

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.022

搅拌对牛粪干式厌氧发酵效果的影响*

李道义¹ 李树君² 刘天舒² 黄希国² 吴丽丽² 景全荣²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 利用自制干式厌氧发酵罐, 通过批次试验, 研究了高温(55℃)条件下搅拌对牛粪干式厌氧发酵效果的影响。连续搅拌转速为8~32 r/min时, 产气效果无明显差异。采用8 r/min间歇搅拌, 所得到的甲烷产量比连续搅拌低约10%, 但能大幅降低搅拌能耗, 在干式厌氧发酵系统中更为适用。反应过程中, 各组间发酵料液的pH值、挥发性有机酸浓度、总碱度和氨氮浓度无明显差异。

关键词: 牛粪 搅拌 干式厌氧发酵 沼气

中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0117-04

Effect of Mixing on Dry Anaerobic Digestion of Dairy Manure

Li Daoyi¹ Li Shujun² Liu Tianshu² Huang Xiguo² Wu Lili² Jing Quanrong²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

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

Abstract: Effect of mixing on dry thermophilic (55℃) anaerobic digestion of dairy manure was investigated. No significant difference in fermentation performance was observed between continuous mixing speeds of 8 ~ 32 r/min. Compared to continuously mixing, although 10% less methane was produced with batch slightly mixing. It greatly decreased energy consumption for mixing, and more suitable for dry anaerobic digestion. No significant difference in pH value, concentrations of ammonia, volatile fatty acid and total alkalinity was observed among different mixing conditions during digestion.

Key words: Dairy manure Mixing Dry anaerobic digestion Biogas

引言

干式厌氧发酵处理畜禽粪便、市政垃圾、餐厨垃圾等有机废弃物并获取可再生能源, 是当前可再生能源研究领域的热点。搅拌能促进传质、传热, 使物料和微生物直接接触, 加速沼气逸出, 直接影响产气效果和电能消耗, 是厌氧发酵过程重要的运行参数^[1-3]。一般认为, 适度搅拌能够提高厌氧发酵的产沼气量^[2]。Khurshed等发现搅拌能显著提高牛粪高浓度厌氧发酵的产气效果, 且随着发酵浓度增加, 厌氧发酵过程对于搅拌的需要愈显突出^[4]; 傅志国等发现提高搅拌频率有助于提高麦秸厌氧发酵的产气效果^[5]。但也有研究发现, 较高强度的搅拌

对提高厌氧发酵产气效果非常有限, 甚至影响系统运行稳定性^[2-3]。

目前, 国内沼气工程所采用的搅拌系统主要针对湿式厌氧发酵工艺, 无法满足干式厌氧发酵工艺的需要。本文以自制卧式厌氧发酵罐为试验装置, 研究不同搅拌条件下, 牛粪高温干式厌氧发酵的产气效果和反应过程中物料变化情况, 用以指导干式厌氧反应器搅拌系统的开发和运行。

1 材料与方法

1.1 试验装置

厌氧发酵装置由卧式厌氧发酵罐(总容积20 L, 不锈钢材质)、双螺带机械搅拌(5~32 r/min)、温

收稿日期: 2012-03-16 修回日期: 2012-05-14

* 国际科技合作资助项目(2010DFB60680)

作者简介: 李道义, 博士生, 主要从事生物质能工程技术研究, E-mail: daoyili@126.com

通讯作者: 李树君, 研究员, 博士生导师, 主要从事农副产品加工、生物质能和生物复合材料研究, E-mail: lisj@caams.org.cn

度控制(25~60℃)和集气装置(有机玻璃材质,内置饱和食盐水)组成,系统设置取样口和观察孔(图1)。

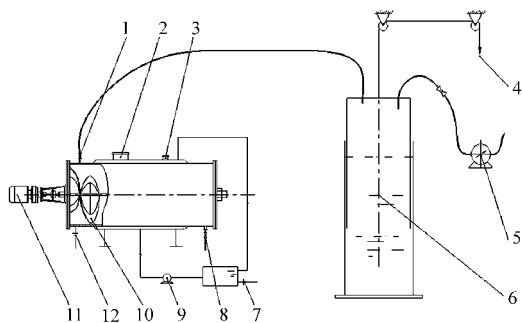


图1 干式厌氧发酵罐示意图

Fig.1 Schematic of dry anaerobic digester

1. 气体出口 2. 进料口 3. 观察孔 4. 重物 5. 湿式气体流量计 6. 集气筒 7、12. 温度电极 8. 取样口 9. 热水泵 10. 桨叶 11. 电动机和减速机

1.2 试验原料

牛粪取自中国农机院良种奶牛繁育中心,4℃冷藏备用。

初始接种物:取牛粪中温厌氧发酵产物,在35℃厌氧工况条件下逐渐升温至55℃(2℃/d)。在55℃条件下,每隔2~3d后添加适量牛粪,当发酵物料的浓度适当后,停止添加牛粪,当物料停止产气后,发酵物料用作启动牛粪高温干式厌氧发酵反应的初始接种物^[6]。

牛粪和初始接种物的总固体质量分数(TS)、pH值、氨氮、挥发性脂肪酸(Volatile fatty acid, VFA)和总碱度(Total alkalinity, TAC)等理化指标如表1所示。

表1 发酵原料的理化指标

Tab.1 Characteristics of dairy manure and inoculum

发酵原料	总固体质量分数/%	pH值	氨氮质量浓度/mg·L ⁻¹	挥发性脂肪酸质量浓度/mg·L ⁻¹	总碱度质量浓度/mg·L ⁻¹
牛粪	17.16	6.88	450	9 040	13 900
初始接种物	12.80	8.10	1 750	22 000	6 000

1.3 试验方法

按比例称取牛粪和接种物,混合均匀后放入干式厌氧发酵罐。反应温度设定为(55±0.5)℃,通过变频器和时间继电器设置4组不同搅拌方式,总反应时间设定为15d,试验基本参数如表2所示。每日测定气体产量和甲烷含量,并取样检测反应器内发酵物料的各项指标。

1.4 检测方法

总固体质量分数采用(105±5)℃干燥法测定;氨氮采用半微量滴定法测定;挥发性脂肪酸采用蒸

馏滴定法测定;总碱度采用酸碱滴定法测定;甲烷体积分数按文献[7]方法测定。

表2 试验条件

Tab.2 Conditions of experiments

批号	牛粪质量/g	接种量/g	接种物来源	搅拌方式
1	10 050	3 050	初始接种物	8 r/min, 连续搅拌
2	10 000	3 000	批次1 发酵残留物	20 r/min, 连续搅拌
3	10 000	3 000	批次2 发酵残留物	32 r/min, 连续搅拌
4	10 000	3 020	批次3 发酵残留物	8 r/min, 间歇搅拌, 每隔11 h 搅拌1 h

2 结果与讨论

2.1 搅拌对产气效果的影响

沼气日产量和甲烷含量随反应时间变化情况分别如图2、3所示。从图2、3可知,在4个不同搅拌条件下,厌氧反应均实现了快速启动,并都在第3天达到产气高峰。在反应初期,间歇搅拌与连续搅拌产气量基本一致,但间歇搅拌在反应后期产气量相对较少。这可能是连续搅拌能够使物料更充分参与反应。从结果可以看出,3组连续搅拌产气曲线和甲烷含量曲线基本重合,产气效果差异很小,可见加大连续搅拌转速对提高产气效果所起作用非常有限。

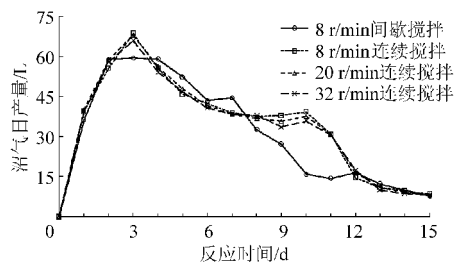


图2 不同搅拌条件下沼气日产量随时间变化曲线

Fig.2 Daily biogas producing at different mixing conditions

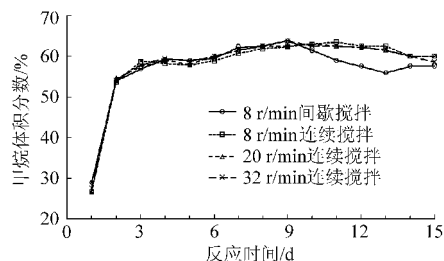


图3 不同搅拌条件下甲烷体积分随时间变化曲线

Fig.3 Changes of CH₄ content at different mixing conditions

4组不同搅拌条件下都取得了较好的产气效果。连续搅拌比间歇搅拌所得到的甲烷产量约高10%,而3组连续搅拌试验的产气指标无明显差异(表3)。

厌氧发酵处理低浓度牛粪物料时,搅拌对产气

效果影响很小^[8-9]。Khursheed 等处理 TS 为 10% 的牛粪物料时,采用搅拌的反应器所得沼气产量要多于无搅拌的反应器,且随着发酵浓度增加,厌氧发酵过程对于混合搅拌的需要愈显突出^[4]。Christopher 等利用中温干式厌氧发酵工艺处理市政垃圾,连续搅拌的转速为 1~25 r/min 时,所得到的产气效果无明显差异^[10]。本文结果与上述报道基本一致。

表 3 不同搅拌条件下的产气效果

Tab.3 Gas producing of dry anaerobic digestion of dairy manure at different mixing conditions

批号	沼气总产量/L	甲烷总产量/L	TS 沼气产量/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	TS 甲烷产量/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	甲烷平均体积分数/%
1	536	306	311	178	57.1
2	537	308	313	179	57.2
3	526	302	307	176	57.4
4	491	278	286	162	56.7

2.2 物料参数变化

反应过程中物料的 pH 值、挥发性脂肪酸、总碱度、氨氮质量浓度变化情况分别如图 4~7 所示。从图可以看出,4 组不同搅拌条件下,各组间的理化指标及变化趋势基本一致,无显著性差异。值得注意的是,在反应 1 d 后,4 组试验物料的 VFA 质量浓度均达到最大值,但间歇搅拌的 VFA 质量浓度略低于另外 2 组。这说明搅拌能提高反应初始阶段的水解酸化效果,促进了 VFA 的生成。

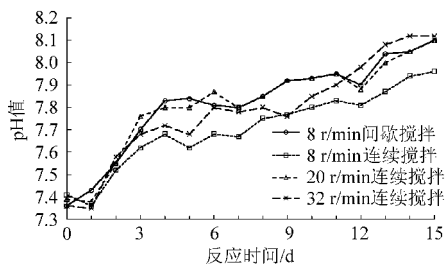


图 4 不同搅拌条件下 pH 值随时间变化曲线
Fig. 4 Change of pH value at different mixing conditions during digestion

傅国志等发现,频繁的搅拌会加速麦秸厌氧发酵过程氨氮的积累^[5]。根据厌氧发酵理论,氨氮主要在水解酸化阶段产生^[1]。这可以说明搅拌能促进物料的水解酸化。但高强度搅拌易导致 VFA 过度积累而降低厌氧发酵系统的稳定性。选用轻微搅拌或不搅拌可以降低干式厌氧发酵过程中酸化现象产生的可能性,从而增加系统的稳定性^[3]。

Vavilin 等提出的二维分布模型可以用来解释该现象:搅拌强度过高时,甲烷化区域会受到 VFA 的抑制逐渐萎缩直至消失,并在反应器内会发现很

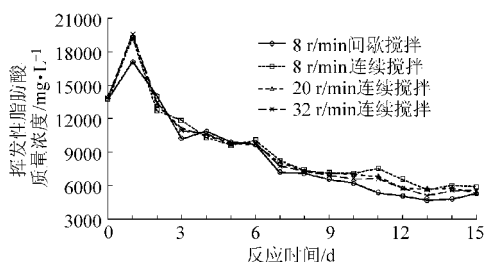


图 5 不同搅拌条件下挥发性脂肪酸质量浓度随时间变化曲线

Fig. 5 Change of VFA content at different mixing conditions during digestion

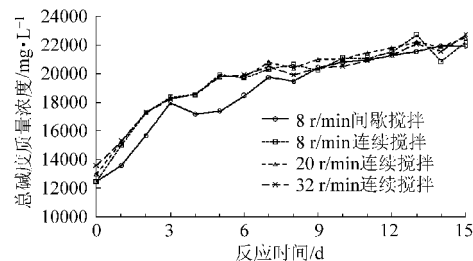


图 6 不同搅拌条件下总碱度质量浓度随时间变化曲线

Fig. 6 Change of TAC at different mixing conditions during digestion

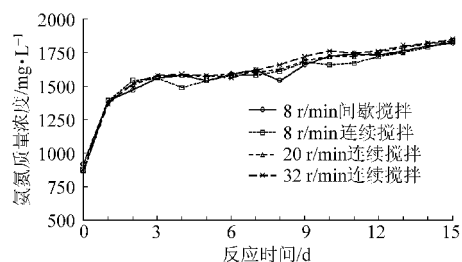


图 7 不同搅拌条件下氨氮质量浓度随时间变化曲线

Fig. 7 Change of ammonia content at different mixing conditions during digestion

多死细胞;而较小强度搅拌时,大部分甲烷区域均能幸存并逐步扩大到整个反应器^[3]。然而,搅拌效果的表征方法以及其对厌氧发酵效果之间的关系有待进一步研究^[2,11]。

2.3 搅拌方式优化

产气效果、搅拌方式和搅拌电耗三者密切相关^[2,5,11]。规模化沼气工程运行时,搅拌电耗约为工程总电耗的 50%,占工程输出电耗的 2.7%~20.6%^[2]。电能消耗过高已成为搅拌装置深入推广的主要限制因素^[2]。

现有厌氧反应器中,主要有物料回流、机械搅拌和气体搅拌等 3 种搅拌方式,其中机械搅拌被认为是最为有效的混合方式^[2,5]。有研究者推荐在干式厌氧发酵系统采用低转速、高扭矩、大桨叶搅拌器^[10]。该类型搅拌系统,适用于高粘度、特高粘度物料的混合,近年来颇受关注^[2]。

以卧式螺带搅拌器为例,它的搅拌功率和转速

的关系可表示为^[12]

$$P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{1+n}$$

式中 P_1 、 P_2 ——转速为 N_1 、 N_2 时的搅拌功率
 n ——料液的非牛顿系数

结合实际搅拌的频率和时间,可以推导出4组试验的搅拌所需电耗关系为

$$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 12 : 12 \times 2.5^{1+n} : 12 \times 4^{1+n} : 1$$

其中, P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 分别对应表2中4组不同搅拌条件下的搅拌电能消耗。

高浓度牛粪的非牛顿系数为 0.35 ~ 0.47^[12]。显然,采用低转速搅拌的方式在减少搅拌电耗上具有绝对优势,而采用间歇搅拌则可以进一步降低搅拌能耗。

尽管连续搅拌时发酵产能与间歇搅拌相比有一定提高(甲烷产量提高10%),但搅拌能耗大幅增加。且在本次试验中,3组连续搅拌所得到的甲烷产量无明显差异。因此,在干式厌氧发酵过程中采用较高强度的连续搅拌是没有必要的,对提高产气效果和降低搅拌电能消耗都不利,而采用间歇低速搅拌在牛粪干式厌氧发酵处理过程中更具有优势。

沼气发酵过程的混合搅拌还是一种理论研究尚不成熟的单元操作,还不能根据不同发酵原料的发酵工艺来设计混合搅拌装置的结构以及运行参数^[2]。而轻度搅拌被证明可以使进料分散,有利于形成一个新的絮凝中心,从而有效提高干式厌氧发酵的产气效果和稳定性^[3]。因此,采用大桨叶低速搅拌系统,有望解决提升产气效果和电能消耗较大之间的矛盾,将逐渐成为发展趋势^[2,12]。

3 结论

(1) 厌氧发酵过程采用低转速机械搅拌,牛粪高温干式厌氧发酵能取得较好的产气效果,TS 甲烷产量为 162 ~ 179 mL/g。在4组不同搅拌条件下,反应物料间的 pH 值、挥发性有机酸浓度、总碱度和氨氮浓度无明显差异。

(2) 连续搅拌的转速对产气效果没有显著影响。采用间歇低速搅拌,所得到的甲烷产量仅比连续搅拌低 10%,但能大幅度降低搅拌电能消耗。间歇低速搅拌条件下进行牛粪高温干式厌氧发酵,有利于提高干式厌氧发酵的产气效果和降低搅拌电能消耗,在干式厌氧发酵系统中更为适用。

参 考 文 献

- 1 Keshtkar A, Meyssami B, Abolhamd G, et al. Mathematical modeling of non-ideal mixing continuous flow reactors for anaerobic digestion of cattle manure[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 87(1):113 ~ 124.
- 2 杨浩, 邓良伟, 刘刘, 等. 搅拌对厌氧消化产沼气的影响综述[J]. *中国沼气*, 2010, 28(4):3 ~ 9.
Yang Hao, Deng Liangwei, Liu Yi, et al. A review on effects of stirring on biogas production of anaerobic digestion[J]. *China Biogas*, 2010, 28(4):3 ~ 9. (in Chinese)
- 3 Vavilin V A, Angelidaki I. Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity and 2D distributed model [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, 89(1):113 ~ 122.
- 4 Khurshed K, Rebecca H, Thomas K, et al. Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(16):1 771 ~ 1 781.
- 5 傅国志, 李秀金, 袁海荣, 等. 搅拌对麦秸厌氧消化性能影响的试验研究[J]. *可再生能源*, 2011, 29(2):65 ~ 68.
Fu Guozhi, Li Xiujin, Yuan Hairong, et al. Investigation on effect of stirring on anaerobic digestion performance of wheat straw [J]. *Renewable Energy Resources*, 2011, 29(2):65 ~ 68. (in Chinese)
- 6 马传杰, 花日茂, 郭亮. 接种量对牛粪厌氧干发酵的影响[J]. *家畜生态学报*, 2008, 29(5):81 ~ 84.
Ma Chuanjie, Hua Rimao, Guo Liang. Effect of inoculation concentration on dry anaerobic fermentation [J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2008, 29(5):81 ~ 84. (in Chinese)
- 7 Demirel G N, Chen S. Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(11):3 542 ~ 3 549.
- 8 Khurshed K, Thomas K, Rebecca H. Anaerobic digestion of animal waste: effect of mixing[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(14):1 607 ~ 1 612.
- 9 Prasad K, Inmaculada B, Lars E. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: lab-scale and pilot-scale studies[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(11):4 919 ~ 4 928.
- 10 Christopher J R, Michael E H, Todd B V. Anaerobic digestion of processed municipal solid waste using a novel high solids reactor: maximum solids levels and mixing requirements [J]. *Biotechnology Letters*, 1990, 12(3):235 ~ 240.
- 11 Alastair J W, Phil J H, Peter J H, et al. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(17):7 928 ~ 7 940.
- 12 Yu L, Ma J, Chen S. Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2):1 012 ~ 1 018.