

分类号: TK11.4



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

密 级: 公 开

UDC: _____

单位代码: 10424

学 位 论 文

基于热管理器的太阳能加热高效制取 沼气系统的设计与分析

燕 纪 伦

申请学位级别: 硕士学位 专业名称: 热能工程

指导教师姓名: 孔祥强 职 称: 副教授

山 东 科 技 大 学

二〇一一年五月

论文题目：

基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气 系统的设计与分析

作者姓名：燕纪伦

入学时间：2008年9月

专业名称：热能工程

研究方向：节能与新能源利用技术

指导教师：孔祥强

职 称：副教授

论文提交日期：2011年5月

论文答辩日期：2011年6月13日

授予学位日期：

**DESIGN AND ANALYSIS OF A HIGH-EFFICIENCY BIOGAS
PRODUCTION SYSTEM WITH SOLAR HEATING BASED ON
THERMAL MANAGEMENT CONTROLLER**

A Dissertation submitted in fulfillment of the requirements of the degree of

MASTER OF PHILOSOPHY

from

Shandong University of Science and Technology

by

Yan Jilun

Supervisor: Associate Professor Kong Xiangqiang

College of Mechanical and Electronic Engineering

May 2011

声 明

本人呈交给山东科技大学的这篇硕士学位论文，除了所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人在导师指导下的研究成果。该论文资料尚没有呈交于其它任何学术机关作鉴定。

硕士生签名：

日 期：

AFFIRMATION

I declare that this dissertation, submitted in fulfillment of the requirements for the award of Master of Philosophy in Shandong University of Science and Technology, is wholly my own work unless referenced or acknowledged. The document has not been submitted for qualification at any other academic institute.

Signature:

Date:

摘 要

沼气作为一种可再生能源，在世界各地得到了快速发展。在我国，农村人口占大多数，在农村中发展沼气项目具有得天独厚的优势。它不仅能够解决农村生活用能的问题，还能够保护环境，增加农民经济效益。总之，大力发展沼气是实现能源和经济可持续发展的有效途径之一。

我国北方地区，受寒冷气候影响，沼气发酵温度低，甚至出现冬季池体冻裂的现象，影响了沼气池的连续运行，降低了沼气池产气率。针对这一问题，本文研究利用太阳能加热系统，提高沼气池温度。同时，针对太阳能利用过程中热源温度随时间变化的问题，本文将热管理器应用到沼气池加热系统中，以稳定加热过程中的太阳能热负荷，使沼气池温度保持在高效发酵温度范围内。

本文以青岛某规模养猪场为基础，对基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统进行了设计计算：根据养殖场基本数据设计了容积为 94m^3 的沼气池；在最不利天气条件下计算了 94m^3 的沼气池在高温发酵时总的热负荷和太阳能集热器面积，以及热管理器的相关参数；计算了沼气池加热系统的加热面积，设计了沼气池内部加热器结构及安装方式。

对利用热水加热的沼气池内部热传递过程进行了数值模拟，沼气池内布置螺旋盘管换热器。利用 Fluent 软件模拟了在重力影响下螺旋盘管换热器加热过程中沼气池内料液的温度分布特性，研究了两种螺旋盘管换热器布置方式对温度场的影响。模拟结果显示分段布置的螺旋盘管换热器比单层布置的螺旋管加热速度更快。建议采用液体搅拌方式，使沼气池内部料液温度分布更加均匀，提高沼气产气率。

本文提出的基于热管理器的太阳能加热系统对我国北方高寒地区的沼气池设计修建有一定的参考价值。

关键词：沼气，高效发酵，太阳能，热管理器，数值模拟

ABSTRACT

Biogas as a reproducible Energy gets a rapid development recently all over the world. The rural population is in the majority in China and developing the biogas project has a big advantage with not only meeting the needs of energy in the daily life, but also protecting the environment and improving the economic benefit. So it is a good method for the sustainable development.

The fermentation temperature is very low and even the biogas plant is frozen to break down in Northern China influenced by the cold climate. This influences the normal working and the efficiencies of producing of the biogas plant. It presents a new system that heats up digester fermenting with solar energy associated with biogas boiler in accordance with these problems. A thermal management controller is applied to control the output temperature stability from solar heating. As a result, the temperature in biogas pool is kept in the range of high efficient fermentation and gas production, which resolves temperature fluctuation in the fermentation process of the feed liquid due to heat-collection load from solar energy.

In this dissertation, the new high-efficiency biogas production system with solar heating is presented for a pig farm in Qingdao: designing a 94m³ biogas plant based on the statistics of the farm; calculating the heat load of the plant in thermophilic fermentation, the parameters of the thermal management controller and the required gross collector area during unfavorable weather conditions; designing the heater structure and installation method for the biogas plant.

The temperature distribution of the biogas slurry in the biogas pool is simulated with the influence of gravity, and explore the effect on the temperature field brought by two different layouts of heater with Fluent. The simulation result shows that the heating rate of the segmented helix coil heater is faster than that of the integrated heater. The stirred-liquid method could be used to improve the layout of the temperature to more uniform for a higher rate.

And this system has reference value for designing biogas plant in cold area of China.

Key words: biogas, High-efficiency Fermentation, solar energy, thermal management controller, numerical simulation

目 录

1 绪 论	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 沼气的发展与利用现状.....	2
1.3 沼气池联合外热源增温系统研究现状.....	7
1.4 本课题的选题意义及主要研究内容.....	10
2 太阳能、沼气和热管理器的基本理论基础	12
2.1 太阳能基本理论基础.....	12
2.2 沼气生产相关理论基础.....	17
2.3 热管理的基础理论.....	22
2.4 本章小结.....	25
3 基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统	26
3.1 系统设计及运行方案.....	26
3.2 太阳能加热沼气池数学模型.....	28
3.3 太阳能加热制取沼气系统设计.....	31
3.4 本章小结.....	41
4 沼气池加热系统数值模拟	42
4.1 模拟软件介绍.....	42
4.2 模拟过程方法.....	43
4.3 沼气池加热系统模型.....	44
4.4 模拟结果及分析.....	48
4.5 本章小结.....	53
5 太阳能加热系统效益分析	54
5.1 太阳能加热系统的环境效益分析.....	54
5.2 太阳能加热系统的经济效益分析.....	56

5.3 本章小结.....	57
6 总结与展望	58
参考文献.....	60
致 谢.....	65
攻读硕士学位期间从事的科学研究及发表论文情况	66

Contents

1	Introduction	1
1.1	Background of the subject	1
1.2	Development and utilization of biogas	2
1.3	Research of heating system with external heat source of biogas pool.....	7
1.4	Significance and content of the subject	10
2	Basic theories of solar energy, biogas and thermal management controller.....	12
2.1	Basic theory of solar energy	12
2.2	Related theory of biogas production.....	17
2.3	Working principle of thermal management controller.....	22
2.4	Brief summary	25
3	High-efficiency biogas production system with solar heating based on thermal management controller	26
3.1	System design and operation scheme	26
3.2	Mathematical model of biogas pool with solar heating.....	28
3.3	Design of biogas production system with solar heating	31
3.4	Brief summary	41
4	Simulation of biogas pool heating system	42
4.1	Introduction of simulation software.....	42
4.2	Method and process of simulation	43
4.3	Physical and mathematical models.....	44
4.4	Simulation result and analysis	48
4.5	Brief summary	53
5	Economic efficiency analysis	54
5.1	Environmental efficiency analysis of solar heating system	54
5.2	Economic efficiency analysis of solar heating system.....	56
5.3	Brief summary	57
6	Summary and Prospect.....	58

Main Reference Documents	60
Acknowledgement	65
Main Work Achievement of the Author during Working on Master Paper	66

1 绪 论

1.1 课题背景

能源和环境问题是当今社会普遍关注的热点,化石能源的逐渐枯竭和以化石燃料为基础的生产消费对地球环境的污染给人类生存带来了巨大压力。在中国,化石能源资源人均拥有量仅为世界人均的 56%,中国经济的快速增长越来越受到能源的制约,同时化石燃料消耗带来的环境污染问题也影响着社会的可持续发展。所以寻求解决之道和探索新能源的开发利用是社会可持续发展、人类环境和谐的必经之路。

中国过去在能源规划和分配统计中,往往忽视农村能源,主要研究商品能源,而商品能源的主要供应集中在城市居民和城市二、三产业上。现在随着农村经济的发展和建设新农村的一系列优惠政策的出台,这种情况发生了很大的变化,农村商品能源需求量和供应量都有所增加,农村和农民的用能情况有了较大的改变,这也加大了整个社会对能源的需求。另外,农村人、畜粪便和垃圾的管理和处理是农村环保工作中的一大难题。在农村,农户生活燃料一般以柴、草和秸秆为主,有条件的地区以燃料为主,或柴煤兼用,加之炉灶落后,燃烧不完全,导致厨房烟灰飞扬,CO、SO₂、CO₂等有害气体污染严重,直接影响了人身健康。同时,某些地区粪便与垃圾失管,成了蚊蝇滋生基地,臭水横流,地面卫生环境恶劣,地下水受到污染。

随着农村经济发展和农民生活水平的提高,广大农民对于改变传统的能源利用方式、使用优质燃料、改善生活环境的需求日益迫切。因此,探索广大农村的用能新模式,提高用能效率对改善我国能源和环境形势有很大的帮助。中国 80%人口生活在农村,秸秆和薪柴等生物质能是农村的主要生活燃料,利用好这些原料,开展农村沼气建设,将人畜粪便通过厌氧发酵生产沼气,替代煤炭、薪柴和秸秆,既可以解决农村地区的能源短缺问题,也可以满足广大农民对使用优质、清洁能源的需求。

在政府的大力支持下,我国的沼气事业取得了很大的发展。目前,全国农村已有户用沼气池 1300 多万,年产沼气大约 33 亿立方米,大中型沼气工程 2200 多处,年产沼气约 12 亿立方米^[1]。沼气已成为我国农村能源的重要组成部分之一,解决了农村的部分能源问题,促进了农村经济的快速发展。农业部非常重视农村沼气建设,《2003~2010

年全国农村沼气建设规划》中提出到 2010 年全国农村的沼气池总量要达到 5000 万户以上, 约 1/5 的农户用上沼气, 通过发展以沼气为纽带的生态农业来推动我国农村全面建设小康社会的进程^[2], 现在这个目标已基本完成。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)》关于农业的规划中再次将农林生物质综合利用作为优先主题, 重点研究生物质的转化技术, 沼气等生产关键技术, 并提出了要开发具有自主知识产权的沼气电站设备的目标。同时, 又将新一代工业生物技术作为前沿技术并重点研究, 这一切都为沼气事业的发展奠定了坚实的基础。

在实际的应用过程中, 也出现了不少的问题。在我国北方严寒地区, 冬季气温低, 沼气生产受气温影响非常明显, 产气率较低, 这也制约了沼气的推广。试验表明当沼气池温度在 15℃ 以上时, 沼气池的产气率能够达到 $0.1\sim 0.2\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 在 10℃ 以下时, 沼气发酵受到严重抑制, 产气率仅为 $0.01\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右, 而且沼气池还有可能被冻裂^[3]。沼气池在 52℃ 时发酵的产气率可达池温 35℃ 的 2.5 倍, 所以可采用余热或者废热来提高沼气池的温度, 以达到提高产气率的问题, 但是要维持沼气池的高温运行消耗大量的能量, 就净产量上来说不合算。在我国太阳能资源丰富, 年日照时数在 2200h 以上, 有 76% 的地区年辐射量超过 $4200\text{MJ}/\text{m}^2$, 即使在东北地区太阳能也十分丰富, 这使利用太阳能加热沼气池制取沼气变得可行^[4]。因此研究太阳能加热制沼气对北方的沼气池冬季产气具有重要意义。

1.2 沼气的发展与利用现状

1.2.1 国外发展与利用现状

国外的厌氧技术研究已有很长的历史, 世界上很多国家都建有沼气池, 发展到现在单个沼气池的容积可达数千立方米^[5]。而且很多与沼气相关的产业发展也很迅速, 已经实现了沼气的产业化和商品化, 具备了工业化生产规模。据世界银行统计数据显示: 截止到 2007 年底, 欧洲的沼气产量已达到 590 万吨油当量(相当于 70 亿立方米天然气)。其中德国为 191 万吨油当量/年, 英国为 170 万吨油当量/年。德国、瑞典、英国、美国等欧美发达国家在沼气工程发展现状也代表了国际沼气工程产业的规模水平。

在欧洲国家中, 德国出台了很多优惠鼓励政策, 大力发展中小型农场沼气工程。德国相继在 2000 年和 2004 年出台和修订了《可再生能源优先法》, 据统计, 德国在 2000

年的沼气发电工程数量为 1050 家，到 2003 年底，迅速发展到了 3000 家，到 2006 年，基本上每个月新建 50 座沼气工程，2006 年底，沼气工程的数量达到了 3500 座。据德国沼气协会估计，到 2020 年，德国沼气发电工程总装机量能够达到 9500MW^[6]。目前，德国在可再生能源领域已经处于世界领先的地位，就业人数超过了 30 万，2009 年，生物沼气等占德国所有可再生能源的 73%。2010 年，德国进一步加快了迈向可再生能源道路的步伐，“国家可再生能源行动计划”设定到 2020 年底可再生能源消费占德国能源消费总量 18% 的约束性指标，其中沼气消费占很大比例。同时，该行动计划还详细列出了现有和未来促进沼气生产利用的措施、手段与政策细节，并规定了具体发展目标。

为达到欧盟可再生能源标准，波兰计划于 2020 年前建造 2000 个新的沼气发电厂，总装机容量 2000—3000 兆瓦。据统计，波兰目前可生产 50-60 亿立方米沼气，其中 17 亿立方米来自农业与食品工业的副产品。同时波兰鼓励农民发展沼气项目，只要到农业部门办理相关手续就能从事沼气生产，调动了农民的积极性。

塞尔维亚于 2009 年通过了《鼓励利用可再生能源发电措施》，将可再生能源的开发利用作为能源发展的优先领域。根据该《措施》规定，生物质能发电价格为 11.4-13.6 欧分，价格较高，另外，生物质能发电的潜能也是可再生能源中最高的，占 63%。

美国在沼气方面主要集中在基础研究上，如产甲烷菌的基因排序、厌氧消化的生化过程、厌氧消化微生物菌群结构以及沼渣沼液中的特殊生物酶，应用技术研究相对较少^[7]。1994 年，美国环保局确立埋地甲烷利用计划（LMOP），该计划将埋地地点与气体和生物燃料应用结合在一起。美国拥有 400 多埋地气体能源利用项目已在实施之中。2009 年在旧金山湾区，工作人员对从 2000 多家餐馆和食品店收集的餐余垃圾进行发酵处理，然后利用其产生的沼气发电。每周处理餐余垃圾的能力为 100 吨，这些垃圾产生的沼气为该地区输送电能，截止目前，该地区餐余垃圾的日处理能力已达 100 多吨，所发电力能够满足周围 1300 户居民的生活需求。

20 世纪 50 年代末，尼泊尔首次引入沼气，1992~1999 年期间，尼泊尔总共装置 37000 座小型沼气池，供应 20 万人使用，预期未来几年将再装置 8 万座小型沼气池^[8]。印度从 20 世纪 70 年代起，就制定了有关沼气的发展计划，到 20 世纪末，沼气池数日已增加到 1200 万个，近几年，沼气技术的目标已从“能源回收”转移到“环境保护”。泰国也通过了“泰国坚强计划”，将大力发展替代能源产业，投资发展社区沼气项目。现阶段正在遴选适合的社区，预计每个沼气池投资 3-10 万铢，每处理 40 公斤垃圾，可产

生 8 公斤沼气，可以供给范围内居民 1 个月的生产、生活用气。

国外的厌氧处理技术大都采用中温发酵来完成，中温发酵后的粪便通过水的稀释作用后再进行曝气沉淀处理。工业上的厌氧发酵技术一般可以分成经典式和上流式发酵技术两种，经典发酵技术的发展主要表现在池型变化和搅拌方式变化上。池型正在由圆柱型向“水滴”型发展。目前农业上的高效厌氧技术主要从工艺上进行改进，如采用序批式反应器和两相厌氧发酵工艺^[9]。总体上，国外厌氧技术的研究主要体现在以下 3 个方面：

- (1) 菌体对物料的适应能力及竞争机制的探讨^[10-12];
- (2) 产甲烷动态过程生化监测方法的研究^[13, 14];
- (3) 探讨水解步骤降解高分子物质降解机制及生物调控机理^[15]。

1.2.2 国内发展与利用现状

我国的沼气事业于 1930 年前后开始得到发展，由于当时大多数城镇没有电力供应，制取沼气的主要目的是用于照明。1929 年夏季汕头开设了我国的第一个沼气商号——中国天然气瓦斯灯行，后来在十几个省都成立了分行，所用池型也与我国目前使用的水压式沼气池基本相似，为混凝土结构，到现在有的沼气池仍然能够使用。

1958 年我国的沼气事业得到了快速的发展，很多省市都修建了沼气池用来解决农村的炊事用能。中国科学院微生物研究所张树政教授等在微生物发酵方面进行了一系列的研究工作^[16, 17]，但是由于当时严格厌氧微生物研究技术上的困难未能突破，理论研究也没有深入下去，当时修建的沼气池缺乏正确的管理，留下来能够使用的沼气池很少。

20 世纪 70 年代初，农村生活燃料的严重缺乏，所以在四川、江苏和河南等省又掀起了发展沼气事业的热潮。农村户用沼气池的兴建也很快遍及到全国范围，在短短的几年时间里，家用沼气池的总数达到了 700 多万个。但是由于急于求成，土法上马，加上水泥等建池材料不足，建成的沼气池的平均使用年限较短，一般只有 3~5 年。后来大量的沼气池报废一度引起人们对沼气技术的怀疑。

1979 年 5 月召开了全国范围内的沼气工作会议，会议认真总结了过去发展沼气工作中的经验教训，又在 1980 年成立了中国沼气协会。在中国沼气协会的帮助引导下，沼气建设事业逐步走上靠科学，保质量，重效益，建管并重，稳步发展的道路。沼气建设事业逐步沿着以能源、环境保护和生态农业为目标的发展方向快速发展。

1980 年以后，在人民政府的大力支持下，理论研究也得到了快速的发展，很多学

者对沼气发酵的科学原理和应用技术进行了大量的研究工作,取得了很多出色的研究成果。育年比较详细的介绍了沼气的性质,从多角度介绍了沼气的用途^[18]。谌斌等研究了利用酒精废水发酵生产白地霉的方法,提高了质量,增加了产量^[19]。通过国际间的学术交流和科研工作,国内相关专家学者掌握了沼气发酵的微生物学原理,在我国先后分离出了几十种产甲烷菌,并对其生活条件进行了研究。在沼气发酵工艺研究方面,我国基本上达到了世界先进水平。截至2008年底,全国户用沼气池达到了2800多万个,大中型沼气设施达到了8000多处,沼气年利用量达到了约120亿立方米^[20]。

如今经过长期的实践,我国已发展出以下几种沼气综合利用的模式。

(1)“单一”模式。该模式主要用于解决用户的生活用能,采用单一的沼气池,投资少,实际使用中,操作不便,产气量受添加料影响,产气量不均。

(2)“三结合”模式。以沼气池为核心,将畜禽舍、沼气池和种植业结合起来,能够实现种、养、池有机结合,形成良性循环的生态体系。

(3)“猪-沼-果”模式。以果园为基础,在果园中建造一个沼气池,沼气池上建猪舍、厕所,能够满足果园所需肥料和生活、生产用能。

(4)“四位一体”模式。以土地资源为基础,太阳能为动力,沼气为纽带,将太阳能温室或大棚、畜禽养殖、沼气建设和蔬菜种植有机结合起来,相互依存,实现产气和积肥同步,种植养殖并举的良性循环。

(5)“生活污水净化沼气工程”模式。在城市排水管网没有覆盖的地方,建造生活污水净化沼气池,处理城镇生活污水,净化功能强,运行稳定,处理效果好。

(6)“大中型畜牧场沼气工程”模式。沼气池一般建立在地上,配有较完善的工艺设施,能够对各种原料进行预处理,发酵工艺选择和残留物的后处理及沼气的净化、计量、储存和应用。

传统沼气利用粪便为原料,生产中由于原料不足、气量不够、经济效益低未能得到继续发展。利用秸秆发酵产生沼气由于有降解率高、出气快、周期短、效益高的特点,且沼渣能够改变我国土地因长期施化肥而产生的土壤板结、有机物含量下降等问题,近来得到了推广应用。

山东省德州市德城区的秸秆能源化利用示范工程,采用太阳能温室加热保温的半地下结构和北京化工大学研制的“自载体生物膜法”发酵技术,可年产沼渣、沼液700多吨,日供气400立方米,通气户数375户^[21]。

北京化工大学科研团队攻关的秸秆生物气化关键技术取得突破性进展,为实现秸秆规模化生产沼气奠定了基础。他们发明的常温、固态化学预处理技术在厌氧发酵前对秸秆进行处理,预先将秸秆转化成易于消化的“食料”,能够使秸秆的产气量提高 50% 至 120%,解决了秸秆木质纤维素含量高、不易消化、产气量低、经济效益差等问题。此外,他们还研制出一种新型反应器,采用组合式强化搅拌系统,实现了机械化进出料和自动化高效搅拌,同时,利用带太阳能温室的半地下式反应器结构,提高了沼气发酵的温度^[22]。山东泰安、德州等地已利用该技术建成了多个完全以秸秆为原料的厌氧发酵生产沼气的集中供气示范项目,下一步还将再建 16 个沼气工程。

在我国,每 2.5 公斤秸秆能产生 1m³ 天然气,秸秆发酵工艺的成熟使秸秆成为可替代能源。河北沧州市政府支持的秸秆发酵项目,在 37℃、浓度 10%至 20%的情况下,利用该工艺能使 2.5 公斤秸秆出 1.375m³ 沼气,提纯后可产生 1m³ 天然气,大大降低了天然气的成本。按我国每年可产生能利用的秸秆总量 6 亿吨计算,利用该工艺,秸秆 1 年的产气量相当于西气东输工程 200 年的供气量。目前,这一项目现已实现商业化运营,2005 年建成的日产沼气近 400m³ 的沼气工程,供一家食品厂使用,效果良好。

山西省太原市特石环保材料有限公司研发的利用农业秸秆资源工业化生产高热值沼气的技术通过专家评审,装置已投入运营,所产沼气热值高(甲烷含量 70%~80%),秸秆的生物能源转化率高达 80%,实现了农村清洁能源的集约化生产,减少二氧化碳和烟尘排放,为改变农村能源结构提供了技术保证。

2007 年 7 月底,东北三省第一家垃圾发电项目——沈阳大辛生活垃圾沼气发电厂建成并网发电。投资 1.2 亿元人民币的沈阳大辛垃圾填埋沼气发电项目全部由美国新新集团投资兴建、运营,经营期限为 20 年。此项目计划分三期进行投资,一期建设 2 台发电机组,发电容量为 2 兆瓦时。项目全部建成后,可为当地 3.7 万户城市居民提供生活用电,投资回报可观。

2008 年 4 月 29 日,由沈阳市老虎冲与意大利阿兹亚公司合作开发的东北地区首个垃圾填埋沼气发电站——沈阳市老虎冲垃圾填埋沼气处理及发电项目一期工程并网发电。该项目利用老虎冲垃圾填埋场每天接收的沈河、和平、浑南等城区的 1700 吨生活垃圾填埋后产生的沼气,进行发电。项目分两期进行,当天并网发电的为一期工程。二期计划 2010 年完成。其中,一期工程能满足 2.5 万城市居民 1 年用电,年节约标煤 1.5 万吨、减少温室气体排放量相当于 12 万吨二氧化碳。项目全部完成后,可为 5 万居民

一年用电。该项目可彻底解决老虎冲垃圾场周边臭味扰民问题，消除了沼气外泄可能引发的火灾和爆炸隐患，缓解了城市电力短缺问题，减少了温室气体排放。

天冠集团燃料乙醇公司于2008年12月利用生产乙醇过程中产生的沼气发电，减少污水排放，节约能源，收到明显成效。为提高沼气利用率和实现资源循环利用，天冠集团将剩余沼气脱硫、脱水、去杂后经增压装置进入沼气发电机组进行发电，沼气发电机组排放的尾气（温度为500~600℃）还可用来干燥饲料、污泥肥料以及采暖等。据测算，每年可发电1425.6万千瓦时，节约电费支出855万元，通过综合利用热能每年可节约燃料费160万元。

安徽省亳州市蒙城县把农村沼气建设列为为农民办实事的民生工程和保护环境的重点工程，加大投资建设力度。截至2010年底，全县累计建成户用沼气池8535户，建设乡村沼气服务网点25处，累计完成投资3000万元。2011年，蒙城县计划建设1000口农村户用沼气池，目前正在抓紧实施工程项目。

随着新农村建设的不断深入，沼气建设使用发生了多元趋势。陕西省在巩固户用沼气的同时，组织专家积极研究中小型畜禽场沼气工程，积极创新沼气建设和使用新模式。2010年，陕西省新建户用沼气19.6万口，现全省户用沼气建设总量已达到131.1万口，占农户总数的18.7%，年产沼气5.05亿立方米，节约煤炭111.1万吨，可减排二氧化碳209.8万吨，减排二氧化硫1.8万吨，年增收节支13.1亿元以上。

1.3 沼气池联合外热源增温系统研究现状

1.3.1 现有的增温技术介绍

沼气增温技术是对现有的沼气设备及其相关环境进行热量补充的技术。经过长时间的研究应用，当前主要运用的增温手段主要有以下几种^[23]：

(1) 塑料暖棚增温技术。将沼气池建在蔬菜大棚中，利用蔬菜大棚保温的性能为沼气系统增温。该技术因地理位置不同效果也不同，在晋南地区，暖棚内温度最高可达20℃以上，沼气池内的温度也可以达到12℃以上，能够满足冬季沼气的正常发酵，但是在北纬40度以北的地区，效果不是很好。

(2) 燃池增温技术。在原有的沼气池外围增建一个环形或者半环形的燃烧池，在燃池内部燃烧掺有一定配比的水的锯末或农作物秸秆，燃烧时间长，是一种增温效果较

为明显的技术，但是要增大了建设投资，消耗大量的原料，污染也较为严重。

(3) 隔热材料保温法。在沼气池底部，四周加保温、隔热材料，减少沼气池的热量损失。不仅能够防止在大地封冻、解冻过程中因地温下降造成的池温降低，还能隔绝沼气池和土壤的热传导，能有效保持池内温度。但是该技术只能起到缓解降温的过程，不能保证冬季沼气工程的运行。

(4) 沼气池表面覆盖柴草保温法。将秸秆、草类、池面堆肥覆盖到沼气池上，能起到一定的保温作用，但是效果有限，只适用于户用沼气池。

(5) 挖环形沟保温法。在沼气池周围开挖环形沟，在沟内对沤粪草，利用粪草发酵的热量对沼气池保温和升温，该方法利用了堆沤发酵的热量，但是对环境也有一定的污染。

(6) 秸秆废弃物燃烧法。在沼气池周围堆积秸秆废弃物，利用燃烧放出热量对沼气池升温。这是一种较早的增温方法，热利用率不高，对环境造成了污染。

(7) 塑料薄膜覆盖法。用塑料薄膜覆盖在沼气池上，然后在薄膜周围堆放柴草，效果不明显。

(8) 热水锅炉加热法。利用燃烧煤炭加热水产生的水蒸气通入沼气池内，能够达到沼气池升温的目的，但是需要大量的煤炭，从能源利用角度上不经济。

1.3.2 现有增温和控温技术的研究现状

现在所使用的沼气池增温方法仍以燃烧秸秆为主的生物质能为主，再加上一些保温材料已达到增温目的；但这些方法热能转化率低，而且污染大，目前已不适应沼气工程的发展要求。

随着研究的深入和新材料的出现，最近出现了很多新的沼气池保温增温方法。徐祯祥等人研究太阳能沼气池，利用咸水池的蓄热功能为沼气池提供热量，方法新颖，但是投入较大^[24]。长沙华美化工有限公司推出的太阳能沼气罐技术，利用氧化镁，氯化镁，中碱玻璃布做成无机玻璃罐体的技术^[25]。其核心是利用新材料对沼气池进行保温，但其成本由使用的新材料决定。秦皇岛市喷灌机厂和昌黎干红葡萄酒业推出使用太阳能加热制沼气装置，同时利用风能提供热水循环动力。使用风能代替电能驱动循环加热热水，减少了运行费用，但整个系统中风能和太阳能利用装置投资较大。张全国等研制的户用钢制沼气发酵装置，利用燃煤锅炉作为辅助加热装置，加热沼气池^[26]，虽然该装置效果

较明显,但是还要使用大量的化石能源,造成了浪费,这违背了发展沼气的初衷。韩广伟将基于 AT89C51 单片机的温度控制系统应用到沼气生产过程中,通过单片机运算控制节流阀通断,从而控制反应罐长时间处于最佳温度^[27]。使用过程中要频繁的控制节流阀的通断,可靠性低。李传峰研制了一种太阳能恒温沼气反应装置,由太阳能加热恒温系统控制水泵的启停,使得料液始终维持在恒定温度^[28]。该装置同样要借助水泵的启停,调节有滞后。党金霞和田德宁等研究了辅助燃烧式沼气池,利用燃烧池中生物质有序燃烧为沼气池持续输送热能,提升池内温度^[29,30]。这种提升沼气池温度的方法燃烧浪费了大量的生物质,同时造成了环境的污染。庞凤仙等研究了利用秸秆反应堆覆盖沼气池来保温的方法,并通过实验验证了其可行性^[31],但实际操作中要考虑反应堆的种类,反应条件等,过程复杂。

当前研究主要集中在沼气池发酵温度的控制上,研究如何通过控制沼气池发酵温度来提高沼气发酵速率。刘荣厚等运用自行设计的小型沼气发酵装置,以废弃的甘蓝叶作为发酵原料,研究了温度对蔬菜废弃物产气特性的影响规律^[32]。孙静等对太阳能加热制取沼气进行了试验研究,研究了换热器的加热量、进出口温差以及沼气池周围土壤温度场的变化特性^[33]。赵金辉等进行了太阳能、沼气锅炉与沼气池集成组装的系统设计,通过确定太阳能集热器面积与沼气锅炉联合运行的匹配方式,保持池体温度处于较好的发酵温度^[34]。郑爱平等对太阳能热水加热沼气池技术进行了经济性分析,结果表明利用该技术降低沼气池温度波动范围,提高沼气池冬季产气率经济效益显著^[35]。在提高沼气池温度的同时,也要注意沼气池内部温度分布变化情况,研究表明沼气池中发酵所需的微生物对温度变化十分敏感, K.J.Chae 通过实验研究了不同发酵温度不同填料负荷下的沼气产气量变化,实验表明温度下降或上升 3~5℃ 都会导致产气速率的下降,产气速率在一段时间内能够恢复^[36]。赵亚杰等以北方寒区 8m³ 户用沼气池为对象,测算了中温发酵时所需要的热负荷,并探索了利用生物质热水发生器的增温技术^[37]。刘建禹等研究了利用沼气生产系统自身所产沼气为燃料,通过锅炉为沼气池增温的方法,并测得了沼气池内换热器壳侧水的表面传热系数,以及发酵料液的表面传热系数等变化规律^[38]。张书荣等采用不同方案对麦秆为原料的沼气发酵进行了实验,结果表明对于养殖区和养殖业欠发达的地区要采用不同的处理方法^[39]。

1.4 本课题的选题意义及主要研究内容

1.4.1 课题选题意义

随着能源危机和环境危机的加重,世界各国都在积极的开发新能源,在我国,农村人口人占大多数,在农村中发展沼气项目具有得天独厚的优势。沼气作为可再生能源,不仅能够解决农村生活用能的问题,还能够保护环境,提高农产品质量,增加农民经济效益,大力发展沼气是实现经济可持续发展的途径之一。研究表明,沼气发酵受温度条件限制较为明显,特别是在我国北方冬季的农村,很多沼气池因为池温较低,出现不产气甚至将沼气池冻裂的情况,所以采取相应的措施控制沼气发酵的温度,是沼气利用中至关重要的一点。

本课题研究的意义就在于利用太阳能热来提高沼气发酵的温度,同时利用热管理器来稳定太阳能加热过程中的热负荷,稳定沼气发酵过程温度。太阳能集热系统生产的加热水通过沼气池内部的换热器来加热料液,使料液升温并保持在高效发酵阶段,进行发酵产生沼气。从而实现沼气在严寒地区的推广应用,促进严寒地区农村生态农业的可持续发展,加快我国全面实现小康的步伐。

1.4.2 课题主要研究内容

随着科技的发展,利用太阳能对沼气系统增温的研究取得了很大的进展,有效地提高了冬季沼气池的温度,给沼气系统冬季的正常运行提供了保障。本文是在太阳能沼气系统增温研究的基础上,将热管理器技术运用到沼气系统中,以解决冬季沼气发酵料液温度变化问题。本课题研究内容主要包括增温系统的设计和增温系统中沼气池换热盘管的软件模拟。其中增温系统的设计计算是基础,软件模拟温度场的分布,为实际应用提供指导。

(1) 提出一种新型的基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统,并对主要部件集热器、换热盘管等进行设计计算。

(2) 建立沼气池内换热盘管加热沼液的数学模型,并对边界进行处理,利用 Fluent 软件对换热盘管的换热进行模拟。

(3) 利用 Fluent 软件模拟沼气池内加热器不同安装位置对沼气池温度的影响情况,研究沼气池温度场的分布情况,为螺旋盘管加热器的布置提供依据。

(4) 分析基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统的环境和经济效益，证明系统可行性。

2 太阳能、沼气和热管理器的基本理论基础

2.1 太阳能基本理论基础

2.1.1 太阳辐射

2.1.1.1 太阳的位置

1) 太阳在天球上的位置

太阳在天球上所处的位置，通常用地平坐标系确定，涉及到以下几个概念

(1) 太阳高度角 h 从地面观察点向太阳中心做一条射线，该射线在地面上有一条投影，这两条线的夹角称为太阳高度角，用 h 表示，变化范围为 $0\sim 90^\circ$ 。

(2) 太阳方位角 γ 从地面观察点向太阳中心做射线在面上的投影线与从观察点在地面上从正南方向的射线之间的夹角称为太阳的方位角，用 γ 表示。正南方为零度角，向西取正值，向东取负值。

(3) 太阳天顶角 θ_z 通常利用太阳高度角和方位角就能确定太阳在天球上的位置，也可以用天顶角来代替太阳高度角。所谓太阳天顶角就是指从地面观察点向天顶做地平面的法线与太阳射线之间的夹角，用 θ_z 表示，从定义中我们可以知道它与高度角之间的关系为：

$$h + \theta_z = 90^\circ \quad (2.1)$$

2) 太阳位置的确定

太阳在天空中的位置每季、每天和每瞬间都在变化，要计算出地球上任何地区、任何时刻太阳所处的位置，还要用到以下几个角度。

(1) 赤纬角 太阳中心与地球中心连线与地球赤道平面的交角，用 δ 表示。赤纬角随着地球在运行轨道上的不同点具有不同的数值，可由 Cooper 方程近似计算

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.2)$$

式中， n 为从每年 1 月 1 日起算的天数。

(2) 时角 将真太阳时用角度表示时，称为当地太阳时角，用 ω 表示。正午时时角

为 0° ，在其他时刻的时角等于离正午的小时数乘以 15° ，规定上午时角为负值，下午为正值。

这样就能计算地球上某点在某日某时刻的太阳高度角

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \omega \tag{2.3}$$

式中 φ ——当地的纬度， $(^\circ)$ ；

δ ——某日的赤纬角， $(^\circ)$ ；

ω ——某时刻的太阳时角， $(^\circ)$ 。

2.1.1.2 日照时间

规定日出时太阳高度角为 0° ，已知某一纬度 φ ，某一时刻的赤纬角，可以求出太阳时角 ω

$$\cos \omega_0 = -\tan \varphi \tan \delta \tag{2.4}$$

式中 ω_0 ——日出日落时的太阳时角， $(^\circ)$ ；

其它各符号意义同前。

所以当地的日照时间为

$$N = \frac{2|\omega_0|}{15} \tag{2.5}$$

式中 N ——当天的日照时间，h；

其它符号意义同前。

2.1.2 太阳辐射强度

本文研究系统能量来源于太阳辐射热量，太阳辐射所产生的能量用太阳辐射强度来衡量。所谓太阳辐射强度是指在垂直于太阳光线的平面上，单位时间单位面积上所获得的太阳辐射能。本文研究的是太阳总辐射，包括到达地球表面上的太阳直接辐射和散射辐射。

在设计太阳能利用装置时，完全由理论推导计算，十分复杂和繁琐，而且做到准确计算也很困难。所以在实际操作中，可以利用经验公式和表格求得太阳辐射强度。

(1) 太阳直射辐射

直射辐射采用布格尔公式^[39]计算

$$E_n = E_0 \exp\left(\frac{-kl}{\sin h}\right) = E_0 p^{\frac{1}{\sin h}} \quad (2.6)$$

式中 E_n ——与太阳光线垂直平面上的太阳直射辐射强度, W/m^2 ;

E_0 ——大气层外表面接收的太阳辐射强度, $E_0=1367\text{W}/\text{m}^2$;

k ——消光系数, 反映大气吸收太阳辐射的能力;

l ——大气层厚度, m ;

P ——大气透射率, $p = \exp(-kl)$;

h ——太阳高度角, ($^\circ$)。

水平面上的太阳直接辐射用下式计算

$$E_{hs} = E_n \cos \theta = E_n \sin h \quad (2.7)$$

式中 E_{hs} ——水平面上太阳直射辐射度, W/m^2 ;

θ ——水平面上的太阳入射角, 即天顶角, ($^\circ$)。

与水平面成倾斜角 β 的平面, 接收的太阳直射辐射强度

$$E_{\beta z} = E_n \cos \theta_\beta \quad (2.8)$$

式中 $E_{\beta z}$ ——倾斜面上的太阳直射辐射强度, W/m^2 ;

θ_β ——倾斜面上的太阳入射角, $\theta_\beta = 90^\circ - (\beta + h)$, ($^\circ$)。

(2) 散射辐射

散射辐射来自半球天空的四面八方, 也是太阳辐射的一部分, 只不过由地球大气及云层的反射和散射作用改变了方向, 也称为漫射辐射。对于晴天水平面上的天空散射辐射强度可用 Berlage 公式^[40]计算

$$E_{HS} = \frac{1}{2} E_0 \sin h \frac{1 - p^{\frac{1}{\sin h}}}{1 - 1.4 \ln p} \quad (2.9)$$

式中 E_{HS} ——地球表面水平面上的散射辐射强度, W/m^2 ;

其他符号意义同前。

由于太阳能集热器与地面呈倾斜角度放置, 倾斜角为 β , 所以集热器上的散射辐射强度为

$$E_{ps} = E_{HS} \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.10)$$

式中 E_{ps} ——与水平面呈 β 的倾斜面上的散射辐射强度, W/m^2 ;

β ——倾斜角, ($^\circ$)。

(3) 地面上的反射辐射

地球表面倾斜的接受面除了接收太阳直接辐射和散射辐射之外,还能够接收到来自地面反射的辐射,特别是在北方冬季下雪之后,更是明显。到达倾斜面的反射辐射强度可用式(2.11)计算^[41]

$$E_{\beta F} = (E_{HZ} + E_{HS}) \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.11)$$

式中 $E_{\beta F}$ ——倾斜面上的地面反射辐射照度, W/m^2 ;

E_{HZ} ——水平面上直接辐照度, W/m^2 ;

E_{HS} ——水平面上散射辐照度, W/m^2 ;

各种地面和水面的反射比,如表 2-1^[20]。

表 2-1 各种地面和水面的反射比

Table 2-1 Specification of the reflectance of different grounds and water surfaces

地面状态	反射比/ %	地面状态	反射比/ %	地面状态	反射比/ %
干燥黑土	14	干草地	15~25	湿砂地	9
湿黑土	8	湿草地	14~26	新雪	81
干灰色地面	25~30	森林	4~10	残雪	46~70
湿灰色地面	10~12	干砂地	18	水面	与入射角相关

(4) 太阳总辐射的计算

地球表面的水平面上的太阳总辐射主要包括太阳直接辐射和散射辐射。水平面上的太阳总辐照度为

$$E_H = E_{HZ} + E_{HS} \quad (2.12)$$

地球表面的倾平面上的太阳总辐射,除了太阳的直接辐射和散射辐射之外,还要包括地面对太阳的反射辐射,所以,倾斜角 β 的平面上的太阳总辐照度为:

$$E_{\beta} = E_{\beta Z} + E_{\beta S} + E_{\beta F} \quad (2.13)$$

式中各符号意义同前。

青岛市太阳辐射总量如表 2-2^[42]所示。

表 2-2 青岛市月、年太阳辐射总量 (千卡/平方厘米)

Table 2-2 Specification of the TSI in Qingdao

区点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年	
高 值 区	莱西	6.6	7.5	11.3	12.9	15.5	14.5	12.4	12.2	12.3	9.3	6.8	5.9	127.2
	马哥庄	6.8	8.0	11.4	12.8	15.3	14.6	11.7	12.6	11.4	9.5	6.7	6.1	126.6
	平度	6.4	7.9	11.2	12.7	15.3	15.4	12.0	12.3	11.1	9.2	6.5	5.8	125.8
中 值 区	小场	6.6	7.7	10.9	12.1	15.3	13.7	11.3	12.3	10.9	9.3	6.8	6.1	122.0
	即墨	6.3	7.5	11.1	12.2	14.6	14.2	11.6	12.0	10.7	9.0	6.3	5.6	121.1
	大桥	6.3	7.4	11.0	12.0	14.6	13.3	11.4	12.1	11.1	9.1	6.6	5.8	120.7
	胶县	6.3	7.9	10.8	12.1	14.4	13.7	11.6	11.8	10.6	9.0	6.5	5.8	120.5
低 值 区	崂山	6.3	7.4	10.9	12.2	14.4	13.7	10.5	11.8	10.1	9.2	6.2	5.6	113.3
	胶南	6.3	7.5	10.9	11.8	14.1	12.9	10.7	12.0	10.6	9.1	6.4	5.8	113.1
	青岛	6.3	7.5	10.6	12.0	13.9	13.0	11.0	11.8	10.7	9.3	6.1	5.9	118.1
	黄岛	6.4	7.7	10.8	11.7	13.6	12.9	10.7	11.8	10.4	9.2	6.4	5.9	117.4
平均	6.4	7.6	11.0	12.0	14.5	13.8	11.4	12.1	10.9	9.2	6.5	5.8	121.4	

2.1.3 太阳能集热器

太阳能集热器是收集太阳辐射热量并将热量传递给流经自身的传热工质(水)的装置。集热器性能的好坏直接影响着整个系统的性能。太阳能集热器的主要分类方法有以下几种^[20]:

- (1) 按传热工质不同可分为液体集热器和空气集热器。
- (2) 按收集太阳辐射方法不同可分为聚光型太阳集热器和非聚光型太阳集热器。
- (3) 按集热器是否跟踪太阳可分为跟踪集热器和非跟踪集热器。
- (4) 按集热器的结构不同可分为平板集热器、真空管集热器和热管真空管集热器。
- (5) 按集热器的工作温度不同可分为 100℃ 以下的低温集热器、100~200℃ 的中温集热器和 200℃ 以上的高温集热器。

目前国内的太阳能集热器主要有平板型集热器,全玻璃真空管集热器,真空管集热器等。全玻璃真空管集热器的全年热效率高,其成本、耐冰冻、夜间保温性能介于集热器和平板集热器之间,承压能力较低,耐热冲击能力较差,空晒系统注入冷水后有可能炸裂真空管,系统可靠性较差(一根管子破裂,整个系统需停用检修),玻璃管内易结垢,难清理^[43,44]。

热管式真空管集热器的全年热效率也较高,其承压能力大,一般可承压 980kPa,耐热冲击性能好,因真空管内不走水,即使空晒时上水也不会使玻璃管炸裂,但是其价

格较高，对于集热器面积需求过大的装置来讲，投资过大^[45-47]。

平板型集热器在 20 世纪 70 年代就已生产，具有集热快、价格低、承压高、耐热冲击性能好等特点，在气温高、日照好的地区热效率较高，另外这种集热器结构简单，故障少，维护方便^[48-50]。因此，本文研究系统采用平板型集热器。

2.2 沼气生产相关理论基础

2.2.1 沼气生产的原理

沼气是有机物在厌氧条件下经过微生物发酵作用而生成可燃性混合气体，主要成分是甲烷和二氧化碳，其中甲烷约占 60%。沼气的产生是一个微生物学过程，沼气发酵又称为厌氧消化，是指各种有机物在厌氧条件下被各类沼气发酵微生物分解转化，最终生成沼气的过程。根据沼气发酵过程中细菌作用的不同，可以将沼气细菌分为两类，一种是分解菌，它将各种复杂有机物分解成简单的有机物和二氧化碳等，另一种是甲烷细菌，能将简单的有机物和二氧化碳氧化或者还原成甲烷。这两种细菌在沼气发酵过程中缺一不可。

沼气产生过程可以分为两步：

- (1) 分解细菌将粪便、秸秆等复杂有机物分解成结构简单的化合物；
- (2) 产甲烷细菌将简单的化合物分解为甲烷。

沼气工程大致可分为 3 个阶段：液化阶段、产酸阶段和产甲烷阶段^[51, 52]。

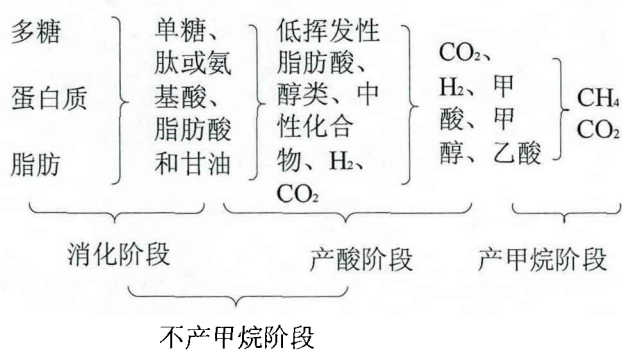


图 2-1 沼气发酵阶段示意图

Figure. 2-1 Schematic of the stages of biogas fermentation

第一阶段是液化阶段，各种固体有机物通常不能直接被微生物利用，在微生物分泌的胞外酶的作用下将固体有机物分解为分子量较小的可溶性有机物质；然后经过水解后多糖分解为可溶性单糖、蛋白质分解为氨基酸或者肽，脂肪分解为甘油和脂肪酸。这类

可溶性物质就能够进入微生物体内，被微生物利用。

第二阶段是酸化阶段，微生物体内的可溶性物质在体内各种胞内酶的作用下进一步分解，产生各种挥发性脂肪酸，主要成分是乙酸、氨和二氧化碳。

第三阶段是产甲烷阶段，微生物产甲烷菌将第二阶段产生的乙酸、甲酸、氨和二氧化碳等转化成甲烷。

在沼气发酵的三个阶段中，液化阶段进行的是水解反应，反应速度较慢，所以说沼气发酵速度主要是受液化阶段的制约，对于农作物秸秆这类原料，液化过程更为缓慢，这类原料在入池之前要经过预处理，提高液化速度。

2.2.2 沼气发酵条件

沼气发酵时必须注意对发酵过程中微生物生命活动条件的满足。从微生物学角度来看，沼气发酵就是培养厌氧消化细菌，使其有良好的生活条件。总的来说，人工制取沼气必须具备两个条件：首先要具备严格的厌氧环境，特别是在产甲烷菌的生长过程中更要严格的厌氧环境，因为氧气不仅不能起到催化作用，相反的起到毒害和抑制的作用，而且在有氧条件下，有机物的分解只能产生二氧化碳^[53]。其次要有充足的发酵原料和沼气接种物，还要有适宜的发醇温度、浓度和酸碱度等^[54, 55]。

影响沼气产生的因素很多，如厌氧环境、温度、浓度、接种物、pH 值、压力、酸碱度及搅拌等。

(1) 厌氧环境

沼气发酵微生物主要包括产酸菌和产甲烷菌两大类。产酸菌大多都是厌氧菌，产甲烷细菌是专性厌氧菌，氧不仅不起作用反而对其有毒害和抑制作用，所以必须创造严格厌氧条件。在沼气池投料之初，随物料带入池子的氧在好氧菌和兼性厌氧菌的活动下迅速消耗掉，从而创造了厌氧环境。沼气发酵启动和投入新料时会带入一部分氧气，但是由于沼气池内部有一部分好氧菌和兼性厌氧菌能够很快地消耗溶解氧，使池内保持厌氧环境。

(2) 发酵温度

沼气发酵的速度很大程度上取决于发酵温度，所以说温度是影响沼气发酵的一个关键因素。同一般的化学反应一样，反应的速度会随着温度的升高而加快，温度每升高 10℃ 化学反应速度可以增加 2~3 倍。沼气发酵的过程也是一种生化反应过程，所以在

一定温度范围内也基本符合这个规律^[20]。

根据发酵温度的高低，沼气发酵分常温、中温和高温发酵三种。在 50~60℃ 范围内，沼气发酵的产气量随着温度的升高而升高，实际应用过程中一般将温度控制在 52~55℃，1m³ 池容日产气 2m³ 以上；中温发酵最适宜的温度是 30~35℃，1m³ 池容日产气 0.4~0.9m³；常温发酵的温度是 10~30℃，1m³ 池容日产气为 0.1~0.25m³^[56, 57]。从表 2-3^[58]可以看出温度对产气量的影响。

在同一温度类型条件下，温度发生波动会给发酵带来一定的影响，在恒温发酵时，在一小时内的温度上下波动最好不要超过±(2~3)℃。研究表明，温度突然上升或下降 5℃，产气量显著下降，温变过大则停止产气^[59]。工作温度为 35℃ 的正常发酵的厌氧消化装置，如果温度突然下降到 20℃，则产气几乎停止。但是温度对厌氧消化系统的破坏不是不可逆的，即温度波动对发酵的影响是暂时的，只要温度恢复正常，发酵也就能

表 2-3 不同发酵温度的产气量
Table 2-3 the rate of producing biogas at different temperature

发酵温度/℃	35	25	20	15
产气量(括号内为)	775 (1)	700 (0.9)	620 (0.8)	525 (0.68)
相对产气量)	560 (1)	540 (0.96)	500 (0.89)	450 (0.8)
mL/(L·d)	510 (1)	480 (0.94)	455 (0.89)	395 (0.4)
	400 (1)	340 (0.85)	260 (0.65)	200 (0.5)
相对平均值	(1)	(0.89)	(0.8)	(0.63)

恢复正常，这种影响也与温度波动的时间长短有关系，温度波动时间越长，发酵恢复所需的时间也越长。关于高温和中温沼气发酵之间温度变化的关系，长期以来，人们认为高温发酵和中温发酵是不同温度类型的微生物进行的，但是实验研究测定，高温污泥在中温条件下能保持 60% 的活性，中温污泥在高温条件下能保持 43% 的活性^[20, 60]。

表 2-4 污泥在不同温度下的产甲烷活性
Table 2-4 the methanogenic activity of sludge at different temperature

测试温度/℃	V _{max} ·CH ₄ [mmol/(gVSS·d)]	
	高温污泥	中温污泥
35	3.72	6.98
55	6.14	2.89

我国北方寒冷地区冬季气温低，沼气池内温度低，正常产气受到影响，因此要采取一些保温和增温措施来维持适宜的发酵温度。另外，我国农村户用沼气池大多采用地下式，地温直接影响池温，在地面以下 2.0~2.5m 深处池温与地温基本相等^[61]。

(3) 接种物

沼气发酵的过程是由多种微生物共同完成的，因此要加入足够多的微生物作为接种物。在实际操作中要根据发酵原料来确定接种物的数量和种类。一般来说，原料是粪便等已经发酵过的，不需要接种；当原料是工农业废水时，需要添加足够数量的接种物。接种物的数量也要根据接种物的来源确定。若利用沼气发酵料液作为接种物，那么接种物的数量要占发酵料液总量的三分之一；如果利用沼气池底部的沉渣作为接种物，那么接种物的数量要占发酵料液的 10%以上，另外，在利用秸秆作为发酵原料时，要加大接种物的数量。

接种物对产气率的影响，如表 2-5 所示。

表 2-5 接种物数量对产气量的影响

Table 2-5 the rate of producing biogas influenced by the quantity of inoculability

原料	接种量 (%)	沼气量 (ml)	甲烷量 (%)
人粪 50g	10	1435	48.3
人粪 50g	20	4805	56.4
人粪 50g	50	10093	66.3
人粪 50g	150	16030	68.7

(4) 沼液 pH 值

沼气发酵是在中性条件下的厌氧发酵，发酵料液的 pH 下降或者上升都会影响沼气产生的速度。沼气发酵 pH 值最适宜为 6.8~7.5，一般来说，正常发酵的沼气池内部的 pH 值能通过自身调节达到发酵要求，但是如果原料配比不对或者管理不当，料液的 pH 值就会偏离发酵范围，当 pH 值低于 6 或者高于 8 时，沼气发酵就会受到抑制或者发酵停止。当料液 pH 值偏离正常发酵范围时，可以通过以下方法调节：对于偏酸性的，可通过少量出料同时投入等量的新料的方法稀释发酵料液中的挥发酸；对于偏碱性的，添加草木灰、稀释的氨水。用石灰水调节时，一定要严格控制用量^[62]。

(5) 搅拌

沼气池料液在重力影响下，会产生分层现象。上层是浮壳，中层清液，下层沉渣，这种情况不利于沼气微生物和发酵料液的均匀接触，影响发酵速率。在生产中一般要通过搅拌来改善这种情况^[63-65]。目前，搅拌方式主要有手工搅拌、机械搅拌、气搅拌和液搅拌四种。手工搅拌主要适合农村小型的沼气池，搅拌工具简单，搅拌间隔时间可根据分层情况而定。机械搅拌要在沼气池中安装搅拌器，投资大，而且这种方式适于单一原料和粉碎后的农作物秸秆原料。气搅拌和液搅拌都是利用沼气池内部自身物质（沼气和

沼液), 通过加压后通入沼气池, 使沼液发生激荡, 达到搅拌的目的。

2.2.3 原料配比方案

在自然界中, 沼气发酵的原料十分丰富和广泛, 几乎所有的有机物质都可以作为沼气发酵的原料。不同种类的发酵原料, 成分不同, 其产气潜力和消化速度也不同, 所以为提高沼气产气量, 获得更好的效益, 必须因地制宜的选择合适的原料及原料配比方案。

人、畜和家禽的粪便是我国农村沼气发酵原料的主要来源之一。这种原料颗粒比较细, 含有较多的低分子化合物, 其中氮素含量较高, 其原料的碳氢比一般都小于 25:1, 因此在使用过程中不需要预处理, 而且分解速度和产气速度也很快, 但是这种原料发酵周期较短, 单位发酵原料的总产气量较少。农作物秸秆也是我国农村主要沼气发酵原料的来源之一, 其含碳量较高, 原料的碳氢比一般都在 30:1 之上, 通常由木质素、纤维素、半纤维素、果胶和蜡质等化合物组成, 特点是分解速度较慢, 产气周期长, 单位原料总产气量较高, 但在使用前必须经过预处理。

要想达到沼气池产气快、产气多、周期长的目的, 就要合理的搭配沼气发酵的原料。沼气发酵原料的搭配中主要有以下三个原则:

(1) 适当多加产出沼气中含甲烷多的发酵原料。由于沼气的质量主要指沼气中甲烷的含量的高低, 所以在选料时, 要选择产出沼气含甲烷多的发酵原料。

(2) 合理搭配消化速度快和慢的原料。要想沼气池产气持久和均衡, 在进料时, 要将消化速度快和慢的原料合理搭配。在农村主要是控制农作物秸秆和人畜粪便的比例。

(3) 合理搭配氮素和碳素含量不同的原料。选料时要能保证沼气细菌的生活和繁殖所需要的营养物质。实践证明, 鲜粪和农作物秸秆的重量比为 2:1 时, 碳氮比为 30:1, 对沼气发酵较为合适。

为农村使用方便, 可按表 2-6 选择参数^[66]。

表 2-6 每立方米料液的参考配料比/市斤
Table 2-6 the reference ratio of feed liquid per cubic meter

配料组合	质量比	6%浓度		8%浓度		10%浓度	
		加料质量	加水量	加料质量	加水量	加料质量	加水量
鲜猪粪		666	1334	890	1110	1110	890
鲜牛粪		706	1294	941	1059	1176.4	823.6
鲜猪粪:青杂草	1:10	55:550	1395				
鲜猪粪:麦草	4.54:1	326:72	1602	434.8:95.6	1469.6	543.6:119.6	1336.8
鲜猪粪:稻草	3.64:1	289.2:79.4	1631.4	385.6:105.8	1508.6	482:132.4	1385.6
鲜牛粪:玉米杆	2.95:1	265.8:90	1644.2	354.6:120.2	1525.2	442:150.2	1407.8
鲜猪粪:麦草:人粪	1:1:1	99:99:99	1703	132:132:132	1604	164:164:164	1508
	2:0.75:1	178.4:66.9:89.2	1665.5	238:89.3:119	1553.7	296:116:148	1445
鲜猪粪:稻草:人粪	1:1:1	100:100:100	1700	132:132:132	1604	165:165:165	1505
	2.5:0.5:1	215:43:86	1656	290:58:116	1536	360:72:144	1424
鲜猪粪:玉米杆:人粪	1:0.75:1	107.6:80.7:107.6	1704.1	143.5:107.6:1435	1605.4	179.4:134.6:179.4	1506.6
	2:0.2:1	200:20:100	1680	268:26.8:134	1571.2	334:3.34:167	1465.6
鲜猪粪:麦草:牛粪	3:1:0.5	318:106:53	1523	423:14:170.5	1365.5	528:176:88	1208
	5:1:1	310:62:62	1566	420:84:84	1412	520:104:104	1272
鲜猪粪:稻草:牛粪	3.5:1:1	252:72:72	1604	339.5:97:97	1466.5	424:121:121	1334
鲜猪粪:玉米杆:牛粪	2.2:2:1	172:156:78	1594	230:208:104	1458	286:260:130	1324
鲜猪粪:人粪:牛粪	1:0.5:3.2	150:71.8:480	1295.2	200:100:640	1060	250:126:800	824
青杂草:稻草:猪粪	1:1:3.64	70.5:70.5:256	1603	92.6:92.6:341	1473.8	117.2:117.2:427	1338.6

2.3 热管理的基础理论

2.3.1 热管理的概念

热管理 (Thermal Management) 的概念最早出现于航空领域, 对于飞船、空间站等大型航天器, 由于其内部热量相当大, 且设备复杂, 各自对热控的要求也不尽相同, 这就要求必须从多个方面考虑, 对航天器的有关热环境以及子系统的热行为统一调节分配和管理, 协调各个子系统之间的关系以优化系统功能。热管理的主要内容包括对系统构件、仪器设备及系统内部环境热参数的控制和调节、热的收集和传输、热的排散以及热能的分配和综合利用等。

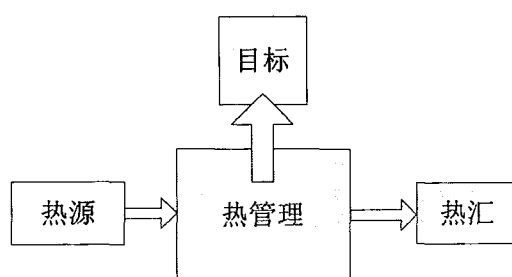


图 2-2 热管理概念示意图

Figure. 2-2 the conceptual diagram of thermal management

热管理概念的提出不仅是技术上的进步, 更是管理、设计思想上的突破。图 2-2 是热管理的概念示意图, 在热源和热汇之间通过热管理平台的作用, 实现热能管理的目标。热汇和热源的数量可以是一个或者多个, 同时, 热源可以是环境或者其他设备, 热汇也可以是环境或者其他热用户。

目前, 热管理的思想已经在电子设备、汽车、建筑系统等多个领域得到应用。在太阳能利用过程中由于太阳辐射强度是随着时间、天气等情况发生波动的, 所以存在输出热量与热用户负荷不能匹配的情况; 在许多进行热量交换的场合, 也存在热源输出热量和用户负荷需求不匹配的情况, 要求控制传热量的变化来适应要求。人们解决这种问题的方法一般是通过外围的设备, 如变频泵等来进行调控^[67], 但这样无疑增加了系统成本。

2.3.2 热管理器在加热系统中的应用

2.3.2.1 热管理器的工作原理

热管理器的运行原理如图 2-3 所示。热管理器由加热段、用热段和贮气室三个功能

单元组成。加热段为满液式蒸发器，用于吸收热源的热量。贮气室内储存不凝性气体，用于减小变工况过程中腔内工作压力的波动。用热段内布置冷凝管排，用于对工质蒸汽进行冷凝，实现向用热对象的供热。各个用热对象可以通过选择不同面积大小的管排，满足各自对热在品位和数量上的不同需求。工质液体从热源吸收热量后沸腾蒸发，蒸汽上升至冷凝管冷凝，并将热量传递给用热对象。工质冷凝液在重力作用下返回到加热段，完成循环。工质蒸汽的宏观运动将不凝性气体向上挤压。由于不凝性气体对凝结换热的强烈抑制作用，会使得用热段分成工质蒸汽覆盖区和不凝性气体阻塞区两段区域，并由分界面将两者分开。工质蒸汽覆盖区内的气体为纯蒸汽，凝结换热可有效进行，实现热量的对外输出，不凝性气体阻塞区内气体主要成分为不凝性气体，由于不凝性气体对凝结的抑制，对外输出热量可忽略不计。两个工作区域之间保持压力平衡关系，该压力称为热管理器的工作压力。

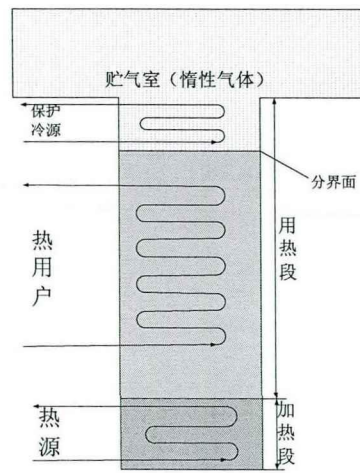


图 2-3 热管理器结构图
Figure. 2-3 Schematic of the thermal manager

在用热段内，同时存在工质蒸汽覆盖区向不凝性气体阻塞区的蒸汽宏观气流运动以及不凝性气体阻塞区向工质蒸汽覆盖区的不凝性气体扩散运动。稳定工况下，蒸汽气流将分界面始终抑制在某一固定位置，达到动态平衡。当热源负荷以及用热对象的用热工况发生变化时，分界面会随之发生移动。例如当热源加热负荷增加时，腔内压力升高，不凝性气体被压缩，分界面朝着贮气室方向移动，用热段有效传热面积增大。反之，则减小。贮气室的容积相对用热段的容积要大的很多，能够有效缓冲分界面移动带来的腔体内压力的波动。由于工质蒸汽覆盖区内发生的是相变传热，饱和工质蒸汽温度与压力具有一一对应的关系，因而能在变工况下保证饱和蒸汽温度波动较小。

2.3.2.2 沼气加热系统中的应用

一般来说,对系统应用热管理思想时,主要可以从三个方面考虑。一是对现有系统应用数学优化方法优化运行;一种是对系统进行能量流结构上的优化;最后一种是采用高效的传热部件,提高系统的能量利用率。热管是一种高效的传热原件,种类和形式很多,在生产和研究中得到了广泛的应用。可控热管(又称为可变导热管)是一种特殊的可控温度的高效传热元件,它的传热能力能够随着加热负荷的变化自动的发生变化,从而实现控制温度的目的。

对于大型的沼气池加热系统而言,常规的热管理方法是针对具体的热源,建立不同的传热单元,采用反馈执行元件,通过加热热水流量的调节或者加热热水温度的调节保证对热量的合理分配使用。例如韩广伟等将单片机的温度控制系统应用到沼气生产过程中,通过单片机运算控制节流阀通断,从而控制反应罐长时间处于最佳温度^[27]。使用过程中要频繁的控制节流阀的通断,可靠性低。

对于多个热源特别是利用热负荷不断变化的热源的沼气加热系统来说,上述方法更不适宜,同时也不利于系统的推广和应用。一种解决方法是将各个传热单元和控制单元集成,利用模块化的热管理装置进行热管理。在利用太阳能加热沼气池升温系统中,热源负荷不断变化,将这一技术应用到太阳能加热制取沼气系统中,能够起到稳定加热负荷和控制输出温度的目的。

2.4 本章小结

本章着重介绍了太阳辐射强度的计算方法、太阳能集热器的选型、沼气生产的基本原理、产生条件和热管理器的相关理论。

太阳辐射强度的计算方法主要介绍了与太阳辐射强度相关的角度概念及计算,太阳直射和辐射的计算方法。太阳能集热器相关知识中介绍了集热器的主要分类及优缺点,和本文系统所需要的集热器的选型。介绍了沼气生产的原理和影响因素,着重介绍了温度对沼气发酵的影响,分析了温度调节对沼气生产的重要性。简要介绍了热管理器的结构和运行原理。本章内容为后续的系统设计计算和模拟过程中的设备选型和运行参数的确定奠定了良好的理论基础。

3 基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统

研究发现,在 $10^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内,沼气均能正常发酵产气,一般温度愈高,微生物活动愈旺盛,产气量也愈高,并且高温发酵时产气量最高,其次是中温发酵。另外,微生物对温度变化十分敏感,温度的突升或突降都会严重影响微生物的生命活动,使产气状况恶化^[68]。我国农村的沼气池,因为受各种条件限制,一般采用常温发酵,大都存在产气率低、产气量不足等缺陷,冬春季节尤甚。利用太阳能经济性集热温度与高效生物质厌氧发酵温度相匹配的特点,将太阳能和生物质能转化为沼气再加以利用是太阳能与生物质能高效规模开发的新途径。但由于太阳能本身的不稳定性,太阳能集热负荷的变化使得沼液温度波动也较大,产气率仍然较低。针对以上问题,本系统将先进的热管理思想应用于太阳能加热制取沼气装置中,通过热管理器控制太阳能加热输出温度的稳定,使得沼气池内温度始终稳定在高效发酵产气温度范围内,解决了太阳能集热负荷变化带来的沼液发酵温度波动问题。

3.1 系统设计及运行方案

3.1.1 系统原理图

太阳能加热高效制取沼气系统如图 3-1 所示。太阳能加热高效制取沼气装置,主要包括太阳能集热器 1,热管理器 2,补水箱 3,沼气锅炉 4,储气罐 5,沼气池 6,换热盘管 7,循环水泵 8、9、10、11,阀门 12、13、14、15、16、17、18、19。太阳能集热器 1 与热管理器 2 加热段 22 的一组蒸发换热管排 28 相连构成循环,太阳能集热器 1 入口管段上设有阀门 16、17 和循环水泵 8;沼气池 6 内的换热盘管组 7 与热管理器 2 用热段的热用户管排组 27 对应相连构成循环,换热盘管组 7 的各个入口管段上设有阀门 12、13、14、15 和循环水泵 9、10;沼气锅炉 4 以储气罐 5 内贮存的沼气作为燃料,沼气锅炉 4 入口管段与热管理器 2 的用热段 21 的蓄热管排 26 相连,沼气锅炉 4 出口管段与热管理器 2 加热段 22 的另一组蒸发换热管排 29 相连,沼气锅炉 4 的入口管段上设有阀门 18、阀门 19、循环水泵 11 和补水箱 3。

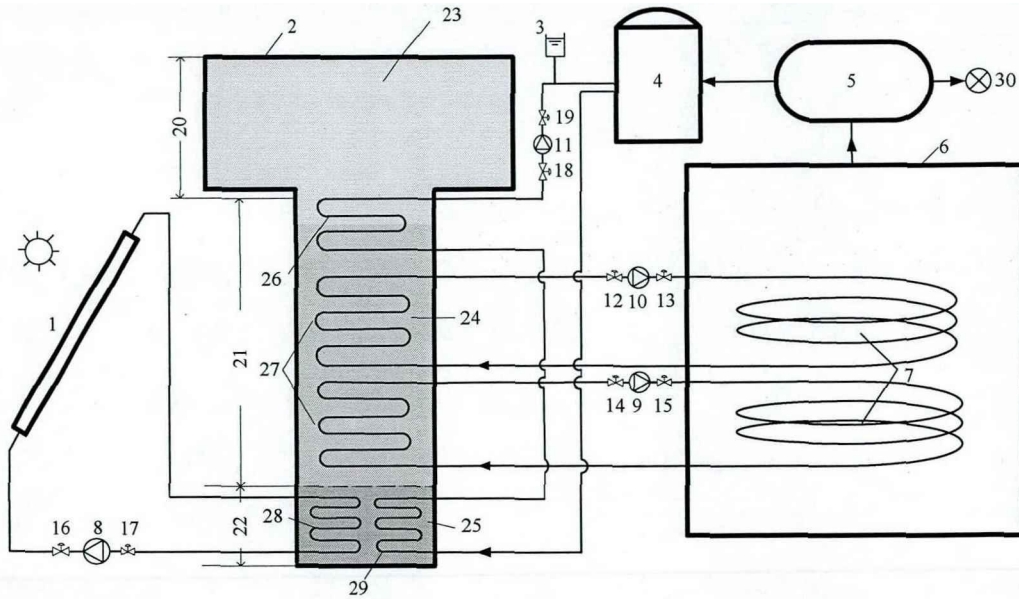


图 3-1 基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统示意图

Figure. 3-1 High-efficiency biogas production system with solar heating based on thermal management controller

- 1.太阳能集热器 2.热管理器 3.补水箱 4.沼气锅炉 5.储气罐 6.沼气池 7.换热盘管组 8-11.循环水泵
12-19.阀门 20.贮气室 21.用热段 22.加热段 23.不凝性气体 24.工质蒸汽 25.工质液体 26.蓄热管排
27.热用户管排组 28-29.换热管排 30.沼气用户

3.1.2 运行原理及方案

热管理器包括加热段、用热段和贮气室三个功能单元，水作为工作介质^[69]。加热段位于底部，设有两组换热管排，并浸泡在工质液池内，一组与太阳能集热器相连，另一组与沼气锅炉相连。用热段内布置多组换热管排，分别与沼气池中相应的螺旋式换热盘管相连，用热段末级换热管排用于蓄热，与沼气锅炉相连。贮气室内储存不凝性气体，由于贮气室容积相对用热段容积要大很多，使得变工况条件下热管理器的内部工质蒸汽温度和压力波动较小，由此实现对热量输出温度的控制。

当白天太阳辐射强度较大时，太阳能集热器吸收太阳热能，借助热水循环管路传递到热管理器加热段，加热内部工质，液态工质吸收热量后沸腾蒸发，蒸汽上升至用热段冷凝，以凝结放热形式将热量传递给沼气池内的热水循环系统，通过螺旋式换热盘管组加热料液产生沼气。若太阳能集热器提供的热量多于料液发酵热需求，热管理器用热段的蓄热管排将多余的热量储存到沼气锅炉内。当白天太阳辐射较弱时，太阳能集热器与沼气锅炉同时运行为沼气池提供发酵所需热量。在阴雨天或夜间，利用沼气锅炉通过热管理器加热段为沼气池提供热量，此时太阳能集热器不工作。同时，为使沼气池内温度

分布更加均匀,可在沼气池内设计多组独立换热盘管,分别与热管理器的热用户管排连接。

具体运行方案如下。

当白天太阳辐射较强时,阀门 16、17 和循环水泵 8 开启工作,阀门 18、19 和循环水泵 11 关闭不工作,太阳能集热器 1 收集的太阳热能,借助热水循环管路传递到热管理器 2 加热段 22 内的换热管排 28,加热管理器内部的工质液体 25,液态工质吸收热量后沸腾蒸发上升至用热段 21,工质蒸汽 24 在用热段 21 内冷凝,以凝结放热形式将热量传递给热用户管排组 27 内的工质,当热用户管排出口处的工质温度大于设定温度时,对应热用户管排出口管段上的阀门和循环水泵开启工作,使受热后的工质进入换热盘管组 7 加热沼气池 6 内的料液产生沼气。若蓄热管排 26 出口处的工质温度大于设定温度即太阳能集热器 1 提供的热量多于发酵热需求时,阀门 18、19 和循环水泵 11 开启工作,蓄热管排 26 借助热水循环将多余的热量贮存到沼气锅炉 4 内。当白天太阳辐射较弱时,阀门 16、17、18、19 和循环水泵 8 和 11 开启工作,太阳能集热器 1 集热通过热管理器及热水循环加热沼气池 6 内的料液产生沼气,同时,储气罐 5 内的沼气加热沼气锅炉 4 内的水,加热后的热水通过热管理器 2 加热段 22 的另一组换热管排 29 将热量传递给工质液体 25,以此加热沼气池 6 内的料液产生沼气。当晚上运行时,阀门 18、19 和循环水泵开启工作,阀门 16、17 和循环水泵 8 关闭不工作,此时太阳能集热器 1 不工作,利用储气罐 5 内的沼气加热沼气锅炉 4,为沼气池 6 提供发酵热,从而保证装置高效持续稳定地产气。

3.2 太阳能加热沼气池数学模型

基于热管理器的太阳能加热制取沼气系统主要由三部分组成:太阳能集热器、热管理器和沼气池。

3.2.1 太阳能集热器数学模型

平板型太阳集热器主要由吸热体、透明盖板、隔热层和外壳四大部分组成。太阳辐射透过透明盖板后,投射到吸热体上,吸热体吸收并将辐射能转化为热能,然后将热量传递给吸热体内的工质,传热工质将热量输送到储热水箱中加以储存和利用。同时,吸热体随着温度的升高要通过热传导、对流和辐射等方式向四周散热,这部分热量是集热

器的热量损失^[46]。

根据能量守恒原理，集热器的能量平衡方程为

$$Q_A = Q_U + Q_L + Q_c \tag{3.1}$$

式中 Q_A ——总的太阳辐射能，W；

Q_U ——集热器有用能，W；

Q_L ——集热器散热损失，W；

Q_c ——集热器自身储存能，W。

太阳能集热器在稳定工况下运行时，有效集热量为

$$Q_U = AE_{\beta}(\tau a)_e - AK_L(t_p - t_s) = mC_p(t_{gc} - t_{gj}) \tag{3.2}$$

式中 A ——集热器采光面积， m^2 ；

$(\tau a)_e$ ——集热器盖板对太阳辐射透过率和吸收率的乘积，无量纲；

K_L ——集热器总热损失系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

t_p ——吸热体平均温度， $^\circ C$ ；

t_s ——环境空气温度， $^\circ C$ ；

m ——集热器换热介质流量， kg/s ；

C_p ——换热介质比热， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ；

t_{gc} ——集热器换热介质出口温度， $^\circ C$ ；

t_{gj} ——集热器换热介质进口温度， $^\circ C$ 。

集热器吸热体的平均温度很难确定，所以引入集热器热转移因子 F_R 。其意义是将吸热体的平均温度 t_p 用集热器换热介质的进口温度 t_{gj} 代替，实际有效集热量与替代后的有效集热量的比值。

$$F_R = \frac{mC_p(t_{gc} - t_{gj})}{AE_{\beta}(\tau a)_c - AK_L(t_{gj} - t_s)} \tag{3.3}$$

这样式 (3.2) 就可以写成

$$Q_U = AF_R[E_\beta(\tau a)_e - AK_L(t_{gj} - t_s)] \quad (3.4)$$

式中各符号意义同前。

3.2.2 热管理器数学模型

热管理器加热段工作介质吸收来自太阳能集热器的热量后，发生沸腾换热，换热量可用下式计算。

$$Q_U = F_j q_j \quad (3.5)$$

式中 q_j ——加热段热流强度，W/m²；

F_j ——加热段换热面积，m²。

热管理器用热段发生冷凝换热，将热量传递给来自沼气池的循环水。换热量可用下式计算。

$$Q_U = m_l C_{pl}(t_{lo} - t_{li}) \quad (3.6)$$

式中 m_l ——热管理器冷凝段循环质量流量，kg/s；

C_{pl} ——热管理器冷凝段循环介质比热，J/(kg·°C)；

t_{lo} ——热管理器用热段出口温度，°C；

t_{li} ——热管理器用热段进口温度，°C。

3.2.3 沼气池加热数学模型

沼气池内料液通过螺旋盘管换热器吸收来自热管理器用热段的热量，其中一部分热量透过沼气池的围护结构散失，热量平衡可用下式表示。

$$G_l C_{pz} \frac{dt_c}{d\tau} = Q_U - Q_{loss} = Q_U - KF(t_c - t_s) \quad (3.7)$$

式中 C_{pz} ——沼气池内发酵料液比热，J/(kg·°C)；

t_c ——沼气池内平均温度，°C；

t_s ——沼气池外土壤温度，°C；

G_f ——沼气池内发酵料液质量, kg;

K ——沼气池的围护结构散热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

F ——沼气池表面积, m^2 。

3.3 太阳能加热制取沼气系统设计

基于热管理器的太阳能加热沼气池系统设计方法如图 3-2 所示。根据用户的基本信息, 如规模型养殖场的养殖数量、养殖种类、沼气用户数量等确定发酵所需沼气池的容积, 然后按照沼气池容积、所加料液质量等计算沼气池负荷以便确定太阳能集热器所要提供的热负荷, 根据太阳能热负荷确定集热器面积、热管理器以及沼气池换热器有关参数。

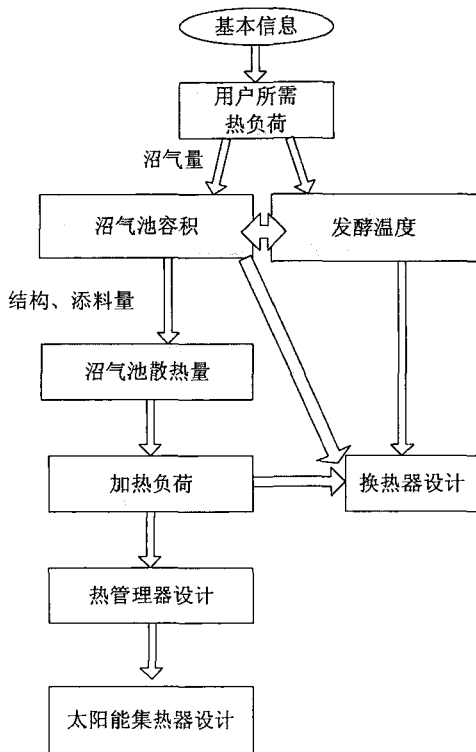


图 3-2 系统设计流程图

Figure. 3-2 Flow chart of system design

3.3.1 沼气池容积设计

3.3.1.1 养猪场粪污处理量

以山东某年出栏 900 头生猪的养殖场为例, 设计沼气池的容积。设计沼气池采用高

温发酵，发酵温度为 52℃，进料以猪粪为主，掺少量的农作物秸秆，进料浓度为 10%。

在对年出栏 900 头生猪的养殖场设计沼气池时，首先要确定养猪场粪污的浓度和数量。本文根据日本、英国、上海等养殖场的数据^[70, 71]总结出养猪场的粪尿排放量如表 3-1 所示。

表 3-1 规模化养猪场粪尿排放量
Table 3-1 Quantity of leting dejection in scale hoggerly

项目		日龄/天	粪便排放量 kg/ (头·天)	尿排放量 kg/ (头·天)
母猪	生产母猪	365	5.0	5.5
	后备母猪	180	2.2	3.5
公猪	公猪	365	3.0	6.9
	后备公猪	180	2.2	3.5
仔猪	哺乳仔猪	0~35	0.5	1.8
	断奶仔猪	35~70	1.0	0.4
育肥猪	—	90	1.3	2.0
		180	2.2	3.5

猪尿中水分含量取 97.5%，粪便含水量取 81.5%，按公猪与后备公猪、母猪和后备母猪 3:1 计算公猪和母猪的粪污干物质平均排放量。仔猪粪污干物质平均值取哺乳仔猪和断奶仔猪的平均值，育肥猪取 90 日龄和 180 日龄的粪污干物质排放量平均值。计算可得出不同规模养猪场排放的粪污干物质量，见表 3-2；年出栏 100~10000 头育肥猪的养猪场存栏及粪污排放量，见表 3-3。

表 3-2 规模化养猪场粪尿及干物质排放量
Table 3-2 Quantity of leting dejection and dry matter in scale hoggerly

项目		日龄 天	粪排放量 kg/头	尿排放量 kg/头	总排放量 kg/头	干物质量 kg/头	平均值 kg/头
母猪	生产母猪	365	5.0	5.5	10.5	1.063	0.921
	后备母猪	180	2.2	3.5	5.7	0.495	
公猪	公猪	365	3.0	6.9	9.9	0.728	0.670
	后备公猪	180	2.2	3.5	5.7	0.495	
仔猪	哺乳仔猪	0~35	0.5	0.8	1.3	0.113	0.166
	断奶仔猪	35~70	1.0	1.4	2.4	0.219	

以表 3-3 中数据作为计算基础，采用最小二乘法得到不同规模养猪场的粪污干物质排放量 W 与年出栏量 H 的回归方程：

$$W = 0.2195H - 0.6268 \tag{3.8}$$

式中 W——粪污干物质排放量，干物质/(千克·天)；

H——养猪场年出栏量，头。

表 3-3 年出栏 100~10000 头育肥猪养猪场存栏及粪污排放量

Table 3-3 Quantity of letting dejection and dry matter in scale hoggerly which output the hog between 100 and 10000

年出栏数	项目	母猪	公猪	仔猪	育肥猪	合计
100	存栏/头	7	0	20	30	57
	TS/(kg·天)	6.45	0	3.32	11.70	21.47
200	存栏/头	14	0	40	60	114
	TS/(kg·天)	12.90	0	6.64	23.40	42.94
300	存栏/头	21	1	61	91	174
	TS/(kg·天)	19.34	0.670	10.13	35.49	65.63
500	存栏/头	35	1	101	151	288
	TS/(kg·天)	32.24	0.670	16.77	58.89	108.57
1000	存栏/头	71	3	201	302	577
	TS/(kg·天)	65.39	2.01	33.37	117.78	218.55
2500	存栏/头	177	7	503	754	1441
	TS/(kg·天)	163.02	4.69	83.50	294.06	545.27
10000	存栏/头	709	27	2010	3015	5761
	TS/(kg·天)	652.99	18.09	333.66	1175.85	2180.59

3.3.1.2 沼气潜在产气量

原料产气率是指单位质量原料的产气量，可分为理论产气率、生产实际产气率和实验产气率。理论产气率是依据原料的化学成分计算得出，是固定不变的。生产实际产气率是在实践中测量的产气率，而实验产气率是在实验中测得的产气率。根据巴斯维尔公式可得三大类有机物的理论产气率，如表 3-4 所示。

表 3-4 三大类有机物质理论产气率

Table 3-4 Producing biogas rate in theory by three kinds of organic compound

有机物种类	成分质量分数%		每公斤物质产气量 (m ³)	
	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
碳水化合物	73	27	0.75	0.73
脂肪	52	27	1.44	1.04
蛋白质	73	27	0.98	0.49

在农村使用的发酵原料多种多样，添加物种类也很多，但是沼气发酵原料不可能全部分解为沼气，对农村原料来说，生产实际产气量大约为理论值的一半左右。

表 3-5 农村沼气原料中总固体含量、实验室产气率、生产实际产气率
Table 3-5 Producing biogas rate in lab and in fact production by country biogas material

原料种类	总固体含量%	实验室产气率 (m ³ /kg)	生产实际产气率 (m ³ /kg)
稻草	80~90	0.40	0.30
麦草	80~90	0.45	0.30
玉米杆	80~90	0.50	0.30
高粱杆	80~90	0.40	0.30
人粪	18~20	0.50	0.35
鸡粪	30	0.50	0.35
猪粪	18~20	0.45	0.35

沼气潜在产气量与粪污干物质排放量的关系可用下式表示:

$$G = W\eta r_m \tag{3.9}$$

式中 G ——沼气产气量, m³/d;

r_m ——原料产气率, m³/(kg·TS);

η ——粪污入池率, %。

将式 (3.8) 代入式 (3.9) 可得

$$G = 0.2195H\eta r_m - 0.6268\eta r_m \tag{3.10}$$

在不同的地区和不同的温度条件下, 原料的产气率差别很大。采用玉米秸秆、猪粪水、接种物按照 1:1:6:2 比例配制料液, 发酵温度 52℃, 发酵周期 15 天, 原料的产气率在 0.92m³/kg 左右^[72], 本文中取原料产气率为 0.92m³/kg。以年出栏 900 头的养猪场为对象, 设计沼气池, 养猪场的粪污全部通入到沼气池中, 按照公式 (3.7) 计算, 可以得出沼气池的预期产气量为 181.746m³/d。

3.3.1.3 沼气池容积

沼气池容积包括消化液的容积和储气容积两部分, 本系统在沼气池外单独设计储气装置, 所以沼气池容积的计算只考虑消化液的容积。在一定的降解速率和温度条件下, 原料的产气率是相对稳定的, 本文按照容积产气率计算沼气池的容积。

沼气池容积

$$V = G / r_v \tag{3.11}$$

式中 V ——沼气池料液的容积, m³;

r_v ——容积产气率, $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$;

G ——沼气产气量, m^3/d 。

将式 (3.10) 代入式 (3.11) 可得养猪场粪污处理沼气池容积计算式

$$V = 0.2195\eta r_m / r_v \tag{3.12}$$

沼气池容积产气率与发酵工艺、温度以及运行情况有关^[73-75]。上海火星沼气站的 450m^3 的沼气池高温发酵时容积产气率最高可达 $1.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 以上, 本文设计采用高温发酵工艺, 容积产气率取 $1.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

在此基础上, 沼气池设计容积为

$$V = 0.2195\eta r_m / r_v = 0.2195 \times 900 \times 1 \times 0.92 \div 1.9 = 94 \text{ m}^3$$

目前我国的沼气池形式多种多样, 主要是水压式沼气池, 以及在水压式沼气池基础上出现的一些新型沼气池, 如曲流布料式沼气池、分离浮罩式沼气池等。分离浮罩式沼气池主要以禽畜粪便为原料, 结构简单制造方便, 且池容产气率高, 广泛应用于以人、禽畜粪便为原料的农村户用沼气池, 或者畜牧养殖厂等沼气工程, 本系统沼气池形式选择这种分离浮罩式沼气池。为简化沼气池加热过程模型, 本文将沼气池简化为圆柱形, 沼气池容积确定后, 确定沼气池的内径和高度, 池体半径为 3m , 高 3.3m 。

3.3.2 沼气池内加热器的设计

3.3.2.1 沼气池热负荷

(1) 沼气池散热系数

沼气池与土壤之间总的换热系数与沼气池建筑材料等有关, 可以表示为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \tag{3.13}$$

式中 α_1 ——内表面热转移系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$;

α_2 ——外表面热转移系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$;

δ ——钢筋混凝土层厚度, m ;

λ ——钢筋混凝土层导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 。

(2) 沼气池散热负荷

$$Q_s = K_{sd} F_1 (t - t_{s1}) + K_{zc} (F_2 + F_3) (t - t_{s2}) \tag{3.14}$$

式中 K_{zd} ——沼气池顶部平均传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;
 K_{zc} ——沼气池侧面和底部平均传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;
 F_1 、 F_2 、 F_3 ——沼气池的顶部、底部和侧面积, m^2 ;
 t ——沼气池内料液平均温度, $^{\circ}C$;
 t_{s1} ——顶层土壤平均温度, $^{\circ}C$;
 t_{s2} ——底部和侧面土壤平均温度, $^{\circ}C$ 。

(3) 沼气池投料负荷

沼气池投料热负荷

$$Q_j = c_{pf} m_f (t - t_j) / 86400 \tag{3.15}$$

式中 c_{pf} ——新鲜料液的定压比热, $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$;
 m_f ——每日投入沼气池的新鲜料液量, kg/d ;
 t_j ——新鲜料液温度, $^{\circ}C$;

(4) 沼气池的热负荷

沼气池热负荷 Q_z 由两部分组成, 即

$$Q_z = Q_s + Q_j \tag{3.16}$$

式中 Q_s ——沼气池散热负荷, W ;
 Q_j ——沼气池投料热负荷, W 。

3.3.2.2 换热器面积及换热管长度

(1) 换热器总传热系数

$$K_h = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{d_2}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{k_2} \frac{d_2}{d_1}} \tag{3.17}$$

式中 d_1 ——换热管外径, mm ;
 d_2 ——换热管内径, mm ;
 k_1 ——水的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$;
 k_2 ——料液的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$;
 λ ——管材的导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 。

(2) 对数平均温差

由于热水沿着管程放出热量，温度不断下降，发酵料液沿着逆向管程吸热而温度上升，且热水和料液之间的温差沿程是不断变化的，因此在计算整个传热面上的热流量时，采用对数平均温差。

对数平均温差

$$\Delta t_m = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}} \quad (3.18)$$

式中 t_1' ——热水进口温度，℃；

t_1'' ——热水出口温度，℃；

t_2' ——料液初始温度，℃；

t_2'' ——料液发酵温度，℃。

(3) 换热器换热面积

$$F_h = \frac{Q_z}{K_h \cdot \Delta t_m} \quad (3.19)$$

式中 K_h ——换热器传热系数，W/(m²·K)；

Δt_m ——换热器管道对数平均温差，℃。

(4) 换热器换热管长度

$$L = \frac{\alpha F_h}{\pi d_1} \quad (3.20)$$

式中 d_1 ——换热管的外径，m；

α ——修正系数，取值 20%^[76]。

3.3.3 太阳能集热器设计

3.3.3.1 沼气池产气量和富裕沼气体积

沼气池产气量 G

$$G = r_v \cdot V \quad (3.21)$$

式中 r_v ——容积产气率，m³/ (m³·d)；

V ——沼气池容积, m^3 。

沼气池富裕产气量 G_s ,

$$G_s = G - G_y \tag{3.22}$$

式中 G_y ——用户消耗沼气体积, m^3/d 。

沼气锅炉以富裕沼气为原料, 其提供的热量为

$$Q_q = G_s \cdot q \cdot \eta_b \tag{3.23}$$

式中 q ——每立方米沼气的发热量, kJ/m^3 ;

η_b ——沼气锅炉热效率, 取 80%。

3.3.3.2 太阳能集热系统热负荷

本文研究系统选用平板型集热器, 以水为工作介质。沼气池热负荷中除沼气锅炉提供的热量外, 其余全部由太阳能集热系统提供。太阳能集热系统热负荷

$$Q_t = Q_z - Q_q \tag{3.24}$$

太阳能集热系统按冬季最冷月份的晴天平均太阳辐射量设计。因此, 平板式太阳能集热器集热面积可以通过下式进行计算

$$F_c = \frac{86400Q_t}{J_t \eta_j (1 - \eta_s)} \tag{3.25}$$

式中 F_c ——太阳能集热面积, m^2 ;

J_t ——冬季晴天平均日太阳辐照量, J/m^2 ;

η_j ——集热器平均集热效率, 取 50%;

η_s ——水箱和管路热损失率, 取 10%。

3.3.4 热管理器设计计算

对于热管理器来说, 设计参数主要包括冷凝段冷凝面积和加热段的加热沸腾面积。

热管理器冷凝侧传热系数

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}} \tag{3.26}$$

式中 h_i ——管内对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

h_o ——管外冷凝换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

d_i ——换热管内径, mm;

d_o ——换热管外径, mm;

λ ——换热管的导热系数, $W/(m \cdot k)$ 。

冷凝管内外换热系数为^[77]

$$h_o = 0.729 \left[\frac{gr \rho_l^2 \lambda_l^3}{\eta_l d (t_d - t_w)} \right]^{1/4} \quad (3.27)$$

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (3.28)$$

$$h_i = \frac{Nu \lambda}{d_i} \quad (3.29)$$

热管理器冷凝段的冷凝面积

$$F_l = \frac{Q_z}{K \Delta t} \quad (3.30)$$

式中 Δt ——管外温度和管内平均温度差, $^{\circ}C$ 。

热管理器加热段发生沸腾换热, 热流密度为

$$q_j = \eta_l r \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\gamma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{pl} \Delta t}{C_{wl} r Pr_l^s} \right)^3 \quad (3.31)$$

式中 c_{pl} ——工作介质饱和液体的定压比热, $kJ/(kg \cdot K)$;

C_{wl} ——经验常数, 取决于加热表面—液体组合情况;

r ——汽化潜热, J/kg ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

t_c ——太阳能集热器集热温度, $^{\circ}C$;

t_d ——热管理器设计工作温度, $^{\circ}C$;

ρ_l 、 ρ_v ——饱和液体及相应饱和蒸汽密度, kg/m^3 ;

γ ——液体与蒸汽之间的表面张力, N/m ;

η_l ——饱和液体动力粘度, $kg/(m \cdot s)$;

s ——经验指数, 对水取 1。

加热段换热面积为:

$$F_j = \frac{Q_z}{q_j} \quad (3.32)$$

式中 q_j ——加热段热流密度, W/m^2 。

计算结果列表如下:

表 3-6 沼气池及加热系统设计参数

Table 3-6 the design parameters of biomass pool and heating system

	名称	设计参数
沼气池参数	池容	94m ³
	沼气池半径	3.3m
	沼气池高度	3m
	设计发酵温度	52±1℃
	进料温度	10℃
	进料种类	猪粪+生物质秸秆
	进料干物质质量	262kg
	进料浓度	10%
换热器参数	换热器种类	螺旋管换热器
	换热管长度	81m
	换热管材质	热水铝塑管
	换热管型号	DN25
	换热器进口温度	60℃
	出口温度	55℃

表 3-7 太阳能集热器及热管理器设计参数

Table 3-7 the design parameters of solar collector and thermal management controller

	名称	设计参数
集热器	集热器面积	81.2m ²
	集热器类型	平板型集热器
	工作介质	水
热管理器参数	热管理器设计工作温度	80℃
	工作压力	47380Pa
	换热管类型	铜管
	换热管内径	10mm
	工作介质	水
	不凝性气体	氮气
	换热管外径	12mm
	加热段管长	3m
用热段管长	2.44m	

3.4 本章小结

本章设计了基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统,介绍了其原理及运行方式。建立了该系统主要部件的数学模型,给出了该系统的设计方法。计算了青岛一规模养猪场沼气池容积。依据沼气池容积及用户相关资料,设计了该套加热系统,计算了系统中太阳能集热器、沼气池内换热器和热管理器的主要部件的参数。

本章已完成了基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统的设计,为下一章沼气池内部温度场的模拟提供了物理模型。

4 沼气池加热系统数值模拟

4.1 模拟软件介绍

4.1.1 CFD 技术的应用

CFD (Computational Fluid Dynamics) ——计算流体力学, 是当前国际上一个很热门的研究领域, 这种技术可用于传热、传质、动量传递以及燃烧、多相流和化学反应等研究中。CFD 技术在很多领域如热能动力、航空航天、机械、土木水力、环境化工等中都得到了广泛的应用。

在一般的工程设计和产品研发中, 检验设计是否可行, 往往要需要经过大量的试验来验证, 这就导致了产品的开发周期长, 费用高; 在设计、试验过程中设计人员的经验等个人因素往往起着很重要的作用, 这也导致了设计的不精确。CFD 技术的应用改变了这一传统过程, 在设计过程中它能够相对准确地规定流体流动的压力场、速度场、温度场、浓度场等分布的时变特性这些细节, 所以不仅能准确地从整体上预测产品的性能, 还能够从场的分析中找出产品或加工工艺的缺陷, 提出整改方案, 还能很容易的得到一些规律的知识, 这也是该技术最大的优势。

总而言之, 对于模拟复杂流场结构的不可压缩/可压缩流动来说, FLUENT 是很理想的软件。

4.1.2 Fluent 软件的特点

Fluent 软件的结构由前处理、求解器以及后处理三大模块组成。Fluent 软件采用 Gambit 作为其专用的前处理软件, 能够画出多种形状的网格。对二维流动可以生成三角形和矩形网格, 对于三维流动可以生成四面体、六面体、三角柱和金字塔等网格。结合具体的计算, 还能够生成混合网格, 它的自适应能力能够对网格进行细分或者粗化, 还能够生成不连续网格、可变网格以及滑动网格。

Fluent 软件的求解模块是核心部分, 其数学模型是以各种湍流模型和纳维—斯托克斯方程为主, 再加上多相流、自由面模型、燃烧和化学反应流模型以及非牛顿流体模型等。附加模型大部分是在主体方程上补充一些附加源项、输运方程与关系式, 采用有限

体积法离散方程,其计算精度和稳定性相比优于传统过程中使用的有限差分法。对于低速不可压流动采用压力校正法,而可压缩流动采用的是耦合法,另外,该软件采用二阶上风格式,能较好的处理畸变网格的计算。

该软件的后处理模块不仅能够展示各种流动的三维效果,还能以动画的形式演示非定常过程,能够直观明了的展示模拟过程。

4.2 模拟过程方法

当使用 Fluent 解决某一问题时,首先要考虑问题的物理模型、计算模型、模型目标、边界条件等等。

确定所解决问题的特征之后,需要以下几个基本的步骤来解决问题:

- (1) 创建物理模型网格;
- (2) 选择合适的解算器: 2D、3D、2DDP、3DDP;
- (3) 输入网格;
- (4) 检查网格;
- (5) 选择解的格式;
- (6) 选择需要解的基本方程: 层流还是湍流(无粘)、化学组分还是化学反应、热传导模型等;
- (7) 确定所需要的附加模型: 风扇,热交换,多孔介质等;
- (8) 指定材料物理性质;
- (9) 指定边界条件;
- (10) 调节解的控制参数;
- (11) 初始化流场;
- (12) 计算解;
- (13) 检查结果;
- (14) 保存结果;
- (15) 优化网格,改变数值和物理模型。

4.3 沼气池加热系统模型

4.3.1 加热器布置方案

未安装搅拌装置的沼气池在使用过程中，沼液会出现明显的分层现象，由上至下分别是浮渣层、发酵层和沼渣层。各个层区的发酵细菌不同，所需的发酵温度也不同，所以加热器的安放位置会直接影响沼气池内的温度分布，进而影响沼气池产气效率。以下用 Fluent 模拟在沼气池设计加热温度为 30℃，沼气池边界温度为 3℃时，加热管不同安装位置时的沼气池温度场。为模拟方便，模拟过程中将加热管简化为面热源。

图 4-1 为沼气池加热器安装在沼气池侧壁时的温度场情况。结果显示：在不考虑重力影响的情况下，换热器安装在沼气池壁面时，沼气池顶部和沼气池中央温度较低，中央部位温度仅为 18℃左右，沼气池壁面和底部的温度较高，相比中间发酵区要高出 2~3℃。

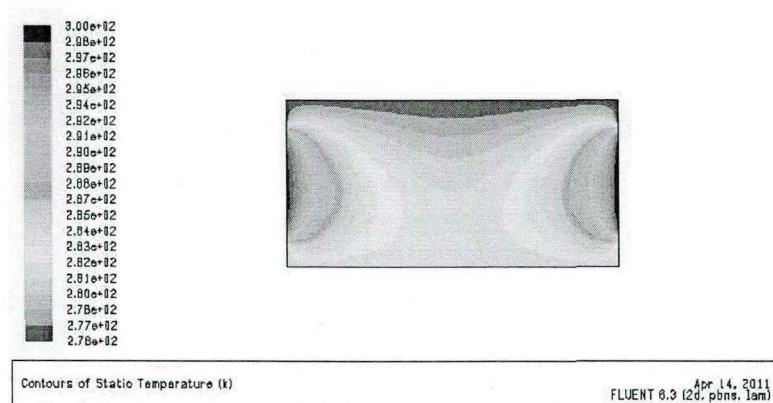


图 4-1 沼气池壁面加热时温度场

Figure.4-1 Temperature field distribution when heater at the wall

图 4-2 为沼气池加热器安装在沼气池底部时的温度场情况。结果显示：沼气池底部加热器周围温度最高，可达 25℃，沼气池顶部和侧壁距离加热器较远，温度较低。

加热器分别位于侧壁和底部时，沼气池中央温度较低，即沼气池中间主要的发酵细菌密集分布的地方温度不是很高，且温度分布不均匀。研究表明在常温发酵时，产气量与沼气发酵温度高低成正比，温度的变化会直接影响产气率，温度波动超过 3℃就会严重影响产气率，所以这两种加热方式对沼气产气率不利。另外，在沼气池壁面和底部加热时，由于沼气池壁内外温度差较大，池体散热损失较大，无疑增加了沼气池的热负荷。

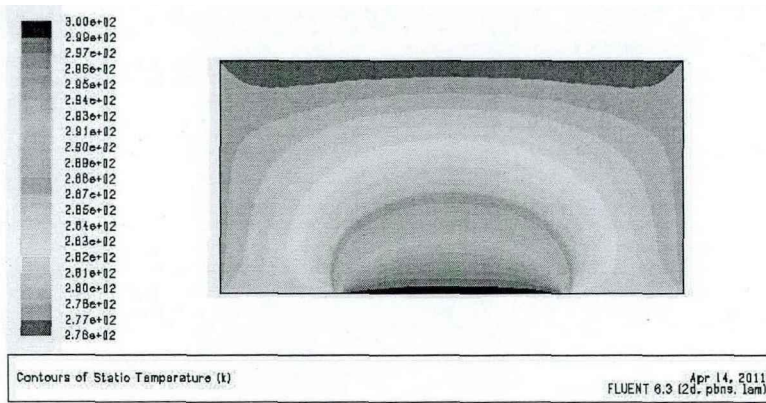


图 4-2 沼气池底部加热时温度场

Figure.4-2 Temperature field distribution when heater at the bottom

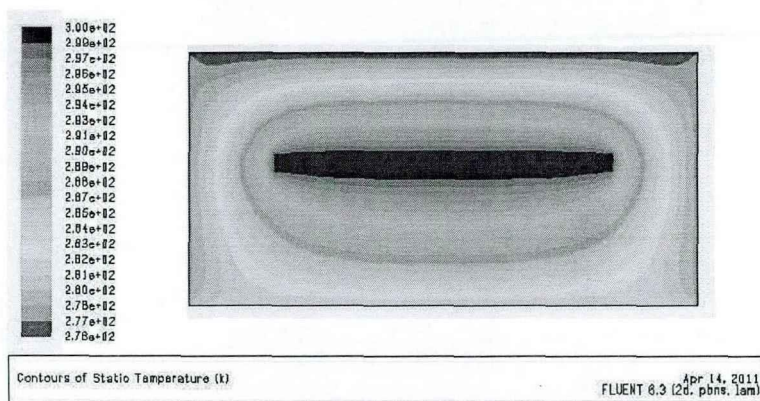


图 4-3 沼气池中间加热时温度场

Figure.4-3 Temperature field distribution when heater at the center

将加热器放置在沼气池内部加热时的温度场如图 4-3 所示,沼气池发酵层温度较高,沼气池内部温度分布较均匀。沼气池壁面和底部与外界土壤的温度差较低,减少了沼气池的散热损失。所以将加热器安放在沼气池中间发酵区最有利于沼气发酵,是一种比较节能的安装方式,本文主要考察这种加热器安放方式对沼气池温度场的具体影响。

4.3.2 模型描述

沼气池加热系统采用了螺旋盘管换热器。它具有结构简单、制造方便和传热系数大等优点,螺旋管式结构避免了因温度变化带来的温差应力,有很好的工程适用性^[78]。

沼气池结构为圆柱形,半径 3m,高 3.3m。螺旋盘管换热器材质为铝管,盘管外径 20mm,螺旋圈中心直径 3m,盘管圈数 6,管路总长 81m。

为了研究螺旋管换热器布置方式对沼气池内部温度场的影响情况,本文设计了两种螺旋盘管换热器布置方式。一种将螺旋盘管安放在沼气池中央,另一种将螺旋盘管分两

段安放在沼气池的上下层,如图 4-4 所示。来自外部的加热热水从沼气池底部进入盘管,与沼气池中的低温沼液换热后,从顶部流出,此过程沼气池中料液被加热升温,维持较高的发酵温度,提高了沼气产气率。

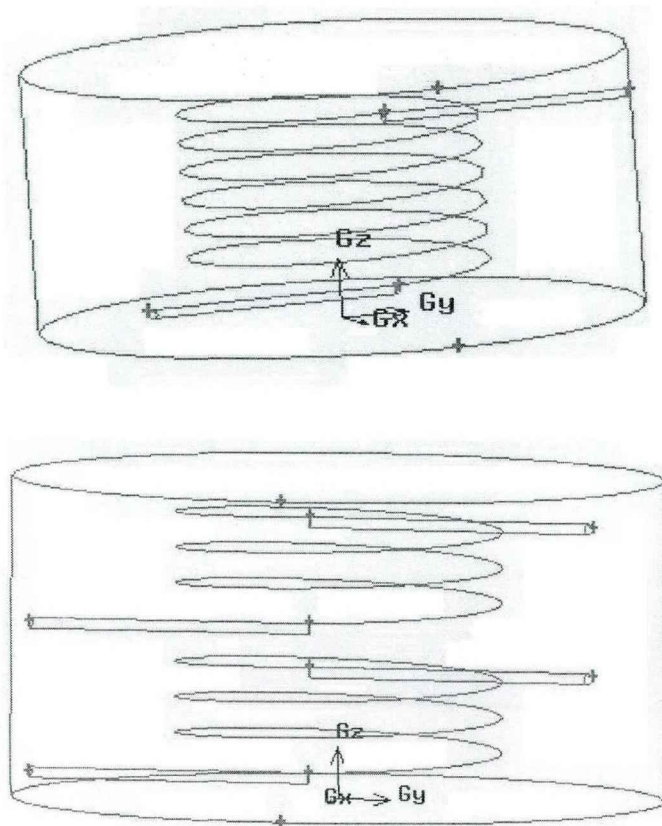


图 4-4 两种螺旋盘管换热器布置方式图
Figure. 4-4 the two different layout of helical coil heater

为简化计算模型,特作出以下几个假设:

- (1) 沼液密度取水的密度,且池中压力变化较小,将水视为不可压缩流体,加热过程中水呈紊流流动;
- (2) 加热过程沼气池无料液进出;
- (3) 水的密度仅与温度有关;
- (4) 盘管厚度为零。

基于以上假设,螺旋管换热器在沼气池中的换热过程可以用以下连续性方程、雷诺 N-S 方程、能量守恒方程来描述。

连续性方程:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \tag{4.1}$$

$$\text{雷诺 N-S 方程: } \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = \text{div}(\eta \times \text{gradu}) + s_u - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = \text{div}(\eta \times \text{gradv}) + s_v - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = \text{div}(\eta \times \text{gradw}) + s_w - \frac{\partial P}{\partial z} \quad (4.4)$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial(pT)}{\partial t} + \text{div}(pTU) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{gradT}\right) + S_U \quad (4.5)$$

式中 U ——平均速度矢量, m/s;

u —— U 在 x 方向上的分量, m/s;

v —— U 在 y 方向上的分量, m/s;

w —— U 在 z 方向上的分量, m/s;

s ——包含除压力梯度和粘性力以外的其他所有力的影响, 包括重力, 重力方向为 z 方向, N;

ρ ——密度, kg/m^3 ;

P ——压力, Pa;

T ——温度, K;

t ——时间, s;

η ——动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

k ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

c_p ——比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

s_u, s_v, s_w ——守恒方程的广义源项。

4.3.3 模型建立

(1) 模型网格划分

利用 Fluent 软件配套的网格划分软件 Gambit 对两种换热器布置方式建模并进行网格划分。划分网格时采用非结构化网格, 这种网格对节点没有结构性限制, 几何灵活性好, 能够适应螺旋盘管比较复杂的几何结构, 从而生成较高质量的网格, 网格划分如图 4-5 所示。

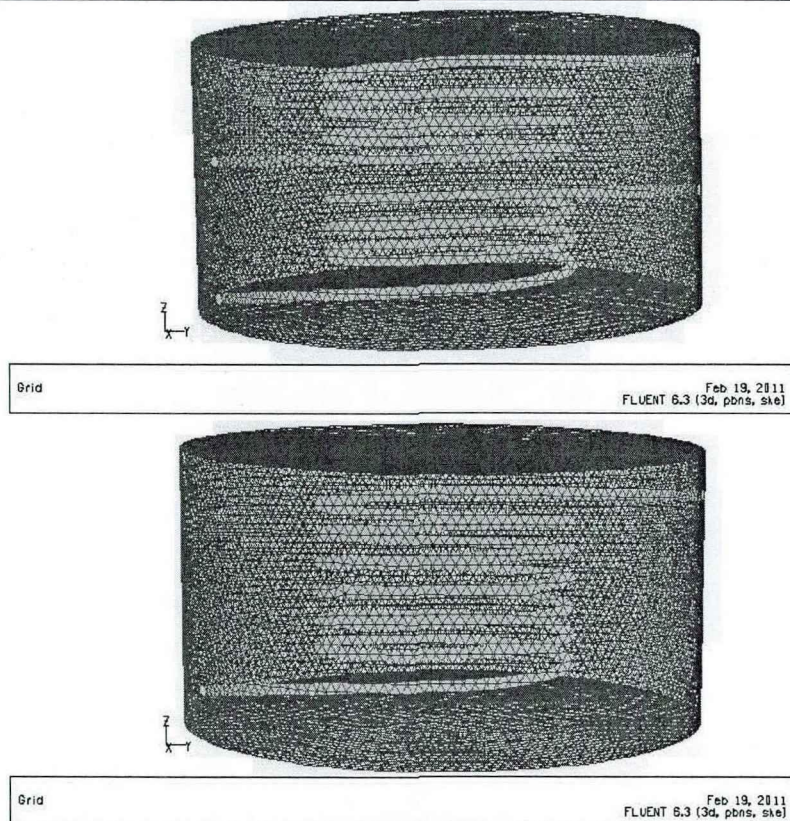


图 4-5 网格划分图

Figure. 4-5 Schematic diagram of net partition

(2) 边界条件设定

热物性参数：水的比定压热容 $c_p=4.182\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{k})$ ，导热系数 $\lambda=0.6\text{w}/(\text{m} \cdot \text{k})$ ，粘性系数 $\eta=0.0010013\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

水的密度和温度的函数关系式如下^[79]

$$\rho = -0.0038T^2 + 2.0098T + 733.76 \tag{4.6}$$

螺旋盘管换热器热水进口流速为 1.2m/s ，温度为 60°C ；出口为自由出流；盘管界面为普通耦合换热壁面。沼气池边界温度为 20°C ，料液初始温度 10°C 。

4.4 模拟结果及分析

4.4.1 截面温度分布

Fluent 软件中对于不可压缩流体采用分离式求解器，流场是不断的迭代来计算的，所以必须建立合适的收敛原则。本文建立的收敛准则为计算结束前控制方程的残差要低于 10^{-4} 的数量级，并且收敛过程相对稳定平滑。通过监视残差来判断是否达到收敛准则，

如图 4-6 所示即为本次模拟的一组收敛曲线，其中横坐标表示迭代次数，纵坐标表示残差数。

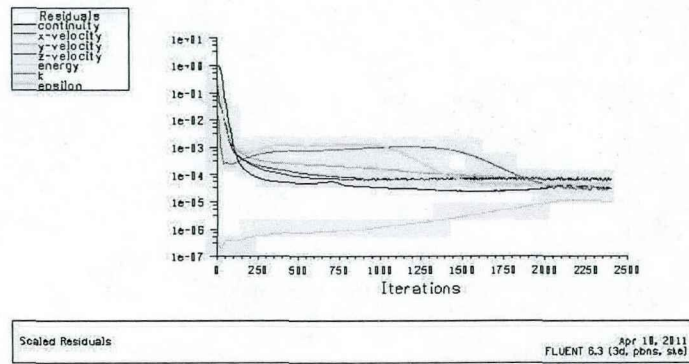


图 4-6 计算收敛曲线图

Figure. 4-6 the curve diagram of iteration convergence

螺旋盘管换热器表面温度分布如图 4-7 所示。螺旋管内水温随着换热的进行逐渐降低，进出口温差大约在 5℃左右。螺旋管内水温沿管长方向的变化曲线如图 4-8，图 4-9 所示，水温自螺旋管进口沿长度方向逐渐降低，第一种安装方式的螺旋管换热器出口温度为 52℃，采用分段安装的螺旋管加热器，其每组换热管排面积较小，出口温度略高，为 55℃。

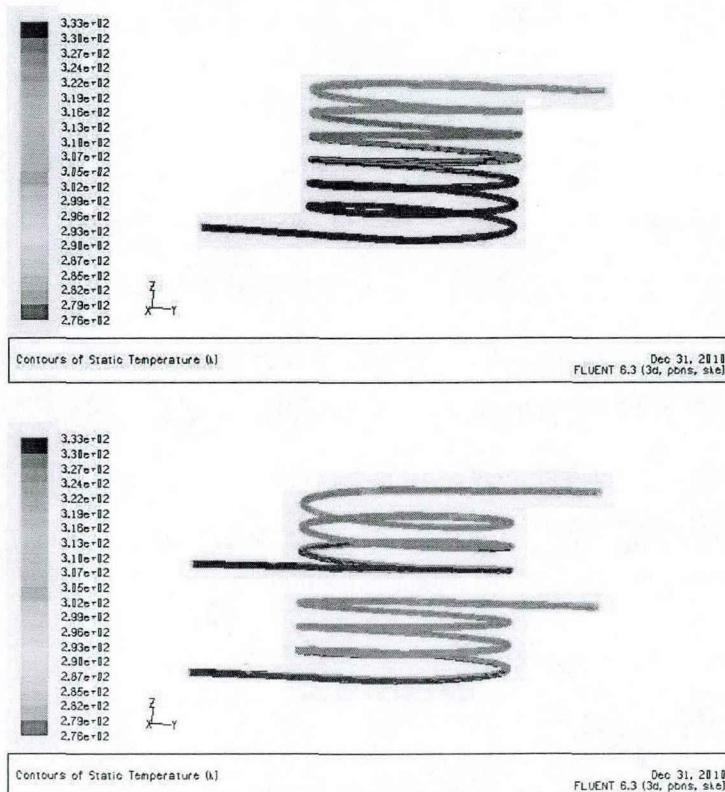


图 4-7 螺旋管内水温变化图

Figure. 4-7 the temperature change of water in helical coil

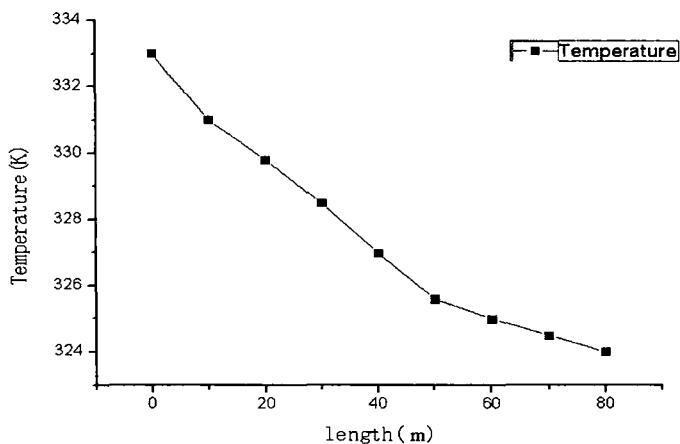


图 4-8 中间布置螺旋管内水温沿管长方向变化曲线

Figure. 4-8 the temperature change of water in central helical coil along the length

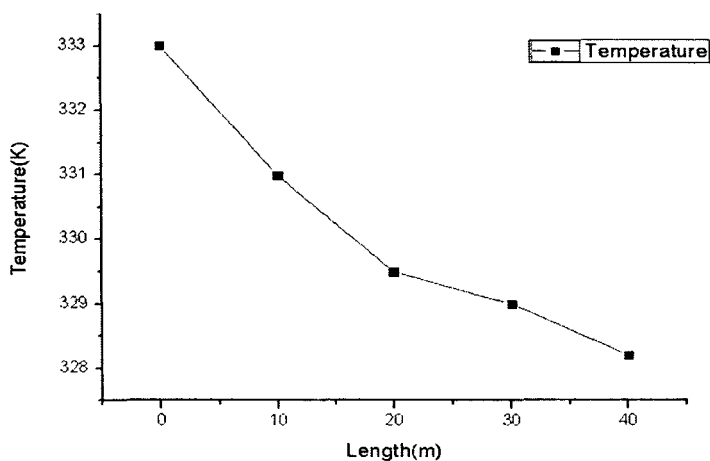


图 4-9 分段布置螺旋管内水温沿管长方向变化曲线

Figure. 4-9 the temperature change of water in segmented helical coil along the length

加热 15 小时后沼气池内部 x 方向截面上的温度分布如图 4-10 所示，料液温度随着加热的进行逐步升高，而且在截面上温度呈现明显分层，沼气池底部温度较低，顶部温度较高；采用单层安放方式的螺旋管换热器加热 15 小时后，沼气池表层温度可达 50℃，而螺旋管换热器分段布置的沼气池表层温度可达 52℃，可见螺旋管换热器分段布置方式提高沼气池温度更加迅速；在同一个截面上，温度变化不明显；采取分段安放换热器的沼气池温度分层更加均匀。

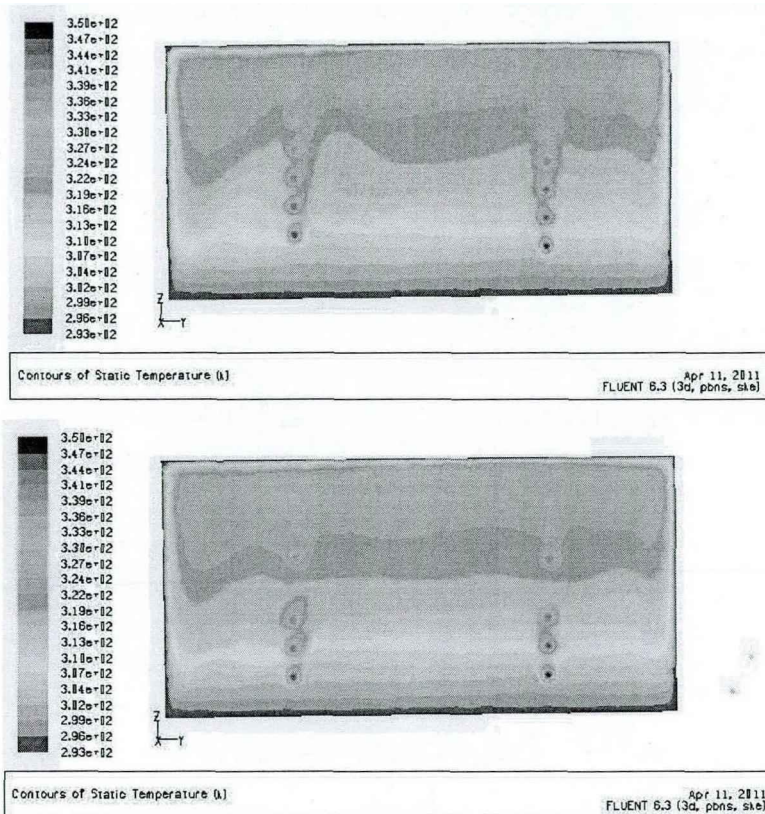


图 4-10 沼气池 x 方向截面上的温度分布图

Figure. 4-10 Section contour of temperature distribution in the X-plan of pool of biogas

螺旋盘管单层布置的沼气池加热 15 小时后内部温度比例如图 4-11 所示，螺旋盘管换热器分段布置的沼气池加热 15 小时后温度分布比例如图 4-12 所示。换热器分段布置的沼气池温度在 42℃到 52℃之间部分大约占 55%，换热器单层中央布置的沼气池温度在 42℃到 52℃之间部分约 50%，同时可以看出，分段布置的换热器加热沼气池低温部分（27℃以下）相比较小，这表明沼气池内部更多空间温度处于高温发酵范围内，发酵效果更好。

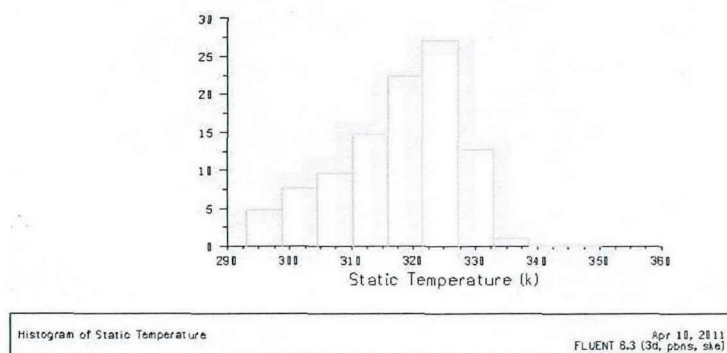


图 4-11 中间布置加热器的沼气池温度分布柱状图

Figure. 4-11 the bar chart of temperature distribution in the biogas pool with heater in the center

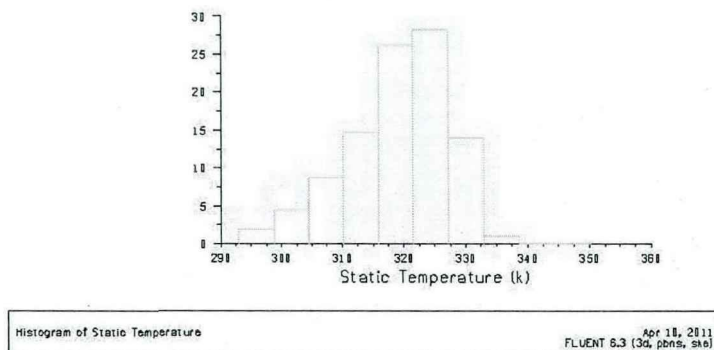


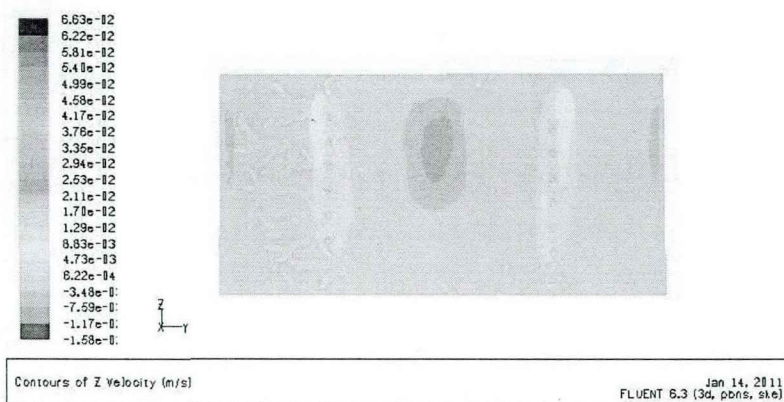
图 4-12 分段布置加热器的沼气池温度分布柱状图

Figure. 4-12 the bar chart of temperature distribution in the biogas pool with segmented heaters

4.4.2 截面速度分布

从图 4-13 中可以看出，无论采用哪种换热器布置方式，整个沼气池内部料液流速近似为零，沼气池中料液的运动是由于浮力不同导致的自然对流，靠近加热管壁的地方速度相对较大，最低流速位于沼气池侧壁和沼气池换热器中央。换热器分段布置的沼气池内部料液流动速度位于螺旋管换热器壁面附近，最大速度为 0.02m/s，换热器不分段的沼气池料液最大流动速度也位于螺旋管换热器壁面附近，最大流速为 0.015m/s。

因此在生产过程中为实现温度分布的更加均匀，需在池中布置相关的搅拌装置使料液实现流动，鉴于沼气池顶部的温度较高，底部温度较低，可采用液体搅拌方式^[10]，即将沼气池顶部高温沼液加压后通入沼气池底部，从而加强对流换热，改善温度的分层现象，提高沼气生产速率。



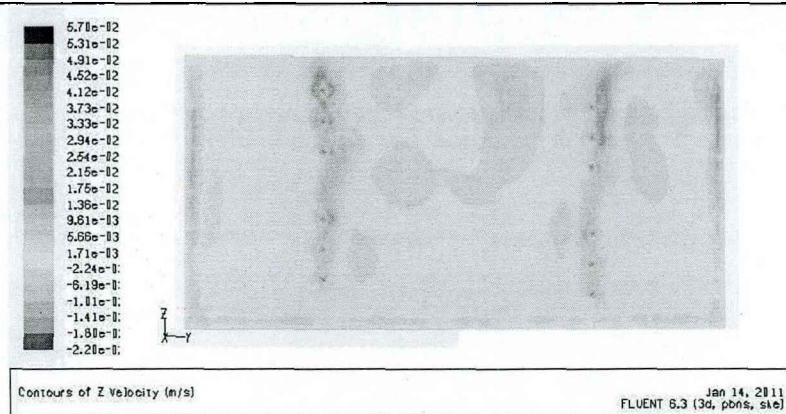


图 4-13 沼气池 x 截面上 z 轴方向速度分布图

Figure. 4-13 Section contour of Z-velocity distribution in the X-plan of pool of biogas

4.5 本章小结

本章建立了螺旋盘管式换热器加热沼气池的数学模型，利用 Fluent 软件对沼气池内温度场的分布情况进行了数值模拟。在 Fluent 软件的基础上，研究了在重力影响下螺旋盘管换热器加热过程中沼气池内料液的温度分布情况。比较分析了两种螺旋盘管管布置方式对加热过程的影响，模拟结果显示加热 15 小时后，分段布置的螺旋盘管换热器比单层布置换热器提高温度速度快，且温度分布更均匀，建议采用液体搅拌方式改善沼气池温度分层现象。

5 太阳能加热系统效益分析

在发电、制冷、采暖等领域开发利用太阳能，能够节省石油、煤炭等化石能源，缓解能源匮乏的威胁。但是，作为一种低功率密度的、间歇性不稳定的能源，它在收集、转换、贮存和利用都要一定的投资，另外，要获得一定数量的有用能量，需要较大的采光面积，这使的太阳能增温装置的初投资费用较大。而沼气作为一种可再生能源，发酵原料来源广泛，生产容易、经济，在能源、农业、卫生、生态环境等方面都有良好的效益。在生产过程中沼气发酵增温装置能够提高产气率，但相比于自然发酵的沼气池，增加增温装置也加大了系统的投资。所以，为确保投资的正确性和科学性，对太阳能增温装置进行经济性分析是十分必要的。

5.1 太阳能加热系统的环境效益分析

要考察太阳能加热系统的环境效益，只从系统自身的能耗上不能说明问题，要与其他沼气池加热方式比较才能看出其效益。本文以煤作为一次能源，电加热方式为比较对象，从系统总能耗和一次能源消耗量这两个方面比较分析太阳能加热系统的环境效益。

(1) 供热量

太阳能加热系统的循环热水负荷即沼气池需加热负荷，由式(3.16)可得系统设计热负荷为7803W，在实际生产中要考虑循环水泵的耗电，系统中循环水泵输入功率为90W，所以一天中总的能耗为2.160kWh

如果用电加热系统，供热量全部来自电能，取值100%电热转换效率，则电加热系统的功耗为 $W'=187.272\text{kWh}$ 。

(2) 系统的一次能源消耗

$$H = W' / (\eta_1 \cdot \eta_2) \quad (5.1)$$

式中 H ——系统一次能源消耗，kWh；

W' ——系统实际功耗，kWh；

η_1 ——发电效率，取值 35%；

η_2 ——输配电效率，取 91%。

(3) 一次能源利用系数

无论是太阳能加热还是其他的方式加热，都要消耗一次能源，一次能源利用系数能够反映不同加热方式的能量转化率。一次能源利用系数为获得的能量与获得该能量消耗的一次能源的比率。定义式：

$$E = Q_g / H \quad (5.2)$$

式中 E ——一次能源利用系数；

Q_g ——获得能量。

(4) 标煤替代量

$$T_{hce} = (H_2 - H_1) / H_{ce} \quad (5.3)$$

式中 T_{hce} ——标煤替代量，kg；

H_1 ——太阳能加热系统的一次能耗，kJ；

H_2 ——电加热系统的一次能耗，kJ；

H_{ce} ——标煤的发热值，取 29307kJ/kg。

(5) 节能率

根据一次能耗，以电加热方式的能耗为基础，能够得到太阳能加热系统的节能率。节能率计算如下

$$\phi = (H_2 - H_1) / H_2 \times 100\% \quad (5.4)$$

式中 ϕ ——系统节能率。

两种加热方式的各种节能效益指标结果如表 5-1 所示。

从表 5-1 中可以看出，相对于电加热系统来说，太阳能加热系统，一次能源利用系数较高，与电加热系统相比节能率能够达到 98%，每天可以减少标煤 72.2kg，一年可节省标煤约 26 吨，能减少 CO₂ 排放 88.4 吨，减少 CO 排放 3.5 吨，有着很好的环境效益 [80]。

表 5-1 各种节能效益指标计算结果

Table 5-1 the results of the indexes of energy efficiency

	太阳能加热系统	电加热系统
供热量 Q/kWh	187.272	
系统功耗 W/kWh	2.160	187.272
系统实际功耗 W/kWh	2.160	187.272
系统一次能耗 H/kWh	6.857	594.5
一次能源利用系数 E	27.3	0.32
标煤替代量 T_{hce}/kg	72.2	
节能率 $\phi/\%$	98	

5.2 太阳能加热系统的经济效益分析

基于热管理器的太阳能加热系统能够提高冬季沼气池的产气率，整个系统的初投资也要考虑。本文在不计设备折旧和环境效益的条件下，对系统进行经济性评价。

(1) 系统增加初投资

系统主要投资在于热管理器和太阳能加热系统，具体成本如下：

表 5-2 系统增加初投资表

Table 5-2 the investment of the system

项目	数量	单价	总价 (元)
太阳能集热器	81.2m ²	400 元/平方米	32480
热管理器	1 台		10000
换热管	81m	10 元/米	810
循环泵	2	200 元/台	400
总价			43690

太阳能加热系统总投资为 43690 元。

(2) 增产沼气受益

采用太阳能加热系统后，沼气发酵系统维持在高温发酵阶段，能大大提高产气量。增温后沼气池沼气增产量为

$$Q_{zc} = V \times (r_{V1} - r_{V2}) \tag{5.5}$$

式中 Q_{zc} —— 沼气增产量，m³/d；

V —— 沼气池容积，m³；

r_{V1} —— 沼气高温发酵容积产气率，m³/(m³·d)；

r_{V2} ——沼气常温温发酵容积产气率， $m^3/(m^3 \cdot d)$ 。

沼气池增产量经济效益

$$\Delta G = Q_{zc} \times a \tag{5.6}$$

式中 ΔG ——增产沼气受益，元/d;

a ——沼气价格，元/ m^3 。

计算结果如下：

表 5-3 增产受益列表

Table 5-3 the income of the increased production

	容积产气率 r_V	容积 V	增产量 Q_{zc}	沼气价格 a	年增产收益
高温发酵	1.9	94	141	0.4 ^[81]	20586
常温发酵	0.4				

(3) 投资回收期

$$N = \frac{\Delta K}{\Delta G_n} \tag{5.7}$$

式中 ΔK ——系统增加初投资，元;

ΔG_n ——系统年增产效益，元。

可得 $N=2.1$ 年，即不到三年即可收回全部成本。

5.3 本章小结

基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气装置能提高沼气产气率，整个加热系统增加了系统的初始投资。本章以煤作为一次能源，电加热方式为比较对象，从系统总能耗和一次能源消耗量这两个方面比较分析了太阳能加热系统的环境效益。结果表明太阳能加热系统一次能源利用系数高，节能率相比可达 98%，环境效益好。

同时，本章在不计设备折旧前提下，对系统进行了经济性评价。结果表明该系统有较好的经济效益，该系统在满足用户需求的前提下，不到三年就能全部收回成本。

6 总结与展望

太阳能与沼气这两种可再生能源在我国的能源利用结构中担当着非常重要的角色,随着能源危机的加剧,这两种能源也越来越受到人们的重视,我国的太阳能和沼气产业也得到了快速的发展。但太阳能和沼气的开发利用中也出现了一些问题。在利用过程中,太阳能受季节和天气的影响不能忽略,同时,由于太阳能是一种低密度的能源,利用过程中要使用较大面积的集热器,增加了系统的投资。而沼气的生产受温度等条件影响非常明显,在我国北方寒冷地区沼气的生产受到了抑制,产气率较低,推广受到了影响。

本文针对我国北方严寒地区沼气池受低温天气影响产气率低甚至池体冻裂的现象,提出了太阳能加热沼气发酵料液高效制取沼气系统。在太阳能加热系统中,利用热管理器稳定加热负荷,改变了太阳能利用过程中集热器热负荷不稳定的情况。同时,沼气锅炉作为辅助热源,解决了夜间和长时间阴雨天气造成的太阳能加热负荷不足的问题。所设系统能保持沼气发酵温度在 52°C 左右,处于高温发酵范围内,大大提高了沼气产气率。

本文建立了基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统数理模型,对系统关键部件进行了设计计算;利用 Fluent 软件模拟了沼气池加热器安装位置对沼气池温度场的影响情况,并以此为基础设计了分段布置的沼气池螺旋盘管加热器。同时,对重力影响下的沼气池加热过程进行了模拟,得出以下结论:

(1) 基于热管理器的太阳能加热制取沼气系统在北方寒冷地区是可行的。该系统能充分利用北方太阳辐射热量,提高沼气池发酵温度;同时,热管理器能起到稳定加热负荷,保持沼气发酵温度处于高温发酵范围内,大大提高了沼气池的产气率。

(2) 在系统的设计计算中,本文根据最不利的气象条件来计算加热系统中集热器的面积,保证了系统的可靠性和稳定性。对于 94m^3 的沼气池,配套 81.2m^2 的平板型太阳能集热器,能够保持沼气池发酵温度维持在 52°C 高效发酵温度范围内。

(3) 沼气池中加热器的布置方式直接影响沼气池内温度的分布,在生产安装过程中,要考虑加热器的安装方式。模拟结果显示分段布置的螺旋管加热器能更好的改善沼气池内部温度的分布情况,提高沼气池升温速率,同时沼液温度分布更均匀。

(4) 在重力影响下,沼气池内发酵料液温度出现明显分层现象,上层温度较高,

底部温度较低。温度分层导致沼气生产速率不均，要采取搅拌方式改变这一现象。

本课题的主要工作是基于热管理器的太阳能加热系统初步设计、计算和沼气池温度场的模拟。通过对整个系统的计算和模拟后，该加热系统在以下几个方面有待于进一步的研究探索：

(1) 设计合理的沼气池保温方案，优化保温层厚度及经济性；

(2) 热管理器详细结构的设计和运行参数管理；

(3) 深入分析气温和池体周围土壤对沼气池温度的影响，科学计算沼气池热负荷，提供设计依据；

(4) 考察搅拌方式对沼气池产气率的影响特性。

目前，世界能源发展已经进入一个崭新的时期，能源结构也呈现出多元化发展的趋势，化石能源的减少和人们对环境保护的进一步重视，必将使新能源、可再生能源得到快速的发展。随着科技的发展和研究的进一步深入，作为可再生能源，太阳能和沼气能源前景广阔，潜力巨大。

参考文献

1. 常振明, 韩平, 曲春洪. 可再生能源利用现状与未来展望[J]. 当代石油石化, 2004, 12(12): 19~23.
2. Liu Ying. Investigation report of Germany biogas technology[J]. China Bioga, 2001, 19(4): 41~43.
3. 陈剑锋. 寒地乡村太阳能沼气开发利用现状[J]. 黑龙江科技信息, 2007, (8).
4. 丁国华. 太阳能建筑一体化研究、应用及实例[M]. 中国建筑工业出版社, 2007.
5. 郑元景, 杨海林, 藺金印. 有机废料厌氧发酵技术[M]. 化学工业出版社, 1998.
6. Porsche G. The impact of national policies and economic frames for the development of biogas in Germany[A]. Proceedings of The future of biogasin Europe-III[C]Denmark Esbjerg:University of Southern Denmark, 2007, 44-50.
7. John Stumbos. Methane generators turn agricultural waste into energy. California Agriculture. 2001, 55(5): 8~9.
8. 孙孝政, 夏吉庆, 田晓峰. 厌氧发酵技术工厂化生产沼气的现状及展望[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(1): 109~112.
9. 王士芬, 夏群. 城市粪便处理技术及方法[J]. 环境卫生工程, 2000, 8(1): 14~16.
10. Lawrence A W, Mccarty P L. Kinetics of Methane Fermentation in Anaerobic Treatment [J].Water Poll Cont, 2002, 41(1): 1~17.
11. Chou WL, Speece RE, Siddiqi RH. Acclimation and Degradation of Petro Chemical Waste Components by Methane Fermentation [J]. Biotech and Bioeny Symp, 2003: 391~414.
12. Bhattacharya, SK. Parkin. Toxicity of Nickel in Methane Fermentation Systems Fate and Effect on Process Kinetics [J]. Int'L conf on Innovative Biological Treatment of Toxic Waste Waters. Arlington UA, 2001: 225.
13. Bionot RA et al. Biotech Let. 1981, (2): 623~628.
14. Edwards. Apply Environ. Microbiol, 2002, 46(29): 540~545.
15. Buswell J A, E. Lignin Biodegration. CRC Crit Rev Biotechnol [M], 1999.
16. 张树政, 黎膏翔, 王惠莲. 白地霉的戊糖代谢—— I .木糖代谢的初步变化途径[J].

- Acta Biochimica et Biophysica Sinica, 1962, (4).
17. 张树政, 杨廉婉. 白地霉的氧化代谢[J]. 微生物学报, 1963, (4).
 18. 育年. 沼气的用途[J]. 可再生能源, 1987, (1).
 19. 谌斌, 刘庆业, 刘明登. 酒精废水发酵生产白地霉[J]. 生物技术, 2001, (6).
 20. 贾振航. 新农村可再生能源实用技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009, 246.
 21. 钱伯章. 沼气的国内外开发利用进展[EB/OL]. www.in-en.com. 2010. 322.
 22. 庞云芝, 李秀全. 中国沼气产业化途径与关键技术[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 53~55.
 23. 魏兆凯, 刘凯等. 沼气池太阳能增温技术研究[J]. 农机化研究, 2009, 5: 212~216.
 24. 徐祯祥. 太阳能沼气池[P]. 中国专利, 专利号申请号 03245701.4. 2004-12-15.
 25. 长沙华美化工有限公司. 太阳能沼气罐耐水性差技术难点及解决办法
www.cshmhg.com.cn.
 26. 张全国, 徐广印, 杨群发等. 户用钢制辅热式沼气发酵系统试验研究[J]. 太阳能学报, 2004, (6).
 27. 韩广伟. 太阳能沼气反应罐温度控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2008, 11: 213-215.
 28. 李传峰, 徐小明. 新型太阳能恒温沼气反应装置的运行试验分析[J]. 农机化研究, 2010, 1: 170~172.
 29. 党金霞, 翟国勋等. 寒区高效小型沼气工程的设计与试验[J]. 农机化研究, 2009, (2): 208~210.
 30. 田德宁, 彭发基. 高寒地区辅助燃烧式沼气池建造技术[J]. 青海科技, 2009, (1): 20~22.
 31. 庞凤仙, 崔彦如等. 北方寒冷地区沼气池增保温研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(31): 17836~17841.
 32. 刘荣厚, 王远远, 孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 116-121.
 33. 孙静, 郑茂余, 吴飞. 严寒地区利用太阳能加热制沼气的试验研究[J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 46~49.
 34. 赵金辉, 谭羽非, 白莉. 寒区太阳能沼气锅炉联合增温沼气池的设计[J]. 中国沼气, 2009, 27(3): 34~35.

35. 郑爱平, 张旭. 太阳能沼气池[J]. 建筑节能, 2008, 36(4): 58~60.
36. K.J.Chae, Am.Jang, S.K.Yim. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields form the mesophilic anaerobic digestion of swine manure[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(1): 1~6.
37. 刘建禹, 樊美婷, 刘科. 高寒地区沼气发酵料液加热增温装置传热特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 298~301.
38. 张书荣, 岳建枝等. 不同处理麦秆厌氧发酵产沼气实验[J]. 中国沼气, 2010, 28(4): 21~23.
39. Psiloglou B E, Balaras A, Santamouris M, et al. Evaluation of different radiation and Albedo models for the prediction of solar radiation incident on tilted surfaces for four European locations[J]. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 1996, 118(3): 786~801.
40. 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 中国建筑工业出版社, 1986, 6~12.
41. 王炳忠. 太阳能辐射计算讲座第五讲地表斜面上辐射量的计算[J]. 太阳能, 2000, (3): 20~21.
42. 青岛市情网. <http://qpinet.qingdao.gov.cn/shizhi.nsf/qixiang?OpenView&Start=1>.
43. 杨建华. 郑州地区全玻璃真空管太阳能热水器的综合评价[J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2004, 13(3): 89~90.
44. 郑瑞澄. 太阳能低温热水地板辐射采暖[J]. 太阳能, 2000, (1): 14~15.
45. 赵玉兰, 张红等. CPC 热管式真空管集热器的集热效率研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(9): 1022~1025.
46. 何梓年, 蒋福林等. 热管式真空管集热器的热性能研究[J]. 太阳能学报, 1994, 1(15): 73~82.
47. 何梓年. 金属吸热体真空管集热器的种类、特点及现状[J]. 太阳能, 1997, (3): 14~16.
48. 万翼, 陈宁等. 平板集热器性能实验及改进措施[J]. 能源技术与管理, 2006, (5): 52~53.
49. 赵春江, 王恒龙. 新型平板式集热器的设计和性能[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(10): 1656~1659.
50. 江希年. 平板太阳能集热器如何从受冷遇迈向发展[J]. 太阳能, 2006, (06): 12~13.

51. 常振明, 韩平, 曲春洪. 可再生能源利用现状与未来展望[J]. 当代石油石化, 2004, 12(12): 19~23.
52. Liu Ying. Investigation report of Germany biogas technology[J]. China Biogas, 2001, 19(4): 41~43.
53. M. P. Bryant. Nutrient Requirement of Methanogenic.Bacteria Advances in Chemistry Series[M]. 1977, 98~99.
54. Ali.R.Tekin, A.Coskun Dalgic. Biogas production from olive pomace[J]. Resources Conservation and Recycling. 2000, (30): 301~313.
55. John Stumbos. Methane generators turn agricultural waste into energy[J]. California Agriculture. 2001, 55(5): 56~58.
56. 钟贤烈. 农村沼气[M]. 农业出版社出版, 1983, 22~41.
57. Hardik Patel, Datta Madamwar. Effects of temperature and organic loading rates on biomethanation of acidic petrochemical wastewater using an anaerobic upflow fixed~film reactor[J]. Bioresource Technology, 2002, (82): 65~71.
58. 卞有生. 生态农业中废弃物的处理与再生利用[M]. 化学工业出版社, 2000, 211~216.
59. 周孟津, 张榕林, 阚金印. 沼气实用技术[M]. 化学工业出版社, 2005, 10~29.
60. 张典, 田晓东等. 提高沼气发酵温度的技术措施分析[J]. 长春工业大学学报, 2007, 28: 182~185.
61. 卢永川. 沼气工程设计[M]. 农业出版社, 1987, 27~30.
62. 沈德安. 寒区户用沼气池联合太阳能增温系统研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2008.
63. Bello-Mendoza R, Sharratt P N. Compartment mixing model for anaerobic digesters with central draft-tubes[J]. Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 1999, 146: 383~394.
64. Borole Abhijeet P, Klasson K Thomas, Ridenour Whitney, et al. Methane production in a 100-L upflow bioreactor by anaerobic digestion of farm waste[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2006, 131(1/2/3): 887~896.
65. Gomez X, Cuetos M J, Cara J, et al. Anaerobic codigestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes conditions for mixing

- and evaluation of the organic loading rate[J]. *Renew Energy*, 2006, 31 (12): 2017~2024.
66. 吴创之, 马隆龙. 生物质能现代化利用技术[M]. 化学工业出版社, 2003, 27.
67. 王福全等. 寒地沼气池温控系统研究[J]. *森林工程*. 2009, 25(6): 46~48.
68. M E M Hamed, Z Grietje, K P. Wilko, et al. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(2): 191-201.
69. 皇甫艺, 吴静怡, 王如竹等. 一种控温热管理器的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(3): 361~364.
70. 中国农业大学, 上海农业广播学校. 华南农业大学等畜粪便学[M]. 上海交通大学出版社, 1997, 78~85.
71. 赵恒斗. 规模化养猪的污水产生治理与综合利用[J]. *中国沼气*, 1996, 14(3): 30~32.
72. 李金平, 岳华等. 三级恒温沼气热电联供系统性能分析[J]. *中国沼气*, 2009, 27(6): 17~21.
73. 朱建湘. 全混和上流式厌氧污泥床反应器的研究[J]. *中国沼气*, 1994, 12(3): 28~30.
74. 徐洁全. 规模畜禽场沼气工程发展和效益探讨[J]. *中国沼气*, 2000, 18(4): 27~30.
75. 方仁生. 大型猪场废水处理技术与应用[J]. *中国沼气*, 1998, 16(4): 39~41.
76. 于海明, 周明等. 高效生物膜反应装置中加热恒温系统的设计[J]. *农机化研究*, 2006, 11: 187~189.
77. 杨世铭, 陶文栓. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
78. 陈志光, 秦朝葵, 戴万能. 螺旋管传热系数实验研究和温度场数值模拟[J]. *煤气与热力*, 2010, 30(1): 16~18.
79. 熊珍琴, 王如竹等. 基于 fluent 软件的热泵热水器水箱温度场数值模拟[A]——第四届全国空调制冷新技术研讨会论文集[C]. 2006, 734~737.
80. 马晓茜. 我国燃煤发电节能的意义与途径[J]. *能源技术*, 1995, (04): 19~21.
81. 施俊. 农村沼气价格的重新确定[J]. *江西农业学报*, 2001, 13(4): 55~57.

致 谢

本文是在孔祥强副教授的悉心指导下完成的。在三年研究生学习期间，导师渊博的学识、严谨求实的治学作风、勤奋敬业的精神，一直激励着我努力学习、潜心研究。在论文的撰写阶段，导师倾注了大量的精力，花费了许多宝贵的时间，给予了细致认真的检查和指导。值此论文完成之际，特向尊敬的导师表示诚挚的感谢和崇高的敬意！

衷心感谢实验室杨前明教授。杨教授在研究生学习方法上给予了大量的指导，这使我受益匪浅。

感谢已毕业的张东师兄、李华师姐。他们在学习上给我树立了良好的榜样，在生活上给予我很多的支持和帮助。

感谢实验室的同学、师弟师妹们。感谢他们研究生生活中给予的关心和帮助。

感谢硕博 08-12 班的同学们，和他们共同度过了丰富充实的三年研究生生活。

最后我还要感谢养育我含辛茹苦的父母，是他们的大力支持，让我可以顺利完成三年的学业，在此，对他们表示我最深的感谢！

燕纪伦
2011 年 5 月

攻读硕士学位期间从事的科学研究及发表论文情况

1) 参与科研项目

(1) 山东省科技发展计划资助项目(2009GG20007011)——中低温太阳能热化学制沼气与发电联产系统研究,2010年1月—2011年5月。主要工作:太阳能加热制取沼气系统研制,仿真模拟。

(2) 淄博矿业集团岱庄煤矿项目:综合利用机组新型高效循环水系统的研发应用,2008年5月—2009年5月。主要工作:冷却塔优化改造分析。

(3) 胶南易通热电项目:热电联产系统技术分析和节能改造技术研究,2009年10月—2010年3月。主要工作:电动泵改汽动泵节能改造。

(4) 山东科技大学研究生创新基金项目(YCA100328):基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气系统研究。

2) 发表的学术论文、申请专利

(1) 孔祥强,燕纪伦,林琳等.太阳能加热高效制取沼气系统的设计与分析.可再生能源,2011,29.

(2) 孔祥强,燕纪伦,林琳等.一种基于热管理器的太阳能加热高效制取沼气装置,专利申请号:201020272326.7.

(3) 王晓明,马法杰,燕纪伦等.自走式玉米去雄机液压系统的设计.流体传动与控制,2011,3.