

太阳能与发电余热复合沼气增温系统设计

寇 巍^{1,2}, 郑 磊², 曲静霞², 邵丽杰²,
张大雷², 裴占江¹, 刘庆玉^{1*}

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110136; 2. 辽宁省能源研究所, 营口 115003)

摘 要: 为了实现大中型沼气工程在北方寒冷地区的应用推广。该文针对北方寒冷气候特点, 以哈尔滨双城市沼气工程为例构建了 1 套太阳能—发电余热中温厌氧发酵增温系统, 阐述了该增温系统的设计原理, 并对沼气发酵热负荷、发电机组余热回收利用率、太阳能集热装置热效率等关键参数进行了理论计算。计算得出该沼气工程全年平均每日热量的损失为 6659.2 MJ, 太阳能—发电余热中温厌氧发酵增温系统全年平均每日集热量为 7017.6 MJ。通过对增温效果与该工程的热量损失进行对比, 表明 12、1、2 月份系统需沼气发电机组额外提供 372.2、369.4、208.3 kWh 电量增温, 其余月份系统可以实现发酵工程每日热量损失的补充, 保证该工程的稳定运行。在 8 月份对示范工程的一次发酵罐体进行了增温效果测试, 表明该增温系统在 28 d 左右可将该发酵罐内物料温度提升到中温发酵水平。该文为北方寒冷地区大中型沼气增温保温设备的配套建设提供参考。

关键词: 太阳能, 沼气, 设计, 发电余热, 增温系统

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.24.028

中图分类号: S216.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-24-0211-07

寇 巍, 郑 磊, 曲静霞, 等. 太阳能与发电余热复合沼气增温系统设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 211-217.

Kou Wei, Zheng Lei, Qu Jingxia, et al. Engineering design of solar and power waste energy heating system for biogas project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 211-217. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

随着沼气技术的不断发展以及国内对生物能源应用的大力倡导和政策支持, 各种类型的沼气工程在中国不断建成并投入使用, 规模化工程已成为未来沼气工程发展的趋势。在沼气生产过程中, 温度是影响沼气发酵产气率的关键因素之一。沼气发酵可分为 3 个发酵区, 即常温发酵区 10~26℃, 中温发酵区 28~38℃ (最适温度为 35℃), 高温发酵区 46~60℃^[1-3]。在大中型沼气工程中由于中温发酵能耗较少, 可使沼气发酵整体维持在一个较高的水平, 并具有良好的经济性, 因而被广泛采用^[4-5]。在北方高寒地区, 由于冬季天气寒冷, 室外温度较低, 为保障沼气发酵稳定运行, 必须对发酵料液罐以及发酵反应器进行严格的增温保温措施, 使发酵

反应温度不受外界环境影响, 因此合理的选择发酵系统增温的模式和设备是保障沼气工程在寒冷地区稳定运行的关键^[6-7]。

沼气工程中维持运行温度的方法有很多, 目前大中型沼气工程多采用化石能源热水锅炉加热、沼气锅炉加热、太阳能加热、沼气发电余热利用等方式。化石能源热水锅炉及沼气锅炉通过直接燃烧煤炭或沼气加热, 其经济效益及能源利用率都极不理想^[8-11]。太阳能加热系统采用定温控制, 通过太阳能集热器完成热能的采集和传输, 操作简单, 可自动运行, 但易受天气影响^[12-14]。沼气发电余热利用是目前发展最快的一种加热方式, 利用发电机组冷却余热以及燃气内燃机所产生的高温尾气, 通过余热回收装置对热能回收利用^[15-17]。

北方地区的气候寒冷, 沼气工程中发酵罐罐体向外部环境大量散热, 而单一的增温方式热利用效率较低和运行成本高等。针对以上问题本文对黑龙江哈尔滨双城市某沼气工程构建一套太阳能—发电余热复合沼气工程增温系统, 以沼气发电机组余热回收为主, 并辅助太阳能加热系统用以解决发电余热浪费及沼气工程增温问题。

收稿日期: 2013-08-12 修订日期: 2013-11-11

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划 (2011BAD15B04)

作者简介: 寇 巍 (1981—), 男, 辽宁沈阳人, 博士生, 研究方向为农业生物环境与能源工程。沈阳 沈阳农业大学工程学院, 110161。

Email: kouwei6@126.com

*通信作者: 刘庆玉 (1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质能源研究。沈阳 沈阳农业大学工程学院, 110161。

Email: qyliu@126.com

1 复合沼气增温系统设计

1.1 中温厌氧发酵增温系统工作原理分析

太阳能—沼气发电余热增温系统通过将太阳能集热器所采集的热量及沼气发电余热所产生热量在蓄热水箱中进行换热从而提高循环水温度，循环热水通过沼气发酵系统内热盘管以辐射和对流方式与发酵原料进行热交换，使沼气发酵系统温度保持在中温发酵范围内。

增温系统通过温度传感器进行自动温度控制，系统启动时外循环冷却水通过电动水泵经由缸套水热交换器进入发电机组进行冷却，而后通过一部分作为热水回流对外循环冷水进行初步预热，同时缸套水热交换器中进行换热，用以提升冷却水温度，防止温度过低影响发电机组使用寿命，外循环冷水通过废气热交换进行二次预热进入蓄热水箱进行换热，达到增温保温的目的，太阳能集热器系统与蓄热水箱系统分别设有温度传感器进行监控，当太阳能集热器与蓄热水箱温差大于 5℃ 时，温差循环泵开启进行强制换热，沼气发酵系统出口设有温度传感器及自力式温度控制阀，当发酵系统循环

水出口水温低于 30℃，太阳能集热器水温低于 40℃ 时电加热系统开启进行加热，循环水出口通过自力式温度控制阀调节循环水流速，从而保证发酵系统始终保持在中温发酵温度范围内稳定运行。

1.2 太阳能—发电余热中温厌氧发酵增温系统设计

图 1 中增温系统共包含 3 个子系统，太阳能集热系统、发电余热回收系统、沼气发酵系统。太阳能集热系统由太阳能集热管、温差循环泵、温度传感器等组成，加热时待加热冷水由入口进入太阳能真空管集热器中，经过管路循环进入蓄热水箱，由温差循环泵进行系统水循环。发电余热回收系统冷却水包含缸套水热交换器、气体发动机、发电机、废气热交换器，外循环冷水经由电动水泵进入缸套水热交换器中进行预热，作为气体发动机以及发电机的冷却水进行循环，而后进入缸套水热交换器及废气热交换器进行余热回收。以哈尔滨双城市沼气工程为研究对象，工程采用干、湿耦合连续发酵方式，工程设计日产沼气 1 200 m³。沼气增温保温系统由 3 个发酵罐体（如图 2 所示）、循环管路，酸化罐等组成。

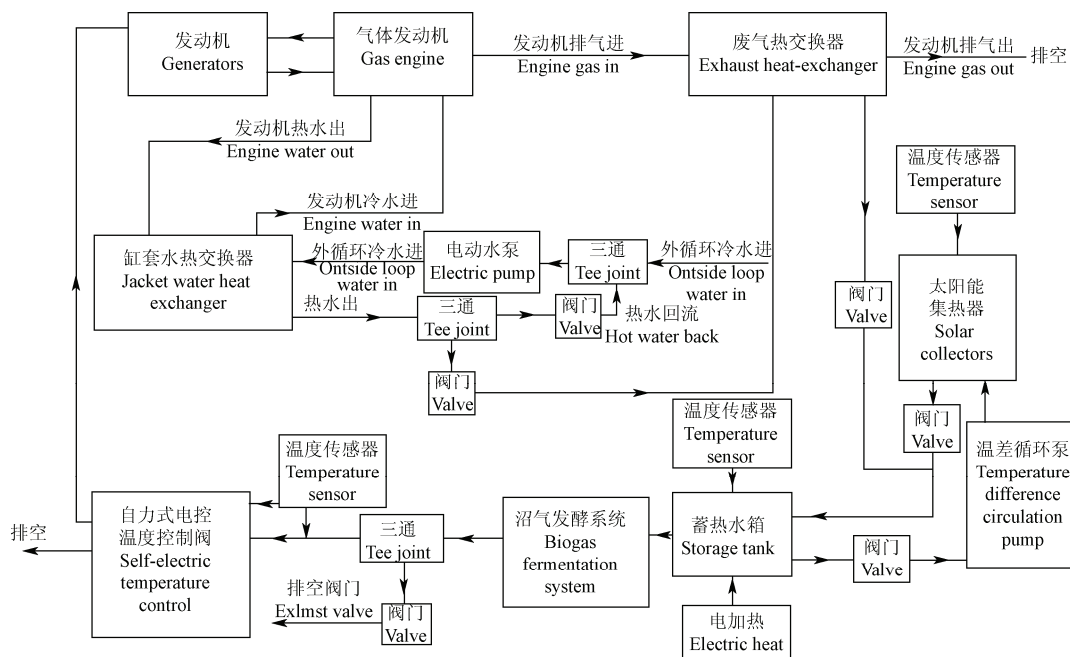


图 1 太阳能—发电余热中温厌氧发酵增温系统示意图

Fig.1 Heating system of middle temperature biogas digester by solar energy and waste heat power generation recovery

2 增温系统能量计算

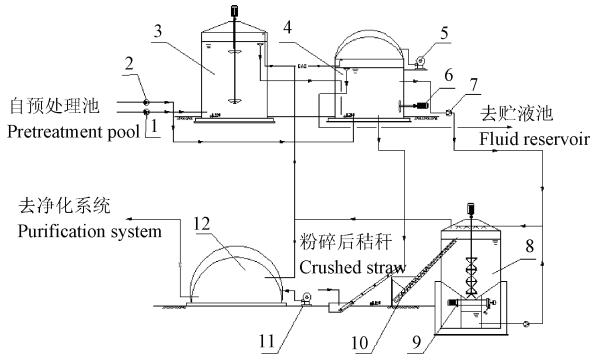
2.1 中温厌氧发酵罐热负荷理论计算

厌氧发酵罐的散热分析是验证增温系统是否符合工程需求的主要依据之一，发酵罐的热负荷主要由 3 部分构成：沼气罐体散失引起的热负荷；进出物料过程引起的热负荷；沼气携带以及搅合和生

物热负荷，其热量在计算中比重过小忽略不计，因此沼气工程日平均热负荷主要由罐体散失的热量和加热物料所需热量组成^[17-19]。

$$Q=Q_1+Q_2 \quad (1)$$

式中， Q 为发酵罐的热负荷，kJ； Q_1 为罐体散出的总热量，kJ； Q_2 为反应器内进出料液的总热量，kJ。



注：1.进料泵，2.进料泵，3.一次发酵罐，4.二次发酵罐，5.鼓风机，6.搅拌器，7.沼液泵，8.干发酵罐，9.出料机，10.进料螺旋输送机，11.鼓风机，12.储气罐
 Note: 1.Feed pump, 2.Feed pump, 3.Primary fermentor, 4.Secondary fermentor, 5.Air blower, 6.Agitator, 7.Slurry pump, 8.Dry fermentor, 9.Discharging machine, 10.Feed screw conveyor, 11.Air blower, 12.Gasholder

图 2 沼气工程工艺流程图
 Fig.2 Process flow diagram of biogas project

沼气发酵罐体散热由顶部散热、侧壁散热和底部散热 3 部分组成，散热量计算公式为：

$$Q_1 = t(Q_{底} + Q_{侧} + Q_{顶}) \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{S_i(T_0 - T_i)}{\sum b_i \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)} \quad (3)$$

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi L \lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad (4)$$

式 (2) 为计算某时间段 (t) 内散热总能量公式，其中： Q_1 为罐体一段时间内散出的总热量，kJ； $Q_{底}$ 为通过罐底部散出的热量，kJ； $Q_{侧}$ 为通过罐体侧壁损失的热量，kJ； $Q_{顶}$ 为通过罐体顶部散出的热量，kJ； t 为时间，h。

式 (3) 为多层平壁热传导公式，用于计算顶层和底层散热，其中： S_i 为发酵罐体不同部位如顶部、侧部和底部的面积， m^2 ； T_0 为发酵罐内部温度， $^{\circ}C$ ； T_i 为发酵罐体不同部位的外部环境温度， $^{\circ}C$ ； $\sum b_i$ 为罐体各部分结构层参数进行累计相加； δ_i 为各部分结构层厚度，m； λ_i 为罐体各结构层导热系数， $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 。

式 (4) 为多层圆筒壁热传导公式，用于计算罐体侧壁散热，其中： t_1 为第 1 层壁内表面温度， $^{\circ}C$ ； t_{n+1} 为第 n 层壁外表面温度， $^{\circ}C$ ； r_{i+1} 为圆筒第 i 层保温层外壁半径，m； r_i 为圆筒第 i 层保温层内壁半径，m； L 为罐体高度，m。

加热进料所需热量为添加物料升温达到中温发酵温度所需的热量，其计算公式为：

$$Q_2 = m_1 c_p (T - T_1) \quad (5)$$

式中， m_1 为进料量，kg/h； c_p 为投粪料液的比热； T 为中温发酵温度 $35^{\circ}C$ ； T_1 为进料温度，用以保障罐内 $35^{\circ}C$ 的中温发酵。

$$c_p = 4.17 \times (1 - 0.00812T_s)^{[19]} \quad (6)$$

式中， T_s 为料液含固率。

本沼气工程采用中温发酵，选取牛粪作为沼气发酵原料，原料来自附近养殖场及农户，含水率 90%，总固体质量分数约为 10%，设计水力停留时间 15 d，每天进料 60 t，冬季加入新鲜发酵料液的平均温度 $5^{\circ}C$ ，全年平均加入新鲜料液 $10^{\circ}C$ ，设计发酵温度中温 $35^{\circ}C$ ，共有 3 个发酵罐体，罐体参数如表 1。罐体均采用双层 PVC 保温 60 mm，苯板三层 150 mm。二次发酵罐顶层无保温结构，顶层为承载空气及沼气储气膜，气体厚度 4 m。

表 1 发酵罐体面积参数
 Table 1 Area parameters of fermentation tank

	底面积 Floor space/ m^2	顶面积 Top space/ m^2	罐高度 Tank height/m
一次发酵罐 Primary fermentor	103	107	8.4
二次发酵罐 Secondary fermentor	165	204	6.6
干发酵罐 Dry fermentor	75	31	3.6

根据进料温度和 2012 年度哈尔滨双城市不同月份平均日气温数据^[20-22]，由上述传热学公式计算系统日平均负荷如表 2。

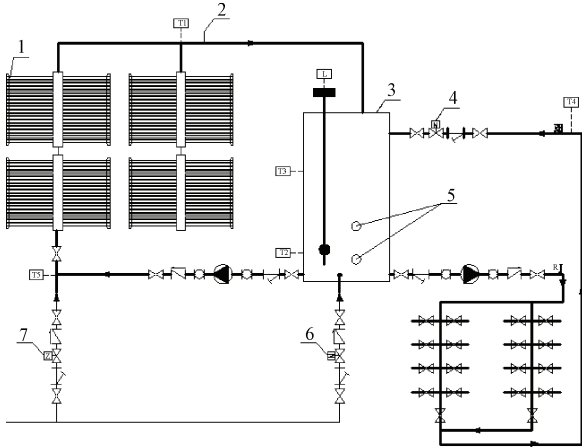
结合进出料热损失情况以及沼气罐体散失热情况，经计算得出该沼气工程全年中 12、1、2 月份热损失量最大可达到 7.58、7.77 和 7.76 GJ/d，全年月平均热量损失为 6659.2MJ。

表 2 2012 年各月系统的日平均热负荷
 Table 2 Average daily heat load in different months in 2012

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
环境温度 Environment temperature/ $^{\circ}C$	-17.5	-13.5	-4	7	14.5	20.5	23	21	15	6.5	-5	-14.5
进料温度 Feed temperature/ $^{\circ}C$	5	5	7.5	10	10	15	15	15	10	7.5	7.5	5
罐体总散热量 Total heat loss of tanks/(MJ·d ⁻¹)	218.6	202.1	162.5	116.7	85.4	60.4	50.1	58.3	83.3	118.7	166.6	185.1
进出料总热量损失 In and out of the total heat loss/(GJ·d ⁻¹)	7.56	7.56	6.30	6.30	6.3	5.04	5.04	5.04	6.3	6.93	6.93	7.56
总热量损失 Total heat loss/(GJ·d ⁻¹)	7.77	7.76	6.46	6.34	6.31	5.05	5.05	5.05	6.31	6.94	6.94	7.58

2.2 太阳能集热系统热负荷计算

太阳能加热系统由太阳能集热管完成热量的采集和传输，系统利用温度传感器进行定温控制，由太阳能热水通过温差循环泵对蓄热水箱进行强制换热。



注：1.太阳能集热器，2、3.排气口，4.电磁阀3，5.电加热，6.电磁阀2，7.电磁阀1
Note: 1.Solar collectors, 2,3.Feed pump, 4.NO.3 Solenoid valve, 5.Electric heating, 6.NO.2 Solenoid valve, 7.NO.1 Solenoid valve

图3 太阳能集热系统图
Fig 3 Solar collector system

采用强制循环加热系统、太阳能集热系统可以为增温系统提供的热量为：

$$Q = A_C \times [J_T \times \eta \times (1 - \eta_L)] / f \quad (7)$$

式中， A_C 为太阳能集热面积，工程设计太阳能集热器面积为 350 m^2 ； J_T 为倾斜辐射量，即倾角等于当地纬度时，倾斜表面平均太阳能总辐射量，MJ； η 为集热器日平均集热效率； η_L 为管路及热水箱损失效率，一般取 $0.2 \sim 0.3$ ； f 为太阳能保证率^[23-25]。

本系统采用真空管集热器，集热面积 350 m^2 ，日平均集热效率取 55% ；方位角 0 （朝向正南），偏重于冬季使用，倾角取 40° ；管路及热水箱损失效率取 0.2 ^[26]。由上述公式计算得太阳能增温系统可提供总热量如表3所示。

2.3 沼气发电余热回收系统热负荷计算

沼气发电内燃机组的总热效率可达 80% ，其中发电热效率为 30% ，余热利用热效率通常为 50% ，机组废气、烟气的热量可通过特制的热交换系统进行热量回收，对发电余热的回收利用既可以实现沼气发电应用又可以减少能源的浪费^[27-29]。

双城市沼气工程设计日产沼气 1200 m^3 ，其中每日向用户输送 750 m^3 ，剩余全部用于沼气发电，沼气中甲烷的质量分数约为 60% ，其余为二氧化碳和水等物质，按 $60\% \text{CH}_4$ 含量计算 1 m^3 沼气燃烧放热为 23.85 MJ ，剩余沼气燃烧可产生热量 $Q_{\text{热}} = 10732.5 \text{ MJ}$ ，沼气发电与烟气回收所产生的余热利用率约为 45% ，则每天发电余热回收为 $Q_{\text{余}} = 0.45 \times Q_{\text{热}} = 4826.6 \text{ MJ}$ ^[30-33]。

表3 太阳能保证率为100%的集热器集热量

Table 3 Solar collector storage volume when guaranteed rate is 100%

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
倾斜辐射量 Tilt radiation/(MJ·m ² ·d ⁻¹)	10.27	13.98	17.95	18.12	18.59	18.20	16.87	16.11	16.7	14.90	11.98	8.96
总热量 Total heat/(MJ·d ⁻¹)	1581	2153	2765	2791	2862	2804	2598	2481	2576	2295	2122	1381

由公式 $W = P \cdot t$ 进行计算（式中： P 为功率，kW； t 为时间，h； W 为做功，kW·h；根据表2计算得出，为补充多损失的热量，在12、1、2月份应使沼气发电机组每日额外提供 372.2 、 369.4 和 $208.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电量进行热量补充。增温系统在其余月份均可满足沼气工程中温厌氧发酵的温度要求。

3 太阳能—发电余热系统增温应用试验及结果

该示范工程7月份进料，8月份开始启动增温调试，沼气发电机组利用每日产生沼气进行发电余热增温，对增温系统的增温效果进行测定，一次发酵罐体内的温度变化如图4所示。

由图4可以看出该工程在8月份对一次发酵罐进行增温调试，由于新进的发酵原料有一个堆沤自

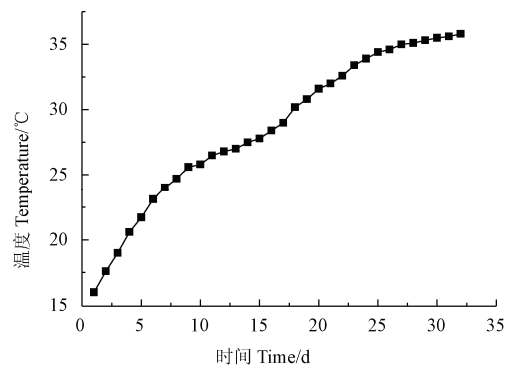


图4 太阳能—发电余热增温系统对一次发酵罐的增温效果
Fig.4 Effect of solar and power waste energy heating system on Primary fermentor

发热的过程，发酵罐内前期温度提升较快，当罐内温度到达 25°C 后升温速度逐渐放缓，后期由于沼气

产量较好, 发电机组回收热量增加, 温度提升略有加快, 大约 28 d 左右一次发酵罐内的整体温度提升到中温发酵水平 35℃, 物料的产气效果也达到最佳状态。由于另 2 个发酵罐的发酵原料是一次发酵罐的发酵后原料, 因此未进行相应温度测定。

4 结论及讨论

1) 哈尔滨双城市沼气工程全年月平均热量损失为 6 659.2 MJ, 太阳能—发电余热增温系统每月可以补充的热量为 7 017.6 MJ, 12、1、2 月份系统热量损失超出增温系统所提供热量, 每日需要补充的热量为 1.34、1.33、0.75 GJ。利用太阳能—发电余热增温系统对该工程的一次发酵罐体进行增温调试, 罐体内物料在 28 d 左右可达到中温发酵温度要求。

2) 本文针对北方寒冷地区沼气工程易受气候条件影响无法正常运行的情况, 吸收利用太阳能与沼气发电机组释放的热能, 设计并计算将吸收后的热能应用于沼气罐体增温的复合沼气增温系统。利用北方平原地区优质太阳能资源的特点, 将沼气发电机组的发电余热与太阳能热水系统的热量进行回收, 减少了发电机组热能的浪费, 并可通过控制发电机组的运行发电量, 对增温能量进行相应的调控。

当厌氧反应器在较高负荷下运行时, 沼气的温度波动不宜过大, 否则将影响厌氧产气过程, 使产气效率明显降低。因此, 沼气在寒冷地区的应用要考虑其发酵温度的稳定性。由于不同沼气工程的发酵工艺如进出料连续性、物料发酵次数、发酵温度等条件的不同, 采用同种增温系统的增温保温效果也不尽相同, 所以沼气工程中增温保温的工艺设计离不开对工程的实际综合考虑。本文的示范工程采用沼气发电余热与太阳能系统并行进行联合增温, 不仅降低了单一的增温方式下热利用效率低和运行成本高等缺点, 在适应性、节能性、运行持久性等方面同时具有明显优势, 是一种值得推广的热增温形式。该系统可为寒冷气候条件下沼气工程的常年稳定运行提供保障。

[参 考 文 献]

[1] 日本能源学会. 生物质和生物能源手册[M]. 北京: 化工出版社, 2007.

[2] 罗光辉, 盛力伟, 丁建华, 等. 大中型沼气工程保温增温方法研究[J]. 农机化研究, 2011(9): 227—231.

Luo Guanghui, Sheng Liwei, Ding Jianhua, et al. Research on the large and medium-sized methane project's keep and increa temperature's method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(9): 227—231. (in Chinese with English abstract)

[3] El-Mashad Hamed M, van Loon Wilko K P, Grietje Zeeman, et al. Design of a Solar thermophilic anaerobic reactor for small farms[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(3): 345—353.

[4] 樊京春, 赵永强, 秦世平. 中国禽畜养殖场与轻工业沼气技术指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[5] Massé D I, Masse L, Xia Y, et al. Potential of low-temperature anaerobic digestion to address current environmental concerns on swine production[J]. Waste Management Research, 2010, 88(13): 112—120.

[6] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[7] 周孟津, 张榕林, 蔺金印. 沼气实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[8] 蒲小东, 邓良伟, 尹勇, 等. 大中型沼气工程不同加热方式的经济效益分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 281—284.

Pu Xiaodong, Deng Liangwei, Yin Yong, et al. Economic benefit analysis on large and middle-scale biogas plants with different heating methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 281—284. (in Chinese with English abstract)

[9] 徐振军. 复合发电系统的沼气热泵供能特性研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 144—147.

Xu Zhenjun. Energy Supply Performance for Biogas Heat Pump with Generator[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 144—147. (in Chinese with English abstract)

[10] 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.

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 (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 268—273. (in Chinese with English abstract)

[11] 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.

Han Jie, Xiang Xin, Li Xiang. Mesophilic running of dry fermentation biogas system without heating device and its effects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 215—219. (in Chinese with English abstract)

[12] Alvarez René, Lidén Gunnar. The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude[J]. Bioresource technology, 2008, 99(15): 7278—7284.

[13] 刘建禹, 樊美婷, 刘科. 高寒地区沼气发酵料液加热增温装置传热特性[J]. 农业工程学报, 2011(2): 298—301.

Liu Jianyu, Fan Meiting, Liu Ke. Heat transfer characteristics of warming methane fermentation liquid heating device in alpineregion[J]. Transactions of the

- Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011(2): 298—301.
- [14] 王丽丽, 杨印生, 王忠江. 北方大型沼气工程加热保温系统优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011(4): 1183—1188.
Wang Lili, Yang Yinsheng, Wang Zhongjiang. Optimization on heating and insulating system for northern large-scale biogas project[J]. Journal of Jilin University, 2011(4): 1183—1188. (in Chinese with English abstract)
- [15] Lubken M, Wicherna M, Schlattmann M, et al. Modeling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops[J]. Water Research, 2007, 41(48): 4085—4096.
- [16] Börjesson Pål, Mattiasson Bo. Biogas as a resource-efficient vehicle fuel[J]. Trends in biotechnology, 2008, 26(1): 7—13.
- [17] Niclas Krakat, Westphal A, Schmidt S, et al. Governs methanogen population dynamics biomass: thermophilic temperature anaerobic digestion of renewable[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(6): 1842—1850.
- [18] 白莉, 迟明书, 周学志, 等. 严寒地区户用沼气池冬季使用保温增温技术研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(6): 54—57.
Bai Li, Chi Mingshu, Zhou Xuezhi, et al. Research on heat insulation and temperature increasing technologies for household biogas pool in severe cold region in winter[J]. Building Science, 2009, 25(6): 54—57. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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, 2012, 40(2): 292—296.
Pei Xiaomei, Shi Huixian, Zhu Hongliang et al. Heating system of high temperature biogas digester by solar energy and methane liquid heat recovery heat pump[J]. Journal of Tongji University, 2012, 40(2): 292—296. (in Chinese with English abstract)
- [20] 石惠娴, 王卓, 朱洪光, 等. 太阳能-空气源热泵耦合式沼气池加温系统设计[J]. 建筑节能, 2010, 38(10): 29—31.
Shi Huixian, Wang Zhuo, Zhu Hongguang, et al. Design on heating systems combined with air-source heat pump and solar energy of the rural biogas digester[J]. Building Energy Efficiency, 2010, 38(10): 29—31. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王永波, 张治, 周秀杰. 哈尔滨气温的长期变化及基本态特征[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 492—497.
Wang Yongbo, Zhang Zhi, Zhou Xiujie. Characteristics of secular change and base state of temperature in Harbin[J]. 2012, 31(2): 492—497. (in Chinese with English abstract)
- [22] www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qsjcx/[Z/OL].
- [23] 裴晓梅, 张迪, 石惠娴, 等. 太阳能地源热泵沼气池加热系统集热面积优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 122—128.
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. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郭平生, 唐贤健, 李天华. 利用太阳能沼气的分布式冷热电供能系统研究[J]. 鲁东大学学报, 2010, 26(1): 75—78.
Guo Pingsheng, Tang Xianjian, Li Tianhua. Study on the distributive energy supply system with CCHP using solar energy and biogas[J]. Ludong University Journal, 2010, 26(1): 75—78. (in Chinese with English abstract)
- [25] 魏兆凯, 刘凯, 王晓洲. 沼气池太阳能增温技术研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(5): 212—217.
Wei Zhaokai, Liu Kai, Wang Xiaozhou. Research on marsh gas pond solar energy technology temperature[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(5): 212—217. (in Chinese with English abstract)
- [26] [https://eosweb.larc.nasa.gov/\[Z/OL\]](https://eosweb.larc.nasa.gov/[Z/OL]).
- [27] 刘显明, 李和平, 俞小银. 沼气发电技术工艺及余热利用技术[J]. 华电技术, 2009(2): 74—79.
Liu Xianming, Li Heping, Yun Xiaoyin. Biogas power generation technology and waste heat utilization technology[J]. Huadian Technology, 2009(2): 74—79. (in Chinese with English abstract)
- [28] 吴正舜, 吴创之, 马隆隆, 等. 1MW木粉气化发电系统的运行特性分析[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 390—393.
Wu Zhengshun, Wu Chuangzhi, Ma Longlong, et al. The performance and analysis of 1MW electric energy generation system by bio-mass gasification[J]. Acta Energy Solaris Sinca, 2003, 24(3): 390—393. (in Chinese with English abstract)
- [29] 龙红明. 沼气发电机组综述[J]. 广东化工, 2011, 38(6): 192—193.
Long Hongming. Review of biogas generator[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(6): 192—193. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李勇, 王艳红, 张炳文. 基于不同标准的锅炉热效率及发电准煤耗修正方法[J]. 动力工程学报, 2012, 32(4): 273—281.
Li Yong, Wang Yanhong, Zhang Bingwen. Correction of boiler thermal efficiency and standard coal consumption rate based on different standards[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(4): 273—281. (in Chinese with English abstract)
- [31] 金红光, 郑丹星, 徐建中. 分布式冷热电联产系统装置及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 133—134.
- [32] 王凤祥, 李学刚, 蒋贺. 振动炉排秸秆锅炉燃烧优化

调整的正交试验及分析[J]. 吉林电力, 2010, 38(5): 37—39, 47.

Wang Fengxiang, Li Xuegang, Jiang He. Orthogonal test and analysis of combustion adjustment optimization for vibrating stoker straw boiler[J]. Jilin Electric Power, 2010, 38(5): 37—39, 47. (in Chinese with English abstract)

[33] 林敏. 北方寒冷地区居住区太阳能资源利用[J]. 山西建筑, 2010, 36(19): 237—238.

Lin Min. The utilization of solar energy in residential districts in the north cold areas of China[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(19): 237—238. (in Chinese with English abstract)

Engineering design of solar and power waste energy heating system for biogas project

Kou Wei^{1,2}, Zheng Lei², Qu Jingxia², Shao Lijie², Zhang Dalei², Pei Zhanjiang¹, Liu Qingyu^{1*}

(1. *Shenyang Agricultural University Engineering college, Shenyang, 110136 China;*

2. *Liaoning Institute of Energy Resource, Yingkou 115003, China*)

Abstract: Biogas projects have been rapidly developed in China due to their energy efficiency and environmental benefit. However, the microorganism in fermentor is inactivate and biogas production will be dramatically declined if the temperature in biogas fermentor is unstable or is too low. Sofar many biogas projects only operate stably in Southern China. It is difficult to expend the larger and medium-sized biogas projects in Northern China. Because the thermal insulation in this region cannot support the biogas fermentation. In this study, a set of heating system that composed of solar and power waste energy were tested. This technology was demonstrated for a middle temperature fermentation project in Harbin Shuangcheng city. The design principle is discussed in this paper. Some key parameters including fermentation heat load, generator heat recovery utilization rate, and thermal efficiency of solar collector unit were calculated theoretically to verify whether this heating system can meet the middle temperature condition. The results showed that averaged daily heat loss for this biogas project was 6659.2MJ during the whole year. Solar energy- power waste heating system used in intermediate temperature anaerobic fermentation can store averaged 7017.6 MJ heat per day. Because of larger temperature difference during the year in Northern China, adding heat and losing heat of the biogas project were analyzed for each month through the comparison analysis of heat supplement and loss. The biogas project needs additional 372.2, 369.4 and 208.3 kWh power from the biogas generator in December, January and February to ensure the project stable operation. In remaining months, the heating system was able to meet the middle temperature for the project. Further testing for the temperature raising effects by this heating system was conducted in August. Results showed that the fermentation raw material in primary fermentor can achieve 35°C after 28 days' heating, and satisfy the middle temperature condition. With high quality solar energy resources in Northern plains, combining the solar energy and biogas power generation waste energy is bale to reduce the generator heat waste and regulate the heating system by controlling the biogas generator. The combined heating system in this biogas project can reduce the investment system. It is expected that this paper will assist designing a heating system to for the stable operation of biogas projects in Northern China.

Key words: solar energy, biogas, design, power waste heat, heating system

(责任编辑: 秦学敏)