

太阳能-地源热泵沼气池加热系统集热面积优化*

裴晓梅¹ 张迪² 石惠娴² 朱洪光² 雷勇² 王卓²

(1. 同济大学机械工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学现代农业科学与工程研究院, 上海 200092)

【摘要】 针对集中供气型沼气工程加温需求和地源热泵式系统存在地下侧土壤温度回补问题,提出了太阳能-地源热泵复合式沼气池加热系统(ISGSHPs),并从经济和环保两方面将该系统与地源热泵和电热膜加热系统进行分析比较得出系统的最优太阳能集热面积。结果表明:最优集热面积主要与每年总加热时间、电价有关。系统最经济加热时间段为每年10月至次年5月;在电价低于0.5元/(kW·h)时,ISGSHPs不如单独的地源热泵系统经济;在电价0.5~1.0元/(kW·h)和高于1.0元/(kW·h)时,ISGSHPs的最优集热面积分别为24 m²和32 m²。目前,最合理的太阳能投资面积为24 m²,生命周期为20年的ISGSHPs相对地源热泵和电热膜系统总节约费用分别为10 830元和59 244元,CO₂减排量约为74 t和266 t,有较大的投资潜力。

关键词: 太阳能集热器 地源热泵 沼气 生命周期节约费用法 优化

中图分类号: S214.9; TK529 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0122-07

Collector Area Optimization of Integrated Solar and Ground Source Heat Pump System for Heating Biogas Digester

Pei Xiaomei¹ Zhang Di² Shi Huixian² Zhu Hongguang² Lei Yong² Wang Zhuo²

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Modern Agricultural Science and Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract

To address the problem of heating biogas project and compensating the lost ground temperature of ground source heat pump system, the integrated solar and ground source heat pump system (ISGSHPs) was presented for heating biogas digester, and the economic and environmental performance of ISGSHPs with that of ground source heat pump and electricity heat membrane system were compared to obtain the optimal solar collector area. The results show that the optimal solar collector area is related to annual total running hours and electricity price. The most economic running period is from October to the next May; ground source heat pump system is more economical than ISGSHPs when electricity price is lower than 0.5 Yuan per kW·h; when the electricity price is between 0.5 and 1.0 Yuan per kW·h or higher than 1.0 Yuan per kW·h, the optimal solar collector area of ISGSHPs is 24 m² and 32 m² respectively. At present, the optimum collector area is 24 m², under which total cost saving in 20 years is 10 830 Yuan and 59 244 Yuan, and carbon dioxide emissions could be reduced about 74 t and 266 t by comparison ISGSHPs with ground source heat pump and electricity heat membrane system. Therefore, this system has potential to develop.

Key words Solar collectors, Ground source heat pump, Biogas, Life-cycle cost-saving method, Optimization

收稿日期: 2010-05-21 修回日期: 2010-08-20

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAD4B05、2008BAJ08D0)、上海市科委科技发展基金项目(09391910700)和上海市科委项目(07DZ12050)

作者简介: 裴晓梅, 高级工程师, 博士生, 主要从事供热、供燃气、通风及空调工程研究, E-mail: peixiaomei2004@163.com

通讯作者: 石惠娴, 副教授, 博士, 主要从事农业生物环境与能源工程研究, E-mail: huixian_shi@mail.tongji.edu.cn

引言

目前,沼气工程产业化最大的难题之一是保证冬季低温环境下正常满负荷产气,这对大中型集中供气型沼气工程尤为关键。解决这一难题的有效途径就是对沼气池进行加热,对沼气常温(10~26℃)、中温(28~38℃)和高温(46~60℃)发酵的研究表明中温发酵具有较好的经济性,最适温度为35℃^[1-3];文献[4~5]分析了各种常见沼气池加热方式的优缺点,并针对中型沼气工程成功开发应用了地源热泵式沼气池加热系统。但地源热泵系统也有潜在的问题。在夏季制冷冬季供热的空调领域,冬夏季取排热不平衡会影响地源热泵系统长期稳定运行^[6-7]。而沼气工程冬季运行热负荷比夏季极端高温天气时所需要的冷负荷高得多,中温发酵沼气池甚至不需要冷负荷,因此,沼气工程中取排热不平衡造成的问题将更加严重。

解决途径:一是采用“辅助热源+地源热泵”的方式分担冬季的部分热负荷,二是采用一定的热源对地下土壤温度进行回补。太阳能不仅能够从上述两种途径解决问题,而且在沼气加热中研究、应用广泛。Alkhamis T M^[8]等对太阳能加热实验室规模沼气池的研究得出系统的固有投资回报率为32.7%;孙静^[9]等研究了在严寒地区利用太阳能加热沼气池的可行性。因此,应该首先倡导使用一次可再生清洁能源太阳能,达到更好的节能减排效果。但太阳能能源密度低和不稳定的特性决定它不能单独供热。考虑两种系统的优缺点,针对大中型集中供气型沼气工程,本文提出太阳能-地源热泵复合式沼气池加热系统(ISGSHPs)。

目前,许多科研人员也在探索太阳能与热泵系统的结合方式和运行特性^[10-12]。但已有的文献对系统最优太阳能集热面积的研究却比较少,普遍采用最大集热面积乘以太阳能保证率来计算集热面积,而各区域推荐的太阳能保证率变化范围较大,不同运行模式和辅助热源也影响太阳能保证率^[13]。选择不合适的太阳能保证率会影响整个系统的经济性与环保效益,因此,本文将从整个系统的经济性和环保效益来计算太阳能-地源热泵复合式沼气池加热系统的最优集热面积。

1 太阳能-地源热泵复合式沼气池加热对象与系统

以上海市崇明县港沿镇合兴村沼气集中供气示范工程为研究对象。沼气池是该工程核心部分,有效容积 $V=69.3\text{ m}^3$ 。在池底和池壁加7 cm厚闭泡

聚苯泡沫板的保温隔热材料,沼气池顶部覆盖塑料薄膜保温。另外,为了加快料液热传递,改善加温效果,在沼气池内安装了搅拌装置。为了进料的均匀和充分利用上清液的余热,在沼气池的前部设置混料池,后面设置沉淀池,从沉淀池出来的上清液经循环管流入混料池与进料混合,每天进500 kg的猪粪,进料时间为10 min。

太阳能-地源热泵复合式沼气池加热系统(ISGSHPs)主要由太阳能集热系统、中转水箱、池内换热盘管系统、地源热泵机组、地下盘管换热系统以及管道和阀门等组成,如图1所示。

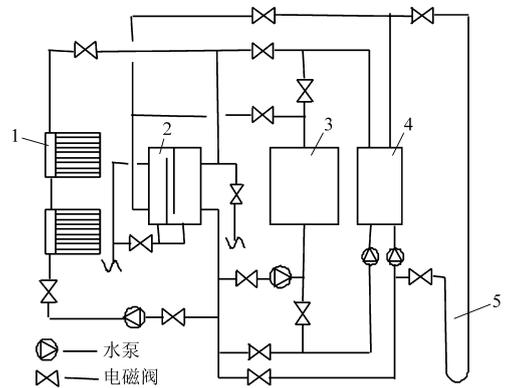


图1 太阳能-地源热泵复合式加温系统

Fig.1 Integrated solar and ground source heat pump system

1. 太阳能集热器 2. 水箱 3. 发酵池 4. 热泵机组 5. U型管

它可以实现太阳能直接供热模式、地源热泵二次加热模式、太阳能热泵模式、地源热泵单独加热模式和埋管侧土壤温度回补模式,其中地源热泵二次加热模式是当天气不是很好时,经集热器加热蓄存在水箱的水温(30~40℃)不能满足直接加热的温度要求,利用地源热泵机组对其再加热;太阳能热泵模式是水箱温度(15~30℃)较低时,关闭热泵的地下换热系统,太阳能集热器为地源热泵提供低位的热源。本系统优先利用太阳能,沼气池加热时首先采用太阳能直接供热和地源热泵二次加热模式,在发酵池内温度仍小于设定温度(35℃)时,采用太阳能热泵模式和地源热泵模式。在夏季利用太阳能对埋管侧土壤温度进行回补保证系统长期有效稳定的运行。上述5种模式的切换通过自制的单片机自动控制技术实现。

2 太阳能集热面积的优化

在实际集中供气型沼气工程热负荷计算的基础上,计算最大太阳能集热面积,并对太阳能-地源热泵复合式加热系统(ISGSHPs)相对地源热泵加热系统和电热膜加热系统进行经济效益和环保效益分析,得出不同电价下太阳能最优集热面积和目前最

合理的投资面积。

2.1 沼气工程热负荷

忽略沼气带走的少量热量以及发酵产生的少量生物热^[14],集中供气工程每天所需的热负荷主要由沼气池向环境的散热量、添加的物料升温所需的热量和补偿回流过程损失的热量组成。

沼气池散热量为

$$Q_s = AK\Delta t_1 \quad (1)$$

$$\text{其中 } K = \frac{1}{R} = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$$

式中 A ——散热面积, m^2

K ——总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

Δt_1 ——发酵温度与环境温度的差值, $^\circ\text{C}$

R ——总热阻, $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$

α_1, α_2 ——发酵池内外壁与沼液的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

λ_1, λ_2 ——发酵池壁和保温材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

δ_1, δ_2 ——发酵池壁和保温层厚度, m

加热进料所需热量和补偿回流损失的热量计算公式为

$$Q_F = mC_p\Delta t_2 + m_2C_p\Delta t_3 \quad (2)$$

其中 $C_p = 4.17(1 - 0.00812T_s)$

式中 Q_F ——料液所需加热量, kJ/d

m_1, m_2 ——进料、回流的质量流量, kg/d

$\Delta t_2, \Delta t_3$ ——进料温升、回流温度损失量, $^\circ\text{C}$

C_p ——投粪料液的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

T_s ——料液含固率

冬季,沼气池干固体含量(料液含固率)在 8% ~ 10% 之间;夏季,在 6% ~ 8% 之间,本工程料液含固率取 8%。发酵原料为猪粪,含水率为 74%,每天进料 500 kg;猪粪进入沼气池前需要用 1 125 kg 回流上清液稀释。假设上清液回流的温度损耗为 3 $^\circ\text{C}$ 。根据上海市崇明县不同月份气温 t_1 和进料温度 t_2 ,由上述传热学公式计算系统日平均负荷如表 1 所示。

表 1 不同月系统的日平均负荷

Tab. 1 Average daily heat load in different months

参数	月份							
	10	11	12	1	2	3	4	5
平均气温 $t_1/^\circ\text{C}$	17.7	12.2	5.3	3.3	4.0	7.9	13.0	18.7
进料温度 $t_2/^\circ\text{C}$	18	15	8	5	5	10	15	19
池体散热 $Q_s/\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$	72.31	95.30	124.14	132.50	129.57	113.27	91.96	68.13
料液负荷 $Q_F/\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$	49.44	55.69	70.25	76.49	76.49	66.09	55.69	47.36
总负荷 $Q/\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$	121.75	150.99	194.39	208.99	206.06	179.36	147.65	115.49

2.2 最大集热面积的计算

本设计拟采用强制循环加热系统,集热面积的计算式为

$$A_c = Qf / [J_T\eta(1 - \eta_L)] \quad (3)$$

式中 A_c ——太阳能集热面积, m^2

Q ——太阳能热水系统的热负荷, MJ/d

J_T ——倾角等于当地纬度时,倾斜表面平均日太阳总辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

f ——太阳能保证率

η ——集热机日平均集热效率

η_L ——管路及热水箱的热损失率,一般取 0.2 ~ 0.3

当集热器的方位角偏于正南和倾角不等于当地纬度时,集热器面积计算式为

$$A_b = A_c / r \quad (4)$$

式中 A_b ——补偿后的集热面积, m^2

r ——补偿比

本设计采用真空管集热器,日平均集热效率为

50%;方位角 0 $^\circ$ (朝向正南),偏重于冬季使用,倾角取 40 $^\circ$,查文献[15]补偿比为 99%;管路及热水箱的热损失率取 0.2。由式(3)~(4)得出不同月份太阳能保证率为 100%的集热器面积如表 2 所示,从表中可以看出最大集热面积 46.27 m^2 。

最大集热面积可以满足除阴雨雪天气以外的最不利工况,但最大集热面积不是最优集热面积。因为最不利工况出现的概率相对较小,地源热泵可以承担部分负荷;另外,最大集热面积必然会增加系统的初投资和运行管理费用。本文通过计算不同集热器面积下 ISGSHPs 生命周期内的经济效益和环保效益来确定最优集热面积。

2.3 经济效益分析

目前,评价太阳能热水系统经济性的方法主要有投资回收年限法、综合能源价格法和生命周期节约费用法(f-CHAR)^[16-17]。生命周期节约费用法采用现金流的经济分析方法,将寿命期内每年的花费和节省燃料的资金按预估的市场贴现率和通货膨胀

表 2 太阳能保证率为 100% 的集热器面积
Tab.2 Solar collector area when guaranteed rate is 100%

参数	月份							
	10	11	12	1	2	3	4	5
总负荷 $Q/\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$	121.75	150.99	194.39	208.99	206.07	179.36	147.64	115.49
倾斜辐射量 $J_T/\text{MJ}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	13.56	12.33	11.44	11.29	11.92	12.78	13.36	13.97
集热面积 A_c/m^2	22.46	30.61	42.49	46.27	43.22	35.10	27.64	20.68

(紧缩)率折算为现值,可以动态地计算太阳能热水系统在寿命期内相对常规能源系统节省的费用。

目前,生命周期节约费用法没有规范的用符号表示的计算公式,并且计算总节省值的文字表达式有错误。因此,本文对生命周期节约费用法进行修正并采用修正后的方法来计算 ISGSHPS 相对地源热泵和电热膜加热系统节省的费用。地源热泵和电热膜加热系统的使用寿命取 15、20 年^[18]。

2.3.1 修正后的生命周期节约费用法

生命周期节约费用包括太阳能节省值(运行费用的节省值)和太阳能系统与常规能源系统初投资差值。

系统年运行费用为

$$M = M_r + M_d + M_w + M_s + M_j \quad (5)$$

式中 M ——年运行费用,元

M_r ——燃料费,元 M_s ——财产税,元

M_d ——偿还贷款费,元

M_w ——设备维护与保险费用,元

M_j ——所得税节省资金,元

年太阳能节省值等于常规能源系统年运行费减去太阳能系统年运行费。当太阳能系统配有与常规能源系统相同的辅助加热器时,不计 M_d 、 M_s 和 M_j , 所得到的简化的年太阳能节省值为

$$S = S_r + S_w \quad (6)$$

其中 $S_r = Q_n P / \eta_f$

式中 S ——年太阳能节省值,元

S_r ——年燃料节省值,元

S_w ——非辅助加热部分年维修与保险费用节省值,元

Q_n ——年太阳能系统节省的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$

P ——辅助能源价格,元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$

η_f ——辅助能源转换效率

考虑市场贴现率和通货膨胀(紧缩)率的影响,生命周期节约费用为

$$S_z = \begin{cases} \sum_{k=1}^N \left[\sum_{j=1}^n S_j (1+d-i)^{-k} \right]_K - (C_s - C_e) & (i \neq d) \\ \sum_{k=1}^N \left[\sum_{j=1}^n S_j (1+d)^{-1} \right]_K - (C_s - C_e) & (i = d) \end{cases} \quad (7)$$

式中 S_z ——生命周期节约费用,元

K ——代表分析的第 K 年

N ——经济分析周期,年

j ——式(5)中的第 j 项

n ——式(5)中需要考虑的项数

C_s ——太阳能系统的初投资,元

C_e ——常规能源系统的初投资,元

当每年太阳能节省值相同时,生命周期节约费用可简化为

$$S_z = \begin{cases} \sum_{j=1}^n S_j \frac{1}{d-i} \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^N \right] - (C_s - C_e) & (i \neq d) \\ \sum_{j=1}^n S_j \frac{N}{1+d} - (C_s - C_e) & (i = d) \end{cases} \quad (8)$$

2.3.2 计算与分析

太阳能-地源热泵复合式加热系统比较复杂,计算其生命周期节约费用涉及的参数也比较多。本系统中热泵模式的性能系数 COP 理论上大于单独的地源热泵系统 COP,根据文献[4]取最小值 2.7,其他主要经济参数见表 3。不同集热面积下的太阳能系统初投资和生命周期为 15 年和 20 年的维修和保险费用如图 2 所示。

本文加热时间设计为每年 11 月至次年 3 月、每年 11 月至次年 4 月、每年 10 月至次年 4 月和每年 10 月至次年 5 月 4 个不同的时间段。在上海电价 0.61 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,不同时间段 ISGSHPS 相对地源热泵系统和电热膜系统每年节约的电费如图 3 所示。

表 3 主要的经济参数

Tab.3 Main economic parameters

经济参数	集热器价格 /元· m^{-2}	水箱等设备 /千元	能源效率 /%	生命周期 /年	热泵初投资 /万元	电热膜初投资 /万元	维修等费用 /%	维修等增长率 /%	上海电价 /元· $(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	电价增长率 /%	市场贴现率 /%
数值	600	4.47 ~ 10.33	95	15/20	2.83	1.67	1	6	0.61	4	6

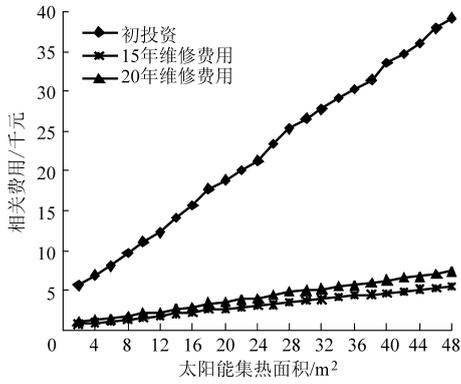
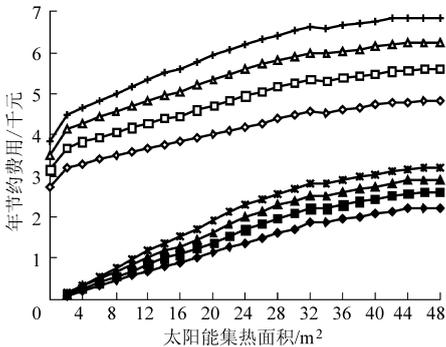


图2 太阳能系统初投资及生命周期维修费

Fig.2 Initial investment and life-cycle maintenance cost of the solar system

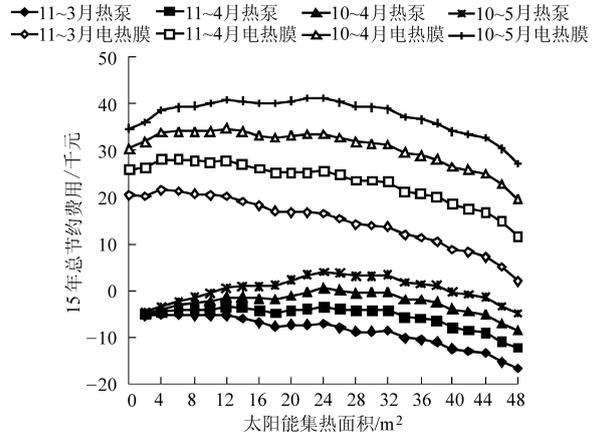
◆11~3月热泵 ■11~4月热泵 ▲10~4月热泵 ▣10~5月热泵
◇11~3月电热膜 □11~4月电热膜 △10~4月电热膜 ▣10~5月电热膜

图3 相对地源热泵和电热膜系统每年节约的电费
Fig.3 Annual cost saving compared to ground source heat pump and electricity heat membrane system

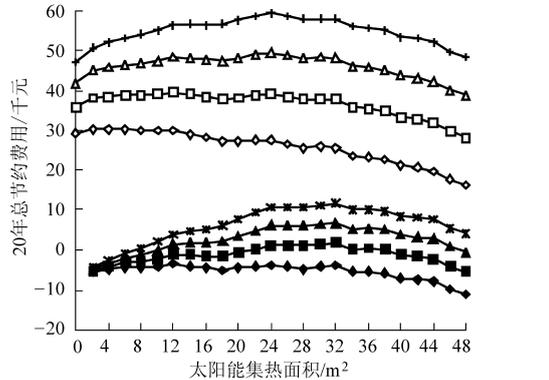
由图2和图3可以看出,尽管太阳能系统初期投资及生命周期维修费随着集热面积的增加而增加,但是相对地源热泵系统和电热膜系统的年节约电费也在增加,且增加加热时间更为经济。另外,各时间段间的年节约差值先增加后趋于稳定,这是由于初始时,增大集热面积带来的节约的费用增长率大于动力消耗费用的增长率;当集热面积增大到 34 m^2 时,部分月份的太阳能保证率达到了最大值100%,动力费用增长率加大。

随着集热面积的增加,ISGSHPs相对地源热泵系统和电热膜系统在不同加热时间段和生命周期下总的节约费用如图4和图5所示。

图4和图5说明随着集热面积的增加,无论相对地源热泵系统还是电热膜系统,生命周期总节约费用不是呈递增或递减趋势,而是呈阶段性的波动。另外,总节约费用和加热时间段有密切的关系。加热时间短于每年11月至次年4月时,ISGSHPs不如地源热泵系统经济;加热时间段为每年10月至次年4月和每年10月至次年5月时,总节约费用在集热面积为 24 m^2 和 32 m^2 时出现峰值。综合比较得出最优集热面积为 24 m^2 ,最经济的加热时间段为每年

图4 相对地源热泵和电热膜系统15年总节约费用
Fig.4 Total cost saving of 15 years compared to ground source heat pump and electricity heat membrane system

◆11~3月热泵 ■11~4月热泵 ▲10~4月热泵 ▣10~5月热泵
◇11~3月电热膜 □11~4月电热膜 △10~4月电热膜 ▣10~5月电热膜

图5 相对地源热泵和电热膜系统20年总节约费用
Fig.5 Total cost saving of 20 years compared to ground source heat pump and electricity heat membrane system

10月至次年5月。此时,太阳能系统初期投资21310元,生命周期15年和20年相对地源热泵系统节约的总费用分别为4041元和10830元,相对电热膜系统节约的总费用分别为41237元和59244元。

图6反映了不同电价下加热时间为每年10月至次年5月时,ISGSHPs相对地源热泵系统20年总节约费用随集热面积的变化。由图6得出在电价低于 $0.5\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,ISGSHPs不如单独的地源热泵系统经济;电价在 $0.5\sim 1.0\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,最优集热面积为 24 m^2 ;电价高于 $1.0\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,最优集热面积为 32 m^2 。在电价 $1.2\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,集热面积为 24 m^2 时的总节约费用为45805元,集热面积为 32 m^2 时总节约费用为54718元。这说明太阳能-地源热泵复合式加热系统在一定条件下具有很大的投资潜力。

2.4 环保效益分析

(1) 系统一次能源消耗

$$H = W' / (\eta_1 \eta_2) \quad (9)$$

式中 H ——系统一次能源消耗,kJ

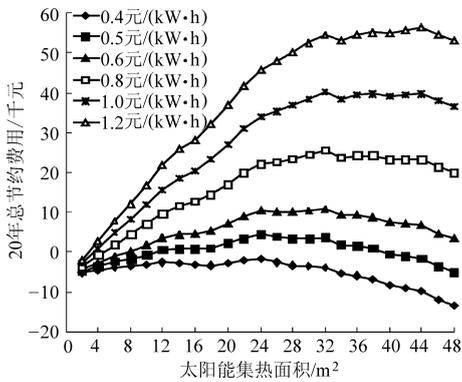


图 6 不同电价下相对地源热泵 20 年总节约费用

Fig. 6 Total cost saving of 20 years compared to ground source heat pump system at different electricity prices

W' ——系统实际功耗, kW·h

η_1 ——发电效率, 火力发电取 35%

η_2 ——输配电效率, 取 90%

(2) 一次能源利用系数

供热季节, 不论何种加温方式均消耗一次能源, 采用能源利用系数来反映不同加温方式的能量转化效率具有可比性。一次能源利用系数为

$$E = Q/H \quad (10)$$

式中 E ——一次能源利用系数

(3) 节能率

根据要比较的两种系统的一次能耗, 以另一种系统的一次能耗为基础, 可以算出节能率为

$$\eta_E = (H_2 - H_1)/H_2 \times 100\% \quad (11)$$

式中 η_E ——节能率, %

(4) 太阳能-地源热泵复合系统的 CO₂ 减排量

为

$$M_{CO_2} = (H_2 - H_1)N/(W\eta_n)F_{CO_2} \times 44/12 \quad (12)$$

式中 M_{CO_2} ——系统寿命期内二氧化碳减排量, kg

W ——标准煤热值, 29.308 MJ/kg

F_{CO_2} ——碳排放因子, 0.866

η_n ——常规能源水加热装置的效率, 95%

式(9)~(12)计算出地源热泵和电热膜系统的年一次能源消耗为 4.97×10^{10} J 和 1.342×10^{11} J, 一次能源利用系数为 0.81 和 0.30。不同集热面积下 ISGSHPS 的年一次能源消耗、一次能源利用系数以及相对地源热泵系统和电热膜系统的节能率和 20 年 CO₂ 减排量如图 7 所示, 减排量参照次坐标 Y 轴刻度(右), 其他参照主坐标 Y 轴刻度(左)。

由图 7 得出年一次能源消耗随着集热面积的增加整体呈下降趋势, 其他参数则呈上升趋势。在集热面积为 32 m² 时各参数出现极值, 这是因为继续增加集热面积, 系统节省的能量有限, 而动力消耗却大

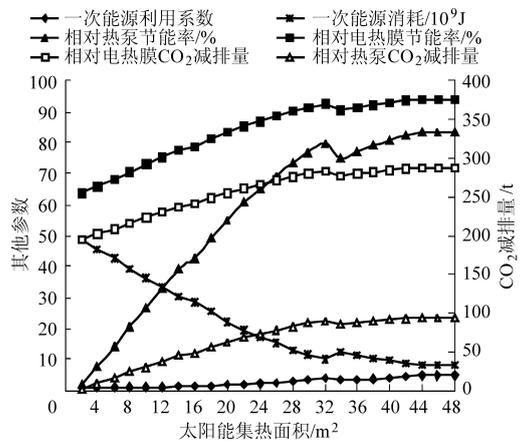


图 7 环保效益

Fig. 7 Performance of environment protection

大增加; 此时相对地源热泵系统和电热膜系统的节能率和 CO₂ 减排量约为 80%、92%、90t、280 t; 集热面积为 24 m² 时, 约为 65%、87%、74 t、266 t。这说明 ISGSHPS 具有很好的环保效益, 从经济效益和环保效益两方面综合考虑, 最优集热面积为 24 m²。

3 结论

(1) 提出了太阳能-地源热泵复合式沼气池加热系统, 采用生命周期节约费用法及修正方法, 得出该系统生命周期节约费用相对于地源热泵和电热膜系统都不是呈递增或递减变化趋势, 而是由于初期投资和运行管理费用增加呈现阶段性的波动。

(2) 最优集热面积不仅和太阳辐射条件、总负荷、集热器性能和系统生命周期有关, 还与每年总加热时间和电价有关。最经济的加热时间段为每年 10 月至次年 5 月。在电价低于 0.5 元/(kW·h) 时, ISGSHPS 不如单独的地源热泵系统经济; 在电价 0.5~1.0 元/(kW·h) 时, 最优集热面积为 24 m²; 在电价高于 1.0 元/(kW·h) 时, 最优集热面积为 32 m²。

(3) 相关环保效益参数在集热面积 32 m² 时出现峰值, 且和集热面积 24 m² 时相差不大, 20 年 CO₂ 减排量分别为 280 t 和 266 t。综合比较经济效益和环保效益, 最合理的太阳能投资面积为 24 m²。

(4) ISGSHPS 主要花费在初期投资上, 一年中利用的时间越长, 其效益就越高。因此建议把沼气池的加热和非冬季供热水及夏季供冷联系起来, 这不仅有利于防止夏季高温下的爆管现象, 延长系统生命周期, 还从产气、产热水和供冷等方面共同改善村民的生活; 同时利用热泵供冷和洗浴废热对地下侧土壤温度进行回补有助于工程的稳定运行。

参 考 文 献

- 1 朱洪光,陈小华,唐集兴.以互花米草为原料生产沼气的初步研究[J].农业工程学报,2007,23(5):201~204.
Zhu Hongguang, Chen Xiaohua, Tang Jixing. Pilot study on employing spartina alterniflora as material for producing biogas by biogasification[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 201~204. (in Chinese)
- 2 Bouallagui H, Haouari O, Touhami Y, et al. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(12): 2143~2148.
- 3 Zupancic G D, Ros M. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion[J]. Renewable Energy, 2003, 28(14): 2255~2267.
- 4 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 CSAE, 2010, 26(2): 268~273. (in Chinese)
- 5 Shi H X, Pei X M, Zhu H G, et al. How to compensate the lost temperature of the digester in cold climate[C]//Proceeding of the International Conference on Power Engineering, 2009, 3: 185~190.
- 6 何耀东,孟震.地源热泵长期有效发展的核心——夏冬季岩土体排取热量的动态平衡[J].暖通空调,2009,39(11): 74~76.
He Yaodong, Meng Zhen. Core of long term effective development of ground-source heat pump—dynamic heat balance of rock and soil between summer and winter[J]. HV&AC, 2009, 39(11): 74~76. (in Chinese)
- 7 Endoh N, Sasaki M, Tsuchiya T, et al. Analysis of soil temperature distributions in a geothermal heat-pump air-conditioning system[C]//Proceedings of the International Conference on Power Engineering, 2009, 3: 179~183.
- 8 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, 2009, 69(3): 239~247.
- 9 孙静,郑茂余,吴飞.严寒地区利用太阳能加热制沼气的试验研究[J].可再生能源,2008,26(1):46~49.
Sun Jing, Zhang Maoyu, Wu Fei. Experiment of producing methane with solar heating in cold area[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(1): 46~49. (in Chinese)
- 10 Yang W B, Shi M H, Dong H. Numerical simulation of the performance of a solar-earth source heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17~18): 2367~2376.
- 11 Ozgener O, Hepbasli A. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(1): 101~110.
- 12 Ozgener O, Hepbasli A. A parametrical study on the energetic and exergetic assessment of a solar-assisted vertical ground-source heat pump system used for heating a greenhouse[J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 11~24.
- 13 支晓晔,刘燕,刘蓉,等.燃气与太阳能联合供热系统集热器面积优化[J].煤气与热力,2009,29(2):A15~A18.
Zhi Xiaoye, Liu Yan, Liu Rong, et al. Optimization of collector area of gas and solar heating system[J]. Gas & Heat, 2009, 29(2): A15~A18. (in Chinese)
- 14 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(18): 4085~4096.
- 15 GJB 960—2006 太阳能集中热水系统选用与安装[S].
- 16 Beckman W A, Klein S A, Duffie J A. Solar heating design by the f-chart method[M]. New York: John Wiley and Sons Co., 1977.
- 17 祁冰,王志峰.我国典型城市太阳热水系统热及经济性能分析[J].太阳能学报,2003,24(6):801~809.
Qi Bing, Wang Zhifeng. The thermal and economical analysis of solar water heating system of several typical cities of China [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2003, 24(6): 801~809. (in Chinese)
- 18 白莉,石岩,齐子妹.我国北方农村沼气冬季使用技术研究[J].中国沼气,2008,26(1):37~41.
Bai Li, Shi Yan, Qi Zimei. Digester heating and insulation technology for biogas utilization in winter of north China[J]. China Biogas, 2008, 26(1): 37~41. (in Chinese)