

# 户用太阳能恒温沼气生产系统全年产气性能试验

李金平<sup>1,2,3</sup>, 甄箫斐<sup>1,2,3</sup>, 杨霭蓉<sup>1,2,3</sup>, 黄娟娟<sup>1,2,3</sup>, 董 缙<sup>4</sup>

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州 730050; 2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州 730050; 3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 兰州 730050; 4. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

**摘要:**为满足北方农户全年生活燃气需求和研究户用恒温沼气池的产气特性, 研发了发酵容积为 3 m<sup>3</sup> 的地上式太阳能恒温沼气生产系统。从沼气池的产气稳定性, 不同发酵温度、不同发酵原料下的产气性能, 全年产气特性 4 个方面对该系统做了试验研究。在兰州地区气象条件下, 厌氧发酵试验结果发现: 该太阳能恒温产气系统可全年稳定连续运行, 全年累计产气 398.52 m<sup>3</sup>; 当最低环境温度分别高于-19.9、0.7 和 6.9 ℃时, 系统可以实现 26、28 和 37 ℃恒温厌氧发酵; 当猪粪与农户常见的玉米秸秆、蒿草、莲花菜叶按一定比例混合发酵后, 可显著提高沼气中甲烷体积分数并延长或缩短发酵周期。

**关键词:** 发酵; 沼气; 秸秆; 户用恒温沼气生产系统; 混合原料; 产气特性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.10.031

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-10-0220-06

李金平, 甄箫斐, 杨霭蓉, 黄娟娟, 董 缙. 户用太阳能恒温沼气生产系统全年产气性能试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 220-225. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.10.031 http://www.tcsae.org

Li Jinping, Zhen Xiaofei, Yang Airong, Huang Juanjuan, Dong Ti. Gas characteristics of household solar biogas production system with constant temperature in whole year[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(10): 220-225. (in Chinese with English abstract) doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.10.031 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

截止 2015 年, 中国已有 5 000 万口户用沼气池<sup>[1]</sup>, 多为 8~10 m<sup>3</sup> 无增温和保温措施的砖混沼气池。因厌氧发酵过程通常在酸性与碱性之间往复交替, 再加上建设施工不规范等因素影响, 砖混沼气池普遍存在漏水、漏气等问题<sup>[2]</sup>; 当环境温度低于 10 ℃后, 传统砖混沼气池产气不稳定、产气速率低下, 甚至不产气<sup>[3-5]</sup>, 严重影响了其推广使用。

为了提升小型沼气生产系统的产气量和稳定性, 国内外许多学者尝试使用太阳能增温的沼气生产系统, 并做了相关探索: 陈志光、郭甲生、张杨竣等分别采用模拟仿真和试验研究的方法分析了一套太阳能辅助增温的地下水压式沼气池的性能<sup>[6-8]</sup>; Dai Rong 等<sup>[9]</sup>也使用真空管太阳能热水器通过换热器为地下沼气池增温; 赵国明等<sup>[10]</sup>设计了太阳能增温的双层真空发酵装置, 试验对比研究了新型沼气生产装置与传统混凝土沼气池的性能; Su Yuan 等<sup>[11]</sup>试验研究了 2 m<sup>2</sup> U 型管太阳集热器加热的 6 m<sup>3</sup> 地下保温钢筋混凝土沼气池的性能; Tian Ye 等<sup>[12]</sup>提出了使用太阳能热水器联合相变储热材料石蜡为沼气池增温的系统。国外学者 Axaopoulos 等<sup>[13]</sup>设计了太阳能集热器充当发酵

装置顶部的“一体式”沼气生产系统, El-Mashad 等<sup>[14]</sup>也设计了一套“一体式”沼气生产系统, 该系统由太阳能增温, 电能补热; Kocar 等<sup>[15]</sup>通过太阳能集热器热水水浴循环为发酵液增温, 实现稳定产气。这些研究主要体现在太阳能增温方式上, 如水浴间壁式换热、发酵罐外壳抽真空、集热器和发酵罐一体构造、使用相变材料等, 已有研究表明: 利用太阳能增温沼气池是一种高效的、切实可行的方法, 带保温的沼气生产系统更易实现恒温厌氧发酵, 增温装置可以采用内置式、水浴式、双层真空式等方式。然而, 现有的研究基本上都处在试验研发阶段, 试验周期短, 关于全年变工况下太阳能增温的混合发酵原料沼气生产系统的研究还是一片空白, 还没有获得用于指导用户的系统运行策略。

为此, 项目组在甘肃省皋兰县阳洼窑村研发了地上式户用太阳能恒温沼气生产系统<sup>[16]</sup>, 试验研究了全年 7 个批次、不同温度和发酵原料下系统的产气性能。

## 1 试验

### 1.1 试验装置

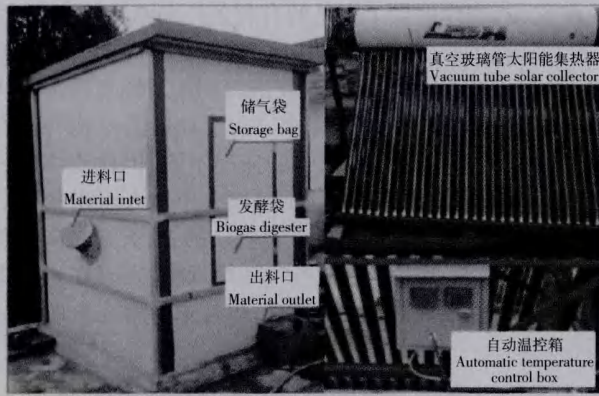
户用太阳能恒温沼气生产系统的实物图和原理图如图 1 所示<sup>[17-18]</sup>。

将发酵原料与水按一定的比例混合后填入红泥软体发酵袋 2 中, 全玻璃真空管太阳集热器 1 集取的太阳能热水在循环水泵 4 驱动下在彩钢房底部和四周螺旋盘管流动, 通过自动温控箱 5 控制循环水泵启停, 控制红泥软体发酵袋 2 中的温度恒定, 当发酵液达到设定温度时循环水泵停止工作, 当发酵袋中温度传感器显示料液温度低于设定的发酵温度时, 循环水泵启动。

收稿日期: 2015-09-21 修订日期: 2016-03-22

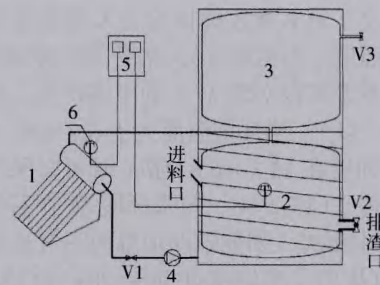
基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2015DFA60460); 国家 863 计划课题(2014AA052801); 甘肃省自然科学基金(1508RJZA051); 兰州理工大学“红柳杰出人才计划”(Q201101)

作者简介: 李金平, 男, 宁夏中宁人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事先进可再生能源系统方面的研究。兰州 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 730050。Email: Lijinping77@163.com



a. 户用太阳能恒温沼气生产系统实物图

a. Picture of household solar heated thermostatic biogas production system



1. 全玻璃真空管太阳集热器 2. 软体沼气池 3. 储气袋 4. 循环泵 5. 自动温控箱 6. 温度测点 V1. 截止阀 V2, V3. 球阀

1. Vacuum tube solar collector 2. Rheid biogas digester 3. Storage bag 4. Circulating pump 5. Automatic temperature control box 6. Temperature measuring point V1. Stop valves V2, V3. Spherical valve

b. 户用太阳能恒温沼气生产系统原理图

b. Schematic diagram of household solar heated biogas production system

图 1 户用太阳能恒温沼气生产系统

Fig.1 Household solar heated biogas production system

1.2 试验原料

试验中猪粪来源于阳洼窑村养殖场,玉米秸秆、蒿草

和莲花菜叶子均采自村内农田,填料时均切碎至 3~4 cm,主要参数如表 1 所示。

表 1 2013 年 10 月-2014 年 11 月批式发酵试验参数

Table 1 Batch fermentation parameters from October, 2013 to November, 2014

发酵批次 Batches	发酵天数 Days/d	发酵温度 $T_m/^\circ\text{C}$	发酵原料 Material	原料 TS TS of material/%	体积比(猪粪:其他:水:接种液) Volume ratio	最低环境温度 Minimum $T_{ab}/^\circ\text{C}$	平均环境温度 Average $T_{ab}/^\circ\text{C}$
第 1 批 The first batch (2013-10-16—2013-12-10)	56	28	猪粪	35.0	1:0:2:1	-16.9	0.8
第 2 批 The second batch (2013-12-15—2014-01-22)	39	26	猪粪	39.4	1:0:2:1	-19.9	-7.5
第 3 批 The third batch (2014-01-25—2014-04-25)	89	26	猪粪+玉米秸秆	猪粪:38.1 秸秆:92.1	1:1:2:1	-18.4	2.7
第 4 批 The fourth batch (2014-04-28—2014-06-20)	54	28	猪粪+玉米秸秆	猪粪:36.2 秸秆:95.6	1:1:2:1	0.7	12.9
第 5 批 The fifth batch (2014-06-26—2014-08-06)	42	37	猪粪	37.0	1:0:2:1	9.3	26.7
第 6 批 The sixth batch (2014-08-12—2014-09-05)	25	37	猪粪+蒿草	猪粪:28.2 蒿草:8.7	1:1:2:1	6.9	22.3
第 7 批 The seventh batch (2014-09-21—2014-11-03)	44	32	猪粪+莲花菜叶	猪粪:36.1 菜叶:4.8	3:4:4:3	-3.0	14.8

1.3 试验方案和方法

从 2013 年 10 月 16 日至 2014 年 11 月 3 日,利用太阳能恒温产气系统开展了 7 个批次的试验,根据厌氧发酵温度和原料,对该系统的产沼气性能做了分析和研究。为保证发酵原料能快速高效地利用,每日对发酵料液搅拌 10 min。

试验测定的料液、热水温度、流量等参数均由 Pt100 温度传感器和 LWGY-15 涡轮流量计传送到 Agilent 数据采集仪上,每 10 s 自动记录 1 次。每天的产气量由 G16 燃气表测定;料液的 pH 值由便携式 pH 计测定;气体成分(CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S)由 Gas600 便携式沼气分析仪测定,TS 值由 SX-4-10 箱式电阻炉测定。

2 结果与分析

2.1 温度对沼气生产系统的影响

为了研究户用太阳能恒温沼气生产系统的热稳定性,选取了 2014 年 1 月 8 日作为典型日(连续 3 个阴雪后的阴天),图 2 给出了当日最低环境温度、太阳能热水平

均温度和沼气池温度的变化图。系统中发酵料液的温度设定在 26 °C。从图 2 中看出,当环境温度随时间在 -23.8~-5 °C 之间变化时,太阳能热水器热水平均温度在 27.8~41.6 °C 波动,而太阳能恒温沼气的料液温度维持在 25.3~27.5 °C 范围内。因此,系统即使经历连续 3 个阴雪天气,厌氧发酵温度仍维持在(26±1.5) °C 范围内,实现了沼气的连续稳定生产,这说明系统热稳定性有保障。

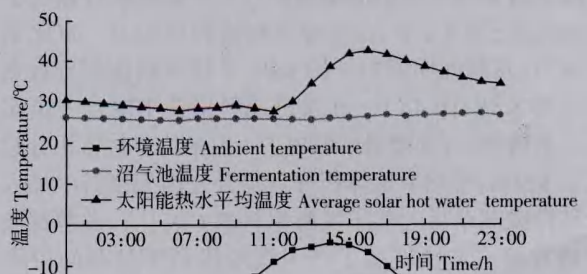


图 2 2014 年 1 月 8 日系统关键温度变化

Fig.2 Temperature variation of system on January 8th, 2014

图3给出了第6批发酵试验每天的最低环境温度和沼气池料液温度。由试验可知,猪粪或猪粪和蒿草为原料的沼气生产系统可以实现 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的中温产气,稳定期日均产沼气 $1.7\text{ m}^3$ 以上。当环境温度大于 $6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,8-9月的兰州太阳辐射强度在 $15.3\sim 16.8\text{ MJ/m}^2$ 时可以保证该系统的发酵温度保持在 $(37\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与张杨峻等<sup>[9]</sup>在石家庄市建造的 $8\text{ m}^3$ 地下水压式太阳能辅助增温的沼气池批式厌氧发酵试验结果(厌氧发酵温度维持在 $(20\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,日产气量在 $0.8\text{ m}^3$ 左右)相比,本系统在厌氧发酵温度和日产气量等方面都有明显优势。

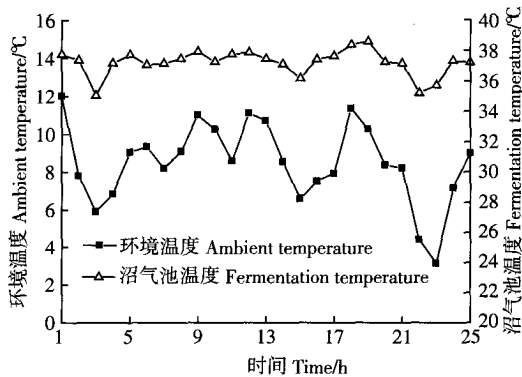


图3 第6批(2014-08-12—2014-09-05)发酵温度变化

Fig.3 Temperature variation of 6th batch

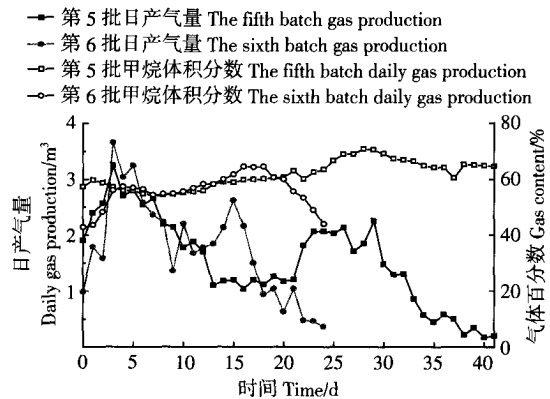
## 2.2 不同发酵原料下的产气特性

研究混合原料的发酵特性的目的,是分析不同混合原料的产气量、部分理化特性,影响因素和有效利用废弃有机物。研究表明:发酵液中碳、氮、磷元素的含量比例对沼气生产有重要影响,碳氮比为 $(20\sim 30):1$ 为较好,碳、氮、磷比例以 $10:0.4:0.8$ 为适宜,发酵菌群会不断将有机碳素转化为 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ ,同时将一部分碳素和氮素合成为细胞物质,多余的氮素则会被分解成以 $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ 形式溶于发酵液中,每分解一轮,碳氮流失一次<sup>[9]</sup>。由此可见,厌氧发酵过程中原料中的C/N值比例会影响发酵过程和产物。

图4a是发酵温度设定为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时第5批和第6批发酵试验期内日产气量和甲烷体积分数的变化曲线,其中,第5批的发酵原料是猪粪,第6批的是猪粪和蒿草的混合原料。图4b是发酵温度设定在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时第1批和第4批发酵试验期内日产气量和甲烷体积分数的变化曲线,其中,第1批的发酵原料也为猪粪,第4批的发酵原料是猪粪和玉米秸秆的混合物。

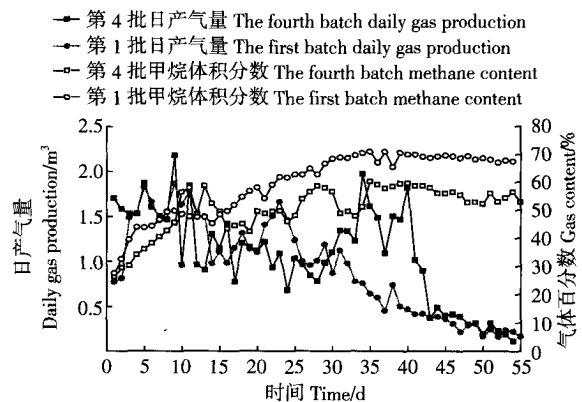
图4中曲线变化的共同特点是:猪粪发酵和混合原料发酵的过程中,发酵周期和沼气中甲烷体积分数发生了显著变化;图4a中,在发酵原料猪粪中加入一定比例的蒿草后,发酵周期缩短了约60%,平均甲烷体积分数则增大了约8.5%;图4b中,在发酵原料猪粪中混合一定比例的玉米秸秆后,发酵周期缩短了1d,平均甲烷体积分数增大了8.56%,平均甲烷体积分数提升是因为猪粪中加入玉米秸秆或蒿草后改善了发酵原料的C/N比,发酵料液中较适宜的C/N比促进了产甲烷阶段产甲烷菌的协同作用,厌氧消化过程产物中甲烷的体积分数增加。发酵周期的变化,取决于发酵原料的结构特性,图4a中蒿草在厌氧环境下、pH值在 $6.8\sim 7.6$ 时,比较容易降解,为后续的水

解、酸化、乙酸化提供了充足的有利条件和原料储备,在适宜的发 酵温度下,生化反应加速进行,发酵周期较单一原料(猪粪)明显缩短;图4b中,发酵周期相对缩短是因为在试验期内玉米秸秆未降解完全,由于原料的结构特性存在不同,在发酵过程中被分解的速率不同,因此产沼气的速率也存在差异,在第4批发酵试验中加入玉米秸秆后TS含量很高,难以降解,消化周期长,第35天左右降解能力达到峰值,进而再次出现产气高峰,试验发现在近2个月的发酵周期后,发酵料液中仍然有未降解完全的絮状秸秆残渣。



a. 第5、6批(2014-06-26—2014-08-06, 2014-08-12—2014-09-05) 恒温发酵试验

a. Biogas yield and  $\text{CH}_4$  volume fraction curve of thermostatic fermentation test of 5<sup>th</sup> & 6<sup>th</sup> batch



b. 第1、4批(2013-10-16—2013-12-10, 2014-04-28—2014-06-20) 恒温发酵试验

b. Biogas yield and  $\text{CH}_4$  volume fraction curve of thermostatic fermentation test of the first & fourth batch

图4 不同原料下的恒温发酵试验

Fig.4 Thermostatic fermentation test of different raw materials

周宪龙等<sup>[20]</sup>对发酵容积为 $10\text{ m}^3$ 的沼气池使用猪粪混合油菜秸壳、玉米秸秆和小麦秸壳后的产气特性做了研究,试验发现,在甘肃甘谷县8—11月环境温度下,沼气池发酵温度 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不同原料沼气池产气量随月份增加逐渐降低,混合原料启动时间较纯猪粪发酵时启动时间短。

## 2.3 不同发酵温度下的产气特性

图5是使用了同一种发酵原料猪粪的第2、5批试验的产气特性曲线,二者的区别是在相同的发酵原料下,采用不同的发酵温度( $26$ 和 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ );试验表明在 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温发酵条件下,发酵周期没有明显的变化,但产气量得到了很大的提高。 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温发酵周期内总产气量 $64.89\text{ m}^3$ ,

比 26 °C 恒温发酵多产沼气 22.37 m<sup>3</sup>, 占整个 26 °C 恒温发酵周期的 52.6%。说明在一定的温度范围内, 发酵温度的升高可以有效提高发酵原料的分解速度和消化速度; 由于在 37 °C 时菌种的协同作用较好, 即参与产甲烷和二氧化碳的菌种在此温度下活性都很强, 很少有酸化或氨的抑制现象产生, 因此, 与 26 °C 恒温发酵试验相比, 37 °C 的发酵温度更能够使产甲烷化顺利进行, 从而在整个发酵周期内产气量得到了很大的提高。

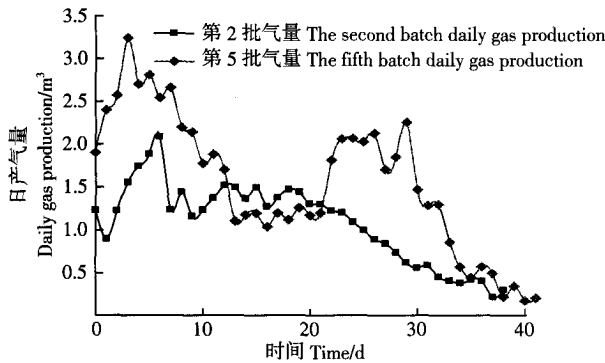


图 5 第 2、5 批(2013-12-15—2014-01-22、2014-06-26—2014-08-06)恒温发酵试验

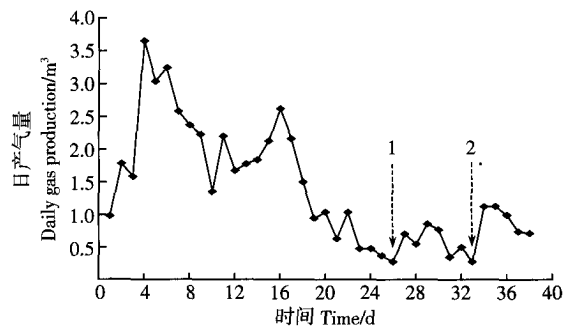
Fig.5 Biogas yield curve of second and fifth batch of thermostatic fermentation test

### 2.4 全年产气能力分析

由表 2 可以看出: 发酵容积为 3 m<sup>3</sup> 的太阳能恒温沼气池全年 7 个批次总产沼气量在 42~69 m<sup>3</sup> 间, 年累计产气量为 398.52 m<sup>3</sup>。表中稳定期日均产气量是整个发酵周期产气稳定期内的平均值, 代表了连续发酵期间能够供给用户的沼气日产量, 这一产量能够持续保证试验期间调研的 4~5 口农户每日 1 m<sup>3</sup> 的生活燃气需求。

由上文各批次产气曲线可以看出: 试验末期有机物

消耗殆尽, 产气曲线斜率变大, 厌氧发酵的稳定性被打破, 日产气量很难满足用户需求。为此, 研究了半连续发酵试验的产气特性, 在第 6 批发酵(猪粪加蒿草, 37 °C)试验后期 2 次向发酵装置内补充新料, 如图 6 中补料点 1、2 所示。按原来的混合比补充原料两桶(0.017 m<sup>3</sup>), 在接下来的 6 d 平均产气量为 0.63 m<sup>3</sup>, 最高产气量 0.86 m<sup>3</sup>。产气量偏低的原因有 2 点: 一是第 26~32 天均是阴雨天气, 太阳能热水已无法维持 37 °C 的恒温发酵; 二是原料补充较少, 发酵过程缺乏充足的有机物质。在第 32 天继续补料 3 桶(0.025 m<sup>3</sup>), 如图所示, 后 6 d(2 d 晴天、3 d 雨天、1 d 多云)产气量显著提升, 续料后日均产气 0.8 m<sup>3</sup>, 最高产气量 1.13 m<sup>3</sup>, 能够满足 2~3 人的用气需求。因此, 在西北兰州的夏秋季节, 3 m<sup>3</sup> 的恒温沼气系统, 一般天气情况下(阴晴日交替), 调整合适的发酵温度和原料比例, 产气末期时, 每周补料 3 桶能持续一周内日均产气 0.8 m<sup>3</sup>, 用气量增加时, 可以通过调节温度和补料量增加产气, 满足用气需求。



注: 1, 2 为 2 次补料点。

Note: 1, 2 were material supplement points.

图 6 第 6 批(37 °C)半连续发酵过程产气曲线

Fig.6 Biogas production curve of semi-continuous fermentation about sixth batch test

表 2 发酵容积为 3 m<sup>3</sup> 的恒温沼气池七批试验产气性能

Table 2 Gas production performance of 3 m<sup>3</sup> biogas digester in seven batches

发酵批次 Batches	发酵原料 Materials	发酵温度 Temperature/°C	产气周期 Days/d	稳定期日均产气量 Daily production/m <sup>3</sup>	最大有效池容产气量 Maximum biogas production rate/m <sup>3</sup>	累计产气量 Cumulative production/m <sup>3</sup>
第 1 批 The first batch	猪粪	28	56	1.33	0.93	50.71
第 2 批 The second batch	猪粪	26	39	1.38	2.54	42.52
第 3 批 The third batch	猪粪+玉米秸秆	26	89	1.32	0.83	69.37
第 4 批 The fourth batch	猪粪+玉米秸秆	28	54	1.35	1.10	57.79
第 5 批 The fifth batch	猪粪	37	42	1.85	1.83	64.89
第 6 批 The sixth batch	猪粪+蒿草	37	25	2.09	1.58	43.72
第 7 批 The seventh batch	猪粪+莲花菜叶	32	44	1.91	1.85	69.52

## 3 结论

通过对户用太阳能恒温沼气生产系统全年的发酵试验数据研究分析, 可以得出以下结论:

- 1) 在西北兰州气象条件下, 利用 30 根管的玻璃真空管太阳能热水器增温的 3 m<sup>3</sup> 沼气池可以维持系统全年稳定运行; 当最低环境温度分别高于 -19.9、0.7 和 6.9 °C 时, 系统可以实现 26、28 和 37 °C 恒温厌氧发酵;
- 2) 当冬季环境温度在 -20~-10 °C 范围内, 即使遭遇连续 3 d 阴天或雪天, 以猪粪为原料的沼气池仍然实现了

(26±1.5)°C 的恒温产气, 稳定期日产沼气 1.2 m<sup>3</sup> 以上; 当环境温度达到 6.9 °C 以上时, 以猪粪或猪粪和蒿草为原料的沼气池实现了 37 °C 的中温产气, 稳定期日产沼气 1.7 m<sup>3</sup> 以上。

3) 当发酵原料的体积比, 猪粪:蒿草(干玉米秸秆):水:接种液为 1:2:2:1 时, 与纯猪粪发酵的批次相比, 混合原料发酵后沼气中甲烷体积分数提升约 8%; 蒿草、莲花菜叶与猪粪混合作为发酵原料时, 能显著缩短厌氧发酵的周期。

4) 发酵容积为 3 m<sup>3</sup> 的太阳能恒温沼气池全年累计产



气398.52 m<sup>3</sup>;在37℃混合原料(猪粪+蒿草)厌氧发酵过程末期,日产气量很难满足用户需求时,向发酵装置中补充0.025 m<sup>3</sup>相同比例的新料,可维持一周内日均产气0.8 m<sup>3</sup>。

### [参 考 文 献]

- [1] 中国产业信息. 2015年中国沼气行业发展概况[EB/OL]. 2015-12-14[2016-01-29]. <http://www.chyxx.com/industry/201512/368621.html>
- [2] 沼气网. 对农村沼气可持续发展的思考[EB/OL]. 2010-3-21[2015-6-12][http://www.zhaoqiweb.com/zhaoqijishu/guoneizhaoqi/a2010321141848\\_1.html](http://www.zhaoqiweb.com/zhaoqijishu/guoneizhaoqi/a2010321141848_1.html).
- [3] 刘树民, 韩靖玉, 岳海军. 中国北方寒冷地区沼气的综合开发利用[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2002(4): 83-86.  
Liu Shumin, Han Jingyu, Yue Haijun. The comprehensive exploitation and utilization of methane in northern cold region of china[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2002(4): 83-86.(in Chinese with English abstract)
- [4] Sander B, Lars J, Van V, et al. Small-scale household biogas digesters: An option for global warming mitigation or a potential climate bomb[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33(2): 736-741.
- [5] Ferrer I, Garfí M, Uggetti E, et al. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(5): 1668-1674.
- [6] Chen Z G, Qin C K, Li Z Q, et al. The transient analysis of a household biogas digester with solar assisted heating system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32: 1139-1143.
- [7] 郭甲生, 秦朝葵, 魏晓峰, 等. 户用太阳能辅助加热沼气池动态传热仿真[J]. 计算机仿真, 2008, 28(1): 360-364.  
Guo Jiasheng, Qin Chaokui, Wei Xiaofeng, et al. Numerical simulation of unsteady heat transfer in solar-assisted heating household biogas digester[J]. Computer Simulation, 2008, 28(1): 360-364.(in Chinese with English abstract)
- [8] 张杨竣, 秦朝葵, 陈志光. 太阳能辅助加热户用沼气池[J]. 城市燃气, 2011(8): 18-23.  
Zhang Yangjun, Qin Chaokui, Chen Zhiguang. Household biogas digester heated by solar-collector[J]. Urban Gas, 2011(8): 18-23. (in Chinese with English abstract)
- [9] Dai Rong, Cun Chang, Xu Zhibin, et al. Application of solar heating system in biogas production[C]//In: D. Yogi Goswami. 45HProceedings of ISES World Congress, Springer Berlin Heidelberg, 2009: 2388-2392.
- [10] 赵国明, 矫云学, 邢向欣. 寒冷地区新型保温节能沼气发酵装置运行试验[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(3): 361-363.  
Zhao Guoming, Jiao Yunxue, Xing Xiangxin. Study on operation test of new energy-saving insulation biogas fermentation system in cold region[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2013, 35(3): 361-363.(in Chinese with English abstract)
- [11] Su Y, Tian R, Yang X H. Research and analysis of solar heating biogas fermentation system[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 1386-1391.
- [12] Tian Y, Lu Y, Lu H, et al. Study of solar heated biogas fermentation system with a phase change thermal storage device [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88: 418-424.
- [13] Axaopoulos P, Panagakis P, Tsavdaris A, et al. Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester [J]. Solar Energy, 2001, 70(2): 155-164.
- [14] El-Mashad H M, van Loon W K P, Zeeman G, et al. Design of a solar thermophilic anaerobic reactor for small farms[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(3): 345-353.
- [15] Eryasar G K A. An application of solar energy storage in the gas: Solar heated biogas plants[J]. Energy Sources, 2007, 29(16): 1513-1520.
- [16] 柏建华. 太阳能加热的恒温沼气池产气性能实验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.  
Bai Jianhua. Experimental Study on Gas Production of Solar Heating Thermostatic Biogas Digester[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.(in Chinese with English abstract)
- [17] 李金平, 单少雄, 董缙. 地上式户用太阳能恒温沼气池产气性能[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 287-291.  
Li Jinping, Shan Shaoxiong, Dong Ti. Characteristic of gas production of over-ground household thermostatic biogas digester heated by solar energy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 287-291.(in Chinese with English abstract)
- [18] 冯荣, 李金平, 李修真, 等. 太阳能加热的地上式户用沼气生产系统热性能分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 196-200.  
Feng Rong, Li Jinping, Li Xiuzhen, et al. Thermal performance of over-ground household biogas production system heated by solar energy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 196-200. (in Chinese with English abstract)
- [19] 姚向君, 田宜水. 生物质能资源清洁转化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 45.
- [20] 周宪龙, 李强, 黄涛, 等. 不同发酵原料对户用沼气产气量的影响[J]. 农学学报, 2012(12): 57-61.  
Zhou Xianlong, Li Qiang, Huang Tao, et al. Effect of different fermenting materials on household biogas production[J]. Journal of Agriculture, 2012(12): 57-61.(in Chinese with English abstract)

## Gas characteristics of household solar biogas production system with constant temperature in whole year

Li Jinping<sup>1,2,3</sup>, Zhen Xiaofei<sup>1,2,3</sup>, Yang Airong<sup>1,2,3</sup>, Huang Juanjuan<sup>1,2,3</sup>, Dong Ti<sup>4</sup>

(1. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

3. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China;

4. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to ensure the annual gas demand of farmers in North China and explore the gas characteristics in the household biogas digester with constant temperature, the 3 m<sup>3</sup> solar constant temperature biogas digester was developed. Stability of the biogas, biogas characteristics under different fermentation temperature and different fermenting materials, annual biogas characteristics, and operation strategy were studied with this system. The batch type experimental research showed that the system could be run steadily and continuously throughout the year. And the annual cumulative production of biogas was 398.52 m<sup>3</sup> under the weather conditions in Lanzhou area. The system could realize constant temperature anaerobic fermentation at 26, 28 and 37 °C when the lowest ambient temperature exceeded -19.9, 0.7 and 6.9 °C, respectively. In addition, the methane volume fraction was improved prominently or the production gas cycle was shortened when the pig manure was mixed with corn straw, wormwood and lotus leaves by a certain mixing proportion. Compared with pig manure fermentation, the volume fraction of methane of biogas produced by mixed material was promoted by about 8% as the volume ratio of raw material pig manure : wormwood : water : inoculums was 1:2:2:1. It could shorten the fermentation period remarkably when the wormwood, lotus and pig mature were taken as fermentation materials. At the end of the fermentation process with the mixed material at 37 °C, the daily biogas production was difficult to meet consumers' demand. And the daily average biogas production could keep 0.8 m<sup>3</sup> in a week if we supplied 0.025 m<sup>3</sup> new material with the same proportion. This experiment can provide reference for the efficient use of renewable energy. Utilizing the mixed materials can regulate the gas production and gas quality, and advices can be adopted for users to use raw materials which come from local resources according to season conditions. Three pails of new materials with same proportion(0.025 m<sup>3</sup>) are needed to replenish for anaerobic fermentation equipment every week, when the stability of gas production is unsure and the daily gas production is hard to satisfy users requirement that is to keep the daily gas production of 0.8 m<sup>3</sup> one week. When the gas consumption increases, the measures that regulate temperature and feed to add the gas production can be adopted to satisfy the biogas utilization demand. The biogas production system with constant temperature operates steadily all the year round. Meanwhile, biogas can completely satisfy the demand of 3-5 people's household cooking and gas in a year. And the biogas digester using pig manure as raw materials can still achieve the gas production with(26±1.5) °C constant temperature and the daily biogas production of over 1.3 m<sup>3</sup>, when the average environmental temperature range is between -23.8 and -5 °C in winter, even encountering 3 successive overcast or snowy weather. The biogas digester using pig manure and wormwood as raw materials can achieve the 37°C gas production and the daily biogas production of over 1.7 m<sup>3</sup>. And when the year-round solar radiation range is 11.7-17.4 MJ/m<sup>2</sup>, the fermentation tank per cubic meter needs 10 glass vacuum tube solar collectors of φ58 mm×1 800 mm.

**Keywords:** fermentation; biogas; straw; household biogas production system with constant temperature; blended stock; gas characteristics