兰州太阳能与发电余热增温沼气工程的性能研究

李金平^{1,2,3},曹岗林^{1,2,3},曹忠耀^{1,2,3},李 娟^{1,2,3},冯 琛^{1,2,3}

(1. 兰州理工大学 西部能源与环境研究中心,兰州 730050; 2. 甘肃省生物质能与太阳能互补功能系统重点实验 室,兰州 730050; 3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心,兰州 730050)

摘 要:为保证兰州地区大中型沼气工程的产气稳定性,解决由于环境温度低而造成发酵塔内温度跨度较大的问题。笔者针对兰州市花庄镇沼气工程,构建一套太阳能与发电余热增温保温系统,达到保证发酵塔在不同季节均能维持恒温厌氧发酵的目的。文章阐述了系统的原理,并对系统的各部分的热量需求进行理论计算。结果表明, 该沼气工程平均日需热量7531.9 MJ,太阳能与发电余热增温保温系统平均日产热量7623.4 MJ,使整个发酵塔的 温度在夏季和其他季节分别维持在52℃和37℃,完全能满足整个工程的热量需求。该系统可使发酵系统在不同 季节均能保持恒温厌氧发酵,保证了其产气稳定,因而这套系统是可行的,为兰州地区太阳能与发电余热增温保温 系统提供了参考。

关键词:太阳能;增温保温;恒温厌氧发酵 中图分类号: S216.4;TK6 文献标志码:B 文章编号:1000-1166(2017)02-0090-06

Performance of Biogas Project Increasing Temperature by Solar Energy and Waste Heat from Power Generation / LI Jin-ping^{12,3}, CAO Gang-lin^{12,3}, CAO Zhong-yao^{12,3}, LI Juan^{12,3}, FENG Chen^{12,3}/ (1. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Gansu Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou 730050, China; 3. China North-western Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to ensure the biogas production stability for large and medium-sized biogas project in Lanzhou and solve the problem of low temperature , a insulation system for biogas project in Huazhuang town of Lanzhou was established adopting solar energy and waste heat from power generation as heat supply. The system principles were elaborated , and the theoretical energy requirement were calculated. The result showed that the biogas project needed a daily heat of 7531.9 MJ for keeping a proper temperature , while the solar energy and waste heat from power generation could provide 7623.4 MJ per day on average , which were able to meet the heat demand for the biogas project , keeping the fermentation temperature maintained at 52° C in summer and 37° C in other seasons.

Key words: solar energy; insulation system; temperature increase; anaerobic fermentation; waste heat from power generation

兰州市花庄镇建有大型奶牛场,发展应用沼气 发电,既可以缓解厂区的电力紧缺,又能减少对周边 环境污染,是非常有前景的可再生能源^[1]。但生产沼 气过程中 温度是影响沼气发酵产气率的关键因素之 一,它通过对酶的活性、微生物代谢方式、物质的溶解 度等方面影响厌氧发酵,进而影响了沼气的产量^[2]。

国内外已有很多关于温度对厌氧发酵影响的研究^[3-4]。目前,大中型沼气工程由于中温和常温发酵能耗较少,使产气维持在一个相对适中的水平,且 具有良好的经济效益,因而得到了广泛的应用^[5]。 兰州属中温大陆性气候 ,冬天寒冷 ,为了维持发酵塔 进行恒温厌氧发酵 必须对系统进行增温保温措施 , 使整个系统运行不受环境温度的影响^[6]。

目前,大中型沼气工程增温保温的方法有很多 种,主要采用沼气锅炉、化石能源锅炉、太阳能、沼气 发电机余热利用等增温方式^[7-8]。兰州地处太阳能 辐照密集区,因而太阳能增温沼气工程具有广阔的 应用前景^[9]。沼气发电余热利用是目前加热发酵 系统最有效的方式之一,但单一的发电余热难以满 足发酵系统所需的热量^[10-12]。针对上述问题,笔者

收稿日期: 2016-03-21 修回日期: 2016-04-08

项目来源: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:李金平(1977 –) ,男、教授,主要从事先进可再生能源系统方面的研究工作, E-mail: lijinping77@163. com

因地制宜 结合太阳能和发电机余热各自的优点 构 建出一套太阳能与发电余热增温保温系统以此来解 决沼气工程中增温保温的问题。

1 太阳能与发电余热增温保温系统的设计

1.1 太阳能与发电余热增温保温系统简介

太阳能与发电余热增温保温系统原理图如图 1 所示。系统由沼气发电机、太阳能集热器、恒温厌氧 发酵塔、储气罐等元件组成,系统采用并联加热的方 式向发酵塔和储气罐供热,循环介质采用水,为了保 证该系统在全年正常运行,太阳能集热器和沼气发 电机中循环水在冬天加入乙二醇以保证系统的媒介 水不发生冻结。

该系统通过温度传感器进行系统循环水路的控 制。当发电机启动时外循环水通过循环水泵与发电 机缸套水在板式换热器中进行换热,以此来冷却缸 套水。此后外循环水与发电机的高温烟气在管壳式 换热器中进行换热 出来的循环水直接进入沼气发 酵塔和储气罐,达到增温保温的目的。考虑到厂内 员工工作时间 整个发电系统运行时间段为 7:30~ 11:30,14:00~18:00和22:00~24:00,在发电机启 动初期泵9处于关闭状态,启动泵10和11,发电机 产生的余热用于发酵塔和储气罐增温。当发电机余 热不足时,启动泵9,关闭泵11,此时系统双重满足 发酵塔、储气罐和进料的增温。在温度传感器 22 和 24 达到各自所需的温度时,关闭泵9,启动泵11,此 时仅仅依靠发电机余热就能满足发酵塔和储气罐的 保温。太阳能集热器将所获取的能量存储干储热水 箱中以用来供给在发电机未工作时发酵塔和储气罐



 1. 恒温厌氧发酵塔; 2. 储气罐; 3. 沼气发电机; 4. 太阳能集热器;
 5. 储热水箱; 6. 电加热丝; 7~8. 三通阀; 9~11. 循环水泵; 12. 温 度传感器采集仪; 13~21. 阀门; 22~25. 温度传感器
 图1 太阳能与发电余热增温保温系统示意图

所需的热量。遇到阴雨天,通过发电机发电加热电 热丝和减少进料量以保证系统稳定运行。

1.2 沼气发电机及其余热利用

该工程中发酵塔和储气罐均为地上式圆柱型, 发酵塔和储气罐有效容积分别为 1200 m³ 和 300 m³。两台沼气发电机组为捷克 TEDOM 公司生产, 型号 Cento T88 SPE BIO,电能输出最大值 76 kW,发 电机发电效率 31.5%。沼气发电机利用自身烟气 以及缸套水热量加热外循环水,外循环水总质量流 量 1.5 kg・s⁻¹。考虑到料房和工作间增温保温,因 而进入发酵塔和储气罐的外循环水实际质量流量 1 kg・s⁻¹,温度记录冬天外循环水加热前后平均水温 65℃和 45℃,夏天平均水温 75℃和 55℃,平均温差 20℃。选取牛粪作为发酵原料 TS = 8%,通过在不 同季节改变进料量来充分利用太阳能的能量富余。

2 系统热负荷计算

国内外在计算大中型发酵塔的热量损失主要包 含两部分^[13-14]:发酵塔自身和进出物料的热量。储 气罐散热量仅包含自身散热量。因此,该沼气工程 日平均散热负荷主要为发酵塔、进出物料和储气罐 散热损失之和。

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \tag{1}$$

式中: Q_T 为系统总散热量, $kJ; Q_1, Q_2$ 和 Q_3 分别为发酵塔、储气罐和进出物料散热量,kJ。

2.1 发酵塔散热量

发酵塔高 12.5 m(地上 11.5 m,地下 1 m),半 径 4.2 m。发酵塔顶部、侧壁与底部的材料和相关 参数见表 1。

厚度 导热系数 部 位 材质 (W • m⁻¹K⁻¹) mm 40 塔 顶 1:2.5 水凝砂浆粉 0.93 珍珠岩 120 0.06砼顶板 C25 200 0.82 20 0.07 防水粉 彩钢板 0.5 49.8 塔侧壁 聚苯乙烯 140 0.041 250 1.74 C20 钢砼 防水粉 20 0.07 20 0.07 塔 底 防水粉 400 C25 砼 0.82 C10 砼 100 1.18 三七灰土 300 1.16 0.97 原土层

表1 发酵塔材料及相关参数

发酵塔总散热量包括3部分:发酵塔顶部、侧壁 和底部散热量。

公式如下[15]:

$$Q_1 = Q_t + Q_s + Q_b \tag{2}$$

式中: Q_t , Q_s 和 Q_b 分别为发酵塔顶部、侧壁和 底部的散热量, kJ。

其中,发酵塔侧壁散热量^[16]:

$$Q_{s} = \frac{\pi L(T_{w} - T_{e})t}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2\lambda_{i}} \ln \frac{r_{j+1}}{r_{i}} + \frac{1}{h_{\infty}r_{i+1}}}$$
(3)

式中:L 为发酵塔高度,m; T_w 为发酵塔内壁温 度,考虑到环境温度对整个发酵塔的影响,夏天发酵 温度取 52°C,其它季节发酵温度取 37°C^[17]; T_e 为 环境温度,C;t为时间,h; λ_j 为发酵塔各结构层的 导热系数,W•m⁻¹K⁻¹; r_j 为各部分结构层厚度, m; h_x 为外界空气自然对流换热系数,冬季取 8.5 W•m⁻²K⁻¹,夏季取 11.9 W•m⁻²K^{-1[18]},春秋两 季取两者平均值。

发酵塔顶部散热量^[16]:

$$Q_{t} = \frac{(T_{w} - T_{e})t}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\xi_{i+1}}{\lambda_{i}} + \frac{1}{h_{\infty}}} A_{t}$$

$$(4)$$

式中: ξ_i 为发酵塔顶部各部分结构厚度, $m;A_i$ 罐顶面积, m^2 。

发酵塔底部散热量^[16]:

$$Q_b = \frac{(T_w - T_s)t}{\sum_{i=1}^n \frac{\xi_{j+1}}{\lambda_i}} A_b$$
(5)

式中: ξ_j 为塔底部各部分结构厚度 ,m; T_s 为地 下两米深处土壤温度 , \mathbb{C} ; A_i 为塔底面积 ,m²。

在分析过程中,由于发酵塔罐体下埋地下一米, 因而在计算过程中,侧壁热量计算分为两部分。

2.2 储气罐散热量

该工程中储气罐为水封钟罩式,罐高12.6 m, 半径4.4 m,罐身分两部分,上部分7.4 m,下部分 5.2 m。下部分为地上式圆柱型,上部分为正八面体 型,且其材料各异。

储气罐顶部、上侧壁、下侧壁与底部的材料和相 关参数见表 2。

储气罐总散热量包括4部分:储气罐底部、顶 部、上侧壁和下侧壁散热量。

表达式如下[15]:

$$Q_2 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 \tag{6}$$

部 位	++ F	厚度	导热系数 ^[16,19]
	11 顶	mm	(W • m ⁻¹ K ⁻¹)
罐顶	彩钢板	0.5	49.8
	聚苯乙烯	70	0.041
	彩钢板	0.5	49.8
罐上侧壁	彩钢板	0.5	49.8
	聚苯乙烯	70	0.041
	彩钢板	0.5	49.8
罐下侧壁	水泥复合保温砂浆	600	0.08
	砖	250	0.42
	1:2 砂浆	20	0.93
	彩钢板	0.5	49.8
罐底	防水粉	20	0.07
	C25 砼	400	0.82
	C10 砼	100	1.18
	三七灰土	300	1.16
	原土层	—	0.97

表2 储气罐体材料及相关参数

式中: Q_2 储气罐自身总散热量, k_J ; Q_4 , Q_5 , Q_6 和 Q_7 分别为储气罐底部、顶部、上侧壁和下侧壁散 热量 k_J 。

考虑到储气罐下侧壁和上侧壁构造,散热量计 算分别按照多层圆筒壁和多层平壁的导热计算,其 余计算与发酵塔计算方法一致对应。由于对进入内 燃机沼气温度的要求,以及防止储气罐中水的冻结 对系统造成严重后果,维持储气罐上侧壁平均壁温 10℃,下侧壁温度16℃,对储气罐从11月~次年3 月份进行保温。

2.3 发酵塔进料所需热量

发酵塔进料所需热量公式如下:

$$Q_3 = mc_p (T_w - T_{rw})^{[20]}$$
(7)

式中: *m* 为进料量, kg • h⁻¹; *T_w* 为进料温度, °C; *c_n* 为进料比热 kJ • kg⁻¹k⁻¹。

 $c_p = 4.17(1 - 0.0812TS)^{[14]}$ (8) 式中:TS 为料液总含固率。

2.4 发酵塔内部吸收发电余热热量

发酵塔内部吸收发电余热热量公式如下:

$$Q_{e} = c_{w}q_{e}(T_{e,out} - T_{e,in})t^{[21]}$$
(9)

式中: Q_e 为发酵塔内部吸收发电机余热热量, kJ; c_w 为外循环水比热 kJ·kg⁻¹k⁻¹; q_e 为发电机外 循环水质量流量,kg·h⁻¹; $T_{e_{jn}}$ 和 $T_{e_{out}}$ 分别为发电 机外循环水加热系统进出口水温, C_o

根据当地不同月份气温条件、不同深度土壤温 度和不同季节进料温度,由上述传热学公式计算系 统的月平均日需热负荷见表3。

中国沼气 China Biogas 2017 35(2)

表 3 不同月份系统平均日需热负荷

项目	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
环境平均温度/℃	-5.0	-0.5	6.5	12.5	17.5	21.0	23.0	22.0	17.0	11.0	3.5	-3.0
地下半米处土壤温度[22]/℃	2.9	2.3	5.1	9.4	14.9	20.8	25.7	25.3	19.9	15.2	10.9	7.2
地下一米处土壤温度/℃	6.8	4.9	7.8	12.4	15.5	18.5	21.5	23.5	21.1	18.3	14.7	10.3
原料进料温度/℃	0	2	5	9	12	15	17	17	13	11	8	2
发酵塔散热量/ (MJ・d ⁻¹)	899.0	829.9	697.4	567.3	460.2	728.1	674.4	683.6	438.9	561.3	713.2	844.2
储气罐散热量/(MJ・d‐1)	255.2	192.9	82.3	—	—	—	—	—	—	—	110.5	216.9
进料需热量/(MJ • d ⁻¹)	6167.2	6563.0	6800.5	7117.2	7292.3	6938.1	6854.7	7000.6	7000.6	7042.2	6525.5	6125.5
总散热量/(MJ・d ⁻¹)	7321.4	7585.8	7580.2	7684.5	7752.5	7666.2	7529.1	7684.2	7439.5	7603.5	7349.2	7186.6

2.5 太阳能集热系统计算

太阳能集热器作为系统增温保温的热源,利用 温度传感器进行整个发酵系统的定温控制。整个系 统所需热量为太阳能集热器集热量和发电机余热热 量之和 因而太阳能集热器集热量计算为整个沼气 系统所需的热量除去沼气发电机余热热量。

集热器面积计算式^[23]:

$$A_e = \frac{Q_{ra}f}{H_T\eta(1-\eta_s)} \tag{10}$$

式中: Q_{re} 为系统除发电机余热外所需热量,此 处取一月份平均值,kJ; A_e 为太阳能集热面积, m^2 ; H_T 为倾斜辐射量,单位面积倾斜表面平均太阳能总 辐射量,为使太阳能集热器能够保证系统全年稳定 运行 取一月份值计算 ,MJ • m⁻²; η 为集热器日平 均集热效率; η,为管路及热水箱损失效率 ,一般取 0.2~0.3; f 为太阳能保证率。

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^[23]:

$$A_r = \frac{A_e}{r} \tag{11}$$

式中: A_r 为补偿后的面积 m^2 ; r 为补偿比。

笔者系统采用真空管集热器,日平均集热效率 取55%,偏重冬季使用,倾角取51°,查文献^[24]补偿 比为94%,管路及热水箱损失效率取0.2,集热器倾 斜面上月平均单日集热量见表4^[25]。

项目		月份										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
倾斜辐照量/(MJ・m ⁻²)	12.6	15.8	16.5	17.4	17.2	16.7	16.1	16.8	15.3	16.4	14.3	11.7
总热量/(MJ・d ⁻¹)	1275.1	1599.0	1669.8	1760.9	1740.6	1690.0	1629.3	1700.2	1548.4	1659.7	1447.2	1184.0

表 4 兰州地区太阳能保证率为 100% 的集热器集热量

在满足系统在最寒冷月份供能时,整套系统所 需太阳能集热面积为245 m²。

3 太阳能与发电余热增温保温系统的结果分析

3.1 发酵塔温度计算

要保证系统恒温厌氧发酵 温度至关重要 ,计算 得该系统与系统未改之前的塔内温度做了对比。其 结果见图 2。

3.2 复合系统单日供热负荷与系统单日需热量计 算对比

通过计算对比发现在整个系统添加太阳能集热

器之后,所产生热量完全能满足该发酵系统的热量 需求(见图3)。

通过计算,兰州郊区某沼气发电工程平均日需 热量7531.9 MJ,太阳能与发电余热增温保温系统 日产热量7623.4 MJ,完全能满足整个系统的供热 需求,保证整个系统的产气速率。

4 不同增温方式复合发电余热增温保温系统的效益分析

大中型沼气工程辅助增温方式除太阳能和发电 余热外,主要的增温方式还有燃煤锅炉与沼气锅





炉^[26]因此下面将此系统与另两种辅助增温方式作 对比分析。

4.1 太阳能与发电余热增温保温系统的效益分析

系统中太阳能年产有效热量 534.2 GJ。太阳能 年运行费用较少,主要为初投资及安装费用,约 20.1 万元。

4.2 发电余热复合沼气锅炉增温保温系统的效益 分析

年节省沼气量计算式^[27]:

$$Q_{ie} = V q \eta_b \tag{12}$$

式中: Q_{le} 为太阳能年产有效热量,GJ;V为沼气 年需量,m³;q为单位体积沼气的热值,因沼气中 CH₄ 含量为 56%,进气温度为 20°C,故取 18.7 MJ•m⁻³; η_b 为沼气增温系统效率,取 80%。

节省沼气 35709 m³。以热值换算以及后期处 理费用,沼气价格约 0.85 元•m⁻³,系统每年节约 燃气费用 3.04 万元。因沼气工程所需温度不高,且 蒸汽锅炉价格较贵,故选用热水锅炉。因而笔者工 程选用 1 t 的热水锅炉,成本约 3 万元。

4.3 发电余热复合燃煤锅炉增温保温系统的效益 分析

年节省煤炭计算式^[28]:

$$Q_{\mu} = m_c q_c \eta_c \tag{13}$$

式中: m_e 为年节省标煤质量, k_g ; q_e 标煤热值, 29.3 MJ· k_g^{-1} ; η_e 为燃煤增温系统效率 μ 70%。

每年节省标煤 26 t,减少 CO₂ 排放 63.8 t,减少 SO₂ 排放 0.7 t,减少 NO_x 排放 0.2 t,减少粉尘排放 0.3 t。按国家税务总局发布的《关于调整焦煤资源 税适用税额标准的通知》^[29],每年节省费用 2.72 万 元。选用燃煤锅炉为热水锅炉,笔者工程选用 1 t 的热水锅炉,成本约 2 万元。

5 结论

(1)兰州市花庄镇沼气发电工程平均日需热量 7531.9 MJ,太阳能与发电余热增温保温系统日产热量7623.4 MJ,完全能满足整个系统热量需求,使整 个发酵塔的温度在夏季和其他季节分别维持在 52℃和37℃进行不同季节的恒温厌氧发酵。

(2)相比其他两种辅助增温方式,系统能够显现出更好的经济效益和环境效益。相比沼气复合增温方式每年可节省3.04万元,减少初始投资约3万元;相比燃煤复合增温方式每年节省标煤26t,减少CO₂排放63.8t,减少SO₂排放0.7t,减少NO_x排放0.2t,减少粉尘排放0.3t,节省2.72万元,减少初始投资约2万元。

(3)相比其它沼气工程的计算分析,文章考虑 到对于储气罐在寒冷季节的保温,更加全面的分析 了整个系统的供能需求,为沼气工程在热量平衡方 面提供了更加完善的分析。且系统结合太阳能集热 系统,更好的利用了兰州地区丰富的太阳能,同时利 用发电机的余热对整个发酵系统进行增温保温,提 高了整个系统对热量的利用效率。

参考文献:

- [1] 张 迪,石惠娴,雷 勇,等.如何保证地源热泵式沼气 池加温系统长期稳定运行[J].节能技术,2011,29 (1):9-14.
- [2] 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.

- [3] 席江,王超.发酵温度、进料浓度和水力停留时间对 连续式厌氧发酵效果的影响[J].中国沼气,2014, 04:43-47.
- [4] Yuan S , Rui T , Hong Y X. Research and analysis of solar heating biogas fermentation system [J]. Procedia Environmental Sciences , 2011 , 11: 1386 – 1391.
- [5] Massé D I, Masse L, Xia Y, et al. Potential of low temperature anaerobic digestion to address current envi– ronmental concerns on swine production [J]. Waste Man– agement Research, 2010, 88(13): 112 – 120.
- [6] 李金平,单少雄,董缇.地上式户用太阳能恒温沼气 池产气性能[J].农业工程学报,2015,05:287-291.
- [7] 寇 巍,张 欢,孙玉辉,等.寒冷地区沼气工程增温保 温能量效益分析[J].太阳能学报,2015,03:708-713.
- [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 , 2000 , 69 (3): 239 - 247.
- [9] 纵玉金. 兰州地区太阳能-地下水源热泵系统的数值 模拟与节能分析[D]. 兰州:兰州理工大学 2010.
- [10] Lübken M , Wichern M , Schlattmann M , et al. Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops [J]. Water research , 2007 , 41(18): 4085 – 4096.
- [11] B? rjesson P , Mattiasson B. Biogas as a resource-efficient vehicle fuel [J]. Trends in biotechnology ,2008 ,26 (1): 7-13.
- [12] Krakat N, Westphal A, Schmidt S, et al. Anaerobic digestion of renewable biomass: thermophilic temperature governs methanogen population dynamics [J]. Applied and environmental microbiology, 2010, 76(6): 1842 – 1850.
- [13] Krakat N , Westphal A , Schmidt S , et al. Anaerobic digestion of renewable biomass: thermophilic temperature governs methanogen population dynamics [J]. Applied and environmental microbiology , 2010 , 76(6): 1842 – 1850.

- [14] 裴晓梅,石惠娴,朱洪光.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.
- [15] Akbulut A. Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: cicekdaĝi case study[J]. Energy, 2012, 44(1): 381-390.
- [16] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版 社,2006.
- [17] 李金平,柏建华,李珍.不同恒温条件厌氧发酵的沼 气成分研究[J].中国沼气,2010,06:20-23+55.
- [18] 刘艳峰,刘加平.建筑外壁面换热系数分析[J].西安 建筑科技大学学报(自然科学版),2008,40(03): 407-412.
- [19] Colangelo F , De Luca G , Ferone C , et al. Experimental and Numerical Analysis of Thermal and Hygrometric Characteristics of Building Structures Employing Recycled Plastic Aggregates and Geopolymer Concrete [J]. Energies , 2013 , 6(11): 6077 - 6101.
- [20] 姚玉英,黄凤廉 陈常贵,等. 化工原理[M]. 天津: 天 津大学出版社,2000.
- [21] 童超,秦朝葵,周宇.小型燃气内燃机热电联供试验 系统研究[J].煤气与热力,2012,09:21-24.
- [22] 贺静静. 兰州地区土壤源热泵垂直 U 型管温度场数值 模拟研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2013.
- [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, 01:122-128.
- [24] GJBT 960-2006 太阳能集中热水系统选用与安装 [S].
- [25] 杨金焕,陈中华,汪征宏.光伏方阵最佳倾角的计算[J].新能源,2000,22(5):6-9.
- [26] 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,2010,02:268-273.
- [27] 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, 07:281-284.
- [28] 邢慧娟,秦朝葵,张杨竣,等.大中型沼气工程热工 行为分析[J]. 热科学与技术,2013,03:272-276.
- [29] 王宇欣,苏星,唐艳芬,等.京郊农村大中型沼气工 程发展现状分析与对策研究[J].农业工程学报, 2008,24(10):291-295.