

户用太阳能恒温沼气生产系统批式 半连续发酵产气性能试验

甄箫斐^{1~3}, 李金平^{1~3}, 谢春欣^{1~3}, 康 健^{1~3}, 冯 荣⁴, 关文静^{1~3}

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州 730050; 2. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 兰州 730050;
3. 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; 4. 陕西理工大学陕西省工业自动化重点实验室, 汉中 723000)

摘 要: 在甘肃省民勤县测试户用太阳能恒温沼气生产系统以半连续工艺发酵的产气性能。在当地冬季气象条件下, 产气系统半连续补料厌氧发酵试验结果发现: 该系统采用半连续补料发酵可在冬季最低环境温度为 $-18.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时连续稳定运行。在116 d试验期内, 平均日产沼气 0.95 m^3 , 累计产气 110.71 m^3 ; 当达到最低环境温度时, 系统可实现在 $(27\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内的稳定产气; 批式厌氧发酵过程半连续补料可维持较稳定的甲烷含量, 平均甲烷含量为54.74%; 另外, 该产气系统在基质浓不变的度条件下可通过调节发酵温度, 满足不同时期4~5口人家庭的生活燃气用量的需求。

关键词: 太阳能; 厌氧消化; 农业废弃物; 产气量; 寒冷地区

中图分类号: TK6

文献标识码: A

0 引 言

传统户用沼气池在循环利用农村有机废弃物、满足农民炊事燃气需求、改善农村人居环境等方面发挥了重要作用^[1~4], 但易受环境温度的影响, 产气不稳定、产气速率低、冬季不产气等问题在寒冷地区普遍存在^[5~8], 严重制约了其推广应用。

目前, 众多研究集中在利用清洁能源提高发酵温度以实现发酵装置高效产气方面, 在大中型沼气工程中, 地源热泵^[9]、太阳能-地源热泵^[10]、太阳能-沼液余热式热泵^[11]等可作为热源加热沼气池; 对于小型户用沼气, 主要利用太阳能提高沼气池产气性能, Kocar 等^[12]试验研究用 $2\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的平板太阳集热器加热 280 L 发酵罐的热平衡和产气性能, 在此基础上, 对 5 m^3 反应器的保温层厚度和太阳能加热系统进行优化。李金平等^[13]将传统沼气池分为3部分, 只用太阳能加热发酵部分, 以减少加热体积和沼气池的散热面积。文献^[14]设计一种带有相变储热装置的太阳能沼气生产系统, 储热装置在太阳能集热量不能满足沼气池热需求时释放热量, 研

究表明用 3 m^3 的固体石蜡和 20 m^2 太阳能集热器可在冬天保证每日生产 5 m^3 沼气的热量需求。Weatherford 等^[15]试验研究太阳能辅助加热的管状聚乙烯沼气池在寒冷气候条件下的热性能。这些研究证明太阳能是一种有效的、环境友好的沼气池增温方式。

在实际应用中, 随着发酵过程的进行, 发酵液中可产沼气的底物浓度必然降低, 产气量也随之下降, 因此农村户用沼气池一般以半连续发酵工艺运行^[16], 而且一般户用沼气池未对发酵原料进行升温预处理, 进出料过程必然会打破沼气池的热平衡, 影响产气速率^[17]。国内外关于户用太阳能沼气池以半连续工艺发酵的研究鲜见报道。在前期研究的基础上, 李金平等^[18, 19]研发成功新型地上式户用太阳能恒温沼气池, 研究表明冬季条件下系统可保证恒温沼气池在 $(26\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下运行, 稳定产气阶段平均日产沼气 1.38 m^3 , 但只研究了批式工艺发酵的产气性能, 为此, 本文在甘肃省民勤县一农户家中搭建该系统, 对实际工况下系统以半连续工艺发酵的产气性能进行试验研究。

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(51676094); 国家高技术研究发展(863)计划(2014AA052801); 甘肃省国际科技合作专项(1604WKCA009); 甘肃省自然科学基金项目(1508RJYA097)

通信作者: 李金平(1977—), 男, 博士、教授, 主要从事可再生能源方面的研究。lijinping77@163.com

1 试 验

1.1 试验装置

试验装置包括真空管太阳能热水器、保温室、红泥软体沼气袋、循环水泵、加热盘管、控制器、测试仪器和数据采集仪。试验采用的真空管太阳能热水器集热面积 $3.85\text{m}^{2[20]}$ (40支长1.8 m,可采光长度1.66 m,直径0.058 m的全玻璃真空管),集热面与地面夹角 45° ,储热水箱储水量400 L;保温室为 $1.9\text{ m}\times 1.9\text{ m}\times 2.6\text{ m}$ 的长方体,侧部由外及内为内置7.5 cm厚聚苯板的彩钢板和6 cm厚的挤塑板,底部为12 cm厚的挤塑板,顶部为内置7.5cm厚聚苯板的彩钢板,保温室整体置于水平地面,外用方钢焊接框架固定;红泥软体沼气袋置于保温室内,有效容积 6.4 m^3 ($1.6\text{ m}\times 1.6\text{ m}\times 2.5\text{ m}$),设有进出料口和出气口,工作时下部装料,上部储气;保温室外进料口下沿距沼气袋底部1.2 m,沼气袋最大装料量为 3.0 m^3 ;内径16 mm、外径20 mm的铝塑管与太阳能热水器连接后固定于保温室中部以下的挤塑板上,保温室内盘管总长40 m,保温室外铝塑管外敷厚3 cm的聚乙烯保温材料。图1为系统示意图和实物图,系统的工作原理见文献[19]。

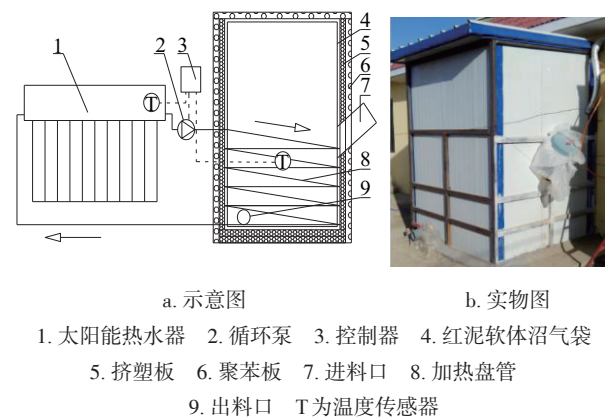


图1 地上式户用太阳能恒温沼气池示意图和实物图

Fig. 1 Schematic diagram and photo of over-ground household biogas production system heated by solar energy

1.2 试验原料

试验原料为该农户家自有羊粪,接种物取自兰州理工大学厌氧发酵实验室。实验室测得所用羊粪的总固体质量分数(TS)为74.4%,挥发性固体质量分数(VS)为52.8%。

1.3 试验过程

于2014年11月底在甘肃省武威市民勤县张麻新村一农户家中建造完成地上式太阳能恒温沼气生产系统,于2014年12月1日至2015年3月26日进行测试,共计116 d。

首次填料时将 0.75 m^3 羊粪、70 L接种液和水箱中热水搅拌均匀后填入沼气池,填料后料液总体积为 1.73 m^3 (根据填料后料液高度计算,下同)。在第23 d再次向沼气池内填入 0.2 m^3 羊粪,填料后料液总体积为 1.85 m^3 。在第47天、第65天和第105天分别出料0.50、1.10和 0.80 m^3 ,同时向沼气池分别填入 0.40 、 0.70 、 0.40 m^3 的羊粪和水,换料后料液总容积分别为 1.90 、 2.10 和 2.20 m^3 。此外,在试验期间农户厕所中粪便也被不定期填入沼气池。

首次填料后料液温度接近 18°C ,开启循环泵加热,为避免升温过快降低产甲烷菌活性,每日升温控制在 2°C ,经过5 d时间料液温度升至预定值 27°C ,之后保持在 $(27\pm 2)^\circ\text{C}$ 的范围。在第65天填料后为增加产气量以应对春节期间农户增长的燃气需求,将发酵温度逐渐升至 30°C 。

1.4 测量参数及仪器

试验期间,每日产气量由G16燃气表测量,气体成分由Gas600便携式沼气分析仪测定,自第4天开始,每天17:00定时手动测量记录。此外,用pT100温度传感器测量沼气池料液温度、环境温度以及储热水箱水温,由Agilent 349702自动扫描并记录,扫描间隔为10 s。测量仪器参数如表1所示。

表1 测量仪器

Table 1 Measuring instruments

测量仪器	生产厂家	量程	精度
G16燃气表	浙江永康新龙仪表有限公司	$0.16\sim 25\text{ m}^3/\text{h}$	1.5%
Gas600便携式沼气分析仪	深圳昂为有限公司	CH_4 为 $0\sim 100\%$, CO_2 为 $0\sim 100\%$, H_2S 为 $0\sim 5\times 10^{-3}$	2%
pT100温度传感器	北京赛亿凌科技有限公司	$-50\sim 100^\circ\text{C}$	$\pm 0.1^\circ\text{C}$

2 结果与分析

2.1 沼气产量及分析

研究批式半连续发酵特性的目的,是为分析不同时期进料其发酵的产气量、部分理化特性,影响因素和有效利用废弃有机物。研究已表明在发酵液中碳、氮、磷元素的含量比例对沼气生产有重要影响,如碳氮比为(20~30):1为较好,碳、氮、磷比例以10.0:0.4:0.8为适宜,发酵菌群会不断将有机碳素转化为 CH_4 和 CO_2 ,同时将一部分碳素和氮素合成成为细胞物质,多余的氮素则会被分解成以 NH_4HCO_3 形式溶于发酵液中,每分解一轮,碳氮流失一次^[21]。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。

太阳能恒温沼气生产系统日产气量和累计产气量随时间变化的曲线如图2所示。由图2可看出试验前期沼气日产气量极低,直至第20天日产气量才达到 0.50 m^3 以上,这主要是由于第一次填料时接种液较少,在启动阶段产甲烷菌量不足所致,从接种到正常产气需要一个生长繁殖过程。第23天的填料未对产气量造成明显的影响,其原因主要是产甲烷菌生长速度慢,产酸菌生长快,因此在发酵初期产酸菌产生了大量的酸不能及时被产甲烷菌利用而造成了酸积累,致使抑制了产甲烷菌的生长而不能正常产气;随着发酵过程的进行,日产气量逐渐升高,然后下降,换料后再次上升,后3次换料后日产气量恢复至 1.0 m^3 所用的时间分别为5、2和4 d,且在第35天第56天、第74天和第112天分别出现4个产气高峰点,对应日产气量分别为 1.0 m^3 。随着基质浓度的升高,发酵环境能在较高的状态下达到动态平衡,产气量达到峰值。

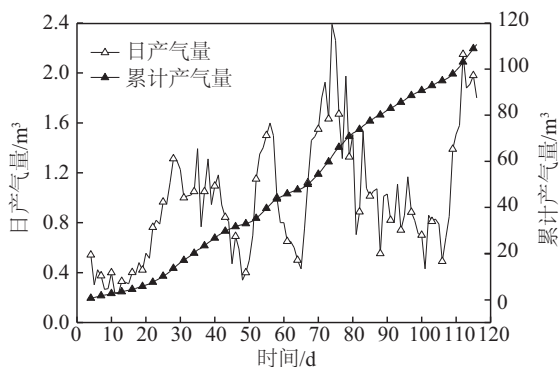


图2 沼气日产量和累计产量

Fig. 2 Daily and cumulative biogas production

在整个试验发酵期内,第35天出现第1个产气高峰 1.39 m^3 ,而后下降,从第42天开始日产气量持续低于 1.0 m^3 。在第47天换料后日产气量回升,第56天出现第2个产气高峰 1.60 m^3 。之后日产气量下降,在第64天降至 0.5 m^3 ,于次日换料后,在第67天即恢复至 1.12 m^3 ,在第74天达到第3个产气峰值,当天的产气量为 2.39 m^3 ,之后缓慢下降,从第97天开始持续低于 1.0 m^3 。在第105天换料后日产气量再次回升,在第112天出现第4个产气高峰 2.15 m^3 。发酵过程中出现4个产气高峰的原因是因为随着基质浓度的升高,在厌氧消化过程中由于某一时刻挥发性脂肪酸(VFA)供大于求,导致酸短暂性积累产生部分抑制,产气性下降,随着挥发性脂肪酸(VFA)不断被消耗以及不同的一碳化合物被甲烷菌群利用使产气能力恢复,产气量升高。由于厌氧消化过程中不能保证酸化阶段产有机酸速率与甲烷菌群利用速率保持一致,因此会产生上下起伏的现象^[22]。

试验人员从第20天开始将沼气作为炊事燃料,至第65天期间,使用人员为两名试验人员及户主,地上式太阳能恒温沼气生产系统累积产沼气 42.36 m^3 ,平均日产沼气 0.95 m^3 ,完全可满足使用人员的炊事所需。从第66天至第96天(农历正月十六),太阳能恒温沼气池累积产沼气 39.60 m^3 ,平均日产沼气 1.28 m^3 ,满足了春节期间该农户一家4口人和1名试验人员的炊事需求。在试验期间,太阳能恒温沼气生产系统累计产气量为 110.71 m^3 。

2.2 气体成分及分析

沼气的主要成分是 CH_4 、 CO_2 和 H_2S 等,而 CH_4 含量的高低决定了沼气的品质。图3为 CH_4 含量和 CO_2 含量变化曲线。试验初期, CH_4 体积分数和 CO_2 体积分数均较低,说明此阶段沼气的含有大量的杂质气体,但在这段时间(0~25 d) CH_4 含量一直在上升,该阶段主要是发酵底物的水解酸化过程,酸化细菌和产乙酸菌作用,生成的气体成分主要为 CO_2 。这一过程随着发酵的进行逐渐减弱甲烷菌逐渐起主要作用。 CH_4 体积分数在第25天达到66.0%,至第47天换料前基本维持在60%以上。换料后 CH_4 体积分数在第50天达到测试期峰值70.6%,之后出现较大幅度波动,在第53天降低至51.0%,之后随着发酵末期有机物消耗殆尽, CH_4

体积分数曲线斜率变大,厌氧发酵的稳定性被打破, CH_4 含量已无法满足燃烧需求由于第 65 天换料量较大,原料带入大量空气,换料当天 CH_4 体积分数和 CO_2 体积分数均大幅下降,之后 CH_4 体积分数稳定回升。第 105 天换料后 CH_4 体积分数和 CO_2 体积分数均出现了较大幅度波动。测试期 CH_4 累积产量 60.6 m^3 ,平均 CH_4 含量为 54.74%。

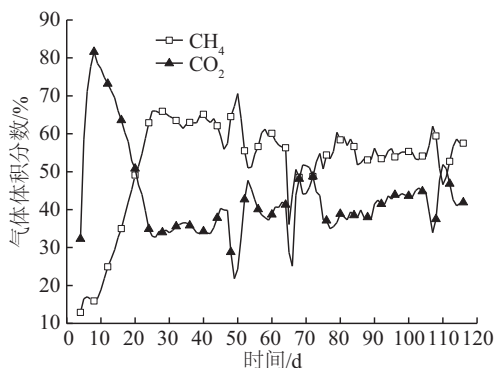
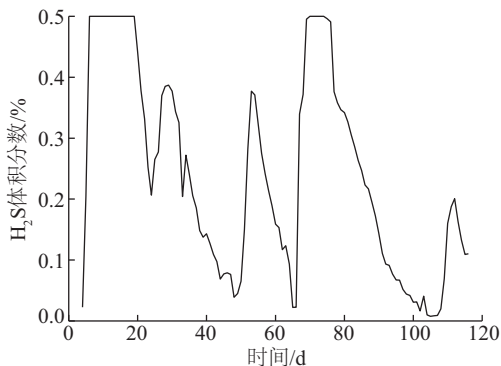
图3 CH_4 和 CO_2 含量Fig. 3 Content of CO_2 and CH_4

图 4 为 H_2S 体积分数的变化曲线,可看到每次换料后由于蛋白质等大分子含硫物质经过初期的水解酸化后分解出 H_2S , H_2S 体积分数均有明显上升,尤其是第 1 次和第 4 次,由于沼气分析仪测量 H_2S 的量程是 0~0.5%,在第 6~19 天和第 70~74 天, H_2S 的体积分数超过量程(图中以 0.5% 表示),其他几次由于换料量相对较少,换料后升幅较小。随着发酵时间的延长,有机物分解越完全,所产沼气中 CH_4 和 CO_2 含量越来越多, H_2S 的体积分数下降。每次进料后,随着料液浓度的增大,所产沼气中 H_2S 的含量就会有所上升,其原因有可能是高浓度的发酵液在发酵过程中更易产生较多的硫醇、吡啶和 H_2S 。

图4 H_2S 含量Fig. 4 Content of H_2S

2.3 环境温度、料液温度和储热水箱水温

图 5 是环境温度、料液温度和储热水箱水温的逐时变化曲线。试验期间,最低环境温度为 -18.2°C ,前 73 天日平均环境温度均在 0°C 以下,最低为 -8.6°C 。沼气池料液温度从最初的 18°C 升至 27°C 后保持在 $27\pm 2^\circ\text{C}$ 的范围内,而在每次换料后均出现不同程度的下降,第 23 天换料时只填入少量羊粪,料液温度最低降至 16.1°C ,经过 2 d 时间回升至 27°C ;而第 47 天换料时使用的热水较少,料液温度最低降至 10.5°C ,经过约 4 d 时间回升至 27°C ;第 65 天换料时使用的热水较多,料液温度最低降至 23.7°C ,经过不足 1 d 时间料液温度即升至 27°C ;第 105 天重新填料时未使用热水,料液温度最低降至 6.0°C ,经过约 2.5 d 回升至 27°C 。此外,太阳能热水器储热水箱水温一直高于料液温度,保证了太阳能热水器可持续为沼气池提供热量。

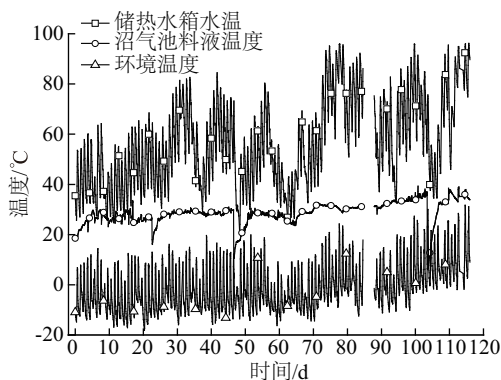


图5 储热水箱、料液和环境逐时温度

Fig. 5 Hourly temperature of solar hot water, fermentation and ambient

3 讨 论

本系统在运行稳定后先后以 27°C 和 30°C 发酵运行,以 27°C 发酵温度运行时日均产气量为 0.95 m^3 。以 30°C 发酵时日均产气量为 1.28 m^3 ,可看到在中温发酵范围内,随着发酵温度的升高,产气量增加。此外,随着发酵过程的进行,料液中可产沼气的底物浓度必然降低,产气量随之下降,农村户用沼气池一般以半连续发酵工艺运行;系统以半连续工艺发酵的过程中,要保证产甲烷过程的顺利进行,必须间隔一段时间进行补料,可适当补充青草、作物稿秆等 C/N 较大的原料,特别发酵前期补料每

次补料量不宜太多,以避免补料后的第1、第2天 CH_4 含量下降过快,以至影响农户对生活燃气的使用;同时一般户用沼气池未对发酵原料进行升温预处理,进出料过程必然会打破沼气池的热平衡,影响产气速率。对比试验数据可以发现,每次换料后料液温度均出现不同程度的下降,最低分别降至16.1、10.5、23.7和6.0℃,料液温度回升至27℃所用时间分别约为2、4、1和2.5d,后3次换料后日产气量回升至1.0 m^3 以上所用的时间分别为5、2和4d,太阳能恒温沼气池单元以半连续进出料方式运行时,换料后料液温度回升时间越短,产气量回升速度越快。在第65天换料时将储热水箱中的大部分热水与羊粪混合后填入沼气池,使得料液温度降幅最小,升温最快。太阳能热水器由于补水,储热水箱水温在换料后较低,但依然高于料液温度,可保证向沼气池提供热量。

本太阳能恒温沼气生产系统稳定运行时以禽畜粪便和农作物秸秆为混合原料,系统在稳定消化期内2 m^3 物料的日均产气量为0.95 m^3 。系统中燃煤炉效率为35%^[23],沼气灶热效率为75%^[24],沼气热值取其平均值为22.94 MJ/m^3 ,标准煤热值为29.30 MJ/kg ^[25]。在炊事用能时每方沼气的量换算为标煤相当于1.68 kg 。

$$\text{替代燃料量} = \frac{\text{沼气的热值} \times \text{沼气的燃烧效率}}{\text{替代燃料的热值} \times \text{替代燃料的燃烧效率}} \quad (1)$$

该户用地上式恒温沼气生产系统采用批式半连续发酵工艺时可全年连续稳定生产沼气,每年满足用户的炊事燃气需求节约标准煤582.54 kg 。

4 结 论

通过对户用太阳能恒温沼气生产系统冬季实际工况下的批式半连续发酵试验数据研究分析,可以得出以下结论:

1)系统以27℃发酵温度运行时日均产气量为0.95 m^3 ,以30℃恒温发酵时日均产气量为1.28 m^3 ;系统以半连续进出料方式运行时,换料后料液温度回升的时间越短,产气量回升速度越快,当最低环境温度为-18.2℃时,系统仍可实现(27±2)℃的范围内的连续稳定产气。

2)和批式恒温厌氧发酵相比,系统采用半连续工艺发酵时,在补料前产气量衰减和补料后基本恢

复原产气量这段时间内,日产气效率虽略有降低趋势,但产甲烷菌较稳定,即 CH_4 百分含量和日产 CH_4 效率较稳定,仍可持续满足一家4~5口人生活燃气用量需求。

[参考文献]

- [1] Christiaensen L, Heltberg R. Greening China's rural energy: New insights on the potential of smallholder biogas[R]. WPS6102, 2012.
- [2] Ding Wenguang, Niu Hewen, Chen Jinsong, et al. Influence of household biogas digester use on household energy consumption in a semi-arid rural region of Northwest China[J]. Applied Energy, 2012, 97: 16—23.
- [3] Rajendran K, Aslanzadeh S, Taherzadeh M J. Household biogas digesters—A review[J]. Energies, 2012, 5(8): 2911—2942.
- [4] 沈连峰,王 谦,轩 轶,等.户用沼气池建设的节能减排和农民增收效果[J].农业工程学报,2009,25(10): 220—225.
- [4] Shen Lianfeng, Wang Qian, Xuan Zhan, et al. Effects of household biogas pond construction on energy-saving, emission-reducing and increase in farmers' income[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2009, 25(10): 220—225.
- [5] Bruun S, Jensen L J, Khanh Vu V T K, 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.
- [6] Ferrer I, Garfi 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.
- [7] 王艳芹,刘 英,姚 利,等.不同措施对北方地区冬季户用沼气池料液温度及产气量的影响[J].中国沼气,2010,28(5): 31—34.
- [7] Wang Yanqin, Liu Ying, Yao Li, et al. Effect of different heat preservation measures on digester temperature and gas production in northern winter[J]. China Biogas, 2010, 28(5): 31—34.
- [8] Kashyap D R, Dadhich K S, Sharma S K. Biomethanation under psychrophilic conditions: A review [J]. Bioresource Technology, 2003, 87(2): 147—153.
- [9] 石惠娴,王 韬,朱洪光,等.地源热泵式沼气池加

- 温系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 268—273.
- [9] Shi Huixian, Wang Tao, Zhu Hongguang, et al. Heating system of biogas digester by ground-source heat pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 268—273.
- [10] 裴晓梅, 张 迪, 石惠娴, 等. 太阳能-地源热泵沼气池加热系统集成热面积优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 122—128.
- [10] Pei Xiaomei, Zhang Di, Shi Huixian, et al. Collector area optimization of integrated solar and ground source heat pump system for heating biogas digester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 122—128.
- [11] 裴晓梅, 石惠娴, 朱洪光, 等. 太阳能-沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(2): 292—296.
- [11] Pei Xiaomei, Shi Huixian, Zhu Hongguang, et al. Heating system of high temperature biogas digester by solar energy and methane liquid heat recovery heat pump [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(2): 292—296.
- [12] Kocar G, Eryasar A. An application of solar energy storage in the gas: Solar heated biogas plants [J]. Energy Sources, Part A, 2007, 29(16): 1513—1520.
- [13] Li Jinyang, Li Jian, Liu Qingyu, et al. Design of the solar energy-heated biogas digester[J]. Advanced Materials Research, 2014, 953: 103—106.
- [14] Lu Yong, Tian Ye, Lu Haowei, et al. Study of solar heated biogas fermentation system with a phase changethermal storage device[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng. 2014.12. 065.
- [15] Weatherford V C, Zhai Zhiqiang. Affordable solar-assisted biogas digesters for cold climates: Experiment, model, verification and analysis [J]. Applied Energy, 2015, 146: 209—216.
- [16] 牛晓庆, 郑 莹, 王汉林. 固体废物处理与处置[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 188.
- [17] 罗 涛, 梅自力, 龙 涛. 进料对沼气发酵温度场和产气的影响分析[J]. 中国沼气, 2015, 33(1): 3—6.
- [17] Luo Tao, Mei Zili, Long Tao. Effect of feeding on temperature contour and biogas production [J]. China Biogas, 2015, 33(1): 3—6.
- [18] 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.
- [18] 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, 2015, 31(5): 287—291.
- [19] 李金平, 甄箫斐, 杨霁蓉, 等. 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—2245.
- [19] Li Jinping, Zhen Xiaofei, Yang Airong, et al. Experiment on gas characteristics of household solar biogas production system with constant temperature in whole year [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 220—225.
- [20] GB/T 4271—2007, 太阳集热器热性能试验方法[S].
- [21] 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.
- [22] 任海伟, 姚兴泉, 李金平, 等. 玉米秸秆储存方式对其与牛粪混合厌氧消化特性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 213—222
- [22] Ren Haiwei, Yao Xingquan, Li Jinping, et al. Effect of maize straw storage practice on biogas production performance during anaerobic co-digestion with cattle manure [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 213—222.
- [23] 王庆一. 能源辞典[M]. 北京: 中国石化出版社, 2005.
- [24] 李金平, 马思聪, 刁荣丹, 等. 新型农村绿色建筑的构建与能耗分析[J]. 中国沼气, 2012, 30(6): 28—32.
- [24] Li Jinping, Ma Sicong, Diao Rongdan, et al. Construction and energy consumption analysis of a new rural green building [J]. China Biogas, 2012, 30(6): 28—32.
- [25] 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.
- [25] Bai Jianhua. The research on performance of biogas production reactor heated by solar energy [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.

EXPERIMENT ON GAS PRODUCTION PERFORMANCE OF FERMENTATION WITH BATCH AND SEMI-CONTINUOUS OF HOUSEHOLD THERMOSTATIC BIOGAS PRODUCTION SYSTEM HEATED BY SOLAR ENERGY

Zhen Xiaofei¹⁻³, Li Jinping¹⁻³, Xie Chunxin¹⁻³, Kang Jian¹⁻³, Feng Rong⁴, Guan Wenjing¹⁻³

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

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

3. Key Laboratory of Energy Supply System Driven By Biomass Energy and Solar Energy of Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

4. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: Household thermostatic biogas production system heated by solar energy solves the problem of low gas production in the traditional biogas digesters in winter. However, there is no discussion about the continuous high efficiency of the batches of the batch fermentation in winter. The over-ground household energy thermostat biogas production system heated by solar energy was built in Zhangma village, Minqin county, Gansu province. The gas production performance of semi-continuous fermentation was studied under the actual operating conditions in winter. Under the meteorological conditions of Minqin, the semi-continuous fed-batch anaerobic fermentation experiment results show that the solar thermostatic biogas production system can continuously and stably run in winter, and can maintain high daily gas production for a long time, the average daily biogas production was 0.95 m³ and the cumulative gas production was 110.71 m³ during the whole experimental period. When the minimum temperature is -18.2 °C, the system can still achieve constant temperature anaerobic fermentation in the range of (27±2)°C; Achieving the semi-continuous fed-batch in the batch anaerobic fermentation process can maintain the stable methane content for a long time, the cumulative production of methane is 60.6 m³ and the average methane content is 54.74% during the 116 day testing period. The system can regulate the fermentation temperature to meet the gas demand of a family of 4-5 people in different periods during a year.

Keywords: solar energy; anaerobic digestion; agricultural wastes; biogas yield; cold regions