

图1 温度对产气率的影响

当沼气发酵温度低于10℃时，微生物进入休眠，产气量少，沼气则根本无法正常使用。另外，温度的波动也对产气率影响很大。例如在恒温发酵过程中，1h的温度上下波动不能超过2~3℃，短时间内温度升降5℃，产气量将明显下降，波动过大时甚至会停止产气<sup>[4]</sup>。因此，保持适宜稳定的沼气发酵温度，才能维持较高的产气率。

## 2常用的沼气发酵温度控制技术

为解决我国北方农村冬季低温严重影响沼气生产的问题，近年来，人们对如何提高及控制沼气池反应温度，因地制宜进行了研发和实践，推出了不少增温控温技术。笔者就目前应用较为广泛的几种沼气发酵增温控温技术介绍如下：

**2.1电加热膜 增温保温系统**电加热膜增温保温系统是运用电流通过金属导体发热的原理，将电能转化为热能为沼气池加热。沼气池电加热系统由于金属导体的材料、结构不同而形式多样，这里介绍一种电加热膜为沼气池加热升温的系统。

该系统即在沼气池的外壁上包覆一层电加热膜，在电加热膜的外层敷设具有一定厚度的苯板或聚氨酯泡沫，对整个沼气池加热系统进行保温。该技术的显著优点是升温均匀、处理时间短、能量转换率高且不易受外界环境（地域和天气等）影响，一定程度上解决了沼气池在冬季的加热和保温问题。然而由于电加热系统需消耗不少高品位的电能，其节能性及社会经济性并不佳。

**2.2锅炉水循环沼气池 增温系统**锅炉水循环加热沼气池技术原理为由燃料在锅炉中燃烧释放大热量来加热循环水，热水通过循环管路送到与沼气池结合为一体的换热器中，换热器则将热水中热能传递到沼气发酵的液料中，实现沼气池反应温度的提升。锅炉水循环系统主要由小型热水锅炉、贮热水箱、热交换器、循环管路及系统补水装置等构成。常见户用锅炉多以A级煤或天然气作为燃料，热水锅炉的局部结构因燃料不同而略有差异，但整体锅炉水循环加热沼气池的原理及基本结构是一致的，其结构如图2所示：

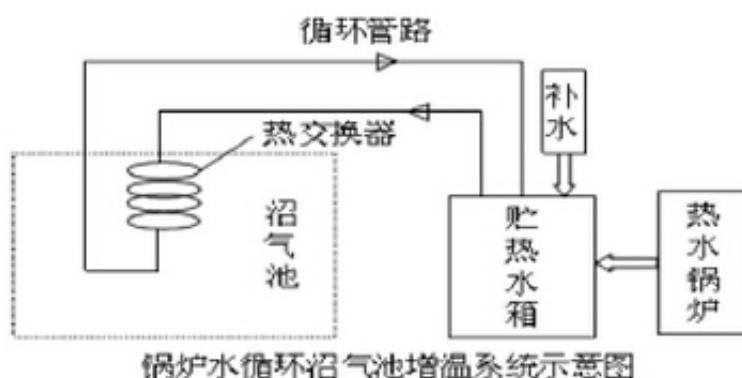


图2 锅炉水循环沼气池增温系统示意图

**2.3太阳能热水器水循环沼气池 增温系统**太阳能热水器水循环加热系统主要有太阳能热水器、换热器、单片机控制系统、循环水泵以及其它辅助部件组成。该加热系统采用太阳能热水器作为主要的加热部件，并通过循环管路将热水输送到沼气池的换热器，换热器向沼气池中沼液放热，提高和保持沼气池的温度，从而提高沼气的产气量。系统工作原理如图3所示：

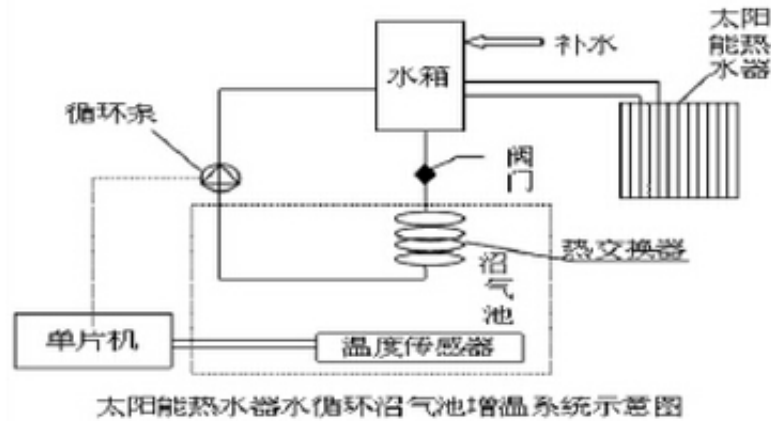


图3 太阳能热水器水循环沼气池升温系统示意图

采用太阳能热水器水循环沼气池升温系统后沼气池在冬天的产气量能提高5~6倍，由温度传感器和单片机实现完全自动化控制，方便高效，且太阳能作为加热热源，具有较为理想的社会性和节能性。由于太阳能利用受天气影响较大，使其推广有一定的局限性。为弥补这一缺陷，目前已经开发出太阳能-沼气锅炉及太阳能-生物质炉等联合沼气池升温系统，提高了系统性能和稳定性，成效显著，颇具推广应用价值。

### 3 沼气池的热量平衡建模

#### 3.1 研究对象及参数

本文研究的对象是我国北方农村户用沼气池，一般一个 $8\text{m}^3$ 的沼气池所产沼气能够满足一个5口之家农户的生活用气。笔者以一个 $8\text{m}^3$

的圆筒形沼气池作为计算对象，沼气池直径 $2.4\text{m}$ ，高 $1.77\text{m}$ ，池底距地面 $2\text{m}$ 。假定该模型处于河北省保定市某一农村，根据中国气象科学共享气象数据，保定市地面温度和地深 $1\text{m}$ 深处温度全年变化情况如图4：

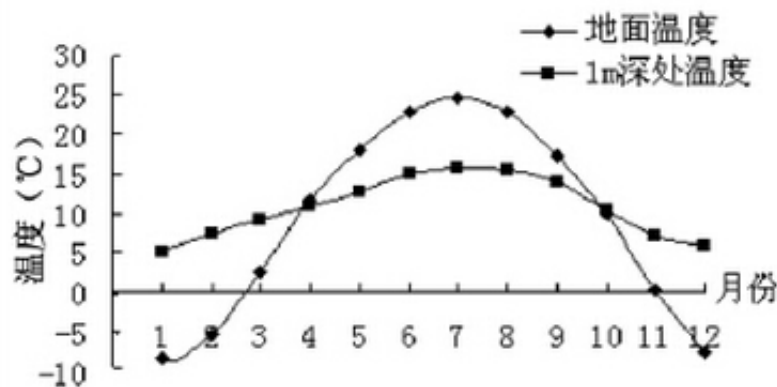


图4 地面温度和1m深处温度变化曲线

式中 $G$ 为生产沼气的价值（元/ $\text{m}^3$ ）； $q_{zq}$ 为沼气的热值，取 $23901.1\text{kJ/kg}$ ； $V$ 为加热装置运行时间内的沼气产量，即 $1152\text{m}^3$ ； $q$ 为天然气的热值，取 $35982.5\text{kJ/m}^3$ ； $D$ 为天然气价格，取2010年北京天然气价格，即 $2.3\text{元/m}^3$ 。经计算，加热装置运行期间产生的沼气价值为 $1759.97\text{元}$ 。

根据热平衡计算结果，在加热装置供热期间总的热负荷为 $4050773.97\text{kJ}$ 。电加热法大约需要耗电 $4050773.97 \div 3600 = 1125.215\text{kW} \cdot \text{h}$ ，按市场价格折算为 $1125.215 \times 0.48 = 540.103\text{元}$ ；锅炉水循环加热法需要燃烧A类煤（优质炭） $4050773.97 \div 15664.7 = 258.592\text{kg}$ ，按市场价格折算为 $258.592 \times 0.85 = 219.804\text{元}$ ；需要消耗天然气 $4050773.97 \div 35982.5 = 112.577\text{m}^3$ ，按市场价格折算为 $112.577 \times 2.3 = 258.925\text{元}$ 。

上述分析中设定几种沼气池升温系统运行时间均为每年6个月，又设定系统使用寿命为20a，针对不同的加热方案，就其成本、运行费用、产出效益等指标逐一进行分析比较，具体结果整理如表4：

3.2 热平衡分析 以上述温度变化关系建立模型为能量控制体,以1d为时间单位,由能量守恒定律,得出如下关系式:

$$Q_p = Q_{in} - Q_{out} + Q_{in} + Q_{in} - Q_{out} \quad (4)$$

式中:

- $Q_p$  沼气池升温吸收的热量 (kJ/d);
- $Q_{in}$  进料带入沼气池的热量 (kJ/d);
- $Q_{out}$  排料带出沼气池的热量 (kJ/d);
- $Q_{in}$  厌氧发酵反应产生的热量 (kJ/d);
- $Q_{out}$  沼气带出的热量 (kJ/d);
- $Q_{in}$  沼气池散热损失的热量 (kJ/d).

3.2.1 进出料损失热量 令进出液料的热量损失  $\Delta Q_{in}$  =  $Q_{in1} - Q_{in2}$ ,其计算公式为:

$$\Delta Q_{in} = c_p m_p (t_i - t_p) \quad (5)$$

式中:

- $\Delta Q_{in}$  进出料损失的热量 (kJ/d);
- $c_p$  液料的比热 (kJ/(kg·K));
- $m_p$  进出沼气池的液料质量 (kg);
- $t_i$  沼气池内温度 (°C);
- $t_p$  进料时液料的温度 (°C).

新鲜液料的浓度较低,约为8%,可近似取水的比热,则  $c_p$  为 4.2kJ/(kg·K),设每天进出沼气池的液料质量为 20kg,且根据图1可知沼气处于中温发酵时最佳温度为 30°C,进料时液料温度为外界环境温度,参考图1.

3.2.2 沼气池的散热损失 对于土壤系统的传热问题目前尚没有令人满意的解析式,因为沼气池的厚度远小于其直径,可以将沼气池向其周围土壤的传热问题看作恒壁温半无限大导热问题<sup>[7]</sup>,则沼气池散热损失的热量计算公式为:

$$Q_{in} = 2.4 \sqrt{\lambda p \pi C_p} (t_i - t_s) \quad (6)$$

式中  $Q_{in}$  为沼气池散热损失的热量 (kJ/d);  $\lambda$  为沼气池散热面积 (为圆柱体沼气池的表面积),其计算公式为  $\lambda = \pi d h + 2 \pi r^2 = 22.38 \text{ m}^2$ ;  $\lambda$  为土壤的导热系数,取 0.5W/(m·K);  $p$  为土壤的密度,取 1500kg/m<sup>3</sup>;  $C_p$  为土壤的比热,取 1.9kJ/(kg·K);  $t_i$  为传热时间,为 1d,即 86100s;  $t_s$  为沼气池内温度,取为 30°C;  $t_s$  为沼气池附近土壤平均温度,参考图1.

各月份沼气池进出料热量损失和散热损失计算结果如表2:

表2 各月份沼气池进出料热量损失和散热损失

月份	$t_p$ (°C)	$t_i$ (°C)	$\Delta Q_{in}$ (kJ/d)	$Q_{in}$ (kJ/d)
1	-6.2	8.1	3040.8	21913.7
2	-5.1	7.3	2848.4	19977.6
3	2.6	9.1	2301.6	18393.4
4	11.7	11.2	1537.2	16721.3
5	17.8	12.7	1024.8	15225.2
6	22.6	14.8	621.6	13577.4
7	24.4	15.4	470.4	12583.6
8	22.7	15.9	615.2	12461.3
9	17.2	14.6	1075.2	14257.1
10	9.9	11.6	1688.4	17249.3
11	0.4	8.7	2486.4	18745.5
12	-5.6	5.3	2990.	21737.7

3.2.3 沼气带走热量 假定生成的沼气能够全部排出沼气池,则沼气带走热量的计算公式为:

$$Q_{in} = c_p V_p \rho_p \quad (7)$$

式中  $Q_{in}$  为沼气带出的热量 (kJ/d);  $c_p$  为沼气的比热,取 2.22kJ/(kg·K);  $V_p$  为沼气产量,沼气池温度为 30°C 时产气 0.8m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),故 8m<sup>2</sup> 的沼气产量为 6.4m<sup>3</sup>/d;  $\rho_p$  为沼气密度,取 0.716kg/m<sup>3</sup>;  $t_i$  为沼气池内温度,为 30°C. 经计算得:  $Q_{in} = 356.05 \text{ kJ/d}$ .

3.2.4 厌氧发酵生物热 对于农村用户沼气池,产生沼气的反应物为人、畜粪便及农作物秸秆,发酵液料有效能量 (6.91kJ/kg) 的 3% 以热量的形式释放出来<sup>[7]</sup>,则发酵产生的反应热为:  $Q_{in} = 199.77 \text{ kJ/d}$ .

经过前面的计算,可得沼气池各月的热量损失  $Q_{in}$ ,在此基础上定义散热损失率  $w_1$  为散热损失占总的热量损失的百分比,定义月沼气池热损失率  $w_2$  为月热量损失占年总散热损失的百分数,计算结果如表3:

表3 各月散热损失率和热负荷率

月份	总热量损失 (kJ/d)	散热损失率 $w_1$ (%)	月热损失率 $w_2$ (%)
1	24810.85	88.323	11.464
2	22782.29	87.689	10.553
3	20551.37	89.500	9.360
4	17114.83	92.307	7.433
5	16106.31	94.529	7.212
6	13854.06	96.550	6.290
7	12911.70	97.409	5.382
8	13230.51	96.451	6.006
9	14484.58	93.569	6.476
10	17737.99	91.291	8.453
11	21088.19	88.891	9.584
12	24884.44	88.420	11.761

从表3可以看出: (1) 沼气池总的热量损失中散热损失全年均占 85% 以上,则散热损失是造成沼气池温度下降的主要原因. 为保持沼气池内适宜的反应温度,对沼气池采取有效的保温措施非常必要. (2) 从沼气池月热损失率分布可知,1~9 月总的热损失率为 38%,而 1~3 月、10~12 月的热损失率为 62%,因此,在这 6 个月中对沼气池加热升温以保证正常高效发酵非常关键,而在 1~9 月则可不需要加热.

#### 4 不同加热方案的经济性分析

为了维持 10~12 月及 1~3 月 6 个月中沼气池温度在 30°C,对沼气池进行加热以弥补沼气池的散热损失. 沼气池加热系统的升温热负荷应等于沼气池相应的热量损失. 由表1得出加热系统运行期间,总的热负荷为 4050773.97kJ. 笔者就上述介绍的电加热法、锅炉水循环加热法及太阳能热水器水循环加热法进行经济性分析.

由图1可知在 30°C 时,有机物的产气率达 0.8m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),则一个容积 8m<sup>3</sup> 的沼气池产气量为 6.4m<sup>3</sup>/d. 又设定供热期为 10~12 月及 1~3 月,则在加热装置运行期间,一共产生沼气 6.4180 = 1152m<sup>3</sup>. 生产沼气的价值可以按下式计算:

$$C = \frac{0.22 \times 1}{0.9} \quad (8)$$

分析表4中数据，太阳能热水器水循环升温系统、燃气锅炉水循环升温系统、燃煤锅炉水循环升温系统及电加热膜增温保温系统的产出效益比为1.375 : 1.176 : 1.211 : 1，显然采用太阳能热水器水循环升温系统的经济性最高。

## 5结论

- (1) 建立1个8m<sup>3</sup>的沼气池模型，设定参数并对模型进行热平衡分析。
- (2) 散热损失是造成沼气池温度低的关键原因，因此对沼气池采取有效的保温措施十分必要。
- (3) 1~3月、10~12月的热损失率为62%，在这6个月中需要对沼气池加热升温以保证正常产气，在4~9月则可不需加热。
- (4) 太阳能热水器水循环、燃气锅炉水循环、燃煤锅炉水循环及电加热膜增温系统的产出效益比为1.375 : 1.176 : 1.211 : 1，因此采用太阳能热水器水循环升温系统的经济性最高。

## 参考文献

- [1]张伟林.重庆市户用沼气池保温升温配套技术研究[J].西南大学学报, 2008.
- [2]张典, 田晓东.提高沼气发酵温度技术措施分析[J].长春工业大学学报(自然科学版), 2007, 28( ): 82 - 85.
- [3]腾传钧, 汪国英.沼气节能综合利用技术[M].贵阳: 贵州科技出版社, 2003: 1 - 6.
- [4]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( 152 ): 523 - 525.
- [5]王晓超, 贺光祥, 丘陵, 等.太阳能热管在沼气工程中的应用[J].农机化研究, 2008( 7 ): 204 - 207.
- [6]付秀琴, 陈子爱, 邓良伟.规模化猪场粪污处理沼气池容积确定[J].中国沼气, 2002( 20 ): 21 - 27

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/90122.html>