

# 太阳能 - 空气源热泵耦合式沼气池加温系统设计 \*

石惠娴<sup>1</sup>, 王卓<sup>1</sup>, 朱洪光<sup>1</sup>, 雷勇<sup>1</sup>, 张迪<sup>1</sup>, 裴晓梅<sup>2</sup>

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

**摘要:** 针对 8 m<sup>3</sup> 沼气发酵池设计了一套空气源热泵 - 太阳能耦合式加温系统,可以根据不同天气切换运行太阳能、太阳能空气源热泵和空气源热泵 3 种热源模式,以满足沼气池内的加温需求。计算了沼气池加温系统的热负荷,将该系统与电热膜加温系统和地源热泵系统进行了比较,可以分别增加投资效益净现值 11 866.9 元和 4 726.7 元,多投资部分的投资回收期分别为 8 年和 4 年。可见,对于小型沼气池工程,采用空气源热泵辅助太阳能热水系统,从节能性与经济性来讲,是一种适宜推广的热源形式。

**关键词:** 沼气池; 空气源热泵; 太阳能; 加温系统; 经济性分析

**中图分类号:** S216.4 ;TK529 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2010)10-0028-04

## Design on Heating Systems Combined with Air-source Heat Pump and Solar Energy of the Rural Biogas Digester

SHI Hui-xian<sup>1</sup>, WANG Zhuo<sup>1</sup>, ZHU Hong-guang<sup>1</sup>, LEI Yong<sup>1</sup>, ZHANG Di<sup>1</sup>, PEI Xiao-mei<sup>2</sup>

(1.Modern Agricultural Science and Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2.College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A heating system combined with air-source heat pump and solar energy was designed for an 8m<sup>3</sup> fermentation reactor. In order to meet the heat load, it can be switched for different patterns including solar energy powered mode, solar powered air-source heat pump mode and air-source heat pump mode according to different weathers. Heat load was calculated based on the characteristics of the digester. Compared with the electro-thermal film heating system and ground source heat pump system, this system increases investment returns and net present value of 23190.2 yuan and 7611.9 yuan respectively. Meanwhile, the recycling extended payback period could be 8 years and 4 years individually. For energy savings and economical availability, it has broad prospects in the future.

**Key words:** biogas digester; air-source heat pump; solar energy; heating system; economics and availability

## 0 引言

温度是影响沼气池厌氧发酵产气的重要因素,根据发酵温度的不同,分为高温(50~65℃)、中温(20~45℃)、低温(小于20℃)以及常温发酵(随温度变化)<sup>[1-2]</sup>。

Zennaki-Bensouda 等人发现对于沼气发酵过程,必须保持温度的稳定。Alvarez 等人研究表明,温度的波动会降低发酵池沼气的产量<sup>[3]</sup>。高温发酵有很多优点,如新陈代谢率高,较容易破坏病原体和原料种子。但高温发酵也有很多弊端,相对于中温发酵稳定性差。同时,高温发酵系统比中温发酵所需能量高<sup>[4]</sup>。因此,为了使发酵池有更好的产气率和更稳定的运行工况,设计一套合理的有针对性的加温系统十分必要。

目前沼气池加温方式有很多,其中常见的加温方式包括电热膜加温、太阳能加温、沼气发电余热加温等方式。电热膜加温技术就是在沼气池外表面敷设一

层电热膜,然后再敷设一定厚度的保温层以达到增温和保温的目的。但这种方法以消耗高品位电能为代价,节能性、社会性不理想<sup>[5]</sup>;太阳能加温系统采用定温控制,通过太阳能集热系统完成热能的采集和传输,由太阳能热水通过换热管对料液进行加温<sup>[6-8]</sup>。该系统节能环保、操作简单,可实现自动运行,但易受天气状况的影响,沼气发电余热加温是在沼气热电联产工程中,利用发电机组发电后产生的将近 600℃ 的气体,高温气体中含有大量的余热,通过余热回收系统中的换热器用余热加温发酵原料<sup>[9]</sup>,一般只应用于大型沼气工程。

目前在农村户用型沼气工程中,应用空气源热泵复合太阳能加温系统为其加热的设计类文章较少。本文通过计算池内热负荷及经济性分析对比,探讨该系统的实用性及可行性。

## 1 加温系统流程设计

整个加温系统主要包括空气源热泵、太阳能集热系统、池内换热器、管道和水泵以及数据采集系统,其流程如图 1 所示。

收稿日期 2010-07-18; 修回日期 2010-07-26

\* 基金项目:上海市科委科技发展基金项目(09391910700);国家科技支撑计划项目(2008BAD4B05);国家科技支撑计划项目(2008BAJ08D0);上海市科委项目(07DZ12050)

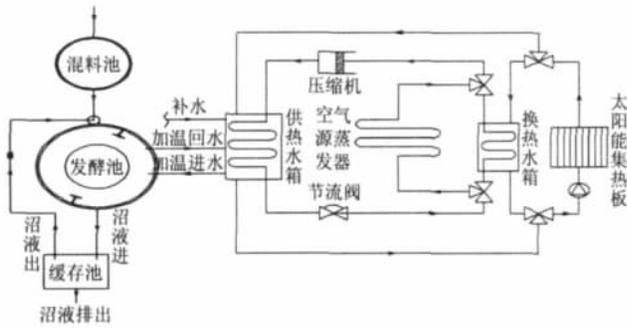


图1 加温系统流程图

Fig.1 Heating system flowchart

图1中,空气源热泵-太阳能耦合系统作为加温系统中热量的来源,通过空气源热泵与太阳能集热器耦合的方法来提供稳定的热量供应,通过控制阀门来控制两者的运行。在太阳能充足的时候,依靠太阳能集热器收集的热量来给发酵池加温,在阴雨天等太阳

能不充分时,则使用空气源热泵来加温,以满足不同季节、不同气候下发酵池对热量的需求。池内换热系统是加温系统的重要组成部分,本设计初步选择不锈钢螺旋管换热器和塑料蛇形管换热器两者进行比较,将在下文中加以选择。供回水管道均采用PPR管材。为了减少能量损失,要在管道外侧采取必要的保温措施。水泵的选择要根据计算得到的供水的流量以及流速进行选择。图1中,料液进入混料池与回流液混合后,进入发酵池发酵,由太阳能-空气源热泵耦合的加热系统为其加温,保证料液得到充分发酵。同时由数据采集系统负责采集过程所需数据。

## 2 加温系统热负荷计算

### 2.1 热负荷计算的气象条件

本实验台搭建在上海市同济大学现代农业工程研究院实验室。实验台设计时考虑了所在地区的气象条件,上海地区的气象参数如表1所示。

表1 上海地区气象条件

Tab.1 Meteorological conditions in Shanghai

上海地区气象参数							
北纬/°	东经/°	室外干球计算温度/°C			室外计算湿球温度/°C	室外计算相对湿度/%	
		冬季采暖	空调	夏季空调		冬季最冷月平均	夏季最热月平均
31	121	-2	-4	32	28	75	83

### 2.2 总热负荷计算

厌氧发酵池的散热分析是加温系统设计的主要依据之一,与反应器的材料、建筑尺寸、面积、所在地区气候条件等有关。散热量主要来自反应器内进出料液的散热量和反应器壁面与外界的散热损失。

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

式中:  $Q_1$  为反应器内进出料液的散热量, J;

$Q_2$  为反应器壁面与外界的散热损失, J, 包括反应器侧壁面与外界的散热量  $Q_{b1}$  和底面与地面的散热量  $Q_{b2}$ 。

#### 2.2.1 进出料的散热量

根据上海地区气象参数,冬季室外计算干球温度取  $-4\text{ }^\circ\text{C}$ , 保证发酵池内水温  $35\text{ }^\circ\text{C}$ 。理论研究和工程实践表明,沼气发酵启动需按接种物:原料:水 = 1:2:5 的比例配料。其中,接种物是富含沼气微生物的物质。来源广、易采集的接种物是正常产气的沼气发酵剩余物,一般需要添加 10% 以上。所进固体厨余占 20%, 水量占总进料量的 50%。其中固体发酵物厨余的污泥停留时间为 20 d, 水力停留时间为 1~5 d, 本设计定为 3 d。针对本实验台  $8\text{ m}^3$  沼气发酵池,全部料液量占总体积的 80% (冬季,干固体含量在 8%~10% 之间;夏季,在 6%~8% 之间,此处取 10%)。

则进出料液的散热量为:

$$Q_1 = M_1 \cdot C_p(T - T_1) + M_2 \cdot C_p(T - T_2) \quad (2)$$

式中:  $M_1$  为进料量, kg/h, 其中沼气发酵剩余物占

12.5%, 厨余固体占 25%, 水量占 62.5%;

$M_2$  为回流沼液量, kg/h;

$T_1$  为进料厨余温度,  $^\circ\text{C}$ , 取冬季最不利工况下  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$T_2$  为回流沼液温度,  $^\circ\text{C}$ , 保证池内  $35\text{ }^\circ\text{C}$  的发酵温度, 回流液有一定的热量损失, 假定回流温度  $32\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$T$  为发酵池内水温,  $35\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$C_p$  为水的传热系数, 取  $4.18 \times 10^3\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

#### 2.2.2 边界散热损失

在不加保温材料的情况下,发酵池周壁及池顶在冬天最不利工况下的热损失:

$$Q_{b1} = K_1(F_1 + F_2)\Delta t \quad (3)$$

式中:  $Q_{b1}$  为发酵池池壁所损失的热量, J;

$K_1$  为传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$F_1$  为墙体与空气接触总面积,  $\text{m}^2$ ;

$F_2$  为发酵池顶面积,  $\text{m}^2$ ;

池底的热损失为:

$$Q_{b2} = K_2 \cdot F_2 \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中:  $Q_{b2}$  为发酵池池底所损失的热量, J;

$K_2$  为有机玻璃与地面的传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$F_2$  为墙体与地面接触总面积,  $\text{m}^2$ 。

为了减少发酵池散热损失,需要对发酵池采取必要的保温措施。本试验拟采用聚苯乙烯泡沫板进行保温,价格在  $350\text{ 元}/\text{m}^3$ 。在加  $100\text{ mm}$  聚苯乙烯泡沫板的保温层后,发酵池需要的总热量如表 2。

表2 冬季最不利工况热负荷 (kW)

Tab.2 Heat load of the most adverse operating conditions during winter(kW)

	Q <sub>1</sub>	Q <sub>b1</sub>	Q <sub>b2</sub>	Q <sub>2</sub>	Q
未加保温层	0.325	4.049	1.284	5.333	5.658
加 100 mm 厚聚苯泡沫板保温层	0.325	0.233	0.039	0.273	0.598

2.3 热泵机组的选择

发酵池 1 d 所耗散的能量 Q<sub>t</sub> 为：

$$Q_t = 24 \times Q \quad (5)$$

式中 Q 为加保温层后的热量。

为了节约能源 机组加温不可能是持续的 因此 需要间断加温。每天对发酵池加温 3 h 计算其换热功率为：

$$Q_j = Q_t / 3 = 4.8 \text{ kW} \quad (6)$$

所选用的机组功率为：

$$W = Q_j / COP = 1.6 \text{ kW} \quad (7)$$

其中 COP 取 3。

因此 选择用电功率为 2 kW 的热泵机组。

表3 2种不同换热管的比较

Tab.3 Comparison between two kinds of pipes

	管径 DN/mm	厚度 /mm	换热器总传热系数 K/[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	管材的导热系数 λ/[W/(m·K)]	换热面积 F/m <sup>2</sup>	管长 L/m
不锈钢管	20	0.4	771.01	15	0.26	4.3
PE-RT 塑料管	25	2.8	71.53	0.48	2.8	46

从计算结果可以得出 虽然 PE-RT 塑料管成本较低 但其导热系数较小 是不锈钢管的 3% 传热系数是不锈钢管的 10% 管长是不锈钢管的 10 倍。因此 本设计初步采用 4 m 不锈钢管螺旋盘于沼气池中央。

3 加温系统经济性计算比较

在不计设备的折旧和环境效益的条件下 计算整个加温装置的投资效益净现值。本设计分别以电加热、地源热泵加热为比较对象 对空气源热泵与太阳能耦合式加温系统进行经济性评价。在 3 种加温系统能够达到相同加温效果的条件下进行计算。银行存款年利率以 3% 计(5 年定期存款的年利率为 2.25%)。电热膜加温系统初投资为 1.67 万元 使用年限为 20 年。地源热泵加温系统初始投资(包括设备投资费和施工费)为 2.83 万元 使用年限为 20 年。空气源太阳能系统初投资 3 万元 使用年限为 20 年。为了便于分析计算 作如下假设 对于该机组 太阳能承担总热负荷的 80% 空气源热泵的制热系数为 3.0。根据负荷计算 每天所需热负荷为 Q=14.352 kW·h。

则每天所耗电量分别用以下公式计算<sup>[10]</sup>：

电加热：

$$W = Q / \eta_e \quad (10)$$

式中 η<sub>e</sub> 为电加温效率 取 0.9。

地源热泵：

$$W = Q / COP \quad (11)$$

2.4 池内换热管的确定

换热管的设计参数主要包括换热面积和所选用的换热管的长度。换热面积和换热管长度的计算如下：

$$F = Q_j / K \cdot \Delta t_m \quad (8)$$

$$L = F / \Pi d \quad (9)$$

式中 F 为换热面积 m<sup>2</sup>；

L 为换热管总长度 m；

Q<sub>j</sub> 为盘管所需要的换热功率 kW；

K 为换热器总的传热系数 W/(m<sup>2</sup>·K)；

d 为换热管的内径 mm；

Δt<sub>m</sub> 为换热器对数平均温度 °C<sup>[5]</sup>。

目前在小型发酵池中 加温方法主要有 2 种 一种为在池壁布置 PERT 加温盘管 另一种为直接将成形不锈钢盘管置入池内中央。35 °C 的水温的运动黏滞系数为 ν=0.727×10<sup>-6</sup> 计算得管内流速为 u=1.48 m/s 符合设计要求。

计算结果如表 3 所示。

其中 COP 取 3。

空气源辅助太阳能加热：

$$W = (Q \times \varphi) / COP \quad (12)$$

其中 φ 取 0.2 COP 取 3。

计算所耗电量分别为 电加热 15.95 kW·h 地源热泵加热 4.784 kW·h 空气源辅助太阳能加温 0.96 kW·h。

3.1 系统运行的费用

按照上海市的电价指标 取电价为 0.627 元计算 运行时间按半年(180 d)计算。

- ①电热膜加温系统 0.627×15.95×180=1 800 元；
- ②地源热泵式加温系统 0.627×4.784×180=540.3 元；
- ③空气源热泵耦合太阳能加温系统 0.627×0.96×180=108.3 元。

表4 系统费用

Tab.4 System costs

	电加热	地源热泵	空气源热泵 - 太阳能耦合
初投资费用 / 元	16 700	28 300	30 000
电费 / 元	1 800	540.3	108.3

由表 4 系统初投资费用可看出 空气源热泵耦合太阳能系统较电加热多投资：

$$\Delta K_1 = 1.33 \text{ (万元)}$$

较地源热泵式加温系统多投资：

$$\Delta K_2=0.17(\text{万元})$$

空气源热泵耦合太阳能系统较电加热每年节省电费： $A_1=1\ 800-108.3=1\ 691.7(\text{元})$

空气源热泵耦合太阳能系统较地源热泵加热每年节省电费： $A_2=540.3-108.3=432(\text{元})$

可见,空气源热泵-太阳能耦合式加温方式较前两种具有明显的节电优势。虽其初投资费用较高,但每年可分别节省1691.7元和432元电费,从长远使用的角度,该系统具有较高经济可行性(见图2)。

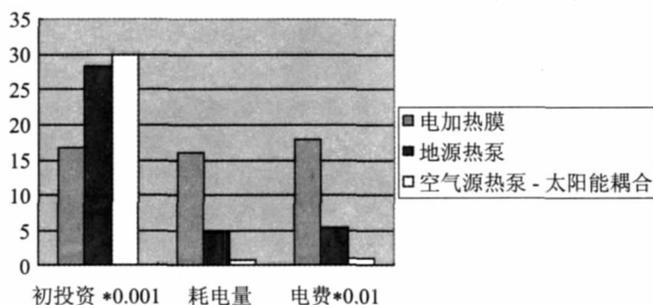


图2 不同热源模式的对比

Fig.2 Comparison between different heating modes

### 3.2 节省的电费可以实现的净现值

净现值的计算公式如下：

$$G=A_i \frac{1-(1+i)^{-N}}{i} \quad (13)$$

式中： $A_i$ 为每年净效益；

$i$ 为银行存款年利率；

$N$ 为使用年限。

比较电加热系统,运行20年产生的效益折算成净现值,由公式(13)计：

$$G_1=1\ 691.7 \times \frac{1-(1+0.03)^{-20}}{0.03}=25\ 166.9(\text{元})$$

所以,投资效益净现值为：

$$G_1-K_1=25\ 166.9-13\ 300=11\ 866.9(\text{元})$$

比较地源热泵系统,运行20年产生的效益折算

成净现值,为： $G_2=432 \times \frac{1-(1+0.03)^{-20}}{0.03}=6\ 426.7(\text{元})$ ；

投资效益净现值为： $G_2-K_2=6\ 426.7-1\ 700=4\ 726.7(\text{元})$

投资效益净现值为正,可见以增加的沼气产值来计算,此项投资的经济性很高,若考虑废物处理带来的环境效益,其投资的经济性更高。

### 3.3 投资回收期计算

按净回收年限法,投资回收期的计算公式如下：

$$T=\frac{\text{初始投资总量}}{\text{净现金流量}} \quad (14)$$

式中： $T$ 为投资回收期。

较电加热,空气源热泵式加温系统多投资的费用

回收期由公式(14)可计算： $T_1=\frac{13\ 300}{1\ 691.7}=7.8(\text{年})$

即8年内可以收回多投资的费用,可以投资。

较地源热泵加热,空气源热泵式加温系统多投资的费用回收期由公式(14)可计算：

$$T_2=\frac{1\ 700}{432}=3.9(\text{年})$$

即4年内可以收回多投资的费用,可以投资。

## 4 结语

(1)对发酵池加100 mm聚苯乙烯保温板进行保温;选取2 kW热泵机组作为热源;4.3 m长不锈钢螺旋管盘旋置于发酵池内。

(2)分别以电加热热水、地源热泵为参照,对太阳能空气源热泵加热系统进行经济性分析。该系统相比电热膜加温系统和地源热泵系统,投资效益净现值分别增加11 866.9元和4 726.7元,投资回收期分别为8年和4年,具有长远的投资效益。

(3)该试验将对系统进行测试,采集数据,同时需要设计一套切换不同模式的自动控制装置;考虑到空气源热泵易结霜等问题,系统性能有待进一步试验分析。

### 参考文献：

- [1]全国人大常委会办公厅.中华人民共和国可再生能源法[M].北京:中国民主法制出版社,2005.
- [2]Bello-Mendoza R, Sharratt. Compartment mixing model for anaerobic digesters with central draft-tubes [C]//Symposium held on Fluid Mixing 6 at the University of Bradford,1999(146):383-394.
- [3]Bouallagui H, Haouari O, et al.Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste[J].Process Biochemistry, 2004(39):2143-2148.
- [4]Zabranska J,Dohanyos M,Jenicsek P, et al.The contribution of thermophilic anaerobic digestion to the stable operation of wastewater sludge treatment[J].Water Science and Technology,2002(46):447-453.
- [5]白莉,石岩,齐子姝.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.
- [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(3):239-247.
- [7]Petros Axaopoulos, Panos Panagakis. Energy and economic analysis of biogas heated livestock buildings [J]. Biomass and Bioenergy,2003(24): 239-248.
- [8]Hamed M El-Mashad, et al. Design of a solar thermophilic anaerobic reactor for small farms [J]. Biosystems Engineering,2004(87):345-353.
- [9]罗福强,汤东,梁昱.用发动机余热加热沼液提高产气率研究[J].中国沼气,2005,23(3):25-26.
- [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):271-272.

作者简介：石惠娴(1969)女,河北省献县人,博士,副教授,研究生导师,农业生物环境与能源工程专业,主要从事生物质能、多相流动特性以及与工程热物理专业交叉领域的研究(huixian\_shi@tongji.edu.cn)。