

畜禽养殖场沼气工程厌氧消化技术优化分析

韩芳^{1,2}, 林聪²

(1. 中国农村能源行业协会, 北京 100125; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为推进畜禽养殖场沼气工程高效运行, 提高其厌氧消化效率, 该文选择了 3 座沼气工程, 对其厌氧消化工艺、工程运行管理和投入产出情况进行分析探讨。在此基础上, 提出中国畜禽养殖场沼气工程建设厌氧消化技术的优化运行方案: 完全混合式厌氧反应器、升流式固体反应器和高浓度推流式反应器适用于高悬浮固体浓度、高固体发酵原料的“能源生态型”沼气工程; 与厌氧消化工艺相匹配的要素是沼气工程日常调控的重点; 热电肥联产能够实现沼气工程效益的最大化; 利用太阳能加热、沼液回用发酵可以节约能源, 降低工程运行成本。

关键词: 沼气工程, 厌氧消化, 工艺, 农业废弃物

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.z1.009

中图分类号: TK421

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-Supp.1-0041-07

韩芳, 林聪. 畜禽养殖场沼气工程厌氧消化技术优化分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 41-47.

Han Fang, Lin Cong. Optimization analysis of anaerobic digestion technologies of biogas engineering in livestock and poultry farms[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.1): 41-47. (in Chinese with English abstract)

0 引言

沼气工程具有环保、生态、经济、能源、社会等诸多效益。现阶段, 中国的沼气工程已从获取沼气燃料的单一模式发展为对沼气、沼渣和沼液综合利用的系统工程。近年来, 畜禽养殖场沼气工程的发展非常迅速, 取得了显著的成效。但多数畜禽养殖场沼气工程的综合效益无法充分显现。其主要原因是工程运行管理不到位, 调控不完善, 工艺技术不尽合理。

厌氧消化技术和工艺是沼气工程的重点和关键。这方面的优化分析和工艺的合理选择是保证沼气工程建设质量、运行稳定和可持续发展的关键。在大中型沼气工程迅速发展的现阶段, 优化沼气工程的厌氧消化技术显得尤为重要。厌氧消化技术始于 19 世纪末 20 世纪初, 经过波浪式的发展历程^[1-5], 开始蓬勃发展并被广泛应用。国内外对厌氧技术有较多的研究。中国重视厌氧消化工艺本身的研究开发, 几乎所有常规的、高效的厌氧消化工艺在中国都有应用^[6]。中国畜禽养殖场沼气工程多采用常温和中温发酵, 进料 TS(干物质)浓度基本在 2%~6% 以下, 产气率为 0.2~0.5 m³/(m³·d)^[7]。不论是在沼气工程技术、相关政策还是在沼气工程带来的经济、环境和能源效益等各方面, 一些欧洲国家尤其是丹麦和德国走在了世界前列。欧洲的农场沼气工程主要采用完全混合式厌氧反应器、推流式反应器或其组合工艺, 其容积产气率视原料和温度不同, 通常在 0.8~15.0 m³/(m³·d)之间^[6]。

沼气经热电联产系统转化为电能和热能, 产生的电能并网销售, 回收的热能通常用于周边农场、村镇供热以及补偿沼气工程本身所需的热消耗^[8]。在欧洲, 有专业化的公司投资建设运营管理沼气工程, 沼气站一般是独立的经营机构^[9]。沼气厂产生的沼液沼渣, 一般不经固液分离直接用于农田施肥。

本文从 3 座畜禽养殖场沼气工程的运行情况出发, 对畜禽养殖场沼气工程厌氧消化的工艺类型、运行管理、投入与产出等关键技术进行了深入的分析研究, 探讨养殖场沼气工程建设的经验和问题, 为畜禽养殖场沼气工程的可持续发展提供参考。

1 工程示范点简介

本文选择了 3 座有代表性的沼气工程进行优化分析, 以下是所选工程示范点的概况。

1.1 留民营七村沼气联供工程

留民营七村联供沼气工程位于北京市东南郊的大兴区长子营镇境内, 是北京市目前最大的农村沼气集中供气工程。1991 年, 留民营就建起了第一期沼气工程, 见图 1a。该工程是中国第一批投入运行的大中型沼气工程之一, 也是目前国内使用时间最长、管理维护最好的沼气工程之一, 对全国沼气工程技术的发展起到了良好的示范作用。为了进一步加大新能源利用, 适应该村养殖业发展需要, 1997 年, 留民营又建成第二期沼气工程, 如图 1b 所示。两座工程一起对全村 200 多户居民进行管道供气。进入 21 世纪, 原有的沼气工程已经不能完全处理村内养殖产生的粪便污水。为了扩大治污能力, 同时解决周边村庄利用沼气的难题, 进一步加大新能源利用规模, 2009 年, 留民营村在对 I、II 期工程进行升级改造的基础上, 新建了第三期沼气工程, 见图 1c, 开始为附近 7 个村近 1 700 户居民提供方便、清洁、安全和廉价的

收稿日期: 2011-01-06 修订日期: 2011-01-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAD4B03)(2009BAC64B08)

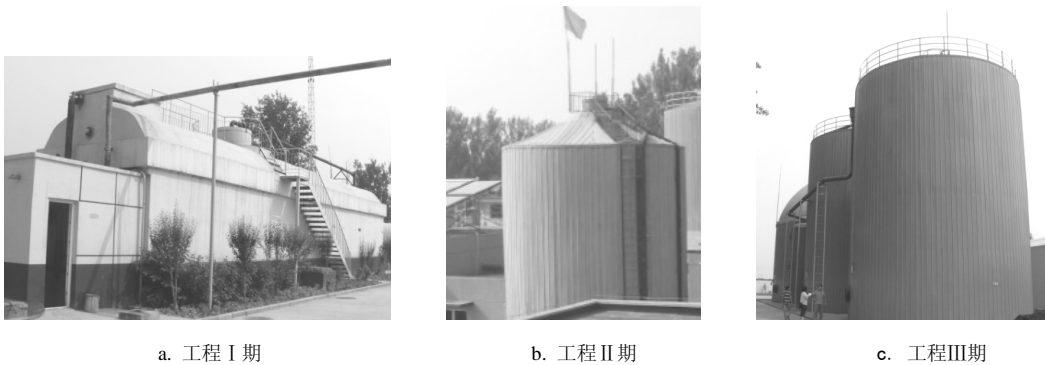
作者简介: 韩芳(1976-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 工程师。研究方向为农业生态环境与可再生能源开发。北京 中国农村能源行业协会, 100125。

Email: hanf822@126.com。

的管道沼气。

七村联供工程总投资 2 381 万元,日处理畜禽粪便及污水 97.5 t,其中鸡粪 22 t、牛粪 6 t、猪粪 6 t、污水 63.5 t。

工程年产沼气 68.4 万 m^3 ,年减排温室气体折合 CO_2 当量 2.3 万 t,全年节煤 4 000 余 t。工程每年生产固态有机肥料 2 135 t、液态有机肥 2.9 万 t。



a. 工程 I 期

b. 工程 II 期

c. 工程 III 期

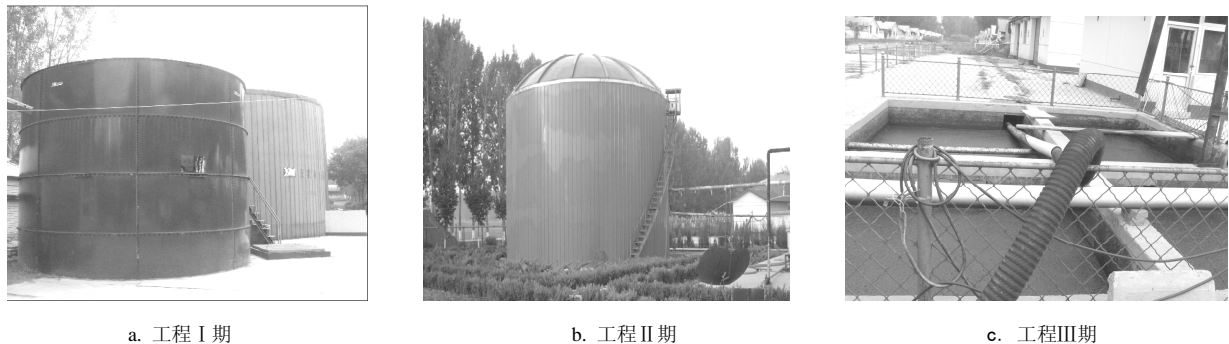
图 1 留民营三期沼气工程

Fig.1 Picture of Liumingying Biogas Engineering in different periods

1.2 北郎中集中供气沼气工程

北郎中集中供气沼气工程位于北京市顺义区赵全营镇北郎中村。早在上世纪 90 年代,北郎中村曾一度被誉为“京郊养猪第一村”。养猪带动经济发展的同时,也严重地影响了当地的生活环境。为了治理养殖污染,该村从 2001 年开始,先后投资 1 000 多万元,采取分期实

施的形式,陆续建起了 3 期沼气工程(图 2)。目前,北郎中村三期工程同时运行,日处理猪粪便 20 t、污水 20 t,日产沼气 1 200 m^3 。所产沼气通过脱硫、脱水处理后,一部分打入输气管道,除了为养殖场食堂的 30~40 人做饭和养殖车间消毒以及为全村的 500 多户村民稳定供气外,多余的部分用来发电。沼气工程年产生有机肥料 3 000 t。



a. 工程 I 期

b. 工程 II 期

c. 工程 III 期

图 2 北郎中集中供气沼气工程图

Fig.2 Picture of Beilangzhong Biogas Engineering

这些肥料全部施到村里的果园和花卉种植园。该沼气工程每年可节约标煤 780 t,减排 CO_2 2 000 t,减排 SO_2 6.63 t,减排 NO_x 5.8 t。工程的循环联动运行见图 3。

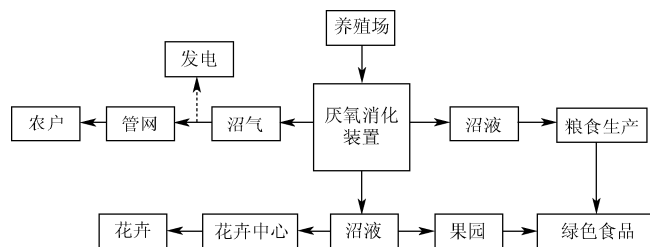


图 3 北郎中沼气工程系统循环流程框图

Fig.3 Circular-flow diagram of Beilangzhong Biogas Engineering

1.3 蒙牛澳亚国际牧场大型沼气综合利用工程

蒙牛澳亚示范牧场大型沼气发电综合利用工程(图 4)是中国最早发电上网的沼气工程,也是当时国内规模

最大的奶牛养殖场粪污处理沼气工程,位于内蒙古自治区呼和浩特市和林县盛乐经济园区,占地 3 hm^2 多。该工程从 2006 年开始实施,采用热电肥联产(CHP)零排放模式,实现了牧场万头奶牛的牛粪、牛尿及污水处理,沼气生产、净化及贮存,沼气发电,发电余热回收利用,有机肥生产及销售。项目总投资 8 000 万元。工程日处理牧场全群 10 000 多头存栏牛的鲜牛粪 280 t、牛尿 54 t 和冲洗水 360 t,日产沼气 11 500 m^3 ,年减排温室气体 CO_2 当量约 21 400 t,日沼气发电量近 2 万 kWh;年沼气发电量 750 余万 kWh,发电余热中的 80% 得到了回收利用;年产固态有机肥约 3 万 t、沼液约 17 万 t,用于牧场近 470 ha 牧草的施肥,同时用于周边农户牧草、青贮饲料以及近 10 个育苗种植基地施肥。目前,该工程已被中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会开发为清洁发展机制(CDM)项目。



图 4 蒙牛澳亚示范牧场大型沼气发电综合利用工程
Fig.4 Large-scale biogas engineering at Mengniu-Macao Demonstration Pasture

2 沼气工程厌氧消化技术优化分析

2.1 工艺类型优化分析

厌氧消化器是沼气发酵的核心设备，微生物的繁殖、有机物的分解转化、沼气的生成都是在消化器里进行的。厌氧消化器的结构决定了沼气发酵的工艺类型。下面将对上述 3 座沼气工程所采用的厌氧消化工艺类型，也是目前能源生态型技术模式中应用较多的厌氧消化器和发酵工艺进行对比分析。

留民营村三期沼气工程采用了两种工艺，I 期为塞流式反应器（Plug Flow Reactor，以下简称 PFR），II 期和 III 期均为升流式固体反应器（Upflow Solid Reactor，简称 USR），各工艺具体运行情况见表 1。

表 1 留民营沼气三期工程工艺对比一览表
Table 1 Process contrast of Liumingying Biogas Engineering during three different construction phases

工程段	I 期	II 期	III 期
建设规模/m ³	100	200	1600
建设时间/年	1991	1997	2009
工艺类型	PFR	USR	USR
发酵温度/℃	28	30	35
滞留期/d	15	15	15
进料浓度/%	6~8	6~8	6~8
年产气量/万 m ³	3.015	7.03	58.4

表 3 蒙牛澳亚示范牧场大型沼气工程厌氧消化工艺参数

Table 3 Anaerobic digestion process parameters of large-scale biogas engineering at Mengniu-Macao Demonstration Pasture

厌氧消化温度/℃	消化罐容积/m ³	日进料量/m ³	PH 值	进料浓度%	投配率/%	滞留期/d	容积负荷/(kg(m ³ ·d) ⁻¹)	池容产气率/(m ³ (m ³ ·d) ⁻¹)	沼气产量/(m ³ ·d ⁻¹)	出料浓度/%	有机物去除率/%
32~35	4×2500	500	7~8	6.5~9.0	5.03~6.22	20	4.0~4.7	1.0	11500	5.5~7	75~85

表 4 主要厌氧消化工艺对比分析表

Table 4 Main anaerobic digestion processes comparative analysis

工艺类型	HCF	USR	CSTR	UASB
原料种类	高悬浮固体废水，尤其适用于牛粪、猪粪	高悬浮固体、高浓度畜禽粪便尤其适用猪粪、鸡鸭粪便、牛粪	所有类型有机物	低悬浮固体溶解性废水
进料浓度/%	7~10	5~6	8~12	<1
容积有机负荷率/(kg(m ³ ·d) ⁻¹)	2~5	5~10	3~8	5~10
水力滞留期/d	15~20	8~15	15~30	1~5
池容产气率/(m ³ (m ³ ·d) ⁻¹)	1~1.5	0.4~1.2	1~2	0.8~1.0
有机物去除率/%	50~70	60~80	55~75	70~85

注：1. 表中数据由现有工程运行和设计资料总结得出。2. 表中的数据为中温或常温条件下消化所得。

北郎中集中供气沼气工程 I 期工程于 2002 年投入运行，采用上流式厌氧污泥床（Up-flow Anaerobic Sludge Bed，以下简称 UASB）工艺，在 2006 年 5 月检修时改为 USR。2004 年建设的污水处理 II 期工程仍采用 USR 工艺。2006 年 III 期工程建成，采用高浓度塞流式（以下简称 HCF）工艺，厌氧发酵罐为 4 个 250 m³ 的池体。各期工程的工艺运行见表 2。

表 2 北郎中三期沼气工程厌氧发酵工艺一览表

Table 2 Process contrast of Beilangzhong three phase Biogas Engineering

工程段	I 期	II 期	III 期
工艺类型	USR (UASB)	USR	HCF
发酵罐容积/m ³	500	700	1000
滞留期/d	12	12	13
进料浓度/%	6	6	6
发酵温度/℃	26	36	32
日产气量/m ³	140~600	130~580	300

蒙牛澳亚示范牧场大型沼气发电综合利用工程针对牧场污水有机物浓度高、残渣固体多容易结壳的特点，厌氧消化采用完全混合式厌氧消化器（Continuous Stirred Tank Reactor，以下简称 CSTR）工艺。内设搅拌器以提高传质效率和破除浮渣。其工艺参数如表 3。

这 3 座工程采用了 5 种工艺（PFR、USR CSTR、UASB、HCF），HCF 是近几年在 PFR 基础上增加搅拌装置后改进而成的新工艺，他们同为塞流式厌氧消化工艺。下面将其中最常用的、也是现阶段发展比较快的 4 种工艺进行分析对比，见表 4。

厌氧消化器工艺的选择是决定畜禽粪便沼气工程能否长期、高效、稳定运行的关键。根据以上分析，可以看出 4 种工艺有着自身的原料适应性，适合于不同的工程类型。对于高悬浮固体浓度、高固体发酵原料，选择 CSTR、USR 和 PFR，此 3 种工艺适用于“能源生态型”沼气工程。对于“能源环保型”沼气工程中处理低悬浮固体浓度的溶解性废水应选择 UASB。在悬浮物含量较高的情况下，经济效益和技术最合适的为 CSTR 与 USR，

而 CSTR 尤其适合于热电肥联产 (CHP) 零排放模式。为了保证沼气的处理效果,以生产沼气为主可选择最佳水力滞留期 (HRT),以环保为主则应适当延长 HRT。在一定的 HRT 条件下,设法延长固体滞留期 (SRT) 和微生物滞留期 (MRT),并使微生物与原料充分混合是厌氧消化器发展的主要方向。

2.2 工程运行管理优化分析

要使沼气发酵持续高效运行,除了发酵装置结构和功能合理外,还需要对厌氧消化过程进行调控,使各个影响因子达到最优,他们之间共同配合才可以促进沼气厌氧消化的高效进行,提高产气率。

2.2.1 工程调控

留民营七村联供沼气工程由专门的沼气站进行公司

化管理维护。沼气的原料以鸡粪为主,同时还辅以牛粪和猪粪。进料总固体质量分数根据季节的变化,幅度控制在 6%~10%,一般夏季为 6%左右,冬季为 8%~10%。工程通过回用沼液来调节进料浓度、温度和酸碱度,日进料量夏季为 50 m³、冬季最高达到 97 m³,有机负荷控制在 3~4 kg/(m³·d)。工程通过太阳能热水工程和锅炉加热的方式保证发酵温度维持在 35℃左右,夏季以利用太阳能为主,冬季以锅炉加热为主。为了让料液充分吸收太阳能,沼气站每日都在下午进料。水力滞留期为 15~18 d,搅拌靠池底进料冲击和沼液回流实现。日产气量 1875 m³,池容产气率达到 0.67~0.84 m³/(m³·d)。留民营七村联供沼气工程的运行如图 5 所示。

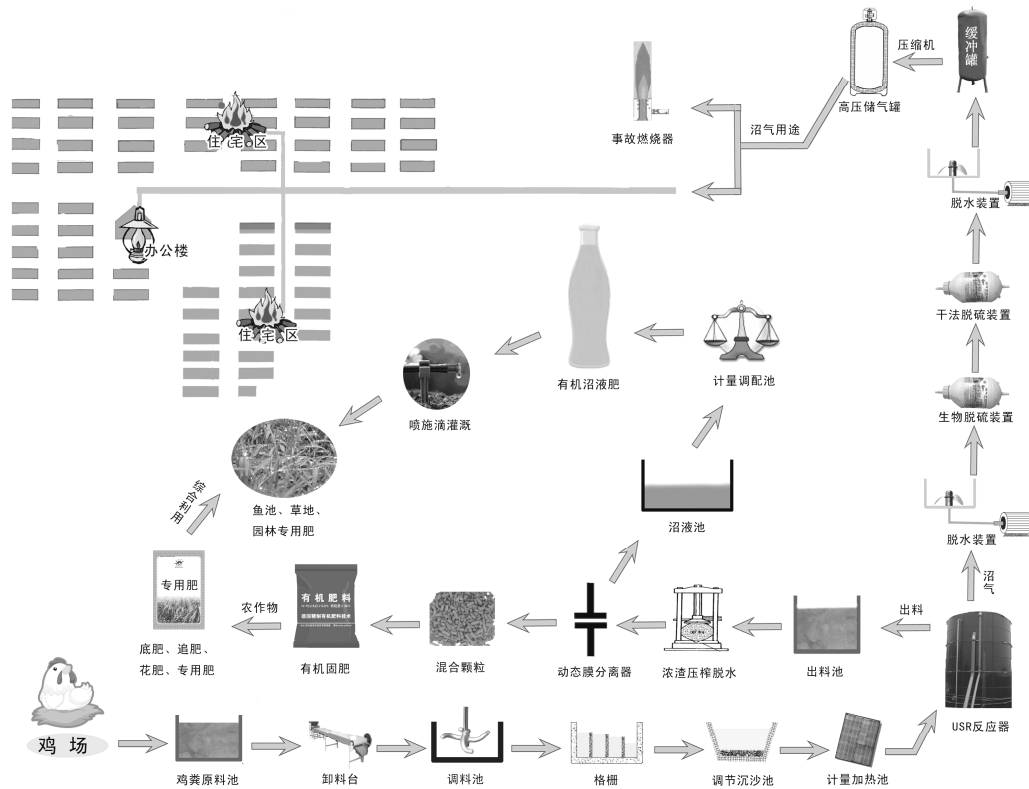


图 5 留民营沼气工程运行图

Fig.5 Running process diagram of Liuminying Biogas Engineering

北郎中集中供气沼气工程由村集体成立的管理中心自管,站内管理人员 8 名。工程原料为猪粪污水,进料浓度也通过回用沼液来调节,冬浓夏稀,平均浓度为 6%。进料量由用气量来定,夏季用气量小,日进料量也相对较低,为 10 m³左右。一天分两次均匀进料,中间间隔 10 h 左右。冬季进料量适当加大。夏季基本是常温发酵,从 10 月底开始,通过燃煤或沼气烧锅炉给料液进行预热以及为反应器内部加热等保温措施,维持反应器内温度在 26℃~35℃。滞留期为 12~13 d。每日能耗费用约 400 元。工程年产沼气 23 万 m³,以 1 元/m³的低价售给村民使用。

蒙牛澳亚示范牧场大型沼气发电综合利用工程由专门的公司经营管理。公司采用计算机集中控制管理系统,

对工程的运行进行全自动调控。工程所在地——内蒙古自治区呼和浩特市和林县盛乐经济园区位于高寒地区,极端最低气温达-34.5℃。对于该工程来说,温度调控是厌氧发酵产气好坏的关键。为了应对低温环境,工程一方面采用发电余热和太阳能集热系统加热料液、保温厌氧消化罐,另一方面采用高浓度进料,以此来实现热能补偿,维持厌氧消化在 37℃的中温条件下进行,从而保证了沼气工程常年高效率的稳定运行。该工程全年的能量平衡见图 6^[10]。

该工程一个突出的特点是其采用“热电肥联产、零排放”的技术模式,促进了农牧生态系统物质和能量的良性循环。沼气发电输入华北电网,余热的 80%得到了回收利用,一部分为奶牛养殖场提供热水、冬季取暖等,

另一部分为厌氧消化提供热源。沼液与沼渣一起作为农肥回归土壤，真正实现了发酵剩余物的零排放。

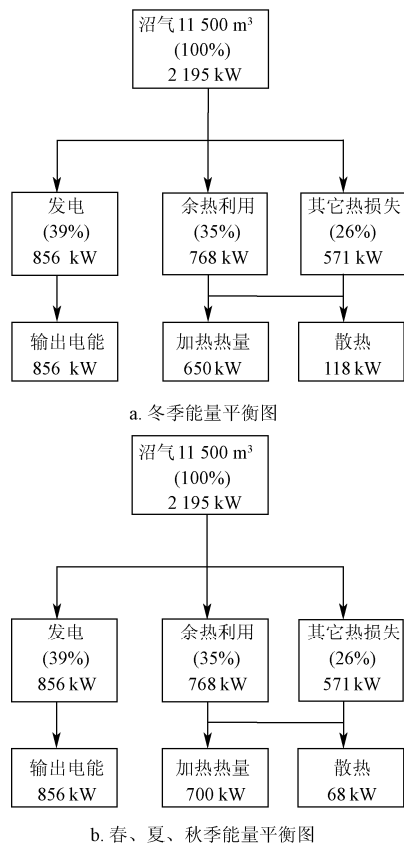


图 6 蒙牛澳亚示范牧场沼气工程全年能量平衡图

Fig.6 Energy balance of biogas engineering at Mengniu-Macao Demonstration Pasture

2.2.2 工程管理

以留民营七村沼气联供工程为例，分析沼气工程的管理模式和措施，提炼管理经验。

留民营七村沼气联供工程由村内的沼气站进行公司化管理维护。留民营沼气站注册成立了企业——北京奥世联新能源技术中心，采用现代企业制度管理和运营沼气工程，自负盈亏。公司的管理人员共 8 名，除了留民营本村外，其他 6 个用气村各配备一名沼气协管员。一村沼气，七村共享。相对于一村一站而言，七村联供模式不但极大降低了投资费用，节约了占地，大大减少了运行管理人员数量（若一村一站，运行管理人员总数将在 30 名左右），而且便于集中管理维护，实现了集约化生产经营。

管理人员通过智能监控系统监控工程运行的关键参数，采集数据，保障工程的安全运行。系统配备 UPS 不间断电源，防止意外断电系统数据丢失。所有信号线缆均采用屏蔽线缆，保证数据的准确可靠。为用户供气通过 IC 卡燃气计量仪表系统管理收费。在沼气站总调压箱内设置总表计量沼气产出，在每个村调压箱内设置分表计量各村沼气用量，在每户居民户内设置 IC 卡用户燃气表计量各户用量。各村用气比例全部达到 100%，具体用气情况见表 4。由于距离沼气站位置的远近、输气管铺

设的长短，各村使用沼气的价格不同。最远的沁水营、赵县营的沼气价格为 1.8 元/m³，留民营本村的沼气价格为 0.8 元/m³。

沼气站建立了多项管理制度对沼气工程进行管控，对设备进行维护，确保工程安全运营、高效运行。规章制度之外，中心还实行严格的岗位责任制来明确职责、确立权限。从村委会主管领导到具体的操作人员人人都需要遵守岗位责任制。为减少用气安全隐患，公司成立了应急救援指挥中心，对火灾、触电伤亡事故、机械人员伤亡事故、食物中毒事故和突发传染性疾病都有相应的应急预案。镇政府、镇派出所、镇安全科、镇卫生院、消防支队等部门的应急电话也都在站内公示，以防不测。

留民营沼气工程日运行成本 3 175 元（见表 5）。为了降低运行成本，沼气站采取了以下措施：尽量使用太阳能加温系统加热发酵原料；适量安装沼气取暖炉；增加沼气用量；适时启动沼气发电机，降低用电量；适量进料避免不必要的沼气浪费；下午进料，让原料充分吸收太阳能。

表 4 留民营沼气站七村联供情况统计表
Table 4 Statistic of biogas supply for 7 villages by Liuminying Biogas Engineering

村 名	用气户数/户	年用气量/m ³
留民营	289	126 908
窦 营	166	23 630
赵县营	416	42 318
郑二营	101	16 240
白 庙	208	31 191
沁水营	368	59 153
靳七营	146	22 726
合 计	1 694	322 166

表 5 留民营沼气站每日运行成本
Table 5 Daily work costs of Liuminying Biogas Engineering

名 称	用 量	单价/元	折款/元
水	15 t	2	30
电	600 Kw-h	0.7	420
煤	450 kg	在按每 t700 元计算	315
运输车	3 辆	120	360
脱硫剂	8 t	3 000	60
软水、化验药品、盐、试剂		30	30
各类年检		汽车、锅炉、高压罐、安全阀、审本、压力表、接地检测、消防安检	100
设备维护费			30
各村沼气管理员工资	6 村		100
沼气站、各村办公费等	7 村		30
各村调压箱伴热带电费			15
站内人员工资	8 人	60	480
鸡粪原料	22 万只鸡的粪便	每只鸡的粪便量两元/a	1 205
合计			3 175

2.3 投入产出分析

以蒙牛澳亚示范牧场大型沼气发电综合利用工程为例,其正常运行后,投入产出情况如下。

工程投入主要有以下3项:

- 1) 鲜牛粪 280 t、牛尿 54 t 和冲洗水 360 t;
- 2) 能耗费用 50 万元/a;
- 3) 运行管理费用 300 万元/a。

项目建成后产生的综合效益包括以下几项:

1) 能源效益:年产沼气 420 万 m^3 ,年发电 750 余万 kWh,折合标煤 4 000 t。

2) 环境效益:年减排 COD 9125 t、TN 487 t、TP96 t,年减排温室气体约 21400 t (CO_2 当量)。显著减轻水环境和大气环境污染,减少疫病传染,有效遏制公共卫生事件的发生,提高人、畜生活环境质量。

3) 生态效益:年产固体有机肥料 12 800 t 和沼液约 170 500 t,施用于蒙牛澳亚示范牧场近 470 ha 牧草的施肥,同时用于周边农户牧草、青贮饲料以及近 10 个育苗种植基地和内蒙古自治区种植无公害蔬菜施肥。提高了牧草与蔬菜质量,有益人、畜健康;防止耕地因过量使用化肥而降低地力,实现植物营养物质生态良性循环及资源利用最大化。

4) 社会效益:蒙牛集团是国内颇有影响的农牧业龙头企业,而澳亚示范牧场是中外合资企业,具有很高的知名度,建立粪污处理综合利用系统,对于树立企业良好形象具有十分重要的作用。通过工程示范,对规模化奶牛养殖场乃至整个奶牛养殖业粪污处理具有促进作用。同时,沼气工程的运行,也为社会提供了就业岗位。

5) 经济效益:沼气发电上网的收益 380 万元/a;沼液作为肥料节约的收益 256 万元/a;即将上市的固体有机肥出售收益 1 099 万元/a;正在开发的清洁发展机制(CDM)项目收益 200 万元/a。

运营期内,项目年均收入 286 万元。如果加上固体有机肥出售收益和 CDM 项目收益,该工程年均收入会大幅度提高。

综上所述,沼气工程的运行过程不但是污染物无害化、废物资源化的过程,也是沼气高水平利用并产生资金回报的过程。

3 结 论

通过对 3 座沼气工程的厌氧消化工艺、运行调控和投入产出分析,可得出以下结论:

1) 我国禽场养殖场多采用“能源生态型”模式,在此基础上建成“热电肥联产、零排放”的技术模式能够实现效益最大化。工程稳定运行后,申请 CDM 项目,可以扩展盈利点。

2) 禽场养殖场沼气工程设计时,可根据工程的建设目标、养殖种类、养殖规模和环境容量选定技术路线,进而确定工艺类型。CSTR、USR 和 HCF 工艺适用于高悬浮固体浓度、高固体发酵原料的“能源生态型”沼气工程。

3) 选用太阳能集热方式为厌氧消化系统增温,可以有效节约能源,减少运行费用。

4) 沼液回用发酵可以有效节约水资源,节约能源,减轻环境消纳压力,提高进料温度,降低运行成本,更重要的是可以提供沼气微生物,有效创造厌氧消化环境。

5) 对于某一具体工程而言,后期的日常调控管理是实现“粪污减量化、能源高效化、资源利用最大化、处理费用最小化”的关键。与工艺相匹配的进料浓度、进料量、出料时间、出料量、温度检测和适量搅拌是日常管理的重点,这些要素的合理搭配可以提高厌氧消化的效率。有效的管理模式、管理制度和现代管理手段的采用,可以进一步提高原料产气率,进而提升沼气工程的综合效益。

[参 考 文 献]

- [1] 彭武厚. 厌氧消化技术发展前景广阔[J]. 工业微生物, 1997, 27(3): 32—36.
Peng Wuhou. The broad development prospects of anaerobic digestion technology[J]. Industrial Microbiology, 1997, 27(3): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李清国. 固体废弃物处理工程[M]. 科学出版社, 2000: 194—195.
- [3] 张朝晖, 王虎, 刘玉凤, 等. 户用沼气系统建设现状评析[J]. 杨凌职业技术学院学报, 2003, 2(3): 34—37.
Zhang Chaohui, Wang Hu, Liu Yufeng, et al. On the current development of biogas system for household use[J]. Journal of Yangling Vocational and Technical College, 2003, 2(3): 34—37. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张无敌, 宋洪传, 李建昌, 等. 在西部大开发中云南商品沼气池前景广阔[J]. 能源研究与利用, 2002, (4): 11—12.
Zhang Wudi, Song Hongchuan, Li Jianchang, et al. Forecast of the marsh gas digester in yunnan province[J]. Energy Research and Utilization, 2002, (4): 11—12. (in Chinese with English abstract)
- [5] 何顺民, 朱维林, 吴礼友, 等. 我国农村沼气现状及服务体系建设对策研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(18): 4789—4790.
He Shunmin, Zhu Weilin, Wu Liyou, et al. Current situation and service system of the development of marsh gas in rural and the countermeasure[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(18): 4789—4790. (in Chinese with English abstract)
- [6] 邓光联. 大中型沼气工程发展模式探讨[C]. 2008 中国农村生物质能源国际研讨会暨东盟与中日韩生物质能源论坛论文集. 北京, 2008: 189—195.
- [7] 蔡昌达. 新型高效规模化沼气工程的关键技术[C]. 沼气技术和产业化发展研讨会专刊. 北京, 2009: 6—12.
- [8] 杨樱, 葛晶晶, 刘凯荣. 中国沼气工程技术研究现代农业科学[J]. 2009, 16(3): 217—219.
Yang Yin, Ge Jingjing, Liu Kairong. Study on biogas engineering technology in China[J]. Modern Agricultural Sciences, 2009, 16(3): 217—219. (in Chinese with English abstract)

- [9] 曹曼. 沼气产业新论[C]. 沼气发展战略和对策研讨会文集. 沈阳, 2010: 27-31.
- [10] 邓良伟, 颜丽, 等. “蒙牛澳亚示范牧场大型沼气发电综合利用工程”可行性研究报告[R].

Optimization analysis of anaerobic digestion technologies of biogas engineering in livestock and poultry farms

Han Fang^{1,2}, Lin Cong²

(1. China Association of Rural Energy Industry, Beijing 100125, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to propel efficient operation of biogas engineering in livestock and poultry farms and enhance their anaerobic digestion efficiency, three biogas projects were chosen and their anaerobic digestion technology, engineering operation management and input-output efficiency were analyzed. The results showed that continuous stirred tank reactor, upflow solid reactor and plug flow reactor were suitable for energy-ecological biogas engineering which had high suspended solids and high solid content in the fermentation material; elements matching the anaerobic digestion technology were the key point in daily regulation of biogas engineering; the maximization benefit of biogas engineering could be achieved by co-production the biogas heat energy, electricity energy and organic fertilizer with digested sludge and slurry; and the use of solar heating and the reuse of digested slurry into anaerobic digestion may save energy and reduce engineering operation costs.

Key words: biogas engineering, anaerobic digestion, technology, agricultural wastes