

文章编号:0254-0096(2018)08-2081-07

相变蓄热式太阳能秸秆沼气系统的热性能研究

王思雨, 陆勇, 鹿浩伟, 汪楚乔, 段文军, 邱嘉明

(东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

摘要: 在项目示范基地安徽和县的太阳能秸秆沼气系统热性能实验结果表明:为保证长江中下游农村冬季稳定的中温发酵状态,需要利用太阳集热器与光伏发电相结合的太阳能光热、光伏联合应用技术;在冬季日平均环境温度为4.7℃的条件下系统稳定运行时,石蜡大部分时间均处于相变状态,相变蓄热水箱内部水温维持近似恒定且不低于55℃,达到稳定蓄热效果,可满足产气罐在冬季的中温发酵热负荷需求;冬季太阳能秸秆沼气系统热利用效率为42.3%,且仍有进一步提高的空间。

关键词: 太阳能; 沼气; 秸秆; 相变蓄热; 热性能; 中温发酵

中图分类号: TK512*.4

文献标识码: A

0 引言

一般来说,沼气发酵的产气率随温度(10~60℃)的升高而增大^[1,2]。迄今,大多数厌氧发酵系统都在中温(30~40℃)范围内运行,厌氧消化效率在35℃附近达到峰值^[3,4]。同时,温度的急剧变化和上下波动会影响产甲烷菌群的生长代谢过程,沼气产量明显下降,波动幅度过大时,甚至会停止产气^[5]。目前我国常用的户用沼气池大多靠自然温度发酵,发酵温度随环境变化,故其发酵效率、产气量均不稳定,且在冬季由于发酵温度低而不产气或产气量很小,已成为制约沼气技术推广的瓶颈。

针对这一问题,国内外许多学者提出太阳能沼气联合应用的解决方式,并进行了大量研究。张铎等^[6]研究用于沼气发酵系统的聚光型太阳能加热装置,以解决寒冷地区沼气工程冬季加热保温问题。Kocar等^[7]研究了土耳其2座不同城市,3种不同气候地区下,对一个5m³的沼气发酵池是否运用太阳能供热的区别。结果表明,使用太阳能供热系统后,为反应器加热的沼气消耗量减少了约19%,这也意味沼气产气潜力得到提升。Yiannopoulos等^[8]设计了一种采用夹套换热的太阳能加热沼气罐,研究稳定运行阶段沼气罐中的温度分布,验证太阳能沼气联合应用的可行性。Abid等^[9]建

立一个小型的太阳能加热产沼气装置,对于有太阳辐射下的泥浆温度与周围环境温度的关系进行实验研究。

当前对于太阳能沼气系统的研究多集中于太阳能辅助供热系统设计及产气性能的研究,专门针对秸秆厌氧发酵的太阳能加热制沼研究相对较少。本文提出适用于长江中下游农村地区的相变蓄热式太阳能秸秆沼气系统,能有效利用该地区丰富的秸秆资源,使冬季可高效稳定地产沼气。

1 实验装置

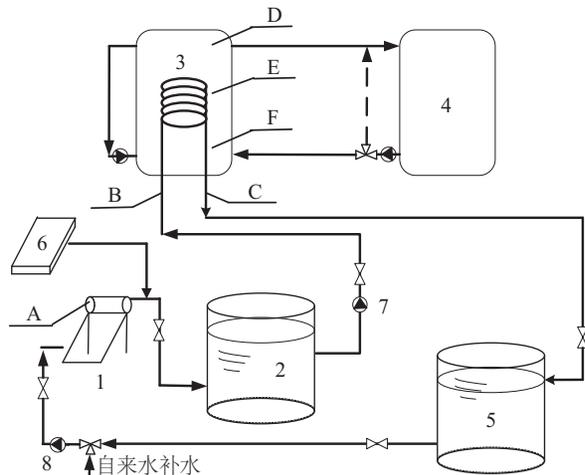
由于课题实验台是在两相式秸秆厌氧发酵装置基础上构建的,所以图1为针对两相式厌氧发酵技术的太阳能秸秆沼气系统工作原理及实验测点布置,相变蓄热水箱平面结构图及测点布置则如图2所示。本文提出的太阳能秸秆沼气系统的工作原理是:采用一种基于太阳集热器与光伏发电装置相结合的太阳能光热、光伏联合应用技术,通过太阳集热器获取热水,若集热水温未达到所设定的目标温度,再使用光伏发电装置提升集热水温。所得热水进入相变蓄热水箱储存,利用石蜡作为相变材料在固-液态交替转变时蓄存或释放潜热,并且利用石蜡相变期间温度稳定的特性,保证内部水温不低于石蜡的熔点温度。当产气罐需要供热时,再由相变

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 科技部国家科技支撑计划(2013BAJ10B12)

通信作者: 陆勇(1969—),男,博士、副研究员,主要从事太阳能蓄热技术、多相流测试技术等方面的研究。luyong@seu.edu.cn

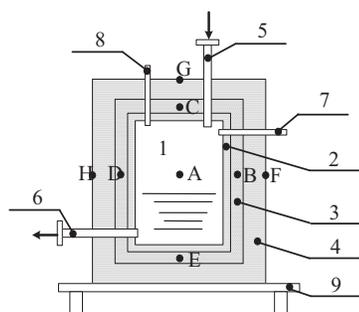
蓄热水箱向产气罐供热,从而使其保持在中温发酵的状态,满足两相式秸秆沼气装置冬季高效厌氧发酵用热需求。从产气罐中进行换热后的热水将流入中温水箱中进行保温,并能再进入太阳集热器中进行循环利用。



1. 太阳集热器 2. 相变蓄热水箱 3. 产气罐 4. 淋溶式水解酸化罐
5. 中温水箱 6. 光伏发电装置 7. 温控供水泵 8. 水泵
A. 集热水温测点 B. 加热盘管进水水温测点
C. 加热盘管出水水温测点 D. 产气罐上层料液温度测点
E. 产气罐中层料液温度测点 F. 产气罐底层料液温度测点

图1 太阳能秸秆沼气系统工作原理及测点布置

Fig. 1 Schematic diagram and monitoring points of solar heated straw biogas fermentation system



1. 水箱 2. 聚氨酯 3. 石蜡 4. 聚氨酯 5. 进水口
6. 出水口 7. 溢流口 8. 排气口 9. 底座
A. 水温测点 B~E. 石蜡温度测点 F~H. 壁面温度测点

图2 相变蓄热水箱平面结构图及测点布置

Fig. 2 Plane structure and monitoring points of phase change heat storage water

实验台包括集热子系统(包括2台全玻璃真空管太阳集热器。每台集热面积 3.95 m^2 ,集热水箱容积 215 L),蓄热子系统(包括相变蓄热水箱、中温水

箱,相变蓄热水箱整体呈圆柱形,内部水箱的体积为 0.95 m^3 ,尺寸为直径 900 mm ,高 1500 mm ,内层聚氨酯、石蜡层、外层聚氨酯厚度分别为 50 、 30 、 200 mm ;中温水箱整体也呈圆柱形,内部水箱的尺寸为直径 900 mm ,高 750 mm ,体积为 0.48 m^3 ,外部使用厚度为 200 mm 的聚氨酯层保温),供热子系统(包括产气罐内部加热盘管及温控水泵,加热盘管为螺旋钢管,安装在产气罐内部,管外径 18 mm ,长度 6.7 m)。控制子系统(包括石蜡温控装置、产气罐温控装置,图中未画出,分别用于控制石蜡温度以及产气罐发酵料液温度)以及发酵装置(包括产酸罐、产气罐,产酸罐及产气罐的有效容积均为 0.8 m^3 ,外部均使用厚度为 100 mm 的聚氨酯层保温)。由于实验条件所限,暂时使用市电代替光伏发电装置,并记录每日耗电量。

2 实验方法

2.1 系统热性能实验测量方案

本文需测量的物理参数有:①集热子系统:集热水温;②蓄热子系统:相变蓄热水箱水温,石蜡层温度,外壁面温度等;③供热子系统:加热盘管的进、出水温;④其他:太阳辐射强度、产气罐发酵料液温度、环境温度、耗电量等。

集热子系统、供热子系统以及产气罐的测量参数已示于图1中。其中,产气罐内分别在上、中、下层设置D、E、F共3个测温点,三者的平均温度代表产气罐料液温度。加热盘管的进、出水温测点均设置在靠近产气罐侧。如图2所示,相变蓄热水箱设置8个测温点,其中A为水温测点,B~E为石蜡测温点,分别置于侧面、上层、下层石蜡层的中间,F~H为外壁面温度测点,分别置于侧面及上部。

测量仪表主要包括SH-X型多回路温度测试仪、太阳辐射仪及电度表。其中SH-X型多回路温度测试仪用于测量温度类数据,测量范围 $-100\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度 $\pm(\text{读数}\times 0.5\%+1)\text{ }^{\circ}\text{C}$;太阳辐射仪用于测量太阳辐射强度,测量范围 $1\sim 2000\text{ W/m}^2$,测量精度 $\pm 10\text{ W/m}^2$;电度表测量范围 $0\sim 99999.9\text{ kWh}$,测量精度 $\pm 1.5\%$ 。

2.2 实验操作模式

具体实验地点为示范项目所在地——安徽和县姥桥镇姥长中心村村委会旁,位于安徽省东部,

长江中下游西岸。太阳能秸秆沼气系统运行实验2016年12月29日开始,1月22日结束,共25 d。其中,12月29日~1月2日为产酸阶段,1月3~22日为太阳能秸秆沼气系统供热周期,产酸罐和产气罐连通,开始产气过程。整个实验过程,通过自动温控装置,保持太阳能秸秆沼气系统中产气罐在中温发酵状态,系统初始工作时,相变蓄热水箱、产气罐等装置已运行至稳定工作的状态。具体实验操作模式如下:

1) 配制发酵料液: 发酵原料为秸秆、鸭粪及餐厨组成,总干物质量为48 kg,并保证三者挥发性有机质质量比为2:1:1。放入产酸罐,每日搅拌8次,产酸周期5 d。

2) 每日08:00~16:00,来自中温水箱的水在全玻璃真空管集热器中进行集热。同时,在08:00~16:00间开启石蜡温度控制装置,设定温度控制范围为54~56℃,当石蜡温度低于设定下限,石蜡温控装置开始加热,当石蜡温度高于设定上限,石蜡温控装置停止工作。

3) 实验中,集热水温的目标温度设定为58℃。若当日太阳能辐射量不足,截至16:00时太阳集热器集热水温在45~58℃之间,则使用电能加热至58℃;若集热水温低于45℃,则暂停使用集热子系统。

4) 产气罐通过温控装置,控制在稳定的中温发酵状态,最佳控制温度为35℃。若相变蓄热水箱内部热水不足,则适当降低发酵温度。

3 结果与讨论

3.1 集热子系统热性能分析

和县属于夏热冬冷地区,冬季的环境温度与太阳辐射量均为一年中最低的时期,故只要满足冬季太阳能秸秆沼气系统的中温发酵需求,便可认为满足全年的中温发酵需求。本文结合和县冬季历史气象数据及太阳集热器热性能分析和县冬季集热量变化。

3.1.1 太阳集热器日平均效率

选取太阳能秸秆沼气系统连续运行实验中,2016年1月14日的太阳集热实验作为典型工况,当日太阳总辐射量为9.35 MJ/m²,平均环境温度为4.7℃,与和县冬季平均气象工况,即平均日辐射量

为9.2 MJ/m²,平均环境温度为5.5℃相近,其中气象资料来源于《中国气象辐射资料年册》。当日集热水温、环境温度及太阳辐射强度变化如图3所示。

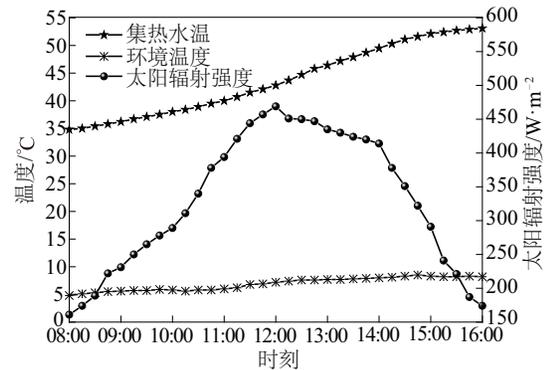


图3 集热水温、环境温度及太阳辐射强度变化特性

Fig. 3 Variation characteristics of collection hot water temperature, ambient temperature and solar radiation intensity

从图3可发现:1)08:00时来自中温水箱的水进入太阳集热器,由于中温水箱的保温作用,集热水温的初始温度为34.8℃,之后集热水温逐渐升高,16:00时集热水温达到53.2℃。2)太阳辐射强度从08:00开始逐渐升高,至12:00前后达到最大值,此时集热水温的上升速率也最大;13:00后随着太阳辐射强度的减弱,集热水温的上升速率也随之减小;15:00后集热水温基本维持恒定,不再有明显的温度增长趋势。

为了更好地描述太阳集热器的实际工作效率,实际应用中常使用在有太阳辐射的一定时间内,太阳集热器集热水箱所获得的热热水内能与太阳集热器采光面上的太阳辐射能量之比,即太阳集热器的日平均效率来表征太阳集热器的性能,如式(1)所示。

$$\eta = \frac{\sum c_w \rho_w V \Delta T_j}{\sum A I_j t_j} \quad (1)$$

式中, η ——太阳集热器的日平均效率; c_w ——水的比热容,取4200 J/(kg·K); ρ_w ——水的密度,取1000 kg/m³;V——集热水箱体积,0.215 m³; ΔT_j ——第j次测量时间段集热水箱水温的变化值,℃;A——太阳集热器的集热面积,3.95 m²;I_j——第j次测量时间段太阳辐射强度的平均值,W/m²;t_j——第j次测量的时间段,s。

将图 3 中 08:00~16:00 的集热水箱实际蓄热量除以这期间太阳集热器采光面上的累计太阳辐射量,得到日平均热效率为 48.9%。

3.1.2 集热水箱对环境的热损

太阳能秸秆沼气系统所用的集热量是来自集热水箱内部的热。本文测量了在无太阳辐射的条件下集热水箱内水温与环境温度的变化,以得到散热热损与内外温差的关系。

规定单位时间间隔内的集热水箱内外温差为:

$$\Delta T_i = \frac{T_{w,i+1} + T_{w,i}}{2} - \frac{T_{e,i+1} + T_{e,i}}{2} \quad (2)$$

式中, ΔT_i ——第 i 次单位时间间隔内集热水箱内外温差, $^{\circ}\text{C}$; $T_{w,i}$ ——第 i 次读数时集热水箱内水温, $^{\circ}\text{C}$; $T_{e,i}$ ——第 i 次读数时环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

单位时间间隔内的集热水箱散热热损为:

$$Q_{j,i} = \frac{c_w \rho_w V_j (T_{w,i+1} - T_{w,i})}{\Delta t} \quad (3)$$

式中, $Q_{j,i}$ ——第 i 次单位时间间隔内集热水箱对环境的散热热损, W ; Δt ——单位时间间隔, s 。

实验步骤为:①在日落后无太阳辐射的条件下进行;②当集热水温与环境温度的差值在 40~60 $^{\circ}\text{C}$ 时开始记录数据,原则上,测量时间间隔越短,越能反映散热热损随时间的变化,但考虑到过短的时间间隔难以引起集热水箱水温测量值上的变化,本文选定 15 min 作为测量数据的时间间隔;③根据式(2)和式(3)计算整理,得到集热水箱内外温差与散热热损的关系。

选取 2016 年 3 月份不定期测量的实验数据计算整理,如图 4 所示。

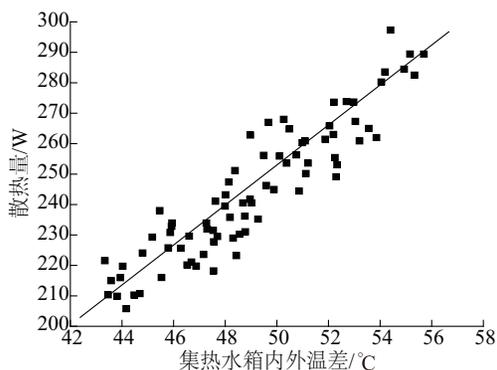


图 4 集热水箱散热热损与内外温差的关系

Fig. 4 Temperature difference dependence of storage tank's thermal losses

从图 4 可知,集热水箱对环境的热损与集热水箱内外温差总体成正相关。相近的温差所对应的散热热损较集中,之所以并不完全一致是由在不同的测量时间内,外界空气的风速、测量仪器的误差等因素综合所致。为了之后根据和县历史气象数据计算集热水箱热损更加方便,本文拟合了主要适用于集热水箱内外温差为 42~58 $^{\circ}\text{C}$ 之间的集热水箱散热热损表达式,与实际测量值的误差保持在 20 W 以内,如式(4)所示。

$$Q_j = 4.83 \Delta T \quad (4)$$

式中, Q_j ——集热水箱对环境的散热热损, W ; ΔT ——集热水箱水温与环境温度之差, $^{\circ}\text{C}$ 。

3.1.3 和县冬季集热量

由于产气罐的最佳控制温度为 35 $^{\circ}\text{C}$,为了更有效率地与产气罐进行换热,将集热温度设定为不低于 55 $^{\circ}\text{C}$ 。这里考虑到产气罐内加热盘管的出水水温不会低于产气罐的控制温度,将集热水温的初温设为 35 $^{\circ}\text{C}$ 。根据和县冬季日平均温度变化,可得将集热水温升至 55 $^{\circ}\text{C}$ 所需的热量 E_t 为:

$$E_t = E_w + E_j \quad (5)$$

式中, E_w ——集热水箱内部热水内能变化, J ; E_j ——集热过程中对环境的热损, J 。其中,集热水箱内部热水的内能变化为固定值,集热水箱蓄满时水的质量为 215 kg,故集热水箱内部热水内能变化 E_w 为固定值,即 18060 kJ。

计算集热过程中集热水箱对环境的热损时,由于集热水温受太阳辐射强度、环境温度等因素影响,并非均匀变化,这里考虑最不利因素,即保持最大温差的情况,计算时将集热水温设为 55 $^{\circ}\text{C}$,和县地区冬季日平均最低温度 -0.6 $^{\circ}\text{C}$,最高 11.9 $^{\circ}\text{C}$ 。集热水温与环境温度的温差范围为 43.1~55.6 $^{\circ}\text{C}$,符合式(4)应用的温差范围。考虑到和县地区冬季的昼长较短,每日集热时间设为 10 h,则每日集热过程中对环境的热损为:

$$E_j = 4.83 \times (55 - T_e) \times 10 \times 3600 \quad (6)$$

由此,可得到和县冬季每日理论集热所需的热负荷 E_t ,由 3.1.1 节可知,太阳集热器日平均热效率为 48.9%,可将其与每日的实际集热量相比较,如图 5 所示。

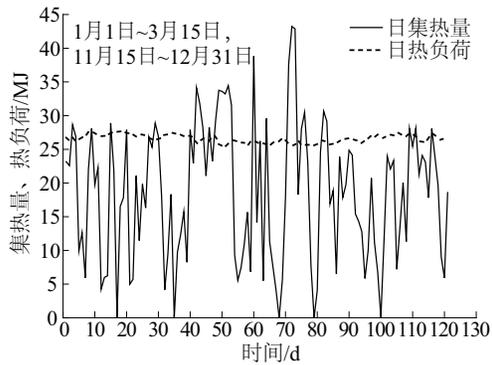


图5 和县冬季太阳集热器日集热量与日热负荷变化

Fig. 5 Variation characteristics of solar collector's collected heat amount and heat load per day in winter located in Hexian

本文提出的太阳能秸秆沼气系统要求集热水温不低于 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而由图 5 知, 和县冬季由于太阳辐射能较为贫乏, 环境温度较低, 只有少数时间的实际集热量高于所需热负荷。故如何保证冬季时期稳定的中温发酵状态, 是解决该地区太阳能秸秆沼气系统稳定运行的关键。由此, 笔者提出利用太阳集热器与光伏发电装置相结合的太阳能光热、光伏联合应用技术, 若集热水温未达到目标温度, 再使用光伏发电装置提升热水的温度, 并使用中温水箱储存经产气罐加热后的热水内能, 以保证冬季稳定高效地产气。

3.2 系统运行热性能分析

由上文可知, 2016 年 1 月 14 日的气象工况与和县冬季平均气象数据相近, 故选取当日的系统运行实验数据进行分析, 以代表和县冬季的平均运行工况。其中, 当日太阳集热器热性能参见 3.1.1 节所述, 下面主要讨论相变蓄热水箱及供热子系统的热性能。

相变蓄热水箱的运行热性能数据见图 6。从图 6 可发现, 相变蓄热水箱中的水温以及石蜡温度均保持较为恒定的状态。其中, 内部水温始终略高于石蜡温度, 这是由于水箱与石蜡层之间存在 50 mm 厚的聚氨酯层, 从而使两者形成从内到外的一定的温度梯度。在 24 h 的运行时间内, 石蜡平均温度保持在熔点 $55.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 可认为大部分时间均始终处于相变状态。同时, 由于石蜡温度变化范围较小, 也使内部水温的波动范围很小, 在保证不低于 $55.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的基础上, 具体浮动范围为 $56.0\sim 57.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均水温

为 $56.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 很好地保持了较为恒定的蓄热温度。相变蓄热水箱外壁面的温度也始终与环境温度形成一定的温度梯度, 这表明相变蓄热水箱始终在与外界环境进行着对流换热。

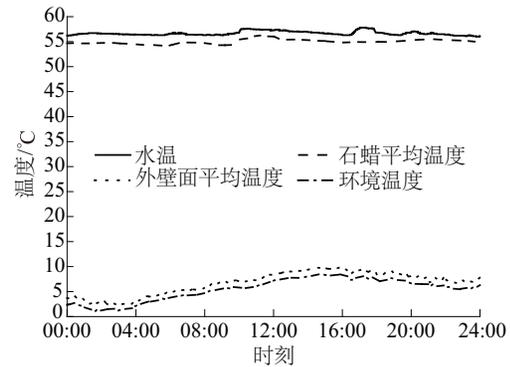


图6 水温、石蜡温度、外壁面温度及环境温度变化曲线

Fig. 6 Temperature variation characteristics of water, paraffin, outer wall and ambient

供热子系统在典型工况日的进出水温的变化情况如图 7 所示。产气罐的控制温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 当产气罐温度降至 $34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温控供热水泵开始工作, 直到产气罐料液温度达到 $35.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 供热过程结束。从图 7 可看出, 当产气罐有换热需求时, 供热水泵开启, 此时进水水温迅速上升, 并逐步趋于恒定, 同时出水水温开始同步变化, 且趋势相近, 并始终保持与进水水温有一定的温差。当加热结束时, 进、出水温均逐步下降, 其中由于进水水温较高, 与环境温度有较大的温差, 降温速率一般会稍大于出水水温降温速率。具体的供热子系统加热量变化如表 1 所示。

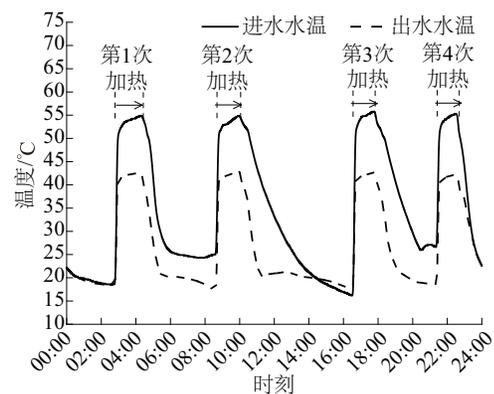


图7 加热盘管进、出水温变化特性

Fig. 7 Temperature variation characteristics of heating coil's inlet and outlet water

表1 供热子系统加热量变化

Table 1 Variation characteristics of heat supply subsystem's heat input

频次	加热时间 <i>t</i> /min	加热总能 <i>E_n</i> /kJ	$\frac{E_n}{E} / \%$
1	77	4934	25.7
2	75	4793	25.0
3	73	4866	25.3
4	70	4603	24.0
合计	295	19196	100

注：*n*—加热频次，如 E_1 为第 1 次加热时的加热总能，依此类推；*E*—24 h 内的加热总能。

已知加热介质流量为 80 L/h，由表 1 可计算得到加热总流量约为 393 L，而当日 2 台太阳集热器的集热总水量为 430 L，故满足要求。其中，10:00~16:30 期间，环境气温较高，产气罐热负荷需求较小，故供热装置在该时段内处于停止运行的状态，其余时段则加热频次明显加快。凌晨(00:00~06:00)时环境气温最低，产气罐热负荷需求较大，故第 1 次加热时，加热总量占比最大，为 25.7%，其余 3 次换热的加热总量占比均小于第 1 次加热。

3.3 太阳能秸秆沼气系统热利用分析

本文所提出的太阳能秸秆沼气系统中，太阳能包括光热、光伏两部分，所收集的太阳能以水作为载热介质，逐级进入相变蓄热水箱、产气罐、中温水箱，并循环利用，同时光伏发电装置所生产的电能还可为相变蓄热水箱中的石蜡层补热。系统的输入能量包括太阳集热器所吸收的太阳辐射能以及所耗的电能。其中，太阳集热器所吸收的太阳辐射能以集热水箱内部热水的内能增量表现出来，所耗的电能一部分用于加热集热水箱，使集热水温继续升至 58 ℃，另一部分用于补充石蜡的潜热及水泵等装置运行所耗电能，故和县冬季平均每日输入热量 E_i 如式(7)所示。

$$E_i = E_{i1} + E_{i2} \quad (7)$$

式中， E_{i1} ——集热水箱内部热水内能增量(仅依靠光热)，J； E_{i2} ——耗电电能，J。

集热水箱内部热水的内能增量以典型工况日(2016年1月14日)集热数据为依据，同时已知供热周期内系统平均每日耗电 3.37 kWh，代入相关数值得到冬季平均每日输入热量 E_i 为 45362 kJ。由表 1

可知，和县冬季平均每日的产气罐热负荷为 19196 kJ，可得出冬季太阳能秸秆沼气系统热利用效率为 42.3%。

进一步提高热利用效率的主要途径有：集热子系统所集热量与产气罐热负荷尚需进一步优化匹配；加热盘管的传热系数仍有进一步提高的空间；减小传热介质在管道中的热损。

4 结 论

1)通过太阳集热器的集热实验以及自然降温实验，得到太阳集热器日平均效率以及集热水箱散热热损与内外温差的关系，并结合和县典型气象年的冬季气象数据，提出为保证冬季时期稳定的中温发酵状态，需要利用太阳集热器与光伏发电相结合的太阳能光热、光伏联合应用技术。

2)通过和县地区冬季时期的太阳能秸秆沼气系统连续运行实验，得到在日平均环境温度为 4.7 ℃ 的条件下，系统稳定运行时，石蜡大部分时间均处于相变状态，相变蓄热水箱内部水温维持近似恒定且不低于 55 ℃，达到稳定蓄热效果，满足产气罐在冬季的中温发酵热负荷需求。

3)实验结果表明冬季太阳能秸秆沼气系统热利用效率为 42.3%，且仍有进一步提高的空间。

4)实验台的建立为长江中下游农村地区的太阳能与沼气的联合利用提供了借鉴意义，有助于实现该地区秸秆类农业废弃物资源化利用，改善农村生态环境。

[参考文献]

- [1] 林 聪. 沼气技术理论与工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [1] Lin Cong. Theory and engineering of biogas technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [2] 张 寰, 周雪花, 张相锋, 等. 农作物秸秆沼气制肥联产发酵设备的研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(12): 2032—2037.
- [2] Zhang Huan, Zhou Xuehua, Zhang Xiangfeng, et al. Study of straw co-fermentation device for biogas and organic fertilizer[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(12): 2032—2037.
- [3] Math-Alvarez J, Viturtia A M, Llabres-Luengo P, et al. Kinetic and performance study of a batch two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes[J].

- Biomass and Bioenergy, 1993, 5(6): 481—488.
- [4] Nozhevnikova A N, Kotsyurbenko O R, Parshina S N. Anaerobic manure treatment under extreme temperature conditions[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(1): 215—221.
- [5] Garba B. Effect of temperature and retention period on biogas production from lignocellulosic material[J]. Renewable Energy, 1996, 9(1): 938—941.
- [6] 张 铎, 邱 凌, 邓媛方. 用于沼气发酵系统的聚光型太阳能加热装置研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 85—90.
- [6] Zhang Duo, Qiu Ling, Deng Yuanfang. Research of parabolic trough solar concentrators heating system applied in biogas engineering [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2011, 39(5): 85—90.
- [7] 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.
- [8] Yiannopoulos A C, Manariotis I D, Chrysikopoulos C V. Design and analysis of a solar reactor for anaerobic wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(16): 7742—7749.
- [9] Abid M, Karimov K S. Biogas digester with simple solar heater [J]. IIUM Engineering Journal, 2012, 13(2): 109—119.

THERMAL PERFORMANCE RESEARCH OF SOLAR STRAW BIOGAS SYSTEM WITH PHASE CHANGE HEAT STORAGE

Wang Siyu, Lu Yong, Lu Haowei, Wang Chuqiao, Duan Wenjun, Qiu Jiaming

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The experimental results of thermal performance of solar straw biogas system in the project demonstration base located in Hexian of Anhui province show that it is necessary to combine solar collector with PV power generation to ensure the stable mesophilic fermentation in the middle and lower reaches of the Yangtze River during winter period. The paraffin layer can maintain phase transition state in most of time, and water temperature in phase change heat storage water tank maintains approximately constant which is not lower than 55 °C when this system runs stably under the average daily ambient temperature of 4.7 °C in winter, achieves the stable heat storage effect, satisfies the thermal load demand of gas producing tank for mesophilic fermentation in winter; the solar straw biogas fermentation system's thermal utilization efficiency is 42.3% in winter, and there is still room for improvement.

Keywords: solar energy; biogas; straw; phase change heat storage; thermal performance; mesophilic fermentation