

Research on Self-Energizing System Model of Methane-Electricity-Heatpump in Cold Area

Chenghu Zhang, Fang Ma, Dexing Sun, Shan Qiu

School of municipal and environment engineering, Harbin institute of technology, Harbin 150090, China
chenghuzhang@sohu.com

Abstract: The heat energy loss of methane liquid is the most important reason for low temperature of methane biochemical reaction in cold area by energy-flow analysis. The heat energy recovery of methane liquid can build a self-energizing system. Vegetable greenhouses and birdhouse or livestock barn in cold area need heating in winter, in order to supply the most heat energy, invented the methane-electricity-heatpump system model, introduced and evaluated the running characteristic and effect.

Keywords: cold area; self-energizing; methane; heat pump; model.

寒冷地区能量自给型沼-电-热泵系统模式探索

张承虎, 马放, 孙德兴, 邱珊

哈尔滨工业大学, 哈尔滨, 中国, 150090
chenghuzhang@sohu.com

摘要: 通过沼气系统能流分析, 发现造成寒区沼气反应温度偏低的主要原因是沼液出料热损失, 提出沼液热回收的能量自给系统。针对寒区的蔬菜种植和畜禽养殖均需采暖越冬的特点, 以供热量最大化为目标, 为寒区农-畜牧场设计了沼-电-热泵系统模式, 并对该模式的运行特点和效果进行了评价。

关键词: 寒冷地区; 能量自给; 沼气; 热泵; 模式

1 引言

核能、太阳能、生物质能是未来人类赖以生存、发展、繁荣的新能源。在目前世界的能源消耗中, 生物质能消耗占世界总能耗的 14%, 仅次于石油、煤炭和天然气, 位居第 4 位。预计到 21 世纪, 世界能源消费的 40% 将会来自生物质能。而在发展中国家, 生物质能消耗达到 50% 以上。我国农业人口约占总人口的 60%, 生物质能也约占农村总能耗的 60%。

低碳经济和低碳能源是未来的世界发展方向, 沼气是一种可再生低碳能源, 必将在农村形成新的低碳产业。21 世纪沼气在农村将成为主要能源之一, 并将逐渐转化为商品能源。从沼气发展前景来看, 未来沼气市场必定由大中型沼气项目引领。沼气向大中型规模发展保证了沼气产业的形成。

2004 年我国畜禽粪便可生产沼气 784.04 亿立方米, 折合甲烷为 480.03 亿立方米, 相当于我国 2004

年天然气产量的 1.35 倍。参照目前天然气的商业价格, 每年畜禽养殖业沼气利用潜在资源价值近 600 亿元, 可实现的经济价值近 40 亿元, 完全可以成为具有广阔商业前景的能源产业。

截至 2009 年, 全国农村户用沼气已达 3050 万户, 各类沼气工程 3.95 万处, 年生产沼气约 122 亿立方米, 生产沼肥 (沼渣、沼液) 约 3.85 亿吨, 使用沼气相当于替代 1850 万吨标准煤, 减少排放二氧化碳 4500 多万吨, 替代薪材相当于 1.1 亿亩林地的年蓄积量, 每年可为农户直接增收节支 150 亿元。

但是, 目前所建设的沼气工程, 绝大多数分布在我国的中南部地区, 在三北的寒冷地区应用实例则非常少。其主要原因是沼气发酵过程受温度影响十分显著, 寒冷地区很难保障沼气发酵过程对温度的要求; 即便是在中南部地区的沼气池, 安全越冬和提高冬季低温条件下的沼气产量和稳定性, 也是一项关键技术。

本文针对寒冷地区的蔬菜种植场、禽畜养殖场需要采暖越冬的特点, 在沼气系统能流分析的基础上, 提出了一种沼-电-热泵模式的能量自给型沼气新工

资助信息: 中国博士后基金 (20090450986), 黑龙江省博士后基金 (LBH-Z09199), 教育部博士点基金 (20092302120023)

艺,将沼气与种植业、养殖业联合起来,为蔬菜提供肥料,处理畜禽粪便污染,并利用沼气发电驱动热泵,为蔬菜大棚、畜禽舍舍提供采暖,形成新的种植业和养殖业模式和产业。实际上,能量自给型沼-电-热泵模式沼气系统,不论在南方还是北方地区均可适用,均可以最大化地增加系统的实际收益率,只不过该工艺技术在寒冷地区具有更大的推广优势。该模式已在黑龙江省 2009 年新增中央预算内投资计划的某农村沼气建设项目中应用。该项目在某种畜场内实施,总投资 452 万元,其中申请国家专项补助 150 万元,地方配套资金 40 万元。种畜场现存栏奶牛 1000 头,占地 80000m²,有畜舍 12 幢,每幢 1070m²,畜舍总面积 12840m²,青贮窖四处,还有 350m² 的二层办公楼一座。该大型沼气工程建在种畜场东部郊区,总占地面积 3951.6m²,主要包括 1000m³ 的 CSTR 反应器一座,输气工程一处,2500m³ 的贮液池一座,辅助用房及配套脱硫、脱水等设施;500m³ 储气柜一座用于发电。项目投产后,日处理粪便 24 吨,CSTR 厌氧反应器维持反应温度 35℃,日生产沼气 864m³,年产沼气 31.54 万 m³,年发电 35.48 万 kWh,年产沼渣 1577 吨,沼液 14190 吨。

2 寒区沼气工艺存在的问题

寒区主要指我国西北、华北和东北的寒冷地区,冬季寒冷干燥,漫长寒冷的冬季造成地温偏低,使普通水压式沼气池池温只能维持在 8~15℃ 之间,达不到最佳发酵温度。由温度过低导致的沼气难题可归纳为:运行时间短,效益差;沼气池温低,产气少;降解效果差、肥效低;发酵周期长,负荷小。

在寒冷地区,由于冬季气温低,普遍存在池容产气率低、出料困难,无法产气,甚至出现冻裂沼气池的现象。据调查,我国北方户用沼气池全年产气率平均为 0.1 m³/(m³d),沼气利用率约 50% 左右,原料分解率不足 30%,沼气利用时间只有 3 个月。这种状况在一定程度上限制了寒冷地区沼气利用技术的发展。

以黑龙江省为例,地面以下 50cm 的温度在最寒冷的 1~3 月份平均在 -5℃,4 月份和 12 月份平均为 0℃,5 月份和 11 月份平均为 5℃,6 月份和 10 月份平均为 12℃,7 月份和 8 月份平均可达 15℃。由于沼气池内温度达到 12℃ 以上才能基本保证沼气的正常发酵,所以在黑龙江省有长达 8 个月的时间里,半米以下的沼气池温度无法达到沼气发酵所要求的基本温

度。普通户用沼气池在 2~4 月份池内温度为 8℃ 左右,发酵周期长达 120 天。沼气池池温在 8~15℃ 之间变化时,产气率为 0.07~0.1m³/(m³d),产气量微弱。

与发达国家相比,欧洲沼气工程几乎全部采用中高温发酵,单位容积产气率在 1~6m³/(m³d)[1-3],而我我国绝大多数沼气工程采用常温或中温发酵,单位容积产气率一般小于 1m³/(m³d)。池温过低严重制约了大中型沼气工程在我国寒冷地区的发展与应用。

目前,解决寒区沼气池池温过低的方法主要有:

(1) 驯化耐低温微生物菌群。目前进展缓慢,未见成熟应用。

(2) 太阳能集热增温措施。其最大优点就是不消耗矿物能源和沼气。缺点是造价比普通沼气池增加近 3 倍,难于推广。并且由于没有辅助热源,在气象条件不利的情况下,仍然不满足冬季沼气发酵需求。

(3) 燃煤锅炉增温措施。其优点是安全可靠,可保证全年全天候正常运行,但由于消耗燃煤,环保与节能效果大打折扣,甚至“入不敷出”。

(4) 沼气锅炉增温措施。其优点是不消耗矿物能源,但由于消耗了大量沼气,使得系统的“实际产气率”降低了 70% 以上,甚至“得不偿失”。

(5) 沼气发电余热增温措施。其优点是不消耗矿物能源,也不影响实际产气效益。但是发电余热的连续性不符合沼气池进料增温的集中性,因此难以单独应用。而且我国沼气发电机组的烟气余热利用和电机冷却余热利用均很不成熟。

3 能流分析与能量自给途径

原料进入沼气系统,经过发酵、收集、输运、燃烧、排放、散热等过程,最终以能量的形式而被加以利用,这些复杂过程都伴随着能量的转化、转移与损耗。对各个子过程进行能流分析,即分析能量输入、输出、损失、转化等过程的品质和数量变化,才能真正全面地了解沼气这一新能源的生产过程,才能实现沼气生产的能量自给和高产高效。沼气池体能流的数学模型为:

$$\left(\rho c V \frac{dt}{d\tau}\right)_r = Q + qV_r + (\rho c V t)_i - (\rho c V t)_o - (\rho c V t)_g - KA(t_r - t_a) \quad (1)$$

式中: Q -池体增温加热量, kW; t -温度, °C; τ -时间, s; ρ -密度, kg/m³; c -比热容, kJ/(kg·°C); V -

体积, m^3 , \dot{V} -沼气流, m^3/s ; q -单位体积反应热强度, kW/m^3 ; K -池体结构散热系数, $kW/(m^2\cdot C)$; A -池体结构散热面积, m^2 ; 下标: r -池体的; i -进料的; o -出料的; g -沼气抽气的。

通过能流分析发现以下现象:

(1) 池体结构耗热量: 采用简单的池体保温措施(500mm 苯板外保温), 即可将池体向大气或大地的散热损失降低到很小的比例, 一般为总热损失的 3% 左右。

(2) 出、进料耗热量: 出料热损失(或进料加热量)是沼气系统热损失的最大部分, 占到 90% 以上。因此利用出料废热来对进料进行加热, 才是降低池体增温能耗的正确出路。

(3) 总耗热量的影响: 一个产气率 $1.76m^3/(m^3d)$ 的沼气池, 池体增温总耗热量与所产沼气热值的比例高达三分之一以上(如果产气率较低, 这一比例还将更高)。也就是说, 消耗 1 份热能, 通过沼气系统转换可获得 3 份热能, 如果消耗的这 1 份热能来源于沼气、或煤、或电, 那么实际的沼气收益只有 2 份甚至更少。如果这 1 份热能来源于太阳能或出料废热回收, 沼气的收益才真正是 3 份。

(4) 出料废热回收: 如果出料废热可以完全回收, 并用之加热进料, 那么进、出料是热平衡的, 也就避免了 90% 以上的热损失。增温只需维持池体结构散热

即可, 即只需要提供 3% 的池体结构耗热量。

(5) 如何实现能量自给: 利用出料废热加热进料, 没有消耗沼气、煤、电、太阳能, 而 3% 的池体结构耗热通过厌氧反应自身放热(沼气池厌氧消化过程的反应热随处理的物料不同而已, 转化人、禽畜粪便为甲烷所产生的反应热, 一般为发酵料液有效能量 [16.915kJ/kg] 的 3% [4]) 就可满足(如果利用烟气的余热那也是绰绰有余)。

也就是说, 池体保温良好时, 池体结构散热极小, 给沼气池增温, 实际上就是加热进料。用回收出料废热来加热进料, 可实现池体进出的能量平衡, 达到沼气系统能量自给的目的, 获得最大限度的沼气收益。能量自给型沼气工艺的目标: 采取沼液回热措施, 在池体增温加热量 $Q \approx 0$ 的条件下, 满足池体反应温度

$$\frac{dt_r}{d\tau} \approx 0.$$

4 沼-电-热泵模式——热能总量最大化

沼气有多种用途, 例如炊事、照明、发电、贮粮、保鲜、养蚕等等。沼气的充分利用应视农村具体情况而定。本文针对寒冷地区蔬菜大棚和畜舍禽舍需要采暖越冬的特点, 以热能利用最大化为目标, 提出了沼-电-热泵(MEHP: methane-electricity-heatpump mode) 模式。MEHP 模式的工艺流程如图 1 所示。MEHP 模式的主要特点在于:

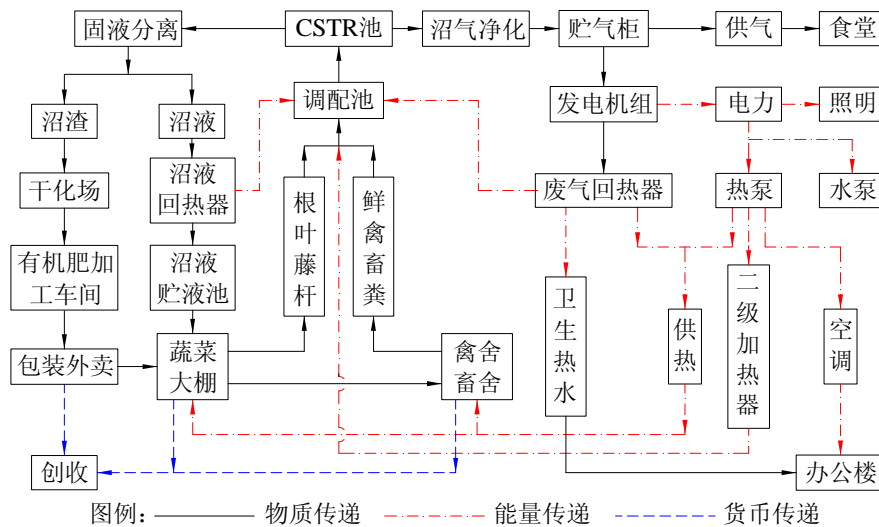


Figure 1. Self-energizing system model of methane-electricity-heatpump
图 1. 能量自给型沼-电-热泵系统模式

- (1) 利用沼液回热器回收出料废热用于加热进料，实现沼气池进、出能量平衡和自给。
- (2) 利用沼气发电。发电的烟气废热和冷却余热用于蔬菜大棚或畜舍禽舍的冬季采暖和卫生热水供应。
- (3) 利用电力驱动土壤源（或水源、空气源）热

泵，提取大量土壤低位热能用于蔬菜大棚或畜舍禽舍的冬季采暖。

- (4) 热回收不足的部分（二级加热器）可由烟气废热或热泵补偿供给，故可分为热泵补偿和烟气补偿两种方式，热泵补偿的系统原理如图 2 所示。

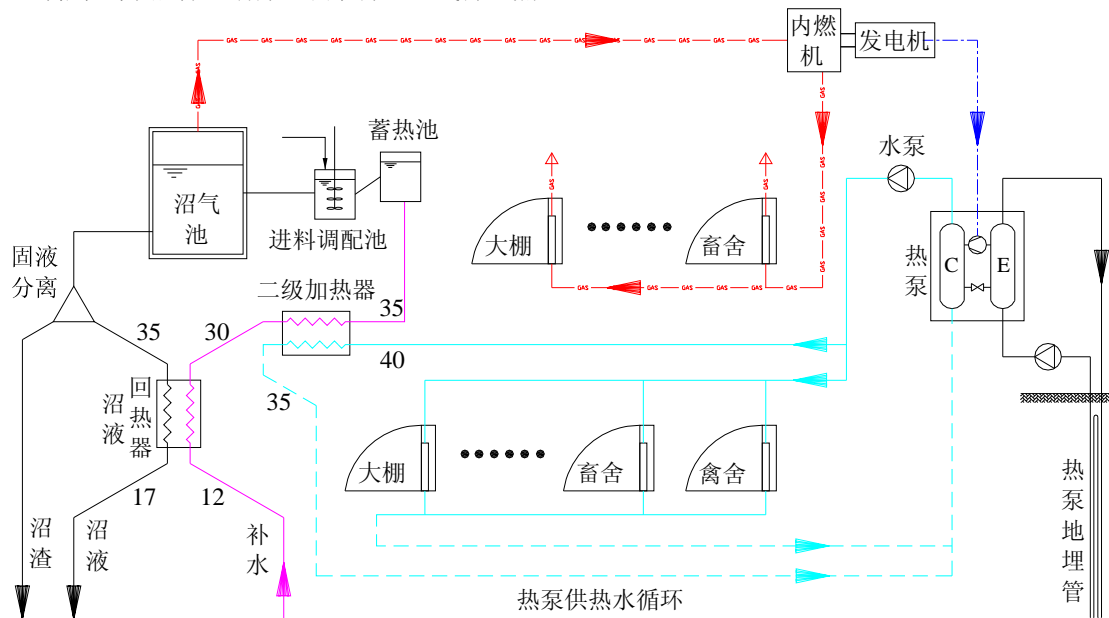


Figure 2. system skeleton of secondary heating by heat pump
图 2. 热泵热水二次加热进料沼气系统原理图

MEHP 模式的沼气系统运行消耗的能量全部由系统自身提供，包括池体散热的补充、进料补水的加热、循环水泵的电耗、热泵机组的电耗、搅拌电耗等。整个系统无需消耗额外收费能源，即可实现自身的正常运转，同时保证沼气能源的稳定高效产出，并实现大面积蔬菜大棚或畜舍禽舍的采暖越冬。

5 MEHP 系统模式运行特性

(1) 沼液回热器

回收出料沼液废热来加热进料补水，是能量自给型沼气工艺的基本措施。沼液回热器的正确设计是能量自给型沼气系统成败的关键。但是沼液不是一种常见的流动换热工质，通过管式流变仪和平板流变仪试验研究发现沼液具有幂律性非牛顿流变特性：

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

式中： τ 为流体内摩擦力，Pa； K 为稠度系数， Ns^n/m^2 ； n 为流动指数。 $\dot{\gamma}$ 为剪应变速度， $1/s$ ； η 为表观粘度函数，Pa.s。不同发酵物产生的不同浓度沼液的稠度系数和流动指数不同，但稠度系数普遍约为 0.003 左右，流动指数普遍小于 1，即表现为剪切稀化特性。

沼液回热器是一个非稳态换热器，因为换热流体不是循环流动，出料和进料都是在较短的时间内完成的，于是沼液流经换热器的时间与换热运行总时间相当，而废热回收又必须在这一较短时间内完成。因此，换热器初始阶段的非稳态换热特性就对整个废热回收过程起着重要的作用。

(2) 烟气回热器

沼气的主要成分为甲烷 (CH_4) 50%~70%，二氧化碳 (CO_2) 30%~40%，此外还含有少量的一氧化碳、氢、硫化氢、氧和氮等气体，其它如灰分、含硫量和含氮量均很低，燃烧所产生烟气中粉尘含量极少，硫和氮的氧化物也较少，主要是 CO_2 和 H_2O 。

沼气发电的烟气中含有 70%~80% 的余热, 这部分热量必须加以回收利用, 才能实现热能利用总量最大化。烟气/水换热器或烟气散热器是烟气热能回收的主要措施, 合理正确地设计烟气换热器必须对烟气的成分和对流换热特性进行深入研究。通过相似理论和正交实验研究发现烟气/水回热器的无量纲传热准则关联式具有以下形式:

$$Nu = C Re^n Pr^m \left(\frac{s}{d}\right)^i \left(\frac{l}{d}\right)^k \quad (3)$$

式中: Nu 为努谢尔特 (Nusselt) 数; Re 为雷诺 (Reynolds) 数; Pr 为普朗特 (Prandtl) 数; d 为换热管径, mm; s 为肋片间距, mm; l 为肋片高度, mm; C 、 n 、 m 、 i 、 k 为实验数据整理得到的常数。

其中烟气温度、流速、肋片间距和高度是影响烟气回热器传热效果的最主要因素。

(3) 微过热运行

在进、出料热能回收和能量平衡的条件下, 沼气池体热损失主要是池体结构散热, 而这一散热量是很小的, 再考虑发酵反应热, 通过非稳态传热计算发现, 在没有加热措施条件下池体全天总体降温幅度不超过 1℃。

因此只要将进料温度稍微提高 1℃ 就能满足池体长时间的散热而保证池内温度不低于最佳发酵温度, 这一运行模式称之为微过热运行。采用微过热进料运行模式避免了在池体内布置加热盘管。

(4) MEHP 模式的效益评估

MEHP 模式采用两级换热器来加热进料, 并保证反应池维持在高效反应温度区间内。一级换热器保证了出料废热的充分利用, 是能量自给的根本; 二级换热器保证进料水温的达标和稳定性。出料首先进行固液分离, 然后对进料的补水进行加热(实现废热回收), 这部分热回收实际可提供 80%~90% 的热量。最后进料补水热量不足部分由热泵或者发电废热提供(仅负担 10%~205% 的热量)。

一个日产沼气 400m³ 的能量自给型沼气池所需的一级换热器(即沼液换热器)面积大约 8m², 投资在 5000 元以内, 二级换热器(即普通换热器)面积大约 2m², 投资在 2000 元以内。可见出料废热回收所需成本是很低的。该沼气池通过 MEHP 模式, 在黑龙江地区可供应的蔬菜大棚面积约为 5700m², 年节约燃煤约 120 吨。

本文定义沼气的实际收益率: 沼气利用系统供出的实际能量(需要扣除池体增温能耗、辅助设备能耗、各种利用损失等)与所产沼气的燃烧热值之比。即

$$\Psi = \frac{E}{Q} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Ψ 为沼气利用系统的实际收益率; E 为沼气利用系统供出的实际能量, kJ; Q 为沼气的燃烧热值, kJ。

本文采用产气率和实际收益率两个指标进行沼气系统的效益评估。采用 MEHP 模式的某沼气工程可以维持反应温度 35℃ 左右, 平均产气率为 0.864 m³/(m³d)。一般而言, 采用太阳能辅助加热的沼气系统的实际收益率约为 85% 左右, 采用沼气炉或其它矿物燃料锅炉辅助加热的沼气系统的实际收益率约在 35%~65% 之间, 采用发电废热辅助加热的用电沼气系统的实际收益率约在 20%~30% 之间[5]。

之所以说 MEHP 模式可以实现热能利用总量最大化, 是因为热泵是一种高效的能源利用设备, 给热泵提供 1 份电能, 它可以从土壤中提取 3 份热能, 从而供出总共约 4 份的热能(即常说的 COP=4)。一般而言, 沼气发电效率可达 25%, 发电废热用于蔬菜大棚供热的利用效率可达 90%, 热泵系统的综合 COPs=3.5 (也就是考虑了系统所有水泵的电耗, 相当于辅助设备电耗占热泵主机电耗的 15%), 那么沼气利用的实际收益率为

$$\Psi = 0.75 \times 0.9 + 0.25 \times 3.5 - 0.33 \times 0.15 = 1.50$$

也就是说, 沼气通过发电+热泵的转换之后, 最终获得的热能是其燃烧热值的 1.5 倍, 即获得的热量增加了 50%。这部分增加的热量实际上是通过热泵提取土壤热能而获得的。

6 结论

沼气在未来是一种可再生低碳商品能源, 必将形成一个新兴产业。在寒冷地区给池体做好保温, 进料温度将是影响反应温度的最主要因素, 进料加热量约占生产沼气热值的三分之一以上。沼液回热器是一个非稳态换热器, 可以回收出料排热的 80%~90%。沼液具有剪切稀化的非牛顿流变特性, 烟气温度、流速、肋片间距和高度是影响烟气回热器传热效果的最主要因素。针对寒区蔬菜种植和禽畜养殖均需采暖越冬而提出的沼-电-热泵模式, 可采取微过热模式运行, 二

级加热器可由烟气废热或者热泵供热提供热源。由于采用了高效用能的热泵技术和全面热回收技术,使得沼-电-热泵系统模式的实际收益率达到 150%。

References (参考文献)

- [1] An Analysis of Energy Production Cost from Anaerobic Digestion System on US Livestock Production Facilities USDA&NRCS[M], October 2007 Report.
- [2] Jim Boden Steiner, John Cuttica, Mark Hall, Ricardo Amon. Animal Waste to Biogas Can This Be a Significant Energy Resource. ACEEE Forum on Energy Efficiency in Agriculture[J], February 21, 2008.
- [3] C. Walla, W. Schneeberger. The optimal size for biogas plants[J]. Biomass & Bioenergy, 2008,32: 551-557.
- [4] Fu Xiuqin, Chen Zi'ai, Deng Liangwei. Volume calculation of dimensions scaled pig dejecta methane reactor[J], China Biogas, 2002(20): 21-27.(Ch).
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.
- [5] John Kangwa. Pear-biogas-pig production simulation model [M]. Hangzhou: Collage of agriculture and biotechnology of Zhejiang University, 2003.