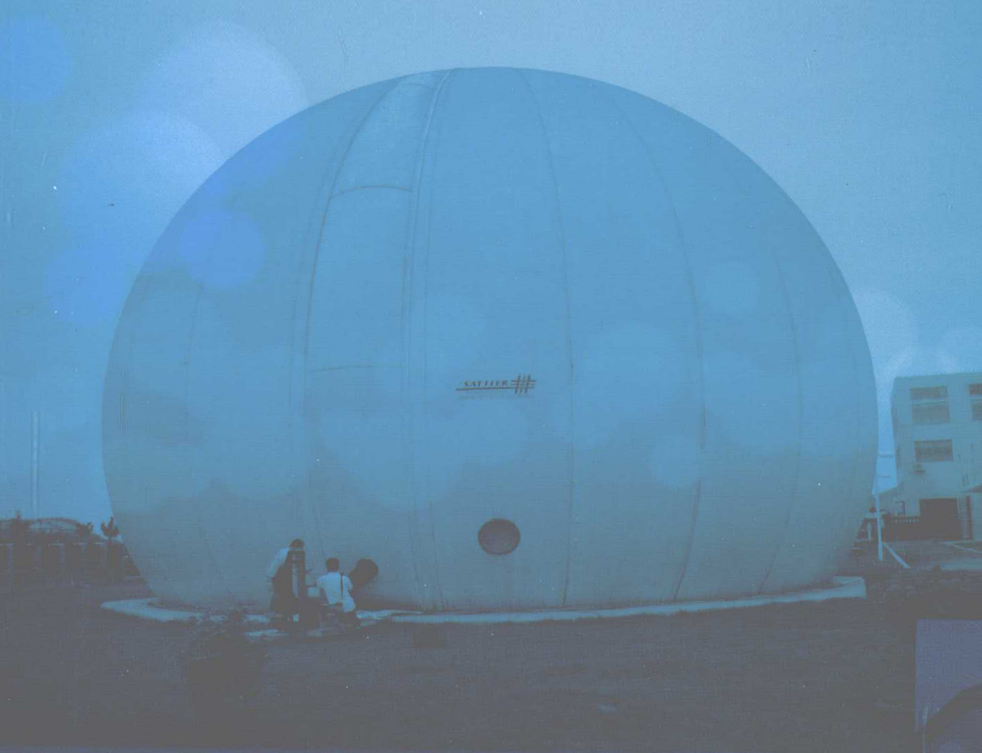




大中型沼气工程 设计与应用

唐艳芬 王宇欣 主编



化学工业出版社

大中型沼气工程 设计与应用

唐艳芬 王宇欣 主 编
刘志丹 崔秋娜 周 涛 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书结合我国沼气工程建设实际,详细阐述了大中型沼气工程设计和实践中涉及的诸多方面,包括厌氧发酵原理、工艺类型、工艺参数、工程装备、沼气的贮存与净化、燃气输配、工程产物利用和运行管理等,并且在阐述具体技术特点时,辅以设计案例和大量图表,内容丰富、资料详实、图文并茂,实用性强,便于读者掌握。

本书适用于环境工程、生态农业、能源与动力工程、工业与民用建筑等专业人士参考,也可作为沼气工程技术人员、研究人员、管理人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大中型沼气工程设计与应用/唐艳芬,王宇欣主编.

北京:化学工业出版社,2013.2

ISBN 978-7-122-16376-9

I. ①大… II. ①唐…②王… III. ①沼气工程

IV. ①S216.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第011944号

责任编辑:尤彩霞

装帧设计:张辉

责任校对:吴静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

850mm×1168mm 1/32 印张5½ 字数142千字

2013年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:25.00元

版权所有 违者必究

本书编委会

主 编 唐艳芬 王宇欣

副主编 刘志丹 崔秋娜 周 涛

编 委 (排名不分先后)

卢海凤 段 娜 周 涛 焦江波

邓 健 王平志 李丽国 李启凤

崔秋娜 刘志丹 唐艳芬 王宇欣



前言

随着能源紧缺和环境污染的日益严峻,能源利用多元化和寻求可替代的清洁能源已成为世界各国重要的能源发展战略。作为可再生能源生产的重要组成部分的大中型沼气工程近年来在我国得到了长足发展,工程建设的规模和数量不断扩大。同时,沼气工程也是实现农业废弃物资源化利用和减少环境污染的重要途径,但和欧美等技术发达国家相比,我国沼气工程技术发展水平还存在一定的差距。加快大中型沼气工程新技术、新装备的研发,有利于推动我国能源科技进步和产业发展、提高能源利用效率、减少温室气体排放、保护环境、实现经济和社会的可持续发展。

本书全面系统地介绍了大中型沼气工程的设计技术理论和应用实践,主要内容包括大中型沼气工程厌氧消化的原理和影响因素、沼气发酵的工艺类型、厌氧反应器的设计、沼气的存储与净化、沼气的输配和利用、沼渣、沼液的资源化利用和沼气工程案例等。

本书由多年从事能源技术研究和沼气工程实践、经验丰富的专家和学者编写完成,内容丰富、资料详实、技术可靠、结构严谨、论述清晰、图文并茂,具有较强的实用性。

本书适用于环境工程、生态农业、能源与动力工程、工业与民用建筑工程等专业师生阅读,也可作为参考用书供沼气工程技术人

员、研究人员和管理人员使用。

鉴于作者水平有限，恳请各位专家和广大读者批评指正，以便今后不断修订、补充和完善。联系方式：E-mail: meller@163.com。

编者
2012 年 12 月



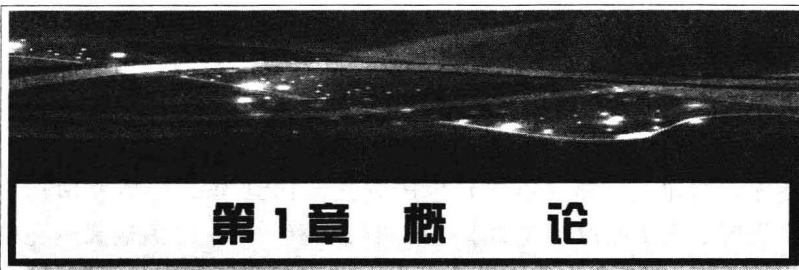
第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 我国沼气工程的发展历程	1
1.3 欧美沼气工程技术和特点	3
1.4 厌氧反应器的主要工艺类型	4
1.5 我国沼气工程发展中存在的问题和解决途径	5
第 2 章 沼气厌氧发酵的原理和影响因素	7
2.1 沼气发酵的原理	7
2.1.1 沼气发酵过程	8
2.1.2 沼气发酵的热力学问题	13
2.1.3 沼气发酵过程的其它竞争性反应	14
2.1.4 厌氧发酵过程中微生物之间的关系	14
2.2 沼气发酵的影响因素	15
2.2.1 营养物质	15
2.2.2 温度	16
2.2.3 停留时间	18
2.2.4 pH 值和碱度	18
2.2.5 物料搅拌	19
2.2.6 毒性物质	20
2.2.7 启动	21
2.2.8 物料负荷	22
2.3 发酵原料	22
2.3.1 粪液混合物料	23

2.3.2	城市污泥	24
2.3.3	生活垃圾	24
2.3.4	工业有机废水	25
2.3.5	农林废弃物	25
2.3.6	城市粪便	26
2.3.7	油脂及其它物料	26
2.4	沼气发酵的过程监测	27
2.4.1	沼气发酵监测的关键参数	27
2.4.2	沼气发酵监测相关生物传感器	30
第3章	沼气发酵的工艺类型	32
3.1	沼气工程规模分类和工艺流程	32
3.1.1	沼气工程规模分类	32
3.1.2	大中型沼气工程工艺流程	32
3.2	厌氧反应器工艺设计	36
3.2.1	沼气工程产气量估算	36
3.2.2	厌氧反应器的负荷和容积	38
3.2.3	厌氧反应器的系统组成	41
3.3	畜禽养殖排污量及发酵原料预处理	46
3.3.1	畜禽养殖产污系数	46
3.3.2	畜禽养殖排污系数	47
3.3.3	规模化养殖场废水产生系数	47
3.3.4	发酵原料预处理	48
3.3.5	厌氧反应器的启动和接种物	49
3.4	沼气厌氧反应器的主要类型	49
3.4.1	升流式厌氧污泥床 (UASB)	49
3.4.2	内循环厌氧反应器 (IC)	51
3.4.3	升流式固体反应器 (USR)	53
3.4.4	全混合厌氧反应器 (CSTR)	55
3.4.5	塞流式厌氧反应器 (PFR)	56
第4章	沼气厌氧反应器的设计	58
4.1	沼气工程的规划和平面布置	58

4.1.1	项目选址的具体原则	58
4.1.2	发酵工艺流程考虑的因素	59
4.1.3	沼气站的平面布置	60
4.1.4	沼气站构筑物的高程布置	61
4.2	钢筋混凝土厌氧反应器	62
4.2.1	钢筋混凝土厌氧反应器外部尺寸	62
4.2.2	厌氧反应器基础设计	63
4.2.3	厌氧反应器的计算简图	64
4.2.4	荷载组合	66
4.2.5	钢筋混凝土厌氧反应器内力计算步骤	66
4.2.6	厌氧反应器的抗浮问题	67
4.2.7	钢筋混凝土厌氧反应器构造设计	67
4.2.8	钢筋混凝土厌氧反应器配筋设置	69
4.3	利浦 (Lipp) 罐厌氧反应器	70
4.3.1	利浦制罐技术的特点	70
4.3.2	利浦制罐设备	71
4.3.3	利浦罐反应器的施工方法	71
4.4	搪瓷钢板厌氧反应器	73
4.4.1	搪瓷钢板	74
4.4.2	搪瓷材料	75
4.4.3	涂搪方法	76
4.4.4	搪瓷拼装罐罐壁的强度计算方法	76
4.4.5	搪瓷拼装厌氧反应器罐体的施工安装	76
4.5	红泥塑料沼气池	79
4.5.1	红泥塑料的特点	79
4.5.2	红泥塑料沼气池设计	80
4.6	一体化沼气池	82
4.6.1	膜材结构	82
4.6.2	双膜结构一体化沼气池的组成和主要特点	84
第5章 沼气的存储与净化		88
5.1	沼气的成分与燃烧性能	88

5.1.1	沼气的燃烧	88
5.1.2	沼气的热值	88
5.1.3	沼气的折标系数	89
5.1.4	理论空气需要量和空气过剩系数	89
5.1.5	沼气的燃烧产物和烟气量	90
5.1.6	着火温度和燃烧速度	90
5.1.7	爆炸极限	91
5.2	低压湿式储气柜	91
5.2.1	气柜布置的一般要求	91
5.2.2	低压湿式储气柜	92
5.2.3	湿式气柜配重设计计算	96
5.2.4	气柜附属物设计要求	97
5.3	干式储气柜	98
5.3.1	刚性结构干式储气柜	98
5.3.2	柔性干式储气柜	102
5.4	沼气的脱水与脱硫	103
5.4.1	沼气的脱水	104
5.4.2	沼气的脱硫	108
第6章	沼气输配和利用	115
6.1	大中型沼气工程燃气需用量及供需平衡	115
6.1.1	燃气需用量	115
6.1.2	燃气的需用工况	118
6.1.3	输配系统的供需平衡	119
6.2	大中型沼气工程燃气输配系统的组成	122
6.2.1	大型沼气工程燃气输配系统的组成	122
6.2.2	建筑燃气供应系统	124
6.2.3	沼气管道及其附属设备	126
6.3	大中型沼气工程输配系统的设计	130
6.3.1	沼气输配管网系统的选择	130
6.3.2	沼气输配管网系统的布线	131
6.3.3	大中型沼气工程输配系统的设计计算	135

第7章 沼渣沼液的资源化利用和沼气工程案例分析	143
7.1 沼渣沼液的综合利用	143
7.1.1 沼渣造粒工艺	143
7.1.2 沼渣颗粒肥生产工艺	145
7.1.3 沼液的综合利用	146
7.1.4 沼液的浓缩	147
7.2 沼气工程的运行管理	149
7.2.1 相关工程设备检测	149
7.2.2 接种物选取、驯化	149
7.2.3 进料管理	150
7.2.4 出料管理	150
7.2.5 沼气工程冬季运行管理	150
7.2.6 工程维护管理	151
7.3 Synergy 奶牛场沼气工程案例分析	151
7.3.1 工艺特点	151
7.3.2 系统参数	153
7.3.3 沼渣处理	154
7.3.4 沼气工程经济与效益分析	154
7.4 北京德青源沼气发电工程案例分析	155
7.4.1 工程简介	155
7.4.2 工艺特点	156
7.4.3 工程效益分析	157
参考文献	158



第1章 概论

1.1 引言

沼气是有机物在一定温度、湿度、酸碱度和厌氧条件下，通过微生物发酵作用产生的一种以甲烷为主的可燃混合气体。沼气工程是以厌氧消化为主要技术环节，集粪污处理、沼气生产、资源化利用为一体的系统工程。由于沼气工程是多学科相互交叉与集成的工程技术，涉及微生物、化工、建筑、结构、材料、电气、给排水等诸多领域。

当前，作为可再生能源重要组成部分的大中型沼气工程受到社会各界的广泛关注和重视。例如，2009年我国畜禽养殖业粪便排放总量为32.64亿吨鲜重，其中BOD、COD含量分别达7273.95万吨和8039.96万吨，COD是全国工业排放量的5倍多。全国农用地畜禽粪便负荷为 $26.8\text{t}/\text{hm}^2$ ，农业废弃物污染已经成为我国重要的污染源，严重影响生态环境、居民生活和身体健康。大中型沼气工程作为我国农业废弃物处理和农村生物质能源高效利用的一种方式在我国得到了快速发展。通过厌氧发酵，不仅有效地消除了有机物污染和病源危害，而且生产了清洁能源和有机肥料，真正实现了农业废弃物的资源化利用。对于改善生态环境，解决农村用能和养殖业污染等问题都有重要意义。

1.2 我国沼气工程的发展历程

我国很早就有开发和利用天然气（沼气）的文献记载，公元

前一世纪的西汉，就已钻凿了人类第一口天然气井——临邛（四川邛崃）火井，用于熬制食盐及炼铁。1890年，我国云南洱海湖农民用天然湖泊沼气——“南园火苗”点灯煮饭。19世纪末，我国广东潮梅一带民间开始了人工制取瓦斯的试验，建立了简陋的瓦斯库，初知了瓦斯（沼气）生产方法。1921年，台湾罗国瑞先生发明了人工制取沼气的水压式沼气装置——中华国瑞天然瓦斯库，并于1929年在广东汕头开办了“国瑞瓦斯气灯公司”。1931年罗国瑞又在上海开办了“中华国瑞天然瓦斯全国总行”，并在全国各地设立了10多家分行，沼气利用普及到中国13个省。当时我国绝大多数城镇缺乏电力供应，制取沼气的主要目的是用于生活照明。

1958年开始至1970年代初，为了解决农村的炊事燃料问题，我国的沼气事业发展达到第二次高潮，全国很多地方着力兴建沼气池。由于缺乏有效的管理和条件限制，对发酵工艺的影响因素缺乏更深入的研究，导致很多沼气池难于持续利用。

1970年代末开始，我国沼气厌氧微生物发酵技术的研究取得了显著进展，同时通过引进、消化国外厌氧发酵的先进技术，逐步积累了户用水压式沼气池建设管理经验，使我国户用沼气建设步入健康稳步发展的阶段。

2005年颁布的《中华人民共和国可再生能源法》明确强调要加强农村沼气建设，为我国沼气事业的发展提供了可靠的政策支持和机制保障，沼气技术与农业生产紧密结合起来。经过多年的建设实践，我国形成了以南方“猪——沼——果”、北方“四位一体”、西北“五配套”等农村沼气发展模式。

近年来，我国沼气工程建设事业进入了快速发展时期。大中型沼气工程建设数量不断扩大、投资结构不断优化、服务体系逐步健全。根据统计部门有关资料，到2010年底，我国沼气用户已超过4000万户。沼气工程总计约73032处，其中大型沼气工程4963处、中型沼气工程22795处、小型沼气工程45259处；目前，年产

沼气总量 142.6 亿立方米，折合标准煤 2500 万吨，可减排二氧化碳 5000 多万吨。

1.3 欧美沼气工程技术和特点

欧洲沼气工程规模大、机械化和自动化程度高、经济效益明显，代表了当今世界沼气工程的先进水平。以德国为例，2009 年沼气工程达 4600 多座，占整个欧洲沼气工程数量的 80%。德国沼气工程普遍采用全混合厌氧发酵工艺（CSTR）、热电联产（CHP）技术，沼气发电上网、发电余热回收利用、沼渣沼液施肥、全程自动化控制的技术模式。德国沼气发电总装机容量达 1300 MW，年发电量为 89 亿度，占整个德国发电量的 1.5%。大型沼气工程项目一般只需一人管理即可稳定运行，运行成本低，生产效率高。

为了减少对化石能源的依赖，瑞典政府对生物质能源的开发利用非常重视，2008 年，瑞典的车用天然气消费总量为 5300 万立方米，其中 55% 为沼气提纯气，提纯沼气的管网输送量达到 1590 万立方米。

近年来美国生物质能源发展很快，2008 年美国生物质能源产量达到 4.138×10^{15} kJ，占总能源产量的 5.33%，生物质能源产量占可再生能源产量的 53.45%。美国沼气生产主要有三个方面，即垃圾填埋气、污水处理厂污泥气和畜禽场沼气工程，美国联邦环境保护署数据显示，2008 年美国有 455 座垃圾场利用沼气发电。在畜牧场沼气工程建设方面，美国约有 10 万家猪场，其中有 155 家畜牧企业配套了沼气工程。

近年来，为推动畜禽粪污沼气工程建设，实现节能减排，美国农业部（USDA）、美国环境保护署（EPA）、美国能源部（DOE）共同推出农业之星计划（AGSTAR），建立沼气项目发展服务管理平台，提供沼气工程建设的政策、法律、技术、设备和市场服务信

息。以更符合成本效益的方法，帮助农民通过最佳管理方式（BMPs）减少甲烷的逸散。

1.4 厌氧反应器的主要工艺类型

厌氧发酵工艺是指微生物在无氧条件下，分解各种有机物质产生能量所采用的技术和方法，它关系到发酵菌种、发酵条件、发酵浓度、发酵过程、产品的处理处置和利用等。沼气工程的生产工艺包括发酵原料的收集、预处理、厌氧发酵、沼气的净化贮存以及发酵残留物的处理利用等环节。

我国沼气工程的发酵工艺中，厌氧反应器主要有内循环厌氧反应器（IC）、升流式固体反应器（USR）、全混合厌氧消化反应器（CSTR）、塞流式反应器（PFR）和升流式厌氧污泥床反应器（UASB）等。发酵类型按温度划分有常温发酵、中温发酵和高温发酵。

由于沼气工程选择工艺路线不同，所采用的厌氧反应器也有区别。例如升流式厌氧固体反应器（USR）是一种适用于高悬浮固体原料的消化器，结构简单，效率较高。塞流式厌氧反应器（PFR）运转方便，稳定性高，在畜禽场沼气工程（尤其是牛粪的处理）中应用较多。适合处理低浓度发酵原料的厌氧装置主要有升流式厌氧污泥床反应器（UASB）、膨胀颗粒污泥床反应器（EGSB）和内循环厌氧反应器（IC）等高效厌氧反应器。另外，适合高浓度原料厌氧发酵的工艺也已经在我国开始推广应用，如覆膜干式厌氧发酵槽反应器和一体化两相厌氧发酵技术等。厌氧发酵装置是大中型沼气工程的核心组成部分，钢筋混凝土建造发酵罐的历史由来已久，但其工序复杂、用料多且施工周期长，给施工带来许多不便。随着科技进步，厌氧发酵装置结构形式也从传统的钢筋混凝土结构、钢结构，发展到可机械化施工的利浦（Lipp）罐结构、搪瓷钢板拼装结构及一体化厌氧罐技术。红泥塑料软体沼气池

等也开始得到市场的认可。

1.5 我国沼气工程发展中存在的问题和解决途径

我国规模化养殖场畜禽粪便污染问题越来越受到企业和各级主管部门的关注，同时，大家也认识到畜禽粪污的潜在资源优势，肥料化和能量化是当前畜禽粪便的主要利用方式。我国沼气工程建设与德国、瑞典、美国等欧美发达国家相比，工艺设计及运行经验等方面相对不足，还存在一些需要解决的问题。

(1) 工程建设问题

由于我国沼气工程建设发展迅速，尚未健全设计标准和资质准入管理制度，造成部分地区设计、施工企业无序恶性竞争，造成配套资金不到位、工程设计不合理，预处理工序中设备堵塞、冬季运行因保温问题造成产气率低等，影响了行业的健康发展。

(2) 工程装备和安全管理

沼气是一种易燃的混合气体，沼气工程对安全管理要求严格。沼气工程运行中要求设备耐压、耐水、耐腐蚀，质量不达标设备往往使用寿命短、故障率高。

沼气工程运行中一些企业安全管理松懈，存在一定的安全隐患，缺失防火、防爆、避雷、沼气燃放等防护设施和警示标识，未制订安全事故应急预案等。

(3) 沼渣、沼液的处理利用

沼渣、沼液作为发酵残余物是优质肥料，是可以高效利用的资源。由于目前我国农村一些地区种植、养殖之间脱节，一些沼气工程周围无足够土地消纳沼液，个别企业存在排放不达标或偷排现象，沼渣、沼液的肥料经济价值无法得到充分体现。因此应合理安排畜禽场布局和沼气工程设计，研究沼液浓缩制肥工艺和沼渣生产有机肥和栽培育苗基质等技术，实现沼液和沼渣的高值化利用，使沼肥在市场上能够真正体现自身的价值，提高沼气工程的整体经济效益。

目前,我国沼气工程建设主要由政府全部投资或提供补贴,集中供气多为公益性质,经济效益相对较差,需提高沼气产业化、商品化、市场化水平,提高沼气的利用潜力,消除沼气发电上网瓶颈,鼓励沼气提纯压缩,实现沼气利用高端化,提高能源效益。

经济全球化的今天,科技水平的高低已成为各国、各地区核心竞争力的基本要素。沼气工程是实现农业废弃物资源化利用和减少环境污染的重要途径。加快大中型沼气工程新技术研发,不仅能够有效改善农村用能结构、改善农村生活条件,更有利于推动我国新能源科技进步和产业发展、提高能源利用效率、减少温室气体排放、保护环境、实现经济和社会的可持续发展。