

太阳能加热的地上式户用沼气生产系统热性能分析

冯 荣, 李金平^{*}, 李修真, 杨捷媛

(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)

摘 要: 为对太阳能加热的地上式户用沼气生产系统的推广应用和优化设计提供指导, 试验研究了该型系统的热性能, 对系统中真空管太阳能热水器日平均集热效率、沼气池散热量和热水-料液传热系数与相关因素的关系进行了分析。试验表明, 当日平均环境温度在 $-2.1\sim-8.6^{\circ}\text{C}$ 变化时, 沼气池内料液温度可维持在 $(27\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的范围内。得到了太阳能热水器日平均集热效率、沼气池散热量和热水-料液传热系数的计算公式; 研究发现沼气池内料液温度对热水-料液传热系数的影响很大, 随着料液温度的提高, 传热系数显著增加。

关键词: 太阳能; 传热系数; 沼气; 户用沼气生产系统; 日平均集热效率; 沼气池散热量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.027

中图分类号: TK511

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0196-05

冯 荣, 李金平, 李修真, 杨捷媛. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.027 http://www.tcsae.org

Feng Rong, Li Jinping, Li Xiuzhen, Yang Jieyuan. 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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.027 http://www.tcsae.org

0 引 言

沼气在中国农村能源市场占据重要地位^[1], 温度是影响沼气池产气率的重要因素, 利用太阳能集热器收集太阳能以加热沼气池, 是一种保证沼气池正常高效产气的有效方式^[2-5]。

许多学者研究了太阳能加热沼气池的热性能, Alkhamis等^[6]试验研究表明 $1.3\text{ m}\times 1\text{ m}$ 平板太阳能集热器在环境温度 30°C 时, 可将 53 L 保温发酵罐的发酵温度控制在 $(40\pm 1)^{\circ}\text{C}$, 集热效率达到 61% ; Kocar等^[7]试验研究了在 $8\sim 17^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下, $2\text{ m}\times 1\text{ m}$ 平板太阳能集热器联合 2 kW 电加热装置加热 280 L 保温发酵罐时可将发酵温度控制在 37°C ; 沈德安^[8]用 15 m^2 真空管太阳能集热器和 5 m^2 平板太阳能集热器联合加热 8 m^3 地下保温玻璃钢沼气池, 在 $-24\sim -6^{\circ}\text{C}$ 室外温度下, 发酵温度维持在 $(16\pm 2)^{\circ}\text{C}$; Su Yuan等^[9]试验发现环境温度 16°C 时, 2 m^2 U型管太阳能集热器每天运行 8 h 吸收的热量可满足 6 m^3 地下保温钢筋混凝土沼气池发酵的需要; 赵国明等^[10]设计了内外胆之间被抽成真空的太阳能增温发酵罐体, 试验表明这

种发酵装置的夜间平均温降速率仅是传统混凝土厌氧发酵装置的 18% ; 陈志光等^[11]建立了太阳能加热户用沼气系统的数学模型; 贾玲等^[12]提出了一套模拟求解户用沼气发酵系统热性能的模拟方法; 王丽颖等^[13]研究发现针对不同的工况调整热循环介质的流量, 可以提高热利用效率。

在前期研究的基础上, 兰州理工大学成功研发了太阳能加热的地上式户用沼气生产系统, 可在中国大多数地区推广应用^[14]。然而不同地区的太阳能资源和环境温度存在差异, 维持沼气池适宜发酵温度所需热量也不同; 在保证发酵温度满足农户冬季沼气需求的情况下, 为对该型系统应用于不同地区时选择适当集热面积的太阳能热水器, 和对进一步优化系统结构以提高其经济性提供指导, 本文对系统中真空管太阳能热水器日平均集热效率、沼气池散热量和热水-料液传热系数进行了试验研究。

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 m^2 ^[15] (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 7.5 cm 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

收稿日期: 2015-03-14 修订日期: 2015-07-17

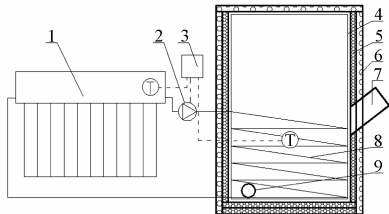
基金项目: 国家 863 计划课题 (2014AA052801); 甘肃省杰出青年基金 (2012GS05601); 兰州理工大学“红柳杰出人才计划” (Q201101); 甘肃省建设科技攻关项目 (JK2010-29)

作者简介: 冯 荣, 男, 甘肃定西人, 博士生, 主要从事可再生能源利用方面的研究。兰州 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 730050。

Email: 13893682861@126.com

*通信作者: 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: lijiping77@163.com

料口和出气口，工作时下部装料，上部储气；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、导热系数小于 0.04 W/(m·K)的聚乙烯保温材料。系统的工作原理是：控制器检测到沼气池内料液温度低于设定温度时，启动循环泵，输送太阳能热水器中热水至沼气池内盘管加热红泥软体沼气袋，进而加料液，当控制器检测到沼气池内料液温度高于设定温度后，关闭循环泵，停止加热。图 1 为系统示意图。



1.太阳能热水器 2.循环泵 3.控制器 4.红泥软体沼气袋 5.挤塑板 6.聚苯板 7.进料口 8.加热盘管 9.出料口 T.温度传感器
1.Solar Water Heater 2.Circulating pump 3.Controller 4.Rheid biogas digester 5.XPS 6.EPS 7.Inlet 8.Heat pipe 9.Outlet T. Temperature sensor
图 1 太阳能加热地上式户用沼气生产系统示意图

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

1.2 试验过程

于 2014 年 11 月份在甘肃省武威市民勤县张麻新村一农户家安装地上式沼气生产系统；将 0.75 m³ 羊粪、70 L

接种液和 1.3 m³ 水搅拌均匀后填入沼气池，料液总体积为 1.73 m³（根据填料后料液高度计算获得）。实验室测得羊粪的固体质量分数为 74.36%，密度为 412.2 kg/m³，则料液固体质量分数为 13.7%^[14]。此外，由于接种液少，测试期只有 7.5 m³ 沼气产出，因此，认为测试期间料液浓度未发生变化。填料后开启循环泵加热，每日升温控制在 2℃。自 12 月 1 日至 12 月 22 日对太阳辐射、料液温度、环境温度、热水进出口温度和循环流量等数据进行测量，使用仪器见表 1；所有数据由 Agilent 349702 数据采集仪自动采集并记录，扫描间隔为 10 s。

1.3 试验原理

本文通过建立太阳能热水器和沼气池的热平衡方程对系统热性能进行分析。系统中存在以下能量转换与传递环节：太阳辐射能转换为热能，热能传递至沼气池，沼气池和储热水箱向环境散热，热水和料液内能变化，管道散热量、料液发酵产热量、以及随沼气带走的热量。由于管道保温良好，料液发酵产热和沼气带走的热量极少，同时热水和料液内能的变化需通过水箱水温 and 料液温度的变化来计算，因此，为简化传热模型，作如下假设^[11]：1) 整个系统管路热损失和水量蒸发损失忽略不计；2) 太阳能热水器储热水箱内温度分布均匀；3) 沼气池内料液性质同水，且温度分布均匀；4) 料液发酵产热和沼气带走的热量忽略不计。

表 1 测量参数及仪器
Table 1 Measuring parameter and instruments

测量参数 Measured parameters	测量仪器 Measuring instruments	技术参数 Technical parameters	生产厂家 Manufacturer
太阳能热水器集热面太阳辐射 Solar radiation on collector face of solar water heater	TBQ-2 总辐射表 TBQ-2 pyranometer	量程 Range: 0~2 000 W·m ⁻² 灵敏度 Sensitivity: 8.963 μV·W ⁻² 精度 Precision: 2%	锦州阳光气象科技有限公司
太阳能热水器储热水箱水温 Water temperature in storage of solar water heater			
加热盘管进口水温 Inlet water temperature of heat pipe	Pt100 温度传感器 Pt100 temperature sensor	量程 Range: -50~100℃ 精度 Precision: 1/3DIN B 级, ±0.10℃	北京赛亿凌科技有限公司
加热盘管出口水温 Outlet water temperature of heat pipe			
环境温度 Ambient temperature			
沼气池内料液温度 Slurry temperature in digester			
循环水流量 Flow rate of circulating water	LWGY-15 涡轮流量计 LWGY-15 turbine flowmeter	量程 Range: 0.4~4.0 m ³ ·h ⁻¹ 精度 Precision: ±0.45%	上海华脉实业有限公司

对于太阳能热水器，每日吸收的热量减去储热水箱热损失应等于向沼气池输送的热量和水的内能变量之和，即：

$$Q_{in} - Q_{loss} = Q_{out} + \Delta U \tag{1}$$

式中：Q_{in} 为太阳能热水器每日吸收的热量，MJ；Q_{loss} 为储热水箱每日热损失，MJ；Q_{out} 为太阳能热水器每日向沼气池输送的热量，MJ；ΔU 为储热水箱内热水每日内能变化量，MJ。

Q_{out} 和 ΔU 可分别由式（2）和（3）计算：

$$Q_{out} = \sum_0^{8640} c \cdot m \cdot (T_{in} - T_{out}) \cdot t \times 10^{-6} \tag{2}$$

式中：8 640 为数据采集仪 1 d 的记录次数；c 为水的比热

容，4200 J/(kg·℃)；m 为循环水流量，kg/s；T_{in} 为进口水温，℃；T_{out} 为出口水温，℃；t 为扫描时间间隔，10 s。

$$\Delta U = c \cdot M \cdot (T_{c,8640} - T_{c,0}) \times 10^{-6} \tag{3}$$

式中：M 为水的质量，400 kg；T_c 为太阳能热水器储热水箱水温，℃。

太阳能热水器日平均集热效率 η_̄ 可写为：

$$\bar{\eta} = \frac{Q_{out} + \Delta U}{\sum_0^{8640} A_c \cdot I \cdot t} \tag{4}$$

式中：A_c 为太阳能热水器集热面积，3.85 m²；I 为太阳能集热器集热面瞬时太阳辐射强度，W/m²。

对于沼气池, 获得的热量与太阳能热水器输出的热量 Q_{out} 相等, 且等于沼气池向环境的散热量与料液的内能变化量之和, 即:

$$Q'_{in} = Q'_{loss} + \Delta U' \quad (5)$$

式中: Q'_{in} 为沼气池每日获得的热量, MJ; Q'_{loss} 为沼气池每日向环境的散热量, MJ; $\Delta U'$ 为料液每日内能变化量, MJ。

$\Delta U'$ 可由式 (6) 计算:

$$\Delta U' = c \cdot M' \cdot (T_{z,8640} - T_{z,0}) \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中: M' 为料液质量, 1 730 kg; T_z 为料液温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

此外, Q'_{in} 由加热盘管传递至沼气池内料液, 可得式 (7):

$$Q'_{in} = \sum_0^{8640} k \cdot A \cdot \Delta T_m \cdot t \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中: k 为热水-料液传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为换热面积, 取加热盘管外圆周面积的一半, 1.256 m^2 ; ΔT_m 为热水-料液换热温差, 可由式 (8) 计算^[16]:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (8)$$

$$\frac{(T_{in} - T_z) - (T_{out} - T_z)}{\ln \frac{T_{in} - T_z}{T_{out} - T_z}} = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \frac{T_{in} - T_z}{T_{out} - T_z}}$$

联立式 (2) 和 (7) 可得热水-料液传热系数 k 的计算式 (9):

$$k = \frac{c \cdot m \cdot (T_{in} - T_{out})}{A \cdot \Delta T_m} \quad (9)$$

2 试验结果与分析

2.1 料液温度、环境温度和太阳能热水温度

图 2 所示为测试期内太阳能热水器储热水箱水温、

环境温度和沼气池料液温度。当每日最低环境温度在 $-9 \sim -18.2^{\circ}\text{C}$, 平均环境温度在 $-2.1 \sim -8.6^{\circ}\text{C}$ 变化时, 经过 5 d 时间料液温度从 18°C 升至 27°C , 并且后期一直维持在 $(27 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 该温度范围可保证沼气池正常运行时每日产沼气量满足普通农户生活燃气所需^[14]。

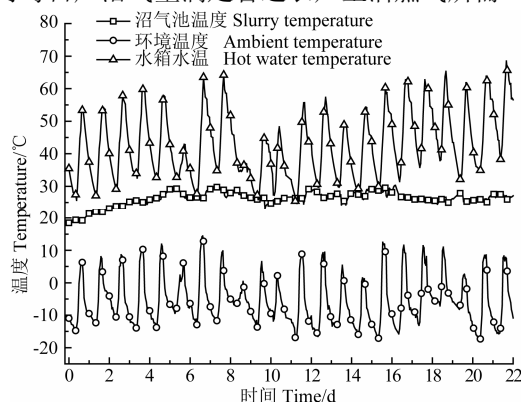


图 2 储热水箱温度、环境温度和沼气池内料液温度
Fig.2 Temperature of water storage, ambient and slurry

2.2 太阳能热水器日平均集热效率及分析

表 2 是测试期太阳能热水器集热面上日照时数 H 、平均太阳辐照强度 \bar{I} 和日平均集热效率 $\bar{\eta}$ 。全玻璃真空管对太阳光线的吸收特性、储热水箱的保温性能和环境因素均会影响太阳能热水器的集热效率, 当热水器结构确定时, 太阳能热水器的集热效率主要受太阳辐射、储热水箱水温和环境温度影响。因此, 将集热面上日累积太阳辐射量和储热水箱与环境日平均温差作为影响热水器日平均集热效率的自变量, 采用多元线性回归模型分析与因变量之间的关系, 样本数量为 22, 分析结果见表 3 所示, 得到多元线性回归方程如下:

$$\bar{\eta} = 9.42 + 5.99E - 1.50(\bar{T}_c - T_a) \quad (10)$$

式中: E 为集热面日累积太阳辐射量, MJ/m^2 ; T_a 为环境温度, T_c 为储热水箱温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 太阳辐射和太阳能热水器日平均集热效率

Table 2 Solar radiation and collection efficiency of solar water heater

天数 Days/d	H/h	$\bar{I}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\bar{\eta}/\%$	天数 Days/d	H/h	$\bar{I}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\bar{\eta}/\%$	天数 Days/d	H/h	$\bar{I}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\bar{\eta}/\%$
1	8.7	608	55.5	9	5.5	226	-82.7	17	8.8	295	41.0
2	7.9	633	51.5	10	7.3	510	37.3	18	8.5	670	46.3
3	8.7	653	53.6	11	7.1	459	52.6	19	7.2	618	34.3
4	8.6	673	50.5	12	8.7	608	57.1	20	8.0	226	28.1
5	8.2	636	46.4	13	7.7	633	50.1	21	8.9	510	58.8
6	7.5	295	14.5	14	7.2	653	44.0	22	8.4	459	40.1
7	8.9	670	42.4	15	8.5	673	58.2				
8	7.6	618	46.0	16	8.9	636	52.7				

注: H 为日照时数; \bar{I} 为平均太阳辐照强度; $\bar{\eta}$ 为日平均集热效率。

Note: H is sunshine duration, \bar{I} is average solar irradiation intensity. $\bar{\eta}$ is average daily heat collecting efficiency.

表 3 数据分析结果

Table 3 Analysis results of experimental data

因变量 Dependent variable	R^2	标准误差 Standard error	P 值 P -value	偏回归 系数 1 β_1	偏回归 系数 2 β_2	截距 Intercept
$\bar{\eta}$	0.695	0.171	1.26E-5	5.99	-1.5	9.42
Q'_{loss}	0.410	4.969	0.032	0.931		-1.374
k	0.784	0.765	0	-0.11	0.83	12.73

注: Q'_{loss} 为沼气池每日向环境的散热量; k 为热水-料液传热系数。

Note: Q'_{loss} is heat release capacity from biogas tank to environment, k is heat transfer coefficient of water-feed liquid.

R^2 为 0.695, 说明因变量变异性的 69.5% 可由回归方程解释, 变量间线性相关性强; P 值小于显著性水平 0.05, 说明回归方程是显著的; 标准误差为 0.171, 说明用回归方程预测太阳能热水器日平均集热效率的平均误差为 0.171; 误差除来源于模型误差和测量误差等之外^[17], 还由于上述回归方程未考虑影响太阳能热水器集热效率的其他环境因素, 如灰尘、风速等, 因此下一步还需进行更细致的研究。偏回归系数 $\beta_1=5.99$ 表示, 在储热水箱与环境日平均温差不

变的情况下, 单位面积日累积太阳辐射量每增加 1 MJ, 日平均集热效率增加 5.99%; 偏回归系数 $\beta_2 = -1.5$ 表示在集热面日累积太阳辐射量不变的情况下, 储热水箱与环境日平均温差每增加 1℃, 日平均集热效率降低 1.5%。

2.3 沼气池散热量分析

沼气池向环境的散热量与料液温度、环境温度、沼气池围护结构的保温性能等因素有关。对确定结构的沼气池, 其散热量由料液与环境温差决定, 因此, 将沼气池料液与环境日平均温差作为影响沼气池散热量的自变量, 采用一元线性回归模型分析与因变量之间的关系, 样本数量为 22, 分析结果见表 3 所示, 得到一元线性回归方程如下:

$$Q'_{\text{loss}} = 0.9314(\overline{T_z} - \overline{T_a}) - 1.3739 \quad (11)$$

R^2 为 0.410, 说明因变量的变异性有 41.0%可由回归方程解释, 变量间具有中等的线性相关性; P 值小于显著性水平 0.05, 认为能用线性模型描述自变量与因变间的相关关系, 标准误差为 4.969; 这主要是由于计算中以水的物性代替料液物性, 且忽略沼气池内非均匀温度场所致, 因此, 在用公式 (11) 指导系统的推广应用时, 可在计算基础上作适当增加, 以提高系统可靠性; 同时还应对不同原料、不同浓度的料液物性和沼气池内温度场作深入分析。回归系数 $\beta_1 = 0.931$ 表示沼气池料液与环境日平均温差增加 1℃, 沼气池日散热量增加 0.931 MJ。图 3 为沼气池散热量与料液和环境日平均温差的关系。

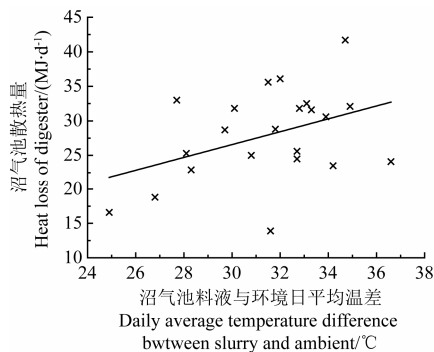


图 3 沼气池散热量与沼气池料液和环境温差的关系

Fig.3 Relationship between heat loss of digester and temperature difference of slurry and ambient

2.4 热水-料液传热系数分析

加热盘管内热水与沼气池料液之间的传热系数是影响传热速率的重要因素, 会影响循环水泵向沼气池输送维持发酵温度所需热量的运行时间, 进而影响系统的运行成本。热水-料液传热系数与加热盘管导热系数、盘管与软体沼气袋接触情况、热水流速、沼气池内料液物性等因素密切相关。在装置确定的情况下, 影响传热系数的主要因素是热源温度和料液温度^[18]。因此, 将进口水温 and 料液温度作为影响传热系数的自变量, 采用多元线性回归模型分析与因变量之间的关系, 样本数量为 29 495, 分析结果如表 3 所示, 得到多元线性回归方程如下:

$$k = 12.73 - 0.11T_{\text{in}} + 0.83T_z \quad (12)$$

$60^\circ\text{C} \geq T_{\text{in}} \geq 30^\circ\text{C}; 29^\circ\text{C} \geq T_z \geq 18^\circ\text{C};$
 $T_{\text{in}} - T_z \geq 5^\circ\text{C}$

R^2 为 0.784, 说明因变量的变异性有 78.4%可由回归方程解释, 变量间线性相关性很强; P 值小于显著性水平 0.05, 说明回归方程是显著的; 标准误差为 0.765, 说明用回归方程预测热水-料液传热系数的平均误差为 0.765; 可认为主要由模型误差和测量误差等引起。偏回归系数 $\beta_1 = -0.11$ 表示, 在料液温度不变的情况下, 进口水温增加 1℃, 热水-料液传热系数降低 0.11 W/(m²·K); 偏回归系数 $\beta_2 = 0.83$ 表示, 在进口水温不变的情况下, 料液温度升高 1℃, 传热系数增加 0.83 W/(m²·K)。可以看出, 料液温度对传热系数的影响很大, 随着料液温度的提高, 料液侧对流换热增强, 热水-料液传热系数增加。

3 结 论

在日平均环境温度在 -2.1~ -8.6℃ 的条件下, 对太阳能加热的地上式户用沼气生产系统热性能进行了试验研究, 得出以下结论:

- 1) 在储热水箱与环境日平均温差不变的情况下, 单位面积日累积太阳辐射量每增加 1 MJ, 日平均集热效率增加 5.99%; 在集热面日累积太阳辐射量不变的情况下, 储热水箱与环境日平均温差每增加 1℃, 日平均集热效率降低 1.5%;
- 2) 沼气池料液与环境日平均温差增加 1℃, 沼气池日散热量增加 0.931 MJ;
- 3) 在料液温度不变的情况下, 进口水温增加 1℃, 热水-料液传热系数降低 0.11 W/(m²·K); 在进口水温不变的情况下, 料液温度升高 1℃, 传热系数增加 0.83 W/(m²·K)。

[参 考 文 献]

- [1] Luc Christiaensen, Rasmus Heltberg. Greening China's Rural Energy: New Insights on the Potential of Smallholder Biogas[R]. 2012.
- [2] 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.
- [3] Ivett Ferrer, Marianna Garf í, Enrica Uggetti, et al. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(5): 1668-1674.
- [4] 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.
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. (in Chinese with English abstract)
- [5] Kashyap D R, Dadhich K S, Sharma S K. Biomethanation under psychrophilic conditions: A review[J]. Bioresource Technology, 2003, 87(2): 147-153.
- [6] Alkhamis T M, El-Khazali R, Kablan M M, et al. Heating of a biogas reactor using a solar energy system with temperature control unit[J]. Solar Energy, 2000, 69(3): 239-247.
- [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] 沈德安. 寒区户用沼气池联合联合太阳能增温系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
Shen Dean. Research on Family Biogas Plant Associated Solar Energy Heating System in Cold Area[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)

- [9] Su Yuan, Tian Rui, Yang Xiaohong. Research and analysis of solar heating biogas fermentation system[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11(PartC): 1386—1391.
- [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的运行试验[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]. Jilin Academy of Agricultural Machinery, 2013, 35(3): 361—363. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈志光, 秦朝葵, 李振群, 等. 太阳能辅助加热户用沼气系统的瞬时计算分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1139—1143. Chen Zhiguang, Qin Chaokui, Li Zhenqun, et al. The transient analysis of a household biogas digester with solar assisted heating system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(8): 1139—1143. (in Chinese with English abstract)
- [12] 贾玲, 邢世录, 田瑞, 等. 户用太阳能中温沼气发酵系统的数值设计[J]. 热科学与技术, 2013, 12(3): 267—271. Jia Ling, Xing Shilu, Tian Rui, et al. Household solar biogas system numerical design in cold area[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2013, 12(3): 267—271. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王丽颖, 林丽华, 高虹, 等. 太阳能沼气池热性能实验研究[J]. 中国沼气, 2013, 31(2): 26—33.
- Wang Liying, Lin Lihua, Gao Hong, et al. Experiment and mechanism analysis on thermal properties of solar digester[J]. China Biogas, 2013, 31(2): 26—33. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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)
- [15] GB/T 4271-2007, 太阳能集热器热性能试验方法[S].
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第四版, 北京: 高等教育出版社, 2006: 476—477.
- [17] 朱晓临. 数值分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 3—4.
- [18] 陈志光, 秦朝葵, 熊超. 螺旋管传热系数的研究[J]. 热科学与技术, 2009, 8(2): 131—135. Chen Zhiguang, Qin Chaokui, Xiong Chao. Study on heat transfer coefficient of spiral heat exchanger[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2009, 8(2): 131—135. (in Chinese with English abstract)

Thermal performance of over-ground household biogas production system heated by solar energy

Feng Rong, Li Jinping*, Li Xiuzhen, Yang Jieyuan

(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)

Abstract: Household biogas is widely used in rural areas of China because it is clean, convenient and renewable energy, and the temperature of slurry in biogas digester is one of the most important factors on the biogas production. It has been proved that heating the biogas digester by solar energy is an effective manner to improve the biogas production performance of digester in winter, and many scholars have researched the thermal performance of heating the biogas digester by solar energy. The new type over-ground household biogas digester has been researched and developed successfully by Lanzhou University of Technology, which can be applied in most areas of China. In this paper, the thermal performance of the new type household biogas production system was experimentally studied in order to provide guidance for the design optimization and promotion of this type of system, which mainly included the heat collection efficiency of vacuum-tube solar water heater, the heat loss of digester and the heat transfer coefficient between hot water and slurry. The new type of system had been constructed completely in November, 2014 in a farmer family in a village of Minqin County, Gansu Province, including an vacuum-tube solar water heater with 3.85 m² heat-collecting area which consisted of 40 vacuum tubes made of glass, an insulating room of 1.9 m × 1.9 m × 2.6 m, a rheid biogas digester of 1.6 m × 1.6 m × 2.5 m, a temperature controller, a circulating pump and other devices. After feeding 1.73 m³ slurry to the digester, the test had been done from December 1st to December 22nd, 2014, and the following parameters were measured: solar radiation on the collection face of solar water heater, hot water temperature in solar water heater's storage, ambient temperature, slurry temperature in digester, inlet and outlet temperature of heat pipe and hot water flow rate in heat pipe, which were recorded by the computer automatically. Else, in order to avoid reducing the activity of methane bacteria caused by the temperature's quick rise, the daily temperature rising was controlled within 2℃. Five days later, the slurry temperature reached up the designed value, and then was kept at (27±2)℃ when the lowest daily ambient temperature was within -9 - -18.2℃, and the average daily ambient temperature was within -2.1- -8.6℃. The results showed that, if the solar radiation on the collect area of solar water heater increased by 1 MJ/m², the daily average heat-collecting efficiency would increase by 5.99%; if the average daily temperature difference of hot water and ambient increased by 1℃, the efficiency would reduce by 1.5%; if the average daily temperature difference of slurry and ambient increased by 1℃, the daily heat loss of digester would increase by 0.931 MJ; if the inlet water temperature increased by 1℃, the heat transfer coefficient between hot water and slurry would reduce by 0.11 W/(m²·K); the slurry temperature had significant effect on the heat transfer coefficient, and when the slurry temperature increased by 1℃, the heat transfer coefficient would increase by 0.83 W/(m²·K).

Key words: solar energy; heat transfer coefficients; biogas; household biogas production system; the average daily collector efficiency; heat loss of digester