

沼气工程生物质能-太阳能互补供热系统优化设计

赵凯¹，冯晶²，孟海波²，李冰峰³，罗娟²，于佳动²，黄开明²

(1.河北省新能源技术推广站，河北石家庄050021；2.农业部农业废弃物资源化利用重点实验室，北京100125；3.农业部农业生态与资源保护总站，北京100125)

摘要：为实现沼气工程生物质能-太阳能互补供热系统经济效益最大化，文章以华北地区5000m³

CSTR厌氧消化罐为实例，采用线性规划方法对该系统的关键参数进行优化。结果表明：该厌氧消化罐的散热量1月份最高，7月份最低，分别为330.02kW和139.18kW。笔者使用生物质能-

太阳能互

补供热系统为该CS

TR发酵罐供热，当成型燃料锅炉功

率为509.3kW，太阳能集热器面积为1775.6m²，蓄热水箱容积为10.48m³时，折合年费用最低。

此时，初投资为1871696元，年运行成本为169736元，折合年费用294515元。初始投资中，太阳能集热器的投资比例最大，占94.9%；生物质颗粒燃烧器占4.08%。运行成本中，生物质颗粒燃烧占75.26%。相比沼气热水锅炉、生物质锅炉与太阳能加热系统，生物质能-太阳能互补供热系统初始投资与年运行费用较低，更适用于中小规模的沼气工程，具有广泛的推广价值。

沼气工程是处理规模化畜禽养殖粪污有效方法^[1]

。近年来，随着国家对畜禽养殖粪污排放的要求越来越严格，国内规模化沼气工程日益增多^[2]

。温度是影响沼气工程粪污处理效率以及厌氧消化产气的关键因素之一^[3-4]

。一般而言，规模化沼气工程采用中温发酵，其适宜的温度范围是35 ~ 40^[5]

。在国内大部分地区，全年温度变化很大，要使沼气工程常年稳定高效运行，有必要采用适当的增温保温方法对沼气工程的厌氧消化温度进行严格控制，使沼气工程的发酵温度保持在中温发酵的温度范围内^[6-7]。

沼气工程传统的加热方式为热水循环加热法，所采用的热源主要包括电热膜、太阳能集热器、化石能源热水锅炉、沼气锅炉、沼气发电余热等^[7-9]

。近年来，生物质固体成型燃料的制备技术日趋成熟，成本逐渐下降^[10]

。生物质颗粒燃料能量密度与中质烟煤相当；燃烧时CO₂零排放，NO_x和SO₂等的排放量远小于煤；燃烧特性明显得到改善，提高了利用效率，连续自动运行条件下，燃烧效率通常能达到86%以上^[11]。基于以上优点，生物质颗粒燃料热水锅炉逐渐在沼气工程供热中占有了一席之地^[12]。

这几种加热方式中，沼气锅炉加热消耗沼气，不利于沼气的高值化利用^[4]

。沼气发电余热需要为沼气工程配备发电机组，并且在当前的技术条件下国产沼气发电机组能量利用效率较低，而进口沼气发电机组则投资较高，不适宜中小规模沼气工程使用^[13]

。太阳能是一种清洁能源，常年运行费用较低，但它在阴天或者晚上无法工作，具有不连续性，为了实现连续供热，需要扩大集热面积和热量存储装置，导致了供热系统初投资增加^[4]。生物质颗粒燃料热水锅炉初始投资较低，但常年需要生物质颗粒燃料，运行费用较高^[14]。

生物质能-

太阳能互补供热系统沼气工程供热是近年来兴起的一种供热方式^[14]

。该系统通过将生物质颗粒燃烧器和太阳能集热器联合组成一个供热系统，充分利用生物质能与太阳能的优势，为厌氧消化罐提供稳定的热源，同时尽量降低运行成本与初始投资^[15]

。太阳能集热器面积的增加，可以减少生物质颗粒燃烧器的运行时间，降低运行成本。但是增加太阳能集热器面积的同时，也增加了初投资^[15]。实现经济效益的最大化，需要对系统中各部分设计参数进行优化^[16-18]。

本文拟建立沼气工程的生物质能-太阳能互补供热系统的经济分析模型，并结合实例利用线性规划方法对供热系统进行优化，为生物质能-太阳能互补供热系统的设计提供参考。

1 研究实例与热量需求

1.1 研究实例

以河北省

保定市年出栏4500头的

奶牛场为例，年产生粪便2.95万吨，设计CSTR

发酵罐1座，容积5000m³，直径为30m，高度为8m，设计停留时间为27天。发酵罐内采用罐内盘管加热的方式。

1.2 热平衡计算

厌氧消化需要保持一定的温度厌氧微生物才能够保持活性，这就要求厌氧消化罐获得的热量必须大于损失的热量，才能保证整个系统的温度恒定^[19]

。一般而言，厌氧消

化罐每日损失的热量主要是每天新增投料

所需热量以及厌氧消化罐每日散热^[19]。厌氧消化过程中的生物化学发热量较小，可忽略不计^[4]。

厌氧消化罐投料损失的热量计算公式（1）为^[20]：

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

式中: c 为料液的比热容(新鲜料液质量分数约为 8%, 取水的比热), $4.2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$; m 为沼气池的新鲜料液流量, $660 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$; T_D 为沼气发酵罐内料液的温度, 35 C ; T_F 为新鲜料液的温度, C 。

厌氧消化罐散热损失的热量计算公式(2)为^[20-21]:

$$Q_2 = (S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3)(T_D - T_E) \quad (2)$$

式中: S_1, S_2, S_3 为发酵罐顶面积、侧壁面积与底面积, 分别为 $706 \text{ m}^2, 754 \text{ m}^2$ 与 706 m^2 ; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为发酵罐顶、侧壁与底部的传热系数, 分别为 $2.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}, 0.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ 与 $0.48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$; T_D 为沼气发酵罐内料液的温度, 35 C ; T_E 为环境温度, C 。

沼气工程总需热量 Q_M 为物料升温与发酵罐散热损失两部分之和^[19]:

$$Q_M = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

沼气工程热量平衡计算结果如表1所示。全年中, 华北地区沼气工程的散热量相差较大, 随外界环境温度的升高而升高。其中1月份环境温度最低, 散热量最大, 为 330.02 kW ; 7月份的环境温度最高, 散热量最低, 为 139.18 kW 。

表 1 沼气工程热量平衡计算结果

月份	T_D ℃	T_E ℃	T_F ℃	Q_1 kW	Q_2 kW	Q_T kW
1 月	35	-1.8	5	240.35	89.68	330.02
2 月	35	2.2	5	240.35	79.93	320.28
3 月	35	8.6	10	200.29	64.34	264.62
4 月	35	14.7	15	160.23	49.47	209.70
5 月	35	20.8	20	120.17	34.60	154.78
6 月	35	26.3	20	120.17	21.20	141.37
7 月	35	27.2	20	120.17	19.01	139.18
8 月	35	25.0	20	120.17	24.37	144.54
9 月	35	20.1	20	120.17	36.31	156.48
10 月	35	15.9	15	160.23	46.55	206.78
11 月	35	7.2	10	200.29	67.75	268.03
12 月	35	0.8	5	240.35	83.34	323.69

2 生物质能-太阳能互补供热系统

2.1 系统设计

本研究中所使用的生物质能-太阳能互补供热系统如图1所示。该系统中，太阳能集热器、生物质颗粒燃烧器及厌氧消化罐通过蓄热水箱相连接，并在控制单元的控制协调下自动运行^[14]。

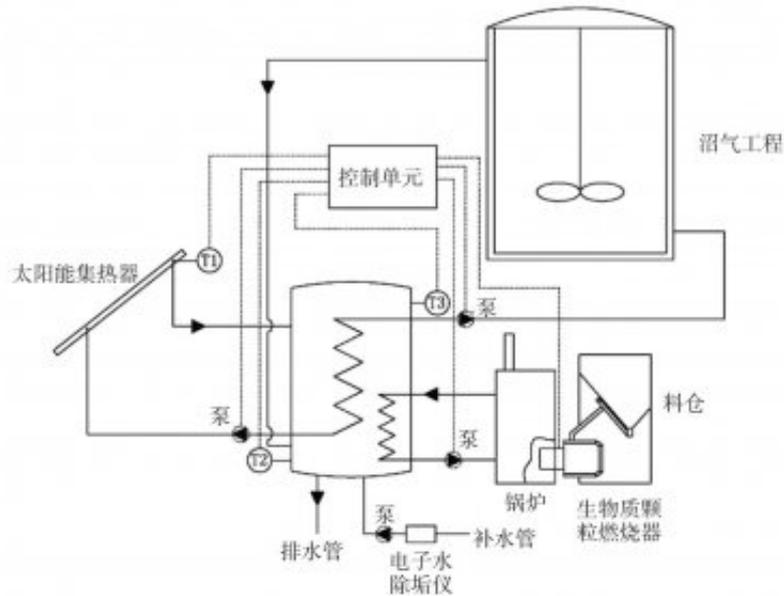
生物质颗粒燃烧器全功率间歇运行，当蓄热水箱上部温度 T_3

大于设定温度时燃烧器停止

运行，小于设定温度则开始运行。太阳能集热器出水口

温度 T_1 与蓄热水箱底部温度 T_2

温差超过7℃时，太阳能集热器循环水泵开始循环；当温差小于3℃时停止循环。供热设备将热量储存在蓄热水箱中，并通过换热装置将热量传递至供热终端。



注： T_1 为太阳能集热器出水口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_2 为水箱底部温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_3 为蓄热水箱上部的温度传感器测得的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；虚线表示控制信号。

图1 生物质能-太阳能互补供热系统流程图

2.2系统优化

在生物质能-太阳能互补供热系统中，太阳能集热器面积的增加可以减少生物质颗粒的使用，降低运行成本，但是会增加系统的初投资。而减少太阳能集热器面积，则降低系统的初始投资，但生物质颗粒燃烧量增大，运行成本提高。因此该系统在初投资和运行成本之间存在矛盾^[14]。本文通过建立系统的经济优化模型，对系统中主要装置的参数进行优化设计。

2.2.1目标函数

系统优化的目标是降低供热系统每年的费用,即将年运行成本和初投资平均到使用年限的每一年相加为目标函数 F_{min} , 目标函数取最小值时的系统参数为最优设计参数。 F_{min} 如下:

$$F_{min} = \frac{F_{invest}}{n} + F_{operation} \quad (4)$$

式中: F_{invest} 为系统的初投资, 元; $F_{operation}$ 为系统的运行成本, 元; n 为系统的使用年限, 15 a。

其中, 系统的初投资包括生物质颗粒燃烧器及配套锅炉、太阳能集热器、蓄热水箱、循环水泵, 以及其他管道仪表等, 其计算式如下:

$$F_{invest} = P_{burner} \times \frac{N_b}{1000} + S_{solar} \times N_s + V_{tank} \times N_t + I_{else} \quad (5)$$

式中: P_{burner} 为生物质颗粒燃烧器的功率, kW; N_b 为生物质颗粒燃烧器的价格, 150 元·kW⁻¹; S_{solar} 为太阳能集热器的面积, m²; N_s 为太阳能集热器的价格, 1000 元·m⁻²; N_t 为蓄热水箱的价格, 450 元·m⁻³; I_{else} 为水泵等附件的投资, 5000 元。

系统的运行成本包括燃烧生物质颗粒燃料的费用, 系统的水泵、风机等的用电费用、人工费、系统的维护费用等。其中生物质颗粒燃料费用每月差别较大, 需按月计算, 其他费用按年计算。计算如式 (6):

$$F_{operation} = \sum_{i=1}^{12} F_i + F_{power} + F_{labor} + F_{main} \quad (6)$$

式中: F_{power} 为燃烧动力费, 元; F_{labor} 为人工费, 2000 元; F_{main} 为系统的维护费用, 500 元。 i 月的生物质颗粒燃料的费用 F_i , 当 $F_i < 0$ 时取 0, 计算如式 (7):

$$F_i = \frac{Q_i - E_i \times S_{solar} \times \eta_1 n_i}{q_{pellst} \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_5 \times \eta_6} N_p \quad (7)$$

式中： Q_i 为 i 月份的沼气工程所需热量，kJ； E_i 为 i 月份倾斜表面月平均日太阳辐射量， $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ； η_1 为太阳能集热器的集热效率，0.5； η_2 为生物质颗粒燃烧器的燃烧效率，0.9； η_3 为锅炉热效率效率，0.8； η_5 为生物质锅炉用盘管换热器的换热效率，0.9； η_6 为采暖用盘管换热器的换热效率，0.9； n_i 为 i 月份的天数，d； q_{pellet} 为生物质颗粒燃料的热值， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； N_p 为生物质颗粒燃料的价格，0.5元 $\cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由式(4) ~ (7) 可得目标函数式如下：

$$F_{min} = \frac{P_{burner} \times \frac{N_b}{1000} + S_{solar} \times N_S + V_{tank} \times N_t + I_{else}}{n} + \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i - E_i \times S_{solar} \times \eta_1 \times n_i}{q_{pellet} \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_5 \times \eta_6} \times N_p + F_{power} + F_{labor} + F_{main} \quad (8)$$

2.2.2约束条件

生物质颗粒燃烧器的功率应大于太阳能集热器不运行条件下厌氧消化罐的最大耗热功率^[14]，即：

$$P_{burner} \times \eta_3 \times \eta_5 \times \eta_6 \geq Q_{max} \quad (9)$$

式中: Q_{Max} 为厌氧消化罐的最大耗热功率, kW。

生物质颗粒燃烧器间歇运行, 生物质锅炉间歇运行时间内与太阳能热水器共同为厌氧消化罐提供热量, 还应当使蓄热水箱蓄热, 蓄热水箱内水温不应超过蓄热水箱的温度上限^[14-15], 其约束如下:

$$\frac{C_w \times \rho_w \times V_{tank} \times \Delta T}{(P_{burner} \times \eta_s \times \eta_6 + \frac{E \times S_{solar} \times \eta_1}{3600 \times t_s} - \frac{Q_{max}}{\eta_6}) \times 3600} \geq t_2 \quad (10)$$

式中: ρ_w 为水的密度, $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V_{tank} 为蓄热水箱容积, m^3 ; C_w 为水的比热容, $4200 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$; ΔT 为蓄热温差, 15°C ; t_2 为生物质颗粒燃烧器设计的最短运行时间, 0.5 h ; E 为年平均日太阳总辐照量, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; t_s 为平均日照时间, h 。

生物质锅炉间歇运行中一个周期的停止运行时间不能过短, 如果停止运行的时间过短则不符合燃烧器的工作特性。在一个周期中停止运行的时间是由蓄热水箱的容积, 太阳能集热器的面积来决定的^[14,15], 其约束如下:

$$\frac{C_w \times \rho_w \times V_{tank} \times \Delta T}{\frac{Q_{max}}{\eta_6} \times 3600} \geq t_1 \quad (11)$$

该系统以生物质颗粒燃烧器为主要热源, 限制太阳能提供热量占总能量需求的比例小于 50%。

$$E \times S_{solar} \times \eta_1 \leq Q_{max} \times 24 \times 3600 \times 0.5 \quad (12)$$

2.2.3 优化模型

根据以上分析，整理目标函数和约束条件如下式：

目标函数：

$$F_{min} = \frac{P_{burner} \times \frac{N_b}{1000} + S_{solar} \times N_S + V_{tank} \times N_t + I_{else}}{n} + \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_i - E_i \times S_{solar} \times \eta_1 \times n_i}{q_{pellet} \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_5 \times \eta_6} \times N_p + F_{power} + F_{labor} + F_{main}$$

约束条件：

$$\begin{aligned} P_{burner} &\geq 509.30 \\ 1458 \times P_{burner} + 387 \times S_{solar} - 63000 \times V_{tank} &\leq 660474 \\ V_{tank} &\geq 10.47 \\ S_{solar} &\leq 2838.92 \end{aligned}$$

2.2.4 优化方法

使用软件Excel (2010) 建立数学模型，通过改变 P_{burner} ， S_{solar} 与 V_{tank} ，以目标函数为目标，约束条件为约束，使用规划求解工具进行求解计算。

3 结果分析

通过计算得知，当生物质能-太阳能互补供热系统中生物质颗粒燃烧器的功率

为509.3kW，太阳能集热器（由清华阳光生产）面积为1775.6m²，蓄热水箱（由清华阳光生产）容积取10.48m³

时，目标函数取得最小值。此时，初投资为1871695.59元，年运行成本为169735.77元。一年4月~9月中，气温较高，厌氧消化罐散热较少，耗热量较低。相比其余几个月份，日照强度较大，日照时间较长。因此，在4~9月由太阳能加热器所提供的热量即可保证厌氧消化罐所需热量。这几个月份内生物质颗粒锅炉基本不需要运行，只需做应急加热使用。

3.1 初投资分析

在生物质能-太阳能互补供热系统的初投资中，太阳能集热器的投资占的比例最大，为94.9%；生物质颗粒燃烧器的投资占的比例是4.08%；蓄水箱与水泵等附件投资所占的比例分别为0.25%和0.80%。随着生物质颗粒燃烧器生产技术

的不断成熟以及生产规模的扩大，其成本会较大幅度地降低，从而能加速生物质能-太阳能互补供热系统的推广。

3.2运行成本分析

生物质能-太阳能互补供热系统运行成本主要包括生物质颗粒燃料费用、燃料动力费、系统维护费、人工费。在运行成本中，生物质颗粒燃料费用占75.26%，人工费占14.14%，燃料动力费占7.07%，系统维护费占3.53%。

3.3加热方式对比分析

当前沼气工程中常用的加热方式主要包括：沼气热水锅炉、生物质锅炉、太阳能等方式。本研究条件下，厌氧消化罐需热量 $6973119.96\text{MJ} \cdot \text{a}^{-1}$

。若使用沼气热水锅炉为单一热源，则年需要消耗

沼气 396200Nm^3

，则占厌氧消化罐的所产沼气的20.68%。以 $0.8\text{元} \cdot \text{Nm}^{-3}$

沼气计，则

年运行成本高达316960

元。若单独使用生物质锅炉为热源，则年需

消耗生物质颗粒燃料 $633\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，运行成本为316500元。这两种加热方式下年运行成本均高于生物质能-

太阳能互补供热系统。若使用

太阳能系统为热源，则需要太阳能热水器面积为 3144.76m^2 ，初投资额为314.47万元，远高于生物质能-

太阳能互补供热系统优化后的结果，不适合中小规模沼气工程。

4结论

(1) 以年费用为目标函数，使用线性规划方法对沼气工程的生物质能-

太阳能互补供热系统中的设计参数进行

了优化。结果表明对于华北地区 5000m^3

的厌氧消化罐可设计成燃料锅炉功率为

509.3kW ，太阳能集热器面积为 1775.6m^2 ，蓄热水箱容积为 10.48m^3

，此时系统的经济性最优，初投资为1871696元，年运行成本为169736元，折合年费用为294515元。

(2) 在生物质能-太阳能互补供热系统中，太阳能集热器的投资比例最大，占到了总投资的94.9%；生物质颗粒燃烧器占4.08%；运行成本中生物质颗粒燃烧为用占75.26%，人工费占14.14%，燃料动力费占7.07%，系统维护费占3.53%。

(3) 与沼气热水锅炉、生物质锅炉相比，生物质能-太阳能互补供热系统充分利用太阳能运行成本低的优势，减少了运行成本；与太阳能系统相比，生物质能-太阳能互补供热系统弥补了太阳能不稳定与初始投资高的缺点。因此，生物质能-太阳能互补供热系统适合于中小规模的沼气工程，具有广泛的推广价值。

参考文献：

- [1] 邓良伟. 规模化猪场粪污处理模式 [J]. 中国沼气, 2001, 01:29 - 33.
- [2] 赵立欣, 孟海波, 沈玉君, 等. 中国北方平原地区种养循环农业现状调研与发展分析 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (18): 1 - 10.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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, 03: 105 - 107.
- [7] 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, 01: 37 - 41.
- [8] 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.
- [9] Kocarg, Eryasara. An application of solar energy storage in the gas: solar heated biogas plants [J]. Energy Sources: A, 2007, 29: 1513 - 1520.
- [10] 赵立欣, 孟海波, 姚宗路, 等. 中国生物质固体成型燃料技术和产业 [J]. 中国工程科学, 2011, 13 (02): 78 - 82.
- [11] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等. 生物质固体成型燃料全生命周期评价 [J]. 太阳能学报, 2011, 32 (12): 1875 - 1880.
- [12] 罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质颗粒燃料燃烧设备的研究进展 [J]. 可再生能源, 2009, 27 (8): 90 - 95.
- [13] 徐晓秋, 王钢, 刘伟, 等. 畜禽粪便厌氧消化沼气发电行业的现状分析 [J]. 应用能源技术, 2011 (06): 1 - 3.
- [14] 王泽龙, 田宜水, 赵立欣, 等. 生物质能 - 太阳能互补供热系统优化设计 [J]. 农业工程学报, 2012, 19: 178 - 184.
- [15] 蒋光银, 侯书林, 赵立欣, 等. 仿真软件在生物质能—太阳能互补供热系统中适用性探讨 [J]. 中国农机化学报, 2013, 34 (05): 93 - 98.
- [16] 岳华, 岳晓钰, 王磊磊, 等. 太阳能和生物质能互补供暖系统 [J]. 煤气与热力, 2009, 29 (11): 15 - 17.
- [17] Frank Fiedler, Chris Bales, Tomas Persson, et al. Comparison of carbon monoxide emissions and electricity consumption of modulating and nonmodulating pellet and solar heating systems [J]. Energy Research, 2007, 31 (10): 915 - 930.
- [18] Frank Fiedler. Combined Solar and Pellet Heating Systems [D]. Sweden: Mälardalen University, 2006.
- [19] 王兰, 邓良伟, 王霜, 等. 畜禽粪污沼气发电工程中的加热能量平衡分析 [J]. 中国沼气, 2016, 34 (06): 65 - 71.
- [20] 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.
- [21] 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.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/162211.html>