

大中型沼气工程不同加热方式的经济效益分析

蒲小东¹, 邓良伟^{1*}, 尹 勇², 宋 立¹, 王智勇¹

(1. 农业部沼气科学研究所, 成都 610041; 2. 四川省农村能源办公室, 成都 610041)

摘 要:为解决大中型沼气工程的加热升温问题, 该文以一个猪场废水处理沼气工程为例, 对沼气锅炉、太阳能和沼气发电余热利用 3 种加热方式进行了经济效益分析。结果表明: 沼气锅炉加热、太阳能加热和沼气发电余热利用加热 3 种方式的投资比为 2:11.2:1, 沼气发电余热利用加热方式的费用年值仅为沼气锅炉加热和太阳能加热方式的 60%和 12%; 沼气发电余热利用加热方式无论从经济效益、技术性能, 还是适应性、运行持久性等方面都明显优于太阳能加热和沼气锅炉加热。因此, 基于中国的自然经济状况, 大部分大中型沼气工程应优先选择沼气发电余热利用加热方式。

关键词: 沼气, 加热装置, 太阳能加热, 沼气工程, 加热方式, 经济分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.07.049

中图分类号: S216.4, F323.214 文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-07-0281-04

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 CSAE, 2010, 26(7): 281—284. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

目前, 国内外规模化大中型沼气工程日益增多, 特别是高浓度物料中温厌氧发酵是规模化沼气工程发展的趋势, 温度是影响沼液中温发酵产气率的关键因素之一, 中温发酵最适温度为 35~40℃^[1-3], 如果要使高浓度物料沼液中温发酵工程常年稳定运行, 保持恒定、高效的产气量, 有必要对沼气发酵料液的温度进行严格控制, 采取适当的加热保温措施, 使发酵温度不随环境气温而变化^[4]。故选择经济高效的加热升温方式成为大中型沼气工程发展必须解决的问题。

有学者提出, 沼气池的加热方式主要包括电热膜加热、太阳能加热、化石能源热水锅炉加热、沼气锅炉加热、沼气发电余热利用和燃油式加热等 6 种^[5]。对于当今国内外的规模化大中型沼气工程而言, 大多数都采用热水循环加热法, 从目前实际应用来看, 主要有沼气锅炉加热、太阳能加热和沼气发电余热利用加热 3 种方式^[6-7]。沼气锅炉加热是一种传统的加热方式, 沼气锅炉以沼气为燃料, 通过燃烧获得热水, 热水经换热器加热发酵料液, 主要运用于有富裕沼气的工程; 太阳能加热系统采用定温控制, 通过太阳能集热系统完成热能的采集和传输, 由太阳能热水通过螺旋换热管对发酵料液进行加热^[8-10]; 沼气发电余热利用是目前发展最快的一种加热方

式, 沼气发电余热利用是在沼气热电联产工程中, 利用发电机组发电, 同时燃气内燃机将排放将近 600℃的尾气, 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热发酵料液^[11-12]。

本文通过设计实例, 分析了这 3 种常见的大中型沼气工程加热方式并进行了经济效益分析, 解决大中型沼气工程加热升温的问题, 以促进大中型沼气工程的稳定运行。

1 研究实例与计算模型

1.1 研究实例

以年存栏 5 700 头猪 (年出栏 10 000 头猪) 的猪场为例, 处理猪粪 10 t/d, 尿 15 t/d, 冲洗废水 85 t/d。采用“基于浓稀分流的猪场粪便污水处理方法” (专利申请号 2009100584721), 分别设计一座高浓度中温厌氧消化罐和一座低浓度常温厌氧消化罐, 各参数如下:

1) 高浓度中温厌氧消化罐

日进水量: 21.4 t/d; 总固体 (TS): 8%; 发酵温度: 中温发酵 (35±2)℃; 有效池容: 300 m³, 尺寸: $\phi 8.00$ m×7.00 m, 锥体高 1.05 m; 水力停留时间 HRT: 14.0 d; 建筑结构: 钢结构; 容积产气率: 1.33 m³/(m³·d), 保温材料: 聚苯乙烯; 中温厌氧消化罐日产气量为 400 m³。

2) 低浓度常温厌氧消化罐

日进水量: 88.6 t/d; 总固体 (TS): 0.4%; 发酵温度: 20℃; 有效池容: 500 m³, 尺寸: $\phi 9.00$ m×8.38 m, 锥体高 1.05 m; 水力停留时间 HRT: 14.0 d; 建筑结构: 钢结构; 容积产气率: 0.2 m³/(m³·d); 常温厌氧消化罐日产气量为 100 m³。

该沼气站日产沼气量共计 500 m³。

注: 因加热只针对高浓度物料, 故仅讨论高浓度中

收稿日期: 2010-01-05 修订日期: 2010-07-15

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划 (2008BAD4B10); 国家“十一五”科技支撑计划 (2008BAD4B15)

作者简介: 蒲小东 (1981—), 男, 四川绵竹人, 主要从事废水处理研究和工程设计。成都 农业部沼气科学研究所, 610041。Email: pxd601@163.com
*通信作者: 邓良伟 (1966—), 男, 四川安岳人, 研究员, 博士, 主要从事废水生物处理研究。成都 农业部沼气科学研究所, 610041。

Email: dlwbrtc@yahoo.com.cn

温厌氧消化罐加热问题。

1.2 热平衡计算

对于沼气工程,由能量守恒定律可知,输出(损失)的能量和输入(获得)的能量应相等,才能保证整个系统的温度恒定。沼气工程每天损失的能量主要是厌氧消化罐及管道的散热,以及每天新增投料所需热量。(发酵产生的生物化学热量相对于外加热量小得多,故忽略不计)

1.2.1 厌氧消化罐投料损失的热量

厌氧消化罐投料损失的热量计算公式(1)为^[13]

$$Q_1 = cm(T_D - T_S) \quad (1)$$

式中: c ——料液的比热容(新鲜料液质量分数约为 8%,可近似取水的比热), $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m ——每天进入沼气池的新鲜料液量, $21.4 \times 10^3 \text{ kg}$; T_D ——沼气发酵罐内料液的温度, 35°C ; T_S ——新鲜料液的温度, 5°C 。

经计算, $Q_1 = 2\,696\,400 \text{ kJ}$ 。

1.2.2 厌氧消化罐散热损失的热量

厌氧消化罐散热损失的热量计算公式(2)为^[13]

$$Q_2 = 24 \times (T_D - T_A) / [\sum b_i / (\lambda_i \cdot S_i) + 1 / (\alpha \cdot S_o)] \quad (2)$$

式中: Q_2 ——罐内向罐外散发的热量,即罐体散热损失, kJ ; S_i ——罐顶、罐壁和罐底散热面积,分别为 52 m^2 、 176 m^2 和 50 m^2 ; S_o ——罐顶和罐壁散热总面积, 228 m^2 ; T_A ——罐外介质温度, 5°C ; α ——罐外壁热转移系数, $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; b_i ——罐体各部结构层,保温板厚度为 70 mm ,罐底基础为钢筋砼厚度为 650 mm ; λ_i ——罐体各部结构层,保温板导热系数为 $0.042 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,钢筋砼导热系数为 $1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

经计算, $Q_2 = 146\,160 \text{ kJ}$ 。

1.2.3 循环水管道散热损失的热量

循环水管道散热损失的热量计算公式(3)为^[13]

$$Q_3 = 24 \times \{ (T_i - T_o) / [1 / (2\pi L \lambda) \cdot \ln(r_o / r_i) + 1 / (2\pi r_o L \alpha)] + (T_o - T_A) / [1 / (2\pi L \lambda) \cdot \ln(r_o / r_i) + 1 / (2\pi r_o L \alpha)] \} \quad (3)$$

式中: Q_3 ——管道内向管道外散发的热量, kJ ; T_i ——进水管温度, 60°C ; T_o ——出水管温度, 40°C ; r_o ——保温层的外半径, 100 mm ; r_i ——保温层的内半径, 20 mm ; L ——进、出水管长度, 50 m ; λ ——管道保温层导热系数, $0.042 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

经计算, $Q_3 = 17\,249 \text{ kJ}$ 。

因此,每天沼气发酵罐总的热损失为

$$Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 2696400 + 146160 + 17249 = 2\,860 \text{ MJ}$$

2 结果与分析

2.1 投资估算

2.1.1 沼气锅炉加热

沼气锅炉加热方式是指锅炉以富裕沼气为燃料获得热水,通过热水循环向沼气发酵系统供热。该方式加热效率高,同时对设备和操作技术要求比较高。沼气锅炉提供的热量按公式(4)计算^[14]

$$Q_0 = r_s \cdot q \cdot \eta \quad (4)$$

式中: Q_0 ——沼气锅炉日供热量, kJ ; r_s ——沼气供锅炉用量, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; q ——单位沼气的发热量, $22 \text{ MJ}/\text{m}^3$; η ——沼气锅炉热效率,取 80% 。

沼气锅炉日供热量 $Q_0 \geq Q_{\text{总}} = 2\,860 \text{ MJ}$,故沼气锅炉至少需要沼气用量 $r_s = Q_{\text{总}} / (q \cdot \eta) = 2860 / (22 \times 0.8) = 163 \text{ m}^3$ 。

沼气站日产气量为 500 m^3 ,则沼气供锅炉用量占其总产气量的 32.6% 。

沼气锅炉类型有蒸汽锅炉和热水锅炉,因为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。本工程选用 2 t 的热水锅炉,成本大约为 5 万元。

2.1.2 太阳能加热

太阳能加热方式是以太阳能为沼气工程加热辅助能源,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,主要运用于太阳能资源比较丰富的地区;以中国太阳能资源最丰富的西藏地区为例,太阳能热管加热系统日均集热量按下式(5)计算^[15-16]

$$Q = AI\eta_j(1 - \eta_s) \quad (5)$$

式中: A ——集热器采光面积, m^2 ; I ——集热面上日平均辐射强度, $20.7 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; η_j ——集热器全日集热效率,取 0.55 ; η_s ——管路及储水箱热损失率,取 0.1 。

经计算, $A = 280 \text{ m}^2$,则太阳能集热器的价格为: $280 \times 1000 = 28$ 万元。

2.1.3 沼气发电余热利用加热

沼气发电余热利用加热是在沼气热电联产工程中,通过发电余热回收系统中的热量加热发酵料液。本工程若采用国产沼气发电机组, 1 m^3 沼气大约可发电 $1.8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,则 50 m^3 沼气可发电 $900 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。选用一台 50 kW 的国产发电机组,每天发电 16 h ,产生的余热为 $4\,400 \text{ MJ}$,若余热利用率为 70% ,则 $Q_{\text{余热}} = 4400 \times 0.7 = 3\,080 \text{ MJ} > Q_{\text{总}} = 2\,860 \text{ MJ}$,足够为厌氧消化罐加热。

一台 50 kW 的发电机组余热回收装置成本大约为: $50 \text{ kW} \times 500 \text{ 元}/\text{kW} = 2.50$ 万元。

经以上计算,3种加热方式投资估算见表1。

表1 不同加热方式投资估算

Table 1 Investment estimation with different heating methods

加热方式	主要材料和设备费/元	安装费/元	合计/元
沼气锅炉加热	50 000	6 000	56 000
太阳能加热	280 000	33 600	313 600
沼气发电余热利用加热	25 000	3 000	28 000

由表1数据可知,3种方式运行费用相同,取得效果相同,都可以达到所需加热升温要求。但沼气锅炉加热、太阳能加热和沼气发电余热利用加热3种方式的投资比为 $2:11.2:1$,沼气发电余热利用加热方式投资最低。

2.2 运行费用

3种加热方式都是采用热水循环加热法,主要在于热源不同,采用的动力设备及加热管线都相同,故年运行费用相同。

1) 电费

设定每天热水循环泵运行 16 h ,功率为 0.25 kW ,每天耗电量为 $4.0 \text{ kW} \cdot \text{h}$,电价按 $0.5 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计,年正常耗

电费用为 730 元。

2) 维护费

年维护费按 1 000 元/a 计, 则 3 种加热方式的运行费用都为 1 730 元/a。

2.3 经济效益分析

1) 费用年值

在技术经济学中, 对一个项目的经济分析采用的指标很多, 有静态评价指标 (如投资回收期, 投资收益率等); 还有考虑资金时间价值的动态评价指标 (如净现值、净年值、费用现值与费用年值以及内部收益率等)。本文采用费用年值对各加热方式进行经济评价^[17-18]。费用年值是将现值分摊到寿命期内各年的等额年值, 可用公式 (6) 计算, 加热系统费用年值见表 2。

$$AC = PC \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] + \text{年运行费} \quad (6)$$

式中: AC ——费用年值, 元; PC ——费用现值, 元;
 n ——加热系统使用年限, a; i ——年利率, 取 10%。

表 2 不同加热方式费用年值

Table 2 Analysis of annual-cost with different heating methods

加热方式	投资 /元	运行费用 /元	使用年限 /a	年利率	费用年值 /元
沼气锅炉加热	56 000	1 730	10	0.1	10 482
太阳能加热	313 600	1 730	10	0.1	52 767
沼气发电余热利用	28 000	1 730	10	0.1	6 286

根据费用年值最小判断准则, 由表 2 可知: 沼气发

表 3 不同加热方式综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation with different heating methods

加热方式	总投资/元	年运行费/元	年收入/元	费用年值/元	适应性	运行管理	动力	运行	持久性	经济性
沼气锅炉加热	56 000, 中	1 730	105 412, 低	10 482, 中	适合所有地区	需要日常管理	需要	能稳定	持久运行	低
太阳能加热	313 600, 高	1 730	146 000, 中	52 767, 高	太阳能辐射强度大的地区: 如西藏	需要日常管理	需要	不能持久	稳定运行	低
沼气发电余热利用加热	28 000, 低	1 730	164 250, 高	6 286, 低	适合所有地区	需要日常管理	需要	能稳定	持久运行	高

3 结 论

对于当今国内外的规模化大中型沼气工程, 大多数都采用热水循环加热法, 主要有沼气锅炉加热、太阳能加热和沼气发电余热利用加热 3 种方式。这 3 种加热方式在投资、运行费用, 适应性和经济性等方面都有比较明显的差别。

1) 沼气锅炉加热、太阳能加热和沼气发电余热利用加热 3 种方式的投资比为 2:11.2:1, 沼气发电余热利用加热方式的费用年值仅为沼气锅炉加热和太阳能加热方式的 60%和 12%。沼气发电余热利用加热方式投资和费用年值均为最低。

2) 沼气发电余热利用加热方式无论从经济效益、技术性能, 还是适应性、运行持久性等方面都明显优于太阳能加热和沼气锅炉加热。

3) 中国大部分大中型沼气工程应优先选择沼气发电余热利用加热方式。

电余热利用加热方式的费用年值仅为沼气锅炉和太阳能加热方式的 60%和 12%, 明显优于其余 2 种加热方式。

2) 年收入

采用不同加热方式的年收入情况见图 1 (本文只计算沼气及发电收入, 沼气以 0.8 元/m³ 计, 电以 0.5 元/(kW·h) 计)。

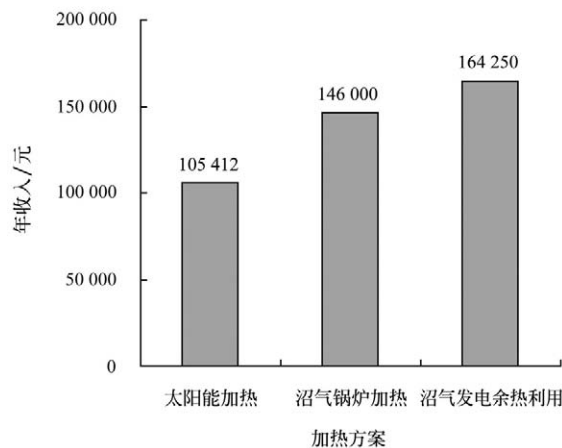


图 1 不同加热方式年收入

Fig.1 Annual income with different heating methods

3) 综合评价

通过以上分析, 3 种加热方式的综合评价见表 3。

由表 3 可知, 沼气发电余热利用加热方式无论从经济效益、技术性能, 还是适应性、运行持久性等方面都明显优于沼气锅炉加热和太阳能加热。

[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: 210.
- [2] 胡继萃, 周孟津, 左剑恶, 等. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [3] 丁羽. 太阳能加热沼气反应装置的设计及参数选择[J]. 农机化研究, 2008, (8): 69—71.
Ding Yu. The design and preferences of the methane reactor with solar heating[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, (8): 69—71. (in Chinese with English abstract)
- [4] 樊美婷, 刘科, 刘建禹. 高寒地区沼气工业化生产配套加热系统的初步设计[J]. 农机化研究, 2008, (3): 105—107.
Fan Meiting, Liu Ke, Liu Jianyu. Preliminary design of industrial production in alpine regions gas heating system supporting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, (3): 105—107. (in Chinese with English abstract)

- [5] 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 with English abstract)
- [6] Andreas Ch Yiannopoulos a, Ioannis D Manariotis b, Constantin V Chrysikopoulos b. Design and analysis of a solar reactor for anaerobic wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2008, (99): 7742–7749.
- [7] 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, Zheng Maoyu, Wu Fei. Experiment of producing methane with solar heating in cold area[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(1): 46—49. (in Chinese with English abstract)
- [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] Petros Axaopoulos, Panos Panagakis. Energy and economic analysis of biogas heated livestock buildings[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 24(3): 239—248.
- [10] 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.
- [11] Zupancic G D, RosM. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion[J]. Renewable Energy, 2003, 28(14): 2255—2267.
- [12] 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.
Luo Fuqiang, Tang Dong, Liang Yu. An investigation on the increasing production of biogas by heating the biomass with exhaust heat from engine[J]. China Biogas, 2005, 23(3): 25—26. (in Chinese with English abstract)
- [13] 姚玉英, 黄凤廉, 陈常贵, 等. 化工原理(上册)[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000: 201—220.
- [14] 赵金辉, 谭羽非, 杨小刚. 太阳能、沼气锅炉与沼气池联合系统的设计[J]. 节能技术, 2008, 26(6): 523—525.
Zhao Jinhui, Tan Yufei, Yang Xiaogang. Application design on solar energy and marsh gas boiler combination warming system[J]. Energy Conservation Technology, 2008, 26(6): 523—525. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王晓超, 贺光祥, 邱凌, 等. 太阳能热管加热系统在沼气工程中的应用[J]. 农机化研究, 2008, (7): 204—207.
Wang Xiaochao, He Guangxiang, Qiu Ling, et al. Solar heat pipe heating system in the application of biogas project study[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, (7): 204—207. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨建坤, 张旭. 采用太阳能加热系统的泳池设计[J]. 节能, 2004, (2): 27—28.
Yang Jiankun, Zhang Xu. Design of the swimming-pool using solar heat system[J]. Energy Conservation, 2004, (2): 27—28.
- [17] 苏建民. 化工技术经济[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [18] 王铁良, 白义奎, 佟国红, 等. 日光温室中燃池加热系统的经济性分析[J]. 可再生能源, 2004, (3): 35—37.
Wang Tieliang, Bai Yikui, Tong Guohong, et al. Economic analysis on using fire pit heating system in solar greenhouse[J]. Renewable Energy, 2004, (3): 35—37. (in Chinese with English abstract)

Economic benefit analysis on large and middle-scale biogas plants with different heating methods

Pu Xiaodong¹, Deng Liangwei^{1*}, Yin Yong², Song Li¹, Wang Zhiyong¹

(1. Biogas Scientific Research Institute of the Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China;

2. Rural Energy Office of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: To solve heating and warming problem on large and middle-scale biogas plants, taking a pig farm wastewater disposal biogas plant as an example, the economic benefits of three heating methods (biogas boiler, solar energy and biogas power generation waste heat utilization) were analyzed in this article. The results showed that ratio of investment was 2:11.2:1 to biogas boiler, solar energy and biogas power generation waste heat utilization, the annual cost of biogas power generation waste heating utilization method was only solar energy and gas boiler heating method's 60% and 12%. Whether economic benefit, technical performance, or adaptability, persistence, biogas power generation waste heat utilization method were better than solar heating and gas boiler heating. Based on the natural and economical situation, the scheme of biogas power generation waste heat utilization is suitable for most large and middle-scale biogas plants in China.

Key words: biogas, heating equipment, solar heating, biogas plants, heating methods, economic analysis