

文章编号: 1671-8097(2017)02-0166-07

DOI:10.13738/j.issn.1671-8097.2017.02.013

畜禽养殖场沼气工程发酵温度的确定方法

罗 涛^{1,2}, 黄海龙¹, 孟 曦², 龙恩深^{1,2}, 冉 毅¹, 梅自力^{*1}

(1. 农业部 沼气科学研究所, 四川 成都 610065;
2. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610041)

摘要:为实现沼气工程运行的净产能最大化,以万头猪场配置的 500 m³ 发酵罐为分析对象,建立计算模型,计算净沼气产量,从而确定发酵温度。结果表明:发酵罐的能量产出效率指标 k 和能量输入效率指标 η 是发酵温度选择的决定性因素;在现有设计条件($k=0.55$ 、 $\eta=0.45$ 、发酵温度 35 °C)下运行,年增温所需沼气体量为总沼气体量的 42.4%,其中,冬季为 65.2%,春季为 42.1%,秋季为 40.4%,夏季为 22.3%,年平均净沼气体量为 285.6 m³/d;只有当 $k \geq 0.55$ 和 $\eta \geq 0.45$ 时,运行净能产出最大的发酵温度为 35 °C,当 k 或 η 值随工程运行下降,降低发酵运行温度方可获得最大净能产出;结合我国沼气工程的实际工况,建议选择 30 °C 作为发酵运行温度,并及时对发酵设备进行维护,以确保工程的长期运行效率。

关键词: 发酵温度;工程运行;沼气体量;热负荷;热效率

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A

0 引 言

随着中国沼气的产业化发展,配备增温装置,维持发酵罐的周年稳定运行,已成为大中型沼气工程的必备^[1]。中温(35 °C 左右)发酵,因其原料产气效率较高,被多数工程选择^[2-3]。然而,为达到中温发酵,不考虑发酵设备的具体性能,投入大量能源,导致大量工程的能量入不敷出,甚至停滞,已成为我国沼气工程运行的常态。分析原因有两方面:1) 发酵罐建设质量差,热流失量大,本文不予探讨;2) 35 °C 以下,发酵温度越高,产气量越大,增温能耗也越大,而净产能却未必最大。因此,有必要对发酵罐的能量投入和产出进行分析,建立能量平衡模型,根据设备工况参数,确定最佳运行温度,从而改变现有以高原料产气率为目标的运行策略为工程净能产出最大化。

发酵罐能量产出由沼气体量决定,而沼气体量则可由产气动力学模型和相关参数确定,主要包括有机物负荷、实际运行效率指数和发酵温

度^[4]。产气动力学模型经过大量学者的验证,已具有较高的可信度。Pham 等^[5]利用 Chen 和 Hashimoto^[6]的产气动力学模型,对猪粪和牛粪常温产气进行预测,并在户用沼气池中进行验证,其结果与实测值吻合较好。Deng 等^[7]在实验室利用 1 L 发酵瓶,测得猪粪的产气率与有机物负荷、发酵温度的关系,提出了改进的理论产气计算模型,进一步提高了模型的精度。

发酵罐能量投入由发酵罐热负荷决定,主要包括原料升温、罐壁散热、沼气体流失和发酵液液面气化散热,这些都可通过监测发酵罐的环境温度和太阳辐射,然后分别根据相关模型进行计算^[8-11]。

由发酵罐能量的产出和投入分析可知,对于既定工程,在一定时间内有机物负荷、实际运行效率指数是相对恒定的;且在既定环境条件下,热负荷也是相对恒定的;只有发酵温度在运行过程中才是可动态控制的因子。因此,可对其进行调控,实现运行净能产出的最大化。本文结合相关计算

收稿日期: 2016-08-27; 修回日期: 2016-11-10.

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目(2015BAD21B03);公益性行业(农业)科研专项资助项目(201403019);四川省科技计划资助项目(15ZC1450);中国农业科学院科技创新工程资助项目。

作者简介: 罗 涛(1986-),男,汉族,博士生,主要从事生物质能源开发及人居环境改善研究。E-mail:327062574@qq.com;
梅自力(1962-),男,汉族,研究员,主要从事生物质能源开发及利用研究。E-mail:13880233242@163.com

模型,以成都地区 2005 年的气象参数为计算条件,以我国最常见养殖量的规模化养殖场(万头猪场)匹配的 500 m³ 发酵罐为分析对象,探究工程发酵温度选择对净产能的影响,为工程的个性化运行提供依据。

1 计算方法

1.1 计算模型

沼气工程的净能产出应以净沼气产量作为评价指标,即发酵罐的沼气生产量减去增温所需的沼气的量(以甲烷含量 60% 计),其计算公式可表示为式(1):

$$b_{(T)} = k \cdot V \cdot R_{p(T)} - \frac{Q_T}{q \cdot \eta} \quad (1)$$

式中: $b_{(T)}$ 为发酵温度 T 时的净沼气生产量, m³/d; k 为实际运行效率指数,即发酵罐的实际容积产气率与试验理论容积产气率的比值, k 的确定主要由工程建设质量和管理运行水平决定; V 为发酵容积, m³; $R_{p(T)}$ 为发酵温度 T 时的理论容积产气率, m³/(m³ · d); Q_T 为发酵温度 T 时的发酵罐热负荷, J/d; q 为沼气热值, kJ/m³, $q = 21\,540$ kJ/m³ (甲烷含量为 60%); η 为热交换系统的热效率。可见, k 值表示发酵罐的能量产出效率, η 值表示能量投入效率,两者共同决定了其净能产出效率。

1.1.1 理论容积产气率

理论容积产气率可由式(2)计算^[7]:

$$R_{p(T)} = \frac{R_{pmax(T)}}{1 + e^{(K_{LR} - L_r)}} \quad (2)$$

式中: $R_{pmax(T)}$ 为发酵温度 T 时的最大理论容积产气率, m³/(m³ · d); K_{LR} 为发酵温度 T 时的有机负荷的半饱和系数, kg/(m³ · d); L_r 为发酵罐的有机负荷, kg/(m³ · d); 其中,发酵原料为猪粪的参数取值见文献^[7]。

1.1.2 发酵罐热负荷

为便于分析计算,假设:

- 1) 进料料液温度等于每天环境温度平均值;
- 2) 进料系统对料液的升温作用忽略不计^[12];
- 3) 发酵罐内温差忽略不计,发酵液和沼气温

度相同。

发酵罐热负荷计算如式(3)所示^[13]:

$$Q_T = Q_f + Q_d + Q_g + Q_w \quad (3)$$

式中: Q_f 为原料升温热负荷, J/d; Q_d 为罐壁热负荷, J/d; Q_g 为沼气输送带走的热负荷, J/d; Q_w 为发酵液液面气化热负荷, J/d。其中, Q_f 、 Q_g 、 Q_w 的计算方法见文献^[12]。 Q_d 由罐顶、罐墙和罐底 3 部分计算值叠加,即发酵罐内外壁工况分别为气-气、气-液和液-固相,计算公式如式(4)所示^[14-15]:

$$Q_d = \sum K_i A_i (T - T_i) \quad (4)$$

式中: K_i 为各部分的综合传热系数, W/(m² · °C), 由发酵罐内、外的表面传热系数和罐壁的导热系数决定^[16]; A_i 为各部分的当量传热面积, m²; T_i 为各部分发酵罐外的综合温度, °C, 其中对于罐底, T_i 等于罐外土壤温度,可由环境温度的平均值确定^[17-18]; 对于罐顶、罐墙, T_i 可由式(5)确定^[19]。

$$T_i = T_e + I \frac{a}{h_{out}} - F_{ti} \quad (5)$$

式中: T_e 为环境温度, °C; I 为太阳辐射照度, W · m⁻²; a 为罐表面的太阳辐射吸收系数; h_{out} 为罐表面传热系数,取 19.0 W/(m² · °C); F_{ti} 是各部分对环境的长波辐射因子。

1.2 计算参数

1.2.1 工艺参数

万头养猪场在中国规模化养殖场中所占的比例较大,其粪污的沼气化处理已逐渐成为必备环节,因而,基本都建设有沼气工程。从其粪污量考虑,发酵罐的设计发酵容积应为 500 m³,进料量约为 25 t/d,总固体质量含量约为 8%,水力停留期为 20 d。

1.2.2 发酵罐

发酵罐径高比一般为 1 : 1 500 m³ 的发酵罐选用 CSTR 反应器,尺寸为 $\Phi 8.8$ m × 8.8 m,罐顶拱顶高度为 1.0 m;采用进料后自动溢流出料工艺,罐内料液保持动态平衡;增温仅采用沼气锅炉,无外加能源,发酵罐结构及运行系统示意图如图 1 所示。保温措施:罐壁各部分简化为 0.1 m 厚保温层,导热系数为 0.042 W/(m · K),外敷设 0.8 mm 厚绿色彩钢板保护层。

1.2.3 环境条件参数

用于确定发酵罐的热负荷环境温度和太阳辐

射照度,以成都 2005 年的全年监测值(间隔为 1 h/次)作为计算参数,监测数据由实验室从当地气象部门获得^[20]。

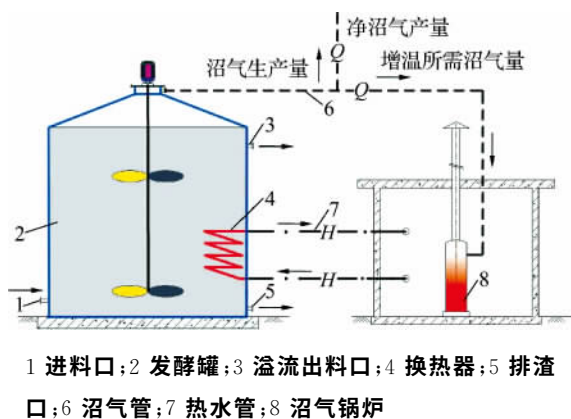


图 1 发酵罐结构及运行系统示意图

Fig. 1 Anaerobic digester structure and operation system

2 结果与分析

2.1 发酵温度与净能产出的关系

由图 2 可知,太阳辐射强度的全年变化规律与环境温度相同,由式(4)和(5)可知,罐壁热负荷分别与太阳辐射照度、环境温度成负相关,加之发酵温度设为定值,认为罐壁热负荷与罐内外温差成正相关。根据 Guo 等^[12]的研究结论,原料升温热负荷、沼气流失热负荷、发酵液液面气化热负荷的变化也与罐内外温差成正相关。因此,认为发酵罐热负荷与发酵罐内外温差成正相关,即罐内外温差越大,发酵罐热负荷越大。降低发酵温度、缩小罐内外温差,即可减少发酵罐热负荷。由式(1)和(2)可知,虽然降低发酵温度,会降低发酵罐的理论容积产气产率,但净沼气产量不一定会降

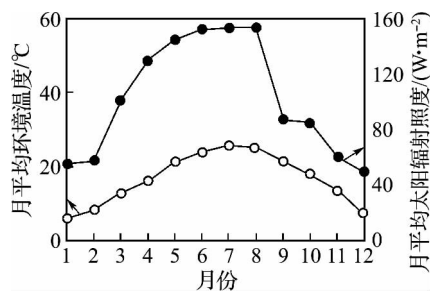


图 2 月均日环境温度和月太阳辐射照度

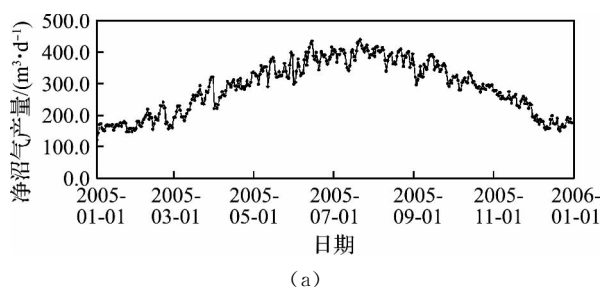
Fig. 2 Monthly average ambient temperature and solar radiation

低,说明净沼气产量与发酵温度没有必然的正相关关系,其变化规律应由 k 和 η 值的大小决定。

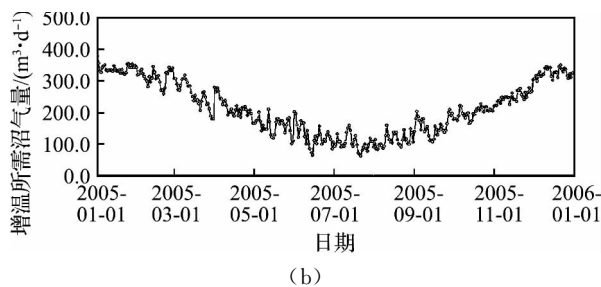
2.2 工程设计条件下的净能产出

现有大中型沼气工程设计的发酵运行温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,容积产气率为 $1.0\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,可得发酵罐设计的沼气产出效率 $k=0.55$ 。 η 的计算由锅炉热效率、管路热损失率和换热器热效率三部分组成。根据相关工程报道,沼气锅炉热效率可达 80% ,管路热损失率为 $20\% \sim 30\%$,换热器热效率与换热介质流速、发酵液浓度及传热特性等多因素密切相关,一般认为 $\eta=0.45$ 较为符合我国沼气工程的运行实际,然而随着工程的运行,换热效率也会呈现逐渐降低的趋势^[21-23]。

因此,可得工程在设计条件($k=0.55$, $\eta=0.45$)下运行,发酵罐全年增温所需沼气和净沼气产量的变化,如图 3 所示。由图 3 可知,在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下运行,全年都需消耗部分沼气用于增温,其中,冬季(1、2、12 月)比例最高,占发酵罐沼气温度的 65.2% ,春季为 42.1% ,秋季为 40.4% ,夏季为 22.3% ,年平均为 42.4% 。扣除增温所需的沼气温,工程的年平均净沼气产量仅为 $285.6\text{ m}^3/\text{d}$,为总产气量的 57.6% ,可以认为选择 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为发酵运行温度,运行能耗相对较高。



(a)



(b)

图 3 发酵罐增温所需沼气和净沼气产量变化

Fig. 3 Amount of biogas used for heat loading and net biogas production

2.3 k 值对发酵温度选择的影响

我国现有农业沼气工程的实际运行 k 值普遍偏低,一般在 $10\% \sim 30\%$,因此,选择适宜的运行发酵温度就显得尤为重要^[4]。如图4所示, $\eta = 0.45$, k 值越大,净沼气产量越高,但净沼气产量并未伴随发酵温度的增加而增加。

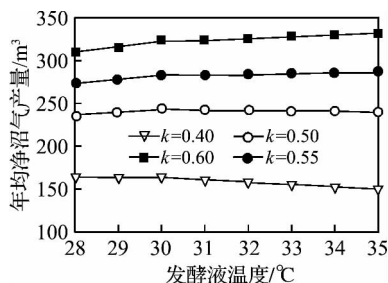


图4 不同 k 值的年平均净沼气产量($\eta = 0.45$)

Fig. 4 Average net biogas production at different values of k ($\eta = 0.45$)

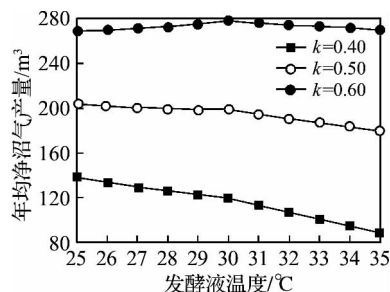
在发酵液温度为 $30 \sim 35^\circ\text{C}$, $k = 0.60$, 净沼气产量随着发酵温度提升而逐渐增加; $k = 0.55$, 净沼气产量几乎无变化; $k = 0.50$, 净沼气产量出现逐渐降低的趋势; $k = 0.40$, 净沼气产量呈现明显的降低趋势,此时最佳运行发酵温度为 30°C , 净沼气产量为 $163.6 \text{ m}^3/\text{d}$, 较 35°C 运行高出 9.43% 。可见,选择 35°C 作为恒定运行参数,显然不符合我国沼气工程的实际。

2.4 η 值对发酵温度选择的影响

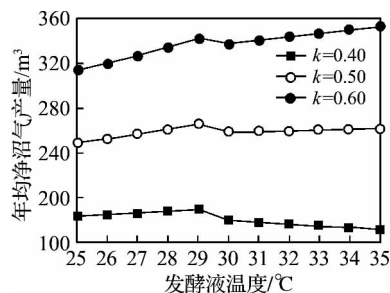
由图5可见,净沼气产量随 η 值的降低而明显降低, $k = 0.40, 0.50$ 和 0.60 , 在 35°C 条件下运行, $\eta = 0.35$ 的运行净能产出分别仅为 $\eta = 0.55$ 的 $51.8\%、68.5\%$ 和 76.6% 。在工程运行过程中,随着换热系统污垢沉积的增加, η 值降低无法避免,此时发酵温度也应随之变化,才能保证发酵罐的最大净沼气产出。如图5(a)所示, $\eta = 0.35$, $k = 0.40$ 和 0.50 , 发酵温度越高,净沼气产量越低,即出现入不敷出的情况。一方面,可通过降低发酵运行温度,使发酵罐获得现有条件下的最大净沼气产量;另一方面,还应及时对换热设备进行维护,以保证工程的运行效率。

Guan 等^[24]认为国外沼气工程增温系统的换热效率可达 54% 以上^[23]。因此,可通过提高换热效率,实现净沼气产量的提高。由图5(b)可知,

$\eta = 0.55$, 当发酵温度低于 29°C , 年均净沼气产量随温度增加的变化速率较大;之后,变化较为平缓,甚至会出现降低现象,如: $k = 0.40, 0.50$ 和 $0.60, 35^\circ\text{C}$ 相对于 29°C , 增加量分别为 $-18.3、-3.9$ 和 $10.4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。这也说明即使 η 为高值, 35°C 也不一定为最佳选择, η 和 k 对发酵温度确定的作用是相辅相成,必须同时考虑。



(a) $\eta = 0.35$



(b) $\eta = 0.55$

图5 不同 η 的净沼气产量

Fig. 5 Average net biogas production at different values of η

2.5 不同阶段发酵温度选择

在沼气工程的生命周期中,不同运行阶段,虽然发酵罐的 k 值和 η 值不同,但两者对发酵温度的选择起到了重要的决定性作用。由表1可知,只有当 $k \geq 0.45$ 和 $\eta \geq 0.55$, 最佳发酵温度才是 35°C ;然而我国农村沼气工程普遍的工况为 $\eta \leq 0.45$ 和 $k \leq 0.55$, 选择 30°C 左右作为发酵运行温度,较为符合实际情况,可获得最大化的净沼气产量。

不同 η 和 k 值条件下,年均最大净沼气产量如表2所示, k 和 η 处于高值运行的最大净沼气产量明显高于低值状态,其中, $\eta = 0.55, k = 0.6$ 的最大净沼气产量是 $\eta = 0.35, k = 0.40$ 的 2.80 倍,说明高效的运行管理是提高沼气工程产气效

率的关键。当 k 和 η 降低,调整发酵温度,虽然可以获得相对的最大净沼气产量,但还应采取相应措施,提高运行效率,以保持较高的产气效益。

表 1 净沼气产量最大发酵温度

Tab. 1 Optimum fermentation temperature for maximal net biogas production

η	最大发酵温度/℃			
	$k=0.40$	$k=0.50$	$k=0.55$	$k=0.60$
0.35	28	28	30	30
0.45	30	31	35	35
0.55	29	29	35	35

表 2 不同阶段的最大年均净沼气产量

Tab. 2 Maximum net annual biogas production at different conditions

η	最大年均净沼气/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)			
	$k=0.40$	$k=0.50$	$k=0.55$	$k=0.60$
0.35	125.8	199.4	238.7	278.4
0.45	163.6	243.0	285.6	331.0
0.55	189.1	265.5	324.5	352.4

我国沼气工程产气的设计用途一般 1/3 用于集中供气、1/3 用于发电、1/3 用于发酵罐增温,采用热电联产工艺,发电机的余热回收率为 40%。在设计工况条件($\eta=0.45$ 和 $k=0.55$)下, 35℃ 运行,发酵罐的产气量为 500.0 m^3/d ,增温沼气需求量为 146.9 m^3/d ,不到产气量的 1/3,可达到设计目标,工程的产电量为 249.9 $\text{kW} \cdot \text{h}$,净沼气产出量为 186.3 m^3/d ;30℃ 运行,发酵罐的产气量为 436.9 m^3/d ,增温沼气需求量为 95.9 m^3/d ,也不到产气量的 1/3,仍可达到设计目标,若使工程的产电量仍为 249.9 $\text{kW} \cdot \text{h}$,净沼气产出量可达 182.7 m^3/d ,为 35℃ 运行的 98.1%,可以认为实现了工程的设计目标。

3 结 论

1) 太阳辐射强度的全年变化规律与环境温度相同,发酵罐热负荷大小与发酵罐内外温差大小成正相关,即发酵温度越高,发酵罐热负荷就越大。

2) 在一定的工况条件下,发酵温度为 35℃ 运行,净沼气产量未必最大;净沼气产量最大的发

酵温度主要取决于发酵罐的沼气生产效率 k 和换热系统热效率 η ,两者相辅相成,须同时考虑。

3) 结合我国农村沼气工程 $\eta \leq 0.45$ 和 $k \leq 0.55$ 的实际,发酵运行温度选择在 30℃ 左右,可获得最大化的净沼气产量,建议保持较高的运行管理水平,并及时进行维护,以确保相对较高的产气效率。

参考文献(References):

- [1] 夏吉庆,王宁宁,王晓东,等. 用于沼气系统的热管式热水加热器设计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5):160-165.
XIA Ji-qing, WANG Ning-ning, WANG Xiao-dong, et al. Design of hot water heater with heat pipe for biogas system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5):160-165. (in Chinese)
- [2] CHEN L, ZHAO L, REN C, et al. The progress and prospects of rural biogas production in China [J]. *Energy Policy*, 2012, 51:58-63.
- [3] 李 东,叶景清,孙永明,等. 稻草与牛粪混合连续厌氧消化制备生物燃气研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1):101-105.
LI Dong, YE Jing-qing, SUN Yong-ming, et al. Continuous anaerobic co-digestion of rice straw and cow manure for biogas production [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1):101-105. (in Chinese)
- [4] 郑 凯,刘卫国. 北京大中型沼气工程运行效率研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2013, 21(1):63-66.
ZHENG Kai, LIU Wei-guo. A study on operating efficiency of large and medium-sized biogas projects in Beijing [J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology*, 2013, 21(1):63-66. (in Chinese)
- [5] PHAM C H, TRILOLO J M, SOMMER S G. Predicting methane production in simple and unheated biogas digesters at low temperatures [J]. *Applied Energy*, 2014, 136:1-6.
- [6] CHEN Y, HASHIMOTO A. Kinetics of methane fermentation [J]. *Biotechnology & Bioengineering Symposium*, 1978, 8(4):503-511.

- [7] DENG L, YANG H, LIU G, *et al.* Kinetics of temperature effects and its significance to the heating strategy for anaerobic digestion of swine wastewater [J]. *Applied Energy*, 2014, **134**:349-355.
- [8] HASHIMOTO A, CHEN Y, VAREL V. *Anaerobic fermentation of beef cattle manure and crop residues* [R]. NASA STI / Recon Technical Report N, Golden, CO: NASA STI, 1981.
- [9] ASHARE E, AUGENSTEIN D, YEUNG J, *et al.* Evaluation of systems for purification of fuel gas from anaerobic digestion. Engineering report [R]. Cambridge, MA: Dynatech R/D Co., 1978.
- [10] WU B, BIBEAU E. Development of 3-D anaerobic digester heat transfer model for cold weather applications [J]. *Transactions-American Society of Agricultural Engineers*, 2006, **49**(3):749.
- [11] RENNUIT C, SOMMER S G. Decision support for the construction of farm-scale biogas digesters in developing countries with cold seasons [J]. *Energies*, 2013, **6**(10):5314-5332.
- [12] GEBREMEDHIN K, WU B, GOOCH C, *et al.* Simulation of heat transfer for maximum biogas production [C]. ASAE / CSAE Meeting, Ottawa, Canada, 2004.
- [13] GUO J, DONG R, CLEMENS J, *et al.* Thermal modelling of the completely stirred anaerobic reactor treating pig manure at low range of mesophilic conditions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **127**:18-22.
- [14] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [15] 龙恩深. 建筑能耗基因理论与建筑节能实践[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [16] MERLIN G, KOHLER F, BOUVIER M, *et al.* Importance of heat transfer in an anaerobic digestion plant in a continental climate context [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**(11):59-67.
- [17] PERRIGAULT T, WEATHERFORD V, MARTÍ-HERRERO J, *et al.* Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**:259-268.
- [18] 花 镜,滕子言,陆小华,等. 沼液余热回收对高温发酵沼气工程净产气率的影响[J]. 化工学报, 2014, **65**(5):1888-1892.
- HUA Jing, TENG Zi-yan, LU Xiao-hua, *et al.* Effect of waste heat recovery on net biogas yield in thermophilic biogas plants [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2014, **65**(5):1888-1892. (in Chinese)
- [19] BARRIOS G, HUELSZ G, ROJAS J. Thermal performance of envelope wall/roofs of intermittent air-conditioned rooms [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, **40**:1-7.
- [20] 梁小珍,刘秀丽,杨丰梅. 考虑资源环境约束的我国区域生猪养殖业综合生产能力评价[J]. 系统工程理论与实践, 2013, **33**(9):2263-2270.
- LIANG Xiao-zhen, LIU Xiu-li, YANG Feng-mei. Evaluation of regional comprehensive production capacity of hog industry in China considered the constraints of resources and environment [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, **33**(9):2263-2270. (in Chinese)
- [21] 寇 巍,郑 磊,曲静霞,等. 太阳能与发电余热复合沼气增温系统设计[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(24):211-217.
- KOU Wei, ZHENG Lei, QU Jing-xia, *et al.* Engineering design of solar and power waste energy heating system for biogas project [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, **29**(24):211-217. (in Chinese)
- [22] 陈志光,秦朝葵,熊 超. 螺旋管传热系数的研究[J]. 热科学与技术, 2009, **8**(2):131-135.
- CHEN Zhi-guang, QIN Chao-kui, XIONG Chao. Study on heat transfer coefficient of spiral heat exchanger [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2009, **8**(2):131-135. (in Chinese)
- [23] 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 Xiao-dong, DENG Liang-wei, 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)
- [24] GUAN T, ALVFORS P, LINDBERGH G. Investigation of the prospect of energy self-

sufficiency and technical performance of an integrated PEMFC (proton exchange membrane fuel cell),

dairy farm and biogas plant system [J]. *Applied Energy*, 2014, **130**:685-691.

Method determinating operation temperature of biogas plant in livestock farms

LUO Tao^{1,2}, HUANG Hai-long¹, MENG Xi², LONG En-shen^{1,2}, RAN Yi¹, MEI Zi-li^{*1}

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

2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A calculation model was established to analyze and maximize the net biogas production of the large and middle scale biogas plant at the existing working condition in China, and then, a 500 m³ digester was taken as an example to investigate the optimum fermentation temperature. The results showed that the two main effects on the fermentation temperature were the biogas production efficiency of the digester (k) and the thermal efficiency of the heat exchange system thermal (η). As the normal designing, $k = 0.55$, $\eta = 0.45$, and fermentation temperature is 35 °C, the biogas used for heat loading is 42.4% of the annual biogas production, which is 65.2% in winter, 42.1% in spring, 40.4% in summer and in summer, the average net biogas production is 288.0 m³/d. As when $k \geq 0.55$ and $\eta \geq 0.45$, the optimum fermentation temperature is 35 °C. However, as decreasing of the value k or η , the optimum fermentation temperature is likely to decrease as well. Two strategies were suggested to improve the benefits of biogas production in biogas plant: operating the biogas plant at about 30 °C in China, maintaining k and η at high values as possible.

Key words: fermentation temperature; operating biogas plant; biogas production; heat load; thermal efficiency

[责任编辑: 郭万慧]