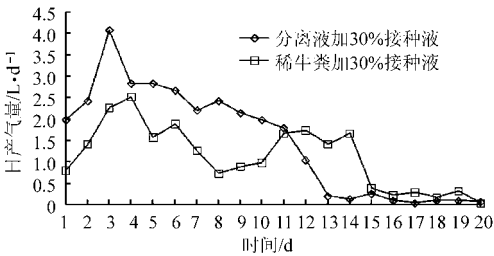


图 3 沼气发酵过程日产气量对比
Fig.3 Contrasts of daily gas production yield during fermentation process

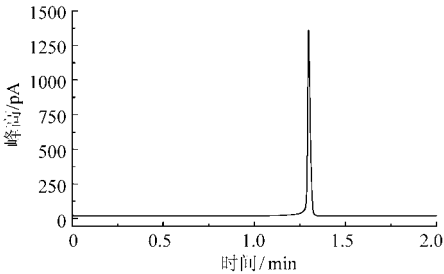


图 4 稀牛粪加入 30% 接种液发酵沼气中甲烷含量
Fig.4 Content of methane in fermentation biogas of dilute dairy manure with 30% inoculum

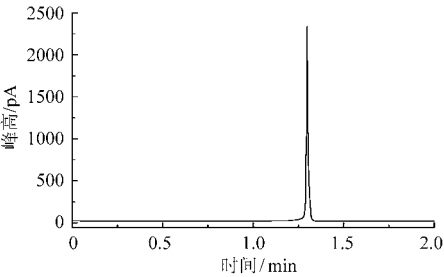


图 5 分离液加入 30% 接种液发酵沼气中甲烷含量
Fig.5 Content of methane in fermentation biogas of separated liquid with 30% inoculum

根据进、出水的 COD 及 VS 值可计算出 COD 和 VS 去除率，根据总产气量和用气相色谱仪测得的甲烷体积分数可以计算单位 TS、VS 的甲烷产率，结果如表 3 所示。

表 3 沼气发酵性能对比
Tab.3 Comparative performance of biogas fermentation

项目	滤液中 COD 去除率/%	VS 去除率 /%	木质纤维 降解率/%	甲烷体积分数 /%	TS 甲烷产率 /L·kg ⁻¹	VS 甲烷产率 /L·kg ⁻¹
稀牛粪加 30% 接种液	49.10	35.19	33.57	45.90 ± 0.90	49.94	59.50
分离液加 30% 接种液	65.40	44.58	37.27	73.72 ± 2.50	93.95	124.51

试验结果表明，原料 VS 很接近的条件下，分离液总产气量、气体中甲烷体积分数和甲烷得率比稀牛粪有显著的提高，其原因主要是分离后的液体黏度降低且颗粒小，有利于微生物的传质。

3.2 混合发酵

图 6 为牛粪分离料液和猪粪在不同混合配比下的日产气量变化曲线，其中第 1 组为 TS 质量分数

8.54% 混合物料，第 2 组为 TS 质量分数 10.49% 混合物料，第 3 组为 TS 质量分数 8.00% 猪粪。从图中可看出，3 组日产气量变化曲线都出现了双峰，但出现双峰的时间却不相同。第 3 组到达第 1 次高峰所用时间最短，其次是第 2 组，第 1 组所用时间最长。但第 3 组达到第 1 次产气高峰后，日产气量就急剧下降直到第 14 天才有所回升，到达第 2 次产气

高峰的时间也最长,为 16 d;第 2 组在经过第 1 次产气高峰后日产气也有下降的趋势,但它下降的幅度不大,第 14 天到达第 2 次产气高峰,此时日产气量为 5.18 L/d,也是 3 组中的最大值。第 1 组日产量总体来说变化不大,但它两次产气高峰时的日产气量都是 3 组中的最小值。第 3 组在经历了第 2 次产气高峰后日产气再次急剧下降,第 24 天结束产气;第 2 组的降幅相对缓和,30 d 停止产气;第 1 组产气持续时间最长,第 30 天仍有产气。

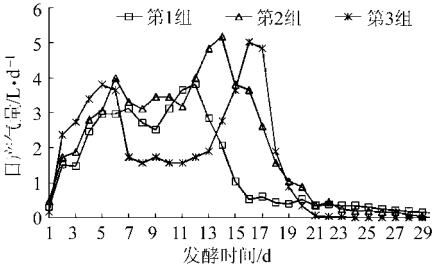


图 6 混合物料日产气量

Fig. 6 Daily biogas production yield of mixed manure

单一以猪粪为原料,TS 质量分数为 8.00% 时出现双峰现象,而双峰中间有明显的低谷,说明单一猪粪为原料发酵会出现受抑制的现象,推测可能是 C/N 失衡导致的结果。

混合物料在厌氧发酵过程中 VS 产气量如图 7 所示。由图可知 3 组 VS 产气量的大小顺序为:第 3 组、第 2 组、第 1 组。根据混合物料设计配比可知,第 2 组只比第 1 组多添加了 0.33 g 鲜猪粪,但 VS 产气量提高了 22.45 L/kg,同时与第 3 组 8.00%

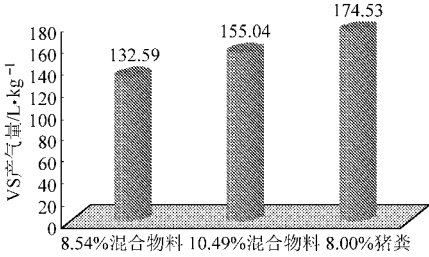


图 7 混合物料 VS 产气量

Fig. 7 VS methane production yield of mixture

猪粪在 VS 产气量上相差仅为 19.49 L/kg。

4 结束语

固液分离发酵对比试验表明,原料 VS 很接近的条件下,分离液总产气量、气体中甲烷体积分数和甲烷得率比稀牛粪有显著提高,其原因主要是分离后的液体黏度降低且颗粒小,有利于微生物的传质。单一粪便发酵尽管简便可行,但不是产沼气的最有效方式^[15]。混合发酵技术由于能同时处理几种有机废弃物,而日益被应用,这种技术的优点是提高了甲烷的产量^[16]。牛粪中添加猪粪进行混合发酵,可以获得较为理想的产气效果,提高设备利用率。混合物料试验结果表明:6.60% 牛粪分离料液和猪粪混合的 TS 质量分数为 10.49% 混合物料产气过程稳定,产气周期相对较短,累计产气量最大为 59.8 L,比同期 TS 质量分数为 8.00% 猪粪组提高了 26.24%,比 TS 质量分数为 8.54% 混合物料组提高了 43.51%。同时,也实现了发酵料液在中温湿法高浓度发酵条件下较好的产气效果。

参 考 文 献

1 Slack R J, Gronow J R, Voulvoulis N. Household hazardous waste in municipal landfills: contaminants in leachate[J]. Science of the Total Environment, 2005,337(1~3): 119~137.

2 Mata-Alvarez J, Mace S, Llabres P. Anaerobic digestion of organic solid wastes[J]. Bioresource Technology, 2000,74(1):3~16.

3 Itodo I N, Awulu J O. Effects of total solids concentrations of poultry, cattle, and piggery waste slurries on biogas yield[J]. Transactions of the ASAE, 1999,42(6):1 853~1 855.

4 张克强,高怀友. 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京:化学工业出版社,2003: 20.

5 关正军,李文哲,郑国香,等. 固液分离对牛粪利用效果的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(4):259~263.

Guan Zhengjun, Li Wenzhe, Zheng Guoxiang, et al. Effect of solid - liquid separation on utilization of dairy manure [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(4): 259~263. (in Chinese)

6 关正军,李文哲,郑国香,等. 牛粪固液分离液两相厌氧发酵技术[J]. 农业工程学报,2011,27(7):300~305.

Guan Zhengjun, Li Wenzhe, Zheng Guoxiang, et al. Technology for two-phase anaerobic fermentation by solid - liquid separated solution of dairy manure[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(7):300~305. (in Chinese)

7 岩淵和則,樋元淳一,松田從三. 牛糞の固液分離特性試験と搾汁液によるメタン発酵[J]. 北海道大学農学部邦文紀要, 1987,15(3): 249~256.

Iwabuchi Kazunori, Himoto Junichi, Matsuda Juzo. Methane fermentation characteristics test of juice and the cattle solid - liquid separation medium[J]. Memoirs of Agriculture, Hokkaido University, 1987,15(3):249~256. (in Japanese)

8 Callaghan F J, Wase D A J, Thayanithy K, et al. Co-digestion of waste organic solids: batch studies[J]. Bioresource Technology, 1999,67(2):117~122.

9 Amon T, Amon B, Kryvoruchko V, et al. Biogas production from maize and dairy cattle manure—influence of biomass composition on the methane yield[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007,118(1~4): 173~182.

10 Wang Wei,Peng Yankun,Zhang Xiaoli. Study on modeling method of total viable count of fresh pork eat based on hyperspectral imaging system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(2):411~415.

11 陶斐斐,王伟,李永玉,等. 冷却猪肉表面菌落总数的快速无损检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(12):3 405~3 409.

Tao Feifei,Wang Wei,Li Yongyu,et al. A rapid nondestructive measurement method for assessing the total plate count on chilled pork surface[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(12):3 405~3 409. (in Chinese)

12 孙通,徐惠荣,应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(1):122~126.

Sun Tong,Xu Huirong,Ying Yibin. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive on-line detection of products/food quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2009,29(1):122~126. (in Chinese)

13 祝诗平,王一鸣,张小超,等. 农产品近红外光谱品质检测软件系统的设计与实现[J]. 农业工程学报,2003,19(4):175~179.

Zhu Shiping,Wang Yiming,Zhang Xiaochao,et al. Design and implementation of near infrared spectroscopy analysis software system for agricultural product quality detection[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(4):175~179. (in Chinese)

14 Lu Renfu,Peng Yankun. Development of a multispectral imaging prototype for real-time detection of apple fruit firmness[J]. Optical Engineering,2007,46(12):123 201~123 208.

15 赵杰文,盛伟,邹小波,等. 水果外观质量在线检测系统的软件实现[J]. 农业工程学报,2006,22(6):115~118.

Zhao Jiewen,Sheng Wei,Zou Xiaobo,et al. Software design for fruit appearance on-line inspection system[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(6):115~118. (in Chinese)

16 Isaksson T, Nilsen B N. On-line,proximate analysis of ground beef directly at a meat grinder outlet[J]. Meat Science, 1996,43(3~4):245~253.

17 Hildrum K I, Nilson B N,Westad F,et al. In-line analysis of ground beef using a diode array near infrared instrument on a conveyor belt[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2004,12(6):367~376.

18 O’Farrell M,Wold J P,Hoy M,et al. On-line fat content classification of in homogeneous pork trimmings using multispectral near infrared interactance imaging[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy,2010,18(2):135~146.

19 廖宜涛,樊玉霞,伍学千,等. 猪肉肌肉脂肪含量的可见/近红外光谱在线检测[J]. 农业机械学报,2010,41(9):104~107,137.

Liao Yitao,Fan Yuxia,Wu Xueqian,et al. On line prediction of intramuscular fat content in pork muscle with visible/near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(9):104~107,137. (in Chinese)

(上接第 126 页)

10 王晓娇. 牲畜粪便与秸秆混合的厌氧发酵特性及工艺优化[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.

Wang Xiaojiao. The mixed biogas fermentation of animals’ waste and corn straw and process optimization [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)

11 刘丹,李文哲,王忠江. 混和畜禽粪便厌氧发酵技术研究[J]. 农业工程技术:新能源产业,2007(6):11~14.

Liu Dan, Li Wenzhe, Wang Zhongjiang. Technology research on anaerobic fermentation of mix livestock and poultry wastes[J]. Agricultural Industrialization;New Energy Industry, 2007(6):11~14. (in Chinese)

12 刘荣厚,王远远,孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性影响[J]. 农业机械学报,2009,40(9):116~121.

Liu Ronghou,Wang Yuanyuan,Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(9):116~121. (in Chinese)

13 魏荣荣,成官文,罗介均,等. 不同温度猪粪厌氧发酵甲烷产量和产能实验[J]. 农机化研究,2010,32(4):170~174.

Wei Rongrong, Cheng Guanwen, Luo Jiejun, et al. Experiment on the methane production capacity and energy output of different temperatures during anaerobic digestion of swine manure[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,32(4):170~174. (in Chinese)

14 王丽丽,王忠江,梁俊爽,等. 20~30℃牛粪厌氧发酵产气特性的试验[J]. 东北农业大学学报,2006,37(6):791~795.

Wang Lili, Wang Zhongjiang, Liang Junshuang, et al. Study on anaerobic fermentation of dairy cattle manure at 20~30℃[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006,37(6):791~795. (in Chinese)

15 Wua Xiao, Yao Wanying, Zhu Jun, et al. Biogas and CH₄ productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source[J]. Bioresource Technology, 2010,101(11):4 042~4 047.

16 Felipe A M, Parviz S, Hub H J C, et al. Anaerobic codigestion of municipal, farm, and industrial organic waste: a survey of recent literature[J]. Water Environment Research, 2006,78(6):607~636.