

甘蔗叶干法厌氧发酵工艺研究*

王金丽 焦 静 张 劲 邓怡国 郑 勇 王 刚

(中国热带农业科学院农业机械研究所, 湛江 524091)

【摘要】 为实现甘蔗叶的能源化利用,采用干法厌氧发酵方法研究发酵原料总固体含量为20%时,不同接种量、草粪比以及发酵温度对甘蔗叶产气量和产甲烷的影响。结果表明:接种量在30%和40%时发酵可以正常启动,接种量为40%时总产气量最高,但发酵后期甲烷含量下降很快;草粪比为1:1和2:1时总产气量高,甲烷含量均在60%以上,产气效果明显好于草粪比为1:0的处理组;发酵温度为35℃时,总产气量和甲烷含量最高,发酵温度为30℃和40℃时总产气量相差不大。甘蔗叶干法厌氧发酵产沼气效果较好的工艺参数为:接种量30%、草粪比1:1和发酵温度35℃。各处理组在甲烷含量达到最高值之前,甲烷含量与发酵时间之间呈现很强的线性相关性。产气高峰过后,虽然日产气量明显下降,但气体中甲烷含量下降幅度不大。

关键词: 甘蔗叶 干法厌氧发酵 沼气 产气量 甲烷含量

中图分类号: S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0109-06

Sugarcane Leaves Dry Anaerobic Fermentation

Wang Jinli Jiao Jing Zhang Jin Deng Yiguo Zheng Yong Wang Gang

(Institute of Agricultural Machinery, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524091, China)

Abstract

In order to transform a large number of abandoned sugarcane leaves into biogas energy, dry anaerobic fermentation method and the fermented materials with total solid content of 20% were used in the experiments. The effects of different inoculum concentrations, grass-manure ratios and fermentation temperatures on the biogas yield and methane content were analyzed. Results showed that the fermentation could work normally when inoculum concentration was 30% and 40%. The 40% inoculum concentration had the highest total gas production, but the methane content decreased rapidly during the fermentation anaphase. When grass-manure ratio was 1:1 and 2:1, maximum total gas production was obtained, with methane content more than 60%, and the gas production efficiency was significantly higher than the efficiency obtained when grass-manure ratio was 1:0. Maximum total gas production and methane content were obtained at the fermentation temperature of 35℃. There was little difference in total gas production when the fermentation temperature was at 30℃ and 40℃. The best results of dry anaerobic fermentation of sugarcane leaves were obtained for an optimum processing parameters combination of 30% inoculum concentration, 1:1 grass-manure ratio and 35℃ fermentation temperature. For all the treatment groups, there was a strong linear correlation between methane content and fermentation time before the methane content reached the highest value. The decrease in methane content was not obvious though the daily biogas yields decreased significantly after the peak of gas production.

Key words Sugarcane leaves, Dry anaerobic fermentation, Biogas, Biogas yield, Methane content

收稿日期: 2010-05-18 修回日期: 2010-07-15

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD07A02-4)、2010年农村能源综合建设项目(2130138)和中国热带农业科学院重点学科建设项目

作者简介: 王金丽, 研究员, 主要从事热带农业工程研究, E-mail: jinliw@tom.com

通讯作者: 张劲, 研究员, 主要从事热带农业工程研究, E-mail: Zj1204@tom.com

引言

当今世界诸多新能源中,生物质能源是最安全、最稳定的能源,也是目前国家重点鼓励的新能源领域^[1]。我国华南等热带地区,具备良好的光、热、湿等自然气候条件,农作物种类丰富,造就了丰富的生物质资源。国内甘蔗种植面积为 120 万 hm^2 ,年废弃甘蔗叶总量 2 700 万 $\text{t}^{[2-3]}$ 。目前绝大多数甘蔗叶被就地焚烧,除了严重污染空气外,还造成了极大的安全隐患。甘蔗叶中营养物质丰富,总碳含量很高,通过干法厌氧发酵技术可以将废弃的甘蔗叶转化成生物质能源,进而替代农村薪柴,还可用于燃烧供热或发电^[4-5],对于获取新型能源和控制农村环境污染都有积极意义。

沼气干法厌氧发酵是以固体有机废弃物为原料(总固体含量在 20% 以上),利用厌氧菌将其分解为 CH_4 、 CO_2 、 H_2S 等气体的发酵工艺^[6-7]。目前,国外干法厌氧发酵技术已经成熟,如车库型干发酵系统、气袋型干发酵系统、干湿联合型发酵系统、渗滤液储存桶型干发酵系统等大型沼气干发酵系统^[8],已经投入生产性应用,可进行规模化的沼气生产。我国干法厌氧发酵技术起步较晚,目前仅有数家利用垃圾填埋场所产沼气发电的企业^[9-10]。农业部规划设计研究院以新鲜牛粪和青贮玉米秸秆废料为原料进行沼气干法厌氧发酵中试工程,取得了比较好的效果^[11]。

甘蔗叶属于南方农作物秸秆,目前在沼气发酵方面的研究还未见报道。接种量、草粪比和发酵温度是影响沼气发酵的几个重要因素^[12-14],为了探索一条适合于甘蔗叶能源化利用的工艺技术路线,本文采用干法厌氧发酵方法,研究不同接种量、草粪比和发酵温度对甘蔗叶沼气发酵的影响,掌握其产气特性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验原料:甘蔗叶,取自湛江市湖光农场甘蔗收获后的干黄叶,用粉碎机粉碎成 3~5 cm 的不规则小段,测其总固体含量为 89.82%;猪粪,取自湛江市湖光农场个体养猪场的新鲜猪粪,测其总固体含量为 26.57%。

接种物:甘蔗叶和猪粪混合后进行中温干法厌氧发酵富集而成,富集时间大于 2 个月,总固体含量为 5%。

其他材料:碳酸氢铵(含 N 量 17%)、绿桔灵。

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示,是由中国热带农业科学院农业机械研究所制作的可控恒温厌氧发酵装置,主要由罐体、加热保温系统和沼气计量系统组成,发酵罐体积为 25 L。

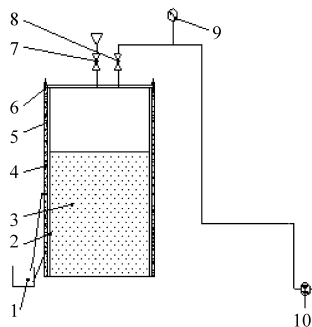


图 1 厌氧发酵装置

Fig. 1 Anaerobic fermentation device

1. 温度控制仪 2. 罐体 3. 发酵原料 4. 加热器 5. 保温材料
6. 盖板 7. 进液阀 8. 排气阀 9. 沼气压力表 10. 流量计

1.3 试验方法

每个处理组称取甘蔗叶 1.67 kg(含干物质 1.5 kg),按照每组工艺规定的草粪比混合好物料,再添加甘蔗叶干物质质量 0.3% 的绿桔灵进行好氧堆沤,堆沤温度为 50~55℃,堆沤时间 7 d。堆沤好的物料加入一定比例的接种物,再加入碳酸氢铵调节碳氮比为 25:1 左右,加适量水,控制发酵原料总固体含量为 20%,搅拌均匀后装罐,调节温度至规定值进行厌氧发酵,发酵时间 60 d,每个处理组做两罐平行试验。通过单因素试验探讨不同接种量、草粪比以及发酵温度对甘蔗叶干法厌氧发酵的影响。发酵过程中,每天下午 17:00 准时打开排气阀门,记录流量计读数,每 2 天测定一次甲烷含量。各组单因素试验水平设置如下:接种量:20%、30%、40%,3 个水平;草粪比(干物质比):1:1、2:1、1:0,3 个水平;发酵温度:30、35、40℃,3 个水平。

1.4 测试指标及分析

总固体:采用 105℃ 烘干法测定;挥发性固体:采用 550℃ 灼烧法测定;总碳:采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ —外热源法测定;总氮:采用全自动凯式定氮仪测定;甲烷含量:采用 Biogas 沼气成分分析仪测定。

试验结束后,综合试验数据进行指标分析^[4],计算干物质产气率 C_w 和容积产气率 C_v ,计算公式为

$$C_w = \frac{C_T}{W}$$

$$C_v = \frac{C_T}{V}$$

式中 C_T ——总产气量, L V ——发酵罐体积, L

W——每罐发酵物料中甘蔗叶干物质含量，kg

2 试验结果与分析

2.1 接种量对产气效果的影响

2.1.1 产气量

试验在草粪比 1:0、发酵温度 35℃ 条件下进行。日产气量变化表明(图 2):接种量为 20% 时,甘蔗叶干发酵日产气量上升缓慢,没有明显的产气高峰,发酵周期在 40 d 左右;接种量为 30% 和 40% 时,甘蔗叶干发酵日产气量上升非常快,均在发酵第 4 天出现了一个产气小高峰,然后迅速下降至较低水平,说明发酵初期有一个产酸阶段,到发酵第 11 天这两组均达到日产气量最高值,分别为 14.8 L/d 和 20.8 L/d,发酵周期在 30 d 左右。

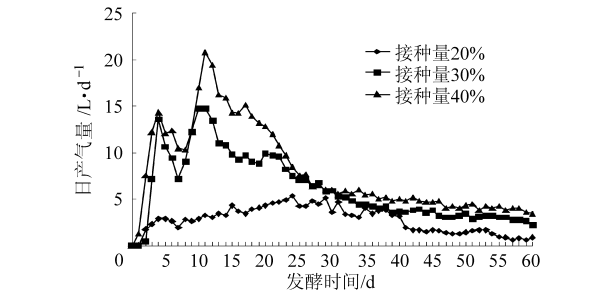


图 2 不同接种量试验的日产气量

Fig.2 Daily biogas yields under different inoculum concentrations

水解反应是不溶性底物厌氧发酵过程的第一级反应,也是限速反应^[15]。甘蔗叶在干发酵方式下水分较少,使微生物的活动受到一定限制,影响了甘蔗叶的分解和产甲烷菌的繁殖,所以需要较多的接种物,以增加沼气微生物数量,避免原料在分解过程中有机酸积累,出现“酸中毒”现象,从而破坏沼气的正常条件。对于甘蔗叶干发酵来说,接种量至少应达到 30% 以上发酵才能正常启动。接种物中含有大量沼气微生物,此外接种物中还含有微生物生长所必不可少的“生长因素”,如某些氨基酸、维生素等^[16],因此,接种量加大,沼气微生物数量多,产气量变大。

不同接种量各项产气指标如表 1 所示。接种量从 20% 增加到 30% 时,总产气量增加了 204.15 L,当接种量从 30% 增加到 40% 时,总产气量增加了 113.70 L,产气增幅不大,说明干法厌氧发酵接种量达到一定值时,分解率就到了一定极限,因此接种量 30% 是较合适的。各组对应的干物质产气率和容积产气率也随着接种量的增加而升高,可见,接种量对于甘蔗叶干发酵来说是非常重要的影响因素之一。

表 1 不同接种量试验的各项产气指标
Tab.1 Gas indexes under different inoculum concentrations

产气指标	接种量/%		
	20	30	40
总产气量 C_T/L	167.75	371.90	485.60
干物质产气率 $C_m/L \cdot kg^{-1}$	111.83	247.93	323.73
容积产气率 $C_v/L \cdot L^{-1}$	6.71	14.88	19.42

2.1.2 甲烷含量

选用发酵 40 d 内的甲烷含量进行分析(图 3),可以看出:接种量为 20% 时甘蔗叶干发酵所产气体甲烷含量上升缓慢,在第 32 天才达到最高值 45.0%;接种量为 30% 和 40% 时气体中甲烷含量上升迅速,均在第 12 天达到最高值,分别为 54.9% 和 55.2%;结合图 2 可以看出,产气高峰之后,日产气量下降较快,但是这两组甲烷含量均保持在 50% 以上,沼气质量较好,发酵 30 d 后才开始明显下降,其中接种量 40% 时降幅较大,可能是因为发酵前期接种量为 40% 的处理组消耗了大量的营养物质,在没有添加新料的情况下,产生沼气的营养物质不足,因此甲烷含量下降较快。对各处理组在甲烷含量达到最高值之前的数据作直线回归分析,接种量为 20%、30% 和 40% 时的相关系数分别为 0.982 3、0.976 9 和 0.984 6,可见,甲烷含量在达到最高值前与发酵时间之间呈现很强的线性相关。

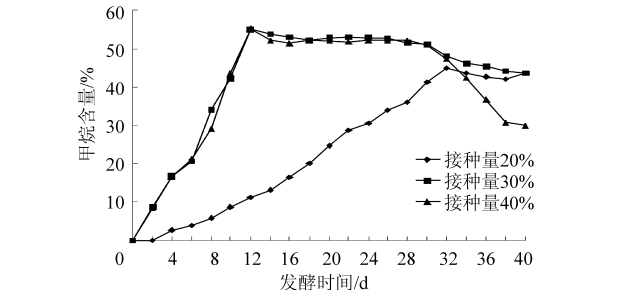


图 3 不同接种量试验的甲烷含量

Fig.3 Methane content under different inoculum concentrations

2.2 草粪比对产气效果的影响

2.2.1 产气量

试验在接种量 30%、发酵温度 35℃ 条件下进行。从图 4 可以看出,当草粪比为 1:0 时甘蔗叶干发酵最先出现产气高峰,在发酵第 11 天达到最高值 14.8 L/d,发酵周期在 30 d 左右;草粪比为 1:1 和 2:1 时日产气量随着发酵时间的延长平稳上升,在发酵第 22 天均达到最高值,分别为 16.6 L/d 和 15.75 L/d,发酵周期均在 50 d 左右,表明发酵原料中猪粪比例越大,产气量越多。由于甘蔗叶原料的

结构非常疏松,不利于介质的传递,而猪粪的结构较为致密,在甘蔗叶中加入猪粪等细碎的原料,可以改善原料间的接触面,增强介质传递,有利于厌氧微生物对原料的充分利用,增大产气量。添加猪粪的同时还可以补充氮源,调解发酵原料碳氮比。

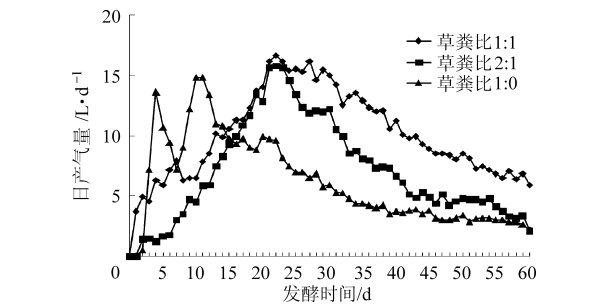


图 4 不同草粪比试验的日产气量
Fig. 4 Daily biogas yields under different ratios of manure to straw

不同草粪比各项产气指标如表 2 所示。草粪比为 1:1 时总产气量比草粪比为 2:1 时高 184.63 L, 比草粪比为 1:0 时高 237.33 L, 可见随着发酵原料中猪粪比例减少,总产气量、干物质产气率和容积产气率各项指标均相应降低。甘蔗叶和猪粪混合发酵在营养调节和结构改良等方面起到了一定作用,效果好于甘蔗叶单独发酵。

表 2 不同草粪比试验的各项产气指标
Tab.2 Gas indexes under different ratios of manure to straw

产气指标	草粪比		
	1:1	2:1	1:0
总产气量 C_T/L	609.23	424.60	371.90
干物质产气率 $C_w/L \cdot kg^{-1}$	406.15	283.07	247.93
容积产气率 $C_v/L \cdot L^{-1}$	24.37	16.98	14.88

2.2.2 甲烷含量

选用发酵 50 d 内的甲烷含量进行分析(图 5),可以看出:草粪比为 1:0 时,甘蔗叶干发酵所产气体的甲烷含量在发酵前期高于其他两组,但最高值仅为 54.9%,发酵后期甲烷含量下降较快;草粪比为 1:1 和 2:1 的甲烷含量变化曲线相近,均在第 25 天达到 60% 以上,发酵后期产气量的下降基本不影响甲烷含量的变化,沼气质量好。由此可见甘蔗叶和猪粪混合发酵甲烷含量比甘蔗叶单独发酵要高,且相对稳定。对各处理组在甲烷含量达到最高值之前的数据作直线回归分析,草粪比为 1:1、2:1 和 1:0 时的相关系数分别为 0.956 1、0.972 9 和 0.976 9,可见,甲烷含量在达到最高值前与发酵时间之间呈现很强的线性相关。

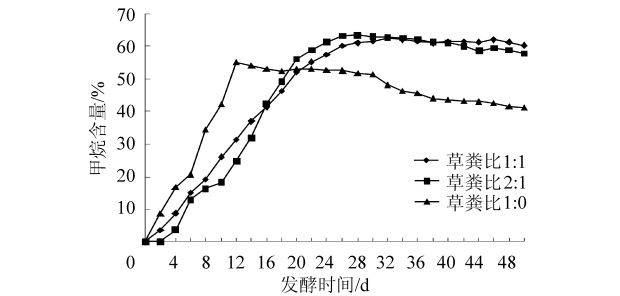


图 5 不同草粪比试验的甲烷含量
Fig. 5 Methane content under different ratios of manure to straw

2.3 发酵温度对产气效果的影响

2.3.1 产气量

试验在接种量 30%, 草粪比 1:1 条件下进行。从图 6 可以看出,各处理组都可以正常启动,均有产气高峰,且温度越高,产气高峰出现越早;发酵温度 40℃ 时发酵周期为 30 d 左右,其他两组为 50 d 左右;发酵温度 40℃ 时日产气量达到最高峰后则迅速下降,而 35℃ 时日产气量在最高峰可维持 6 d。从不同发酵温度的总产气量看(表 3),发酵温度 40℃ 时总产气量低于 35℃ 时,说明在 30~40℃ 中温发酵范围内,发酵温度与沼气产量并不是呈正比关系。

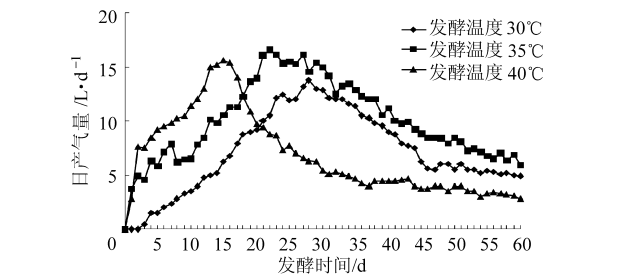


图 6 不同发酵温度试验的日产气量
Fig. 6 Daily biogas yields under different fermentation temperatures

温度通过对微生物活性的影响,能有效提高甘蔗叶的降解速度和微生物呼吸强度。在发酵过程中微生物对温度有一定要求,将发酵料液维持在适宜的温度范围内,可以保证产气率,温度过高或过低均会影响微生物的活性,且发酵原料不同,对温度的要求也不相同。从表 3 可以看出,发酵温度 35℃ 时甘蔗叶干发酵的总产气量、干物质产气率和容积产气率都最大,分别为 609.23 L、406.15 L/kg 和 24.37 L/L,远高于其他两组,而发酵温度 30℃ 和 40℃ 时差别不大。

2.3.2 甲烷含量

选用发酵 50 d 内的甲烷含量进行分析(图 7),可以看出:发酵温度为 40℃ 时,甘蔗叶干发酵在第 22 天甲烷含量达到最高值 60.5%,然后开始下降,而其他两组甲烷含量均维持在 60% 以上;结合图 6

可知,发酵后期产气量下降对发酵温度为 30℃ 和 35℃ 这两组的甲烷含量影响不大,说明在 30 ~ 35℃ 的温度范围内,产甲烷菌最活跃。对各处理组在甲烷含量达到最高值之前的数据作直线回归分析,发酵温度为 30、35 和 40℃ 时的相关系数分别为 0.910 3、0.956 1 和 0.992 3,说明在 30 ~ 40℃ 范围内,发酵温度越高,甲烷含量与发酵时间之间呈强线性相关。

表 3 不同发酵温度试验的各项产气指标

Tab.3 Gas indexes under different fermentation temperatures

产气指标	发酵温度/℃		
	30	35	40
总产气量 C_T /L	434.60	609.23	413.95
干物质产气率 C_w /L·kg ⁻¹	289.73	406.15	275.97
容积产气率 C_v /L·L ⁻¹	17.38	24.37	16.56

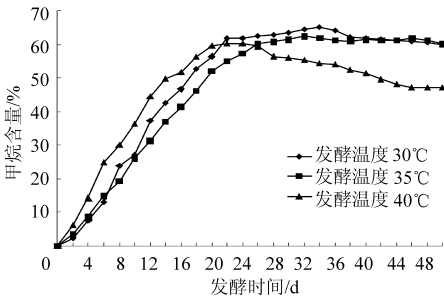


图 7 不同发酵温度试验的甲烷含量
Fig. 7 Methane content under different fermentation temperatures

2.4 单因素试验综合分析

综合以上 3 组试验,比较其对甘蔗叶干法厌氧发酵产气量和产甲烷的影响,结果如图 8 ~ 11 所示。

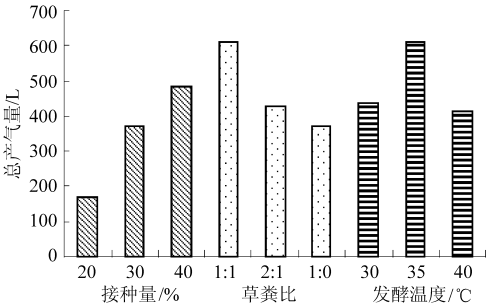


图 8 不同发酵工艺条件下总产气量
Fig. 8 Total gas production under different fermentation conditions

从图 8 可以看出,各处理组在 60 d 内的总产气量差异较大,最高的可达到 609.23 L,最低的只有 167.75 L;接种量越大、原料中猪粪含量越高,总产气量越大。从图 9 可以看出,各处理组的最高甲烷含量均达到 45% 以上,可以燃烧,并且凡是原料中

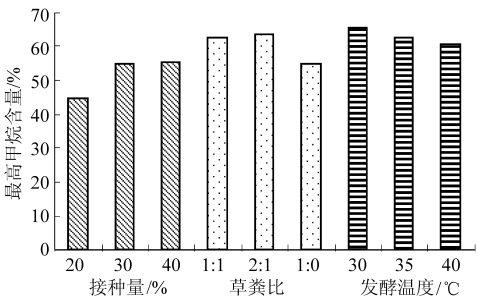


图 9 不同发酵工艺条件下最高甲烷含量
Fig. 9 Methane content under different fermentation conditions

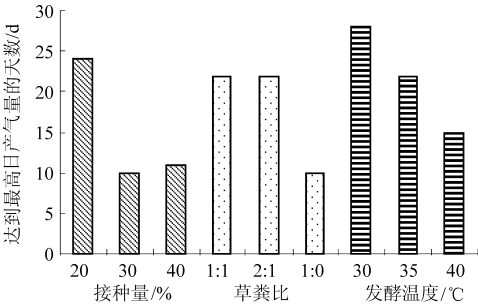


图 10 不同发酵工艺条件下达到最高日产气量的天数
Fig. 10 Number of days to reach the maximum daily gas production under different fermentation conditions

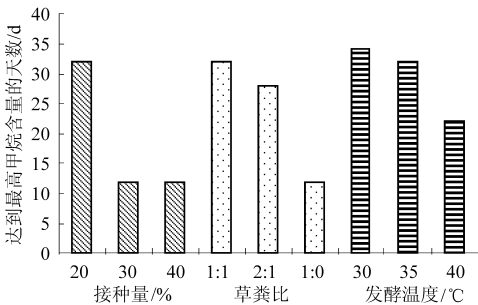


图 11 不同发酵工艺条件下达到最高甲烷含量的天数
Fig. 11 Number of days to reach the maximum methane content under different fermentation conditions

添加了猪粪的处理组最高甲烷含量均可达到 60% 以上,说明添加猪粪有利于产甲烷菌的生长繁殖,获得质量较好的沼气。

达到最高日产气量的天数越短,说明发酵启动越快,从图 10 可以看出,接种量大或者发酵温度高,都可以加快甘蔗叶干发酵的启动速度。达到最高甲烷含量的天数越短,说明原料水解和产酸所需要的时间就越短,产甲烷越快,从图 11 可以看出,接种量在 30%、40% 以及草粪比为 1:0 时达到最高甲烷含量的天数最短,但是结合图 8 和图 9 可知,这 3 组的总产气量较低,甲烷含量也都在 60% 以下,说明发酵中原料分解利用不够充分;并且结合图 9 可知,甲烷含量在 60% 以上的各组,达到最高甲烷含量的天数平均为 30 d,时间较长,所以还应对如何提高产甲烷速度作进一步的研究。

3 结 论

(1) 甘蔗叶单独发酵时,接种量需在 30% 以上才能正常启动,当接种量为 40% 时,发酵后期甲烷含量下降很快;甘蔗叶和猪粪混合发酵时,草粪比为 1:1 和 2:1 的甲烷含量均可达 60% 以上,产气效果好于甘蔗叶单独发酵;甘蔗叶和猪粪混合发酵温度在 35℃ 时总产气量最高,30℃ 和 40℃ 时总产气量相差不大,这 3 个发酵温度下甲烷含量都能达到 60% 以上,但发酵后期,发酵温度为 40℃ 的甲烷含量下降较快。综合以上几方面,对于甘蔗叶干法厌氧发酵,能获得较高产气量和甲烷含量的工艺参数是:接种

量 30%、草粪比 1:1 和发酵温度 35℃。

(2) 对各处理组在甲烷含量达到最高值之前的数据作直线回归分析,发现相关系数均在 0.90 以上,大部分都在 0.95 以上,表明在甲烷含量达到最高值之前,甲烷含量与发酵时间之间呈强线性相关。

(3) 本试验的发酵时间是 60 d,在发酵后期,日产气量明显下降,但气体中甲烷含量仍能维持较高的水平,表明产气量的减少并不会导致甲烷含量的迅速降低。

(4) 本试验虽然是在实验室条件下进行的,但在理论上揭示了甘蔗叶干法厌氧发酵的产气规律,对探索甘蔗叶能源化利用具有一定的指导作用。

参 考 文 献

- 陈小华,朱洪光.农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J].农业工程学报,2007,23(3):279~283.
Chen Xiaohua, Zhu Hongguang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 279~283. (in Chinese)
- 焦静,王金丽,邓怡国,等.热带农业废弃物资源及沼气利用[J].安徽农业科学,2008,36(30):13 350~13 351,13 405.
Jiao Jing, Wang Jinli, Deng Yiguo, et al. Tropical agricultural waste resources and the use of biogas [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(30):13 350~13 351, 13 405. (in Chinese)
- 焦静,王金丽,邓怡国,等.草粪比对甘蔗叶干法厌氧发酵产气效果的影响[J].广东农业科学,2010,37(1):51~54.
Jiao Jing, Wang Jinli, Deng Yiguo, et al. Effect of ratios of manure to straw on sugarcane leaves dry anaerobic fermentation for biogas production [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(1):51~54. (in Chinese)
- 刘战广,朱洪光,王彪,等.粪草比对干式厌氧发酵产沼气效果的影响[J].农业工程学报,2009,25(4):196~200.
- 李世密,魏雅洁,张晓建,等.秸秆类木质纤维素原料厌氧发酵产沼气研究[J].可再生能源,2008,26(1):51~54.
- 李想,赵立欣,韩捷,等.农业废弃物资源化利用新方向——沼气干发酵技术[J].中国沼气,2006,24(4):23~27.
Li Xiang, Zhao Lixin, Han Jie, et al. The new direction of agricultural residues utilization in China: biogas dry fermentation technology [J]. China Biogas, 2006, 24(4):23~27. (in Chinese)
- 曲静霞,姜洋,何光设,等.农业废弃物干法厌氧发酵技术的研究[J].可再生能源,2004,22(2):40~41.
Qu Jingxia, Jiang Yang, He Guangshe, et al. Research on dry anaerobic fermentation by agricultural refuse [J]. Renewable Energy Resources, 2004, 22(2):40~41. (in Chinese)
- Walter J W. Anaerobic dry fermentation [J]. Biotechnology & Bioengineering Symp., 1980(10):43~65.
- 边义,刘庆玉,李金洋.玉米秸秆干发酵制取沼气的试验[J].沈阳农业大学学报,2007,38(3):440~442.
Bian Yi, Liu Qingyu, Li Jinyang. Experimental investigation of making biogas from dry fermented corn stalk [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(3):440~442. (in Chinese)
- 叶小梅,常志州.有机固体废弃物干法厌氧发酵技术研究综述[J].生态与农村环境学报,2008,24(2):76~79,96.
Ye Xiaomei, Chang Zhizhou. State of arts and perspective of dry anaerobic digestion of organic solid waste [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(2):76~79, 96. (in Chinese)
- 韩捷,向欣,李想.干法发酵沼气工程无热源中温运行及效果[J].农业工程学报,2009,25(9):215~219.
- 李想.农业废弃物干法厌氧发酵关键参数优化研究[D].北京:中国农业科学院,2007.
Li Xiang. The optimized study on the pivotal parameters of agriculture residues dry anaerobic fermentation [D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. (in Chinese)
- 孙国朝,邵廷杰,连莉文,等.干发酵工艺条件的研究[J].太阳能学报,1985,6(3):221~235.
Sun Guochao, Shao Tingjie, Lian Liwen, et al. Research on the requirement condition of dry fermentation [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1985, 6(3):221~235. (in Chinese)
- 白洁瑞,李轶冰,郭欧艳,等.不同温度条件粪秆结构配比及尿素、纤维素酶对沼气产量的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):188~193.
- 林聪.沼气技术理论与工程[M].北京:化学工业出版社,2007:31~37.
- 鲍海琴.有机垃圾生物制气的影响参数分析[D].武汉:华中科技大学,2007.