

太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统

裴晓梅¹, 石惠娴^{2*}, 朱洪光², 龙惟定³

(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; 3. 同济大学 中德工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对地源热泵式沼气池加温系统需要打地埋井及铺设地埋管受地质水质局限等问题, 系统构建了太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统. 对系统发酵池热负荷、沼液余热回收率、中高温热泵机组、太阳能集热装置等关键参数进行了理论计算, 得出系统能够保证发酵池温度 $50 \pm 2^\circ\text{C}$, 沼液余热回收量可以达到系统总需要热量的 70%. 系统特点在于采用太阳能和沼液余热联合作为中高温热泵低位热源并确立其三种运行模式, 包括太阳能直接加温模式, 太阳能低位热源—热泵加热模式和太阳能—沼液余热回收联合式热泵加温模式.

关键词: 太阳能热泵; 厌氧消化; 余热回收; 高温发酵; 中高温热泵

中图分类号: S214.9; TK529

文献标识码: A

Heating System of High Temperature Biogas Digester by Solar Energy and Methane Liquid Heat Recovery Heat Pump

PEI Xiaomei¹, SHI Huixian^{2*}, ZHU Hongguang², LONG Weiding³

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Modern Agricultural Science and Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Engineering in Germany, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A heating system of biogas digester was developed to avoid area limitations of buried wells in the heating system of biogas digester by ground-source heat pump, in which the heat energy was supplied by hot water from waste heat recovery coupled with solar-assisted heat pump. The key parameters such as the heat load of digester, waste heat recovery rate of the methane liquid, medium and high heat pump, the solar energy collector area and so on were

calculated. The results show that this system can guarantee the temperature of $50 \pm 2^\circ\text{C}$ in the digester, the heat recovery rate of the methane liquid can reach up to 70%. The system is characterized by that the solar energy and waste heat recovery of the methane liquid serve as the low-graded heat sources of the heat pump. There are three kinds of running modes including the solar energy heating directly, the solar energy low level heat sources heat pump, and the combination of the solar energy and waste heat recovery low-graded heat resources heat pump and so on. The waste heat recovery technique can make full use of energy of the system and prevent thermal pollution.

Key words: solar-heat pump; anaerobic digestion; waste heat recovery; high temperature fermentation; high temperature heat pump

中高温厌氧发酵是一种高度依赖温度的污水处理过程^[1-3]. 限制高温厌氧发酵工程应用的因素是维持高温厌氧发酵环境在温度 55°C 的条件下, 相对中温发酵(35°C)需要输入更多的热量. 因此, 推动高温厌氧发酵工程化的首要任务是探索出一种经济、环保、节能的加温系统^[4-5].

目前沼气池加温方式有很多, 试验分析比较证明地源热泵式沼气池加温系统更经济合理、节能环保^[6], 但由于地源热泵式沼气池加温系统由土壤可提供较为稳定的但温度较低的低位热源, 适用于中温发酵, 不适用于全年都需要加热的高温发酵系统. 另外地源热泵式沼气池加温系统需要打地埋井及铺设地埋管, 在不同地区会受地质水质局限. 因此, 提出太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统, 用来解决单独的沼液余热回收式热泵加温系统提供的能量不足的问题与单独的太阳能加温系统在

收稿日期: 2011-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(2870234002); “十一五”国家科技支撑计划(2008BAD4B05); 上海市科委科技发展基金(09391910700)

第一作者: 裴晓梅(1972—), 女, 高级工程师, 博士生, 主要从事供热、供燃气、通风及空调工程相关领域的研究.

E-mail: peixiaomei2004@163.com

通讯作者: 石惠娴(1969—), 女, 副教授, 研究生导师, 工学博士, 主要从事农业生物环境与能源工程领域的研究.

E-mail: huixian_shi@tongji.edu.cn

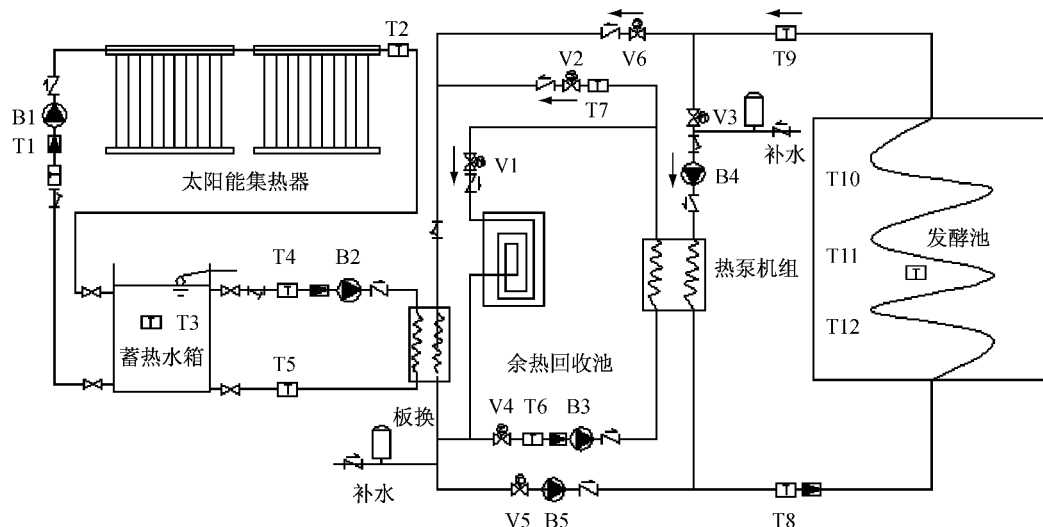
阴雨天、冬天不能满足沼气池加温要求的问题.同时用以解决不适合打地埋井及采取地源热泵式沼气池加温地区的沼气工程冬季不产气及加温问题.系统采用余热回收循环加温技术可以充分利用热量,解决热污染问题.

1 太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统的构建

在同济大学嘉定生态园构建了太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统.发酵池、热泵和余热水箱等布置在地面上,太阳能集热器布置在两层实验楼屋顶上.主要设备发酵池体为圆柱形,内部尺寸定为 $(2.76 \times 2.52 \text{ m})$ (直径 \times 高度),池壁和池底为厚5 mm的碳钢,有效体积 $V=15 \text{ m}^3$;在池底采用厚度为50 mm的PE板保温,在池壁采用厚度为50 mm的挤塑聚苯乙烯泡沫(XPS)板保温隔热.发酵池

顶部覆盖专用沼气顶膜,覆盖面积为 7 m^2 .在发酵池一侧壁距池底高0.5 m处安装一台搅拌机,在发酵池另一侧距顶0.7 m处安装一台搅拌机;搅拌机的参数是:额定功率2.5 kw,额定工作频率是50 Hz,转速 $740 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.

图1中加温系统主要包括四个子系统,太阳能集热系统中待加热低温水从蓄热水箱的出口流出,经过循环泵后,进入楼顶的太阳能真空管集热器,在集热器里被加热后再流回到蓄热水箱当中;太阳能低位热源系统由蓄热水箱、板式换热器、板换循环泵、热泵低位热源水泵组成;沼液余热回收系统包括沼液余热回收池、螺旋管换热器和热泵低位热源水泵.每天从发酵池里溢流出来的沼液直接流进余热回收池中,在余热回收池中将热量传递给热泵蒸发器回路中的工质,作为热泵的低位热源;热泵加热系统由一个热泵机组、一台热泵高位热源水泵以及发酵池内加热盘管组成.



B1 太阳能循环泵; B2 板换循环泵; B3 热泵低位热源泵; B4 热泵高位热源泵; B5 太阳能直供泵; V1-V6 电磁阀; T1-T12 温度传感器

图1 太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统

Fig.1 Heating system of high temperature biogas digester by solar energy and methane liquid heat recovery heat pump

2 太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统理论计算及设备选型

太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统主要设备选型,首先要进行高温厌氧发酵池热负荷的理论计算、太阳能集热器集热面积、沼液余热回收池的计算选型及高温热泵机组的选型.

2.1 高温厌氧发酵池热负荷理论计算及确定

在某一室外温度下,为达到发酵池内要求的温

度,加热系统在单位时间内需向发酵池提供的热量为发酵池热负荷.发酵池热负荷受环境条件、进料温度、太阳辐射强度、发酵池外维护结构、进料量、生物热扰、搅拌热等众多因素的影响.

发酵池热负荷主要由三部分构成:发酵池外围维护结构的热耗散引起的热负荷;进出物料热负荷;沼气带走的热量以及搅拌和生物热负荷.忽略沼气带走的少量热量以及发酵产生的少量生物热^[7],集中供气工程每天所需的热负荷主要由发酵池向环境的散热量和加热进料所需热量组成.

其中,发酵池散热量 Q_s 计算公式为

$$Q_s = k_l l (t_1 - t_2) + k_c A_c (t_1 - t_2) + k_f A_f (t_1 - t_3) \quad (1)$$

式中: k_l 为池壁单位高度传热系数; l 为圆柱体的高度; k_c 为池顶单位面积传热系数; A_c 为池顶表面积; k_f 为池底单位面积传热系数; A_f 为池顶表面积; t_1 为高温发酵池内温度,取 55°C ; t_2 为外界环境温度; t_3 为定深度土壤温度;

$$k_l = \frac{1}{R_l} = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1 \pi d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_3} \right) \quad (2)$$

式中: R_l 为单位长度池壁总的热阻; α_1 、 α_2 分别为发酵池内壁与沼液、外壁与大气的对流换热系数; λ_1 、 λ_2 分别为发酵池壁和保温材料导热系数; d_1 、 d_2 、 d_3 分别为圆柱体内径、池体外径和加保温层的外径。

加热进料所需热量由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,其计算公式为

$$Q = Q_1 + Q_2 = m_1 c_p (t_m - T_1) + m_2 c_p (t_m - T_2) \quad (3)$$

式中: Q 为所需的加热量; Q_1 为新添加物料升温所需的热量; Q_2 为补偿回流过程损失的热量; C_p 为投粪料液的比热; m_1 为进料量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; m_2 为回流沼液量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; T_1 为进料温度, T_2 为回流沼液温度,保证池内 53°C 的发酵温度,回流液有一定的热量损失,假定回流温度 20°C ; t_m 为发酵池内水温, 53°C ;

$$c_p = 4.17 \times (1 - 0.00812 T_s) \quad (4)$$

式中: T_s 为料液含固率,量纲为一。

本实验选择餐厨垃圾作为厌氧发酵原料,原料来自同济大学嘉定校区食堂,取原料含水率 80%,总固体含量 TS 20%。设计水力停留时间 20 d,则每天的进料量是 750 kg,其中稀释的上清液为 375 kg。根据上海市嘉定区不同月份气温条件和进料温度,由上述传热学公式计算系统日平均负荷如表 1。

表 1 不同月系统的日平均负荷

Tab.1 Average daily heat load at different months

月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
环境温度/ $^\circ\text{C}$	18.2	12.4	6.2	3.6	4.7	8.4	14.1	19	23.4	27.8	27.7	23.6
进料温度/ $^\circ\text{C}$	15	10	5	5	5	10	10	15	20	20	20	20
料液总加热量/ $\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$	36.1	43.9	51.7	51.7	51.7	43.9	43.9	36.1	28.2	28.2	28.2	28.2
池体总散热量/ $\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$	20.9	27.7	35.8	38.9	37.6	32.4	25.7	19.1	14.0	8.0	8.1	12.9
总热量 $\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$	57.0	71.6	87.5	90.6	89.3	76.3	69.6	55.2	42.2	36.2	36.3	41.1

2.2 太阳能集热器集热面积的计算

拟采用强制循环加热系统,太阳能集热面积的计算公式为

$$A_c = Q \times f / [J_T \times \eta \times (1 - \eta_r)] \quad (5)$$

式中: A_c 为太阳能集热面积; Q_c 为太阳能热水系统的热负荷; J_T 为倾斜辐射量,即倾角等于当地纬度时,倾斜表面平均日太阳总辐射量; f 为太阳能保证率,量纲为一; η 为集热机日平均集热效率,量纲为一; η_r 为管路及热水箱的热损失率,量纲为一,一般取 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,集热器面积为

$$A_b = A_c / R \quad (6)$$

式中: A_b 为补偿后的集热面积; R 为补偿比。

本系统采用真空管集热器,日平均集热效率为 50%;方位角 0° (朝向正南),偏重于冬季使用,倾角取 40° ,查文献补偿比为 99%^[8];管路及热水箱的热损失率取 0.2。由式(5)和式(6)得出不同月份太阳能保证率为 100%的集热器面积如表 2,从表 2 可以看出最大太阳能集热面积为 20.1 m^2 。

系统每天需要太阳能提供的热量为:

$$Q_c = [Q - (1 + 1/C)(m_1 + m_2) c_p (t_1 - 25)](C - 1)/C \quad (7)$$

式中: C 为热泵机组的制热系数,量纲为一。

根据式(6)和式(7),计算需要太阳能 $24.84 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

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%

月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
倾斜辐射量/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	13.5	12.3	11.4	11.2	11.9	12.7	13.3	13.9	13.4	16.	17.2	13.4
总热量/ $\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$	57.0	71.0	87.5	90.6	89.3	76.3	69.6	55.2	42.2	36.2	36.3	41.1
集热面积/ m^2	10.5	14.5	19.1	20.1	18.7	14.9	13.0	9.9	7.8	5.5	5.3	7.6

2.3 中高温热泵机组选型

式热泵机组,系统每天需要的加热时间如表3所示:

热泵机组选择额定制热量为0.6 kW的水—水

表3 热泵在各个月份平均每天工作的时间

Tab.3 the everyday average working time of the heat pump in each month

月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
总热量/MJ·d ⁻¹	57.0	71.6	87.5	90.6	89.3	76.3	69.6	55.2	42.2	36.2	36.3	41.1
每日工作时间/h	2.29	2.88	3.52	3.65	3.59	3.07	2.80	2.22	1.70	1.46	1.46	1.66

热泵机组的型号和发酵池的最大热负荷、冬夏季负荷特点、进料负荷所占的比例以及由于进料引起的温度波动和需要加热时间有关。

根据表1计算结果可知,热泵机组应参照1月份、4月份和7月份热负荷选型。各月份料液负荷占总热负荷的比例分别是69.3%、71.8%和77.4%,理想情况下进料会使厌氧发酵池内部温度下降约2.33℃、2.07℃和1.80℃;理论上越短的时间使料液达到设计温度越好,综合考虑到热泵机组以及辅助热水泵等设备的初投资与运行费用,以及保持高温发酵稳定性,加热时间是应在1—3 h内。实验设计加温料液需要3 h,计算热泵机组的制热功率是10.1~13.5 kW。

目前,市场上额定制热功率为10.6 kW的小型中高温热泵产品比较容易获得,因此选择制冷剂为R134,额定输入功率为2.52 kW,额定制热功率为10.6 kW的高温热泵机组。

2.4 太阳能热泵沼液余热回收系统计算

厌氧消化液余热回收量是指理想换热状态下一定的时间内,通过余热回收盘管从沼液中回收的热量。沼液的余热回收率是指相同的时间段内,回收的沼液与热量与高温厌氧发酵池内所需要热量的比值,计算系统的余热回收率约为60%。

发酵池内加热盘管、太阳能蓄热盘管以及沼液余热回收盘管的传热过程均是管内受迫对流换热和管外自然对流传热,根据传热学理论,管内受迫对流换热准则关联式可以表达为:

$$\text{加热流体 } N_f = 0.023R_f^{0.8}P_f^{0.4} \quad (8)$$

$$\text{冷却流体 } N_c = 0.023R_c^{0.8}P_c^{0.3} \quad (9)$$

管内平均传热系数为:

$$\text{加热流体 } \alpha_f = 0.023R_f^{0.8}P_f^{0.4}\lambda_s/d_0 \quad (10)$$

$$\text{冷却流体 } \alpha_s = 0.023R_c^{0.8}P_c^{0.4}\lambda_s/d_0 \quad (11)$$

管外污水侧自然对流准则:

$$N_u = C(G_rP)^n \quad (12)$$

污水侧的平均换热系数为:

$$\alpha_w = c(G_rP)^n\lambda_p/d_1 \quad (13)$$

式中: G_r 为格拉晓夫数; P_r 为普朗特数; λ_p 为管

材导热系数; d_1 为管外径; C 和 n 是由实验确定的常数,其值的大小主要与流态和管子的放置方式有关。圆管水平放置 C 和 n 的取值: $C_rP=10^{-2}\sim 10^2$ 时, $C=1.02$, $n=0.148$; $G_rP=10^2\sim 10^4$ 时, $C=0.85$, $n=0.188$; $G_rP=10^4\sim 10^7$ 时, $C=0.48$, $n=0.25$; 时, $C=0.125$, $n=1/3$ 。

单位管长的换热系数为:

$$k_L = 1/\left(\frac{1}{\alpha_s\pi d_0} + R_1 + \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{1}{\alpha_w\pi d_1} + R_w\right) \quad (14)$$

式中: α_w 为污水侧换热系数; α_s 为管内水侧换热系数; R_w 为管外侧污垢热阻; R_1 为管内侧污垢热阻; λ_p 为管材导热系数;

换热盘管换热量

$$Q = k_L L \Delta t \quad (15)$$

式中: L 为污水换热器盘管的长度; Δt 为污水换热盘管内外介质的传热温差。

发酵池内加热盘管采用壁厚2 mm、外径20 mm的PE-RT管,太阳能蓄热盘管和沼液余热回收盘管采用壁厚2 mm 外径32 mm 不锈钢304管,根据公式(15)计算得单位长度换热量分别为70 w和270 w,相应的换热器盘管长度分别为120 m、10 m、30 m。

经计算分析:太阳能—沼液余热回收式热泵高温厌氧发酵加温系统能够保证发酵池温度 $50\pm 2^\circ\text{C}$,沼液余热回收量可以达到系统总需要热量的70%,是一种节能、环保、可行的高温发酵加温系统。经过实际测试初步结果,在上海十月份的天气下,进口水温为 20°C 左右的前提下,可以将高温热泵出口进入沼气池的温度提升到 60°C 左右,当它为发酵池提供热量时,可以使发酵池升高到 $50\pm 2^\circ\text{C}$ 左右,理论和实际初步测试表明该系统运行可行。

3 太阳能—沼液余热高温厌氧发酵加温系统工艺原理及特点

高温热泵是利用各种低位热源进行供热制冷的

新型能源利用技术,通过卡诺循环和逆卡诺循环原理转移冷量和热量.本系统为满足冬季沼气池高温发酵温度的要求,将太阳能集热器采集的热量蓄积在蓄热水箱中和沼液余热回收热量蓄存在沼液余热回收池中,作为高温热泵的低温热源,实现了以太阳能和沼液余热作为热泵加温的低位热源.在需要加温时,把太阳能和沼液余热回收的热量与循环水进行热交换,使循环水温度提高,再通过对高温热泵输入少量的高品位电能,实现低温位热能向高温位转移,进而使得太阳能沼液余热回收热泵机组出水温度达 60°C 左右,热水在热盘管中,以辐射和对流的方式与发酵原料进行热交换,使沼气池温度保持在高温发酵范围内.

太阳能—沼液余热高温厌氧发酵加温系统采用温差法自动控制.太阳能集热器联集箱末端和沼液余热回收池中温差大于 5°C 时,集热器加热循环泵开启,当二者的温差小于 2°C 时集热器加热循环泵停止.运行时,高温厌氧发酵池加温系统特点有3种加温模式,对应3个加温环路.

(1)太阳能直接加温模式:当高温厌氧发酵池中的温度低于 50°C ,且蓄热水箱中的温度大于 60°C ,系统按照太阳能直接加温模式运行;当高温厌氧发酵池中温度高于 50°C 或蓄热水箱中的温度低于 60°C 时,该加温模式停止运行;加温环路为蓄热水箱出口—高温厌氧发酵池盘管换热器—蓄热水箱入口.

(2)太阳能低位热源—热泵加热模式:当高温厌氧发酵池中的温度低于 50°C ,蓄热水箱中的温度在 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 时,或蓄热水箱中的温度小于 50°C 且大于沼液余热回收池内温度时,采用太阳能—热泵加热模式(太阳能为低位热源);当高温厌氧发酵池中的温度高于 50°C ,或蓄热水箱中的温度小于沼液余热回收池内所测温度时,该加温模式停止运行;加温回路为蓄热水箱出口—高温热泵—高温厌氧发酵池内盘管换热器—蓄热水箱入口.

(3)太阳能—沼液余热回收联合式热泵加温模式,当高温厌氧发酵池中的温度低于 50°C ,且蓄热水箱中的温度小于 50°C 且小于沼液余热回收池内温度时,系统按照沼液余热回收式热泵加温模式运行;当高温厌氧发酵池中的温度高于 50°C ,或者沼液余热回收池中温度小于 25°C 时,该加温模式停止运行.加温回路为蓄热水箱出口—沼液余热回收池—高温热泵—蓄热水箱入口.

4 结语

针对高温厌氧发酵高能耗和排放的沼液具有高热流的特点,提出太阳能—沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统,将沼液余热回收和太阳能利用充分有效的结合起来,目的为高温厌氧发酵提供一种节能、环保、经济的加温方式.与地源热泵式沼气池加温系统相比,取消了地埋井,降低了系统初投资,还摆脱了地源热泵的局限,使其可以在岩石地质或水质条件较差的地域得以应用,拓展了适用范围,同时增加的余热回收环路使系统能量利用更加充分,防止了热污染,具有很强的现实意义.

参考文献:

- [1] Gannouna H, Bouallagui H. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of biologically pretreated abattoir wastewaters in an upflow anaerobic filter [J]. *Hazardous Materials*, 2009, 170: 263.
- [2] Rene Alvarez, Gunnar Lide. The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude [J]. *Bioresource Technology* 2008, 99: 7278.
- [3] Zupancic G D, Ros M. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(14): 2255.
- [4] 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*, Kobe: JSME, 2009, 3: 185.
- [5] 何耀东, 孟震. 地源热泵长期有效发展的核心——夏冬季岩土体排热量的动态平衡 [J]. *暖通空调*, 2009, 39(11): 74
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]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2009, 39(11): 74
- [6] 石惠娴, 王韬, 朱洪光, 等. 地源热泵式沼气池加热系统 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 268.
SHI Huixian, WANG Tao, ZHU Hongguang, et al. Study on heating system of biogas digester by ground-source heat pump [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(2): 268
- [7] 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: 4085.
- [8] 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.
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 Agricultural Mechanics*, 2011, 42(1): 122.