

沼气技术及其应用

张全国 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

沼气技术及其应用/张全国主编. —北京:化学工业出版社, 2005. 4

ISBN 7-5025-6936-7

. 沼... . 张... . 甲烷-农业技术 . S216. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 029223 号

沼气技术及其应用

张全国 主编

责任编辑: 杨立新

文字编辑: 周 倜

责任校对: 李 林

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http:// www .cip .com .cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850mm × 1168mm 1/ 32 印张 11 字数 308 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6936-7

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《沼 气 技 术 及 其 应 用》 编 写 人 员

主 编：张全国

副主编：倪慎军 关树义

编 者：杨世关 杨群发 徐桂转 岳建芝
李 刚 张国强 郭前辉 李改莲

前 言

随着人们对健康生活的追求，科学消费观念的更新，人们更加关心生态环境对人类生活的影响。追求绿色、环保、健康型的产品，特别是在无污染的生态环境中，采用无公害、生态良性循环的生态农业工艺技术生产出来，经检验合格的安全卫生的食（饮）用优质农产品及其加工品更让广大消费者情有独钟。现代农业从作物、病、虫、草等整个生态系统出发，综合运用各种防治措施，创造不利病虫害孳生和有利于各类天敌繁衍的环境条件，保持农业生态系统的平衡和生物多样性，减少各类病虫害所造成的损失，强调生产环境无污染、生产要素无污染以及生产过程不造成环境污染和生态破坏，即农产品的采摘、分选、包装、贮藏、搬运、直至上架销售的各个环节都有严格的要求，严禁二次污染，甚至对包装的材质是否达到环保标准都有要求。以沼气技术为纽带的农业生态工程作为按照生态学原理和经济学规律建立起来的社会、经济和生态三种效益相统一的农业生产体系，它遵循生态学原理，能够有效地运用农业生态系统中生物群落共生原理，系统内多种组分相互协调和促进的功能原理，以及地球化学循环的规律，实现物质和能量多层次多途径利用与转化，从而设计与建设合理利用自然资源，保持生态系统多样性、稳定性和持续高效功能的农业生态系统。沼气技术已经成为我国生态农业发展的重要技术支撑之一。本书全面系统地介绍了农业生态工程中的沼气技术。内容主要包括以沼气技术为基础的现代生态农业模式、理论基础、工艺原理及其实用技术，深入浅出地介绍了农村家用沼气工程应用技术及利用沼液沼渣替代农药化肥生产生态农产品等相关技术，充分反映了沼气技术在我国农业生态工程中的研究成果和实践经验，适用于广大农村的农业技术人员，从事生态农业、农业环境保护和农村可再生能源研究开发

的科技工作者以及从事管理工作的领导干部阅读，亦可作为高等院校相关专业的教材和参考书。

本书由张全国主编，倪慎军和关树义副主编，其中第 1 章由杨世关和倪慎军编写，第 2 章由杨群发和郭前辉编写，第 3 章由岳建芝和张国强编写，第 4 章由张全国和李改莲编写，第 5 章由李刚和张全国编写，第 6 章由杨世关和关树义编写，第 7 章由徐桂转编写，第 8 章由岳建芝编写，全书最后由张全国、关树义统稿。在本书编写过程中，虽然注意吸收了沼气技术的新发展和新成果，但由于编写时间仓促和作者水平所限，书中难免存有不足及疏漏之处，敬请各位读者提出宝贵意见，以使本书日臻完善。

编者

2004 年 12 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 沼气技术在我国的发展历史及现状	1
1.2 以沼气为纽带的农业生态工程的理论与技术基础	3
1.2.1 基本概念	3
1.2.2 基本原理	5
1.2.3 农业生态工程设计的技术体系	16
1.3 沼气技术在改善我国农业生态环境方面的作用	23
1.3.1 我国农业生态环境的危机	23
1.3.2 沼气技术在缓解我国农业生态环境危机中的作用	25
主要参考文献	28
第 2 章 农村家用沼气技术基础	29
2.1 沼气发酵基本原理	29
2.1.1 概述	29
2.1.2 沼气发酵微生物	30
2.2 沼气发酵原料及处理	33
2.2.1 沼气发酵原料及其产气特性	33
2.2.2 沼气发酵原料预处理	40
2.3 沼气发酵工艺及控制条件	48
2.3.1 沼气发酵工艺	48
2.3.2 沼气发酵工艺控制条件	70
主要参考文献	85
第 3 章 农村家用沼气工程的设计、施工及运行管理	86
3.1 农村家用沼气工程设计计算	86
3.1.1 沼气池的池形	86
3.1.2 沼气池设计原则	90
3.1.3 沼气池设计参数	91
3.1.4 沼气池设计的主要问题	92

3.2	农村家用沼气工程施工工艺	93
3.2.1	选定池形	94
3.2.2	建池时间的选择	94
3.2.3	建池地址的选择	95
3.2.4	施工工艺的选择	95
3.2.5	建筑材料的选择	96
3.2.6	土方工程	98
3.2.7	施工工艺及操作要点	100
3.2.8	密封层施工	104
3.2.9	质量检查验收	105
3.3	农村家用沼气池工程启动运行方法	105
3.3.1	准备充足的发酵原料	105
3.3.2	发酵原料的配比	106
3.3.3	拌料接种	106
3.3.4	投料	107
3.3.5	加水封池	107
3.3.6	放气点火	107
3.3.7	启动后进入正常运转	107
3.4	农村家用沼气池工程日常管理与安全管理	107
3.4.1	日常管理	107
3.4.2	安全管理	111
	主要参考文献	112
第4章	沼液加工利用技术	113
4.1	沼液主要组成和特性	113
4.2	沼液肥效及其增效技术	117
4.2.1	沼液肥效	117
4.2.2	厌氧发酵液的增效技术	120
4.2.3	注意事项	121
4.3	沼液抗病虫作用及其应用技术	123
4.3.1	沼液的抗病虫作用	123
4.3.2	沼液的应用技术	127
4.3.3	注意事项	129
4.4	沼液浸种和催芽技术	129

4.4.1	沼液浸种和催芽作用	129
4.4.2	注意事项	132
4.5	沼液无土栽培技术	133
4.6	沼液养殖实用技术	133
4.6.1	沼液养猪	133
4.6.2	沼液用于其他养殖	135
4.7	生态型沼液产品加工工艺	137
	主要参考文献	138
第5章	沼渣综合利用技术	141
5.1	沼渣的定义	141
5.2	沼渣的基本特性	141
5.2.1	沼渣作为肥料施用	141
5.2.2	沼渣作为饲料	144
5.3	工业沼肥生产技术	144
5.4	沼肥实用技术	145
5.4.1	用沼渣制作棉花营养钵	145
5.4.2	玉米营养土施用沼渣	145
5.4.3	用沼渣种植香菇技术	146
5.4.4	沼渣堆肥处理	147
5.4.5	沼渣与其他肥料的配合使用方法	148
5.4.6	沼渣养猪	148
5.4.7	沼渣养鱼	148
5.4.8	沼渣养黄鳝技术	149
5.4.9	沼渣养殖蚯蚓技术	150
	主要参考文献	154
第6章	以沼气为纽带的生态农业模式	155
6.1	以沼气为纽带的生态温室模式	155
6.1.1	模式组成、原理及特点	155
6.1.2	模式设计	159
6.2	以沼气为纽带的生态果园模式	182
6.2.1	模式组成、原理及特点	182
6.2.2	模式设计	184
6.2.3	模式能流分析与计算	201

6.3 以沼气为纽带的生态农场模式	207
6.3.1 发展背景	207
6.3.2 养殖场粪便污水沼气生态化处理模式	209
6.3.3 规模化养殖场沼气反应器设计	223
主要参考文献	239
第7章 沼气能源利用技术	241
7.1 沼气的成分和燃烧特性	241
7.1.1 沼气的成分和物理性质	241
7.1.2 沼气的燃烧特性	244
7.2 沼气净化及输配工艺	252
7.2.1 沼气脱水原理及装置	253
7.2.2 沼气脱硫工艺及装置	255
7.2.3 沼气中二氧化碳的去除	272
7.2.4 沼气的输配	275
7.3 沼气燃具及其设备	286
7.3.1 沼气的燃烧方法及燃烧器	286
7.3.2 民用沼气燃具及其设计	291
7.3.3 沼气燃具的设计	296
7.4 沼气发电	298
7.4.1 沼气发电系统概述	299
7.4.2 沼气发动机装置	300
7.4.3 沼气燃料电池	306
7.4.4 沼气发电在国内的应用状况及前景	312
主要参考文献	313
第8章 以沼气技术为基础的生态农产品技术经济评价	315
8.1 技术经济评价的基本理论	315
8.1.1 资金的时间价值原理	315
8.1.2 比较原理	316
8.1.3 边际产出和机会成本原理	317
8.1.4 经济效果原理	318
8.1.5 资源替代原理	319
8.2 经济效益评价方法	321
8.2.1 经济效益与经济效果	321

8.2.2	经济效益的表示	321
8.2.3	经济效益评价的指标体系	322
8.2.4	经济效益评价的基本方法	325
8.3	不确定分析	330
8.3.1	盈亏平衡分析	331
8.3.2	敏感性分析	333
8.4	社会效益评价	335
8.4.1	社会效益评价的内容	335
8.4.2	社会效益评价的方法	335
8.4.3	社会效益和经济效益的关系	339
8.5	技术经济可行性分析方法	339
8.5.1	可行性研究阶段及内容	340
8.5.2	企业财务评价和国民经济评价	343
8.5.3	可行性研究的作用	348
8.6	案例分析——沼气成本及效益分析	348
	主要参考文献	353

第 1 章 概 论

1.1 沼气技术在我国的发展历史及现状

沼气在我国的应用已经有一个多世纪的历史。100 多年沼气技术在我国的发展大体上可分为 4 个时期，即 20 世纪 30 年代、50 年代、70 年代以及 80 年代以后的时期。

早期称沼气为瓦斯，沼气池为瓦斯库。在 19 世纪 80 年代末，广东潮梅一带民间就开始了制取瓦斯的试验，到 19 世纪末出现了简陋的瓦斯库，并初步懂得了制取瓦斯的方法。由于当时沼气池过于简陋，产气较少，没能得到推广应用。我国真正意义上开始开展沼气研究和推广是在 20 世纪 30 年代。当时的代表性人物主要有中国台湾省新竹县的罗国瑞，汉口的田立方。他们从反对帝国主义对中国进行经济侵略和为农村解决燃料问题出发，决心从事天然瓦斯的研究推广工作。罗国瑞从 20 世纪初期即开始了天然瓦斯库的研究和试验工作，历经 10 多年的辛勤工作，研制出了我国第一个较完备且具有实用价值的瓦斯库。他为了推广该项技术，于 1929 年在广东汕头市开办了我国第一个推广沼气的机构——汕头市国瑞瓦斯汽灯公司。为能在更大范围内推广该技术，他于 1931 年将该公司迁至上海，更名为“中华国瑞瓦斯总行”，之后又更名为“中华国瑞瓦斯全国总行”。总行又在全国各地设立了分行，据考证，当时共在全国设立了 14 个省分行，21 个市分行，15 个县分行。“中华国瑞瓦斯全国总行”于 1942 年被日军纵火焚毁而停办，其下的省、市、县分行也相继关门。期间，罗国瑞于 1933 年开始了沼气技术人员的培训工作，并编写了培训教材《中华国瑞天然瓦斯库实习讲义》。田立方在 1930 年左右设计了带搅拌装置的圆柱形水压式和分离式两种天然瓦斯库。由于瓦斯库应用效果较好，所以他于

1933 年左右开办了“汉口天然瓦斯总行”，在总行内设立了一个研究机构“汉口天然瓦斯灯技术研究所”和一个人员培训机构“汉口天然瓦斯传习所”。田立方于 1937 年编写了《天然瓦斯（沼气）灯制造法全书》，此书共 4 个分册，即《材料要论》、《造库技术》、《工程设计》和《装置使用》。“汉口天然瓦斯总行”于 1937 年日本侵占武汉时被迫关门。

我国第二次推广沼气是在 20 世纪 50 年代。这次全国大办沼气的策源地在武昌，其发起人是 30 年代在“汉口天然瓦斯传习所”接受过培训的原中南材料学研究所工程师姜子钢。武昌办沼气的经验经新闻媒体报道后在全国震动很大，全国各地纷纷派人到武昌学习。为了适应当时这种形势发展的需要，农业部于 1958 年上半年委托中国农业科学院和北京农业大学举办了全国沼气技术培训班。1958 年 4 月 11 日毛泽东主席视察武汉地方工业展览馆参观应用沼气的展览时，指示“这要好好地推广”，从而掀起了沼气在全国推广的高潮，当时全国大多数省（市）、县都办上了沼气。但由于操之过急，忽视建池质量以及沼气池缺乏正确的管理等原因，当时所建的数十万沼气池大多都废弃了。

我国第三次大规模推广沼气是在 20 世纪 70 年代。70 年代末期由于农村生活燃料的严重缺乏，在河南、四川、江苏等农村又掀起了发展沼气的热潮。而且这股热潮很快传遍了全国，短短几年时间内全国累计修建户用沼气池 700 万个。这种搞运动式的推广带来的弊端在短时间内便显现出来，修建的沼气池平均使用寿命只有 3~5 年，到 70 年代后期即有大量的沼气池报废。

可以说 20 世纪 50 年代和 20 世纪 70 年代这两次推广沼气最后都以失败而告终。这两次推广的失败，特别是 70 年代推广的失败为其后沼气在农村的推广和利用造成了严重的负面影响，直到现在一些农村地区农民对沼气技术还持怀疑态度。这也提醒人们在今后的沼气技术推广应用中一定要严格控制建池的质量和实行科学的管理，惟有如此，才能保证这项技术得到健康发展，真正造福于民。

同时，在这三次规模化的沼气推广中，人们对沼气技术的认识还大都停留在利用其解决燃料短缺的层面上，建沼气池的出发点大都是为了获取燃料用于点灯做饭，也就是说人们看到的只是其作为能源的价值。人们对沼气技术更深层次的认识和更广范围的应用主要是从 20 世纪 80 年代开始的。

20 世纪 80 年代以后沼气技术在我国的发展主要有以下几个特点。有了可靠的技术保障。这方面农业部组织成立了专门的研究机构——农业部沼气科学研究所，1980 年又组织成立了中国沼气协会，一些高校如首都师范大学、浙江农业大学、河南农业大学等也开展了这方面的研究和人才培养工作。经过广大科技工作者的努力，在沼气发酵微生物学原理和沼气发酵工艺方面都取得了重要进展。沼气池池形和沼气发酵原料有了大的发展和变化。首先在池形方面，在传统的圆筒形沼气池的基础上，涌现出了许多高效实用的池形，如曲流布料沼气池、强回流沼气池、分离浮罩沼气池、预制板沼气池等。沼气发酵原料方面实现了秸秆向畜禽粪便的转变，从而解决了利用秸秆作为原料存在的出料难，易结壳等难题。沼气技术的利用途径实现了重大转变，由以前的单一制取能源向改善农村环境卫生、保护生态环境、发展生态农业等多元化利用转变，尤其在生态农业方面的独特作用，更是近年来这一技术得到重视和推广的重要原因。由于沼气发酵的产物沼气、沼液和沼渣等能在农业生态工程的建设中发挥作用，如沼气可以用于沼气灯诱蛾，可以为日光温室大棚增温并提供二氧化碳气肥；沼液可以用作叶面肥和杀虫剂；沼渣是一种很好的优质有机肥。所以，近年来，以沼气为纽带的各种农业生态工程技术模式得到快速发展，并且产生了良好的效果。可以说，目前沼气技术已经成为我国生态农业发展的重要技术支撑之一。

1.2 以沼气为纽带的农业生态工程的理论与技术基础

1.2.1 基本概念

1.2.1.1 生态系统与农业生态系统 生态系统是指由生物组分与

环境组分组合而成的结构有序系统。生物组分可分为生产者、消费者和分解者；环境组分包括太阳辐射、气体、水体和土体，这里的气体包括空气和来自各种生命活动和非生命活动产生的组分（如氨、二氧化硫和氮氧化物等），水体包括江、河、湖泊、海洋内的水、地下水和弥漫在空气中的水蒸气等，土体泛指自然环境中以土壤为主体的，包括生物残体、排泄物、岩石和飘尘在内的固体成分。生态系统的结构包括相互联系、相互渗透和不可分割的 3 个方面，即物种结构、时空结构和营养结构。物种结构指组成生态系统生物组分的生物种群以及它们之间的量比关系；时空结构是指生态系统中各生物种群在空间上的配置和在时间上的分布；营养结构则指生态系统中由生产者、消费者和分解者 3 大功能类群以食物营养关系所组成的食物链、食物网。系统结构决定系统的功能，生态系统具有能量流动、物质循环和信息传递 3 大功能，其中能量流动和物质循环是生态系统的基本功能，而信息传递则起到对能量流动和物质循环过程调节的作用，能量和信息依附于一定的物质形态，推动或调节物质运动，三者不可分割，构成生态系统的核心。

农业生态系统是指在人类的积极参与下，利用农业生物和非生物环境之间以及农业生物种群之间的相互关系，通过合理的生态结构和高效生态机能，进行能量转化和物质循环，并按人类社会需要进行物质生产的综合体。作为一种被人类驯化了的生态系统，农业生态系统不仅受自然的制约，还受人类活动的影响；不仅受自然生态规律的支配，还受社会经济规律的支配。农业生态系统类似于自然生态系统，其基本组成也包括生物和非生物环境两大部分。其生物组分包括以绿色植物为主的生产者、以动物为主的消费者和以微生物为主的分解者。而且其中占据主要地位的生物是经过人工驯化的农业生物，包括各种大田作物、果树、蔬菜、家畜、家禽、养殖水产类、林木等，也包括农田杂草、病、虫等有害生物。更重要的是在农业生态系统的生物组分中还增加了最重要的调节者和主体消费者——人类。农业生态系统的环境组分包括自然环境组分和人工环境组分。自然环境组分包括水体、土体、气体、辐射等，它是从

自然生态系统继承下来的，但已受到人类不同程度的调控和影响。人工环境组分包括生产、加工、贮藏设备和生活设施，例如，温室、禽舍、水库、渠道、防护林带、加工厂、仓库和住房等。人工环境组分是自然生态系统中没有的，通常以间接的方式对生物产生影响。人工环境组分在研究中时常部分或全部被划在农业生态系统的边界之外，归于社会系统范畴。

1.2.1.2 生态工程与农业生态工程 工程是指人类在自然科学原理的指导下，结合生产实践中所积累的技术，发展形成包括规划、可行性研究、设计、施工、运行管理等一系列可操作、能实现的技术科学的总称。因此生态工程就是应用生态系统中物种共生、物质循环再生原理、结构与功能协调原则，结合系统工程的最优化方法，设计分层多级利用物质的生产工艺系统。这里的生态指的是生态系统而非生态环境，根据工程的定义，生态工程也可以简单地概括为生态系统的人工设计、施工和运行管理。生态工程的目标就是在促进物质良性循环的前提下，充分发挥资源的生产潜力，防止环境污染，达到经济效益与生态效益的同步发展。生态工程主要包括3个方面的技术：一是在不同结构的生态系统中，能量与物质的多级利用与转化；二是资源再生技术；三是自然生态系统中生物群落之间共生、互生与抗生关系的利用技术。

农业生态工程作为生态工程的一种类型，是指有效地运用生态系统中生物群落共生原理，系统内多种组分相互协调和促进的功能原理，以及地球化学循环的规律，实现物质和能量多层次多途径利用与转化，从而设计与建设合理利用自然资源、保持生态系统多样性、稳定性和持续高效功能的农业生态系统。

1.2.2 基本原理

以沼气为纽带的农业生态工程作为农业生态工程遵循农业生态工程的基本原理，作为按照生态学原理和经济学规律建立起来的社会、经济和生态三种效益相统一的农业生产体系，它遵循生态学原理。

农业生态工程的生态学原理可概括为“整体、协调、循环、再

生”，具体又包括多项原理，其中与以沼气为纽带的农业生态工程关系较密切的有以下 8 项原理。

1.2.2.1 整体效应原理 农业生态系统是一个复杂的网络状的庞大系统，在这个系统内有能量流、物质流、信息流、价值流 4 个流，进行着转运、连接、交替与补偿活动，各组分间进行着反馈、负反馈作用。因此，促使这一大系统的整体纳入良性循环的轨道，是人们决策的目标与调控的方向，将因“整体效应”强化而表现出高产与稳定。人们要求能流的转化效率高，物流的循环规模大，信息流的传递畅通，价值流的增值显著。生态效率提高的最终标志不只是某一作物或畜禽的单产提高，而是整个系统的总体生产力提高。同时整体功能高又意味着系统稳定性高，“整体的稳定性寓于复杂性之中”，而复杂性表现为组分的多样性，生态位的健全性及各种反馈关系的合理性等。

整体效应优化的模式主要由各种生产结构优化来体现。农业生态系统有结构与功能两大属性。生态系统表现什么样的功能取决于其有什么样的结构，结构决定功能。也就是结构与功能两个方面，结构是主导的一面。同样，农业上如果生产结构合理，不仅带来经济效益成倍地提高，而且生态环境与生产条件能向良性与持续方向发展。生产结构调整实质上是一种智力投入，以良好的决策发挥各组分整体优化来引导与促进整体功能优化与效益提高。因此，要整体优化需首先调整生产结构，也就是在农业生态系统中，首先要运用生态学上的“整体功能大于个体相加之和”的原理。

1.2.2.2 互惠共生原理 自然生态系统中存在的多种生物共生的现象是长期自然选择协同进化的结果。农业生态系统中各种群间，由人工诱导多种共生互利关系，加强了物质内循环作用，既提高生态效益，又提高经济效益。“四位一体”沼气生态工程模式就充分利用了这一原理，在模式中，温室内的猪和蔬菜之间，以及猪和沼气微生物之间就存在这种互利的关系。猪呼出的二氧化碳可增强蔬菜等植物的光合作用，植物释放的氧气则有利于猪的生长。猪所排泄的粪便为沼气发酵微生物提供了充足的营养物质，从而保证了沼

气发酵的顺利进行，发酵产生的沼气在温室内燃烧可提高猪生长环境的温度，沼液可用来作添加饲料喂猪，从而提高猪的生长速度。

虽然随着科学技术的进步，人类越来越多地了解了自然界的互利共生关系，并引入到农业生态系统中；然而也必须看到，这种生物间互助互利关系却又被某些现代物理化学的措施所取代或削弱，如最普遍存在的单一地大量施用氮素化肥使豆科作物固氮作用削弱；单纯追求扩大粮食作物面积，压缩豆科作物或豆科绿肥面积，减弱了农业生态系统生物固氮环节。

1.2.2.3 食物链原理 植物、动物和微生物等众多特性各异的生物，之所以能够按一定数量、比例、排列顺序，有条不紊地组合成有稳定结构和相应功能的系统，最根本的原因之一是因为生物间存在着营养（食物）的依存关系。自养生物——绿色植物借助太阳能将环境资源中的无机物质形成植物物质能并以其为基础，构成自养者与异养者、异养者生物之间的食物链关系。生物间的食物链关系是多种多样的，最基本的有3种方式：第一种是捕食食物链，是由植物到草食动物，再到肉食动物，以直接消费活有机体或其组织为特点的食物链；第二种是腐食食物链，以死有机体或生物排泄物为食物，通过腐烂、分解，将有机物质分解为无机物质的食物链；第三种是寄生食物链，是以寄生的方式取食活的生物有机体而构成的食物链。另外，若在食物链的链节中包含有上述两种或两种以上的基本食物链，则称之为混合食物链。

不同类型或不同的发展阶段的生态系统三类食物链的比例是不相同的。据研究不同类型食物链的比例将影响系统的稳定性，凡腐食食物链比例大的生态系统，其自我维持机制、抗干扰和恢复能力都比较强而有利于整体稳定。

从生态学原理看，在自然生态系统中生产者、消费者与分解者所构成的食物链是一条能量转化链、物质传递链，也是一条价值增值链。林德曼十分之一定律说明，能量从一个营养级向下一个营养级转化的比率只有十分之一，因此自然界的食物链很少有长达4个营养级以上的。但在人工生态系统与农业生态工程中，这条食物链

往往进一步缩短了，缩短了的食物链不利于能量的有效转化和物质的有效利用，同时还降低了生态系统的稳定性，加重了环境污染。因此，根据生态系统的食物链原理，在农业生态系统中，可以将各营养级因食物选择而废弃的生物物质和作为粪便排泄的生物物质，通过增加相应的生物进行转化，延长食物链的长度，并提高生物能的利用率。

食物链同一营养级上不同生物种群对能量和物质交换、转化、接受、传递的速率、效率是不一样的。在农业生态系统中，通过调节作为驱动者的生物种群的种类、数量、比例，可以扩大能流、物流的途径、范围、流动速率及转化效率，以提高生产力。

以沼气为纽带的各种生态农业工程正是利用了这一原理。如“猪—沼—果”、“猪—沼—菜”模式就是在猪和果树（蔬菜）两个营养级之间增加了厌氧微生物这样一个营养级，在猪和厌氧微生物之间形成了一条腐食食物链，从而使生物能的利用率以及该生态系统的自我维持能力都得以提高。

1.2.2.4 边缘效应原理 利用两个截然不同的生态系统之间的边缘地带（段），通过对两个系统的连接、渗透作用，以扩大能量转换与物质循环规模，从而使两个系统生态经济效益共同提高，这种功能原理在生态学上称“边缘效应”或“边际效应”。在不同类型的生态系统的结合部位都存在这种“边缘效应”。比如，在某些森林和草原交接处鸟的种类较多；在海湾、河口处鱼类最复杂、最活跃；旱涝交替的湖滨，植物适应不良环境的能力较强等，都是自然生态系统中的边缘效应。人工生态系统中也有边缘效应，如桑基鱼塘系统。该系统由基面种桑、桑叶喂蚕、蚕沙养鱼、鱼粪肥塘、塘泥为桑施肥等各环节所构成的完整的水陆相互作用的人工生态系统。该系统利用水陆边缘空间生长和活动的生物，可以直接发挥边缘效应。

1.2.2.5 生态位原理 生态位是指生物在完成其正常生活周期时所表现的对环境的综合适应特征，是一个生物在物种和生态系统中的功能和地位。从营养角度来看，是指有机体在群落中的功能作用

和地位；从物理空间来看，是指生物种群所占据的基本生活单位。每一种生物在多维生态空间中都有其理想的生态位；而每一种环境因素都给生物提供了现实生态位。理想生态位与现实生态位之差就产生了生态位势。这种位势一方面使生物去寻求、占领和竞争良好的生态位，能动地去改造环境，另一方面也迫使生物不断地适应环境，调节自己的理想生态位，并通过自然选择，实现生物和环境关系的世代平衡，使现实生态位与理想生态位之差最小。在自然生态系统中，随着物种向多样化发展，空白生态位逐渐填充，生态位逐渐饱和，从而构成复杂稳定的网络结构的生态系统。

农业生态系统是个生态—经济—社会复合生态系统，它存在的空间既有自然环境，也有社会经济环境。因而某类生物单元能否在特定区域内存在和发展，既取决于当地自然生态因子整体即自然的生态位，又往往更容易受当地社会经济条件的影响和制约，如某种生物单元按其自然的生态位很适宜发展，然而如果市场销路不畅、价格不合理或受贮藏、运输等社会经济因素等的制约，就会不适宜其发展，因而在农业生态工程的设计、管理中对生态位概念的应用必须考虑经济因素。在农业生物单元选择、调整时，既要认真地分析当地、当时自然资源、环境状况及其变化，同时也要掌握社会经济资源状况，往往社会经济的变化更大、更快，影响更直接。另外，生态位既有空间概念，还需考虑时间因素，构成生态位总体的各生态因子总是随时间，如季节、社会经济发展阶段而发生质和量的变化，因而是动态的，在农业生态系统中尤为突出。

在农业生态系统中生物种类简单、食物链较短，尚有许多未被占据、利用的潜在生态位，都可以通过引入新的生物单元，进行食物链加环、农作物立体配置、水体分层、立体放养等，以丰富农业产品种类、提高系统生产力。如在“猪—沼—果”生态工程模式的基础上，可在果园增加养鸡环节，在沼渣利用方面增加蚯蚓养殖环节等。果园养鸡，一方面可起到杀灭果园害虫，减少果园野草的目的；另一方面还可通过其产生的粪便为果树提供有机肥。沼渣养殖的蚯蚓一方面可作为鸡饲料加以利用；另一方面还可作为中药材变

成产品进行出售。总之通过系统当中这些生态位的利用，使系统的生产力得以提高。在生态农业建设中，还可以通过人工措施，开拓一些农业生物需要却并不是自然存在的环境，以拓宽生物种类、数量，生产更多高产优质的产品。例如“四位一体”模式就是通过对塑料温室大棚的运用，为生物创造更适宜的生存环境。不论是引进新生物还是调整结构，必须遵守生态位相同的生物间竞争排斥原理，尽量选择那些生态位能互补、不重叠的生物加以巧妙搭配、组装，使系统取得生物与环境、生物之间协调发展。

1.2.2.6 限制因子作用原理 生物的生长发育离不开环境，并适应环境的变化，生态环境中的生态因子如果超过生物的适应范围，就会对生物产生一定的限制作用，只有当生物与其居住环境条件高度相适应时，生物才能最大限度地利用环境所提供的优越条件，并表现出最大的增产潜力。

(1) 最小因子定律 1940 年，德国化学家李比西提出“植物的生长取决于数量最不足的那一种营养物质”，即最小因子定律。这一定律说明，在植物生长过程中，如果某一营养物质数量不足，不但会影响植物的生长，同时也将限制其他处于良好状态下的因子发挥效应，该因子又称限制因子。由此可见，一种生物要在某种环境中生存和繁衍，必须得到所需的各种基本物质和一定的理化条件，生物只在其环境处于适宜的范围内分布和栖息。但是，这一定律只能在相对稳定的状态下运用，否则难以确定限制因子；此外，由于不同生态因子之间可能存在的替代作用会减弱甚至消除其限制作用。最小因子原理阐明了生物对环境的最基本的适应关系，对农业生态系统管理、农业生物与环境适应都是极重要的概念。虽然农业生态系统因人为的作用也会促使限制因子的转化，但无论怎样转化，最小因子仍然是起作用的。因此，在农业生态工程规划和建设过程中，必须先对其环境作出科学的分析和诊断，从错综复杂的生态环境中找出主要限制因子，据此确定规划目标、建设方向和调控措施。

现实生产中有许多符合最小因子限制定律的例子。如采用沼液

养鱼，当沼液排放使鱼塘水体过肥时，就会使浮游植物、水生植物大量繁殖，这些植物一方面通过覆盖水面导致鱼塘的复氧过程受阻，另一方面它们的残体在被微生物分解过程中又会大量消耗水体中的氧气，从而导致水体氧气不足，鱼类则因严重缺氧而死亡，此时氧气不足就成为鱼塘生产的一个重要限制因子。

(2) 耐性定律 在最小因子定律的基础上，人们发现某些因子过量也会影响生物的正常生长，成为限制因子。因此，在 1913 年，谢尔福德把最大量和最小量限制作用的概念统一合并为耐性定律。具体而言，就是对某种生物来说，各种生态环境因子都存在着一个生物学的上限和下限，它们之间的幅度就是该生物对某一生态因子的耐性范围，称为生态幅。完整理解耐性定律，需掌握它 5 个方面的基本内涵：一种生物对各种生态因子的耐性范围不同，不同生物对同一生态因子的耐性范围也不同；同种生物在不同发育阶段对生态因子的耐性范围是不同的；由于生态因子的相互作用，当某个生态因子不是处在最适状态时，则生物对其他一些生态因子的耐性范围将会缩小；主要生态因子耐性范围广的大多数生物种，其分布也较广；同一生物种内的不同品种长期生活在不同的生态环境下，对多个生态因子会形成有差异的耐性范围，即产生生态型的分化。

(3) 环境容纳量 环境容纳量是指有限的环境中能够稳定地允许达到的最大的生物种群数量。容纳量的大小主要决定于两个方面：一是光、温、水、养分等因子或食物、空间等资源所构成的自然环境；二是食性、行为、适应能力等种群的遗传特性。这就使种群密度小时，个体得到资源充裕，种群密度上升，达到一定密度后，受资源限制而影响种群增长，最终停止增长，密度下降。

环境容纳量是生物与环境相互依存所导出的一个生态学重要概念，是自然资源特别是可更新资源合理利用和管理的科学依据。它关系到生物圈内不同层次不同范围的生态系统能够容纳多大的生物种群；关系到大可以到全球能够养活多少人口，小可以具体到每 667 米²（1 亩）农作物种植密度、一片草地放牧量、森林的年砍伐

量等。

因此，在农业生态工程建设和管理中要求对系统的环境资源状况、负载能力作出科学的定性和定量的评价，生物资源更需测定其生产力水平及其动态变化和更新能力，并据此选择相应的生物和生态系统类型和相应的利用对策。必须指出的是对受人类干预的农业生态系统而言，其环境容纳量的变化是比较大的，一片农田密度因外界环境因素和生物内在因素的改变，而相应改变；同样，一片草地由于风调雨顺或进行了人工施肥使生产量提高，则放牧量可适当增大；因而农业生态系统中，对环境容纳量需有动态的概念，通过施肥、灌溉、排水、播种期及其他栽培管理措施，以及更换品种等，都可改变环境容量，提高生产力。

1.2.2.7 物质循环再生原理 生物地球化学循环是物质循环的基本形式，包括生物小循环和地质大循环两大部分，它们是密切联系、相辅相成的。生物小循环是指环境中元素经生物体吸收，在生态系统中被相继利用，然后经过分解者的作用，再为生产者吸收、利用，生物小循环的时间短、范围小，是开放式的循环。地质大循环是指物质或元素经生物体的吸收作用，从环境进入生物有机体内，然后生物有机体以死体、残体或排泄物形式将物质或元素返回环境，进入五大自然圈的循环，该循环的时间长、范围广，是闭合式循环。

生态系统的功能是由能量转化、物质循环、信息传递加以实现的，并通过能量转移、物质循环等将生态系统众多生物、非生物组分联结成一个自我组织、自我维持的系统。能量由环境进入生态系统，每经一营养级必有相当部分耗散，呈单向流动。生态系统的物质则由环境被生产者吸收后，沿着食物链（网）逐级转移，未被利用部分均能通过腐食食物链，并由那里的碎屑生物、腐食生物作用，将复杂的有机物分解还原为无机状态，归还环境，可再度被植物吸收利用。

农业生态系统中重要的物质循环包括碳循环、氮循环、磷循环和水循环。

碳循环。碳元素作为构成有机物的基本成分，来自于二氧化碳。从生物小循环的角度分析，碳主要通过 3 条途径进行循环：一是在光合作用和呼吸作用之间的细胞水平上的循环；二是在大气二氧化碳和植物体之间的个体水平上的循环；三是在大气二氧化碳植物动物微生物之间的食物链水平上的循环。从地质大循环角度看，碳以动植物残体的形式被深埋地下，通过物理化学变化转变为化石燃料，化石燃料被开采利用后又释放出二氧化碳到大气中，并进一步被植物吸收利用。

氮循环。植物从土壤中吸收硝酸盐、铵盐等含氮化合物，与体内的含碳化合物结合生成各种氨基酸，并进而构成植物的主要成分之一蛋白质分子，植物体被动物摄食后，进一步转变成动物蛋白质，动植物残体或排泄物被微生物分解时氮被转变为氨气返回环境，氨气通过被植物再次利用进入新的循环。循环过程中，氮素会主要从 3 个方面损失掉：一是挥发损失，即由有机质的燃烧分解或其他原因导致氨的挥发损失；二是氮的淋失，主要是硝态氮由于雨水或灌溉水淋洗而损失；三是在水田或土壤通气不良时，硝态氮受反硝化作用变成游离氮而导致的氮损失。因此，从合理利用氮素和能源的角度来考虑，在农业生产生活中将作物秸秆直接燃烧作燃料是不经济的。

磷循环。磷循环是典型的沉积型循环，磷以不活跃的地壳作为主要贮存库。岩石土壤风化释放的磷酸盐和农田中施用的磷肥，被植物吸收进入植物体内。从生物小循环看，各种磷的有机化合物经土壤微生物的分解，转变为可溶性的磷酸盐，可再次供给植物吸收利用；从地质大循环分析，从生物小循环脱离的磷可分别通过动植物残体在陆地表面的磷矿化，以及受水的冲蚀进入江、河、湖泊、海洋等水体而进入地质大循环。磷和氮不同，它基本上不会挥发损失。它利用率低的主要原因是水溶性磷在土壤中容易与钙、镁、铁和铝等结合形成难溶性磷化物。所有农业生产中磷肥的利用率一般只有 10% ~ 25%。

水循环。水是生物圈中最丰富的物质之一，是植物进行光

合作用的主要原料，是生命体最重要的组成成分，有机体中的水分占 70% 以上。水在生物圈中的循环，基本上是源于水域并终于水域，主要途径是地球表面与大气通过降雨和蒸发之间的相互变化。由于蒸发（蒸腾）量与植被类型、地面条件、大气温度、空气湿度、风力状况等有关。而这些因素可通过人力调控的主要是植被状况，因此，合理保护自然植被在调节水分平衡上有重要意义。

农业生态系统由于人类需要其高的净生产力而使生态系统被保持在生态演替早期阶段，它与环境间进行着频繁的大量的物质交换，除了生产性输出外，由于系统自我保持能力削弱，使非生产性输出如风蚀、水蚀加大，离开生物循环进入地球化学循环数量增大，成为当代生态环境问题的一个重要方面，如何加强生物循环是当前农业生态系统管理中的重要课题。

1.2.2.8 能量流动与转化原理 农业生态工程的生产过程就是能量流动和转化过程，首先绿色植物通过光合作用将太阳能转化为以植物形式存在的化学能，然后沿食物链（网）转移和传递能量，并最终形成各种动植物产品。除太阳能以外，农业生态系统生产过程中，还需投入其他能量，这些能量称为辅助能。根据来源的不同，辅助能分为自然辅助能和人工辅助能。自然辅助能主要包括沿海和河口的潮汐作用、风力作用、降水和蒸发作用等。人工辅助能包括生物辅助能和工业辅助能，生物辅助能指来自于生物有机体的能量，如人力、畜力、种子和有机肥所含的化学潜能等，工业辅助能则包括以化石能源形式直接投入的辅助能和以化肥、农药、农机具等化石能源产品形式投入的辅助能。辅助能不能直接转化为生物化学潜能，它的作用是促进初级生产者对太阳光能的固定和次级生产者对植物化学潜能的转化。合理的辅助能的投入是提高农业生态系统生产力的根本原因。

能量在整个生态系统中，沿以下途径流动：能量以太阳光的形式进入生态系统，其中少部分被绿色植物吸收转化为生物化学能，其余部分以热的形式离开生态系统；生产的生物化学能一部分沿着

食物链和食物网流经生态系统的各个营养级，一部分则以动物、植物物质中的化学潜能形式存贮在系统中，或作为产品离开生态系统，此外，还有一部分通过消费者和分解者生物有机体呼吸释放的热能从系统中散失。

能量在生态系统中的流动和转化遵循以下原理。

热力学第一和第二定律。热力学第一定律即能量转化和守恒定律，该定律认为能量在流动过程中，既不可能增加，也不可能减少，只能从一种形态变为另一种形态，其总量保持不变。在生态系统中，被植物通过光合作用以化学能形式固定下来的太阳能在流经食物链（网）的过程中同样遵循这一定律。热力学第二定律又被称为熵增原理，它是对能量传递方向和转换效率规律的一个重要概括，其基本内容可表述为：自然界的所有自发过程都是能量从集中型转变为分散型的不可逆的衰变过程。熵作为从热力学第二定律抽象出的一个概念，是一个对系统无序程度进行度量的热力学函数，因此热力学第二定律又可表述为一切自发过程总是向熵值增加的方向进行。在生态系统中，复杂的有机质被分解为无机质的过程为自发过程，而无机物质决不能自发地合成有机物质，必须借助外界对系统的做功，即利用太阳能才能使二氧化碳、水和无机物质转变成有机物质。

耗散结构理论。根据热力学第二定律，一个封闭系统最终要走向无序，走向解体。然而，很多现象表明，开放系统是不断从无序向有序，从低有序到高有序状态发展。普里高津的耗散结构理论解决了与这种现象有关的理论问题。耗散结构是指开放系统在远离平衡的非平衡状态下，系统可能出现的一种稳定的有序结构。普里高津的耗散结构理论表明：一个远离平衡态的开放系统，可以通过与外界环境进行物质和能量的不断交换，从外界吸收负熵，从而使系统维持稳定状态，保持或提高其有序性。农业生态系统作为一个能量和物质的转换的开放系统，为了维持其自身的稳定和发展，必须不断地从外界环境输入能量，即不断输入太阳能和辅助能，排除无序，建立有序，形成有效的耗散结构。

林德曼效率定律。林德曼效率指某一营养级所固定的能量与前一营养级所持有的能量之比，又称能量转化效率。美国生态学家林德曼于 20 世纪 30 年代末在对 Cedar Gog 湖的食物链进行研究时发现营养级之间的能量转化效率平均大致为十分之一，其余十分之九由于消费者采食时的选择浪费，以及呼吸排泄等被消耗了，即所谓的“十分之一定律”。其实这只是对生态系统食物链各营养级之间能量转化效率的一个粗略估算，此后的研究进一步证实了众多生态系统的林德曼效率是在 10% ~ 20%。

生态金字塔原理。由于能量每经过一个营养级时被净同化的部分都远远少于前一营养级，当营养级由低到高，其生物个体数目、生物量、所含能量一般呈现出下大上小的塔形分布，称为生态金字塔。用生物数量、生物量和能量所表示的金字塔被分别称为数量金字塔、生物量金字塔和能量金字塔。在这 3 类金字塔中，能较好地反映营养级之间比例关系的是能量金字塔。后两者，在描述一些非常规形式的生物链中个别营养级的比例关系时，会出现生态金字塔倒置现象或畸形现象。生态金字塔原理对农业生态工程的设计具有重要的指导意义。食物链长、塔的层次多、能量消耗多、贮存少，系统则不稳定；反之，系统则表现出较高的稳定性，但食物链过短，会造成能量利用率过低、能量浪费大现象。

1.2.3 农业生态工程设计的技术体系

根据目前农业生态系统设计中存在的问题主要是结构元的单一性、结构链的不完整性和结构网的不合理性的特点，农业生态工程设计的技术体系主要包括加环、解链和接口技术。

1.2.3.1 加环技术 云正明等人对加环技术的定义是指根据物质能量通过食物链发生“浓集”以及生物之间“相生”“相克”的原理，以人工生物种群代替自然生物种群，从而达到废弃物的多级综合利用，增加高能量高价值的产品生产和抑制能量损失的生物工艺过程。即通过增加某些食物链环节，充分利用系统获得资源，生产出相应的可为人类二次利用产品的过程。

根据食物链加环的性质不同，可以将加环分为生产环、增益

环、减耗环、加工环、复合环等 5 类。加环的过程实质上是增加环中的组分或增加形成环的接口。农业生态系统中增加的环节主要是一些具有高的生态经济位的环节和能促使资源循环利用的环节，去掉的环节主要是一些低效高耗性环节。

(1) 生产环 生物链生产环的设计是利用人类不能直接利用或者利用价值较低的生物产品为资源，通过加入一个新的生物种群(环-营养级)进行物质、能量的再转化过程，以达到使非经济产出组分或者生产过程中的副产品，直接生产出人类可以利用的经济产品的目的。例如，利用沼气发酵产生的沼渣栽培食用菌，养殖蚯蚓等都属于这种技术的利用。生产型食物链加环设计流程如图 1-1 所示。

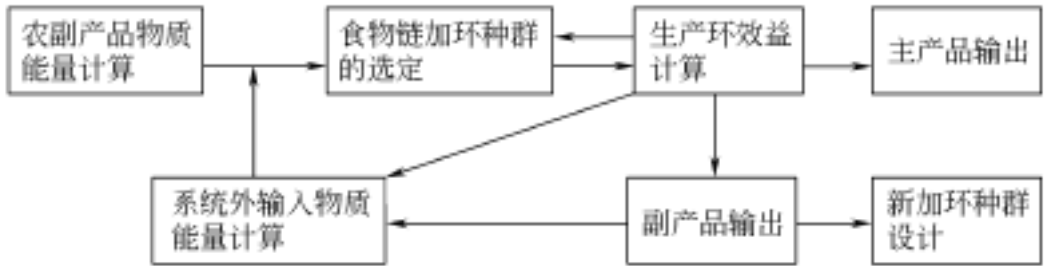


图 1-1 生产型食物链加环设计流程

依据图 1-1，生产型食物链加环设计，一般可分为下列 5 步进行：统计计算设计区农副产品可以提供的转化的数量、能量、营养物质含量；根据统计计算结果，选择食物链的生物种群并计算生物种群的数量；计算加环后的生产效益，包括主产品的经济效益和副产品的数量与再转化的可行性；根据生产环需要及效益分析，计算必须由外系统输入的物质、能量的种类和数量，分析输入的可能性与经济上的合理性；调整食物链的种群数量和外部输入量，并根据副产品输出的量和质，分析其新出路。

关于生产型食物链的设计，在一个设计区里可以是一种，也可以是很多种。对于食物链的选定，应当从技术、经济两方面进行比较方案的精心选择。

(2) 增益环 所谓增益环，是指所加入的环节，虽然不能直接

生产出商品，但可以加大或提高生产环的生产效益。即根据系统所产废弃物的资源特征选定适宜的生物种群，将废弃物进行转化和能量的富集，然后提供给食物链的生产环节，作为补充资源，从而增加生产环的效益。例如，在生长季节比较长的南方地区或北方的部分地区，一些处理养猪场污水的能源环境工程利用沼气发酵出水种植水葫芦、细绿萍等植物，来处理和净化出水以便实现污水的达标排放。处理过程中所生产出的水葫芦、细绿萍虽然不是商品，但可以作为饲料饲养家畜、家禽、养殖鱼类，从而节约饲料，降低成本。对鱼和家畜饲料来说，这些生产性环节是有利的，是可以带来效益的，是一类增益性环节。食物链增益环设计流程如图 1-2 所示。

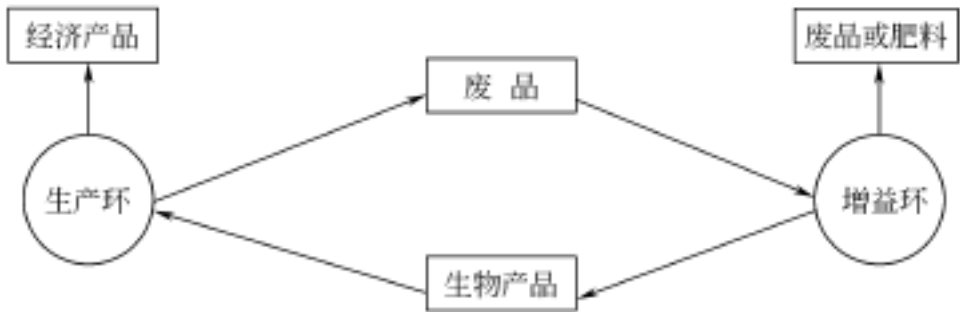


图 1-2 食物链增益环设计流程

例如，利用副产品、垃圾、废品、动物粪便生产蚯蚓、蝇蛆，再利用蚯蚓和蝇蛆作为鸡、猪等缺乏的动物性蛋白饲料，从而使鸡、猪的产量增加。其中，蚯蚓和苍蝇就是鸡、猪一类的增益环。

可以看出，食物链增益环的研究和技术开发的前景是十分广阔的。尤其是在当今世界人口爆炸、环境污染、食物短缺的现实条件下，利用粪便通过食物链的作用，增加动物蛋白乃至人类食物生产的资源是十分重要的。

(3) 减耗环 在食物链网中，每个环节均是生产者，但是，每个环节又都是上一营养级的消费者，其中，有些环节生产的产品人类没有利用价值，反而过度消耗上一营养级的资源。例如，农田害虫、杂草和田鼠等，这个环节称之为损耗环。在原来的损耗环上增

加一些新的环节，或增大原有的环节，使之抑制和减弱损耗环的作用，加入的这种环节即为减耗环。例如，在“猪—沼—果”模式的果园中散养鸡，一方面可以吃果园内的杂草，另一方面还可以捕捉果园内的害虫。所以鸡的饲养，抑制了杂草和害虫等损耗环的作用。食物链减耗环设计流程如图 1-3 所示。

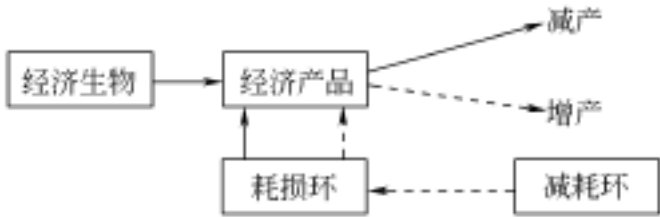


图 1-3 食物链减耗环设计流程

减耗环的设计包括如下 4 个步骤：第一，查清当地主要生产型生物种群的主要对抗性生物类（耗损环），并对它们的发生发展规律进行分析和研究；第二，选择对耗损环生物种群具有拮抗、捕食、寄生作用，同时对其他经济生物种群无害的生物种群；第三，建立减耗环生物种群的保护、放养与人工繁殖的工艺技术体系；第四，根据耗损环的种群数量与发生规律，确定减耗环生物种群的数量配比。

（4）加工环 加工环是农业生态系统产业化的必然产物，是在自然生态系统食物链和食物网基础上的创新和发展，是将农业生产过程中产出的初级和次级产品改变形态、经济和营养价值的一种环节。加工环与前面所谈的生产环相比，不同点只是加入的食物链种群不是一般的生物，而是人类这个特殊的生物种群。

目前，农业生态系统产出的产品大多是以原粮、毛菜、水果等形式输出，产值低，利用过程中营养物质的损耗大，营养物质的价值没有得到充分体现。同时，未经充分利用的部分产品又极易以废物形式输出，造成污染。如果对其进行适当加工处理，在提高产品的营养价值的同时，还可以大幅度提高产品的经济价值。例如，毛菜中的不可食部分，包括菜根、豆荚、老叶等，占毛菜重的 20% ~ 40%。这部分以产品形式输出后一般以垃圾形式再输出。按照一个

中等城市日输入消费毛菜 50~100 吨计，则每日由此产生的有机垃圾达 10~29 吨。这些垃圾从运输到处理，需要消耗大量的人力、物力和财力。如果增加加工环节，在原产地将毛菜变为净菜上市，一方面免去了将其作为垃圾进行处理所需的大量费用；另一方面，这些不可食部分可在蔬菜产地经过再加工变为饲料，或作为沼气发酵的原料，使这些原本为废物的东西又可就地直接或间接作为肥料还田，参加原系统的物质循环。加工环设计流程见图 1-4。

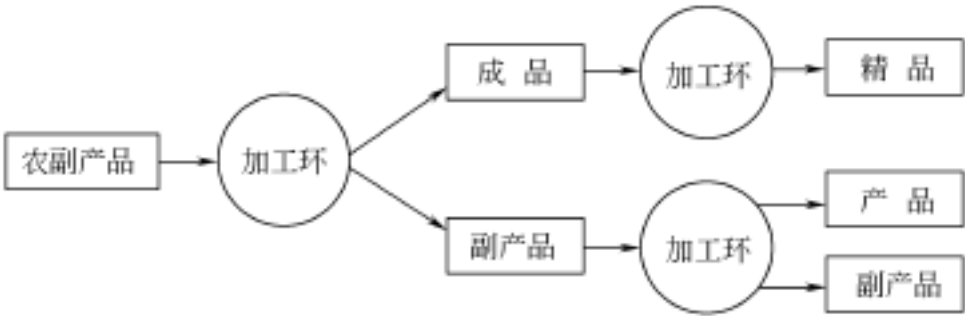


图 1-4 加工环设计流程

另外，增加加工环还可以使另一些生产环、增益环相连接。例如，养蚕过程中产生的粪便（蚕沙）主要作为有机肥被利用，由于其产气特性非常好，所以现在有些地方改用其作为沼气发酵原料生产沼气，产生的沼气又被用来代替电加热蚕室。这一加工环又可以通过沼渣栽培食用菌、养殖蚯蚓、生产有机肥等生产、增益和加工环的联结，增加经济、社会和生态效益。

(5) 复合环 能同时起到上述两种环或多种环功能的加环为复合环。比如，前面谈到的在果园内放养鸡，可以起到灭虫、除草、肥园和产蛋、产鸡等多种功能。就灭虫和除草来说，鸡是减耗环；从鸡粪肥园的角度看，鸡是增益环；而从向系统外输出蛋和鸡肉产品看，鸡又是生产环。再比如，在一些农业生态系统中，引入蜜蜂这一环节，它不仅可将原本分散在各植物花中的花粉、花蜜，经转化后生产出有经济价值的商品蜜、黄蜡、蜂王浆、蜂胶、花粉等，

起到生产环的作用；而且由于蜜蜂传媒授粉作用，使很多作物增产，例如，可以使皮棉增产 20%，油菜籽增产 18% 左右，梨、苹果分别增产 30% ~ 50% 和 20% ~ 47%。又如，在一些鱼塘中增加养鸭环节，鱼鸭混养，鸭具有生产环的功能；鸭摄食投饲的饲料时，摄食常常不充分，其摄食率为 80% ~ 90%，这些未摄食的饲料增加了鱼的饲料，另外，由于鸭的消化道仅为其体长的 3.3 ~ 4.7 倍，故仅有 37% 的干饲料被其消化吸收，其他部分则随粪便排出体外，鸭粪中含有 26.2% 的有机质，氮、磷、钾和钙含量分别为 1.0%、1.4%、0.62% 和 1.8%，不仅可以作为如罗非鱼的直接饲料，还有肥水及增加鱼塘中鱼类天然饵料的作用，在这一过程中，鸭子起增益环的作用；同时，鸭在鱼池中可摄食一些对鱼有害的昆虫及有病的鱼和活动力差的鱼种鱼苗，又起了减耗环的作用。

1.2.3.2 解链技术 所谓的解链是指通过生态工程的设计实施，使有害物质降解或脱离与人类相联系的食物链。食物链的解链不是在所有地区都是需要的，只是在环境污染严重、有害物质有可能沿着食物链逐步累积，而且有可能危及人类身体健康的时候才采用。食物链解链的方式一般有 3 种。第一，把它的最终产品改变用途，使它们脱离与人类食物相连接的食物链。第二，改变生态工程人工种群的类型，使这些种群生产的产品不可能进入人体。第三，加入新的种群，使对人类有害的物质降解，或者对有害的物质不吸收、不浓集。

设计时重要的是如何选定最佳的解链部位。也就是说，在什么时间、在哪个环节解链损失最小；怎样做既达了解链的目的，又可以增加收益。比如，一块污染的耕地，解链的途径可以有两条：一条是种粮食并从粮食开始解链，如利用加工链将粮食制成工业酒精或工业淀粉；另一条是改变这块土地的种植方式，可以种植棉花或红麻等纤维植物，也可以栽培花卉、林木等观赏植物，这些经济作物的产品根本不进入与人类连接的食物链，因此不会对人类的健康造成危害，同时在经济方面也保证了土地的产值。食物链解链流程见图 1-5。

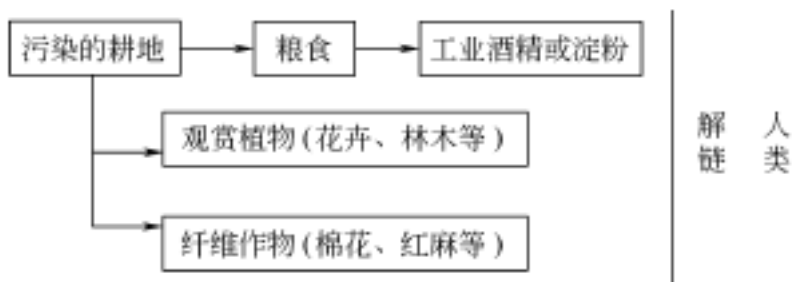


图 1-5 食物链解链流程示意

1.2.3.3 接口技术 接口就是将原来构不成循环关系又互不相关的两条或多条食物链通过适宜的配置连接起来，形成一个闭合循环的食物网的技术。接口是能量、物质和信息的汇集交换场所。促进生态经济协调发展，符合生态恢复演替规律，宜于生态保护和经济发展的双赢技术，是属于良性循环的接口技术。

实现农业资源高效利用、清洁生产的良性循环接口至少由肥料、饲料、加工和贮藏工程技术 4 部分组成。肥料接口工程将畜禽粪便加工成种植业的肥料，完成养殖业到种植业的接口；同时，也将作物秸秆加工还田，完成不同作物间、上下茬口作物间的接口。饲料工程将种植业的主副产品加工处理，并将加工的废物处理，为养殖业提供饲料，完成种植业到养殖业的接口。同时，又将畜禽粪便、屠宰下脚料饲料化，完成养殖业内部不同畜种间的接口。加工工程将种植业和养殖业的产品加工后投放市场，完成系统同外部环境的接口。贮藏工程既可贮存生产原料，又可对农产品起保鲜和后熟作用，实现种植业和养殖业间以及系统与环境间的接口。因此它们既是系统的组成，又是系统的调节器，见图 1-6。

实际上，无论加环、解链还是接口都是人类对多样化的系统结构关系的一种主观能动性的理解和应用，是人类更好地认识和改造自然的有效途径，加环和接口都是十分必要的。而且，近年来发展起来的各种各样的以沼气为纽带的农业生态工程都不同程度地利用了这些技术。事实上，存在于农业生态系统中的接口还有很多，例如，生产和市场的接口，农业与工业的接口等。

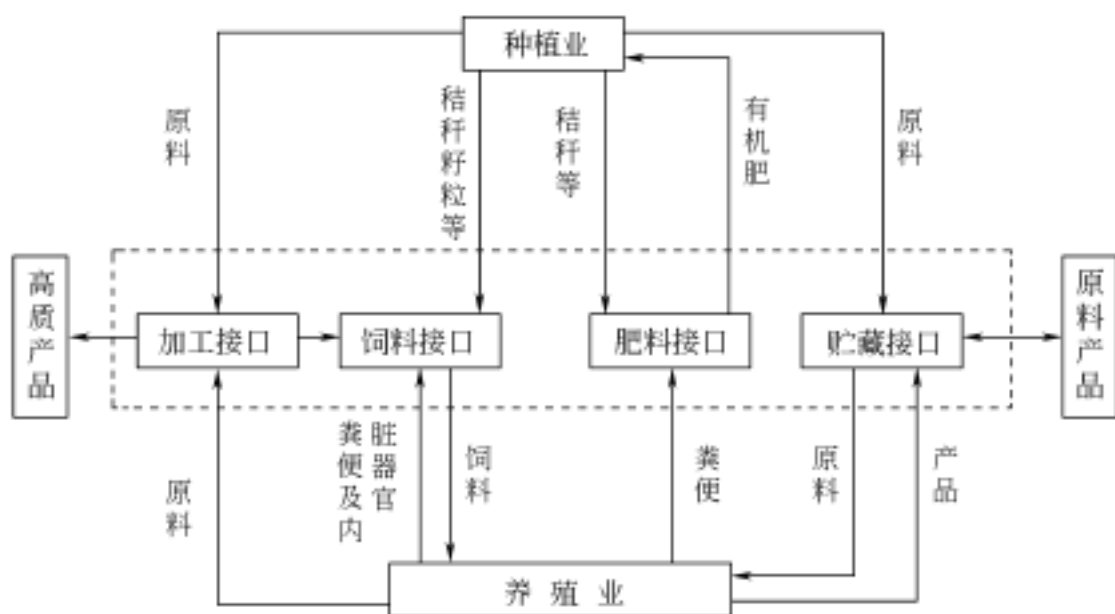


图 1-6 生态农业接口示意

1.3 沼气技术在改善我国农业生态环境方面的作用

1.3.1 我国农业生态环境的危机

大量事实表明，我国农业生产在取得突出成就的同时，也面临着严峻的生态环境危机，这些危机突出表现在以下 3 个方面。

1.3.1.1 生态破坏加剧 在占国土面积 2/3 以上的山区、农牧、农林等生态脆弱地区，普遍存在着严重的生态破坏，并趋于加剧。

目前全国水土流失面积已达 367 万平方千米，占国土面积的 38%，20 世纪 80 年代以来，全国沙化面积年均扩大 2460 千米²，治理速度赶不上扩展速度，多数地方仍是沙进人退。全国草原面积约 3 亿公顷，占国土面积的 31.8%，还有可利用草山草坡 4811.87 万公顷，由于盲目开垦、超载滥牧以及其他人为的破坏，草原“三化”（沙化、碱化、退化）面积已占草原总面积的 1/3，而且总体治理速度仍低于“三化”发展速度。比如，内蒙古自治区在 1999 年至 2000 年所进行的沙漠化土地检测表明，全区沙漠化土地面积为 42.08 万平方千米，占自治区总面积的 35.57%。而且沙化土地遍布全区 12 个盟市，涉及 76 个旗县近千个乡镇苏木。从 1999 年沙漠化

土地检测结果与 1994 年普查数据对比看, 5 年间内蒙古全区沙化面积扩展了 15726 千米², 平均每年扩展 3145 千米², 已远远超过 20 世纪 90 年代初全国沙化的平均每年扩展 2460 千米² 的速度。

由于生态破坏加剧, 包括生物多样性丧失, 近几十年来我国农业灾害趋于频繁, 据统计, 20 世纪 50 年代以来我国的自然灾害(水、旱、风、冻)成灾面积呈上升趋势, 90 年代成灾面积已相当于 50 年代的 273%。与此同时, 病虫害也呈加剧趋势。

生态破坏也加剧了生态脆弱区的贫困, 全国 90% 以上的贫困人口都生活在这类地区, 由于水土流失的加剧以及坡耕地的不断开垦, 不少地区陷入“越垦越穷、越穷越垦”的恶性循环中, 群众的贫困程度加剧, 脱贫的难度增加。

1.3.1.2 农业主产区资源利用不合理及废弃物污染严重 我国的农业主产区虽然没有大的生态破坏问题, 但普遍存在着资源利用不合理, 并导致环境污染, 影响到了农业生产力的持续稳定提高的问题。

总体上, 目前我国化肥、农药施用量已接近或超过某些发达国家的施用水平。如 1995 年全国化肥施用量已达 375 千克/公顷, 即使按复种指数折算(242 千克/公顷), 也已高出发达国家为防止化肥对水体造成污染而设置的安全上限(255 千克/公顷)! 我国农药施用量每年以 10% 左右的速度递增。化肥、农药的超量施用必然导致对地表及地下水质量安全的威胁, 加上规模化养殖场排放的大量污水, 我国地面水体多已受到氮、磷等营养物质的污染, 太湖等地的富营养物质中化肥氮即占入太湖中氮的 29%。据日本学者研究, 目前太湖的污染防治需投入 2000 亿元, 这相当于江苏省 1996 年国民生产总值的 1.5 倍。

目前, 随着养殖业的快速发展, 我国畜禽粪便产生量很大, 据国家环境保护总局 2000 年对全国规模化畜禽养殖业污染情况所做的调查, 1999 年全国畜禽粪便产生总量约为 19 亿吨, 而同期我国各工业行业产生的工业固体废物为 7.9 亿吨, 畜禽粪便产生量是工业固体废弃物的 2.4 倍, 部分地区如河南、湖南、江西这一比例甚

至超过 4 倍，除北京、天津、上海等少数工业发达的城市地区外，大多数地区都超过了一倍以上。其中规模化畜禽养殖场产生的粪便相当于工业固体废弃物的 27%，山东、广东、湖南等地区规模化畜禽养殖场的粪便产生量已相当于本地区工业固体废弃物的 40%。而且，畜禽粪便化学需氧量（COD）已达 7118 万吨，远远超过工业废水与生活废水 COD 排放量之和。

另外，从畜禽粪便的土地负荷来看，我国总体的土地负荷警戒值已经达到体现出一定环境胁迫水平的 0.49，部分地区如北京、上海、山东、河南、湖南、广东、广西等地已经呈现出严重或接近严重的环境压力水平。

根据研究估计，我国畜禽粪便主要污染物 COD、生化需氧量（BOD）、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN 的流失量分别为 797.31 万吨、580.87 万吨、155.88 万吨、46.76 万吨和 407.14 万吨。而 1999 年全国工业废水的 COD 排放总量为 691.74 万吨，生活污水 COD 排放量为 697 万吨，由此可以看出我国畜禽养殖的废水 COD 排放量已超过全国工业废水和生活污水的 COD 排放量。

此外，由于大范围减少有机肥投入，只用不养，使得一些地区如东北黑土区，土壤有机质已由开垦时的 8% ~ 10% 降至 2% ~ 3%，表土层因水蚀、风蚀而逐年变薄，面临土壤基础耗竭的威胁。

1.3.1.3 外源污染加剧 随着农村经济，特别是乡镇企业的高速发展，乡镇企业占整个工业污染的比例已由 20 世纪 80 年代中期的 11% 提高到 1997 年的 45%。三废污染的农田面积已达 0.1 亿公顷，比 1983 年增加了 2.5 倍，约有 15% 的农田受到不同程度的污染，每年因污染减产粮食 100 亿千克以上，直接经济损失达 125 亿元，给土壤和水资源造成严重破坏。由于河流污染物排入海洋，使得入海口水产业蒙受巨大损失，仅 1993 年就减产 50%。

1.3.2 沼气技术在缓解我国农业生态环境危机中的作用

1.3.2.1 保护森林资源，减少水土流失 目前我国广大农村地区，尤其是中西部地区，农村生活用能仍以林木、柴草和秸秆等生物质能源为主，约占 70%。因此大量植被被消耗和破坏。例如，贵州

省每年烧柴 450 万米³，占该省林木砍伐总量的 50% 以上。我国森林资源量最为丰富的云南省，在每年约 4000 多万米³ 的林木消耗中，被作为薪柴烧掉的就占约 1745 万米³。通过在农村推广沼气技术，以沼气代替薪柴，将会有效缓解这种森林植被被大量砍伐的状况。

就云南省而言，目前全省有 80 万座户用沼气池，按每个沼气池每年产生沼气 500 米³，每年节省薪柴 2 ~ 3 吨计算，每年通过沼气利用可节约 160 万 ~ 240 万吨薪柴，按每亩中幼林地薪柴量 4 吨计算，相当于保护了 40 万 ~ 60 万亩林地免遭砍伐。

广西壮族自治区由于近些年来大力推广沼气，使其森林资源得到了有效保护。在 1960 ~ 1985 年的 20 多年中，全省的森林覆盖率一直在 22.01% ~ 22.32% 之间徘徊。1987 年广西的森林资源社会总消耗量中，仅农村生活用能就占了 48.1%，并从 20 世纪 80 年代开始就出现了“赤字”，1980 ~ 1985 年间，年均森林资源消耗量 2085 万米³，而生长量却只有 1577 万米³。为解决这一问题，1985 年以后，自治区大力推广沼气和省柴灶技术，到 1990 年全区森林资源开始出现“长”大于“消”的局面，森林覆盖率从 1985 年的 23.1% 上升到 25.34%，到 2001 年上升到 41%，11 年间增长了 5 个百分点，森林资源蓄积量也从 1991 ~ 1995 年的 3.1 亿米³ 增加到 1996 ~ 2001 年的 4 亿米³，5 年时间净增 9000 万米³。

1.3.2.2 生产有机肥和杀虫剂，降低农药和化肥污染 农村沼气的开发利用，可以解决燃料和肥料问题，减少农药化肥的污染。

燃料问题的解决，在有利于恢复森林生态平衡的同时，也为害虫天敌提供了适宜的生存环境，从而为害虫的生物防治提供了基础；另外，有机物经沼气池厌氧发酵后，寄生虫和害虫的虫卵多数被杀死，减少了病虫害来源；再者，沼液中还含有吲哚乙酸、赤霉素等杀虫成分，可以有效杀死蚜虫、红蜘蛛等害虫。通过这些作用，开发利用沼气技术可以降低农药的使用量。

开发沼气降低化肥使用量，主要是通过生产的沼肥替代化肥来实现。沼肥中的腐殖酸含量为 10% ~ 20%，对土壤团粒结构的形

成起着直接作用；沼肥中的氨态氮和蛋白氮使该有机肥具有缓速兼备的肥效特性；沼肥中的纤维等有机成分为疏松土壤及增加土壤有机质含量提供了必不可少的基础；而沼肥中大量活性微量元素则是提高肥料利用以及增强土壤肥力的因素。长期施用沼肥的土壤，有机质、氮、磷、钾等营养元素的含量明显增加，土壤酶活性增强，土壤物理性状得到不同程度的改善，增强作物对营养的利用和吸收，显著提高土壤肥力，促进农业持续增产。此外，森林的恢复，减少了水土流失，也使得土壤肥力增强，间接减少了化肥的施用量。

1.3.2.3 无害化处理畜禽粪便和生活污水，防治农村面源污染

目前，由于农田径流水、生活污水和养殖污水等造成的面源污染相当严重，而要控制和降低面源污染难度又很大。在这方面，沼气可以发挥很好的作用。养殖粪便污水经过沼气发酵处理，显著降低了废水中有机质的含量，改善排放废水的水质，如果，再对其加以综合利用则会产生更好的环保效果；采用污水净化沼气池处理生活污水可以解决小城镇发展带来的水污染问题。而且，与废水好氧生物处理技术相比，沼气厌氧处理技术还具有运行维护费用低、污泥产量低和产生沼气能源等优点。

近年来，养殖场污水处理沼气工程和生活污水净化沼气池在我国得到了快速发展。截至 2002 年，我国规模化养殖场粪尿废水沼气处理工程，又称能源环保工程，累计达到 1560 处，总池容达 76.51 万米³，年产沼气 1.837 亿米³，年处理有机污水 5013 万吨，发电 968.4 万千瓦时，供气户数 10.9919 万户。我国生活污水净化沼气池累计达 11.51 万处，总池容达到 447.3 万米³，年处理污水 38467.54 万吨。

正是由于沼气技术这些独特的作用，近年来，沼气建设和发展受到了各级政府部门的重视。农业部于 2000 年 1 月启动和实施了以沼气综合利用建设为重点、符合当前农业和农村经济发展新阶段的“生态家园富民计划”，并根据发展基础和生态环境建设的要求，对全国农村沼气建设进行了科学规划：到 2005 年新增户用沼气池

1100 万户，全国沼气池总量达到 2000 万户以上，使 1/ 10 的农户使用沼气，适宜地区沼气普及率达 15%；到 2010 年再新增户用沼气池 3000 万户，全国沼气池总量达到 5000 万户以上，使 1/ 5 的农户使用沼气，适宜地区沼气普及率达 35%。通过规划的实施，将有效提高农村优质能源的用能水平，使 5000 多万农户清洁燃料比例达到 80% 以上，受益人口 2 亿人以上；保护林地 7000 多万亩，改善耕地 4000 多万亩，年处理畜禽粪便 2000 多万吨，改善农村卫生条件；增加农民收入，仅燃料和肥料效益可使户均年直接增收节支 300 元以上。推进实施生态家园建设，使受益农户获得更大的利益，使农村面貌得到更大的改观。

总之，随着科学技术的进步和人们对沼气技术认识的逐步加深，在已有发展局面的基础上，沼气技术会获得持续快速的发展，从而为我国生态环境的改善、农业生态工程的发展以及农村经济水平的提高做出更多的贡献。

(杨世关 倪慎军)

主要参考文献

- 1 王兆骞主编. 中国生态农业与农业可持续发展. 北京: 北京出版社, 2001
- 2 张壬午等编著. 农业生态工程技术. 郑州: 河南科学技术出版社, 2000
- 3 方正明, 刘金铜等著. 生态工程. 北京: 气象出版社, 2002
- 4 骆世明主编. 农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 2001
- 5 苑瑞华主编. 沼气生态农业技术. 北京: 中国农业出版社, 2002
- 6 李长生主编. 农家沼气实用技术. 北京: 金盾出版社, 2004
- 7 马世俊, 李松华主编. 中国的农业生态工程. 北京: 科学出版社, 1987
- 8 陈阜主编. 农业生态学. 北京: 中国农业大学出版社, 2003

第 2 章 农村家用沼气技术基础

2.1 沼气发酵基本原理

沼气是一种可燃性气体混合物，它的主要成分是甲烷（ CH_4 ），其次是二氧化碳（ CO_2 ）。除此以外，还含有少量的氮、氢、氧、氨、一氧化碳（ CO ）和硫化氢（ H_2S ）等气体。沼气是有机物质（如农作物秸秆、人畜禽粪便、垃圾以及有机废弃物等）在厌氧条件下，通过特定微生物的作用形成的。沼气是一种方便、清洁的气体燃料，可以广泛应用于生产和生活中。

2.1.1 概述

早在几千年以前，人们就已经发现了自然界中存在一种可燃的气体。1776 年，意大利物理学家 A. 沃尔塔测出湖泊底部植物体腐烂产生的气体中含有甲烷。直到 1875 年俄国学者波波夫首先利用河泥加入纤维素物质，产生出甲烷，并发现了甲烷发酵是一个微生物学的过程。这个发现为以后沼气发酵的应用奠定了基础。此后，大量的微生物学家对沼气发酵的过程进行了许多探索和研究。在 1901 年，荷兰学者桑格对甲烷细菌的形态特征提出了一个比较清晰的概念，并发现氢和二氧化碳的混合物能发酵产生甲烷。1916 年，俄国微生物学家奥梅梁斯基分离出第一株甲烷菌。1936 年巴克尔命名为奥氏甲烷杆菌，并发现沼气发酵分为产酸和分解酸形成沼气两个阶段。初步建立了沼气发酵的两阶段学说。1950 年，美国亨格特教授利用厌氧技术解决了甲烷菌的分离和培养的难题。1967 年布赖恩特用改良的亨格特技术将奥氏甲烷菌进行分离，获得了甲烷杆菌 MOH 菌株和“S”有机体，证实了原奥氏甲烷杆菌是此两种菌的共生体，从而揭示了产氢细菌和甲烷菌之间的相互依赖关系，更进一步推动了甲烷发酵的研究。

2.1.2 沼气发酵微生物

有机物质在厌氧条件下变成沼气，要经过一系列复杂的物理化学变化，其中任何变化都离不开微生物的作用。沼气池里有各种类型的微生物，它们的作用各不相同，必须使微生物分工合作才能使有机物产生沼气。

2.1.2.1 沼气发酵微生物种类 近年来国内外科学家对沼气微生物进行了大量的研究，已发现沼气池内不产甲烷细菌有 18 个属 51 种，产甲烷细菌有 3 个目、4 个科、7 个属和 13 种。其中，不产甲烷微生物能将复杂的有机物变成简单的小分子量的物质。不产甲烷细菌按照在生长过程中对氧气的要求分为好氧菌、专性厌氧菌和兼性厌氧菌 3 类。其中专性厌氧菌数量最大，是在不产甲烷阶段起主要作用的菌类。产甲烷菌是沼气的生产者。产甲烷菌是沼气发酵的核心，它们是一群非常特殊的微生物。它们严格厌氧，对氧和氧化剂非常敏感，最适合 pH 值的范围为中性或微碱性。它们依靠二氧化碳和氢生长，并以废弃物的形式排出甲烷。甲烷菌在自然界分布广泛，如湖泊、沼泽、土壤中，淡水或碱水池塘污泥中，下水道污泥、腐烂秸秆堆以及城乡垃圾堆中都有大量的甲烷菌存在。由于甲烷菌的分离、培养和保存都有较大的困难，所以对甲烷菌的生理生化特征还不清楚，甲烷菌的纯种还不能应用于生产，这些都直接影响沼气发酵的进一步研究和沼气池的产气率。

2.1.2.2 沼气发酵微生物之间的关系 在沼气发酵中，产甲烷菌和不产甲烷菌相互依赖，相互制约，一方面互为对方创造维持生命活动所需的物质基础和适宜的环境条件，另一方面又互相制约。它们之间的关系主要表现在下面几个方面。

不产甲烷菌为产甲烷菌提供生长活动所需的物质和养分，产甲烷菌帮助不产甲烷菌为其生化反应解除反馈抑制，不产甲烷菌通过其生命活动为产甲烷菌提供合成细胞物质和产甲烷菌所需的前提物质和能源物质；而另一方面，不产甲烷菌的发酵产物又可抑制本身的发酵过程。酸的积累可以抑制产酸细菌的继续产酸，氢的积累也同样抑制产氢细菌继续产氢。但是在正常发酵中，产甲烷菌可

以连续不断的利用酸、氢气和二氧化碳等，使厌氧消化中氢和酸不能积存，这样不产甲烷菌就可以进行正常的代谢和生长。

不产甲烷菌为产甲烷菌创造适合其生长和产甲烷的厌氧环境。在沼气发酵初期，随着原料和水分的加入，沼气池中也进入了大量的空气，这对于在厌氧环境中生长活动的产甲烷菌是十分不利的。但是由于不产甲烷菌类中的好氧和兼性厌氧微生物的活动，使得发酵液中含氧量不断下降，从而为产甲烷菌的生长和活动创造了良好的厌氧环境。

不产甲烷菌与产甲烷菌共同调节维持沼气池中的 pH 值，使其保持在一个适宜的状态。在沼气发酵初期，不产甲烷菌首先降解原料中的淀粉和糖类等，产生大量的有机酸和 CO_2 。产生的 CO_2 也部分溶于水，这就使发酵液的 pH 值下降。但是，由于不产甲烷菌类群中的氨化细菌同时也要进行氨化作用，其产生的氨气 (NH_3) 可中和部分酸；再由于不断的产生甲烷，消耗掉乙酸、氢气 (H_2) 和 CO_2 ，又使发酵液的 pH 值上升。所以在日常发酵中，沼气池内的 pH 值能通过产甲烷菌和不产甲烷菌的共同作用而维持在一个适宜的状态。

2.1.2.3 沼气发酵的基本原理 沼气发酵的实质是微生物自身物质代谢和能量代谢的一个生理过程。沼气发酵过程中，微生物在厌氧的情况下为了取得进行自身的生活和繁殖所要的能量，而将一些高能量的有机物质分解，有机物质在转变为简单的低能量成分的同时放出能量以供微生物代谢之用。总结多年的研究表明，沼气发酵的过程一般可以分为 3 个阶段。

第一阶段是液化阶段。由微生物的胞外酶，如纤维素酶、淀粉酶、蛋白酶和脂肪酸酶等对有机物质进行体外酶解，将多糖水解成单糖或二糖、蛋白质分解成多肽和氨基酸、脂肪分解成甘油和脂肪酸。通过这些微生物对有机物质进行体外酶解，把固体有机物转变成可溶于水的物质。这些水解产物可以进入微生物细胞，并参与细胞内的生物化学反应。

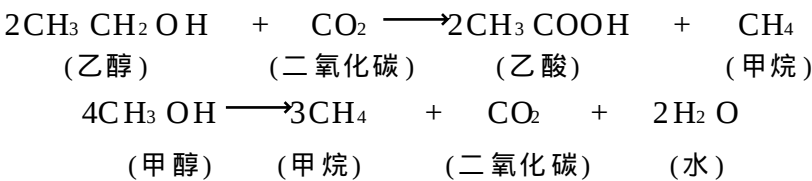
第二阶段是产酸阶段。上述水解产物进入微生物细胞后，在胞

内酶的作用下，进一步将它们分解成小分子化合物，如低级挥发性脂肪酸、醇、醛、酮、脂类、中性化合物、氢气、二氧化碳、游离状态氨等。其中主要是挥发性酸，乙酸比例最大，约占 80%，故此阶段称为产酸阶段。参与这一阶段的细菌，统称为产酸菌。

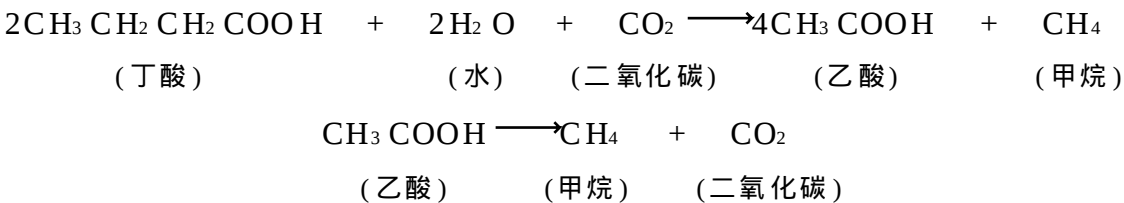
液化阶段和产酸阶段是一个连续过程，可统称为不产甲烷阶段。这个阶段是在厌氧条件下，经过多种微生物的协同作战，将原料中的碳水化合物（主要是纤维素和半纤维素）、蛋白质、脂肪等分解成小分子化合物，同时产生二氧化碳和氢气，这些都是合成甲烷的基质。因此，可以把液化阶段和产酸阶段看成是原料加工阶段，将复杂的有机物转化成可供甲烷细菌利用的基质，如甲酸、乙酸、丙酸等。其中乙酸就是脂肪、淀粉和蛋白质发酵后生成的一种副产物，甲烷大部分是在发酵过程中由乙酸形成的，所以这个阶段为大量产生甲烷奠定了雄厚的物质基础。

第三阶段是产甲烷阶段。在这一阶段中，产氨细菌大量繁殖和活动，氨态氮浓度增高，挥发酸浓度下降，为产甲烷菌创造了适宜的生活环境，产甲烷菌大量繁殖。产甲烷菌利用简单的有机物、二氧化碳和氢等合成甲烷。在这个阶段中合成甲烷主要有以下几种途径。

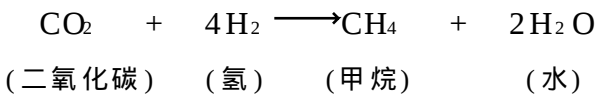
(1) 由醇和二氧化碳形成甲烷



(2) 由挥发酸形成甲烷



(3) 二氧化碳被氢还原形成甲烷



沼气发酵的 3 个阶段，可用图 2-1 表示。

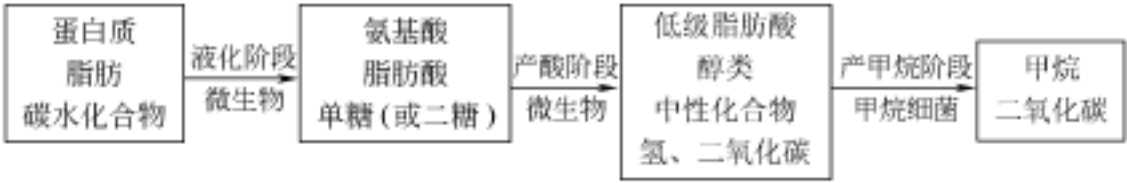


图 2-1 沼气发酵过程简图

沼气发酵的 3 个阶段是相互连接、交替进行的，它们之间保持动态平衡。在正常情况下，有机物质的分解消化速度和产气速度相对稳定。如果平衡被破坏，就会影响产气。若液化阶段和产酸阶段的发酵速度过慢，产气率就会很低，发酵周期就变的很长，原料分解不完全，料渣就多。但如果前两个阶段的发酵速度过快而超过产甲烷速度，则会有大量的有机酸积累起来，出现酸阻抑，也会影响产气，严重时会出现“酸中毒”，而不能产生沼气（甲烷）。

2.2 沼气发酵原料及处理

2.2.1 沼气发酵原料及其产气特性

2.2.1.1 沼气发酵原料 日常生活中的农作物秸秆、杂草、树叶等，猪、牛、马、羊、鸡等家畜家禽的粪便，农业、工业产品的废水废物（如豆制品的废水、酒糟和精渣等），还有水生植物都是用来进行沼气发酵的原料。沼气发酵原料既是生产沼气的物质基础，又是沼气微生物进行正常生命活动所需的营养和能量的物质来源。为了保证沼气发酵过程中有充足而稳定的发酵原料，同时使池内发酵既不结壳，又容易进料和出料，达到管理方便，产气率高的目的，须认真选择好沼气发酵原料。为了确切地表示固体或液体中有机物质的含量，一般采用如下一些方法来测定原料的有机质的量。

(1) 总固体（TS）和挥发性固体（VS） 原料中总固体、挥发性固体、水分和灰分之间的组成关系如图 2-2 所示。

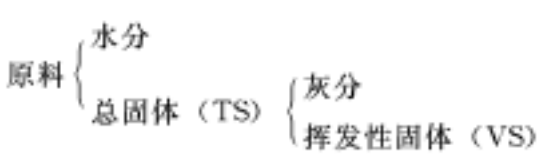


图 2-2 TS、VS、水分、灰分之间的关系

总固体 (total solid, TS), 又称干物质, 是指发酵原料除去水分以后剩下的物质。测定方法为: 把样品放在 105 的烘箱中烘干至恒重, 此时物质的

质量就是该样品的总固体质量。

$$TS = \frac{\text{样品中 TS 质量 } W_{干}}{\text{样品质量 } W_s} \times 100 \%$$

挥发性固体 (volatile solid, VS), 是指原料总固体中除去灰分以后剩下的物质。测定方法为: 将原料总固体样品在 500 ~ 550 温度下灼烧 1 小时, 其减轻的质量就是该样品的挥发性固体质量, 余下的物质是样品的灰分, 其质量是该样品灰分的质量。

$$VS = \frac{\text{样品 TS 质量 } W_{干} - \text{样品灰分质量 } W_{灰}}{\text{样品 TS 质量 } W_{干}} \times 100 \%$$

在沼气发酵中, 沼气微生物只能利用原料的挥发性固体, 而灰分是不能利用的。因此就应该用挥发性固体的质量来表示原料的质量。但考虑到测定挥发性固体含量要比测定总固体含量的要求更高, 在大多数农村还不具备这个条件, 而农村常用的沼气发酵原料 (粪便和秸秆) 在风干状态下的总固体质量分数又比较稳定, 测定几次后的平均值基本就可以作为常数通用。一般就使用总固体质量表示农村原料质量, 计算比较方便。农村常用发酵原料总固体含量见表 2-1。

表 2-1 农村常用发酵原料总固体含量 (近似值) %

发酵原料	总固体含量	水分含量	发酵原料	总固体含量	水分含量
风干稻草	83	17	猪粪	18	82
风干麦草	82	18	牛粪	17	83
玉米秆	80	20	人尿	0.4	99.6
青草	24	76	猪尿	0.4	99.6
人粪	20	80	牛尿	0.6	99.4

(2) 生化需氧量 (BOD) BOD 是指微生物将溶液中的有机质

分解所消耗氧的量，称生化需氧量（biochemical oxygen demand）。测定生化需氧量要保持一定的温度和一定的时间，通常在 20℃ 下，经 5 天培养后所消耗的溶解氧量，用 BOD₅ 表示，单位为 千克/米³。

(3) 化学需氧量（COD） COD 是指在一定条件下，溶液中有有机质与强氧化剂重铬酸钾作用所消耗氧的量，即称为化学需氧量（chemical oxygen demand）。单位为 千克/米³ 或 千克/升。1 千克 COD 可能生产 CH₄ 约 0.35 米³。

COD 和 BOD 被普遍用来表示原料中含有机质的量，BOD 基本上反映了能被微生物分解的有机质的量。不易被微生物分解的物质，其 COD 可能比 BOD 大得多。生活污水的 BOD 与 COD 之比常在 0.4~0.8 之间。

(4) 农村常用的发酵原料产出量 人、畜、禽排泄量及产沼气量见表 2-2，猪、牛、马日排粪、尿量见表 2-3。

表 2-2 人、畜、禽排泄量及产沼气量

种 类	日排粪量 / 千克	日排尿量 / 千克	年排粪量 / 千克	产沼气量 / 立方米
人(成年)	0.5	1	183	5.4~5.5
猪(饲养 7 个月)	2~5.5	4~8	730~2008	50~78.6
黄牛	10~15		3650~5475	110~164
水牛	15~20		5475~7300	164~220
奶牛	34	34	12410	208~370
马	15	15	5475	190
羊	1.5	2	548	17.5
鸡	0.1		36.5	2.7
鸭	0.15		54.8	
鹅	0.25		90	

2.2.1.2 沼气发酵原料的产气特性 不同的发酵原料进行沼气发酵时具有不同的产气特性，即使同一种原料，当其处在不同地区或所处的发酵条件不相同时，其产气特性也不相同。

表 2-3 猪、牛、马日排粪、尿量

项目类别			日排粪量/ 千克						日排尿量/ 千克					
			春	夏	秋	冬	全年平均	近似值	春	夏	秋	冬	全年平均	近似值
猪质量 / 千克	母猪	大(100 以上)	8. 6	9. 4	8. 0	6. 6	8. 15	8. 0	12. 40	10. 9	14. 75	11. 75	12. 45	12. 5
		中(50 ~ 100)	4. 35	4. 65	5. 4	4. 3	4. 67	4. 5	11. 16	9. 35	13. 9	10. 4	11. 2	11. 0
		小(50 以下)	3. 6	3. 5	4. 3	3. 0	3. 6	3. 5			10. 9		10. 9	11. 0
	架子猪	特小(25 以下)	2. 0	2. 0	2. 05	1. 65	1. 92	2. 0	4. 14	4. 5	4. 7	3. 25	4. 15	4. 0
		小(25 ~ 50)	3. 9	2. 9	3. 5	2. 75	3. 26	3. 5	7. 76	6. 5	7. 7	9. 05	7. 75	8. 0
	肥猪	大(100 以上)	5. 2			5. 4	5. 3	5. 5						
		中(75 ~ 100)	5. 85	5. 2	4. 7	4. 4	4. 03	5. 0	7. 86	7. 5	8. 7	7. 5	7. 9	8. 0
		小(50 ~ 75)		6. 25	4. 2	4. 25	4. 9	5. 0	8. 17	8. 05	8. 6	8. 2	8. 2	8. 0
	牛质量 / 千克	黄牛	大(150 以上)	9. 25	8. 5	8. 45	8. 4	8. 65	8. 5					
中(50 ~ 150)			6. 05	7. 55	6. 85	7. 55	7. 0	7. 0						
小(50 以下)			4. 1	4. 75	6. 5	6. 5	5. 46	5. 5						
水牛		大(200 以上)	11. 2	24. 6	25. 2	24. 0	21. 2	21. 5						
		中(200 以下)	9. 9	12. 0	13. 4	13. 0	12. 1	12. 0						
马质量 / 千克		(150 左右)	7. 2	7. 1	6. 85	4. 2	6. 33	6. 5						

注：1. 近似值系全年日平均数的四舍五入数。
2. 该表由湖南省怀化地区农村能源办公室测定。

(1) 原料产气率、料液产气率、池容产气率

原料产气率是指单位原料质量在整个发酵过程中的产气量。说明在一定的发酵条件（即配料、温度、时间、浓度、酸碱度等）下，原料被利用水平的高低。原料产气率的表示方法如下。

原料产气率 = $\frac{\text{沼气(米}^3\text{)}}{\text{TS(千克)}}$

原料产气率 = $\frac{\text{沼气(米}^3\text{)}}{\text{VS(千克)}}$

原料产气率 = $\frac{\text{沼气(米}^3\text{)}}{\text{COD(千克)}}$

料液产气率是指单位体积的发酵料液每天产生沼气的数量。其单位为米³/ (米³ · 天)。

当料液中所含原料的种类和质量（料液度）不同，其产气率也不同。故料液产气率不能说明发酵原料被利用水平的高低，也不能说明消化器容积被利用的程度，实际应用中一般不采用料液产气率。

池容产气率是指沼气池（消化器）单位容积每天生产沼气流量的多少。其表示单位为：生产中使用“米³/ (米³ · 天)”；小型试验时用“升/ (升 · 天)”。

池容产气率说明装置被利用水平的高低。

原料产气率和池容产气率说明了原料和装置被利用水平的高低，这两个指标是衡量沼气生产水平的重要参数。使用它来评价消化器时，要考虑二者的发酵条件和生产状况。例如，甲池池容产气率为 0.15 米³/ (米³ · 天)，乙池为 0.12 米³/ (米³ · 天)，是否就能肯定甲池的质量比乙池好呢？这要分析一下甲池的原料质量、浓度是否正处在产气高峰时期等，根据综合因素来判定消化器的生产水平。又例如甲池的原料产气率为 0.2 米³/ 千克 (TS)，乙池为 0.3 米³/ 千克 (TS)，不能简单地就说乙池的原料比甲池的质量高。要分析甲乙两池的发酵条件和发酵滞留期的长短和发酵温度等，再来作出评价。农村常用发酵原料在中温条件下的原料产气量见表 2-4。

表 2-4 农村常用发酵原料在中温条件下的原料产气量

原料种类	每千克 TS 沼气产量/ 升		原料种类	每千克 TS 沼气产量/ 升	
	滞留 10 天	滞留 20 天		滞留 10 天	滞留 20 天
玉米秆	290	470	猪粪	340	490
麦秆	200	280	牛粪	170	220
甜菜叶	290	340	马粪	140	200
青草	235	305	羊粪	105	210
水生杂草	290	380	家禽粪	190	430

(2) 发酵原料产气量的估算 农村各种发酵原料能够转变成沼气（甲烷）的最大数量称为“理论产气量”，也可以称为发酵原料

的“产气潜力”。理论产气量的大小取决于该发酵原料中的碳水化合物、蛋白质和类脂化合物等有机物的含量，这类有机物的含量越大，发酵原料的产气潜力就越大；反之发酵原料中的灰分和木质素含量越大，其产气潜力就越小。对农村常用的 10 种发酵原料的产气潜力进行了测定和计算（见表 2-5）。

表 2-5 农村常用 10 种发酵原料的化学组成和理论产气量（以干重计）

原料种类	1 千克发酵原料中化学成分的含量/ 千克					理论产气量/ (米 ³ / 千克)	
	灰分	木质素	类脂	蛋白质	碳水化合物	沼气	甲烷
水葫芦	0. 1275	0. 1099	0. 0386	0. 1167	0. 6073	0. 6254	0. 3220
水花生	0. 1487	0. 1307	0. 0271	0. 0972	0. 5963	0. 5815	0. 2964
玉米秆	0. 0830	0. 1811	0. 0463	0. 0633	0. 6263	0. 5984	0. 3109
麦草	0. 1051	0. 2021	0. 0234	0. 0298	0. 6396	0. 5426	0. 2756
稻草	0. 1581	0. 1756	0. 0321	0. 0316	0. 6026	0. 5291	0. 2718
人粪	0. 1824	0. 1452	0. 0814	0. 1753	0. 4157	0. 6008	0. 3244
猪粪	0. 2244	0. 1801	0. 0603	0. 1148	0. 4204	0. 5146	0. 2745
鸡粪	0. 2084	0. 1876	0. 0455	0. 0882	0. 4703	0. 5047	0. 2645
马粪	0. 1834	0. 2401	0. 0283	0. 0946	0. 4536	0. 4737	0. 2436
牛粪	0. 2713	0. 3012	0. 0528	0. 1046	0. 2704	0. 3813	0. 2062

结果表明： 不同的发酵原料，其产气潜力不同； 同一类发酵原料，由于来源、存放时间等条件的不同，其有机物含量会有所变化，产气潜力也有一定的变化； 日常用发酵原料产沼气潜力为 0. 38 ~ 0. 62 米³/ 千克（干重），产甲烷潜力为 0. 2 ~ 0. 32 米³/ 千克（干重）。一般来说，产气潜力大的发酵原料能够生产更多的沼气。

在日常的沼气发酵中，原料不可能完全分解。即使分解的原料也有一部分转化为污泥和菌体以及其他的产物而不能变成沼气。所以实际的原料产气量比理论产气量（即按巴斯维尔公式计算的产气量）要低。根据经验，在中温发酵条件下，猪粪、牛粪实际产气量占理论产气量的 70%左右，稻草占 44%左右。农村家用水压式沼气池用猪粪、牛粪、稻草、青草、酒糟等原料混合发酵。湖南省宁乡县农村能源办公室 1981 ~ 1982 年测试结果，冬春季的实际沼气产气量占理论产气量的 20%左右，夏秋季实际沼气产气量占理论产气量的 50%左右。为便

于人们在沼气发酵过程中估算发酵原料的产气量，农业部成都沼气科学研究所提供的常温发酵条件下鲜料产气量见表 2-6。

表 2-6 农村常用沼气发酵原料（鲜料）产气量

原 料 种 类	1 千 克 鲜 料 产 气 量/ 米 ³	生 产 1 米 ³ 沼 气 需 原 料 量/ 千 克	备 注
鲜人粪	0.040	25.0	鲜粪
鲜猪粪	0.038	26.3	鲜粪
鲜牛粪	0.030	33.3	鲜粪
鲜马粪	0.035	28.6	鲜粪
鲜鸡粪	0.031	32.3	鲜粪
鲜青草	0.084	11.9	鲜粪
玉米秆	0.190	5.3	风干态
高粱秆	0.152	6.6	风干态
稻草	0.152	6.6	风干态

(3) 产气速度 产气速度是指发酵原料投入消化器后产生沼气快慢的程度。知道了产气速度，便于掌握消化器产气规律，从而可以确定消化器进料、出料的时间。经过对猪粪、牛粪、马粪、人粪、稻草、麦草、玉米秆和青杂草等农村常用沼气原料的产气特性进行测定，结果表明秸秆类原料木质纤维含量高，碳氮比高，分解速度慢，产气速度慢。粪便类原料碳氮比低，分解较快。在 35 温度条件下，粪便经 60 天就可以发酵完全，秸秆则需要 90 天才能发酵完全，几种原料产气速度列于表 2-7。

表 2-7 农村常见发酵原料产气速度

发酵时间/ 天 原料名称	原料产气速度(占总气量的百分数)/ %									原料产气率 / (米 ³ / 千克 TS)
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
人 粪	40.7	81.5	94.1	98.2	98.7	100				0.43
猪 粪	46.0	78.1	93.9	97.5	99.1	100				0.42
牛 粪	34.4	74.6	86.2	92.7	97.3	100				0.30
青 草	—	—	—	98.2	—	100				0.41
麦 草	8.8	30.8	53.7	78.3	88.7	93.2	96.7	98.9	100	0.435

注：发酵温度 35 ；发酵周期粪类 60 天，秸秆类 90 天；发酵料液浓度是总固体含量为 60 %。

在温度为 20 条件下，每千克总固体产气量为 35 时的 60%左右。

2.2.2 沼气发酵原料预处理

2.2.2.1 发酵原料的浓度 沼气发酵原料的浓度又称料水比。掌握适当的料液浓度对沼气发酵的研究具有很重要的意义。沼气池最适宜的发酵浓度，随着季节的交替（即发酵温度不同）而相应地变化。一般来说，沼气池发酵浓度的变化范围为 6% ~ 12%，夏季浓度以 6% ~ 10% 为宜，低温季节浓度则以 10% ~ 12% 为佳。

可以用简便的方法来测定各种原料所含干物质和水分的比例：将准备好的原料充分搅拌均匀，从中取出少量的混合原料，晒干或烘干，直至质量稳定为止。一般原料都含有大量的水分，表 2-8 介绍了常用沼气发酵原料的含水量。

表 2-8 常用沼气发酵原料的含水量

原 料 名 称	鲜人粪	鲜人尿	鲜猪粪	鲜猪尿	鲜牛粪	鲜羊粪	鲜马粪	鲜鸡粪	干稻草
含水量/ %	80	99.6	82	96	83	60	76	70	17
干物质含量/ %	20	0.4	18	4	17	40	24	30	83
原 料 名 称	干麦草	玉米秆	油菜秆	花生藤	蚕豆壳	青草	污泥	一般风干粪	
含水量/ %	18	20	17	12	28	76	78	30 ~ 40	
干物质含量/ %	82	80	83	88	72	24	22	60 ~ 70	

2.2.2.2 碳氮比 碳氮比是指发酵原料中所含的碳素和氮素量之比，常用符号 C/ N 表示。沼气发酵原料的碳氮比，是根据微生物所需要的营养物质而定的。碳元素为沼气微生物的生命活动提供能源，又是形成甲烷的主要物质，氮元素是构成沼气微生物细胞的主要物质。微生物对碳素和氮素的需求量有一定的比例。如果沼气发酵原料中的 C/ N 过高，例如 30 : 1 以上，发酵就不易启动，而且产气效果不好。在农村发酵原料中，通常根据碳氮的含量多少将原料分为两类。一类是富氮原料，主要是指人、畜和家禽的粪便。这类原料的颗粒较细，含有较多的低分子化合物，氮素含量较高，碳氮比一般小于 30 : 1（见表 2-9），其产气特点是发酵周期短，容易

分解，且产气速度快，单位原料的总产气量比农作物秸秆低。另一类是富碳原料，主要是指农作物秸秆。它的碳素含量较高，碳氮比一般在 30 1 以上。农作物秸秆通常是由木质素、纤维素、半纤维素、果胶和蜡质等化合物组成，其产气特点是分解速度较慢，产气周期较长，但单位原料总产气量较高，因此使用这种原料在入池前要进行预处理，以便提高产气效果。

表 2-9 常用沼气发酵原料的碳氮比（近似值）

原 料		碳素占原料质量/ %	氮素占原料质量/ %	碳 氮 比
粪 便 类	鲜羊粪	16	0.55	29 1
	鲜牛粪	7.3	0.29	25 1
	鲜马粪	10	0.42	24 1
	鲜猪粪	7.8	0.60	13 1
	鲜鸡粪	35.7	3.70	9.65 1
	鲜人粪	2.5	0.85	2.9 1
	鲜人尿	0.4	0.93	0.43 1
秸 秆 类	干麦草	46	0.53	87 1
	干稻草	42	0.63	67 1
	稻壳	40	0.60	66 1
	玉米秆	40	0.75	53 1
	落叶	41	1.00	41 1
	大豆茎	41	1.30	32 1
	野草	14	0.54	27 1
	花生藤	11	0.59	19 1
	红薯藤叶	36	5.3	6.8 1
	红花草子秆	44.3	1.4	33 1
	蚕豆秆	40.9	1.94	21 1
	油菜秆	38.4	2.09	18 1
	马铃薯秆	36.8	2.13	17 1
	水浮莲	23.6	1.42	17 1
	水葫芦	30.4	3.12	10 1
	水花生	34.5	3.89	9 1

碳氮比对厌氧消化的影响问题，国内外科学家都进行过大量的研究，而结论并不一致。一般原料的碳氮比介于（15 ~ 30） 1，即可正常发酵，一旦达到 35 1 时，产气量明显减少。但是也有说法

认为碳氮比为 16 : 1 和 13 : 1 时产气率高。根据科研部门和我国农村沼气发酵的试验和经验，投入原料的 C / N 以 (20 ~ 30) : 1 的比例配比为宜。

不同形式的碳素，被微生物利用的难易程度很不一样。例如纤维素、半纤维素、葡萄糖、木质素都是碳水化合物，它们都含有碳素，但葡萄糖就很容易被沼气微生物利用产生沼气；微生物对氮素的利用也是如此。

当 C / N 过小时，过量的氮变成可溶性氮，导致料液“氮中毒”，会使发酵停止。

混合原料的 C / N 为各种原料碳量和与氮量和之比。即：

$$K = \frac{C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + \dots}{N_1 X_1 + N_2 X_2 + N_3 X_3 + \dots} = \frac{\sum C_i X_i}{\sum N_i X_i}$$

式中 C——碳素的质量分数，%；

N——氮素的质量分数，%；

X——原料质量，千克；

K——C / N。

例：某农家有玉米秆 500 千克，人粪 80 千克，要求配成 C / N = 25 / 1 的混合原料，需要多少猪粪？

设需要猪粪为 X 千克

查表 2-9 知：玉米秆 C 40%，N 0.75%

人 粪 C 2.5%，N 0.85%

猪 粪 C 7.8%，N 0.60%

所以 $25 / 1 = \frac{500 \times 40\% + 80 \times 2.5\% + X \times 7.8\%}{500 \times 0.75\% + 80 \times 0.85\% + X \times 0.60\%}$

得出：X = 1267.36 千克

农户需用猪粪 1267.36 千克满足配料要求。

2.2.2.3 原料的预处理 农作物秸秆碳素含量高，其 C / N > 30 / 1。秸秆由木质素、纤维素、半纤维素、果胶和蜡质等化合物组成进行沼气发酵。秸秆难于消化，其中的木质素是一种很难被细菌分解利用的物质，而纤维素的分解也比较慢。所以，农业废物沼气

发酵时的分解率一般只有 50% 左右。而可溶性原料就较容易消化，进行沼气发酵时，废水中的可溶性有机质往往可去除 90% 以上。

秸秆表面有一层蜡质，不容易被沼气微生物所破坏。如果秸秆直接下池会大量漂浮结壳，而未被充分利用分解，所以必须进行预处理。常用的预处理方法有以下几种。

(1) 切碎或粗粉碎 用铡刀将秸秆切成 60 毫米左右长短，或进行粗粉碎。这样不仅可以破坏秸秆表面的蜡质层，而且增加了发酵原料与细菌的接触面，可以加快原料的分解利用。同时，也便于进出料和施肥时的操作。经过切碎和粗粉碎的秸秆下池发酵，一般可以将产气量提高 20% 左右。

(2) 堆沤处理 堆沤处理是先将秸秆进行好氧发酵，然后再将堆沤过的秸秆下沼气池进行厌氧发酵。秸秆经过堆沤后，纤维束变得松散，这样扩大了纤维素与细菌的接触面，可以加快纤维素的分解，进而加快沼气发酵过程的进行；通过堆沤还可以破坏秸秆表面的蜡质层，下池后不易浮料结壳。

堆沤的方法有两种。一种是池外堆沤，先将作物秸秆铡碎，起堆时分层加入占干料重 1% ~ 2% 的石灰或草木灰，用以破坏秸秆表面的蜡质层，并中和堆沤时产生的有机酸。然后再层层泼一些人畜粪尿或沼气液肥、污水，加水量以使料堆下部不流水，而秸秆充分湿润为度。料堆上覆盖塑料薄膜或糊一层稀泥。堆沤时间夏季 2 ~ 3 天、冬季 5 ~ 7 天。当堆内发热烫手时 (50 ~ 60 ℃)，要立即翻堆，把堆外的翻入堆内，并补充些水分，待大部分秸秆颜色呈棕色或褐色时，便可投入沼气池内发酵。

另一种方法是池内堆沤。池内堆沤与池外堆沤相比，其能量和养分损失要少一些，而且可以利用堆沤时所产生的热量来增高池温。新池进料前应先取出沼气池内试压的水，老池大换料时也要把发酵液基本取出 (留下菌种部分)，然后按配料比例配料，可以在池外拌匀后装入沼气池；也可以将粪、草分层，一层一层地交替，均匀装入池内。草料必须充分湿润，但池底基本不能积水。将活动盖口用塑料薄膜盖好，当发酵原料的料温上升到 50 ℃ 时 (打开活

动盖口塑料薄膜时有水蒸气), 再加水至零压水位线, 封好活动盖。使用这种方法, 能够使池温增高, 及早产气。

动物粪便属于富氮性原料, 其 $C/N < 25/1$ 。粪便类原料的颗粒较细, 含有较多低分子化合物, 原料分解产气速度快, 不必进行预处理。

2.2.2.4 接种物 接种物是指为了加快沼气发酵的启动速度和提高沼气产气量而向沼气池加入的富含沼气微生物的物质。在一般的沼气发酵原料和水中, 沼气微生物的含量比较少, 靠其自己繁殖, 不利于尽快产气。所以在新池投料和老池大换料的时候, 一定要添加 30% 含有大量沼气微生物的接种物, 这样才能保证沼气发酵的顺利进行。

大自然里, 产甲烷菌群的分布是比较广的, 如沼泽、池塘污泥, 以及老粪坑底脚污泥, 屠宰场阴沟污泥, 酒厂、豆制品厂废水污泥, 沼气池沉渣表面污泥等, 都可作沼气发酵的菌种。由于各种厌氧消化污泥中含有大量的沼气微生物, 具有很高的生物活性, 所以又称“活性污泥”。

如果当地接种物难以获得或数量不足时, 可以采取扩大富集培养的方法, 把少量的接种物加以增殖, 然后逐步扩大, 作为沼气发酵的接种物。

2.2.2.5 浓度 沼气发酵料液的浓度是指沼气发酵料液中发酵物质的质量分数。采用发酵物质总固体 (TS) 表示的称作总固体浓度 (TS%), 采用挥发性固体 (VS) 表示的称作挥发性固体浓度 (VS%)。例如, 100 千克发酵液中含总固体 8 千克, 则总固体浓度 (TS%) = 8%; 100 千克发酵液中含挥发性固体 7 千克, 则挥发性固体浓度 (VS%) = 7%。

例: 使用猪粪为单一原料的消化器中, 发酵料液总质量为 4000 千克, 据计算所投猪粪中的总固体量为 320 千克, 则总固体浓度为多少?

$$TS\% = \frac{320}{4000} \times 100\% = 8\%$$

混合发酵原料的料液总固体浓度算法如下。

$$m_0 = \text{TS}\% = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots}{Z} \times 100\%$$

式中 X ——原料总固体量，千克；

Z ——发酵料液总质量，千克；

m_0 ——混合发酵料液总固体的质量分数，即 $\text{TS}\%$ 。

例：一粪便和秸秆混合投料的沼气池，据计算投入猪粪的总固体为 60 千克，人粪的总固体为 40 千克，麦草的总固体为 200 千克，沼气池料液总量为 3750 千克，求混合发酵料液总固体的质量分数？

$$m_0 = \frac{60 + 40 + 200}{3750} \times 100\% = 8\% = \text{TS}\%$$

知道投料原料数量后，要按照一定的浓度来配制发酵料液，计算加多少水。

已知
$$m_0 = \frac{\text{总固体质量}}{\text{发酵液质量}} \times 100\%$$

发酵液质量 = 发酵原料质量 + 水质量

总固体质量 = 原料量 $\times$ 总固体%

$$m_0 = \frac{X_1 m_1 + X_2 m_2 + X_3 m_3 + \dots}{X_1 + X_2 + X_3 + W} \times 100\% = \frac{\sum X_i m_i}{\sum X_i + W} \times 100\%$$

式中 X ——原料质量，千克；

m ——某种原料总固体的质量分数，%；

W ——加水量，千克；

m_0 ——发酵液的质量分数。

例：某农户有猪粪 2000 千克，人粪 300 千克，玉米秆 1000 千克，要配制总固体浓度为 10% 的沼气发酵液，要加水多少？

查表知：猪粪 $\text{TS}\% = 18\%$ ；人粪 $\text{TS}\% = 20\%$ ；玉米秆 $\text{TS}\% = 80\%$ 。

所以

$$10\% = \frac{2000 \times 18\% + 300 \times 20\% + 1000 \times 80\%}{2000 + 300 + 1000 + W}$$

$$W = 3900 \text{ 千克}$$

注意：沼气池投料时还要加入相当数量的接种物，接种物既有总固体也有水分。在计算投料浓度和加水量时，应该把接种物中的水分和总固体都加入计算，这里是有意忽略没有计算。

按照一定的 C/N 和料液 TS% 浓度要求进行配料。

例：一个 6 米³ 的沼气池，按 80% 的池容进行投料，要求 TS% = 8%，C/N = 25/1，接种物量为原料总量的 25%（接种物 TS% = 10%），设混合后料液容重为 1，以猪粪、麦草作原料，不考虑接种物的氮、碳含量，问使用猪粪、麦草、接种物和水各多少？

设用猪粪 X 千克，麦草 Y 千克

据题意：接种物质量 = (X + Y) × 25%

$$\text{加水量} = (6000 \times 80\%) - [X + Y + (X + Y) \times 25\%]$$

查表 2-9 知：猪粪含氮 0.60%、碳 7.8%，麦草含氮 0.53%、碳 46%；

猪粪 TS% 为 18%，麦草 TS% 为 82%。

按公式：

$$25/1 = \frac{X \times 7.8\% + Y \times 46\%}{X \times 0.6\% + Y \times 0.53\%}$$

$$8\% = \frac{X \times 18\% + Y \times 82\% + [(X + Y) \times 25\%] \times 10\%}{6000 \times 80\%}$$

解方程：X = 219 千克，Y = 1057 千克

接种物为 319 千克，加水量为 3205 千克。

沼气池要用猪粪 219 千克，麦草 1057 千克，接种物 319 千克，加水量 3205 千克。

2.2.2.6 粪草比 所谓粪草比是指投入沼气池发酵原料中粪便原料与秸秆类原料质量之比。例如，入池原料中，各种粪便的总质量为 1000 千克，各类秸秆的总质量为 500 千克，入池原料的粪草比则为 2/1，原料的粪草比一般为 2/1 以上为宜，不要小于 1/1。

按照 C/N = (20 ~ 30)/1 的要求，动物粪便与秸秆发酵原料的

配料比实例，列于表 2-10。

表 2-10 1 米³ 发酵料液配料比

配 料 组 合	质 量 比	6% (质量分数)		8% (质量分数)		10 % (质量分数)	
		加料 质量比	加水量 / 千克	加料 质量比	加水量 / 千克	加料 质量比	加水量 / 千克
猪粪		333	667	445	555	555	445
牛粪		353	647	470.5	529.5	588.2	411.8
骡马粪		300	700	400	600	500	500
猪粪 青杂草	1 10	27.5 275	697.5				
猪粪 麦草	4.54 1	163.5 36	800.5	217.4 47.8	734.8	271.8 59.8	668.4
猪粪 稻草	3.64 1	144.6 39.7	815.7	192.8 52.9	754.3	241 66.2	992.8
猪粪 玉米秆	2.95 1	132.8 45	822.2	177.3 60.1	762.6	221 75.1	703.9
牛粪 麦草	40 1	331 8.2	660.8	440 11	549	551 13.7	435.3
牛粪 稻草	30 1	318.5 10.5	671	424 14.1	561.9	530 17.7	452.3
牛粪 玉米秆	23.1 1	307.8 13.3	678.8	410 17.7	572.3	513.3 22.2	464.5
人粪 稻草	1.5 1	80 53	867	107 71	822	134 90	776
人粪 麦草	1.5 1	92 51	857	122 68	810	153 85	762
人粪 玉米秆	1.13 1	68 60	872	90 80	830	112 99.5	788.5
牛粪 骡马粪	随机混合	350	650	460	540	550	450
骡马粪 玉米秆	10.8 1	219 20.3	760.7	291.6 27	681.4	366 33.9	600.1
猪粪 人粪 麦草	1 1 1	49.5 49.5	851.58	66 66 66	802	82 82 82	754
	2 0.75 1	49.58 89.2 33.5	832.7	119 44.6	776.9	148 55.5	722.5
		44.6		59.5		74	
猪粪 人粪 稻草	1 1 1	50 50 50	850	66 66 66	802	83 83 83	751
	2.5 0.5 1	107.5 21.5	828	145 29	768	180 36	712
		43		58		72	
猪粪 人粪 玉米秆	1 0.75 1	53.8 40.4	852	71.8 53.8	802.6	89.7 67.3	753.3
		53.8		71.8		89.7	
	2 0.2 1	100 10 50	840	134 13.4	785.6	167 16.7	732.8
				67		83.5	
猪粪 牛粪 麦草	3 1 0.5	159 53	761.5	211.8 70.6	682.3	264 88	604
		26.5		35.3		44	
	5 1 1	155 31 31	783	210 42	706	260 52	636
				42		52	

续表

配 料 组 合	质 量 比	6 % (质量分数)		8 % (质量分数)		10 % (质量分数)	
		加料 质量比	加水量 / 千克	加料 质量比	加水量 / 千克	加料 质量比	加水量 / 千克
猪粪 牛粪 稻草	3.5 1 1	126 36 36	802	169.8 48.5 48.5	733.2	212 60.5 60.5	667
猪粪 牛粪 玉米秆	2.2 2 1	86 78 39	797	115 104 52	729	143 130 65	662
猪粪 人粪 牛粪	1 0.5 3.2	75 37.4 240	647.6	100 55 320	530	125 63 400	412
青 杂 草 稻草 猪粪	1 1 3.64	35.3 35.3 128	801.4	46.3 46.3 168.5	738.9	58.6 58.6 213.5	669.3
	0.5 1 3.65	18.7 37.4 136	807.9	24.9 49.7 181.5	743.9	31.1 62.2 227	679.7
水 葫 芦 稻草 猪粪	1 1 2.7	43 43 116	798	57.3 57.3 155	730.4	71 71 191.7	666.3
水 葫 芦 玉 米秆 猪粪	1 2 5	24 48 117	811	31.3 62.6 156	750.1	39 78 195	688
青杂草 玉 米秆 猪粪	1 1 3	39 39 116.9	805.1	52 52 156	740	64.9 64.9 194.7	675.5
骡马粪 人 粪 玉米秆	3 29 0.5 1	127 5 19 4 38.8	814.3	170 25 8 51.7	752.5	212 5 32.3 64.6	690.6
骡马粪 猪 粪 玉米秆	3 1.52 1	107 54 6 35.9	801.8	143 7 72 8 47.9	735.6	179 7 91 59.9	669.4

2.3 沼气发酵工艺及控制条件

2.3.1 沼气发酵工艺

沼气发酵工艺是指沼气发酵从配料入池到产出沼气的一系列操作步骤、过程和所控制的条件。按照沼气发酵的温度、进料方法、装置类型以及作用方式、发酵液的状态等可以把沼气发酵工艺分若干种类型（见表 2-11）。

表 2-11 沼气发酵工艺类型

分类依据	工艺类型	主要特征
发酵温度	常温发酵	发酵温度随气温的变化而变化,沼气产气量不稳定,转化效率低
	中温发酵	发酵温度 28 ~ 38 。沼气产气量稳定,转化效率高
	高温发酵	发酵温度 48 ~ 60 ,有机质分解速度快,适用于有机废物及高浓度有机废水的处理
进料方式	批量发酵	一批料经一段时间发酵后,重新换入新料。可以观察发酵产气的全过程,但不能均衡产气
	半连续发酵	正常的沼气发酵,当产气量下降时,开始小进料,以后定期地补料和出料,能均衡产气,适用性较强
	连续发酵	沼气发酵正常运转后,便按一定的负荷量连续进料或进料间隔很短,能均衡产气,运转效率高,一般用于有机废水的处理
装置类型	常规发酵	装置内没有固定或截留活性污泥的措施,提高运转效率受到一定限制
	高效发酵	装置内有固定或截留活性污泥的措施,产气率、转化效果、滞留期等均较常规发酵好
作用方式	二步发酵	沼气发酵的产酸阶段与产甲烷阶段分别在两个装置中进行,有利于高分子有机废水及有机废物的处理,有机质转化效率高。但单位有机质的沼气产量稍低
	混合发酵	沼气发酵的产酸阶段与产甲烷阶段在同一装置内进行
发酵料液状态	液体发酵	干物质(TS)含量在 10% 以下,发酵料液中存在有流动态的液体
	固体发酵 (或干发酵)	干物质(TS)含量在 20% 以上,不存在可流动态的液体。甲烷含量较低,气体转化效率稍差,适用于水源紧张、原料丰富的地区
	高浓度发酵	发酵浓度在液体发酵与固体发酵之间,适宜浓度为 15% ~ 17%

2.3.1.1 小型沼气发酵工艺

(1) 家用水压式沼气池常温发酵工艺 家用水压式沼气池是属于半连续进出料、单级常温发酵工艺,其工艺流程如图 2-3 所示。

备料: 做好原料准备, 要求数量充足、种类搭配合理、要铡碎的做到尽量铡碎。

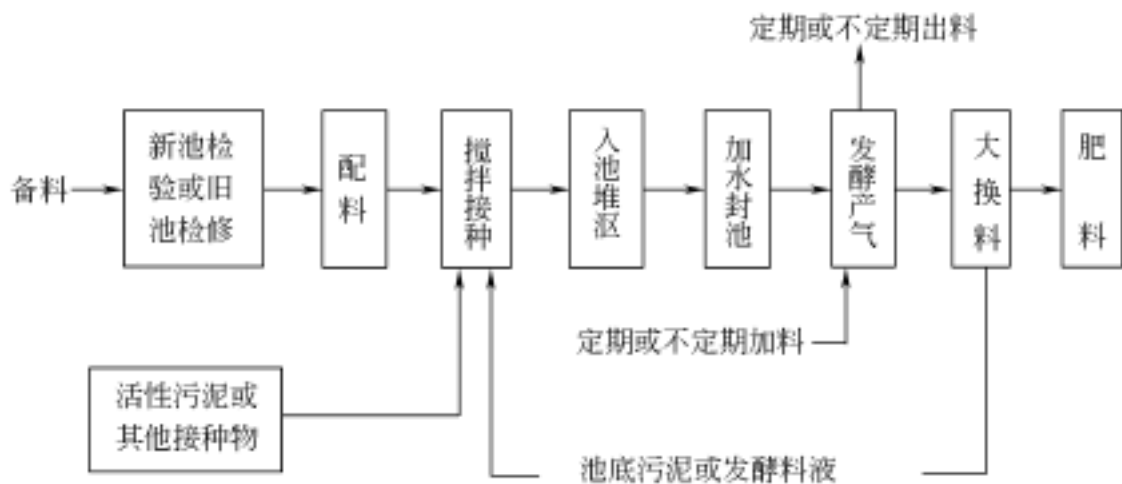


图 2-3 家用水压式沼气池发酵工艺流程

新池检验或旧池检修：做到确保不漏水、不漏气。

配料：满足工艺对料液总固体浓度（TS%）和 C/N 的要求配比原料。

拌料接种：做到拌和均匀。

入池堆沤：把拌和好的原料放入池内，踩紧压实，进行堆沤。

加水封池：当堆沤原料温度上升至 40～60℃ 时，从进出料口加水，然后用 pH 精密试纸检查发酵液的酸碱度，pH 值在 6～7 时，可以盖上活动盖，封闭沼气池。若 pH 值低于 6 时，可加草木灰、氨水或澄清石灰水将其 pH 值调整到 7 左右，再封盖。封盖后应及时安装好输气管、开关和灯、炉具，并且关闭输气管上的开关。

点火试气：封池 2～3 天后，在炉具上点火试气，如能点燃，即可使用；如若点不燃，则放掉池内气体，次日再点火试气，直至能点燃使用为止。

日常管理：按照工艺规定添加新料，进行搅拌，冬季防寒，检查有无漏气的现象。

大换料：发酵周期完成以后，除去旧料，按照工艺开始第二个流程。

(2) 家用水压式沼气池均衡产气常规发酵工艺 北方地区产气

率：0.12 ~ 0.15 米³/ (米³ 池容 · 天)；

南方地区产气率：0.15 ~ 0.25 米³/ (米³ 池容 · 天)；0.15 ~ 0.2 米³/ (米³ 料液 · 天)；0.2 ~ 0.3 米³/ (米³ 料液 · 天)；0.1 ~ 0.2 米³/ (千克 TS · 天)；0.25 ~ 0.35 米³/ (千克 TS · 天)。

一年投入原料：秸秆 500 千克和 2 头大猪 (或 3 头中等猪，或 1.5 头牛) 的粪便。

池外堆沤：采用秸秆质量的 1% ~ 2% 石灰，兑成石灰水，均匀施于秸秆上，再泼上粪水 (沼液)。湿度以不见水流为宜，料堆层层踩紧，气温小于 10℃ 时要保湿。

堆沤时间：春夏 1 ~ 2 天，秋冬 3 ~ 5 天，气温 25℃ 时堆沤 1 天，当堆沤温度达到 60℃ 时，拌料接种，入池启动。

原料配比浓度：鲜猪粪 玉米秆为 2.95 : 1。

6% (质量分数)：132.9 : 45.0，加水 882.1 千克

8% (质量分数)：127.3 : 60.1，加水 762.6 千克

10% (质量分数)：221.0 : 75.1，加水 703.9 千克

接种物量：投料时应加入占原料 30% 以上的活性污泥，或 10% 以上正常产气池底污泥，或 10% ~ 30% 的沼液。

大换料：北方在春季进行一次大换料，气温、地温低于 10℃ 不宜大换料，换料前 10 天不进料。

非三结合的沼气池，在启动运转 30 天左右，产气量明显下降时，应该添加新料，5 ~ 6 天加料 1 次，加料量为发酵液的 3% ~ 5%，冬季宜多宜干。

(3) 分层满装料沼气发酵工艺 工艺生产经济指标如下。

池容产气率：夏秋季在 0.15 米³/ (米³ · 天) 以上；冬春季在 0.1 米³/ (米³ · 天) 以上。

原料产气率：夏秋季在 0.25 米³/ (千克 TS · 天) 以上；冬春季在 0.2 米³/ (千克 TS · 天) 以上。

例：一个 6 米³ 沼气池，采用分层满装料工艺，全年饲养 3 头猪 (50 千克/头)，使用 600 千克秸秆，夏秋季运转 120 天可产气 154 米³；冬春季运转 200 天可产气 171 米³，全年总计可产气

325 米³。

该工艺流程分为启动、运转、大出料三大阶段，如图 2-4。

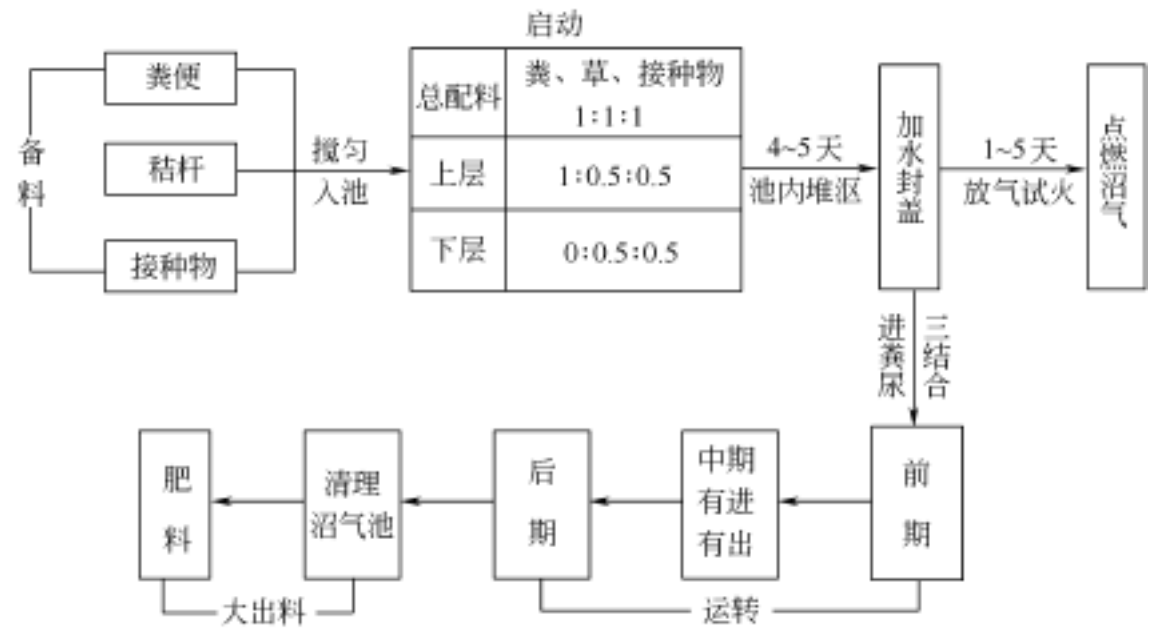


图 2-4 分层满装料沼气发酵工艺流程

一般地，根据秸秆收获和用肥的季节，南方地区一年可分别在夏秋季和冬春季完成两个流程；而北方因气温低一年只能完成一个流程。南方两个流程的时间安排是：6 月前后利用收获的小春作物秸秆投料启动，7~10 月运转 4 个月，11 月大出料，为种植小春作物提供有机肥料；11 月前后利用大春收获的秸秆投料启动，11 月或 12 月至第二年 4 月或 5 月运转 200 天后大出料，为大春栽插提供有机肥料。

该工艺的启动技术如下。按粪 草 接种物为 1 1 1 备料。秸秆宜铡为 10 厘米左右的小节，装料之前先用水预湿，每立方米的备料量为麦草 45 千克、粪 45 千克、接种物 45 千克或稻草 60 千克、粪 60 千克、接种物 60 千克。装料时，下层按粪 草 接种物为 0 0.5 0.5 装，上层按粪 草 接种物为 1 0.5 0.5 装。6 米³ 沼气池下层装麦草 135 千克、接种物 135 千克，上层装粪 270 千克、麦草 135 千克、接种物 135 千克，或下层装稻草 180 千克、接种物 180 千克，上层装粪 360 千克、稻草 180 千克、接种物 180

千克。原料拌和均匀，分层入池后，夏秋季堆沤 3~4 天，冬春季堆沤 5~6 天，下雨时遮住活动盖口。堆沤期满，从进出料口向池内加水，加水的数量以水封住进出料管下口后再加 400~500 千克为宜。然后封盖，进行点火试气。因为该工艺在投料阶段是分上下两层配料加料，而且装满全池，不预留贮气箱，所以称之为分层满装料工艺。

该工艺运转阶段的管理十分简单，只应每天将“三结合”的粪便进料入池，为了确保原料在池内充分分解，每立方米沼气池每天入池总固体数不宜超过 0.7 千克。出料时，应掌握前期只进不出，中期（液面达到池容的 80%~90% 时）有进有出。后期不进不出，不用进行搅拌。

(4) 干发酵工艺 所谓干发酵，通常是指发酵液总固体浓度超过 20% 的发酵方法，由于固体浓度太高难以采用连续投料或半连续的投料方式，绝大多数均采用批量投料。下面介绍以秸秆为原料的干发酵方法（同时也适合于粪草混合发酵）要点的关键：添加足够的优质接种物；秸秆要切碎并用石灰水预处理，并进行池内外堆沤；添加适量氮源，发酵浓度为 20%~30%。

配料和预处理

a. 秸秆用量和预处理。风干秸秆（TS% = 85%）切成 150 毫米左右的小段，加石灰水泼湿，再将接种物总用量的 1/3 混入，进行池外堆沤，堆沤时间为 2~3 天。堆沤的目的是初步破坏秸秆的纤维——木质结构，并增加秸秆容重，以提高单位池容的秸秆处理量。堆沤结束后加入其余接种物和氮肥，入池再堆沤 24 小时，用以增加启动的料温。

通常，每立方米池容处理风干秸秆约为 100 千克，加入粪便一般不影响秸秆的处理量。如果发酵周期为 90 天，那么平均有机负荷率（每立方米池容平均每天处理的总固体量）为：

$$\frac{100 \times 85\%}{90} = 0.94 \text{ [千克 TS (米}^3 \cdot \text{天)]}$$

这时平均体积产气率可超过 0.2 米³/ (米³ · 天)。如果增加粪

便，则由于平均体积有机负荷率增加，可以提高平均体积产气率。例如，按秸秆质量的 2 倍加入猪粪（TS% = 20%）则平均体积有机负荷率为：

$$\frac{(100 \times 85\%) + (200 \times 20\%)}{90} = 1.4 \text{ [千克 TS/ (米}^3 \cdot \text{天)]}$$

这就可以保证平均体积产气率超过 0.28 米³/ (米³ · 天)。

b. 接种物。对接种物的要求与其他发酵工艺相同，接种物的数量应为秸秆质量的 1.5 倍以上。它是保证干发酵正常进行的关键。池外堆沤时先用 1/3 的量，其余的入池时再加入。

c. 添加氮源。由于采用的是批量投料方法，平时没有含氮丰富的粪尿流入，而秸秆本身含氮量不足，因此必须在入池时补充氮源。但由于干发酵的水分含量较少，太多的氮易造成发酵抑制。所以加碳酸氢铵时用量为秸秆用量的 2%，加尿素时为秸秆用量的 1%。

d. 用石灰水预处理。石灰的用量应为秸秆质量的 5%，此项措施的目的在于破坏秸秆的木质纤维结构，并中和发酵过程中产生的酸，以防止 pH 值下降。

浓度控制。用加水量来控制料液的浓度，石灰 5 千克加水 100 千克配成石灰水用于预处理；接种物（TS% = 10%）按 1:1 加水稀释；氮肥每千克加水 50 千克溶解后使用。由于堆沤过程中水分会损失，按上述比例加水，一般可将浓度控制在 20% ~ 30%。

发酵周期。为了充分利用沼气池和积造有机肥，南方地区在冬春季可以采用一个发酵周期，约 150 ~ 200 天；夏秋季（5 ~ 10 月）可采取两个发酵周期，每个周期约为 90 ~ 100 天。各地区应该把发酵周期和农事用肥密切结合起来考虑。

贮气问题。干发酵池必须附有贮气设施，如塑料贮气袋、分离浮罩或水压式贮气池。不过采用每户一个干发酵池和一个水压式池最简便。

(5) 半连续投料发酵方法

备料。备料是沼气发酵工艺的首要步骤。新建沼气池和沼气池大换料前，必须准备好充足的发酵原料。小康型沼气池采用人、畜粪尿等流体、半流体发酵，备料较难，因此要做到边建池边备料、接种、堆沤。

新池检验或旧池检修。新建沼气池时，必须严格按照设计要求，检查建池的质量，经试压检查证明质量合格，才能投料使用。对于使用一年以上，又未用密封涂料的沼气池，在大换料后，应用水把气箱、池墙冲洗干净，对池体进行一次非常仔细的检查，若发现有裂缝的地方和渗漏现象，要及时修复。同时，应将池盖、池墙等部件用水泥浆涂刷 3~4 遍，以防止渗漏。

原料接种堆沤。新建沼气池投料或旧池大换料的时候，一般应加入占原料质量 30% 以上的活性污泥，或留 10% 以上正常发酵的沼气池底部活性污泥，或用 30% 的沼气发酵液作启动接种物。

如果新建沼气池没有活性污泥，可以用堆沤 5~10 天的畜粪（牛粪、羊粪）或老粪坑底部粪便作接种物，用量仍占原料质量的 30% 以上。

从沼气池拱顶活动盖口加入已拌匀的发酵原料。应该边进料边踩紧压实。原料入池以后，即可进行适当的池内堆沤，堆沤时间各地区随季节不同而异：一般夏季 1~2 天，冬春季 3~5 天。如果用喂配合饲料的猪的粪、鸡的粪发酵，池内堆沤的时间应长一些（注意加接种污泥菌种）。进行池内堆沤时，切忌盖上活动盖。若遇上降雨天气或气温太低时，可在活动盖口覆盖遮蔽物，雨过天晴或气温回升后，应及时揭开遮蔽物，以利于好氧和兼性微生物发酵。

加水封池

a. 适量加水。沼气发酵的含水量以 88%~94% 为佳，换言之就是，原料的干物质浓度占 6%~12%。在这个范围内，夏天宜稀，冬天则宜浓。小康型沼气池采用人畜粪尿等流体、半流体原料发酵，猪粪尿、人粪尿的干物质浓度在 7.5%~10% 的范围内，完

全可以满足沼气发酵原料含水量的要求，不需要另外加水。

如果采用稻草垫栏的猪牛栏粪发酵，则要进行池内堆沤。当堆沤到发酵原料温度上升到 50 ~ 60 ℃ 时，便可加水。加水时应从出料口（水压间）加入，不宜从天窗口或进料口加入，以免冲走已经附着在原料上的粪尿及菌种。加入的水应该是温度较高的污水或沼气肥水，这样可以增加发酵微生物的数量和部分溶于水的低分子化合物，进而加速产气。总加水量应扣除拌料时加入的水量。加水完毕后，可用 pH 广泛试纸检查发酵液的酸碱度，若 pH 值低于 7，那么可以加入适量草木灰、氨水或澄清石灰水将其 pH 值调整到 7 左右，让池内的发酵原料在好氧条件下（不封活动盖）发酵几天，防止挥发酸的积累。经常用手电照明观察沼气池，当池内液面布满很多大小不一的紫色气泡（即沼气）时，说明沼气发酵已经启动，可以将活动盖盖上封池使用。

b. 密封活动盖的方法

．密封材料。常用的沼气池活动盖的密封材料有黏土、白干泥、水泥等。首先将不含砂的干黏土锤碎、筛去粗粒和杂物，按 1 : 10 ~ 15 的配比（质量比）将水泥与黏土干拌均匀后，分成大小两堆料，再加水拌和，将大堆料拌湿，将小堆拌成泥浆状，以“手捏成团，落地开花”状为宜。

．清洗表面。首先用扫帚扫去粘在蓄水圈（又称天窗口）、活动盖底及圆周边的泥砂杂物，再用水冲洗，使蓄水圈、活动盖表面洁净，以利于黏结。

．封盖步骤。先用瓦刀将拌好的泥浆抹在蓄水圈内气箱拱盖上面，抹匀粉平，再把活动盖坐在泥浆上，注意活动盖与蓄水圈之间的间隙要均匀，用脚踏紧，使之紧密贴合。然后将拌好的水泥黏土撒在活动盖与蓄水圈之间的间隙里，分层锤紧，填满为止。当锤紧第一层黏土后，选 3 个卵石等距离放入活动盖与蓄水圈墙的间隙内。卵石粒径与间隙大小相同，压紧活动盖。水泥黏土起着密封的作用，3 粒卵石起骨架作用，这样可以防止沼气池内压力增高时，活动盖向上移动而造成漏气。

．养护使用。用水泥黏土密封活动盖后，打开沼气开关，将水灌入蓄水圈内，养护一至两日后即可关闭开关使用。揭开活动盖换料时，注意先钩出 3 个卵石，匀松间隙内的密封材料，再揭活动盖，防止损坏蓄水圈墙。

放气试火。封池后，当压力上升到 3 ~ 4 千帕（300 ~ 400 毫米水柱）时，开始放气。第一次排放的气体主要是二氧化碳和空气，甲烷含量很少，一般不会点燃。当压力表水柱上升到 2 千帕（200 毫米水柱）时，进行第二次放气，并且开始试火，应在炉具上做点火试验（切忌在沼气池导气管直接点火）。如果能点燃，说明沼气发酵已经正常启动，次日即可使用。

2.3.1.2 大中型沼气工程沼气发酵工艺 大中型沼气工程沼气发酵工艺就发酵原料来说，可分成过稀、稀、稠和过稠 4 种，如表 2-12所示。

表 2-12 发酵原料类型

原 料 类 型	形 态	含 量		原 料 来 源
		TS %	COD (毫克/升)	
过稀原料	液态	< 0.1 %	< 1000	城镇生活污水
稀原料	液态	> 0.1 %	> 1000	酒糟液分离的糟液、屠宰场清液、城镇粪便
稠原料	液固态混合	5% ~ 15 %		畜禽粪便、秸秆
过稠原料	液固态混合	> 15 %		粪便、秸秆

就发酵原料的使用情况，可分成酒厂、屠宰场、畜牧场和城镇粪便处理厂等 4 种行业。

(1) 酒厂（酒精厂）沼气发酵工艺

发酵原料。酒厂（酒精厂）使用发酵原料主要分成 3 类：以甘薯干为原料酿酒和制取酒精的糟液；以玉米为原料酿酒和制取酒精的酒糟；以糖蜜为原料制取酒精的糟液。

现将几个制酒厂和酒精厂的原料情况和酒糟主要成分列于表 2-13，表 2-14。

表 2-13 酒厂发酵原料情况

工 厂	制 酒 工 艺	生产产品			年 排 放 量/ 吨	
		原料	种类	年产量/ 吨	液 态 酒 精	固 态 酒 精
南阳酒精厂	液态发酵	甘薯干	酒精	50000	800000	
	制 酒	甘薯干	白酒	10000		
			溶剂	5000		
乐至酒厂	制 酒	甘薯干	白酒	2300	46800	
蓬莱酒厂	制 酒	甘薯干	酒精	5000	64500	
通城酒厂	制 酒	麦 麸	酒精			
龙泉酒厂	制 酒	甘薯干或渣	酒精	800 ~ 1000	18000	
长白酒厂	固态发酵制酒	玉米	白酒	200		1080
英达酒厂	固态发酵制酒	玉米	白酒	360		2520
平沙糖厂	酵母发酵法	甘蔗糖蜜	酒精	2100	28350	

表 2-14 酒糟主要成分

工 厂	种 类	TS %	悬浮物 / (毫克/ L)	pH	COD / (毫克 升)	BOD / (毫克 升)	备 注
南阳酒精厂	酒糟液	4. 5 %	20000	4. 2 ~ 4. 5	50000	25000	BOD/ COD = 0. 5
乐至酒厂	酒糟液	3. 8 %	42500	3 ~ 4	19000	11600	0. 61
蓬莱酒厂	酒糟液	5 %	28000	4. 4	548000	23900	0. 44
通城酒厂	酒糟液	4. 1 % ~ 4. 5 %		6	43000 ~ 47000		
龙泉酒厂	酒糟液	3. 5 % ~ 4 %		4. 5	43000 ~ 47000		
长白酒厂	酒精(稀释)	8. 96 %		3. 8	16500		去稻壳
平沙糖厂	原废水		17240	3. 9 ~ 4. 5	100000 ~ 130000	57700 ~ 67200	
	稀释废水			4. 1 ~ 4. 3	35000	12850	

液体酒糟沼气发酵工艺

a. 液体酒糟高温发酵工艺。液体酒糟高温发酵工艺是利用从

酒精蒸馏塔排出的具有 80 ~ 90 的糟液，通过沉砂池将酒糟中的砂粒和碎石沉淀分离，并进行适当的冷却。沼气发酵温度一般被控制在 53 ~ 58 ，所以要将高温糟液先冷却到 60 左右，再进入消化器发酵。南阳酒精厂、蓬莱酒厂等都采用这种工艺。糟液高温沼气发酵情况见表 2-15。

表 2-15 糟液高温沼气发酵情况

厂 名	发 酵 温 度 /	pH 值		滞 留 期 / 天	负 荷 量 / [千 克 COD / (米 ³ · 天)]	产 气 率 / [米 ³ / (米 ³ · 天)]	COD 去 除 率 / %
		进	出				
南阳酒精厂	53 ~ 55	4.2 ~ 4.5	7.5 ~ 7.8	8	6.25	2.5	86
乐至酒厂	53 ~ 55	3 ~ 4	7.2 ~ 7.3	14 ~ 15	1	1.1 ~ 1.6	96.8
蓬莱酒厂	55	4.4	7.5	11 ~ 13	1	2	79
通城酒厂	55	6.0	7.2	8	5.4	2.5	75
龙泉酒厂	37	4.5	7.0	15	10	5	82

各酒厂在冷却糟液时，采用的方法不同：有的采用喷淋冷却塔冷却，有的则采用卧式列管冷却。而蓬莱酒厂则较好地利用糟液的余热，使其糟液通过具有冷水流过的套管，因而冷水得到预热，将预热水提供给生产锅炉用水，达到锅炉节能的目的。

液体酒糟高温发酵，通常采用地下或半地下普通消化器，滞留期为 8 ~ 15 天，产气率为 1.5 ~ 2.5 米³/ (米³ · 天)，负荷量为 5.4 ~ 6.25 千克 COD/ (米³ · 天) (表 2-15)。

南阳酒精总厂日产 40000 米³ 沼气工程，所产沼气除供给南阳市 2 万多户家庭用外，还供本厂职工食堂、锅炉和作工业原料。南阳是我国实现民用沼气的第一个城市。

工厂年产酒精 5 万吨，丙酮、丁醇 5000 吨，白酒 1 万多吨。月排放废糟液 2700 吨，年排放量达 80 万吨以上。

工厂从 1964 年开始试验研究生产沼气，在 1967 年建立的两座 2000 米³ 隧道式沼气消化器的基础上扩建，1986 年又新建两座 5000 米³ 的新型消化器，于 1987 年 12 月建成投产。

南阳酒精总厂沼气发酵工艺流程如图 2-5。

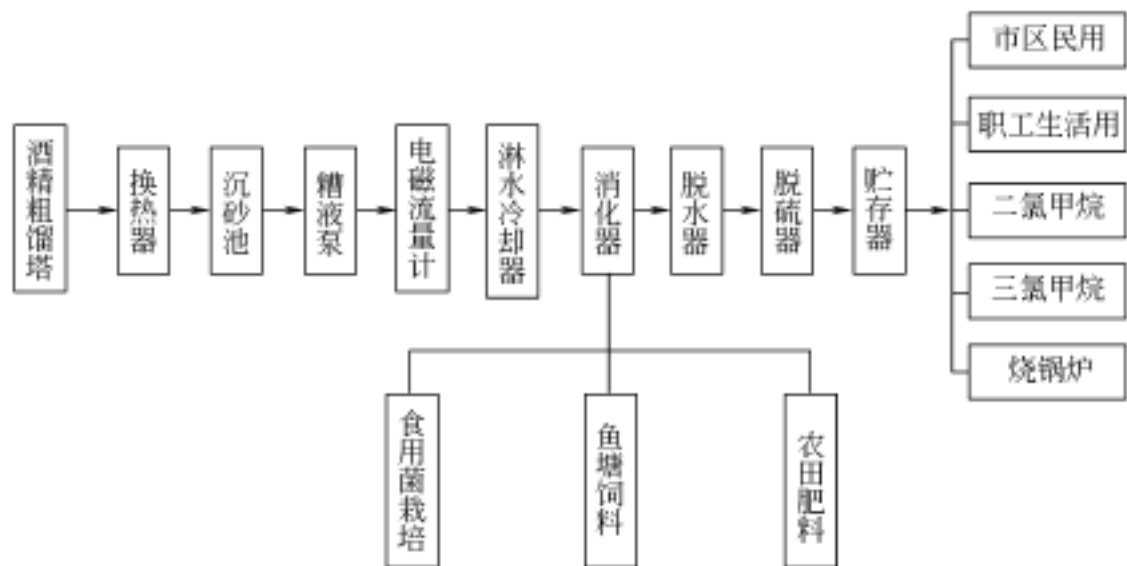


图 2-5 南阳酒精总厂沼气发酵工艺流程

糟液进料浓度为 COD 50000 毫克/升，排放浓度为 COD 8000 毫克/升，去除率为 84%；BOD 由 25000 毫克/升降至 2300 毫克/升，去除率 90.8%；pH 值由 4.2 升至 7.2~7.5；悬浮物由 20000 毫克/升降至 700 毫克/升，去除率 96.5%。

蓬莱酒厂沼气发酵工艺流程如图 2-6。

糟液沼气发酵，启动消化器进行接种时，要调节料液的 pH 值。待启动运转正常后，经冷却后的糟液可以按规定投料量直接进入消化器，发酵过程中可以通过控制投料量及污泥回流来调节 pH 值，应保持 pH 值在 7.5 左右。

b. 液体糟液中温发酵工艺。龙泉酒厂依靠糟液自身具有的温度来进行中温发酵，其工艺流程如图 2-7。

酒厂玉米酒精糟液呈酸性其 pH 值为 4.5，经竹帘过滤稀释 1 倍后 pH 值为 5.00，料液温度在 40 左右。过滤后料液的 TS 为 1.20%，VS 为 TS 的 70.9%，COD 为 22300 毫克/升，BOD 为 6810 毫克/升，悬浮物为 7130 毫克/升。进行中温发酵（ 37 ± 2 ），产气率为 $5 \text{ 米}^3 / (\text{米}^3 \cdot \text{天})$ ，处理负荷为 10 千克 COD /（ $\text{米}^3 \cdot \text{天}$ ），COD 去除率为 82%，排放消化液 pH 为 7.0。

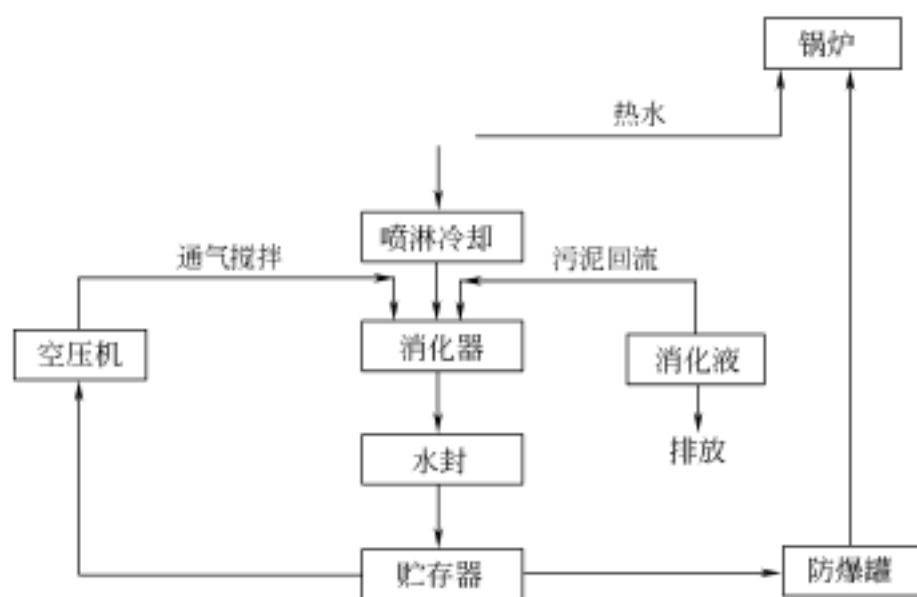


图 2-6 蓬莱酒厂沼气发酵工艺流程

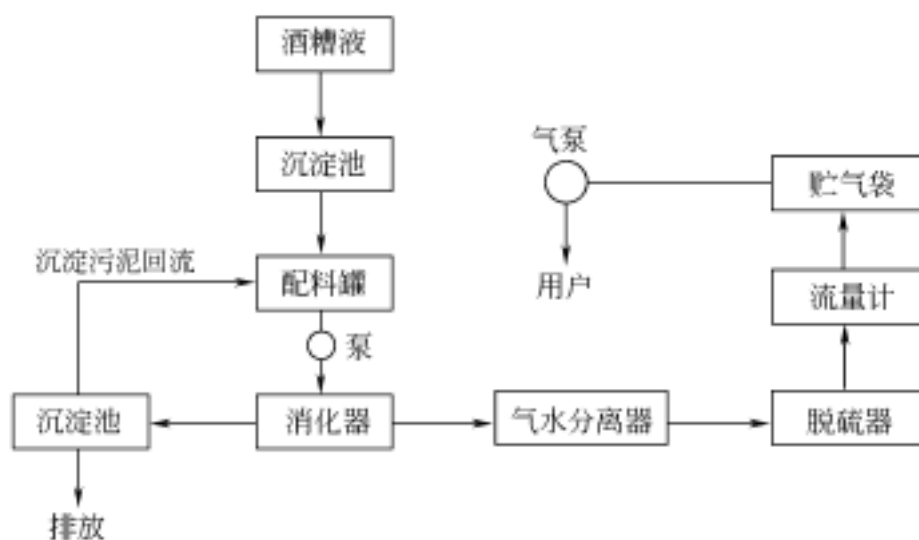


图 2-7 龙泉酒厂沼气发酵工艺流程

消化器是属于污泥床 UASB 和过滤器 AF 联合型，消化器总容积为 2×10^8 米³。料液先进入配料罐与沉淀池回流的污泥混合并停留 1 天 pH 值为 5.5，再进入消化器消化。

固体酒糟中温沼气发酵工艺。长白酒厂和英达酒厂均采用玉米为原料酿酒，玉米酿酒以稻壳为填充料，酒糟为带稻壳的固态酒糟。进行沼气发酵时，先对酒糟加 2 倍水稀释，再筛除稻壳，料

液入沉淀池，沉淀 3~5 小时后，取其上清液送进消化器发酵。长白酒厂沼气发酵工艺流程如图 2-8。

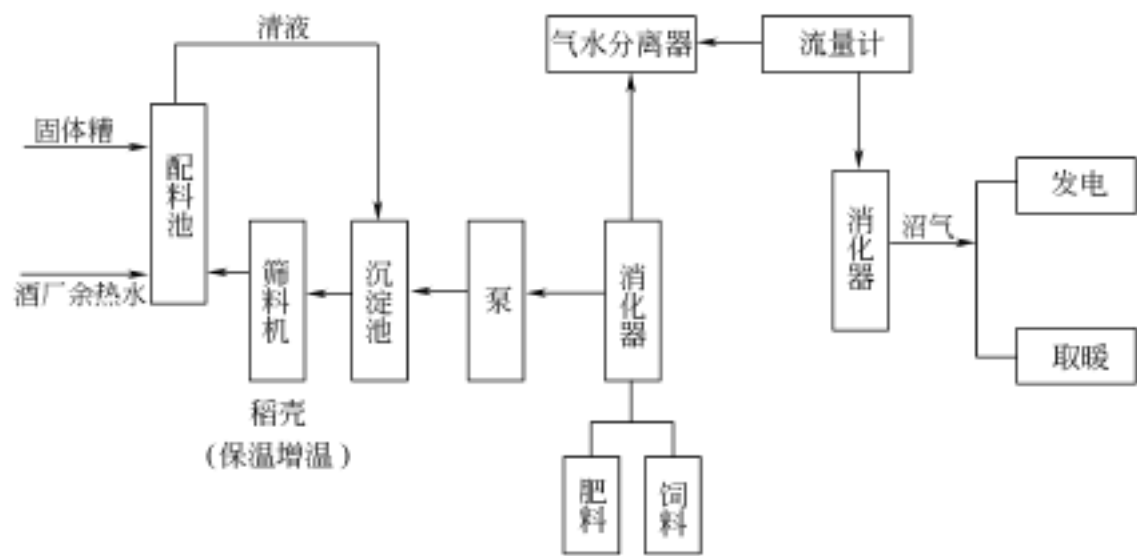


图 2-8 长白酒厂沼气发酵工艺流程

消化器增保温方法：采用从酒糟中分离出的稻壳，使消化器埋在糟壳中，利用糟壳生物发酵热对消化液增温和保温，在东北地区可以长年供气。

(2) 屠宰污水沼气发酵工艺 屠宰场的污水和猪栏的粪便是沼气发酵的良好原料。屠宰场办沼气对卫生与环境保护有很重大的意义，同时生产沼气也可解决全场职工生活用能的问题。

处理屠宰污水和猪粪的沼气发酵工艺流程方案按沼气发酵和发酵后处理方式不同分成 3 种类型，见图 2-9。

屠宰污水与猪粪沼气发酵和后处理工艺流程分别介绍如下。

屠宰污水与猪粪二级沼气发酵工艺。屠宰污水与猪粪在第一级消化器发酵后又进入第二级消化器再发酵，使有机物更好地为微生物代谢分解，减少对环境的污染，其工艺流程如图 2-10。

在预处理池里，屠宰污水与猪栏的粪便通过格栅除去杂物后用计量泵从计量池送入消化器。经发酵后的污水通过滤池里的细砂石滤层，可进一步减少寄生虫卵与 COD 的值，达到较好的卫生环境

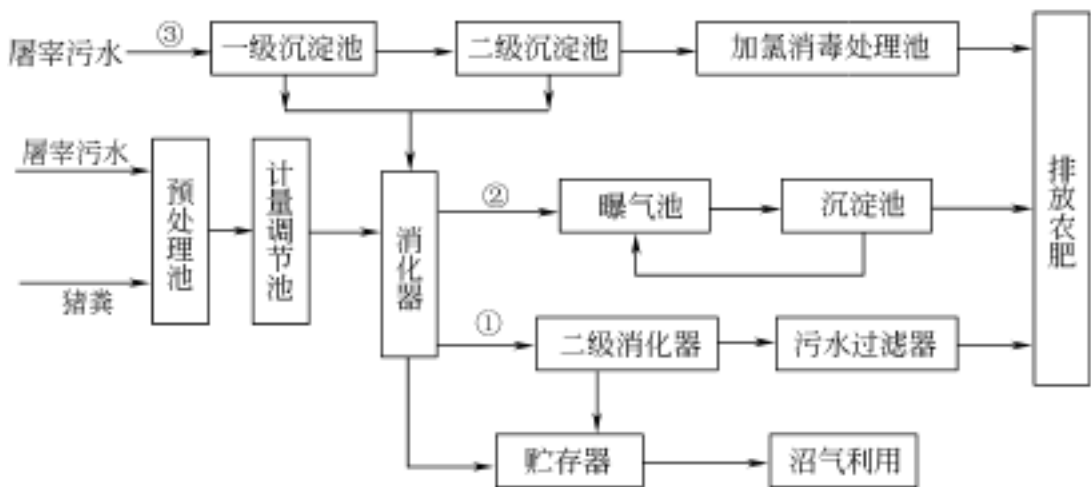


图 2-9 屠宰污水、猪粪沼气发酵工艺流程方案

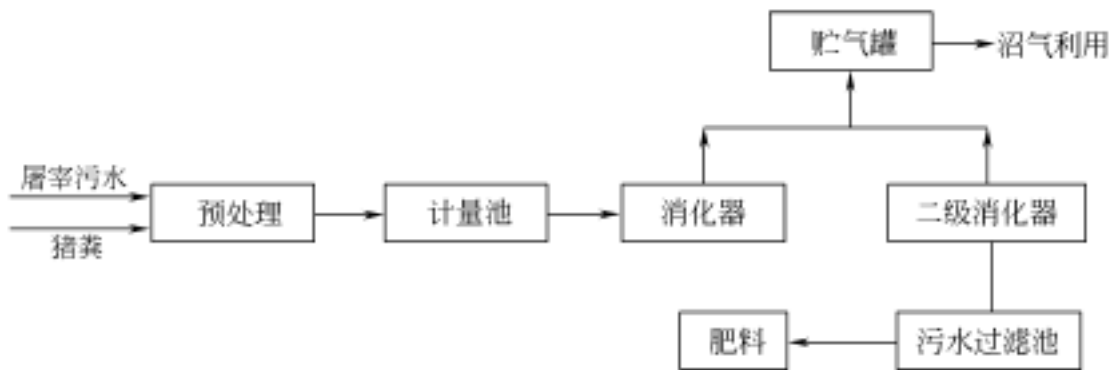


图 2-10 屠宰污水、猪粪二级沼气发酵工艺流程

效果。例如，某食品收购站，屠宰污水与粪便混合，经发酵 120 天后，COD 的值由发酵前的 19000 毫克/升降至 1306 毫克/升，去除率为 93%，大肠杆菌菌值由 10^{-9} 降到 10^{-4} 。

大肠杆菌菌值是指检出一个大肠杆菌所用的样品的最小数量（通常以克或毫克表示）。大肠杆菌菌值越大，则说明检出的大肠杆菌数量越少，处理粪便的卫生效果越好。为方便起见，一般把大肠杆菌菌值用负指数来表示。例如，用样品 0.01 毫升检出有大肠杆菌，记为 10^{-2} 。

屠宰污水沼气发酵和加氯处理工艺。当冷冻厂在一级沉淀池内，将宰猪的大量污水除去猪肠胃内物和废毛蹄壳及部分漂浮物

(废脏器、油渣)，再进入二级沉淀池继续沉淀微细悬浮物及寄生虫卵。污水在沉淀池滞留两天，处于密封或半密封的状态，使有机质分解，血色素脱色，悬浮物减少。沉淀池的沉淀物刮入斜斗槽中，然后流入消化器发酵，猪栏粪便由人工和机械收集，直接进入消化器，发酵残渣用作农肥，其工艺流程如图 2-11。

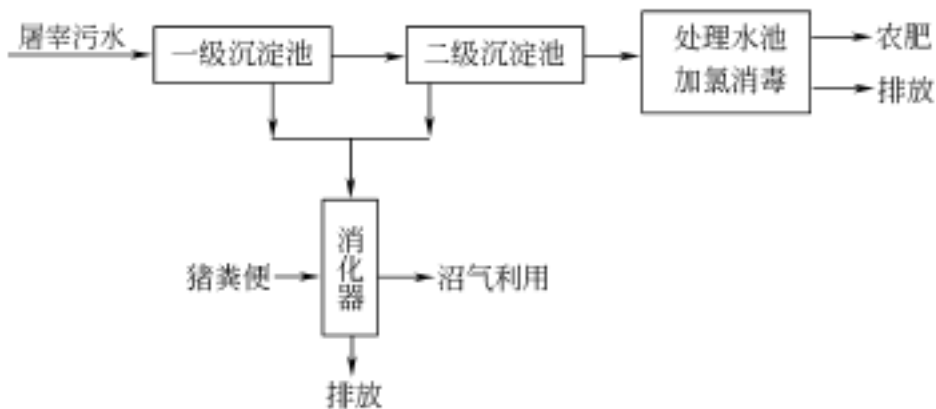


图 2-11 屠宰污水沼气发酵和加氯处理工艺

屠宰污水经两级沉淀后加氯处理效果良好。未加氯时，出水大肠杆菌个数为 2.38×10^6 个/升，细菌总数为 2.24×10^8 个/升；加氯处理后，余氯为 4 毫克/升时，大肠杆菌降为 900 个/升，细菌总数为 1.79×10^5 个/升，BOD 降低了 42.2%（由 557.6 毫克/升降至 320 毫克/升），而 COD 降低了 87%（由 744 毫克/升降至 100 毫克/升）。

屠宰污水沼气发酵和曝气处理工艺。北京和杭州肉联厂屠宰污水采用沼气发酵和曝气处理工艺，如图 2-12。

污水在预处理池除去碎皮、烂肉、毛屑类等难以消化物，进入调节池调节料液浓度和 pH 值，然后进入消化器消化，经厌氧消化器处理的污水分成两路再处理，以达到排放标准。经厌氧消化后的污水，可以采用曝气（好氧）处理并沉淀后排放，曝气池沉淀的污泥回到曝气池中去利用。

(3) 禽畜场沼气发酵工艺 禽畜粪便中悬浮物太多，固形物浓度较高，原料的有机成分含量及碳氮比见表 2-16。

表 2-16 中，总固体是指对原料量的百分比，其他各项是指干

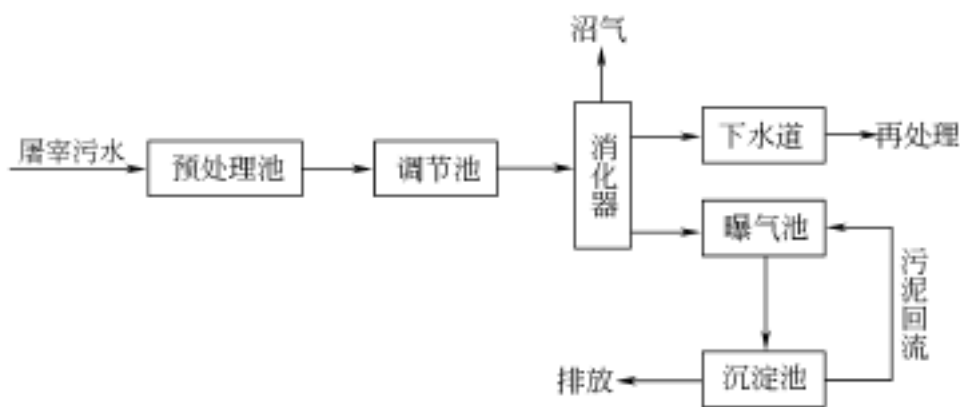


图 2-12 屠宰污水沼气发酵和曝气处理工艺流程

物质百分比（表中数据由上海市工业微生物研究所，河北省微生物所等单位提供）。

表 2-16 原料有机成分含量及碳氮比（近似值）

原料	总固体 / %	挥发性固体 / %	粗脂肪 / %	木质素 / %	纤维素 / %	蛋白质 / %	含氮量 / %	含碳量 / %	碳氮比 (C/N)
鸡粪	68.9	82.2	2.84	19.82	50.55	9.52	3.70	35.7	10 1
鲜牛粪	15 ~ 20	70 ~ 77	3.23	35.57	32.49	9.05	0.29	7.3	25 1
猪粪	20 ~ 27.4	76.54	11.5	21.49	32.39	10.95	0.60	7.8	13 1
稻草	80 ~ 88	86.02	9.62	12.7	59.95	5.42	0.63	42	67 1
人粪	17	77.42	11.22	14.66			0.85	2.5	3 1

上海五四畜牧场沼气示范工程，装置以鲜牛粪为原料，地面消化器，采用近中温发酵，两级消化，年平均产气率为 $0.8 \text{ 米}^3/(\text{米}^3 \cdot \text{天})$ 以上。其工艺特点为：原料前处理采用绞龙式粪草分离机、发酵原料固液分离机进行处理；消化器采用两级发酵方式，一级发酵是牛粪在全混合式消化器内发酵，消化液再进入二级消化器发酵，二级消化器是折流式生物过滤罐；沼气经过脱水、脱硫入贮存器，供应畜牧场 484 户用气。该工程消化器总容积为 1004m^3 ，由 8 个消化器组成，生产实践证明，对于集约化奶牛场粪便，这种发酵工艺是合适的。沼气发酵工艺流程如图 2-13 所示。

(4) 城市粪便沼气发酵工艺 烟台市人口 26 万，日产粪约 150 吨。青岛市区人口 107 万，日产粪约 1500 吨。本溪市市中心

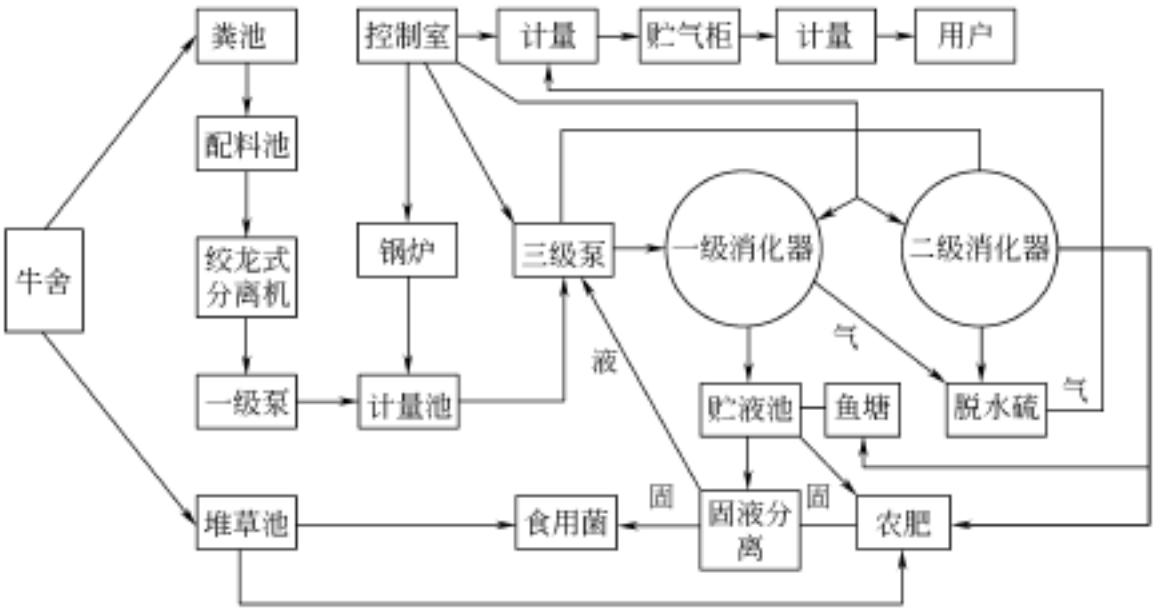


图 2-13 牛粪近中温两级沼气发酵工艺流程

区人口 52 万，日产粪尿 3360 吨。一级消化器 1000 米³，二级消化器 300 米³，日处理 80 吨。

城市粪便处理从卫生和环境要求上来说，要求采用高温发酵工艺，如图 2-14 所示。

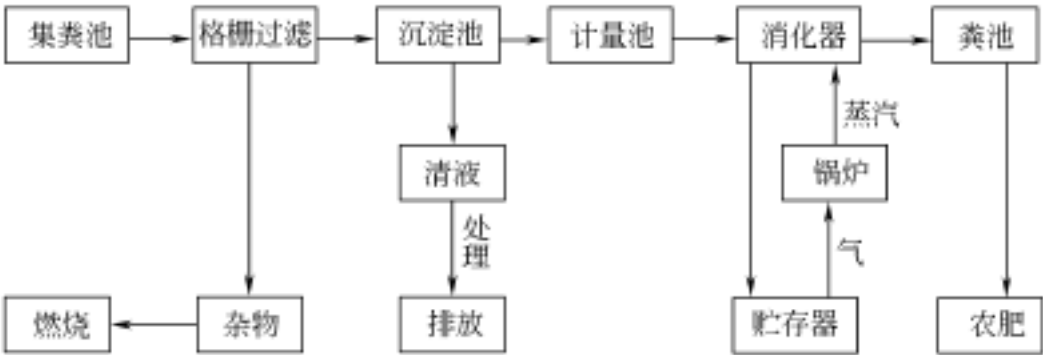


图 2-14 高温处理粪便工艺流程

在城镇粪便中，通常有一些不能用泵运送的杂物，需先用格栅将杂物除去。粪便液含固形物仅 1% ~ 2%，产气量低，要求经过 24 小时左右的沉淀，使沉淀物浓度提高到 5% ~ 6% 后，再进行高温发酵。生产的沼气用来烧锅炉，生产的蒸汽用来维持消化器在 53 ~ 55 工作。经沉淀后的清液，COD 还在 1000 毫克/升以上，

必须经再处理后，方能达到环保排放要求。

城市粪便经高温发酵处理后的卫生效果是明显的，见表 2-17。

表 2-17 城市粪便经高温发酵处理后的卫生效果

单 位	发 酵 温 度/	滞 留 期 / 天	进 料		出 料	
			蛔虫卵死 亡 率/ %	大 肠 杆 菌 菌 值	蛔虫卵死 亡 率/ %	大 肠 杆 菌 菌 值
青 岛 市 一 厂	53 ± 2	10	5 ~ 40	$10^{-12} \sim 10^{-8}$	95 ~ 100	$10^{-3} \sim 10^{-1}$
青 岛 市 二 厂、三 厂	53 ± 2	13	5 ~ 40		95 ~ 100	$10^{-3} \sim 10^{-1}$
烟 台 市	55 ± 1	10	13	10^{-8}	100	$10^{-3} \sim 10^{-2}$

由表 2-17 知，蛔虫卵死亡率都在 95 % 以上，大肠杆菌菌值也由 $10^{-12} \sim 10^{-8}$ 降低到 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ，达到了国家粪便无害化卫生标准。

国家粪便无害化卫生标准 GB 7959—87 关于沼气发酵的卫生标准见表 2-18。

表 2-18 沼气发酵的卫生标准

编 号	项 目	卫 生 标 准
1	密封贮存期	30 天 以 上
2	高温沼气发酵温度	(53 ± 2) 持 续 2 天
3	寄生虫卵沉降率	95 % 以 上
4	血吸虫卵和钩虫卵	在 使 用 粪 液 中 不 得 检 出 活 的 血 吸 虫 卵 和 钩 虫 卵
5	粪大肠杆菌菌值	常 温 沼 气 发 酵 10^{-4} 、高 温 沼 气 发 酵 $10^{-3} \sim 10^{-2}$
6	蚊子、苍蝇	有 效 地 控 制 蚊 蝇 孳 生，粪 液 中 无 子 子，池 的 周 围 无 活 的 蛆、蛹 及 新 羽 化 的 成 蝇
7	沼气池粪渣	需 经 无 害 化 处 理 后 方 可 作 农 肥

注：1. 也可用于三格化粪池和密闭贮存方法处理粪便卫生效果的卫生评价。
2. 在非血吸虫病和钩虫病流行区，血吸虫卵和钩虫卵指数可以不检。

2.3.1.3 原料两相发酵工艺 两相发酵工艺（two-phase anaerobic digestion process）是 1971 年由美国 S. Ghosh 等人开发研究的。通常情况下，人们认为沼气发酵主要过程经历了酸化和甲烷化两个

阶段。酸化阶段所繁殖的酸化菌群在营养要求、生理代谢及其繁殖速度和对环境条件的要求等方面与在甲烷化阶段所繁殖的菌群有很大的差别。因此，人们把酸化阶段和甲烷化阶段人为地分开，建立起所谓的酸化罐和甲烷化罐两相发酵工艺，使沼气的产生效果大大提高。

在酸化阶段的酸化菌群繁殖较快，故滞留期较短；而甲烷化阶段的滞留期较长。对每升料液有机物达数十克，一般来说，酸化阶段滞留期为 1~2 天，甲烷化阶段滞留期为 2~7 天。所以，前者的消化器容积较小，而后的容积较大。酸化阶段一般采用高速度消化器或常规消化器，或采用完全混合式的反应器。而甲烷化阶段可采用任何厌氧消化器，生产中应用较多的是第二代高效装置，即污泥床反应器。由于不同发酵阶段仍然不可能是纯菌群培养，故在实际生产运行中酸化阶段还包括有液化（水解）和甲烷化的发酵反应。所以，为了更好的发挥酸化菌群和甲烷菌群的分解效率，对不同沼气原料或废水，则往往需要通过试验，以便确定最佳两相发酵工艺条件。

有机物在酸化阶段被分解成有机酸、醇、氢气以及少量的 CO_2 、 CH_4 等。而甲烷化阶段把大量有机酸进一步分解成 CH_4 和 CO_2 等。两相发酵工艺见图 2-15，为广东某糖厂采用两相沼气发酵工艺处理糖蜜废水。

其工艺过程分为酸化阶段和甲烷化阶段。

酸化阶段（第一阶段）：先将高浓度的废水进行适当的稀释，用泵打入高位料箱，然后通过热交换器将料液加热至 36 进入酸化罐（33），酸化罐容积为 30 米³。

甲烷化阶段（第二阶段）：从酸化罐出来的料液，经过中和池中和，再泵入高位料箱；通过热交换器加热至 35 进入甲烷化罐（温度 33），罐容积为 100 米³；经消化后的污泥污水再回流至高位污泥池进入发酵池，而溢流的消化液流入污泥沉淀池，上清液作为灌溉之用而排放。

两相发酵工艺生产性运行效果见表 2-19。

阶段采用第二代的消化器，故两相法适于处理含悬浮固体高的有机废水。

表 2-20 果酒废水中温 (35) 两相发酵与常规发酵比较

指 标	常规发酵	两相发酵
负荷/ [千克 COD (米 ³ · 天)]	0.8	6.1
原料在沼气池内的滞留时间(HRT)/ 天	15	7.4
产气率/ [米 ³ / (米 ³ · 天)]	0.4	2.9
CH ₄ 含量/ %	61.1	70.5
H ₂ 含量/ %	0	2.9
出水 pH	6.8	7.5
COD 去除率/ %	84	96

2.3.2 沼气发酵工艺控制条件

在日常沼气发酵过程中，要使沼气发酵正常进行，获得较好的产气效果，就要创造适宜沼气发酵微生物进行正常生命活动所需要的基本工艺条件。影响沼气发酵的工艺条件主要有以下几个方面。

2.3.2.1 严格的厌氧环境 微生物发酵分解有机物，若在好氧的条件下就产生 CO₂；若在厌氧的环境中就产生甲烷。沼气发酵是一个微生物学的过程，在发酵过程中，产甲烷菌显著的特点是在严格的厌氧条件下生存和繁殖，有机物被沼气微生物分解成简单的有机酸等物质。产酸阶段的不产甲烷微生物大多数是厌氧菌，在厌氧的条件下，把复杂的有机物分解成简单的有机酸等；而产气阶段的产甲烷细菌是专性厌氧菌，不仅不需要氧气，而且氧气对产甲烷细菌具有毒害作用，培养中要求氧化还原电位在 - 330 毫伏以下。因此，沼气发酵时必须创造严格的厌氧环境条件。

在沼气发酵的过程中，不仅需要充足的产甲烷菌，而且还需要大量的不产甲烷菌。不产甲烷菌中有好氧菌、厌氧菌和兼性厌氧菌。这些菌落构成了一个复杂的生态系统。因此，游离态氧对产甲烷菌的影响就不像纯培养产甲烷菌时那样严重。沼气池中原来存在的空气，以及装料时带入的一些空气对沼气发酵的危害并不大，虽然产甲烷菌的生长和繁殖需要严格的厌氧环境，若有氧的环境中，

产甲烷菌不会增长，反而受到抑制，但它们并不会死亡。所以，只要沼气池不漏气，投料时带入的氧气就会很快被一些好氧菌和兼性菌消耗掉，并为产甲烷菌创造了一个良好的厌氧环境。据测定，在沼气发酵开始时，沼气池中的氧化还原电位 (Eh) 为 - 121 毫伏，发酵 9 ~ 47 天后降低到 - 353 ~ - 410 毫伏。

沼气发酵微生物中产甲烷菌属专性厌氧菌，要求严格的厌氧环境。不产甲烷菌中多数也是专性厌氧菌，虽然也有一些好氧菌和兼性厌氧菌，它们需要一些氧气，但在沼气池投料时所带进的氧已能满足它们的要求。在启动和整个发酵过程中不必再添加氧气，因此，沼气池应严格密封。

2.3.2.2 温度条件 沼气发酵微生物只有在一定的温度条件下才能生长繁殖，进行正常的代谢活动。一般来讲，沼气发酵细菌在 8 ~ 65 的范围内都能进行正常的生长活动，产生沼气。在一定范围以内 (15 ~ 40) 随着温度的增高，微生物的代谢加快，分解原料的速度也相应提高，产气量和产气率都相应地增高，见表 2-21。

表 2-21 温度对沼气产气速度的影响					
沼气发酵温度/	10	15	20	25	30
沼气发酵时间/ 天	90	60	45	30	27
有机物产气率/ (升/ 千克)	450	530	610	710	760

当温度为 10 时尽管发酵了 90 天，但其产气率只有 30 发酵 27 天时的 59%。猪粪在 27.6 下发酵比在 16.9 下发酵，总产气量提高 67%。

Roediger (1976)、斐佛 (John T. Pfefter) 等和其他许多学者系统地研究了温度对不同原料沼气发酵产生的影响后指出，若温度介于 30 ~ 60 之间，沼气发酵的日产气效率和日负荷量并非与温度的增高呈正相关。而是在这个范围之内出现了两个产气的高峰。一个高峰在 37 左右，另一个在 52 左右。不同研究者由于采用

的发酵原料不同，结果不尽相同。概括地讲，一个高峰介于 30 ~ 40 之间；另一个高峰介于 50 ~ 60 之间。在这两个最适宜的发酵温度中，有两个不同的微生物类群参与作用。40 ~ 50 是沼气微生物高温菌和中温菌过渡区间，它们在这个温度范围内都不太适应，因而此时产气速度会下降。但当温度增高到 53 ~ 55 时，沼气微生物中的高温菌活跃，产沼气的速度最快。沼气发酵温度突然变化，对沼气产量有明显影响，过高时，则会停止产气。通常依沼气发酵对温度的要求划分为高温发酵（50 ~ 55 ）、中温发酵（33 ~ 38 ）、和常温发酵（10 ~ 30 ）、3 种类型，农村沼气发酵利用自然温度发酵，属于常温发酵。

我国农村的沼气池，基本都建在地下，大都采用自然温度发酵。沼气池内的料液温度受到气温和地温的影响，特别是受地温的影响较大。在我国四川成都地区，建在地下的水压式沼气池全年发酵料液温度的变化范围是 10 ~ 26 ；在湖南长沙地区（宁乡县），建在地下的水压式沼气池的发酵料液的温度变化范围是 12 ~ 31 ，平均温度为 18.6 ，最高池温为 31 ，最低为 12 ，其中池温在 12 ~ 15.9 之间的为 137 天，16 ~ 20.9 的为 116 天，21 ~ 31 的为 112 天。沼气池发酵液温度与气温、地温变化比较见表 2-22。

表 2-22 沼气池发酵液温度与气温、地温变化比较

项 目		冬			春			夏			秋			全年 总计 (365 天)
		11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	
成 都 地 区	平均气温 /	10.91	6.37	7.58	6.81	12.10	15.90	24.4	23.30	25.9	27.3	20.8	19.70	16.79
	平均地温 (210 毫米 处) γ	18.95	16.54	14.67	13.5	13.8	14.7	18.0	18.1	19.5	21.2	22.0	21.6	17.55
	平均池温 /	20.61	14.84	11.65	11.28	12.5	14.8	18.4	20.9	22.65	24.5	23.25	21.95	18.12

续表

项 目		冬			春			夏			秋			全年 总计 (365 天)
		11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	
长 沙 地 区	平均气温 /	10.2	6.5	5.8	4.8	10.2	16.1	20.8	26.2	29.5	29.9	22.8	15.2	16.6
	平均地温 (200 毫米 处)	13.0	9.1	8.1	6.0	10.7	16.0	21.8	26.7	30.9	32.7	27.0	18.2	18.4
	平均池温 /	18.6	15.9	13.3	12.9	13.0	14.9	17.7	19.6	23.4	26.2	24.9	21.2	18.6

注：1. 测试时间：成都地区 1981 年 11 月至 1982 年 10 月；长沙地区 1981 年 5 月至 1982 年 4 月。

2. 测试单位：成都地区由农业部成都沼气科学研究所测定；长沙地区由湖南省宁乡县农村能源办公室测定。

沼气发酵的速度与发酵温度有着密切的关系。在我国广大农村采用的常温沼气发酵，随着一年四季气温的变化，池温变化也较大，产气率的变化也大。冬季池温低，产气率低；夏季池温高，产气率也相应提高，可达 0.3~0.5 米³/ (米³ · 天)。

但是，发酵原料总的产气量并不受发酵温度的影响。在一定的温度变化范围内 (8~35℃)，一定量的发酵原料的总产气量基本上是不变的。也就是说提高原料的发酵温度并不能提高发酵原料的分解利用率，只是能提高沼气发酵的速度。假如要产同样多的沼气，发酵池温度低的需要的发酵周期就长，发酵池温度高的需要的发酵周期就短。例如在夏季 (27℃) 1 个月就可充分分解利用的发酵原料，在冬季 (10℃) 却要用 4 个月或者更长的时间才能完全消化分解。

发酵温度的突然升高或降低，对产气量有很大的影响。一般认为发酵温度突然上升或者下降 5℃，产气量就明显降低，若温度变化过大则会停止产气，当温度恢复正常后，仍可以正常产气。

沼气发酵由于采用常温、中温和高温发酵，其产生的结果也

不相同。为了防止发酵温度的突然变化而影响到正常产气，在农村自然发酵中可以对沼气池采取适当的保温措施，一般常温发酵温度不会突变；在进行中高温发酵时，一定要严格控制发酵料液的温度。

采用酒糟为原料进行沼气发酵时，要利用酒糟本身具有 80 ~ 90 的温度，宜进行高温发酵。

对于粪便，为了满足粪便的无害化处理，要求采用高温发酵。因此要求对发酵料液进行加温处理。

2.3.2.3 营养和原料的处理 充足和适宜的发酵原料是产生沼气的物质基础。在沼气发酵中，各种微生物源源不断地从外界吸收营养成分，以构成菌体和提供自身进行生命活动所需的能量。同时，在降解有机物质的过程中也形成了许多中间代谢产物。沼气细菌需要从原料中吸取的主要营养物质是碳（C）元素、氮（N）元素和无机盐等。但是，不同的微生物所需的营养成分是不同的。例如，产甲烷菌只能利用简单的有机酸和醇类等作为碳源，形成甲烷。绝大多数产甲烷菌可利用二氧化碳为碳源，形成甲烷；氮源方面只能利用氨态氮，而不能利用复杂的有机氮化合物，如蛋白质等。有机物质必须先经过不产甲烷微生物的分解作用，才能进一步被产甲烷菌利用。一般来说，碳素大都来源于碳水化合物，是细菌进行生命活动的主要物质能量来源。氮素多来源于蛋白质和亚硝酸盐、氨类等无机盐类，是构成细胞的主要成分。沼气发酵细菌对碳素和氮素营养需求要维持在一个适当的 C/N。关于沼气发酵中碳氮比例的影响问题很多学者都颇有争议，最初研究者引用土壤微生物学概念，过分强调 25 : 1，通过进一步研究发现，用常规的化学分析法来分析原料中的碳、氮含量，并不能正确反映发酵原料中的碳氮比例的关系。例如，木质素虽含碳量很高，但多数微生物不能利用。同一种发酵原料不同碳氮比例产气量也不一定相同。

综合国内外研究资料来看，沼气发酵要求的碳氮比例并不十分严格，原料的碳氮比例为（20 ~ 30）: 1，即可正常发酵。常用的发

酵原料中，鲜人粪含氮多、含碳少，碳氮比值小；作物秸秆含碳多、含氮少，碳氮比值大。为了满足沼气发酵细菌对碳氮比的要求，在投料时要注意合理搭配，综合投料，才能获得较高的产气量。

自然界可以作为沼气发酵原料的有机物质是相当丰富的，除了矿物质和木质素外，几乎所有的有机物都可以作为沼气发酵原料，如人畜粪便、作物秸秆、青草、含有机质丰富的废水和污泥以及农业废弃物等。目前，我国农村沼气发酵的原料主要是人畜粪便和各种作物秸秆。从化学分析的结果来看，各种家禽的粪便中都含有丰富的营养物质，是沼气发酵微生物良好的营养基质。许多研究者进行了各种发酵原料产气潜力的测定工作，结果见表 2-23、表 2-24。

表 2-23 不同原料沼气发酵的产气率（自然温度条件下）

原料名称	产气率/（升/ 千克）			甲烷含量 （体积分数） / %	发酵温度 /	研究者
	湿料	干料	挥发性固体			
猪粪 + 牛粪		110 ~ 126			自然温度 （室外池，一年）	钱泽澎
牛粪		230 ~ 290			自然温度 （23 ~ 31）	李钰
猪粪		127. 6			自然温度 （27 ~ 30）	江苏省六合县沼气 试验站
牛粪		85. 2			自然温度 （27 ~ 30）	
稻秆		140. 0			自然温度 （27 ~ 30）	
麦秆		183. 0			自然温度 （27 ~ 30）	
人粪		322. 0			自然温度 （27 ~ 30）	
锯木屑		4. 0			自然温度 （27 ~ 30）	重庆师 范学院
凤眼莲		185 ~ 259		62. 4 ~ 66. 5	自然温度 （平均 23. 8）	

表 2-24 不同原料沼气发酵的产气率（定温条件下）

原 料 名 称	产 气 率/ (升/ 千 克)			甲 烷 含 量 (体 积 分 数) / %	发 酵 温 度 /	研 究 者
	湿 料	干 料	挥 发 性 固 体			
猪 粪 (2%)		426.3 ~ 648.9			35	姚 爱 莉
猪 粪 (6%)		405.1 ~ 541.3			35	
稻 草 (2%)		405.70			35	
稻 草 (6%)		353.57			35	
麦 秆 (2%)		518.58			35	
麦 秆 (6%)		435.24			35	
麦 秆		487.29			35	周 孟 津
玉 米 秆		632.24			35	
人 粪		470	962		35	熊 承 宗
麦 秆	460	495	780	60 ~ 67	35	姜 锋 等
稻 秆	415	450	730	59 ~ 67	35	
玉 米 秆	500	555	845	60 ~ 68	35	
人 粪	115	430	710	60 ~ 74	35	
猪 粪	125	510	960	70 ~ 71	35	
牛 粪	23	120	260	67 ~ 76	35	
马 粪	74.6	345.3	425.7	74.7	35	郭 梦 云 等
污 泥	37.9	75.8	543.8	76.3	35	
酒 精 蒸 馏 废 液		385			35	张 树 政
猪 粪	116.70	426.0	556.57	65	30	彭 武 厚 等
牛 粪	58.86	294.3	382.76	66	30	
鸡 粪	213.80	310.3	277.5	60 ~ 65	30	
青 草	63.28	398.0	489.42	64	30	
稻 草	193.20	216.0	320.00	65	30	
柠 檬 酸 发 酵 废 菌 体		393 ~ 608		57 ~ 61	30	彭 武 厚
红 萍		108.6	250.1	64.6	29.6	贺 瑞 征
油 菜 秆		382.3	459.5	67.6	29.4	

括号中的数据指的是原料中水的质量分数。

2.3.2.4 适宜的酸碱度 溶液中氢离子 (H^+) 的浓度称作酸碱度。溶液中氢离子浓度大时则溶液呈酸性，氢离子浓度小时则呈碱性。

酸碱度的大小用 pH 值来表示。pH 是溶液酸碱度大小的度量单位。产甲烷最旺盛时，二氧化碳的含量很低，pH 值在 7.0 ~ 7.5 之间；当 pH 值处于最低值时，酸性气体（主要是 CO_2 ）的含量正是最大值，所以，料液的 pH 值是监测发酵过程并进行其控制的一个重要技术参数。

沼气发酵正常进行时，通常都是在微碱性环境。沼气发酵微生物细胞内细胞质的 pH 值一般呈中性，同时，细胞具有自我调节的能力，从而保持环境呈中性。所以，沼气发酵细菌可以在较为广泛的范围内生长和代谢，其 pH 值在 6 ~ 8 范围内均可发酵，最佳值是 7.0 ~ 7.2。（这里的 pH 值指的是消化器内料液的 pH 值，而不是发酵原料的 pH 值。）通常来说，pH 值高于 8.5 或低于 6.5 时，对沼气发酵都有一定的抑制作用，因为过酸或过碱使开始产气的时间持续得很长，导致产气量很少，甚至不产气。若 pH 值小于 6 时就会产生严重的阻抑作用，造成“酸中毒”，所产的气体不能燃烧使用。一般来说，当 pH 在 6.0 以下时，则应大量投入接种物或重新进行启动。

为了顺利地进行沼气发酵、及早地产气、提高产气量，则必须调节好启动时的 pH 值，pH 值调到 7.5 左右为最佳。在发酵过程中，除了一次添加过量的新鲜作物秸秆或青草等易产酸的原料，造成发酵液酸化，从而使 pH 值下降，需及时调节外，一般不用调节。

正常的沼气发酵过程中，pH 值一般会呈现出规律性的变化。在发酵初期，由于产酸细菌繁殖较快，而产甲烷细菌繁殖较慢，所以发酵初期的 pH 值往往下降，随着氨化作用的进行，产生氨，氨溶于水，形成氢氧化铵，中和有机酸，使 pH 值回升，保持在一定的范围之内，比较稳定。就是说在正常的情况下，沼气发酵过程中的 pH 值变化是一个自然平衡过程，pH 值有一个自行调节的能力，

一般无需进行随时调节。但如果配料不当，或操作管理不合理，可能会导致大量挥发酸积累，从而使 pH 值下降。例如，用喂配合饲料的鸡的粪、猪的粪发酵，需用草木灰、石灰水调节 pH 值，方能启动。

另外，在人畜粪便和其他有机废弃物中含有许多对 pH 起缓冲作用的物质。因此，在发酵过程中，一般是不需要进行调节的。

在大中型沼气发酵消化器投料时，要根据 pH 值来控制投料量，如果投料量过多，会形成冲击负荷，造成产酸过多。一般在间断投料时，投料前的 pH 值应以 7.5 ~ 7.8 为宜，在投料以后，其 pH 值不应低于 6.5。

调节 pH 的方法：过酸时可以经常换料（少量），以稀释发酵液中的挥发酸，提高 pH 值；也可用适量的石灰乳、草木灰或氨水进行调节。石灰乳调节的好处是：一是其价格低廉；二是钙离子与钾和钠离子相比对沼气的毒性较小，钙离子能与二氧化碳反应，生成碳酸钙沉淀。如果发酵液的 pH 值大于 8，可以加入适量的牛粪、马粪，同时加水稀释，因为牛马粪便是酸性物质，pH 值约为 5 ~ 6。常用发酵原料的酸碱度如表 2-25 所示。

表 2-25 常用发酵原料的酸碱度

原料	酒糟	猪粪	猪尿	牛粪	人粪	人尿	泔水	草木灰	石灰水
pH 值	4.3	6 ~ 7	7	7	6	8	6	11	12

建议采用测定挥发酸来控制投料量，这样可以做到精确管理。按南阳酒精厂的经验，以间断投料（每次投料 10%）为例，投料前发酵液的挥发酸以 650 毫克/升以下为宜，超过 800 毫克/升时就要加以注意或适当减少投料，当超过 1000 毫克/升时将迅速转坏，应大量减少投料或停止投料，待挥发酸量下降以后再恢复投料。

当利用含有大量有机酸的原料进行沼气发酵时，尽管 pH 值较低，但在原料进入消化器后有机酸会很快被利用，消化器内仍能保持正常的 pH 值。因此，使用含有机酸的废水为发酵原料时，一般

不需要调节 pH 值，只要适当控制进料负荷，发酵过程即可正常运行。酸性原料进出料 pH 的变化列于表 2-26。

表 2-26 酸性原料进出料 pH 值的变化

原 料 种 类	进 料 pH 值	出 料 pH 值	负 荷 / [千克 COD (米 ³ · 天)]	备 注
合成脂肪废水	4.3 ~ 4.6	7.0 ~ 7.3	5 ~ 6	上海市工业微生物研究所
酒精废水	4.0 ~ 4.4	7.8	7.2 ~ 9.6	南阳酒精厂
造纸及糠醛废水	6.5	7.0	4.5	广州能源所
豆制品废水	4.5	7.0	9.9	上海市工业微生物研究所

2.3.2.5 干物质浓度和有机物负荷量 对于沼气发酵干物质浓度的问题，不同的研究者有不同的观点。据有关专家对稻草加猪粪为原料测定：在 27 ~ 30 的范围内，干物质浓度 5% ~ 15%，随着浓度的增大，其总产气量也随着增大；但是，如果浓度进一步增大，增大到 15% ~ 25% 时，总产气量增加反而不明显，甚至减少。

结合浓度和温度两个因素来考虑对产气量的影响。高浓度 (13.5%) 在 50 和 32 的条件下，产气量比较低浓度 (7.4%) 高一倍。但在 17 的条件下，高浓度的产气量反而低于低浓度。这是因为高浓度在较低的温度条件下，容易引起有机酸的积累，使发酵料液的 pH 值减小，从而影响产气量。因此，发酵温度较低的沼气池不适合采用高浓度发酵。

近年来，我国一些地区开展了固体发酵（干发酵）的研究。一些研究发现，将干物质浓度提高到 20% 以上，不仅可以提高池容产气率，而且方便进出料，适合我国北方农村的用肥习惯。沼气固体发酵技术的核心是在较高水平的挥发性有机酸含量的运转中控制 pH 的问题。

结合我国广大农村的实际生活生产中用气的特点，沼气发酵最适宜的干物质浓度，应随季节不同（即发酵温度不同）而相应变

化。高温季节浓度控制在 6% 左右，低温季节浓度则以 10% ~ 12% 为好。这是因为，在我国冬季气温低，适当增加发酵浓度，可以略微的提高发酵液温度，以利于发酵进行。另外，由于增加了发酵原料的数量，可以使日产气量增加，对改善冬季的供气状况有较大作用。而夏季气温较高，发酵旺盛，这时候适当的降低发酵浓度，控制产气速度，使产生的气只要够用就行，过多的产气，反而造成浪费。

沼气发酵的处理能力，中温发酵为 2 ~ 3 千克/ (米³ · 天)，高温发酵为 5 千克/ (米³ · 天)，常温发酵则远远小于前面两种发酵的处理能力，其处理能力还随着环境温度的变化而变化。

各种类型的沼气发酵工艺都有一定的有机物负荷能力，超过极限值就会出现超负荷现象，此时，产酸速度就会大大超过消耗酸的速度，造成有机酸的积累，减小了发酵液的 pH 值，使产气机制受到抑制，从而造成沼气发酵不能正常进行。因此，沼气发酵处理时首先要保证发酵原料中的有机物含量不能超出发酵容器的最大负荷。

2.3.2.6 压力 据资料 (尼泊尔) 对隧道式消化器和水压式沼气池进行测试，列于表 2-27。

表 2-27 气体压力对日产气量的影响

沼气池	沼气测定	压力/ 毫米水柱	温度/	气体产量/ 米 ³	读数/ 次
隧道式	1 天 1 次	变化, 最高 1100	20. 5	1. 53	2
	1 天 2 次	变化, 最高 780	20. 5	1. 63	2
隧道式	1 天 1 次	变化, 最高 1100	21. 1	2. 16	2
	1 天 2 次	变化, 最高 780	21. 1	2. 11	2
水压式	1 天 2 次	变化, 最高 1200	24. 5	1. 74	7
	按流量计	固定, 最高 40	24. 5	1. 67	6

1 毫米水柱 = 9. 80665 帕。

从表 2-27 中试验结果表明，压力对每天的产量几乎没有影响。但是，大量的试验与研究表明压力的影响是具有双重性的，它既会影响气体的组成成分，也会影响总产气量。CO₂ 可溶于水但甲烷不溶，在高压下，CO₂ 的溶解度增加，所以此时沼气中甲烷的含

量就相对地提高了。

压力对沼气发酵产气有一定的影响。大型沼气发酵罐的底部常由于搅拌不到，水压使沼气和硫化物处于过饱和状态，从而使挥发酸积累，抑制了反应的进行。小型沼气池也有类似现象。我国农村推广的水压式沼气池，将发酵部分和贮气部分结合在一起，使贮存的气体保持了比较高的压力。据研究，压力对产气有较大的影响。例如，贮气的压力保持在 981 帕的比对照 6867 帕总产气量高 15 %。因此，压力是值得关注的影响因素之一。

我国的水压式沼气池发酵经常处于较高和变动的压力条件下，随着压力的变化造成料液流动，起到了搅拌作用，使压力的影响减少。如果将我国的传统池形进行改进，使其压力处于较低的状态，并增加搅拌装置，这样，沼气池的产气率将有显著的提高。

通常情况下，习惯地认为压力表上的读数越大越好，其实不然，实际压力表上的读数的大小并不能反映沼气产量的多少，且压力过高对产气量还会有负面影响。

2.3.2.7 添加剂和抑制剂

(1) 添加剂 能够促进有机物分解并提高沼气产量的物质叫做添加剂。添加剂的种类很多，包括一些酶类、无机盐类、有机物和其他无机物等。

在沼气发酵过程中添加少量的有益的化学物质，有助于促进沼气发酵，提高产气量和原料的利用率。分别在沼气发酵液中添加少量的硫酸锌、磷矿粉、炼钢渣、碳酸钙、炉灰等均可不同程度地提高产气量、甲烷含量及有机物的分解率，其中以添加磷矿粉的效果为最佳。硫酸锌添加量为 0.005 % 时，沼气产量提高 3 %；0.01 % 时，沼气产量提高 40.2 %；0.02 % 时，沼气产量提高 21 %；0.05 % 时，起毒害作用。 CaCO_3 （碳酸钙）可提高牛粪消化器的产气量和甲烷的含量。

添加过磷酸钙能促进纤维素的分解，提高产气量。添加少量的钾、钠、镁、锌、磷等元素能促进产气、提高产气率的原因：一是能促进沼气发酵菌落的生长；二是能增加酶的活性，尤其是镁、锌、

锰等二价金属离子常常是酶活性中心的组成成分， Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 是水解酶的活化剂，能提高酶的活性和促进酶的反应速度，有利于纤维素等大分子化合物的分解。添加浓度如下：Na 为 100 ~ 200 千克/升；K 为 200 ~ 400 毫克/升；Ca 为 100 ~ 200 毫克/升；Mg 为 75 ~ 150 毫克/升。

在进料时添加纤维素酶，可加速有机质分解，提高产气量。若添加少量的活性炭粉末则可以提高产气 2 ~ 4 倍。如果添加表面活性剂吐温 20，其浓度为 0.001%，则可降低表面张力，增强原料和菌种的接触，产气量最高可提高 40%。

另外，如果把尿素添加到牛粪消化器内，可提高产气速度和产气量；把黑曲霉添加到污泥消化器内，可提高甲烷的含量；把 H_2 通入消化器内，甲烷则与 H_2 成适当比例增加，当氢耗尽后，产气中甲烷的含量又恢复到原来水平；添加 0.25% ~ 0.5% 的甲醇和 0.25% ~ 0.5% 的醋酸钠，均可较大幅度地提高沼气产量。

(2) 抑制剂 除了由于沼气发酵不正常而造成的有机酸的大量积累，氨浓度过高所引起的发酵障碍以外，常由于添加了一些有害的物质而使沼气发酵受到抑制。这些对沼气发酵微生物的生命活动起抑制作用的物质叫做抑制剂。

抑制沼气发酵最普遍的原因是：硫酸还原细菌将无直接作用的 SO_4^{2-} 还原成可溶性硫化氢 (H_2S)，与发酵液中的重金属反应，形成溶解度极小的硫化物，表现出很高的抗性；沼气发酵菌有一定的忍耐程度，超过极限浓度，常使沼气发酵受阻。抑制剂的种类很多，有无机物和有机物，有植物性的和矿物质的物质。下面罗列一些典型的抑制剂种类。

铵态氮：若浓度过高，则会杀伤沼气发酵菌。

各种农药：特别是剧毒农药，有极强的杀灭沼气发酵微生物的作用。

挥发酸浓度：中温发酵达到 2×10^{-3} 以上，高温发酵达到 3.6×10^{-3} 以上时，产生抑制。

金属元素：如 K、Na、Ca、Mg 等，适量起好作用，过量

(Na > 800 千克/升, K > 1200 毫克/升, Ca > 800 千克/升, Mg > 1000 毫克/升) 时则起抑制作用。

2.3.2.8 搅拌 在沼气发酵过程中, 若对沼气池进行搅拌则能有效地提高产气速度和处理效率, 因此, 搅拌对整个沼气发酵过程来说具有举足轻重的作用。通过试验得知, 如果搅拌时间短, 那么消化效率下降; 若不搅拌, 则有机物处理量和产气量都减少到连续搅拌时的一半。搅拌的目的在于使消化器内原料的温度分布均匀, 使细菌和发酵原料充分接触, 加快发酵速度, 提高产气量, 并有利于除去产生的气体。此外, 搅拌还破坏了浮渣层, 便于气体的排出。但是也有说法认为无需搅拌, 尤其是在高温发酵时, 发酵液本身搅动就很激烈, 再进行搅拌, 效果不明显。

传统的沼气池中并没有设计搅拌装置, 这样沼气池中的料液一般会形成 3 层, 自上而下分别为浮渣层 (结壳层)、清液层和沉渣层, 严重地影响了产气效果。为了打破浮渣层中的结壳, 使料液充分均匀混合, 并更好地与微生物接触, 就必须设置必要的搅拌器。有关专家通过试验研究发现, 搅拌作用对产气量具有显著的影响。搅拌的沼气池与不搅拌的进行比较, 总产气量可提高 15% ~ 35%。搅拌的效果是毋庸置疑的, 关键问题是如何进行搅拌, 设计既要结构简单, 又要操作方便, 并且价格低廉, 符合各地方实际情况。

在日常管理中, 可根据发酵规模大小, 采用不同的搅拌方法。

机械搅拌。机械搅拌器安装在沼气池液面以下, 定位于上、中、下层皆可。如果料液浓度高, 安装要稍偏下一些。此种搅拌法比较适合于小型沼气池。 液体搅拌。即用人工或泵使沼气池内的料液循环流动, 以达到搅拌的目的。 气体搅拌。即将沼气池产生的沼气, 加压后从池底部冲入, 利用产生的气流, 达到搅拌的目的。液体搅拌和气体搅拌比较适合于大、中型的沼气工程。

2.3.2.9 接种物 在沼气发酵中, 菌种数量的多少和质量的优劣直接影响着沼气发酵的产气率。在处理废水时, 由于废水中含有的产甲烷细菌比较少, 故在投料前, 必须进行接种。添加接种物可促使过早产气, 提高产气速率。不同来源的沼气发酵接种物 (俗称沼

气菌种) 的数量对产气和气体组成有着不同的影响。

若想添加优质适当的接种物, 以提高沼气发酵的产气率, 那么第一步就是要对菌种进行培养。通常都是先从老发酵池的池底部取出污泥, 再移入新建的发酵池中, 并在适宜的温度条件下, 添加一些新料, 逐步增加以培养菌种, 也可以将老发酵池中的沼液抽取一部分出来加入到新发酵罐中, 这样可以加快菌体繁殖的速度。需要注意的是, 如果需要进行高温发酵, 那么必须使用高温发酵的菌种; 若需要进行中温发酵, 则必须使用中温发酵的菌种。绝对不能使用中温发酵的菌种给高温发酵接种, 否则不能达到预期效果。因为, 不同温度条件下的菌落具有不同的生理特性。

污泥中存在有大量的沼气发酵的微生物, 如果在发酵器中提高污泥的浓度, 那么就可以增大处理量。沼气发酵的处理能力, 以有机质计, 中温发酵为 $2 \sim 3$ 千克/(米³ · 天), 高温发酵为 5 千克/(米³ · 天), 但如果提高污泥的浓度, 那么可以使处理量增加近 3 倍, 这样能大大缩小发酵器的容积。

新型沼气发酵装置, 例如厌氧过滤器、上流式厌氧污泥层反应器、厌氧附着膨胀床反应器等, 它们的重要特点之一就是保持有较高的菌体浓度, 所以也就具有较高的处理能力。

农村户用沼气池一般以人畜粪便和作物秸秆作为原料, 粪便中含有大量的沼气发酵菌, 装入池后, 经厌氧培养, 就可以进行发酵。可以采用添加接种物的方法来提产气和改善发酵的状况。通常情况下, 开始发酵时要求菌种量达到发酵量的 5% 以上。

实际操作中, 接种物添加的数量, 要按不同的发酵工艺要求来考虑。

常温发酵。此种情况下的接种物一般采用的是下水道中的污泥, 添加量大约相当于发酵液重的 10% ~ 15%; 若采用沼渣时, 则应加 10% 以上, 而如若使用较多的秸秆作发酵原料时, 应该加大接种用量, 其质量应大于秸秆的质量。

中温发酵。中温发酵的菌种要从常温接种物中筛选、富集驯化得到。例如, 某酒厂采用猪场自然发酵的猪圈粪 5 吨, 7% 浓

度酒糟稀释液 1.5 吨，制酒排出料液 10 吨，用大型塑料袋培养近 1 个月。

高温发酵。高温发酵的菌种一般是从中温发酵菌种富集驯化培养而得。例如某酒精厂采用屠宰场臭水池底起泡有腥臭的污泥和酒糟沟底起泡的污泥，混合后加入少量（约 10%）酒糟液保温培养，刚开始时采用的是中温，以后逐步提高到高温（53 ~ 55 ）。起初污泥中甲烷菌较少，繁殖较慢，待 pH 值回升到了 7.5 ~ 7.8 后开始产气，再加料并逐步扩大。

还有一些酒厂是就近就便，采用其附近城肥无害化处理厂的高温粪便沼气发酵液 64 米³，自然发酵的猪圈粪 19 米³，加酒糟沟底污泥 3 米³作接种物，在 45 ~ 55 的温度条件下，逐渐加入新鲜酒糟，进行菌种驯化和扩大培养。

(杨群发 郭前辉)

主要参考文献

- 1 彭景勋编著. 小康型沼气池. 北京: 中国农业出版社, 1997
- 2 吴湘淦主编. 农村能源. 北京: 农业出版社, 1988
- 3 万仁新主编. 生物质能工程. 北京: 中国农业出版社, 1995
- 4 伍义泽主编. 沼气新技术应用研究. 成都: 四川科技出版社, 1988
- 5 卢永川编著. 沼气工程设计. 北京: 农业出版社, 1987
- 6 王学涛. 新型高效户用沼气发酵装置试验研究: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2002

第 3 章 农村家用沼气工程的设计、施工及运行管理

3.1 农村家用沼气工程设计计算

3.1.1 沼气池的池形

随着我国沼气科学技术的发展和农村家用沼气的推广，根据当地使用要求和气温、地质等条件，家用沼气池有固定拱盖的水压式池、大揭盖水压式池、吊管式水压式池、曲流布料水压式池、顶返水水压式池、分离浮罩式池、半塑式池、全塑式池和罐式池。形式虽然多种多样，但是归总起来大体是由水压式沼气池、浮罩式沼气池、半塑式沼气池和罐式沼气池 4 种基本类型变化形成的。与“四位一体”生态型大棚模式配套的沼气池一般为水压式沼气池，它又有几种不同形式。

3.1.1.1 固定拱盖水压式沼气池 固定拱盖水压式沼气池有圆筒形、球形和椭球形 3 种池形。这种池形的池体上部气室完全封闭，随着沼气的不断产生，沼气压力相应提高。这个不断增高的气压，迫使沼气池内的一部分料液进到与池体相通的水压间内，使得水压间内的液面升高。这样一来，水压间的液面跟沼气池体内的液面就产生了一个水位差，这个水位差就叫做“水压”（也就是 U 形管沼气压表显示的数值）。用气时，沼气开关打开，沼气在水压下排出；当沼气减少时，水压间的料液又返回池体内，使得水位差不断下降，导致沼气压力也随之相应降低。这种利用部分料液来回串动，引起水压反复变化来贮存和排放沼气的池形，就称之为水压式沼气池。

水压式沼气池，是我国推广最早、数量最多的池形，是在总结“三结合”、“圆、小、浅”、“活动盖”、“直管进料”、“中层出料”

等群众建池的基础上，加以综合提高而形成的。“三结合”就是厕所、猪圈和沼气池连成一体，人、畜粪便可以直接打扫到沼气池里进行发酵。“圆、小、浅”就是池体圆、体积小、埋深浅。“活动盖”就是沼气池顶加活动盖板。水压式沼气池形有以下几个优点。

池体结构受力性能良好，而且充分利用土壤的承载能力，所以省工省料，成本比较低。

适于装填多种发酵原料，特别是大量的作物秸秆，对农村积肥十分有利。

为便于经常进料，厕所、猪圈可以建在沼气池上面，粪便随时都能打扫进池。

沼气池周围都与土壤接触，对池体保温有一定的作用。

水压式沼气池形也存在一些缺点，主要如下。

由于气压反复变化，而且一般在 $4 \sim 16$ 千帕（即 $40 \sim 160$ 厘米水柱）压力之间变化。这对池体强度和灯具、灶具燃烧效率的稳定与提高都有不利的影响。

由于没有搅拌装置，池内浮渣容易结壳，又难于破碎，所以发酵原料的利用率不高，池容产气率（即每立方米池容一昼夜的产气量）偏低，一般产气率仅为 $0.15 \text{ 米}^3/(\text{米}^3 \cdot \text{天})$ 左右。

由于活动盖直径不能加大，对发酵原料以秸秆为主的沼气池来说，大出料工作比较困难。因此，出料的时候最好采用出料机械。

3.1.1.2 变形的水压式沼气池

(1) 中心吊管式沼气池 将活动盖改为钢丝网水泥进、出料吊管，使其有一管三用的功能（代替进料管、出料管和活动盖），简化了结构，降低了建池成本，又因料液使沼气池拱盖经常处于潮湿状态，有利于其气密性能的提高。而且，出料方便，便于人工搅拌。但是，新鲜的原料常和发酵后的旧料液混在一起，原料的利用率有所下降。

(2) 曲流布料水压式沼气池 该池形是由昆明市农村能源环保办公室于 1984 年设计成功的一种新池形。它的发酵原料不用秸秆，

全部采用人、畜、禽粪便。原料的含水量在 95% 左右（不能过高）。该池形有如下特点。

在进料口咽喉部位设滤料盘。

原料进入池内由布料器进行半控或全控式布料，形成多路曲流，增加新料扩散面，充分发挥池容负载能力，提高了池容产气率。

池底由进料口向出料口倾斜。

扩大池墙出口，并在内部设隔板，塞流固菌。

池拱中央、天窗盖下部吊笼，输送沼气入气箱。同时，利用内部气压、气流产生搅拌作用，缓解上部料液结壳。

把池底最低点放在水压间底部。在倾斜池底作用下，发酵液可形成一定的流动推力，实现进出料自流，可以不打开天窗盖把全部料液由水压间取出。

3.1.1.3 其他各种变形的水压式沼气池 除了上述两种变形的水压式沼气池外，各地还根据各自的具体使用情况，设计了多种其他变形的水压式沼气池形。例如，为了减少占地面积、节省建池造价、防止进出料液相混合、增加池拱顶气密封性能的双管顶返水水压式沼气池，为了便于出料的大揭盖水压式沼气池和便于底层出料的圆筒形水压式沼气池，为了多利用秸草类发酵原料而采用的弧形隔板、干湿发酵水压式沼气池。

3.1.1.4 无活动盖底层出料水压式沼气池 无活动盖底层出料水压式沼气池是一种变形的水压式沼气池。沼气池为圆柱形，斜坡池底。它由发酵间、贮气间、进料口、出料口、水压间、导气管等组成。该池形将水压式沼气池活动盖取消，把沼气池拱盖封死，只留导气管，并且加大水压间容积，这样可避免因沼气池活动盖密封不严带来的问题，在我国北方农村，与“模式”配套新建的沼气池提倡采用这种池形。

(1) 进料口与进料管 进料口与进料管分别设在猪舍地面和地下。厕所、猪舍及收集的人、畜粪便由进料口通过进料管注入沼气池发酵间。

(2) 出料口与水压间 出料口与水压间设在与池体相连的日光温室内。其目的是便于蔬菜生产施用沼气肥，同时出料口随时放出二氧化碳进入日光温室内促进蔬菜生长。水压间的下端通过出料通道与发酵间相通。出料口要设置盖板，以防人、畜误入池内。

(3) 池底 池底呈锅底形状，在池底中心至水压间底部之间，建一 U 形槽，下返坡度 5%，便于底层出料。

(4) 工作原理 未产气时，进料管、发酵间、水压间的料液在同一水平面上。产气时，经微生物发酵分解而产生的沼气上升到贮气间，由于贮气间密封不漏气，沼气不断积聚，便产生压力。当沼气压力超过大气压力时，便把沼气池内的料液压出，进料管和水压间内水位上升，发酵间水压下降，产生了水位差，由于水压气而使贮气间内的沼气保持一定的压力。用气时，沼气从导气管输出，水压间的水流回发酵间，即水压间水位下降，发酵间水位上升。依靠水压间水位的自动升降，使贮气间的沼气压力能自动调节，保持燃烧设备火力的稳定。产气太少时，如果发酵间产生的沼气跟不上用气需要，则发酵间水位将逐渐与水压间水位相平，最后压差消失，沼气停止输出。

目前发展的沼气池池形主要有曲流布料、预制钢筋混凝土板装配、圆筒形、椭球形、分离贮气浮罩等户用沼气池。

3.1.1.5 曲流布料式沼气池 曲流布料沼气池是在“圆、小、浅”圆筒形沼气池的基础上，经过筛选而设计出具有先进发酵工艺和池形结构的沼气池。

特点：池底由进料口向出料口倾斜，池底部最低点在出料口底部，在倾斜池底的作用下，形成流动推力，实现主发酵池进出料自流；能够利用外力连动搅拌装置或内部气压进行搅拌，防止料液结壳；采用连续发酵工艺，发酵条件稳定；池形结构合理，原料进入池内由分流板进行半控或全控式布流，充分发挥池容负载能力，池容产气率高；造价低廉，自身耗能少；操作简单方便，容易推广。

适用范围、条件：该池适用于经济条件好，原料丰富（日进料

量 100 千克), 耗能大的养殖业发达地区, 要求家庭成员有一定的文化技术知识, 特别适用于能够进行科学管理的养殖专业户、科技户或要求建设高档沼气池的农户。

3.1.1.6 分离贮气浮罩式沼气池 特点: 分离贮气浮罩式沼气池不属于水压式沼气池, 其发酵池与气箱分离, 没有水压间, 采用浮罩与配套水封池贮气; 有利于扩大发酵间装料容积, 最大投料量为沼气池容积的 98%; 浮罩贮气相对于水压式沼气池其气压在使用过程中是稳定的。

适用范围: 该池适用于以人、畜、禽粪便为发酵原料的农村户用沼气池或畜牧场沼气工程, 地温在 10℃ 以上均能正常运行, 不受地域限制。

3.1.1.7 预制钢筋混凝土板装配沼气池 预制钢筋混凝土板装配沼气池是在现浇混凝土沼气池和砖砌沼气池基础上研制和发展起来的一种新的建池技术。它与现浇混凝土沼气池相比较, 具有容易实现工厂化、规范化、商品化生产和降低成本、缩短工期、加快建设速度等优点。它把池墙、池拱、进出料管、水压间墙、各口及盖板等都先做成钢筋混凝土预制件, 运到建池现场, 在大开挖的池坑内进行组装。

3.1.2 沼气池设计原则

合理的设计, 可以节约材料、省工省时, 是确保修建沼气池成功的关键。设计沼气池的主要原则如下。

技术先进, 经济耐用, 结构合理, 便于推广。

在满足发酵工艺要求, 有利于产气的情况下, 兼顾肥料、卫生和管理等方面的要求, 充分发挥沼气池的综合效益。

因地制宜, 就地取材, 力求沼气池池形标准化、用材规范化、施工规范化。

考虑农村修建沼气池面广量大, 各地气候、水文地质情况不一, 既要考虑通用性, 又要照顾区域性。

总之, 沼气池的设计关键就是要使设计出来的沼气池有利于进出料、有利于沼气池的管理、有利于提高产气率和提高池温为原

则。根据实践经验证明：沼气池的结构要“圆”（圆形池）、“小”（容积小）、“浅”（池子深度浅）；沼气池的布局，南方多采用“三结合”（厕所、猪圈、沼气池），北方多采用“四位一体”（厕所、猪圈、沼气池、太阳能温棚）。

3.1.3 沼气池设计参数

3.1.3.1 气压 农村家用沼气池，主要用于农户生产沼气，一般用于炊事和照明，沼气产量较多的农户，除炊事和照明外，还可以用作淋浴、冬季取暖、水果和蔬菜保鲜等诸多用途，其沼气的压力和气流量的设计，应根据产气源到用气点的距离、用气速度等来确定输气管的大小。但是，作为大众用的农村户用沼气池，这样就会比较复杂，很难达到定型和通用的目的。根据目前全国各地农村沼气池的选址调查，大多数沼气池都建于畜禽圈栏旁边和靠近圈栏，甚至有的地区建在畜禽圈栏内（上为畜禽圈栏，下为沼气池），利用气点都比较近，一般在20米以内。因此，农村户用沼气池的设计气压一般为2000~8000比较适合。

3.1.3.2 产气率 产气率是指每米³沼气池24小时产沼气的体积，常用米³/（米³·天）表示。农村户用沼气池产气率的高低，一般与沼气池的池形没有明显直接关系，而是与发酵温度、原料的浓度、搅拌、接种物多少、技术管理水平等有关，当这些条件不同时，产气率也不同。根据经验，农村家用沼气池，在常温条件下，以人、畜粪便为原料，其设计产气率为0.20~0.40米³/（米³·天）之间。

3.1.3.3 容积 沼气池设计的一个重要问题就是容积确定。沼气池池容设计过小，如果农户人畜禽粪便比较充裕，则不能充分利用原料和满足用户的要求。如果设计过大，若没有足够的发酵原料，使发酵原料浓度过低，将降低产气率。因此，沼气池容积的确定主要是根据用户发酵原料的丰富程度和用户用气量的多少而定。我国农村家用沼气池，每人每天用气量为0.3~0.4米³，那么3~6口人之家，沼气池建造容积6~10米³。

3.1.3.4 投料量 沼气池设计投料量，主要考虑料液上方留有贮气间，是贮存沼气的地方。投料量的多少，以不使沼气从进出料间排除为原则。一般来说，沼气池设计投料量，一般为沼气池池容的 90%。

3.1.4 沼气池设计的主要问题

农村家用沼气池设计需要解决的主要问题如下。

3.1.4.1 沼气池形式的选择问题 沼气发酵可以是连续投料、半连续投料和批量投料式。我国广大农村由于原料特点和用肥集中等原因，主要采用半连续投料发酵。沼气池的几何形状有圆柱形、球形、半球形和长方形等。由于圆柱形、半球形沼气池的结构合理，受力均匀，强度较高，抗震性强，施工方便，节约用料，密封性好，便于输气而得到广泛使用。圆形比长方形沼气池在同等容积、同等受力情况下，表面积可减小 20%，沼气池壁厚可减小 50% 左右。

圆形水压式地下沼气池，是我国农村推广的主要池形。它除了有上述优点外，其综合效益也较好，管理使用方便，节约用地，造价较低，适应性较强。我国农村家用小型沼气池，大部分采用立式圆柱形；在沿海和沙网地带采用较多的是球形。

从建筑材料来分，有砖砌的、石砌的、混凝土等结构，现在广大农村大多采用混凝土和砖砌结构的沼气池。

除了材料结构、池形之外，还必须考虑修建沼气池地点的地形、位置和地下水位等条件。

3.1.4.2 沼气池容积大小和各部分尺寸的确定问题 沼气池容积的大小，要根据使用要求、产气率和气温等条件来确定。农村家用沼气池，通常用下列公式，按照人口数量来估算沼气池的容积。

$$V = V_1 + V_2 \quad (3-1)$$

式中 V ——沼气池容积，米³；

V_1 ——发酵间容积，米³；

V_2 ——贮气间容积，米³。

$$V_1 = nkr \quad (3-2)$$

式中 n ——气温影响系数;
 k ——人口多少系数;
 r ——家庭人口数量。

一般来说, 每人建造 $1.0 \sim 1.4 \text{ 米}^3$ 的发酵间, 就基本上能满足生活用气的需要。由于人多用气省, 人少用气费的特点, 一般 $2 \sim 3$ 口人的农户, $k = 1.4 \sim 1.8$; $4 \sim 7$ 口人的农户, $k = 1.1 \sim 1.4$ 。另外, 考虑气温对产气的影响, 气温高, 产气多; 气温低, 产气少。因而区域气候不同, 发酵间的大小也要考虑增减。我国南方地区, $n = 0.8 \sim 1.0$; 我国中部地区, $n = 1.0 \sim 1.2$; 我国东北各省, $n = 1.2 \sim 1.5$ 。

贮气间和发酵间是相互联通、没有严格界限的整体。为了方便起见, 一般将最大贮气部位线以上部位作为贮气间, 考虑到用气、浮料和留有贮备量等, 贮气间容积应占发酵间容积的 25% 左右 ($V_2 = V_1 \times 25\%$)。

目前, 我国农村家用沼气池, 根据一般的生活水平, 每人每天为 $0.2 \sim 0.3 \text{ 米}^3$, 沼气池的容积以 4 米^3 、 6 米^3 、 8 米^3 、 10 米^3 为宜。并且, 我国科研人员已经设计出一套农村家用水压式 4 米^3 、 6 米^3 、 8 米^3 、 10 米^3 沼气池标准图集及质量检查验收标准和施工操作规程, 已在 1984 年经国家标准局批准, 代号是 GB 4750 ~ 4752—84。

农户建池, 可以根据估算公式 (3-1) 和公式 (3-2) 计算出大致沼气池总体积, 然后再选择和其接近的标准图集的沼气池, 按照该标准的图纸要求施工建造。

3.2 农村家用沼气工程施工工艺

沼气池是个生产并贮存沼气的装置, 所以它必须是抗渗漏和气密性均好的装置, 要达到结构安全, 不漏水、不漏气、寿命长的目的, 除了进行科学合理的设计以外, 其施工技术和施工质量是一个非常重要的环节。所以本节对施工中的具体细节和注意事项作以阐述, 对施工人员在施工中会有所帮助。

新建沼气池，必须符合科学要求，才能保证质量，达到好的使用效果。

3.2.1 选定池形

我国农村家用沼气池，绝大部分是埋在地下，受结构自重、土层的垂直和水平压力、地面活荷载、地基反作用力、静水压力和上浮力、池内料液重力及沼气压等轴对称荷载作用。圆形池池盖和池底的最不利情况是空池阶段。由于沼气池是封闭壳体，变形微小，所以作用于池体的土层水平侧压力可按弹性平衡理论采用静止土压力计算。对于水压式沼气池，其削球壳池盖、池体边界按无矩铰支假定的无矩理论计算，池墙按两端铰接的圆柱壳计算。经过计算分析，并通过实体模型验证以及破坏实验，证明实验结果同理论计算是吻合的。根据这个理论，我国科研人员设计出一套农村家用沼气池标准图集以及质量检查验收标准和施工操作规程，也就是国家标准 GB 4750—84。

建沼气池首先要了解各种沼气池形的布局状况，因为布局合理是提高沼气池产气量的重要前提；其次要了解池形的日常管理操作是否方便，特别是排渣清淤是否容易；同时，池形要具备正常的新陈代谢功能，可混合使用杂草、秸秆，不造成短路，进出料口一旦发生短路，要有切实可行的排除方法；此外要根据家庭人口和饲养畜禽的数量、种类等情况来确定容积，一般按每人 $1.3 \sim 1.5 \text{ m}^3$ 池容的比例来预算沼气池的池容，比如，3口之家选用 4 m^3 的池容，5~6人选用 8 m^3 的池容，养猪多、发酵原料充足的农户可适当增大池容。

农户建池，可以根据用户所能提供的发酵原料种类、数量和人口多少、地质水文条件、气候等特点，因地制宜地选定池形和容积。

3.2.2 建池时间的选择

建池时间的选择主要根据以下3个方面来考虑。

沼气池的发酵速度、产气率与温度变化呈正比关系。春夏季（上半年）气温逐渐升高，沼气池中厌氧细菌逐渐活跃，沼气池

发酵旺盛，新池发酵启动比较快，产气率高；而秋冬（下半年）由于气温由高逐步降低，发酵由旺转缓慢。因此，从季节气温的升降看，应选择气温较高的春夏季建池最好。

从春夏和秋冬季的降雨和地下水位升降的规律来看，前者雨水较多，地下水位升高，低洼地区建池有一定困难，而秋冬季节恰恰相反。所以，在低洼地区应选择下半年建池较好。

从建材价格涨落情况看，上半年建池价格要比下半年低，每袋泥的季节差价一般在 5 ~ 6 元左右，如果建一座沼气池需水泥 20 袋，那么，上半年建池一般要比下半年节约 72 元左右。因此，从经济角度来考虑，在上半年建池比较合算。

综合以上分析，选择上半年建池比较合适，但地下水位较高的地区、村落，宜采用分期施工的方法，即上半年做好规划，下半年挖坑建池。

3.2.3 建池地址的选择

做到猪圈、厕所、沼气池三者联通建造，达到人、畜粪便能自流入池。池址与灶具的距离一般控制在 25 米以内；尽量选择在土质坚实、地下水位低、地势较高的地方建池。同时还要注意选择的地方要避风向阳、出料方便，并且能使运输车辆的畅通。

准备建池材料。根据池形确定施工工艺，备足建池材料。

拟定施工方案。根据沼气池的形式和结构等条件，做好施工前的技术准备工作，确定施工方案。

3.2.4 施工工艺的选择

我国农村家用圆形（包括球形）沼气池施工工艺，总的说来有砌块建池、整体现浇建池和组合式建池 3 种。

砌块施工工艺。砌块（这里包括混凝土预制块、标砖和块石）建池在我国较为广泛，在我国长期的实践中发现砌块建池有以下优点：由于标砖、混凝土预制块都是规格化的材料，所以这就为池形标准化创造了条件；施工简便，节约木材；适应性强，对于不同水位都可以采用；可以常年备料，常年建池，加快建设速度。该方法节约成本，主池体各部位厚薄均匀，受力好、抗压抗拉性能

好，可分段施工，缩短地下建池时间，利于地下水位高的地区建池。

混凝土整体现浇施工工艺。整体现浇池的整体性能比较好，质量比较稳定，使用寿命长，但是耗用的模板和人工比较多。但是，混凝土现浇施工时技术要求较高，若挖坑和校模不准，易造成池墙厚薄不一，而且会增大建池成本；此外，现浇施工要求一气呵成，不能间歇，难免出现规范不一、质量难以保证的现象。实践证明，在地下水位较高的地区使用该法施工要比预制件施工难得多。因此，建造农村户用沼气池，预制件施工法要比混凝土现浇施工法更胜一筹。

组合式建池是指池墙和池盖采用两种不同的施工工艺，例如池盖现浇而池墙采用砌块建池，或者池盖采用砌块而池墙现浇建池。

至于农户最后选择哪种施工工艺，这要根据当地的建池材料、地质水文条件、施工习惯等，因地制宜地确定施工工艺。

3.2.5 建筑材料的选择

沼气池设计要求经济合理地选用建筑材料。建筑材料的费用约占建筑物造价的 50% ~ 60%，所以要尽可能地就地取材，使沼气构筑物取得较好的技术经济指标。目前，我国农村建池用材料有水泥、砖、混凝土、砂浆、块石等。这里对这几种建池用的建筑材料的性质、配置和使用作一简单介绍。

(1) 砖 这里的砖指的是普通烧结黏土砖，它是以黏土为原料，经过焙烧而成的人造石材。砖的外形标准尺寸为 240 毫米 × 115 毫米 × 53 毫米的直角平行六面体，容重约为 1600 ~ 1800 千克/米³；外观尺寸应平整，没有过大翘曲，敲击声脆。砖的标号按照抗压和抗折两项强度分为 MU30、MU25、MU20、MU15、MU10 五个标号。

(2) 水泥 在建筑中常用的水泥有硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥及粉煤灰硅酸盐水泥。此外，还有一些具有特殊性能的水泥，以满足不同工程的特殊需

要，如中热硅酸盐水泥、白色硅酸盐水泥、快硬硅酸盐水泥、膨胀水泥等。在每一品种水泥中，又根据其胶结强度的大小，分为若干标号。当水泥的品种和标号不同时，其性能也有差异。因此，在使用水泥时，必须注意水泥的品种及标号，了解其性能特点及使用方法，从而能够根据工程的具体情况合理地选择与使用水泥，这样既可以提高工程质量又能节约水泥。

硅酸盐水泥和普通硅酸水泥。在普通硅酸水泥成分中，绝大多数仍是硅酸盐水泥熟料，所以其基本特征与硅酸盐水泥相近。但由于普通硅酸盐水泥中掺入了少量混合材料，故其某些特性与硅酸盐水泥比较起来，又有差异。与同标号水泥相比，普通水泥的早期硬化速度稍慢，其3天、7天的抗压强度较硅酸盐水泥稍低。同时，普通水泥的抗冻、耐磨等性能也较硅酸盐水泥稍差。

矿渣硅酸盐水泥。矿渣硅酸盐水泥是由硅酸盐水泥熟料和粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料。矿渣水泥与普通水泥相比，它具有较强的抗溶出性侵蚀及抗硫酸盐侵蚀能力，所以矿渣水泥比较适用于溶出性或硫酸盐侵蚀的水工建筑工程、海港工程及地下工程。但是，矿渣水泥在酸性水（包括碳酸）及含镁盐的水中，矿渣水泥的抗侵蚀性能却较硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥差；水化热低，适宜于大体积工程；保水性较差、浸水性较大，这样矿渣水泥很容易在混凝土内形成毛细管道路及水囊，当水分蒸发后，便形成孔隙，降低混凝土的密实性和均匀性；干缩性较大，干缩是一种不良的性质，它将使混凝土产生干缩，使混凝土产生很多细微的裂缝，从而影响混凝土的密实性和均匀性，所以在使用矿渣水泥时要加强养护。

火山灰质硅酸盐水泥。火山灰质硅酸盐水泥是由硅酸盐水泥熟料和火山灰质混凝土，适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料。火山灰水泥的许多性质，如抗侵蚀性、水化时的发热量、强度以及增进率、环境温度对凝结硬化的影响、碳化速度等，都与矿渣水泥有相同的特点。但火山灰水泥的抗冻性及耐磨性比矿渣水泥要差。

根据这些性质可知，最适宜用于地下或水下工程，特别是需要抗渗、抗淡水或抗硫酸盐侵蚀工程更具有优越性，由于抗冻性较差，不宜用于受冻部位。

粉煤灰水泥。粉煤灰水泥抗硫酸盐侵蚀能力较强，但次于矿渣水泥，适用于水工和海港工程。粉煤灰水泥抗碳化能力差，抗冻性较差。

(3) 石灰 石灰是一种气硬性无机胶凝材料，它是以碳酸钙为主要成分的天然岩石在适当高温下煅烧得到以氧化钙 (CaO) 为主要成分的生石灰。石灰在使用前，一般先加水，使之消解为熟石灰，其主要成分为氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)。在建造沼气池的工程中，熟石灰被掺入水泥砂浆里配制成混合砂浆，用作砌筑砂浆和密封砂浆。

(4) 块石 将天然岩石用机械方法或人工方法进行加工，或不经加工而获得的各种块状石料就是块石。在山区或者盛产石材的地区建造沼气池，可以用块石砌筑发酵间和出料间。用于建造沼气池的石料多选用组织紧密、均匀、无裂缝、无风化的砂岩或石灰岩，因为这样的岩石容易加工。需要指出的是，建造沼气池的石材要求有耐水性。材料的耐水性是指材料在水的作用下不会损坏，其强度也不会显著降低的性质。建筑材料的耐水性用软化系数表示。软化系数是材料在水饱和状态下的抗压强度和材料在干燥状态下的抗压强度的比值。用于建沼气池的石材其耐水性应取 0.85 ~ 0.90。

(5) 混凝土 混凝土是以水泥为胶凝材料，与水和骨料（包括砂和石）按适当比例配合拌制成混合物，再经浇筑成型后得到的人工石材。新拌和的混凝土通常称为混凝土拌和物。对于新拌和的混凝土要求具有一定的和易性（包括流动性、黏聚性和保水性 3 方面的含义），这样便于施工操作并获得质量均匀、密实的混凝土。

3.2.6 土方工程

《农村家用水压式沼气池施工操作规程》（GB 4752—84）适用

于《农村家用水压式沼气池标准图集》（GB 4750—84）施工的沼气工程。

3.2.6.1 池坑开挖 沼气池池坑开挖时，首先要按照设计池身尺寸放线，放线尺寸为：池身外包尺寸 + 2 倍池身外填土层厚度（或操作现场尺寸）+ 2 倍放坡尺寸。

池址在无地下水、土壤具有天然湿度、池坑开挖深度小于表 3-1 所规定的允许值，或有地下水、池坑开挖深度小于表 3-1 的允许值时，可按直壁开挖池坑。

表 3-1 直壁开挖的最大允许高度

土 壤 类 型	直壁开挖的最大允许高度/ 米	
	无地下水,土壤具有天然湿度	有地下水
在堆填的砂土和砂石土内	1.00	0.60
在亚砂土和亚黏土内	1.25	0.75
在黏土内	1.50	0.95
在特别密实的土层内	2.00	1.20

当土壤具有天然湿度，土质构造均匀，水文地质良好，无地下水，池坑开挖深度小于 5 米，或者当沼气池建在有地下水、池坑开挖深度小于 3 米时，边坡的最大允许坡度应符合表 3-2 的规定。

表 3-2 边坡坡度

土 壤 名 称	边 坡 坡 度		
	人工挖土并将土抛 在沟槽的上边	机 械 挖 方	
		在 沟 槽 或 者 沟 底 挖 土	在 沟 槽 或 沟 上 边 挖 土
砂土	1 1	1 0.75	1 1
亚砂土	1 0.67	1 0.50	1 0.75
亚黏土	1 0.50	1 0.33	1 0.75
黏土	1 0.33	1 0.25	1 0.67
含砾石、卵石土	1 0.67	1 0.50	1 0.75
泥炭岩、白垩土	1 0.33	1 0.25	1 0.65

3.2.6.2 池坑开挖放线 进行直壁开挖的池坑，为了省工、省料，

应利用池坑土壁做胎模。

圆筒形池，上圈梁以上部位按放坡开挖的池坑放线，圈梁以下部位按模具成型的要求放线。

球形池和椭球形池的上半球，一般按直径放大 1 米放线，下半球按池形的几何尺寸放线。

砌块沼气池池坑，按 GB 4750—84 的几何尺寸，加上背夯回填土 15 厘米宽度进行放线；土壤好时，将砌块紧贴坑壁原浆砌筑不留背夯位置。

池坑放线时，先定好中心桩和标高基准桩。中心桩和标高基准桩必须牢固不变位。

3.2.6.3 池坑开挖要求 池坑开挖应按照放线尺寸，开挖池坑不得扰动土胎模，不准在坑沿堆放重物和弃土。如遇到地下水，应采取引水沟和集水井等排水措施，及时将积水排除，引离施工现场；做到快挖快建，避免暴雨侵袭。

3.2.6.4 特殊地基处理

淤泥。淤泥地基开挖后，应先用大块石压实，再用炉渣或碎石填平，然后浇筑 1 : 5.5 水泥砂浆一层。

流砂。流砂地基开挖后，池坑底标高不得低于地下水位 0.5 米。若深度大于地下水位 0.5 米，必须采取池坑外降低地下水位的技术措施，或迁址避开。

膨胀土或湿陷性黄土。应更换好土或采取排水、防水措施。

3.2.7 施工工艺及操作要点

以下对 3 种施工工艺的操作要点作一介绍。

3.2.7.1 整体现浇混凝土沼气池的施工

(1) 抽槽土胎模浇注法 按 GB 4750—84 的尺寸放线抽槽取土。先挖水压间池墙沟土，并修整好表面。浇注水压间池墙混凝土。待混凝土强度达到设计强度 70% 后，取水压间中心土，同时挖取发酵间池墙土槽，修整池盖土胎模，刷上隔离剂，并将进、出料管沟槽挖通。待进、出料管安装就位后，一次浇注池墙、圈梁和池盖混凝土。当混凝土强度达到设计强度的 70% 后，由活动盖口

取出池芯土，然后浇捣池底和水压间底板混凝土。再做内密封层的施工。

(2) 大开挖支模浇注法 按照 GB 4750—84 的尺寸，挖掉全池土方。池墙外模，利用原状土壁；池墙和池盖内模可用钢模、木模、砖模等。支模后浇注混凝土，一次成型。混凝土浇捣要连续、均匀对称、振捣密实、浇捣程序由下而上。池盖顶面原浆压实抹光。

支模

外模：圆筒形沼气池的池底、池墙和球形、椭球形沼气池下半球的外模，对于适合直壁开挖的池坑，利用池坑壁作外模；土胎模的成型应由小变大，逐步修整。并将土模表面刮平，或粉一层好土，保持湿润。

内模：圆筒形沼气池的池墙、池盖和球形、椭球形沼气池的上半球内模，可采用钢模、木模或砖模。砌筑砖模时，砖块必须浇水湿润，保持内潮外干，砌筑灰缝不漏浆。

混凝土的材料要求。混凝土是由水泥、水、砂、石按照一定比例混合，经过搅拌、浇筑成型、凝固硬化形成的人造石材。混凝土的强度和密实度与所用材料以及拌制和浇筑都有很大关系。对于农村户用沼气池用的混凝土，根据其工程特点，对其材料的要求如下。

水泥：优先选用硅酸盐水泥，也可以用矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥。水泥标号选用 325 号。其强度和安定性指标要符合 GB 175—77《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》、GB 1344—77《矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥与粉煤灰硅酸盐水泥》标准。结块水泥不准使用。

砂：宜采用中砂，要求不含有机杂物，水洗后含泥量不大于 3%；云母含量小于 0.5%。

石子：采用粒径 0.5 ~ 2.0 厘米碎石或卵石，级配合理，孔隙率不大于 45%；针状、片状小于 15%；压碎指标小于 10% ~ 20%；泥土杂质含量用水冲选后小于 2%；石子强度大于混凝土标

号 1.5 倍。

水：选择饮用水。

混凝土的拌制 配合比：拌制混凝土采用施工配合比。当采用理论配合比时，必须将混凝土的标号提高 15%。配合比中的水灰比一般控制在 0.65 ~ 0.55。圈梁混凝土的水灰比应尽量控制在 0.55 ~ 0.50，可加入 0.2% ~ 0.6% 水泥质量的塑化剂改善其和易性。人工拌制时，每立方米混凝土的水泥用量不少于 275 千克。

混凝土坍落度：新拌制混凝土的坍落度应控制在 4 ~ 7 厘米。

用量误差：拌制混凝土时，称料应准确。石子的称重允许误差 $\pm 2\%$ ；沙子的称重允许误差 $\pm 3\%$ 。

混凝土的浇捣。浇捣混凝土前，应清除杂物，将模板浇水湿润。

混凝土浇捣采用螺旋式上升的程序一次浇捣成型。要求浇捣密实，无蜂窝麻面。

养护。要求在平均气温大于 5 的条件下进行自然养护。外露的现浇混凝土应加盖草帘浇水养护：硅酸盐水泥拌制的混凝土，应在浇捣完毕 12 小时后连续潮湿养护 7 昼夜以上；矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥拌制的混凝土，应在浇捣完毕 20 小时后连续潮湿养护 14 昼夜以上；混凝土施工中掺入塑化剂时，连续养护时间不得少于 14 昼夜。

拆模。拆侧模时混凝土的强度应不低于混凝土设计标号的 40%；拆承重模时混凝土的强度应不低于混凝土设计标号的 70%。

回填土。回填土应以好土对称均匀回填，分层夯实。而拱盖上的回填土，必须待混凝土达到 70% 的设计强度后进行，避免局部冲击荷载。

3.2.7.2 砌块沼气池的施工

(1) 砌块沼气池所用材料要求 砌块沼气池所用材料要求除应符合 GB 4750—84 的技术要求外，还应满足下列要求。

砖。标号 75 号以上。外形规则无裂缝翘曲，声音清脆，质量均匀，无过火、无欠火，不含易爆裂物质。

块石。经加工成 9 厘米厚、外形规则的石块，强度大于 300 号，软化系数大于或等于 0.7。

制块。混凝土预制块强度大于 150 号，尺寸准确，外形规则，无缺棱少角。

砌筑砂浆。采用 50 ~ 75 号水泥砂浆。

(2) 池底施工 将池基原土夯实，铺设卵石垫层，浇捣 15.5 的水泥砂浆，再浇池底混凝土，振实压光，抹成池底曲面形状。

(3) 池墙砌筑 采用“活动轮杆法”砌筑圆筒形沼气池池墙。砌筑中应注意以下几点。

砌块先浸水，保持面干内湿。

砌块砌筑应横平竖直，内口顶紧，外口嵌牢，砂浆饱满，竖缝错开。

注意浇水养护砌体，避免灰缝脱水。

若无条件紧贴坑壁砌筑时，池墙外围回填土必须回填密实。回填土含水量控制在 20% ~ 25% 之间，可掺入 30% 的碎石、石灰渣或碎砖瓦块等；对称、均匀回填夯实。边砌筑边回填。

(4) 进、出料管施工 进、出料管与水压间的施工及回填土，应与主池在同一标高处同时进行，进、出料管插入池墙部位按 GB 4750—84 用混凝土加强。

(5) 圈梁施工 在砌好的池墙上端，做好砂浆找平层，然后支模。当采用工具式弧形木模时，应分段移动浇灌低塑性混凝土，捣实抹光。

(6) 池盖砌筑 待圈梁混凝土达到 70% 强度后，方可砌筑池盖。采用“无模悬砌卷拱法”施工。

3.2.7.3 组合式沼气池的施工 比较常见的组合式沼气池是池墙砖模现浇和池拱砌块，这种施工方法在土质较好的地区，具有省工、省料、省模板、施工方便、质量好的优点。在组合式沼气池的

具体施工中，需要注意以下几点。

按设计图尺寸，沼气池直径放大 24 厘米（池壁浇灌混凝土厚度为 12 厘米）大开挖土，池壁要求挖直、挖圆。

画好池墙内圆线，依线砌砖模墙；每砌 20 厘米高砖模墙后，贴上油毡或塑料膜（作隔离膜），浇灌一次混凝土，分层浇灌、分层捣固。捣固要密实，不留施工缝。砖模的坐浆，用黏性黄泥浆较好，便于脱膜。

池墙与池拱的交接处，做 12 厘米宽、12 厘米高的混凝土圈梁，以利于加固池拱。

池拱，用标砖采用“无模悬砌卷拱法”施工。

3.2.8 密封层施工

采用“三灰四浆工作法”施工。

(1) 砌块沼气池密封层的施工

基层用水灰比为 0.4 的纯水泥浆均匀涂刷 1~2 遍。

底层抹灰，用 1:3 水泥砂浆抹底灰层 5 毫米厚，初凝前反复压实 2~3 遍。

刷纯水泥浆 1 遍，要求同 。

中层抹灰，抹 1:2.5 水泥砂浆，厚 5 毫米，做法同 。

刷纯水泥浆 1 遍，要求同 。

面层抹灰，抹 1:2.5 水泥砂浆，厚 5 毫米，反复压实抹光，要求表面有光度、不翻砂、无裂纹。

刷纯水泥素浆 2~3 遍，要求同 。

(2) 现浇混凝土沼气池密封层的施工 要求与砌块沼气池密封层施工方法相同，只是减去中层抹灰层。

(3) 密封涂料层施工 密封涂料层施工除采用“三灰四浆工作法”外，还可在面层抹灰后另做密封涂料层。

硅酸钠密封涂料。按层次顺序为水泥净浆、硅酸钠液交替涂刷 3~5 遍。要求涂刷均匀，不漏涂、不脱落、不起壳。

石蜡热熔密封涂料。要求涂刷部位内壁表面烘干，再将熔化后的石蜡液，多层、均匀的交叉涂刷，并用喷灯烘烤，促使石蜡

熔液能渗入抹灰层毛细孔内部，起到填充密封作用。

为了提高沼气池贮气室的密封性能，可采用“夹层水密封”技术。

3.2.9 质量检查验收

按《农村家用水压式沼气池质量检查验收标准》(GB 4751—84)进行检查验收。凡符合要求，可交付用户投料使用。

3.3 农村家用沼气池工程启动运行方法

沼气池的启动是指新建成的沼气池或者已经大出料的沼气池，从向沼气池内投入原料和接种物起，到沼气池能够正常稳定产生沼气为止的这个过程。

我国农村家用沼气池，普遍采用半连续沼气发酵工艺，它的启动可以按照下面的步骤逐步展开。

3.3.1 准备充足的发酵原料

沼气池的启动的首要条件就是准备充足的原料。在自然界中，可以作为沼气发酵的原料十分广泛和丰富，几乎所有的有机物都可以作为沼气发酵原料，例如农作物秸秆，人、畜和家禽的粪便，生活污水，工业和生活有机废物等。而我国农村家用沼气工程常用的原料主要有两大类，即富氮原料和富碳原料。

我国农村家用沼气工程中的富氮原料主要是指人、畜和家禽粪便。这类原料颗粒较细，含有较多的易分解化合物，氮素的含量也较高，其原料的碳氮比（含碳量与含氮量的比，用 C/N 表示）一般都小于 25/1，因此不必进行预处理，分解和产气速度较快。这种原料是我国农村沼气发酵原料的主要来源之一。该原料的特点是发酵周期较短，产气速度快。

我国农村家用沼气工程中的富碳原料主要指各种农作物秸秆。其碳素含量较高，原料的碳氮比一般都在 30/1 以上。与人、畜粪便一样，农作物秸秆也是我国农村主要沼气发酵原料之一。农作物秸秆通常是由木质素、纤维素、半纤维素、果胶和蜡质等化合物组成，其产气特点是分解速度较慢，产气周期较长。使用这种原料在

入池前需进行预处理，以提高产气效果。

3.3.2 发酵原料的配比

我国农村沼气发酵的一个明显特点就是采用混合原料（一般为农作物秸秆和人畜粪便）入池发酵。因此，根据农村沼气原料的来源、数量和种类，采用科学适用的配料方法是很重要的。配料、原料在入池前，应按下列要求配料。

浓度。在沼气发酵中保持适宜的发酵料液浓度，对于提高产气量，维持产气高峰是十分重要的。发酵料液浓度是指原料的总固体（或干物质）质量占发酵料液质量的百分比。发酵原料的浓度，南方各省夏天以 6% 为宜，冬天以 10% 为宜；北方地区，沼气最佳发酵时间一般在 5~10 月，浓度为 6%~11%。不同季节投料量不同，初始浓度低些有利于启动，早产气、早用气、早用肥。按 6% 的浓度，每立方米池容需投入鲜人粪、鲜畜粪 300~350 千克，水（包括接种物）650~700 千克；按 8% 的浓度，每立方米池容需投入鲜人粪、鲜畜粪约 430~470 千克，加水 530~570 千克，其中接种物占 20%~30%。

碳氮比值。正常的沼气发酵要求一定的原料碳氮比。因此，在原料配比中，应考虑有适当的碳氮比，沼气发酵比较适宜的碳氮比值是 $(20 \sim 30) : 1$ 。常用动物粪便与秸秆发酵原料配比参考表 2-10。

3.3.3 拌料接种

接种物亦称菌种，主要是产甲烷的微生物。在沼气发酵池启动运行时要加足够的接种物才能正常产气。

在各种有机物厌氧消化的地方都可以采集接种物。例如下水道污泥和屠宰场、肉食品加工厂、豆腐坊、酒厂、糖厂等地的阴沟污泥，湖泊、塘堰沉积污泥，正常发酵的沼气池底脚污泥或发酵料液，以及陈年老粪坑底部粪便等，均含有大量沼气微生物，都可以采集为接种物。有条件的地方，最好能对所选取的接种物进行富集、驯化和扩大培养。这样既可以使不同区系的沼气微生物个体得到增殖，又可以使大量接种微生物群体适应入池后的新

环境。

接种物的数量，以相当于发酵原料 10% ~ 30% 为宜。

3.3.4 投料

新池或大换料的沼气池，经过一段时间养护，试压后确定不漏气不漏水，即可投料。将准备好的粪类原料、接种物和水按比例拌和均匀投入池内，并且入池后原料要搅拌均匀。

3.3.5 加水封池

池内堆沤过程中，由于好氧和兼氧微生物的作用，发酵料液的温度不断上升。当池内发酵原料温度上升到 40 ~ 60 °C 时（春夏 1 ~ 2 天，秋冬 3 ~ 5 天）加水（注意总加水量应扣除拌料时加入的水量）。加水完毕，可用 pH 广泛试纸检查发酵料液的酸碱度，一般 pH 值在 6 以上时可封池；如果 pH 值低于 6，可加上适量草木灰、氨水或澄清石灰水调整到 7 左右，再封池。封池后，应及时将输气管开关和灯、炉具安装好，并关闭输气管上的开关。

3.3.6 放气点火

沼气池封盖以后开始几天所产的气主要是二氧化碳，甲烷含量较少，再加上池内原来有很多空气，所以开始放出来的气体难以燃烧，要排放数次废气才能试火。当沼气压力表上的压力读数达到 4 千帕（400 毫米水柱）时，应放气试火。放气 2 ~ 3 次后，由于产甲烷菌数量的增长，所产气体中甲烷含量逐渐增加，所产生的沼气即可点燃使用。这里应特别注意，试火一定在灶具上进行，不能在沼气池导气管上直接试火，以防回火引起沼气池内爆炸。

3.3.7 启动后进入正常运转

当每天的产气量基本稳定后，并且炉具火焰稳定不灭时，表明发酵启动阶段已经完成，这时沼气发酵进入正常运转时期。

3.4 农村家用沼气池工程日常管理与安全管理

3.4.1 日常管理

沼气池正常启动后，直到大出料停止运转，这段时间为沼气池

发酵运转阶段。运转是否正常，和沼气池工程的日常管理工作密切相关。沼气池工程管理的好坏将直接影响到沼气质量和产量。“三分建池七分管理”就是说明管理的重要性。为了保证沼气池产气正常，在日常管理中应从以下各方面着手。

3.4.1.1 进出料要经常化 进出料经常化，这样做的目的主要是满足沼气菌生活所必需的原料，以利于沼气菌的新陈代谢。进出料的原则是：先出料后进料，进出料体积大致相同。对于正常运转的沼气池，切忌只进料不出料，否则当料液过满时用气，发酵液就会进入导气管导致导气管堵塞。此外，在添加新料时，切忌加大用水量，以免降低发酵浓度，影响产气效果。

对于三结合沼气池，从启动开始便可以陆续向池内进料。但是应对每天进料量作一估计，当累计进料量达到池容积的 85% ~ 90% 时，开始出料。若进料量不足，则应补加铡短的作物秸秆以及其他发酵原料。

对于非三结合的沼气池，启动运行约一个月左右，当产气量明显下降时，应及时添加新料。要求每 5 ~ 6 天加料一次，每次加料量占发酵液量的 3% ~ 5%。在此量范围内，冬季宜多、宜干（可以 8 ~ 9 天加料一次）。加秸秆应先用粪水或水压间的料液预湿、堆沤。

3.4.1.2 搅拌要经常化 农村家用沼气池，一般都未安装搅拌装置，发酵原料在静止状态下分为 3 层，从上到下依次是浮渣层、发酵液层和发酵沉渣层。浮渣层，发酵原料较多，沼气菌却很少，原料不能充分利用，而且浮渣层过厚，还会影响沼气进入气箱。发酵液层，发酵原料少，水分多，沼气菌也很少。发酵沉渣层，发酵原料多，沼气菌也多，这是产生沼气的重要部位。由于这 3 个层次的存在，要经常搅拌沼气池内的料液，搅拌有利于打破浮渣层结壳和搅动沉渣，可以使新鲜原料与发酵微生物充分接触，避免沼气池产生短路和死角，提高原料利用率和产气率，大约可提高产气 10% 以上。搅拌的方法可用长把物器从进料管伸入沼气池内来回拉动；也可从出料间舀出一部分粪液，倒入进料口，以冲动发酵料液；搅

拌每 3~5 天进行一次，每次搅拌 3~5 分钟。

3.4.1.3 经常检测 pH 值 pH 值是酸碱度大小的表示单位。沼气微生物最适宜的 pH 值范围是 6.8~7.5。需要指出的是这里的 pH 值指的是消化器内料液的 pH 值，不是发酵原料的 pH 值。当沼气原料的 pH 值小于 6 或者 pH 值大于 8 时，沼气发酵就会受到抑制，甚至停止产气，所以要经常检测 pH 值。配料不当，突然更换添加原料，可能导致发酵液过酸，造成产气量下降或气体中甲烷含量减少。在农村检查 pH 值一般可用广泛试纸浸泡在发酵液中（1 分钟左右）与标准试纸颜色对照后，如发现 pH 值小于 7（即试纸呈土黄色、橙色），说明发酵液呈酸性，应加入适量草木灰、氨水或澄清石灰水调节 pH 值至正常范围（6~8）；若广泛试纸显示橘红色，则表明发酵料液呈强酸性，应将大部分或全部料液取出，重新接种，投料启动。

3.4.1.4 保温 沼气微生物是在一定的温度范围进行代谢活动的，在 8~65 范围内，温度越高，产气速度越快。我国的农村家用沼气池建于地下，受地温影响较大。对于我国北方地区，冬季气温较低，沼气池内温度随之较低，如果低于 10℃ 以下将不能正常产气，所以就必须采取保温和增温措施，保证沼气池正常运行。农村家用水压式沼气池的越冬管理，主要是搞好增温保温，防止池体冻坏，并使发酵维持在较好水平，达到较高产气率。越冬管理的时期为寒露到春分。这是因为从寒露开始，气温低于地温，沼气池由吸热变为放热，池温下降速度加快，因此应提早采取保温措施。这里介绍 4 种行之有效的办法。

添加增温剂。在冬季要保持沼气池产气足，可添加豆腐水、人尿、谷酒糟等增温。如用谷酒糟增温方法是：每隔 10 天向池内加料一次，每次 50 千克左右，连续加 4 次后，可保持池内越冬产气充足。

池外保温。可用锯木屑和泥或用切碎的稻草和泥，夯实在挖好的沼气池周围的环形沟内进行隔温。但最好是先在沼气池上半球部的外表面，涂一层隔湿的沥青，这样可防池内热量散失，也可

阻挡外面冷空气侵入，取得良好的保温作用。再在池子上面严密地盖上一层厚厚的稻草，或搭个塑料棚，效果会更好。

要调节发酵浓度。沼气发酵的最适发酵浓度，应随季节的不同而变化，夏季发酵浓度以 6% ~ 7% 为宜，冬天发酵浓度以 10% ~ 12% 为好，因此，冬季的用料要适当增加。在寒露前后，选择晴天进行出料和进料，浓度要达到 10% ~ 15%；等到了冬季还要及时补料，浓度要提高到 15% ~ 20% 左右，使冬季沼气池在高浓度下运转。

搅拌池料提高产气量。在不搅拌的情况下，沼气池内明显地分为浮壳、清液、沉积和污泥 4 层，在发酵温度相同的情况下，进行搅拌后，总产气量可提高 15% ~ 35%，在冬季更应注意在晴天定期搅拌。

3.4.1.5 添加促进剂，提高产气量 促进剂在沼气发酵中有 3 个方面作用：改善沼气微生物的营养状况，满足其营养需要；为发酵微生物提供促进生长繁殖的微量元素；改善和稳定产甲烷菌的生活环境，加速新陈代谢。促进剂用量小，效果大。但使用中应注意：有些促进剂具有两重性，当添加量小或适量时，对沼气发酵有促进作用；如果用量过大，超过了一定的限度时，则会对发酵产生副作用，变为抑制剂。所以正确使用促进剂是很重要的。下面介绍几种促进剂的用量及作用。

纤维素酶：进料时添加，可加速有机质分解，提高产气量。

尿素：添加到牛粪消化器内，可提高产气速度和产气量。

碳酸钙：可提高牛粪消化器的产气量和甲烷的含量。

黑曲霉：添加到污泥消化器内，可提高甲烷的含量。

加稀土元素：一般用量每立方米料液加 5 克，投入沼气池内，可提高产气量 17%（体积分数）。

钾、钙、钠、镁都能对沼气发酵起刺激作用。添加浓度是：钠为 100 ~ 200 毫克/升；钾为 200 ~ 400 毫克/升；钙为 100 ~ 200 毫克/升；镁为 75 ~ 150 毫克/升。

甲醇和醋酸钠添加 0.25% ~ 0.5% 的甲醇和 0.25% ~ 0.5%

的醋酸钠可较大地提高沼气产量。

硫酸锌添加量为 0.005% 时，沼气产量提高 3%；添加量为 0.01% 时，沼气产量提高 40.2%；添加量为 0.02% 时，沼气产量提高 21%。

碳酸氢铵用量为料液的 0.1% ~ 0.3%，即 1 立方米料液加 1 ~ 3 千克，溶解于水后倒入沼气池并搅动，可提高产气量 30% 左右。

旧电池中含有碳、锰、锌、铵等，一个 8 立方米的沼气池，用 17 节电池，剖开砸碎后拌入发酵原料中投入沼气池 3 天即可增加产气量。

1 加煤粉，煤除含大量的碳、氢、氮外，还含有一些微量元素。在沼气池中加入少量的煤粉，可改善微生物的生活环境，是促进酶活性的诱导剂，可加速有机物分解，提高产气量。

总之，加入促进剂对提高沼气产量可起一定作用，但大部分促进剂不是发酵原料，它们只能起辅助作用，长期靠它们来增加产气量是不对的，根本保证在于投入充足的发酵原料。

3.4.2 安全管理

沼气的主要成分是甲烷、二氧化碳和少量的氮气、硫化氢气体等。甲烷是无色、无味、无毒的气体，遇明火即燃烧。沼气中的有毒气体主要是硫化氢。硫化氢是一种无色气体，有臭鸡蛋气味，燃烧时火焰呈蓝色，易溶于水，当浓度超过 0.02% 时，可引起头痛、乏力、失明、胃肠病等。所以对于沼气的使用必须进行安全管理，需要注意的事项如下。

刚消过毒的禽畜粪便、肥皂水、洗衣粉水不能进入沼气池，以防沼气池的细菌受到破坏。

沼气池的出料口要加盖，防止人、畜掉进池内造成死亡。

经常检查输气系统，防止漏气着火。

要教育小孩不要在沼气池边和输气管道上玩火，不要随便扭动开关。

沼气池一旦进料后，不要轻易下池出料或检修，若下池检

修一定要做好安全防护措施。一是打开活动盖透风；二是把小鸡等动物吊入池内，待 15 分钟后，观察小动物是否正常，否则严禁下池。

要经常观察压力表中压力值的变化。当沼气池产气旺盛、池内压力过大时，要立即用气和放气，以防胀坏气箱，冲开池盖，压力表充水。如池盖一旦被冲开，要立即熄灭沼气池附近的明火，以免引起火灾。

加料或污水入池，如数量较大，应打开开关，慢慢地加入。一次出料较多，压力表压力读数下降到零时，打开开关，以免产生负压过大而损坏沼气池。

沼气灯、灶具和输出管路，不能靠近柴等易燃物品，以防失火，一旦发生火灾应立即关闭开关，切断气源。

注意防寒防冻。

(岳建芝 张国强)

主要参考文献

- 1 周孟津，张荣林等主编．沼气实用技术．北京：化学工业出版社，2004
- 2 周孟津主编．沼气生产利用技术．北京：中国农业大学出版社，1999
- 3 万仁新主编．生物质能工程．北京：中国农业出版社，1992
- 4 刘英主编．农村沼气实用新技术．成都：2002
- 5 李长生主编．农家沼气实用技术．北京：金盾出版社，1999
- 6 吴相金主编．农村能源．北京：中国农业出版社，1986
- 7 农业部沼气产品及设备质量监督检验测试中心主编．沼气技术标准汇编．成都：2003

第 4 章 沼液加工利用技术

4.1 沼液主要组成和特性

沼液是人、畜粪便及农作物秸秆等各种有机物经厌氧发酵后的残余物，是一种优质的有机物。各种有机物在密闭的沼气池内，经过多种微生物分泌的酶的作用而产生沼气的过程叫“厌氧发酵”。厌氧发酵过程实际上就是一个十分复杂的微生物的生物化学过程。厌氧发酵可分为 3 个阶段。液化阶段，有不产甲烷的微生物分泌的胞外酶对有机物进行体外分解。结果把固体有机物转化成可溶于水的物质。产酸阶段，即上述有机物转化为可溶于水的物质后进入微生物细胞，在胞内酶的作用下，将液化产物变成小分子化合物，如低级脂肪酸、醇、酮、醛等。实际上前两个阶段是连续的，统称不产甲烷阶段。产甲烷阶段，即在产甲烷细菌大量活动下，铵态氮浓度增高，氧化还原势降低，产甲烷细菌大量繁殖，其分泌的酶将上述阶段分解出来的有机物转化成甲烷和二氧化碳等物质。整个厌氧发酵过程中碳水化合物（纤维素、半纤维素、淀粉、多糖等）降解，木质素也降解成腐殖质，蛋白质水解成多肽和氨基酸，并继续分解成硫醇、胺、苯酚、硫化氢及氨。

厌氧微生物生物降解比好氧微生物生物降解产生的污泥量少，不用补充氧，无需消耗电能，并且能够产生沼气这种清洁能源，厌氧发酵在国际上越来越受到人们的重视。目前厌氧发酵技术在废水以及固体废弃物的生物处理方面已有很多应用，并已开发出各类相应的性能优良的发酵工艺和设备。国外已经设计出高效厌氧发酵装置，例如 UASB、ASBR 等可以用来处理猪场废水。但是厌氧生物降解没有好氧生物降解彻底，畜禽粪便经过厌氧发

酵以后，所得废液和废渣的营养物质的含量较高。在厌氧发酵环境下，除最终产出甲烷、二氧化碳等气体和微生物自身吸收的一部分蛋白质外，大部分物质留在发酵残留物中而且还产生许多衍生物。厌氧发酵过程中的多菌群共生作用使得厌氧发酵液成分复杂，含有多种生物活性物质，而且营养丰富。其发酵代谢产物可分为两大类。第一类是沼气，它产生后自动与料液分离，并从料液中逸出进入沼气管。第二类是保存在料液中的物质（厌氧发酵液）。这些物质可分为3种。第一种物质是营养物，由发酵原料中作物难以吸收的大分子物质被微生物分解而形成。由于其结构简单，可被作物直接吸收，向作物提供氮、磷、钾等主要营养元素。第二种物质也是原本存在于料液中的，只是通过发酵变成离子形式罢了。它们的浓度不高，在农家肥的厌氧发酵液中含量最高的是钙（0.02%），其次是磷（0.01%），还有钾、铁、铜、锌、锰、钼等微量元素，它们可以渗进种子细胞内，能够刺激发芽和生长，也是牲畜所必需的。第三种物质相当复杂，目前还没有完全弄清楚。已经测出的这类物质有氨基酸、生长素、赤霉素、纤维素酶、单糖、腐殖酸、不饱和脂肪酸、纤维素及某些抗生素类物质，可以把这些东西称为“生物活性物质”，它们对作物生长发育具有重要调控作用，参与了从种子萌发、植株长大、开花结果的整个过程。如赤霉素可以刺激种子提早发芽，提高发芽率，促进作物茎、叶快速生长；干旱时，某些核酸可增强作物抗旱能力；低温时，游离氨基酸、不饱和脂肪酸可使作物免受冻害；某些维生素可增强抗病能力，在作物生殖期，这些物质可诱发作物开花，防止落花、落果，提高坐果率等。其中主要的农化性质物质、氨基酸及矿物质含量分别如表4-1、表4-2、表4-3所示。

表 4-1 厌氧发酵液的主要农化性质物质

水分/ %	全氮/ %	全磷/ %	全钾/ %	pH	碱解氮 / × 10 ⁻⁶	速效氮 / × 10 ⁶	有效钾 / × 10 ⁻⁶	有效锌 / × 10 ⁻⁶
95.500	0.042	0.027	0.115	7.600	335.60	98200	895.70	0.400

表 4-2 厌氧发酵液的氨基酸含量 毫克/ 升

天冬氨酸	苏氨酸	谷氨酸	甘氨酸	丙氨酸	半胱氨酸	缬氨酸
12.30	5.42	14.01	8.07	6.56	26.79	12.70
异亮氨酸	亮氨酸	苯丙氨酸	赖氨酸	天冬酰胺 + 谷氨酰胺		色氨酸
7.16	1.24	12.03	7.65	356.03		7.10

表 4-3 厌氧发酵液矿物质含量 毫克/ 升

磷	镁	硫	硅	钾	钠	铁	锰	锌	氟	碘	硒
43.00	97.00	14.30	317.40	30.90	26.20	1.41	1.07	28.30	0.16	0.15	0.50
铜	铬	钡	锶	钼	钴	镍	钒	汞	铅	砷	镉
36.80	14.10	50.20	107.00	4.20	2.80	8.50	2.80	0.03	2.83	3.06	8.90

对厌氧发酵液离心后，用液相色谱/ 质谱联用仪测定，结合化学分析，对数据进行相对分子质量分析得到表 4-4 的结果。根据表 4-4 经过推断可知，在厌氧发酵液中可能存在下列有机成分：L(+)-抗坏血酸、吡哆乙酸、天冬氨酸、1-氯辛烷、苏氨酸、N, N-二甲基氰胺、谷氨酸、4-溴丁腈、甘氨酸、异亮氨酸、丙氨酸、半胱氨酸、缬氨酸、二氢香素、1,2,3,4-四氢萘酚、乙酸、丙酸、丁酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、天冬酰胺、2-乙酰苯丙咪喃、谷氨酰胺、色氨酸、苯甲醛、乙炔二羧酸、核糖醇、1-乙酰-1-环己烯、1,2-苯基二甲醇、4'-氯苯丙酮、2-氨基-5-溴苯甲酸、亚氨基二乙酸、3-溴-4,6-二硝基氟苯、8-苯氨基-1-苯磺酸铵盐、4-苯甲酰吡啶、茚、2-氨基-4-氯苯甲腈、2-溴-4-硝基丙烷、对二氯苄胺、1-苯基庚烷、2-噻吩乙酰氯、2-乙酰苯丙咪喃、2-(氯甲基) 丙基二氯硅烷、4-氯-2-甲硫基嘧啶等近百种组成。

表 4-4 液相色谱/ 质谱联用仪测定厌氧发酵液的组成成分

相对分子质量	成分/ 分子式	相对分子质量	成分/ 分子式
106	苯 甲 醛	184	2-氨基-4-氯苯甲腈
124	1-乙酰-1-环己烯	202	NCCH ₂ CH ₂ CH ₂ SiCH ₃
152	核 糖 醇	104	C ₆ H ₄ N

续表

相对分子质量	成分/ 分子式	相对分子质量	成分/ 分子式
94	C ₇ H ₁₀	132	[C ₆ H ₅ CH CH—CO] ₂ O
160	2-乙酰苯丙咪喃	364	B ₂ 核黄酸
119	苏氨酸	246	C ₈ H ₉ O ₈
132	C ₆ H ₅ CH CH—CHO	75	甘氨酸
190	亚氨基二乙酸	89	丙氨酸
105	丝氨酸	340	C ₆ H ₅ CHBrCH BrC ₆ H ₅
128	NCC H ₂ CH ₂ NHCH ₂ COOH	318	(C ₆ H ₅ C H ₂ O) ₂ C ₆ H ₃ CHO
133	天冬氨酸	406	C ₂₂ H ₂₆ ON ₅
144	NCC ₆ H ₄ NCO	384	C ₂₇ H ₄₁ O
85	H ₂ NNHCH ₂ CH ₂ CN	131	亮氨酸
160	C ₄ H ₇ COC ₆ H ₅	84	NCCCH ₂ CONH ₂
162	C ₄ H ₁₈	146	赖氨酸
232	双(苯基硫)甲烷	96	C ₇ H ₄
149	甲硫氨酸	142	C ₈ H ₁₆ N ₂
120	C ₇ H ₈ N	165	苯丙氨酸
104	C ₆ H ₄ N ₂	174	吡啶乙酸, 精氨酸
155	组氨酸	186	C ₉ H ₁₄ O ₄
148	C ₆ H ₅ CH CH—COOH	240	胱氨酸
112	C ₅ H ₄ O ₃	316	8-苯氨基-1-苯磺酸铵盐
336	Br ₂ C ₁₄ H ₈	250	Br ₂ C ₆ H ₃ NH ₂
264	3-溴-4, 6-二硝基氟苯	158	CH ₃ (CH ₂) ₉ OH
148	1-烯丙基-4-甲氧基苯	110	C ₇ H ₁₀ O
200	1-氨基-5-溴苯甲酸	176	C ₆ H ₄ O ₂
202	NCC H ₂ CH ₂ CH ₂ SiCH ₃	234	[C ₆ H ₅ CH CH—] ₂ C O
218	C ₄ H ₁₀ O ₄	238	CH ₃ (C ₆ H ₅) Si(OCOCH ₃) ₂
224	C ₁₆ H ₁₆ O	242	C ₆ H ₅ CO—OO—COC ₆ H ₅
274	(二氯碘)苯	244	CH ₃ (CH ₂) ₉ SO ₃ Na
299	Br ₂ C ₆ OClN	284	CH ₂ (CO ₂ CH ₂ C ₆ H ₅) ₂
92	C ₇ H ₈	256	C ₁₀ H ₄ O ₂ SN ₂
117	缬氨酸	240	胱氨酸
121	半胱氨酸	490	C ₂₀ H ₁₀ O ₅
114	乙炔二羧酸	262	C ₇ H ₇ OC ₁₄ N
138	1, 2-苯基二甲醇	268	C ₁₂ H ₉ O ₂ N ₂ SNa
168	4'-氯苯丙酮	115	脯氨酸

从厌氧发酵液的成分可以看出厌氧发酵液不仅含有氮、磷、钾

3 种基本营养元素，动植物所需氨基酸和微量元素，大量腐殖酸和维生素，还含有数十种防治作物病虫害的活性物质、植物生长激素、抗生素等，在工农业生产和生活中得到了很大程度的应用。

由于厌氧发酵的原料不同，其氨基酸等物质种类和数量也有很大差别。山东医学院的孟庆国等在 1996 年采用 GC-9A 气相色谱仪对 3 种不同原料鸡粪、猪粪及猪皮汤的厌氧发酵残留液中游离氨基酸进行测定。实验结果表明，鸡粪厌氧发酵残留液中游离氨基酸种类最多，且含量较其他两种残留液高，鸡粪残留液更适于作为饲料添加剂。1998 年他利用电感耦合等离子体发射光谱法又对北京郊区 15 个沼气池的厌氧发酵残留物中的微量元素进行了测定。ICP-AES 测试结果表明：厌氧发酵残留物中含有铁、铜、锰、锌、镍、铬、硒和钙等元素，这些元素是人体和动物都必需的，用厌氧发酵残留物作饲料添加剂，可以通过食物链进行良性循环。

很早以前人们就知道应用厌氧发酵后的残余物作为有机肥料肥田，把农业废弃物经过微生物的处理返回到农田中，符合生态规律。在大力发展生态农业的今天，厌氧发酵技术又重新得到关注。近年来随着厌氧发酵综合利用技术的提倡，发现厌氧发酵液不仅仅可以作为有机肥料，还具有抗病杀虫、防冻抗冻、作为饲料添加剂等多重功效。厌氧发酵液运用到农业生产，其意义要远远大于一般的有机肥料。总的来说厌氧发酵液是一种具有多种功能的宝贵资源。

4.2 沼液肥效及其增效技术

4.2.1 沼液肥效

近 10 年来，厌氧发酵液的综合功能不断被揭示和证明。厌氧发酵液的养分含量随投料的种类、比例和加水量不同而有很大的差异。一般以人、畜粪便为原料厌氧发酵，发酵后残余物无任何毒副作用。从厌氧发酵液的组成中可知它含有丰富的氮磷钾基本营养元素，而且都是以速效养分的形式存在，因此，其速效营养能力很强，养分可利用率高，是一种多元的速效复合肥，厌氧发酵液根外

施肥或叶面喷施其营养可迅速被果树和作物茎叶吸收，参与光合作用，从而增加产量，提高品质，同时增强抗病和防冻能力。

长期使用厌氧发酵液能促进土壤团粒结构的形成，增强土壤保水保肥能力，改善土壤理化特性，提高土温和土壤中有机质、全氮、全磷及有效磷等养分，同时减少污染，降低用肥成本。

用厌氧发酵液作基肥浇灌果树，结果大，色鲜，味道鲜美，甜味好。用其肥稻田，作物生长强壮，挺拔翠绿、分蘖多、苗高且根系粗壮发达、白根多，有效穗、穗粒数、结实率都有所提高。据四川农业科学院在水稻、玉米、棉花等作物上的试验表明：亩施厌氧发酵液 1500 ~ 2500 千克，可增产 9.0 % ~ 26.4 %，每 100 千克厌氧发酵液增产水稻 1.38 千克，玉米 2.0 千克，棉花 0.65 千克。

用厌氧发酵液作追肥，效果也很明显，追施厌氧发酵液的小麦亩产增产 20 千克，用厌氧发酵液泼浇的大白菜，较对照提前 5 ~ 7 天包心，增产 30 %。厌氧发酵液兑 1.5 倍的清水对红富士苹果进行喷施取得较好的效果，坐果率平均提高 14.4 %，单果重平均增加 58 %；总产量提高 14 %；果实可溶性固性物含量提高 2.8 %，果形端正，果实香甜。另外，厌氧发酵液与化肥配合施用，效果会更好。据山东省试验，厌氧发酵液与氮、磷化肥配施，小麦生长旺，分蘖多植株高，生育期的干物质也多，比对照增产 20.5 %，比与氮肥配施的增产 14.5 %，比与磷肥配施的增产 5.6 %。厌氧发酵液采用浸种、喷施等施肥方法可达到明显的增产效果，尤其对块茎、块根增幅可达 20 % ~ 40 %。

厌氧发酵液作为一种优良的有机肥料可以完全代替化学肥料，关于厌氧发酵液肥效性质的研究是比较丰富的，大量试验说明厌氧发酵液是一种优质、全效的有机肥料。

但有研究认为厌氧发酵液与化肥的合理配比，效果更好。用厌氧发酵液与化肥配比、施肥量、叶面喷施厌氧发酵液的浓度的不同组合对蔬菜产量性状指标、品质指标及植株生理活性指标的影响结果表明，施用厌氧发酵液可以有效地促进 3 项指标的提高，但是各项指标要求的施肥组合都不相同，因此在确定施肥条件的时候，既

要考虑产量，又要兼顾品质及植株生理活性。他在试验中把番茄产量性状指标加 70% 权重，品质指标加 20% 权重，植株生理活性指标加 10% 权重，则优选出的施肥条件为施用化肥-厌氧发酵液混合肥料，施用量为 3 水平（氮 = 8.388 克/米² 次、磷 = 7.368 克/米² 次、钾 = 16.368 克/米² 次），叶面喷施厌氧发酵液的浓度为 50%。因此，厌氧发酵液作为一种优良的有机肥料完全可以代替化学肥料，但他们同时认为厌氧发酵液与化肥在合理配比条件下混合使用时的效果更好。

湖北省农业科学院土壤肥料研究所对数百个沼气池的厌氧发酵液和沼渣样品进行统计分析，结果显示，不同样品中氮、磷、钾的含量差别较大，平均含量分别为 0.39%、0.37% 和 2.06%。这与一般无土厩肥相近似，但厌氧发酵液中的速效养分高于厩肥液或厩肥。比较厌氧发酵与堆沤两种方式对肥料质量的影响，发现厌氧发酵每消耗 1 千克干物质，就可比堆沤发酵多产 386.1 ~ 495.6 升沼气外，碳素的损失也比堆沤减少 8.3% ~ 22.8%，氮素损失减少 8.4% ~ 16.1%，厌氧发酵液中速效氮含量增加 1 ~ 3 倍，说明厌氧发酵方式保肥效果比较好。不同原料发酵的养分变化是不同的，猪、牛粪的氮磷钾的损失量最小，肥料的质量也较高，是厌氧发酵的理想原料。无论哪种原料经厌氧发酵以后，3 大营养元素有 90% 以上仍保留在厌氧发酵残留物中，而且有很大一部分已转化为速效态，是一种优质速效的有机肥料。

上海农科院土肥所对比厌氧发酵和堆沤腐熟两种方法处理有机原料，结果得出：经过 3 个月处理以后，好氧分解的氮的损耗可达 50% 左右，而厌氧发酵的回收率可高达 95% 以上，厌氧发酵液中总氮量一般可占沼肥总氮量的 20%，其中速效含量高。经过厌氧发酵后，速效磷是全磷的 10% ~ 20%，有机磷与无机磷的比值要比堆沤法高 1 ~ 3 倍，厌氧发酵液中磷含量为总全磷量的 10% 左右。从残渣残液的测定中发现，钾在固相和液相数据之间的分配几乎对等。沼肥中钾的回收率可达 90% 以上。

有人对厌氧发酵液有着极高的赞誉，称其为一种“广谱性的兼

具生物肥料和生物农药特性的厌氧微生物加工剂”，采用厌氧发酵时，不仅内含养分损失少而且还会转变成许多衍生物，例如核酸、激素、维生素等。因此，它的营养内涵已远远超过一般肥料概念中的氮、磷、钾等大量营养元素和硼、锰、铜、锌、钼等微量营养元素而达到较高增产的目的，厌氧发酵液对多种作物都有激发增产作用和不同的增产效果，以对块根、块茎类增产最显著，增幅可达 20% ~ 40%；对旱作物的肥效大于水稻，增幅达 15% ~ 25% 不等。

4.2.2 厌氧发酵液的增效技术

厌氧发酵后的固形物生产高效肥料已经成功，已经在上海和深圳的两个沼气工程中开发出了产品并进入市场，取得了很好的经济和社会环境效益。以厌氧发酵液为基质制造叶面喷施肥是有市场潜力的，目前已经研制出了“洞庭丰”，“绿霸”两种产品。“绿霸”是用发酵成熟的沼液经过筛、过沙层、过纤维层、去除颗粒较大的杂质，澄清后与相应的无机成分进行络合、混合、浓缩、净化成集作物生长发育所需各种营养物于一体的有机络合营养液。它能快速供给多种营养，绿色植物喷施绿霸生长发育健壮，增产 11.88% ~ 30.73%。氨基酸通过叶片上的气孔、外质连丝和质膜，快速参与蛋白质合成。B 族维生素，赤霉素类物质通过叶片进入体内，能促进氨基酸、嘧啶，嘌呤物质合成，加速植物生长。农作物喷施绿霸营养液，可增加产品蛋白质含量及其他光合作用产物，并减少常规使用量，降低农产品有害物质残留物。可以说绿霸是充分利用农村废弃物，提高资源利用效率，改善生态环境，促进物质良性循环的一种生态技术产品。另一些产品目前正在试验中。

河南农业大学农业部可再生能源重点实验室在 2003 年进行了以畜禽粪便为原料生产优质厌氧发酵液的生产工艺研究。试验发现厌氧发酵液中的营养成分和抗病虫害成分含量不同程度地受到发酵条件温度、原料浓度、接种量、搅拌速度和酸碱度的影响。原料浓度是影响厌氧发酵液中氨态氮含量最显著因素，当发酵时间为 5 天、温度为 30℃、原料浓度为 3.7% 时，发酵出的厌氧发酵液氨态

氮含量最大；发酵时间是影响厌氧发酵液中水溶磷含量的最重要的控制参数，其次为温度，当发酵时间为 4 天、温度为 55℃、原料浓度为 1.85% 时，发酵产出的厌氧发酵液中的水溶磷含量最高；如果综合考虑氨态氮和水溶磷含量，若两成分的权重分别定为 65% 和 35%，则在发酵时间 4 天、温度 55℃ 和原料浓度 3.7% 的发酵工艺条件下，生产出氨态氮和水溶磷含量相宜的优质厌氧发酵液，是一种发展前景很好的生态复合肥。

因此商品化生产厌氧发酵液可以完全或部分替代化肥和农药，为厌氧发酵技术带来经济效益，解决现代化农业生产的污染问题，符合生态农业可持续发展的要求，这也是发展生态农业的一个新思路。

4.2.3 注意事项

(1) 沼液的要求 正常运转使用两个月以上，并且正在产气（以能点亮沼气灯为准）的沼气池出料间内的腐熟沼液；出料间中倒进了生人粪尿、牲畜粪便及其他废弃物的沼液，起白色膜状的沼液不能用。发酵充分的沼液为无恶臭气味、深褐色明亮的液体，pH 为 7.5~8.0。根据不同目的采用纯沼液、稀释沼液进行喷施。

(2) 喷湿量 喷施量应根据作物品种、生长阶段、环境等不同因素决定，具体喷施程度：湿而不滴。

(3) 喷湿时间 喷施时间在早上 8:00~10:00 进行。不能在中午高温时进行，以防灼烧叶片；雨前不能喷施，否则雨水冲走不起作用。尽可能喷洒在叶片背面，有利作物快速吸收。

(4) 沼液的处理及喷施的时机 喷施用的沼液首先要用细纱过滤，除去固形物，避免堵塞喷雾器。喷洒工具是手动或自动均可。

果树喷施沼液要把握时机，一定要在采果后一周内，因为此时是树体急需养分水分供给的关键时机。要做到因树制宜，用量适当。凡土质较好，当年产量低，树势居中上的树，为保障安全越冬，喷施沼液的次数不宜多，冬季最多两次，采果后一周内一次，

12 月底一次，用量每棵树控制在 0.5 ~ 0.8 千克。反之，当年产量高，树势差，土质差的树可多喷，并加大用量。从采果后到来年二月可每隔 20 天喷一次，用量可视树生长情况，每棵用沼液 1 ~ 1.5 千克。果树共喷施 4 ~ 5 次，不但达到保养果树生理性能，还能增强果树的抗冻害能力。

(5) 山地果园滴灌施肥更要求合理布局 猪舍应建在果园纵向中线的较高地势处，位置低于自来水源，这样既可保证正常供水，又能最大限度地自流滴灌。要把沼气化粪池建在猪舍中央地下，使舍内地面倾向池子，以粪便、尿、冲洗水自流入池，做到雨、粪水严格分流，可收到保持卫生、增积肥料的双重效果。并且严把沼液过滤关。要把沼气化粪池建成中央沼气发酵池和外围环形沼液沉淀过滤槽及贮液池 3 部分。最好采用直管进料，便于粪、尿、水进入沼气发酵池发酵产气后，排入外环形槽。外环形槽容量应视发酵池的大小而定，以不大于发酵池容积的 $\frac{1}{4}$ 为宜。外环形槽内应设置插式塘屏，用于拦截杂物，滤出清液，以保持输配液通畅。塘屏可用粗细合适的镀锌管或硬塑管做成矩形屏框，框内套上滤板并将其绑紧于框架上。滤板可采用贝壳（粗滤料，厚度 5 ~ 10 厘米）或聚乙烯泡沫（细滤料，厚度 2 ~ 3 厘米）等材料制作板，表面网上细目尼龙网。沿着水流方向，应先插粗滤板，后插细滤板，滤板只数应以使试验色度变浅且澄清为准。

(6) 管道敷设技术要点

选材。整个系统应以使用塑料管为好。其主要优点是耐腐蚀、价廉又易于安装。主流管应选用 PVC 耐高压管，分流及次分流管要采用有弹性且有较好强度的塑料管。

埋置。应尽可能把管道埋没于地下，以免外力破坏和因阳光直射老化破裂，主流管埋深 30 ~ 50 厘米，分流、次分流管埋深视果树品种而定，龙眼园 40 ~ 60 厘米、枇杷园 30 ~ 40 厘米。要求分流管穿越果树根系区，每一根系区配置 1 ~ 2 个滴孔，孔位置以利于均匀滴液为准，其半径 5 ~ 7 厘米的球形空间内，应填充粗砂细石，以便滴出液散渗，防止孔口堵塞。

合理选择管（孔）径。分流、次分流管过水面积之和，应略小于主流管断面过水面积之和；滴孔面积之和，也应略小于分流、次分流管过水面积之和。这样才能保持输、配、滴管各部分间的流量平衡。控制不同等高线上的滴量相对平衡，是滴灌系统的基本要求，而由于山地高度相差悬殊，各点上的管内水压差异很大，因此以不同大小的滴孔来控制浸液量则是保持平衡的关键。

防堵塞。在主流管上，每隔一定长度（20 ~ 30 米）设置一个排淤口，口端配一个同径阀门；同样，在分流管途中也设排淤口，次分流管末端或每隔 5 ~ 10 米，再设置一排淤口，口端用橡皮塞（盖）封紧。清淤时，只要从主滴管注入带压力的清水，然后自上而下，分别打开排淤阀（口），即可洗净管道与滴孔。

日常管理。经常清洗滤板，检查系统是否在根部外漏水，若发现应立即修好。最好采用既可沼液滴灌又可清水滴灌的系统。应用时只要抽掉滤板即可。

4.3 沼液抗病虫作用及其应用技术

4.3.1 沼液的抗病虫作用

人们对厌氧发酵液的抗病防虫作用很早就有认识，并在农业生产中的大量应用，使得人们认识了厌氧发酵液在环保以及社会效益等方面为人们带来的益处。因此，国内外科研工作者对厌氧发酵液的抗病防虫作用机理开展了一些研究工作。但由于厌氧发酵液具有发酵原料多样化、发酵过程多变性的特点，多种菌类的联合作用，使得厌氧发酵过程极其复杂，人们很难通过分离纯菌种的办法去研究厌氧发酵的机理，阻碍了其应用技术的进一步研究，使得国内外对厌氧发酵液的研究多停留在肥效和抗病防虫的效果水平上，对抗病防虫机理的研究较少。

1988 年辽宁大学生物系的莫韵玑研究了厌氧发酵液对植物病菌的抑菌作用。他采用 11 种常见植物病菌，用实验室杯碟法进行抑菌试验。发现不管正在产气或已停止产气的厌氧发酵液对大部分植物病菌都有抑制作用，但其抑菌效果有差异，对小麦根腐病菌、水

稻纹枯病菌抑菌效果较明显，稀释成 10% 浓度的厌氧发酵液也有明显的抑菌圈；对玉米大、小斑病菌、水稻小球菌核病菌、棉花炭疽病等效果差些；对蚕豆枯萎病菌、棉花枯萎病菌等更差些，浓度在 50% 以上才看到有抑菌现象；而厌氧发酵液对苹果褐腐病菌、镰刀菌不但没有抑菌作用，反而有刺激生长现象。实验结果还证明，正在产气和停止产气的厌氧发酵液对抑菌作用无明显差异；pH 值低的发酵不正常的厌氧发酵液抑菌作用降低；证明光照和除菌作用对厌氧发酵液的抑菌效果都无影响，从而证明了厌氧发酵液的抑菌物不是菌体，而是菌体分泌在溶液中的可溶性物质，从不怕光照说明这种抑制物质不是多烯类，另外从色谱显影分析来看，他初步认为抑菌物质是有极性的碱性水溶性物质。因为气相色谱测定证明 pH 值为 7.2 的厌氧发酵液中乙酸、丙酸、丁酸含量均比 pH 值 6.4 的厌氧发酵液低。因此证明厌氧发酵液中的抑菌物不属于脂肪酸。

1991 年南京农业大学的李顺鹏等对莫韵玘的推测做了进一步的研究。他发现厌氧发酵液对甘薯软腐病有明显防治作用。用厌氧发酵液对根霉做抑菌圈试验，其平均抑菌圈直径为 2.0 厘米。经过一系列实验表明，厌氧发酵液中抑制根霉的主要抑菌因子是铵离子 (NH_4^+) 而不是多烯类抗生素和 pH 值的影响等。同时，因厌氧发酵代谢产物复杂，他推测可能还存在一些其他因素。

1992 年上海市农科院土肥所的沈瑞芝等在对厌氧残留物（包括厌氧发酵液和沼渣）减轻和防御大麦黄花叶病的研究中，更进一步对厌氧残留物防治病虫害的机理作了推测。她在对厌氧发酵液的激素进行分离和测定中发现其中含有吲哚乙酸、赤霉素类、维生素 B 等物质，认为这些物质对抑制病虫害有关系。另外，她在研究中还发现用厌氧发酵物处理的作物种子生长时释放甲烷、乙烯等物质，使种子产生抗逆性，与抑病有关。

河南农业大学农业部可再生能源重点实验室在 2002 年对畜禽粪便厌氧发酵液的抗病虫害作用与机理进行了系统的实验研究，他们检测出厌氧发酵液中有 120 多种成分，其中多数成分为营养成分，近 20 种成分对作物病虫有直接杀灭作用，认为厌氧发酵残留

物既可防治作物病虫害，而且还起到较好的肥效作用，是发展绿色农业、避免农药污染的理想方法。云南师范大学的张无敌等人还提出厌氧发酵残留物至少对近 30 种病害具有防治作用，20 多种病害的防治效果达到或超过现行使用的农药效果，19 种虫害取得明显的防治效果，17 种农作物病原菌有不同程度的抑制作用，且长期使用不会对环境带来污染，也不会产生病虫害的抗性等问题。

总体看来，对厌氧发酵液防治病虫害机理的研究结果大致可分为以下 3 个方面： 厌氧发酵液中 NH_4^+ 、赤霉素、吲哚乙酸、维生素 B 等物质的抑制作用； 厌氧发酵液对作物抗逆性的激发作用； 厌氧发酵液对作物的营养作用，使作物的抵抗能力增强。

厌氧发酵液的抗病防虫的功效已经被大量的实践所证明。厌氧发酵液通过直接喷施作物的茎、秆、叶，起到防治病虫害的作用；还可以作为浸种液，从而达到防治病虫害的目的。现已证实厌氧发酵液对各种农作物如粮食、经济作物、蔬菜、水果等作物种类中的病害具有良好的防治效果（表 4-5），并能防治 18 种作物的虫害（表 4-6）。

表 4-5 厌氧发酵液防治的病害种类

农作物	病 害
水稻	穗颈瘟, 纹拓病, 白叶枯病, 叶斑病, 小球菌核病
小麦	赤霉病, 全蚀病, 根腐病
大麦	叶锈病, 黄花叶病
玉米	大班病, 小班病
蚕豆	枯萎病
花生	病株
棉花	枯萎病, 炭疽病
甘薯	软腐病, 黑斑病
烟草	花叶病, 黑胫病, 赤星病, 炭疽病, 气候斑点病
黄瓜	白粉病, 霜霉病, 灰霉病
辣椒	白粉病, 霜霉病, 灰霉病
茄子	白粉病, 霜霉病, 灰霉病
甜瓜	白粉病, 霜霉病, 灰霉病
草莓	白粉病, 霜霉病, 灰霉病
西瓜	枯萎病
葡萄	病株

表 4-6 厌氧发酵液防治的害虫种类

农作物	害虫
水稻	稻纵卷叶螟, 灰飞虱, 白背, 飞虱, 螟虫, 稻蓟马, 稻叶蝉, 褐色短翅飞虱, 褐色长翅飞虱, 稻螟虫, 褐飞虱若螟
小麦	蚜虫
玉米	螟幼虫
黄豆	蚜虫
棉花	棉铃虫
柑橘	红蜘蛛, 黄蜘蛛, 矢尖蚧, 蚜虫, 青虫
白菜	蚜虫, 菜青虫
莲花白	蚜虫, 菜青虫
大芹菜	蚜虫
蒿笋	蚜虫
厚皮菜	蚜虫
黄瓜	蚜虫, 红蜘蛛, 白粉虱
西红柿	蚜虫, 红蜘蛛, 白粉虱
茄子	蚜虫, 红蜘蛛, 白粉虱
甜瓜	蚜虫, 红蜘蛛, 白粉虱
辣椒	蚜虫, 红蜘蛛, 白粉虱
草莓	蚜虫, 红蜘蛛, 白粉虱
菊花	蚜虫

厌氧发酵液对某些病虫害的防治效果与现行使用的农药功效相似, 甚至更好。厌氧发酵液可以通过浸种防治土传病, 在稻田基肥中实施可使白叶枯病的病情指数降低 11.86% ~ 25.49%, 防效可达 43.42% ~ 48.32%; 可使纹枯病的病情指数降低 44.994% ~ 66.52%; 防效优于敌枯双, 与井冈霉素农药效果接近, 喷施小麦防治小麦赤霉病防效与多菌灵相当, 发病率比对照下降 20.71%, 相对防治效果可提高 44.88%, 还防小麦全蚀病、根腐病菌, 白穗率仅为 6%, 而对照则高达 40%。应用厌氧发酵液及其制剂浸种秋播大麦, 抑制大麦黄花叶病效率高达 90%。厌氧发酵液浸种、包粒, 作基肥使用, 可明显抑制棉花枯萎病、黄萎病。厌氧发酵液浸种马铃薯种块可大大减少青枯病, 喷施番茄、青椒、花椰菜可控制晚疫病和花叶病。玉米喷施厌氧发酵液, 对大斑病和小斑病有良好的抑制作用, 喷施之后病害不会再发展。

厌氧发酵液用作稻田基肥，叶蝉在早稻和晚稻的田间密度分别比对照下降 66% 和 54%；稻飞虱密度比对照分别下降 59% 和 69%。稻苗施沼液后害虫数为 0.1 头/百丛，而施化肥后害虫数为 90 头/百丛，即化肥发生虫害的概率是厌氧发酵液的 900 倍。白背飞虱、灰飞虱则从 112 头/百丛减少到 21 头/百丛。早稻稻叶蝉的发生率下降了 66%，晚稻下降 54%。蓟马发生率也很小。喷施小麦、大豆、莴苣、莲花白、白菜、蒿笋、厚皮菜、菊花等作物，防治蚜虫效果与乐果相同，蚜虫死亡率在 90% 左右。对于菜青虫的杀灭率一次防治率在 70% 左右，二次防治率可达 95%。厌氧发酵液浸泡棉花种子，可大大减轻棉铃虫危害。

单用厌氧发酵液来防治玉米螟幼虫效果虽不及农药，但与对照相比 30 株中减少为害株 2 株和 3 株，并且沼液浸种后的玉米叶色稍深，显得健壮。沼液与敌敌畏混合浇玉米心叶，收到了治虫、施肥双重功效。江苏沭阳县进行沼液与敌杀死乳油配成混合剂，使用时将喷雾器喷头朝下，6 天、11 天后检查 30 株发现玉米叶有成排小孔和部分仅剩下一次表皮的为螟虫危害，发现一株。

平均气温 26.1℃ 下将厌氧发酵液均匀喷施柑橘叶面，观察 52 小时结果，将沼液均匀喷施在柑橘叶面后，红、黄蜘蛛 3~4 小时开始失去活动能力，5~6 小时后死亡，杀死率为 93.25%，矢尖蚧在 3~8 小时后开始变黑翅壳，死亡脱落，杀死率为 91.55%；蚜虫 28 小时活动减弱，40~50 小时逐渐死亡并脱落，杀死率 90.35%。喷施后观察 5 天，无其他症状发生。

4.3.2 沼液的应用技术

也有不少对厌氧发酵液与农药合施的研究。比如，厌氧发酵液与氧化乐果相混合喷施麦地，平均杀虫率达 99.25%，比单用氧化乐果等农药防治的杀虫率提高 5%。与乐果相混合喷施麦地平均杀虫率达 98.3%，可提高杀虫率 15%。应用厌氧发酵液防治蚜虫，可减少农药用量 60% 以上。

河南农业大学农业部可再生能源重点开发实验室 2004 年对以厌氧发酵液为基质，添加各种生化剂络合成不同混合剂做了大量试

验，研究发现厌氧发酵液与某些生化剂配成的混合剂的杀虫率比厌氧发酵液原液杀虫率有很大的提高，有些情况下蚜虫、菜青虫校正死亡率为 100%，而此浓度下的生化剂用量仅为常规用量的 5% ~ 10%，而且连续喷施既对作物无药害反应，又对害虫天敌无毒杀作用，蔬菜测定无任何对人、畜有毒害的残留，大田试验一次喷施药效比标准药剂的药效好 5% ~ 10%，目前已经研制出 4 种新型“生物药肥”进行大田推广试验。大田试验药效很好，结果见表 4-7

表 4-7 大田一次喷施混合剂药效对比

时 间 药 效	第一天	第三天	第五天	第七天
百混合剂 26000 倍液	96. 15 %	95. 43 %	95 %	93. 65 %
吡混合剂 22000 倍液	96. 01 %	95. 7 %	94. 32 %	93. 2 %
溴混合剂 11667 倍液	92 %	91. 08 %	89. 5 %	89. 5 %
阿混合剂 9500 倍液	94. 77 %	93 %	92. 59 %	92 %
标准药剂	91. 23 %	90. 9 %	90. 1 %	89. 4 %
清水对照 (虫情指数)	46. 15 %	55. 38 %	63. 1 %	75. 38 %

从表 4-7 中得出百、吡、阿混合剂这 3 种配方的药效都比标准药剂好，平均比标准药剂的药效高 5%，溴混合剂的药效与标准药剂药效相当。所以大田试验结果表明以厌氧发酵液为基质的新型配方，完全可以推广。

杀灭小麦蚜虫用本试验的新配方亩施 50 千克，喷洒在叶面、茎部。杀灭蔬菜蚜虫亩施 30 ~ 40 千克，杀灭桃树蚜虫、石榴树蚜虫应根据树冠大小决定喷施量；连续施药两次效果达 100%。杀灭菜青虫，连续施药两次，药效达 95% 以上，应用本品还能达到增产、果品质量提高的效果。

叶面喷施棉花，主要在花龄期进行，亩施 50 千克，第一次喷施后隔一周再喷施一次，防治率达 95% 以上。喷施西瓜要根据不同的生长期进行，第一次将沼液稀释 50 倍，在西瓜伸蔓阶段进行，第二次在花期和初果期进行，使用本试验新配方不但对西瓜上的青虫、棉铃虫杀死率达 95% 以上，而且西瓜蔓长势健壮浓绿。第三

次果实膨大期进行喷施稀释 10 倍的沼液，喷施后几天内，果实迅速膨大。

防治柑橘虫害，一般情况下喷施一次药剂，红蜘蛛、黄蜘蛛在施药后 3~4 小时后失去活力，5~6 小时死亡 98%，蚜虫 30 小时后停止活动，48~56 小时死亡 90%，其他青虫药后 24 小时失去活动，死亡率 87%。新配方兼肥、药于一体，在柑橘生长过程中可多次喷施，第一次在有明显的绿色花蕾时进行，第二次在谢花后进行，第三次在生理落果基本停止时进行（谢花后 20 天左右），第四次在果实膨大期进行，第五次在采果后进行。目的在于增强果树生理性状。

4.3.3 注意事项

沼液的要求。正常运转使用两个月以上，并且正在产气（以能点亮沼气灯为准）的沼气池出料间内的腐熟沼液；出料间中倒进了生人粪尿、牲畜粪便及其他废弃物的沼液，起白色膜状的沼液不能用。发酵充分的沼液为无恶臭气味、深褐色明亮的液体，pH 为 7.5~8.0。根据不同目的采用纯沼液、稀释沼液进行喷施。

喷施量应根据作物品种、生长阶段、环境等不同因素决定，具体喷施程度：湿而不滴。亩用量约 50~75 千克。

喷施时间在晴天早上 8:00~10:00 进行。不能在中午高温时进行，以防灼烧叶片；雨前不能喷施，否则雨水冲走不起作用。尽可能喷洒在叶片背面，有利作物快速吸收。

喷施用的沼液首先要用细纱过滤，除去固形物，避免堵塞喷雾器。喷洒工具是手动或自动均可。

4.4 沼液浸种和催芽技术

4.4.1 沼液浸种和催芽作用

研究发现厌氧发酵液不但没有病菌、虫卵，并且还可以杀死种子表面的病菌、虫卵，含有的吡啶乙酸、大量腐殖酸、生长素、赤霉素等物质，在浸种过程中，种子吸收了沼液中的各种营养物质和微生物分泌的多种活性物质，这些物质能够激活种子胚乳中酶的活动，促进胚细胞分裂，刺激生长发育。沼液浸种就是利用沼液中所

含“生理活性物质”营养组分对种子进行播种前处理，不但对种子根腐病菌、纹枯病菌、小球菌核病菌、棉花炭疽病菌、甘薯黑斑病菌、玉米大小斑病菌具有较强的抑制作用，还可提高种子的发芽率，促进种子生理代谢和植物根系的发育。有助于作物后期生长代谢，从而提高植物素质，增强植物抵御干旱等自然灾害的能力。沼液浸种方法简单，不需额外投资，因此得到广泛应用并取得了较大的经济效益。试验材料表明，用沼液给水稻、小麦、番茄、海椒等作物浸种可使种子萌发快、发芽率高、芽齐苗壮、根系发达及抗逆性强。可使水稻增产 5% ~ 10%、玉米增产 5% ~ 10%、小麦增产 5% ~ 7%、棉花增产 9% ~ 20%。研究分析沼液浸种水田作物与旱田作物，发现沼液宜施于旱田。

早稻一次浸泡 24 小时，再浸清水 24 小时，对一些抗寒性较强的品种，浸种时间适当延长，可用沼液浸 36 小时或 48 小时，清水浸 24 小时。早稻杂交品种，由于其呼吸强度较大，因此宜采用间歇法浸种，即浸 6 小时后提起用清水洗净沥干（不滴水为止），然后再浸，连续这样做，直到浸够要求时间为止。中稻 15 小时，晚稻常规品种浸沼液 24 小时，用间歇法。杂交品种浸沼液 12 小时，浸清水 12 小时，用间歇法可明显提高成秧率及秧苗素质，种子吸收了大量营养物质为秧苗早发高产打下基础。发芽率比清水浸种高 5% ~ 10%，成苗率提高 20%，秧苗白根多、粗壮、叶色深绿、移栽后返青快，生长速度较快，分蘖早、多，有效穗、成穗率、株高、空壳数、瘪粒数、空秕率、实粒数及千粒重等性状方面都比未用厌氧发酵液处理过的高。早稻比清水浸种提高产量 6%，中稻提高 7% 左右。晚稻产量提高 9.8%。同时经厌氧发酵液浸种的水稻秧抗冻能力增强，减少冷冻害。总之，沼液浸种对水稻生产具有增产作用，但因不同发酵原料沼液的营养含量不同，其增产幅度也不一样：人粪及猪粪作发酵原料的沼液浸种，比单纯猪粪为原料的沼液浸种，增产效果更为显著。

小麦沼液浸种在播种前一天，浸种 12 小时后沥干种子，用清水洗净晾干即可播种，发芽率比清水浸种高 25%，且早 3 天出芽。

同等条件下，苗齐而壮，单株叶面积增大，长势好，根系发达有助于植株吸收更多矿物质，为以后各器官的发育奠定了基础。最后产量比清水浸种高 7%，比药剂（多菌灵）拌种高 10%。小麦沼液浸种 14 小时并正常管理，每公顷增产 519.75 千克；浸种 6 小时，在年初气温差过大的情况下仍比清水浸种增产 225 千克/公顷。

红薯沼液浸种 2 小时后捞出清水洗净，晾干上苗床。结果发芽率高，比常规提高 30% 左右；发病率明显下降，黑斑病几乎没有发生；壮苗率为 90% 以上。山芋浸种将选好的山芋种子分层放进干净的容器中，然后倒入沼液，沼液应没过上层种子 6~8 厘米，浸泡 2~3 小时后，捞出山芋种子，沥干表面水分后，即可按常规方法进行育苗。

烤烟浸种将烤烟种子装进透水性较好的白布袋中，每袋装 300~500 克，然后扎紧袋口，放入装有沼液的容器内浸泡 30 小时，然后取出用清水反复轻搓，直至水清为止，12 小时后播种（春烟须催芽后播种）。

棉花翻晒 1~2 天后，装入袋中，浸泡 24~48 小时，沥干并用草木灰拌和成黄豆粒状及时播种。沼液浸种对棉籽的发芽率有 7.2%~10.3% 的提高，发芽势可提高 20.7%~30.1%，明显提高棉籽总体活力指数。但有资料表明沼液浸种棉籽不能减少病苗出现，因此棉籽不宜用沼液浸种，不过沼液对促进棉花后期生长、防病抗虫方面仍有很大作用。

将晒过的玉米种装入塑料编织袋（只装半袋）内，并拽一下袋子的底部，使种子均匀松散于袋内，用绳子吊入出料间料液中部，浸泡 24 小时后取出，用清水洗净，沥干水分，即可播种。玉米沼液浸种发芽率可达 95%，并促进玉米前期生长，使苗壮叶绿，抗病能力增强，玉米生长期病株减少 4%。浸种处理的玉米穗平均增长 1.8 厘米，穗中间平均增加 0.8 厘米，每行平均增加 3.9 粒，穗头秃顶长度平均减少 1.9 厘米，千粒重增加 10.1 克。试验区比对照区平均增产 9.35%。在相同栽培条件下，沼液浸种和施用能明显改善玉米的各项经济性状，提高玉米产量 10.3%。

4.4.2 注意事项

沼液的要求。正常运转使用两个月以上，并且正在产气（以能点亮沼气灯为准）的沼气池出料间内的沼液；停止产气，废弃不用的沼气池的沼液不能用来浸种。出料间中流进了生水、有毒污水（如农药等），或倒进了生人粪尿、牲畜粪便及其他废弃物的沼液不能用。出料间表面起白色膜状的沼液不宜于浸种。发酵充分的沼液为无恶臭气味、深褐色明亮的液体，pH 为 7.2 ~ 7.6，相对密度为 1.0044 ~ 1.0077。

浸种前准备工作。第一要晒种，晒种能增强种子皮的透性和增进酶的活性，提高种子的发芽率和存活能力，播种后可提早出苗，还可提高种子的吸水能力，并杀灭部分病菌，保证种子质量。时间一般 1 ~ 2 天，每天约晒 6 小时，选择晴天的中午前后几个小时的阳光。为使种子接受阳光均匀，应将种子在晒席上薄薄摊开，每日翻动 3 ~ 4 次。第二要清理浮渣，将沼气池出料间内的浮渣和杂物清理干净。第三要揭开沼气池出料间盖透气。有盖板的出料间应在清渣前 1 ~ 2 天揭开透气，并搅动料液几次，让硫化氢气体逸散，以便于浸种。

装袋。用透水性较好、结实的塑料纺织袋或白布袋，将种子装入袋内，装种要根据袋子大小而定，一般每袋 15 ~ 20 千克，并要留出一定空间（因种子吸水后会膨胀）。空间大小视种子的种类而定，有壳种子留 $\frac{1}{3}$ 空间，无壳种子应留 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{2}{3}$ 空间，然后扎紧袋口。

浸种位置。将装有种子的袋子用绳子吊入正常产气的沼气池出料间中部的沼液当中，并在出料口上横放一根竹棒，将绳子另一端绑在竹棒中部，使袋子悬吊达到固定浸种位置的目的。

浸种时间。视种子种类和出料间沼液温度的不同而不同。有壳种子一般浸种 24 ~ 72 小时，无壳种子一般浸种 12 ~ 24 小时。沼液温度低时，浸种时间稍长；反之，则时间相应缩短。农村户用沼气池普遍是常温发酵，在环境气温变化不大时，池内料液温度较为恒定。春末夏初，沼气池出料间内沼液温度为 15 左右时，浸种时间可稍长；夏末秋初，出料间内沼液温度为 18 左右时，浸

种时间可适当缩短。一般以种子吸饱水为度，最低吸水量以 23 % 为宜。但是作物性状、沼液的浓度有差异，应根据不同情况决定浸种时间长短。

种子浸泡后，一定要沥干，再用清水洗净，晾干种子表面水分，才可催芽或播种，否则很可能会导致颗粒无收。同时浸种时间不能超过规定时间，如果时间过长，会使种子水解过度，影响发芽率。

4.5 沼液无土栽培技术

水培用的沼液要从出料间取出后放置 3 天以上，释放掉还原态物质后再用，由于在有氧条件下沼液的成分变化很大，根据目前国内水培蔬菜所用的营养元素配方以及沼液营养物质含量，要将沼液 pH 值调整到 5.5 ~ 6.0 (采用 98% 磷酸缓冲液调节)。然后再利用其作为培养液，种植番茄、黄瓜、西葫芦等蔬菜，其效果很好。

无土栽培首要的是基质的配制。配制基质：1/3 炉渣 (直径 0.1 ~ 0.5 厘米)，1/3 锯末，1/3 沼渣。未经水洗的炉渣 pH 值较高，影响作物生长，所以炉渣在使用前要经过水洗。锯末不应太细，小于 30 毫米的锯末所占比例不应超过 10%，并且要堆沤 90 天以上方可使用。利用常规无土栽培滴灌系统，将沼液过滤后输入灌溉系统，对蔬菜施肥。

4.6 沼液养殖实用技术

对厌氧发酵液按浓度 10% 测定，发现其含蛋白质 6.2%，还含有多量物质，游离氨基酸，维生素，微量元素磷、钙、钾、铜、铁、锌、镁等和活力较强的纤维素酶、蛋白酶，而且均是可溶性营养物质，易于消化吸收，能够满足牲畜的生长需要，所以厌氧发酵液是一种理想的饲料来源。

4.6.1 沼液养猪

沼液作猪饲料添加剂在饲料营养水平较低的情况下有显著作用，饲喂生长育肥猪 (从断乳后至育肥结束) 能提高饲料利用率，缩短饲养周期，降低生产成本和料肉比，提高瘦肉率，还使喂沼液的猪

食欲好、爱睡、皮肤红润、长膘快、健壮少病，有的猪还能排出蛔虫。沼液添加浓度以 1% ~ 1.5% 为宜。全生育期净增重率提高 16.7%。用消化能为 12.12 兆焦/ 千克、粗蛋白为 10%、粗纤维为 5% 的主要用玉米和糠麸组成的饲料喂养二月龄断奶仔猪，在饲料中添加 1.5 倍的厌氧发酵液喂养 5 个月长到出栏，平均日增重 437 克，平均多增重 116 克；饲料转化率提高 17%，大约每增重 1 千克可节省 1 千克饲料。在粗放饲养条件下用厌氧发酵液作饲料添加剂，猪日增重提高 26%，采食量增加 14%，育肥期约缩短 20%。1997 年山西省农业科学院用沼液和饲料 1 : 1 养猪，降低成本 3.77%，1995 年全国 94 万头猪用沼液作添加剂，节约饲料 6.3 万吨。但因各地沼液成分有一定的差异，因此各地农户的实际效果也有所不同。对猪肉各部位的理化、卫生指标进行检验，结果见表 4-8、表 4-9。

表 4-8 饲喂沼液猪肉物理性质分析结果

样 品	水分/ %	色值/ (°)	pH	系水率/ %	肌肉脂肪/ %
正常值		10 ~ 25	5.7 ~ 6.8	75 ~ 95	2.2 ~ 4.0
试验 1 号	75.08	13.41	5.71	77.92	3.53
试验 2 号	76.85	13.55	6.45	91.02	2.77
对照 1 号	73.18	13.43	6.70	94.22	4.04
对照 2 号	74.17	13.95	6.95	90.77	2.25

表 4-9 饲喂沼液猪的肝理化分析结果 毫克/ 千克

样 号	农药残留		砷	氟	铅	镉	汞	铜	钙
	666	DDT							
试验 1 号	0.023	0.005	0.15	2.00	0.14	0.06	0.010	0.61	68.0
试验 2 号	0.031	0.002	0.11	1.46	0.06	0.03	0.179	1.95	65.5
对照 1 号	0.022	0.004	0.07	1.86	0.09	0.06	—	2.67	68.4
对照 2 号	0.026	0.001	0.19	1.46	0.05	0.05	0.094	10.54	79.6
样 号	磷	镁	钾	钠	锌	锰	铁	氯/ %	硒
试验 1 号	3796	216	3240	764	45.3	3.3	168	0.56	0.58
试验 2 号	2908	168	2640	672	36.2	3.2	1174	0.54	0.47
对照 1 号	3648	180	2824	698	44.3	2.7	200	0.55	0.76
对照 2 号	3262	203	2732	840	49.8	3.2	168	0.55	0.50

(1) 沼液要求

新池启动和大换料后，发酵时间不到 3 个月的沼液不能喂猪。因发酵时间太短，沼液浓度过大，pH 值不稳定，料液中有部分病原微生物。因此，这类沼液不宜喂猪。

沼液浓度过大，干物质超过 1.5% 以上不宜喂猪，但可采取用水稀释的方法调整浓度，使稀释液度降至 1.5% 以下，再继续发酵 15 天以上，即可喂猪。

沼气池出料间有死鼠、死猪等动物及农药时，这种带有病毒的沼液不宜喂猪。沼气池出料间流入大量雨水时，也不宜喂猪。

沼气池出料间应加盖，沼气池周围要经常清扫干净，不能堆放脏物。沼气池和出料间表面周围砌筑好排水沟，防止污水流入出料间而造成沼液污染。

(2) 饲喂技术

猪喂养沼液时间。要选择健康无病的猪，并要防疫、驱虫，健胃后方可饲喂沼液。喂养时间一般从断奶仔猪到出栏成猪均可。每天分早、中、晚 3 次。夏季用的沼液在喂前 2 小时取出，冬季在喂前 3 小时取出，以利沼液中残留的氨气挥发。待静置沉淀后，取上面的清液直接喂或与饲料混合喂。

饲喂沼液数量。喂量根据猪的生长发育、体重及猪的消化情况确定。20 千克重以下的猪不能饲喂；20 ~ 30 千克重的猪日喂量为 4 ~ 5 千克；40 ~ 60 千克重的猪日喂量为 5 ~ 6 千克；60 ~ 90 千克重的猪日喂量为 6 ~ 7 千克。如果吃不完，可留在槽（池）中让猪待一会儿再吃。但下顿吃时，应换成新的沼液，不能将上顿余下的留着下顿饲喂。值得注意的是沼液只是添加剂，不能代替基础日粮。

注意观察。在用沼液喂猪过程中特别是第一次开始取用沼液喂猪时，要注意观察猪的活动、采食、排便等情况，发现异常现象立即停喂沼液，马上检查原因，待查明原因后，再决定是否继续使用沼液喂猪。继续喂猪时，添加量不能超过 0.1 千克。

4.6.2 沼液用于其他养殖

沼液喂鸡。用沼液或与清水混合供蛋鸡、肉鸡饮用和食用，可

提高产蛋率，且增重快。小鸡长到体重 0.3 千克以上可开始拌沼液饲喂。一般饲料均可拌用。沼液要求拌匀，用量以拌至不干不湿为宜。取沼液之前必须用木棒搅几下，再从池中取沼液。正常发酵产气并已使用 3 个月以上的沼气池，均可取液。但不能从病态池取液饲用。

另外沼液养牛蛙蝌蚪能明显提高蝌蚪成活率，而且群体生长速度迅速加快，生长期缩短，病害明显降低。沼液还能养黄鳝、蚯蚓等动物。

沼液施于鱼塘，不仅可以改善养鱼池的条件，促使塘内浮游生物的繁殖比常规多 37.48% (表 4-10)，光合作用加强，产氧量增加约 46.86% (表 4-11)，减少鱼饵消耗，同时减少由于施新鲜粪便带来的寄生虫及病菌，有效地控制烂鳃、赤皮、肠炎、白头白咀病等鱼病发生，避免翻塘。鱼苗成活率可提高 10% ~ 20%。成鲜鱼产量增产 19% ~ 38% (表 4-12)，而且改善鱼的品质，增加了鲜味。200 克以下的鱼不宜饲喂沼液，饲料拌沼液喂鱼的效果也很好。对于每亩 2 ~ 2.5 米深、亩产 500 千克鲜鱼的鱼池，每周可施用正常发酵的含固体浓度 1% 的沼液 15 担左右。施用 时，要根据季节、气候的变化灵活掌握，主要看水色透明度，如大于 30 厘米时就施用，低于 20 厘米时就不施用。施用沼液应选择在晴天的上午进行。

表 4-10 沼液养鱼与常规方法养鱼浮游生物量比较

处 理	1983 年			1984 年		
	叶绿素 / (毫克/ 米³)	浮游植物 / (毫克/ 升)	浮游动物 / (毫克/ 升)	叶绿素 / (毫克/ 米³)	浮游植物 / (毫克/ 升)	浮游动物 / (毫克/ 升)
沼液	107. 64	21. 39	1. 2943	122. 56	24. 51	5. 50
猪粪水	81. 47	16. 25	1. 7874	85. 50	17. 10	2. 95

表 4-11 沼液养鱼与常规方法养鱼鱼塘光合作用产氧量比较

处 理	产氧量/ [克/ (米³ · 天)]	
	8 月 3 日	8 月 19 日
沼液	3. 316	5. 292
猪粪水	2. 786	3. 228

表 4-12 沼液养鱼与常规方法养鱼两年产量比较

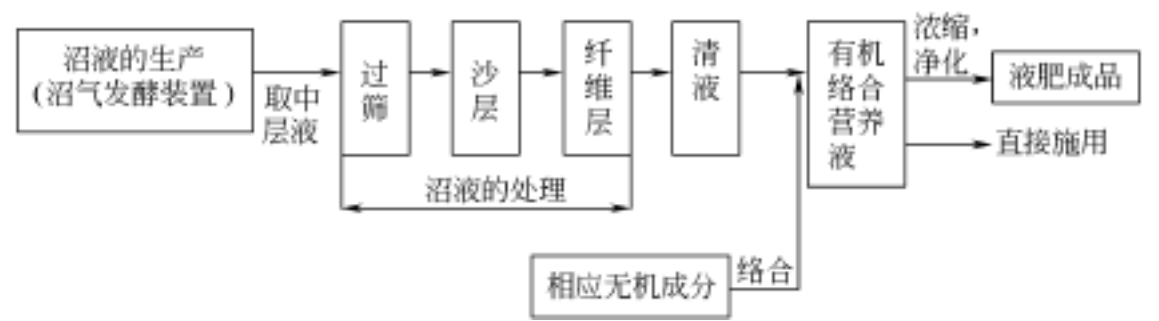
分 类	年 份	鱼放质量/ 千克		每公顷产量/ 千克		增肉倍数		增产情况	
		沼液	常规	沼液	常规	沼液	常规	沼液	常规
肥水 鱼	1983 年	33. 6	35. 2	2748	2613	4. 68	5. 05	132. 75	5. 1
	1984 年	62. 0	61. 25	3088. 5	2951. 25	3. 71	3. 62	111. 75	4. 7
吃食 鱼	1983 年	30. 75	35. 45	4024. 5	2781	6. 89	5. 22	1243. 5	44. 7
	1984 年	48. 15	46. 5	4023	368	5. 55	5. 32	339	9. 2
合 计	1983 年	64. 35	70. 65	6777	5397	5. 75	5. 14	1221. 75	25. 6
	1984 年	110. 1	107. 8	7111. 5	6635. 25	4. 52	4. 35	475. 5	7. 1

蛋白饲料是直接影响畜牧业发展和菜篮子工程的重要因素，沼液培养菌、藻类提供生物蛋白是目前解决蛋白饲料问题的有效途径。沼液能为藻类提供所需的碳、氮、磷及二价态铁等营养元素，所含氨基酸、脂肪酸是光合菌的氮源和碳源。非常适于小球藻、螺旋藻、光合细菌、食用菌乃至水蚤等生物。研究证明沼液养钝顶螺旋藻，藻类生成量（干重）可达 7~8 克/天；养裸腹水藻等一些植物性浮游生物，每周可获水蚤（湿量）2.5~5 克/升。这些生物含蛋白质很高，接近优质鱼粉的水平。沼液培养物经絮状沉淀，离心处理后可作饲料喂鸡、猪、牛、羊，效果相当理想。

4.7 生态型沼液产品加工工艺

目前沼液产品加工还不多见，主要是农民自己利用厌氧发酵液进行直接浇灌，或过滤后进行叶面喷施。但总体来说可以分为以下两个方面。

(1) 用作液肥的加工工艺



(2) 用作杀虫剂的加工工艺



(张全国 李改莲)

主要参考文献

- 1 沈瑞芝. 一种广谱的生物肥料和生物农药——厌氧消化液与植物抗逆性. 上海农业学报, 1997, 13 (2): 89 ~ 96
- 2 Peter Weiland. Anaerobic waste digestion in Germany-Status and recent developments. Bio-degradation, 2000, 11 (6): 415 ~ 421
- 3 Krylova, Nailia I. Influence of ammonium and methods for removal during the anaerobic treatment of poultry manure. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1997, 70 (1): 99 ~ 105
- 4 Eismann F. Effect of free phosphine on anaerobic digestion. Water Research, 1997, 31 (11): 2771 ~ 2774
- 5 卞有生. 生态农业中废弃物的处理与再生利用. 北京: 化学工业出版社, 2000
- 6 苑瑞华. 沼气生态农业技术. 北京: 中国农业出版社, 2001
- 7 李轶. 北方农村能源生态模式中利用沼液为肥料对番茄产量、品质及其植株生理活性等指标影响的研究: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2000
- 8 孟庆国等. 厌氧消化残留液中氨基酸含量的测定. 氨基酸与生物资源, 1996, 18 (3): 34 ~ 36
- 9 孟庆国等. 厌氧消化残留物再利用及其中微量元素的测定. 农业环境与保护, 1998, 17 (2): 81 ~ 83
- 10 张晓辉. 沼肥在防治农作物病虫害方面的应用. 农村能源, 1994, 6: 23 ~ 24
- 11 李顺鹏, 樊庆笙, 朱家全. 厌氧发酵液防治水稻白叶枯病和纹枯病的研究. 中国沼气, 1993, 8: 11 ~ 15
- 12 李顺鹏, 沈标, 顾向阳. 厌氧发酵液防治甘薯软腐病的效果. 中国沼气, 1992, 11: 18 ~ 21
- 13 张明生. 应用正交优化法进行花生厌氧发酵液浸种试验研究. 中国沼气, 1995. 13

(4): 45 ~ 46

- 14 全国农业技术推广服务中心编著. 中国有机肥料资源. 北京: 中国农业出版社, 1999
- 15 全国农业技术推广服务中心编著. 中国有机肥料养分志. 北京: 中国农业出版社, 1996
- 16 浙江农业大学编著. 植物营养与肥料. 北京: 中国农业出版社, 1991
- 17 贺瑞征. 沼气肥的性质及施用效果. 湖北农业科学, 1983 (8)
- 18 朱惠芬等. 沼肥的养分性质、特点及质量的影响因子. 中国沼气, 1984 (1): 16 ~ 19
- 19 熊承永. 我国沼气近期科研情况和发展趋势. 中国沼气, 1998, 16 (4): 45 ~ 48
- 20 王熙醇. 河北省霸州市利用沼液研制成功“绿霸植物有机络合营养液”. RURAL ENREGY, 1994, 3: 17 ~ 18
- 21 姚艳. 利用畜禽粪便为原料的优质厌氧发酵液生产工艺研究: [硕士学位论文]. 河南: 河南农业大学, 2003
- 22 南京农学院主编. 微生物学实验. 北京: 农业出版社, 1981
- 23 莫韵玑. 沼气发酵液对植物病菌抑菌作用的研究. 中国沼气, 1998, 6 (2): 6 ~ 10
- 24 李顺鹏等. 沼气发酵液对甘薯软腐病病原菌的抑菌机制研究. 中国沼气, 1992, 10 (4): 18 ~ 21
- 25 沈瑞芝等. 应用厌氧残留物减轻和防御大麦黄花叶病的研究. 中国沼气, 1992, 10 (2): 5 ~ 8
- 26 沈瑞芝等. 厌氧消化液与植物抗逆性 [J]. 第四届美洲华人生物技术学术讨论会集. 新加坡: 1992
- 27 李正华. 厌氧发酵液的抗病防虫机理及其应用技术研究 [硕士学位论文]. 河南: 河南农业大学, 2002
- 28 张无敌等. 厌氧消化残留物在防治农作物病虫害中的作用. 中国沼气, 1996 (1): 6 ~ 9
- 29 王继军等. 沼液对农药的增效作用. 农业环境保护, 1998, 17 (4): 190 ~ 191
- 30 刘银洲, 王发富. 利用沼液给果树治虫和根外施肥试验. 中国沼气, 1991, 9 (1): 38 ~ 39
- 31 李改莲. 畜禽粪便厌氧发酵液产品开发及其防虫特性试验研究: [硕士学位论文]. 河南: 河南农业大学, 2004
- 32 郇春花, 刘继青, 关绍. 浅谈沼气综合利用与生态农业. 中国沼气, 1997, 15 (1): 38 ~ 40
- 33 朱斌成等. 沼液浸种对增强水稻秧苗抗冷害机理的研究. 中国沼气, 1997, 15 (1): 17 ~ 20
- 34 金家志, 绍凤君. 沼液在农业上的综合利用. 资源节约和综合利用, 1991, 2: 36 ~ 38

- 35 王宁堂. 沼液浸种的技术要点及注意事项. 河北农业科技, 2002, 6: 8
- 36 宋洪川, 张无敌等. 蔬菜种子在沼液中发芽的研究. 云南师范大学学报, 2002, 3: 19 ~ 23
- 37 王跃贵. 水稻、玉米应用沼液的效应效果. 耕作与栽培, 2001, 2: 49 ~ 50
- 38 韩天喜. 早、中稻沼液浸种试验. 中国沼气, 1995, 5: 33 ~ 34
- 39 周孟津. 沼气生产利用技术. 北京: 中国农业大学出版社, 1999
- 40 袁发林, 刘家林. 沼肥水稻旱床育秧及生产试验. 中国沼气, 2000, 18 (1): 35 ~ 36
- 41 吴尚作. 沼液浸种增产技术的研究推广. 中国沼气, 1997, 15 (1): 35 ~ 37
- 42 季方兴. 沼液浸种. 农村能源, 1995, 4: 18 ~ 20
- 43 袁炳富, 汪立龙, 洪长才. 沼液浸种增产的原因及浸种方法. 农村能源, 1999, 1: 20 ~ 21
- 44 邱凌, 杨保平, 张正茂. 沼液浸种对旱地小麦苗期发育的影响. 中国沼气, 1999, 17 (1): 42 ~ 44
- 45 邹辉. 农作物沼液浸种. 农村实用工程技术, 2001, 10
- 46 胡丽华. 棉花施用沼气肥的效果与技术. 江西棉花, 1997, 6: 14 ~ 17
- 47 胡方才, 沈继华, 张一锦. 沼液对玉米防虫及增产效果试验. 中国沼气, 1993, 2: 42 ~ 44
- 48 刘富春, 朱飞, 王安洪. 沼液浸种和施用对玉米产量影响初探. 耕作与栽培, 2003, 2: 44 ~ 45
- 49 熊心金. 应用沼气厌氧发酵技术提高菜篮子工程的综合经济效益. 中国沼气, 1990, 8 (3): 35 ~ 36
- 50 吴凡. 沼液喂猪效益高. 现代农业, 2001, 6: 22
- 51 张岳. 沼气及其发酵物在生态农业中的综合应用. 农业环境保护, 1998, 17 (2): 94 ~ 95
- 52 吴巨昌. 沼液的饲用药用价值. 科学养鱼, 1995 (3): 12 ~ 15
- 53 丰斌. 大力推广沼气是发展生态农业的有效途径. 中国沼气, 2002, 20 (2): 49 ~ 50
- 54 郭继业. 沼液浸种的操作技术. 农民科技培训, 2003 (3): 10

第 5 章 沼渣综合利用技术

5.1 沼渣的定义

厌氧发酵是发酵微生物将发酵原料进行复杂生化反应的过程，在发酵过程中，发酵原料中绝大多数物质被分解成蛋白质、氨基酸、酚等多种水溶性物质和二氧化碳、甲烷等气体，而原料中未能分解或分解不完全的物质同随发酵原料进入反应器的尘土及其他杂质由于重力作用而沉积在反应器底部形成流态物质，这些流态物质干燥去除水分后就形成了沼渣。农村户用沼气池的出渣物是沼渣和沼液的混合物，因其固态物质含量较多也笼统地称为沼渣。本书所指沼渣是指反应器出渣物经自然风干后的固态物质。

5.2 沼渣的基本特性

沼气发酵过程中，微生物将发酵原料分解为上百种蛋白质、氨基酸及维生素、生长素、糖类等物质。这些物质以单体或多体形式游离于发酵液和吸附在固态物质上。当将反应器底部流态物质进行干燥脱水时除部分易挥发性物质如吡啶乙酸挥发掉外，其他物质仍保留在沼渣中，同时发酵过程中形成的微生物菌团及未完全分解的纤维素、半纤维素、木质素等物质继续保留在沼渣中，因此沼渣基本上保持了厌氧发酵产物中除气体外的所有成分，同时由于微生物菌团和未完全分解原料的加入，使沼渣具有其独有的特性。

5.2.1 沼渣作为肥料施用

5.2.1.1 营养成分的多样性及均衡性 沼渣作为厌氧发酵后的产物，其物质组成和投入原料有较大的差别，其有机质含量达到 40% 以上，腐殖酸含量达到 20% 左右。同时由于人畜粪便中含有尿素、尿酸、维生素、生长素等物质，这些物质在发酵过程中除一

部分分解转化为多种氨基酸物质外，其还能形成和保留类似维生素、生长素等物质。另外发酵原料的氮、磷、钾元素在发酵过程中损失较小，施用后其养分具有逐步稳定释放的特性。沼渣与堆肥对氮素保留情况对比见表 5-1。

表 5-1 沼渣与堆肥对氮素保留情况对比

处 理		发 酵 前			发 酵 后			
		全 氮		有效氮	全 氮		有效氮	
		%	克/ 瓶	克/ 瓶	克/ 瓶	损失/ %	克/ 瓶	损失或增加/ %
猪粪 麦秆 (4 1)	沼肥	1. 41	17. 5	3. 3	15. 76	10	8. 35	154
	堆肥				12. 47	28. 7	1. 46	- 55
猪粪 牛粪 人粪 (1 1 1)	沼肥	1. 88	22. 78	3. 36	22. 5	1. 23	12. 1	260
	堆肥				19. 04	16. 4	0. 96	- 71
猪粪 牛粪 人粪 (3 1 1)	沼肥	2. 86	36. 90	6. 47	35. 90	2. 71	7. 15	105
	堆肥				32. 03	1. 32	1. 56	- 76

5.2.1.2 增强土壤保水（墒）保肥能力和提高影响元素释放的持久性 沼渣肥料中含有的腐殖质疏松多孔又是亲水胶体，能吸持大量水分，故能大大提高土壤的保水能力。同时因腐殖质带有正负两种电荷，故可吸附阴、阳离子，又因其所带电性以负电荷为主，所以它具有较强的吸附阳离子的能力，其中作为养分原料的 K^{+} 、 NH_4^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子一旦被吸附后，就可以避免随水流失，而且能随时被根系附近的其他阳离子交换出来供作物吸收，仍不失其有效性。

5.2.1.3 肥料的环保性 沼渣肥料与其他肥料最明显的区别就在于它所具有的环保性能。尿素、碳铵等化学肥料在大量施用的过程中往往会带入大量的氮素，这些氮素主要以硝态氮的形式存在，长期使用会改变土壤性状，降低肥力，造成土壤板结，作物对化肥的依赖性增强；同时在施用期间短时间内大量释放过多氮、磷元素造成地下水或地表水的富营养化，危害正常的生态环境。

5.2.1.4 提高土壤有机质含量 沼渣中含有多种有机物质和微生物菌团，这些物质在施用后对土壤的理化特性具有明显的改善作

用，尤其对于盐碱地的改良效果更明显。

胡敏酸是腐殖酸中的重要组成物。从表 5-2 可以看出在浓度为 0.1% ~ 0.05%，施用量维持土壤质量的十万分之五至十万分之一的情况下，土壤团粒总数可增加 1.5 ~ 3 倍，其中水稳性团粒增加 8.5% ~ 20.5%。

表 5-2 腐殖酸对土壤的改良作用

胡敏酸浓度处理	用量 (按土壤重) %	大于 2 毫米的粒级			0.5 ~ 2 毫米粒级		
		团粒质量/ g	水稳性团粒质量/ g	水稳性团粒/ %	团粒质量/ g	水稳性团粒质量/ g	水稳性团粒/ %
对照	—	3.6	2.67	75.9	19	14.1	74.6
0.25 %	0.34	10.30	9.18	88.4	38.5	31.8	83.1
0.1 %	0.005	6	5.33	90.5	35.1	32.23	91.6
0.05 %	0.001	5.5	4.9	92	31.19	31.19	95.2

5.2.1.5 沼渣对盐碱化土壤有较好的改良作用 沼渣中富含胡敏酸和富里酸等酸类物质，施肥时消除了引起土壤碱化的主要盐分物质碳酸钠，降低土壤碱度，同时多种有机物质的施加，提高了土壤交换容量，增加土壤孔隙度，促进土壤胶体形成。中国科学院土壤研究所对沼渣改善碱土化学性质的研究表明，施用沼渣连续两年可使碱性土壤 pH 值和碱化度降低 1 ~ 2 个单位。连续两年施用沼渣之后土壤有机质及氮素含量的变化情况见表 5-3。

表 5-3 连续两年施用沼渣之后土壤有机质及氮素含量的变化情况

处 理	有 机 质/ %			氮 素/ %		
	试验前	试验后	增加	试验前	试验后	增加
对照	1.59	1.69	0.10	0.086	0.088	0.002
沼渣 1000 千克/ 亩	1.61	1.92	0.31	0.084	0.092	0.008
沼渣 3000 千克/ 亩	1.57	2.06	0.47	0.076	0.113	0.037
沼渣 6000 千克/ 亩	1.91	2.43	0.43	0.092	0.123	0.031
硫酸 78.3 千克/ 亩	1.99	1.83	- 0.16	0.096	0.095	- 0.001

另外腐殖质是一种含有多酸性功能团的弱酸，其盐类具有两性胶体的作用，因此具有很强的缓冲酸碱变化的能力。当连续施用沼

渣肥料时，可增强土壤缓冲酸碱变化的能力。

5.2.1.6 促进作物的生理活性，提高粮食产量 沼渣中的腐殖酸在一定浓度下可促进植物的生理活性。

腐殖酸盐的稀溶液能改变植物体内糖类代谢，促进还原糖的积累，提高细胞渗透压，从而增强了作物的抗旱能力。

过氧化氢酶的活性，加速种子发芽和养分吸收，从而增加生长速度。

加强作物的呼吸作用，增加细胞膜的透性，从而提高其对养分的吸收能力，并加速细胞分裂，增强根系的发育。

5.2.1.7 减少农药和重金属的污染 沼渣中的腐殖质有助于消除土壤中的农药残留和重金属污染以及酸性介质中铝、铁、锰的毒性。同时腐殖酸还能与某些金属离子络合，由于络合物的水溶性而使有毒的金属离子有可能随水排出土体，减少对作物的危害和对土壤的污染。

5.2.2 沼渣作为饲料

沼渣含有发酵所产生的多种蛋白质和氨基酸，这些物质可以作为某些特殊养殖业的饲料来源。沼渣作为饲料使用时只是部分替代饲料但并不能提供完全的营养来源；沼渣作为替代饲料用于水生动物养殖的方法目前还存在一定的争议，主要是沼渣在给鱼类提供饲料的同时也在一定程度上造成了水体污染，使养殖水质有机质含量增加，水体的透明度和浊度恶化，对于局域水质影响严重。

5.3 工业沼肥生产技术

农村户用沼气副产物沼渣、沼液综合利用可有效改善农村生态环境，促进农村地区经济发展。但对于一些大型养殖场、食品厂、味精厂、酒精厂的沼气发酵副产物来说由于数量太大无法像农户那样分散处理，因此需要采取必要的工业化措施处理，工业沼肥既可以为农业生产提供必要的有机肥料，又能改善企业生产环境，增加收入，提高企业效益。沼肥生产工艺流程见图 5-1。

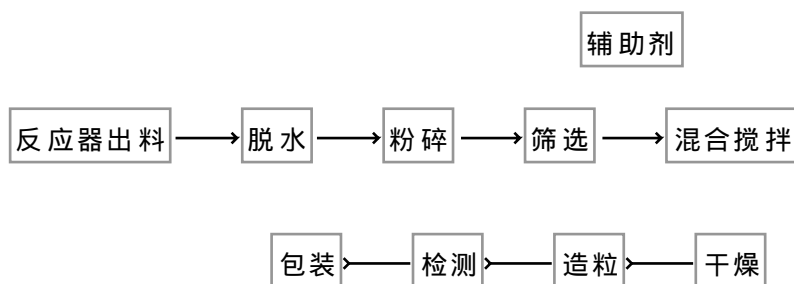


图 5-1 沼肥生产工艺流程

工业沼肥产品生产的关键问题就是固液分离过程（脱水）时营养物质的流失和辅助剂配合添加等，同时其产品规模直接受反应器处理能力的限制，原料来源在一定程度上限制商品化的进程。

5.4 沼肥实用技术

5.4.1 用沼渣制作棉花营养钵

沼渣中含有较多的吡啉乙酸和有机物质，可以提供作物生长所必需的生长素和肥料，同时沼渣中的有机肥料的肥力释放周期长，可以提供长效肥力。使用沼渣棉花营养钵的优点：发苗效果好，苗期、蕾期较短，现蕾开花早，有利于前伸有效开花结铃期，从而达到增产增收的目的。

5.4.1.1 棉花营养钵的配制 每分苗床地用沼渣 50 ~ 100 千克，钙镁磷肥 2.5 千克，氯化钾 1 千克，根据棉花品种和当地气候条件选择制钵时间。

5.4.1.2 移栽 当棉花幼苗长至 5 ~ 6 片叶进行大田移栽。

一般来说同类棉种比较，使用沼渣的棉花其第一真叶期可以提前 1 ~ 2 天，叶片大小和茎粗都有明显提高。同时使用沼渣后的伏前桃密度增大，整体增产效果明显。

5.4.2 玉米营养土施用沼渣

沼渣肥料作为玉米催苗的基肥使用可以使玉米茎秆粗壮，根须增加，抓地牢固，增强玉米的抗倒伏能力，和其他速效氮肥配合使用可以起到明显的增产作用，每亩可增产 10% 左右。同时沼渣和泥土按 6 : 4 的比例混合后可以制作玉米营养钵用于玉米的早期育

苗，当玉米苗长出 2~3 片真叶时进行移栽。这种苗转青快、发病率低，特别使用于早春季及反季玉米的种植。

5.4.3 用沼渣种植香菇技术

沼渣的选择及处理。选择正常发酵 3 个月的沼气池的沼渣，在阳光下曝晒，干燥后粉碎，剔除石块等大的固形物。

基料配方。a. 沼渣 78%，木屑 20%，石膏 1%，糖 1%；b. 沼渣 60%，玉米芯 20%，麦麸 18%，石膏 1%，尿素 1%。培养料含水量控制在 55% 左右。配料应保证碳氮比为 30 : 1，pH 值适中。

装袋及灭菌。筒袋以高密度聚乙烯筒袋为好，先把一端扎紧加热密封后待用。将营养素、二氢钾、多菌灵用清水溶解后，加足所需水与培养料充分搅拌均匀，使其含水量约 55% 左右，然后将拌好的料装入袋内封好，装袋要速度快、松紧均匀。装好的菌棒及时进锅灭菌，要在 3~5 小时使锅内温度达到 100℃，保持 20~24 小时，中途不得停火、降温、缺水。

接种。接种方法以接种箱接种为宜，接种箱接种无菌条件好，成功率高，每立方米用气雾消毒剂 4~6 克（按说明加量）或每立方米用甲醛 10 毫升，高锰酸钾 5 克进行灭菌 30 分钟后常规接种。

发菌期管理。发菌期管理的主要任务是调节培养室的温度和湿度，检查处理杂菌。每隔 5~7 天翻垛一次，同时进行刺孔工作。室内温度保持恒温 25℃ 左右（±2℃），空气相对湿度保持 70% 以下，光线越暗越好。接种 15 天左右，接种块菌丝四处蔓延，菌丝圈直径达 6~7 厘米，应加强通风，达 9~10 厘米时应分期分批刺孔。30 天左右菌丝长满全袋并出现瘤状物，要及时翻垛，刺孔，使菌棒成熟一致。50 天左右进入转色期，瘤状物由大、硬、白逐渐变小、软、棕红色并分泌出水，应及时放出分泌物积水，严防低温和强光刺激，加强温度管理，以达到有效积温。

催菇。将转色好的菌棒浸水达原重、或达原重的 95% 后，出池直立放在太阳光晒着的地方，上下盖铺麦草，上边再盖农膜，

白天盖膜，夜晚掀膜，昼夜温差达 10℃ 以上，反复操作，3~5 天后即有大量菇蕾出现，及时破膜，上棚。

菇期管理出菇阶段要注意温、湿、气、光四要素。子实体发育温度范围 5~25℃ 均可，但以 15℃ 最佳，气温低、长速慢、菇肉厚、品质优，但产量低；气温高、发育快、菇肉厚、易开伞，色黄质差。出菇期以保湿为主，前期以喷水保湿为主，后期浸水与喷水相结合。香菇为好氧生物，出菇期注意通风换气，保持空气新鲜。

5.4.4 沼渣堆肥处理

现在农村户用沼气池多以畜禽粪便作为发酵原料，而农村的大量的作物秸秆很少得到利用。在华中地区如果将秸秆直接还田，在好天气下一般 4 个月木质素仅分解 25%~45% 左右，其矿质化、腐殖化周期较长，同时还需要配施速效氮肥来调节土壤的 C/N 比，以避免出现微生物与作物争氮的矛盾。同时秸秆直接还田时部分带有病虫害的秸秆还可能造成病虫害的蔓延。如果先将秸秆进行堆沤处理，既可以杀死病虫害又可以提供优质有机肥料。利用沼渣进行秸秆堆肥处理是利用沼渣中残存的发酵微生物对秸秆进行降解，同时提供必要的氮源以平衡 C/N 比，分解逐步释放出的水溶性氮、磷、钾被沼渣基质吸收，减少养料损失。沼渣堆肥方法如下。

将秸秆作物粉碎至 5~10 厘米左右的小段，与沼渣按 1:1 比例混合备用。

选择地势高且平坦向阳地作为堆肥地，起堆时先用沼渣铺成 20 厘米厚的底层，上面铺设混合均匀的堆肥料，每铺 30 厘米厚时用沼液喷洒至下部微有液体渗出为好。

肥堆高度、宽度一般为 1.5 米、1 米左右，顶部凹陷，铺料完成后顶部和四周表面用稀泥抹光，表面抹泥厚度约为 1.5 厘米。

堆肥完成后，在肥堆周围沿底部挖深 5 厘米、宽 10 厘米左右的环沟以防水分外流。

堆肥时间视当地气温条件确定，以堆肥秸秆变为褐色且基本腐烂为准，一般春秋季节需要 20 天左右。

由于沼渣中含有厌氧发酵过程中各种微生物，在空气环境中厌氧细菌处于休眠状态，当堆肥密封后部分好氧细菌消耗了有限空间中的氧气而构成了简单的厌氧环境，由此大量引进的厌氧微生物可以将秸秆纤维素、木质素降解成作物可以吸收的小分子物质。沼渣堆肥较传统堆肥腐熟速度快、秸秆降解率高，可以加快作物秸秆还田速度。

沼渣堆肥后的腐熟肥料可以直接作为基肥使用也可用作种肥和追肥，作追肥使用时应适当提前追施以利发挥肥效。

5.4.5 沼渣与其他肥料的配合使用方法

沼渣作为有机肥料可以和其他速效肥料尤其是矿物肥料配合使用，互相补充达到增产效果。

5.4.5.1 沼渣与磷肥的配合使用 将沼渣和磷矿粉按 20 : 1 均匀混合，将这种混合物与有机垃圾或泥土一起堆沤。堆沤方法：先放一层厚度为 20 ~ 30 厘米的沼渣与磷矿粉的混合物，再放一层有机垃圾（厚度为 30 ~ 40 厘米），再放沼渣、有机垃圾，由此形成一个肥料堆。把泥土敷在肥料堆表面并打紧压实。堆沤一个月左右就制成了沼腐磷肥。这种肥料对缺磷土壤有显著增产作用。

5.4.5.2 沼渣与氮肥的配合使用 碳铵和氨水易挥发，如能将沼渣与其混合施用能促进化肥在土壤中的溶解和吸附并刺激作物吸收，这样可减少氮素损失、提高化肥利用率。

5.4.6 沼渣养猪

沼渣可以作为替代饲料用于肉猪养殖，虽然其增长速度不明显，但其饲料报酬比提高，表现出较好的经济效益；商品猪肉质无异常，胴体瘦肉率提高 1.25%，且生猪在整个生长期中消化道疾病明显减少。

饲养方法：沼渣替代饲料适用于 3 月龄幼崽，在基础日粮的基础上逐步添加沼渣，以使生猪能渐渐适应口味，沼渣日总添加量以占基础日粮的 15% 左右为好。

5.4.7 沼渣养鱼

沼渣养鱼是将沼气池内物质充分腐熟发酵后的沼渣施入鱼塘，

为水中的浮游动植物提供营养，增加鱼塘中浮游动植物产量，丰富滤食性鱼类饵料的一种饲料转换技术。沼渣养鱼有利于改善鱼塘生态环境。水体含氧量可提高 13.8%，水解氮含量提高 15.5%，铵盐含量提高 52.8%，磷酸盐含量提高 11.8%，因而使浮游动植物数量增长 12.1%、质量增长 41.3%，从而增加鱼的饵料，达到增加鱼产量的目的，同时可减少鱼的病虫害。沼渣养鱼适用于以花白鲢为主要品种的养殖塘，其混养优质鱼（底层鱼）比例不超过 40%。

（1）施用方法

基肥。一般在春季清塘、消毒后进行，每亩施沼渣 150 千克，均匀撒施。

追肥。4~6 月，每周每亩施沼渣 100 千克；7~8 月，每周每亩施沼渣 75 千克；9~10 月，每周每亩施沼渣 100 千克。

施肥时间。晴天上午 8:00~10:00 施用最好，有风天气，顺风泼撒，雨天不施。

（2）注意事项 水体透明度大于 30 厘米时，说明水中浮游动物数量大，浮游植物数量少，施用沼渣可迅速增加浮游植物的数量，办法是，每两天施一次沼液，每亩每次 100~150 千克，直到透明度回到 25~30 厘米后，转入正常投肥。

5.4.8 沼渣养黄鳝技术

利用沼渣养殖黄鳝，沼渣中含有较全面的养分，可供鳝鱼直接食用，同时也能促进水中浮游生物的繁殖生长，为鳝鱼提供饵料，减少饵料的投放，节约养殖成本（一般可降低成本 30%左右）。其技术要点如下。

5.4.8.1 筑建养鳝池和巢穴埂 根据养殖规模，确定池容的大小，池深要求 1.7 米，不少于 1.5 米。池子挖好后，池底铺水泥沙浆，池墙用砖或片石砌好，并用水泥沙浆勾缝，以免黄鳝打洞逃走。筑巢穴埂，沿池墙四周及中央，用卵石和碎石修一道小埂，高 0.7~1 米、宽 0.5 米，石缝用稀泥和沼渣填满，作为黄鳝的巢穴和产卵埂。也可在中间开“十字”沟，自然长、宽 0.8 米、深 0.25 米，

沟底部要用水泥沙浆抹面，填一些片石，石缝用沼渣和稀泥填满，同样可供黄鳝在石缝中做穴产卵。

5.4.8.2 饲养管理 养鳝池及巢穴埂筑好后，放黄鳝苗前半个月，向池中投放沼渣。方法：将沼渣与稀泥混合投放，厚度为 0.5 ~ 0.7 米左右，作为黄鳝的饲料及活动场所；填好料后，放水入池，水深随季节而定，一般夏季、秋季 0.5 米左右，春季、冬季 0.25 米左右。

放养量：每平方米投放 3 千克，每条重 25 克左右。

投放饵料量及投放时机。黄鳝活动的习性是昼伏夜出，夜间活动频繁，所以投料通常在黄昏。投放量，小黄鳝下池 1 个月后，每隔 10 天左右投一次鲜沼渣，每平方米 15 千克，但要注意观察池内水质，应保持池内良好的水质和适当溶氧量，如发现鳝鱼缺氧浮头时，应立即换水。鳝鱼喜吃活食，在催肥增长阶段，每隔 5 ~ 7 天投喂一些蚯蚓、螺蚌肉、蚕蛹、蛆蛹、小鱼虾和部分豆饼等，投喂量为鳝鱼体重的 2% ~ 4% 左右。鳝鱼是一种半冬眠鱼类，在入冬前要大量摄食，需增大饵料的投放量，贮藏营养满足冬眠的需要。

常规管理。冬季为保护鳝鱼安全过冬，可将池内的水全部放干，并在池表面覆盖一层 10 ~ 20 厘米的稻草，以便保温。夏季气温高，可在池的四周种植丝瓜、冬瓜、豆类等，并搭架为黄鳝遮阳、降温。加强水源管理，防止农药、化肥等有害物质入池。经常注意观察黄鳝的行动，及时发现疾病，一旦发现及时用药物防治。

5.4.9 沼渣养殖蚯蚓技术

蚯蚓俗称曲蟾，中药称地龙，属杂食性动物，主要以有机物质作为主要食物来源。据大量科学试验表明，蚯蚓内有大量脂肪酸、核酸和衍生物、游离氨基酸，还有微量元素，如磷、钙、铁、钾、锌、铜以及多种维生素，是人体理想的营养来源之一。其中，蚯蚓体内蛋白质含量十分丰富，新鲜蚯蚓含蛋白质 20% 以上（干制品高达 70%），是动物性蛋白的主要来源。蚯蚓还有很高的药用价值，具有解热、镇痉、平喘、降压、利尿和通经络的功能。利用现

代生物技术，可从蚯蚓中提取 4 种防治具有一定抗癌作用及溶解血栓的药品和保健品等。目前我国蚯蚓酶药品已批量投入生产，各地制药厂利用蚯蚓开发上市的地龙胶囊已达数种，蚯蚓制品对治疗心血管病、改善脑血管病引起的瘫痪和语言障碍疗效显著。栖息深度一般为 10 ~ 20 厘米。

蚯蚓是喜温、喜湿、喜安静、怕光、怕盐、怕单宁气味的环节动物。白天栖息，夜晚出来活动觅食。蚯蚓对周围环境反应十分敏感，适于生活在 15 ~ 25 ℃、湿度 60% ~ 70%、酸碱度 pH 值为 6.5 ~ 7.5 的疏松土壤中。

蚯蚓主要以腐烂的有机物为食，腐烂的落叶、枯草、蔬菜碎屑、作物秸秆、禽畜粪、瓜果皮、造纸厂、酿酒厂或面粉厂的废渣以及生活垃圾都可作为蚯蚓的食物，在人工养殖中，对于蚯蚓饵料的处理一般是将动物粪便与一些有机生活垃圾进行充分发酵的腐熟物质作为饲料来使用。而沼渣作为完全发酵腐熟化后的产品在有机质含量、病虫卵去除和酸碱度等条件上都较简单堆沤腐熟后的饲料更适用于作为蚯蚓人工养殖的饵料。

蚯蚓的养殖可根据养殖户自身实际情况确定合适的养殖方式，目前蚯蚓的人工养殖主要有大田养殖、半地下池养殖、肥堆养殖、大棚养殖和立体箱式养殖。其中立体箱式养殖是工厂化养殖的主要方法，它占地少、养殖密度大、使用人力少、养殖环境容易控制、成品收集简单、生产效率高。

蚯蚓立体箱式养殖方法如下。

(1) 养殖房选择 废弃的仓库或民房都可以作为养殖用房，但原用于贮存农药、化工原料等有害物质的房子不适用，厂房要求保持良好通风，冬季保温性能较好。

(2) 养殖箱的制作 养殖箱的尺寸形状可根据养殖条件选择，但应便于移动管理，单箱面积以不应超过 1 米² 为宜，高度为 30 厘米左右，箱体材料可选用木质、塑料。木质箱材质不能选用杉木和其他芳香性针叶木料及含单宁酸或树枝液的木料，这些异味物质易造成蚯蚓死亡或逃逸。

养殖箱底部和四侧要留有排水、通气孔以满足蚯蚓的生长需要，通气孔直径 0.7~1 厘米为宜，太大容易造成蚯蚓及蚯蚓粪坠落，太小造成通风不畅而引起箱内温度过高。通气孔面积可占箱壁面积的 20%~35%。

(3) 养殖床的制作 为了利用养殖空间，降低饲养成本，可将养殖箱层叠形成塔式立体养殖。养殖架尺寸以养殖箱规格确定，以角铁焊接或竹木搭架，也可采用砖灰砌筑，类似于蚕床。架高 1.5 米左右，一般分为 5~6 层即可。

室内立体层床一般以左右双行建造，养殖床间应设置作业通道以便管理。养殖床的制作要求结构牢固，不出现摇晃现象，层间距均匀。养殖箱取拿方便。

(4) 蚯蚓品种的选择及养殖密度要求 目前地球上已知有蚯蚓 2500 多种，在我国分布 160 余种，但适合人工养殖较有经济价值的品种不多，目前主要是一些引进和后来改良驯化的品种。

“大平二号”，20 世纪 70 年代末从日本引进，是人工养殖的首选，其趋肥性强、繁殖率高、定居性好、肉质肥厚营养价值较高。“大平二号”单体成虫体长 35~130 毫米，体宽 3~5 毫米，体重 0.45~1.12 克，身体圆柱形，体色多样，60~70 天达到性成熟，成蚓每 3~45 天产卵茧一次，可孵化幼蚓 2~6 条，单位养殖密度可达每平方米 30000~50000 条。

“美国红蚓”属于粪蚯蚓，喜欢吞食各种畜禽粪便，适用于养殖场来消除畜禽粪便对环境的污染。其体长 90~150 毫米，直径 3~5 毫米，成虫平均体重 0.5 克，繁殖能力强、产量高。

“进农 6 号”又称“秸秆蚯蚓”，是河北邯郸薛进军博士筛选培育而成的一个品种，适宜各种农作物秸秆的处理，这种蚯蚓食量大、生长快、繁殖率高、养殖简便。2 千克蚯蚓种可以处理 1 亩地秸秆，产成蚓 620 千克，蚓粪 2 吨。它是进行农村秸秆处理的有效方式。

采用箱式立体养殖单箱的养殖密度应控在每平方米 5000~10000 条左右，箱体上层覆盖聚乙烯塑料薄膜以保证箱内湿度防止

水分蒸发。

(5) 料配比 鲜沼渣经简单脱水后可以直接作为饲养饵料，饵料湿度以手握刚有水渗出为宜。初次投料厚度 10~15 厘米（冬季 20 厘米）左右，以后每次在 5 厘米左右，做到薄料多加，夏薄冬厚。

(6) 日常管理 饲养管理主要是养殖湿度、温度、避光、饵料控制和防天敌、除粪便的管理。

湿度。蚯蚓喜欢潮湿而不积水，不同品种要求湿度不完全相同，但一般可掌握在含水量 70% 左右。

饵料。饲料要分批定点投喂，以表面吃光为度，不可堆积过多。

温度。蚯蚓适宜生长的温度为 15~30℃，以 25℃ 左右为好，高温（35℃ 以上）季节应采取降温措施。

避光。蚯蚓系夜行动物，怕光，应注意遮光。

适时分床。在饲养过程中，种蚓不断产出蚓茧，孵出幼蚓，而其密度就随着增大；当密度过大时，蚯蚓就会外逃或死亡，所以必须适时进行分床或收集。

防天敌。蚯蚓的天敌主要有蛇、鼠、家禽和鸟类。

防逃逸。由于蚯蚓自身生活习性的原因，在光照、温度过高、湿度过大、过小等条件下容易造成蚯蚓逃逸。

除粪。蚓粪作为蚯蚓的代谢产物应及时清除，以保证蚯蚓的正常生长环境。蚓粪一般每月清除一次，每平方米养殖床每月可清除粪土 25~30 千克。

(7) 蚯蚓的收集 当养殖箱中蚯蚓达到一定密度时要及时将成虫收取或分箱，以免因养殖密度过大而造成群体死亡或逃逸。成蚓的收集可以与补料、除粪同时进行也可单独实施。蚯蚓收集的主要方式有光取法、诱捕法、筛取法、电热收取法、料床驱动法和机械分离法。

光取法。利用蚯蚓的畏光的特性，将养殖箱放到阳光下照晒，蚯蚓会很快钻入箱底部聚集成团，然后将箱体倒扣即可收集到

成团的蚯蚓。

诱捕法。将蚯蚓爱吃的新鲜饵料放置在带孔容器中，将容器放入养殖箱中，蚯蚓的嗅觉很灵，在闻到新鲜饵料的味道后会很快钻进容器，3~4天后容器中即可收集大量蚯蚓。

筛选法。利用筛子将成蚓和蚓粪及幼蚓、蚓卵分开。筛孔直径为3毫米，振动过筛后，筛网上基本全为成蚓。筛出的蚓粪中含有大量蚓卵（茧）和幼蚓及体积较小的成蚓，可以继续装箱养殖。

电热收取法。利用电热吹风机均匀在养殖箱饵料表面吹动，利用热风 and 声音将蚯蚓驱赶到饵料底层，然后逐层刮出蚓粪或倒置养殖箱即可收取大量成蚓。

料床驱动法。将养殖箱表面饵料用齿耙疏松，由于蚯蚓本身的畏光性和喜静特性使大量蚯蚓钻入下层料床，逐层刮去上层饵料后可在箱底收取成蚓。

机械分离。对于大型蚯蚓养殖企业为提高养殖效率和降低运行成本一般采用自动机械分离装置。机械分离装置利用蚯蚓的形态和蚯蚓与机械间的作用（黏附力）来实现分离。目前主要应用的有筛网分离器和梳齿式分离器。筛网分离器主要适用于蚓粪较干且易碎的工况下，当水分含量超过60%时，网眼容易被堵死，蚓粪凝结成团，难于分离。梳齿式分离是通过梳齿的移动收集蚯蚓，这种方法可以收集到纯净的蚯蚓。

(李刚 张全国)

主要参考文献

- 1 李鹏，殷碧祥．沼渣营养钵有利于培育棉花壮苗．中国沼气，1997，15（2）
- 2 蔡阿兴等．沼气肥改良碱土及其增产效果研究．土壤通报，1999，30（1）
- 3 周孟津．沼气生产利用技术．北京：中国农业大学出版社，1999
- 4 黄昌勇．土壤学．北京：中国农业出版社，2003
- 5 陆欣．土壤肥料学．北京：中国农业大学出版社，2002
- 6 孙振均．蚯蚓反应器与废弃物肥料化技术．北京：化学工业出版社，2004

第 6 章 以沼气为纽带的生态农业模式

以沼气为纽带的生态农业模式依据生态学原理，以沼气建设为纽带，将养殖业、种植业等有机地组合在一起，通过模式各单元之间的合理布置和匹配，使得物质和能量实现梯级利用，从而使农业生产达到高产、高效、优质、低耗的目的，实现农业生产的生态化和可持续化。20 世纪 90 年代以来，沼气技术在生态农业方面的应用呈现出快速发展的局面，出现了多种多样的以沼气为纽带的生态农业模式，如“四位一体”模式，“猪—沼—果（菜、菇、鱼、蚯蚓）”模式，“五配套”模式，“中部地区生态果园模式”，“沼气生态农场”等。本章根据这些模式的共性和特点将这些模式归为以下 3 种类型：生态温室模式、生态果园模式和生态农场模式。

6.1 以沼气为纽带的生态温室模式

6.1.1 模式组成、原理及特点

以沼气为纽带的生态温室模式的主要组成要件包括：沼气池，日光温室，畜禽舍。在此基础上，还可以增加厕所、蚯蚓养殖槽等内容。在模式各组成要件中，沼气池起着联结养殖与种植、生产与生活用能的纽带作用，处于核心地位。畜禽舍内的家畜和家禽起着为沼气池提高发酵原料的功能，畜禽粪便在沼气池内发酵后，产生的沼气用于为大棚增温及提供二氧化碳气肥的作用；产生的沼液可用作大棚内植物的液面肥和杀虫剂，还可用来喂猪；产生的沼渣用作有机肥，也可用作蘑菇栽培的基质；另外，畜禽呼吸产生的废气二氧化碳为植物提供光合作用所需的二氧化碳，而植物的呼吸则为畜禽提供新鲜的氧气。模式各组成部分之间的关系见图 6-1。

这种类型的生态农业模式较典型的有北方“四位一体”模式和中部“生态温室”模式。两种模式的结构示意图见图 6-2 和图 6-3。

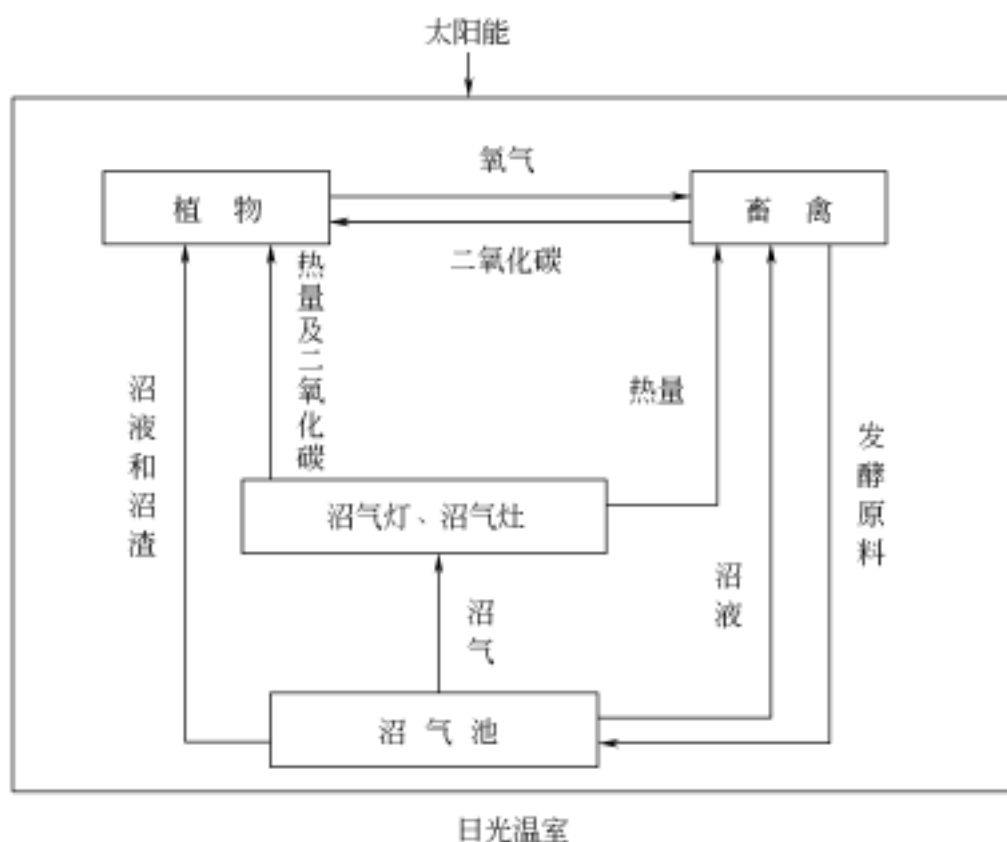


图 6-1 模式物质与能量流动示意

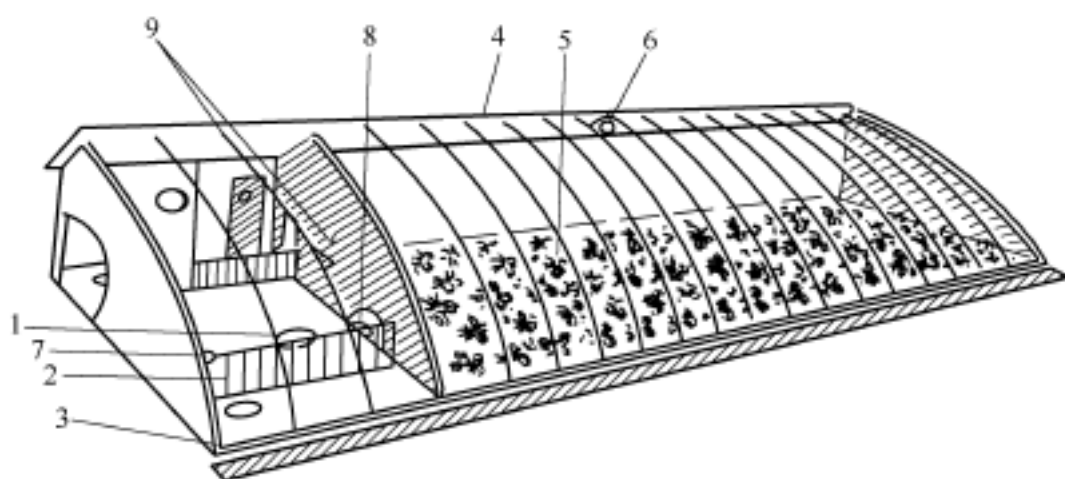


图 6-2 北方“四位一体”模式结构示意图

- 1—沼气池；2—猪圈；3—厕所；4—日光温室；5—菜地；
6—沼气灯；7—进料口；8—出料口；9—通气孔

北方“四位一体”生态农业模式是辽宁省在 20 世纪 90 年代研究探索出来的一种生态农业模式，目前已在我国北方农村得到了大

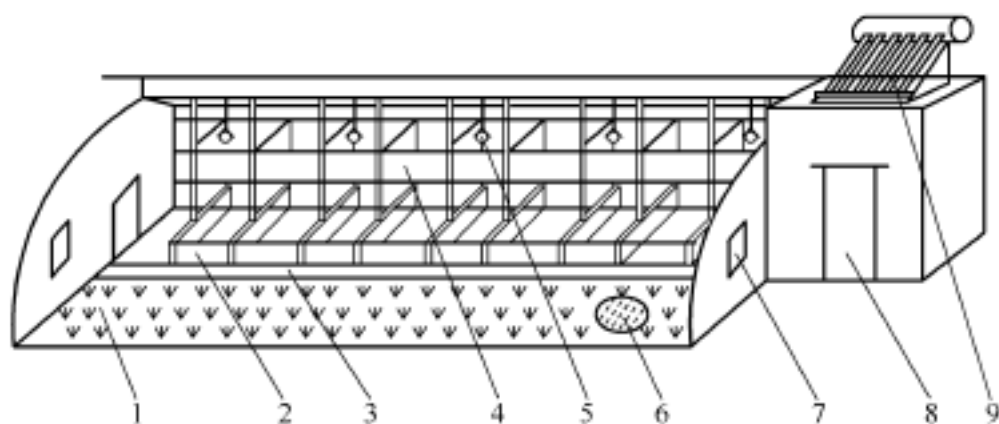


图 6-3 中部地区“生态温室”模式结构示意图

- 1—种植区；2—家畜养殖区；3—工作通道；4—家禽养殖区；5—沼气灯；
6—沼气池；7—温室通风窗；8—看护房；9—太阳能真空管热水器

范围的推广，取得了显著的经济、能源和生态效益。这种模式的特点可归结为以下 6 点。

多业结合，集约经营。通过模式单元之间的联结和组合把动物、植物、微生物结合起来，加强了物质循环利用，使得养殖业与种植业通过沼气纽带作用紧密联系在一起，形成一个完整的生产循环体系。这种循环体系达到高度利用有限的土地、劳力、时间、饲料、资金等，从而实现集约化经营，进而获得良好的经济、社会和生态效益。

合理利用资源，增值资源。模式实现了对土地、空间、能源、动物粪便等农业生产资源的最大限度的开发和利用，从而使得资源实现了增值。

物质循环，相互转化，多级利用。生态模式充分利用了太阳能，使太阳能转化为热能，又转化为生物能，达到合理利用。通过沼气发酵，以无公害、无污染的肥料施于蔬菜和农作物，使土地增加了有机质，粮食增产，秸秆还田，并转化为饲料，达到用能与节能并进。

保护和改善自然环境与卫生条件。生态模式把人、畜、禽、作物联结起来，进行第二步处理，达到规划合理、整齐、卫生，从

而保护了环境。同时通过沼气发酵，消灭了病菌。粪便中含有大量的病原体，它可以通过多种途径污染水体、大气、土壤和植物，直接或间接地影响着人体健康。沼气发酵处理粪便使粪便达到了无害化效果。在常温沼气发酵条件下，钩虫卵 30 天被杀灭，蛔虫卵 30 天被杀灭，沙门菌平均存活 6 天，痢疾杆菌 40 天被杀灭，减少了对土壤的污染。这就改变了农村粪便、垃圾任意堆放的状况，消灭了蚊蝇的孳生场地，切断了病原体的传播途径。因此，沼气发酵处理粪便，净化了环境，减少了疾病，大大改善了农村的卫生面貌。

有利于开发农村智力资源，提高农民素质。生态模式是技术性很强的农业综合型生产方式，是改革传统农业生产模式，实现农业由单一粮食生产向综合多种经营方面转化的有效的途径，因此，推广应用北方生态模式，极大地增强了农民的科技意识和技术水平，提高了农民的素质。

社会效益、经济效益、生态效益提高。高度利用时间，不受季节、气候限制、在新的生态环境中，生物获得了适于生长的气候条件，改变了北方地区一季有余，二季不足的局面，使冬季农闲变农忙；高度利用劳动力资源，生态模式是以自家庭院为基地，家庭妇女、闲散劳力，男女老少都可从事生产；缩短养殖时间，延长农作物的生长期，养殖业和种植业经济效益较高，一般每户年可养猪 20 头，种植蔬菜 150 平方米，年效益可达纯收入 5000 元。

中部地区生态温室模式是近年来在河南地区发展起来的一种生态农业模式，其特点可归结为：生态化、立体化、设施化和高效化。

生态化。就是运用生态学食物链原理开发宏观与微观生产的物资良性循环、能量多级利用的再生资源高效利用技术，提高资源利用效率，实现物质流动的良性循环，增强可再生资源利用与环境容纳量的持续性。为了实现系统运行的生态化，可采取以下几个措施：一是通过厌氧发酵技术的应用，为模式的生产提供优质有机肥和有机营养液以替代化肥和农药；二是最大限度地利用太阳能、生物质能等可再生能源，减少农业生产过程中化石能源的利用量；

三是通过合理的技术衔接，充分发挥和利用动物、植物和微生物之间固有的依存关系，减少生产过程对外来物质的引入。

立体化。就是在模式的设计过程中，充分利用地下、地表和空中的空间，以求使设施内的空间得到最大限度的合理利用。在设计方面将沼气池埋入温室的地下，地面空间分成两部分，一部分用于植物种植，另一部分用于家畜养殖，养殖区上部的空间用于家禽养殖。

设施化。为了改变自然环境对农业生产的影响和限制，模式的整个生产都布置在以太阳能日光温室为主体的设施内，从而保证了模式的可控化运行。

高效化。这里所说的高效化可以从两个方面加以理解：其一是系统运行效率高，这主要体现在通过各种技术接口，强化了系统内部各组成部分之间的相互依赖和相互促进的关系，从而保证了整个系统运行的高效率；其二是系统的效益高，这主要是由于系统的生产严格遵循了自然规律，也就是实现了生态化生产，所以模式生产的农产品的品质和产量就得到了提高，从而保证了系统的高效产出。

6.1.2 模式设计

6.1.2.1 模式结构布局 模式结构布局见图 6-4 ~ 图 6-7 所示。

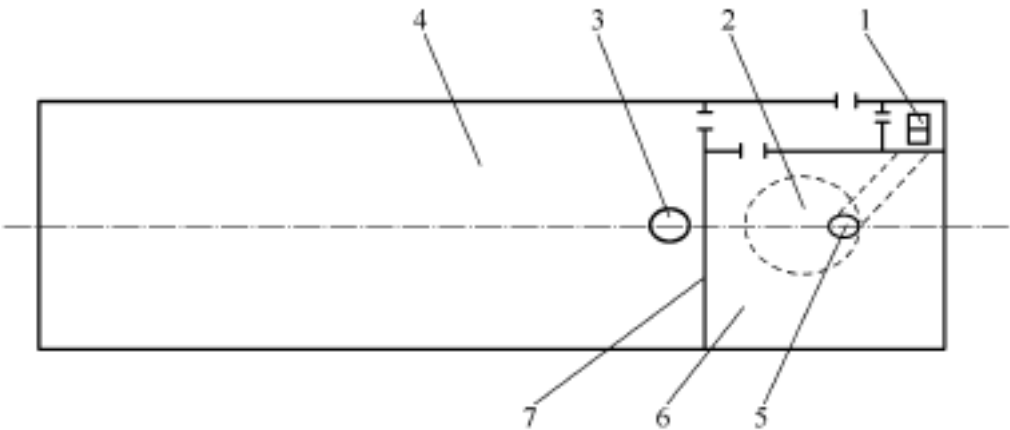


图 6-4 畜禽舍右侧放“四位一体”模式平面结构布局

1—厕所；2—沼气池；3—出料口；4—日光温室；
5—进料口；6—猪舍；7—内山墙

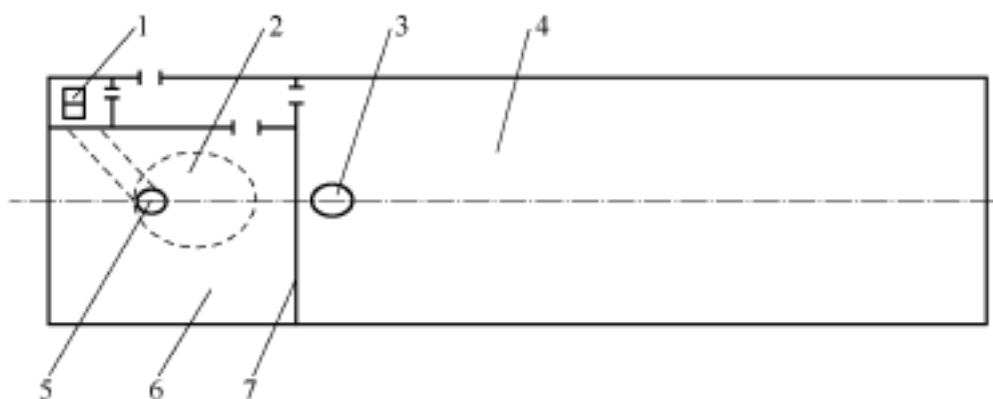


图 6-5 畜禽舍左侧放“四位一体”模式平面结构布局

1—厕所；2—沼气池；3—出料口；4—日光温室；
5—进料口；6—猪舍；7—内山墙

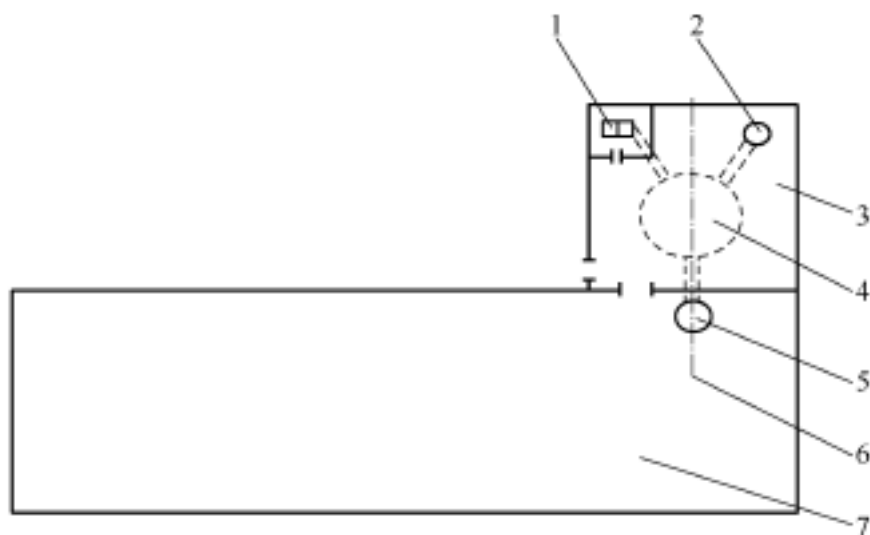


图 6-6 畜禽舍后侧放“四位一体”模式平面结构布局

1—厕所；2—进料口；3—猪舍；4—沼气池；5—出料口；
6—猪舍东西宽度中心线；7—日光温室

6.1.2.2 模式基本单元之间匹配关系 为实现模式生产的生态化，模式日光温室内作物生长所需的营养成分氮、磷、钾应主要来自沼气发酵的副产物——沼液和沼渣，而沼气发酵所需的原料则主要依赖大棚内所养的猪等家禽和家畜。所以要确定模式各组成单元之间的匹配关系，实质上就是建立各单元间营养成分供需的平衡关系。考虑到棚内动物养殖虽然存在多样性，但主要以养猪为主的情况，

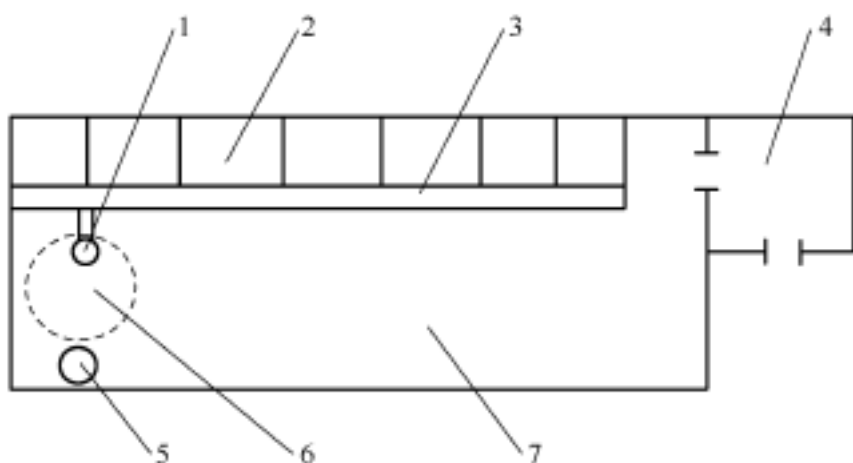


图 6-7 中部地区“生态温室”模式平面结构布局

1—进料口；2—畜禽舍；3—集粪沟；4—看护房；

5—出料口；6—沼气池；7—日光温室

这里主要确定猪存栏头数、日光温室面积与沼气池容积三者之间的关系。

实际应用中，多数情况是温室的面积为已知值。所以这里设日光定温室面积、温室内所种蔬菜种类、产量及其对氮、磷、钾的需求量都为已知参数，据此来求猪存栏数量、猪舍面积、沼气灯数量和沼气池的容积。

(1) 猪存栏头数的确定 首先设大棚面积 A 一定，并设在猪的一个存栏周期内棚内的蔬菜产量 W 一定。由此列出氮、磷、钾的平衡关系式如下。

$$\text{氮的平衡关系式: } \frac{A W n}{666.7} = \alpha C_1 \times R\% \times R_N \%$$

$$\text{磷的平衡关系式: } \frac{A W p}{666.7} = \beta C_2 \times R\% \times R_P \%$$

$$\text{钾的平衡关系式: } \frac{A W k}{666.7} = \gamma C_3 \times R\% \times R_K \%$$

式中 A ——日光温室面积，米²；

W ——蔬菜亩产量，千克/亩；

n 、 p 、 k ——分别为单位蔬菜产量对氮、磷、钾的需求量，千克/千克；

α β γ ——分别为 1 头猪在 1 个存栏周期内所排粪便沼气发酵后产生的沼肥的氮、磷、钾含量，千克；

C_1 、 C_2 、 C_3 ——分别为满足氮、磷、钾供需平衡的猪的存栏头数；

R ——粪便的收集率，一般取 90 %；

R_N 、 R_P 、 R_K ——沼肥中氮、磷、钾的收集率，氮和磷一般取 95 %，钾一般取 90 %。

根据上述关系式，猪的存栏头数应取： $C = \max(C_1, C_2, C_3)$ 。

部分蔬菜对氮、磷、钾的需求量情况见表 6-1。

表 6-1 蔬菜作物生产 1000 千克产品所需要的养分数量 千克

蔬菜名称	氮(N)	磷(P ₂ O ₅)	钾(K ₂ O)
番茄	2.7 ~ 3.2	0.6 ~ 1.0	4.9 ~ 5.1
茄子	3.0 ~ 4.3	0.7 ~ 1.0	4.9 ~ 6.6
辣椒	5.2 ~ 5.8	1.1	6.5 ~ 7.4
黄瓜	2.0 ~ 3.0	0.8 ~ 1.0	3.5 ~ 4.0
西葫芦	3.0 ~ 5.0	1.3 ~ 2.2	4.5 ~ 6.0
西瓜	4.6 ~ 5.0	3.4	4.0
冬瓜	1.3 ~ 3.0	0.61	1.6 ~ 2.4
苦瓜	5.3	1.8	6.9
菜豆	3.4	2.3	5.9
豇豆	4.1	2.5	8.8
草莓	6.0 ~ 6.2	2 ~ 2.3	6.5 ~ 8.2
白菜	1.8 ~ 2.5	0.4 ~ 1.0	2.8 ~ 4.5
甘蓝	3.0 ~ 4.5	1.2 ~ 1.6	5.1 ~ 6.3
花椰菜	10.9 ~ 13.9	2.1 ~ 4.8	4.9 ~ 17.7
莴苣	2.1 ~ 2.6	1.0	3.2 ~ 3.7
芹菜	2.0 ~ 2.4	0.9 ~ 2.4	1.1 ~ 3.9
菠菜	2.5 ~ 4.0	0.9 ~ 1.4	4.6 ~ 6.9
油菜	2.8	0.3	2.1
小白菜	1.6	0.9	3.9
韭菜	2.0 ~ 2.4	0.7 ~ 0.9	3.7 ~ 4.1
大葱	2.1 ~ 4.0	0.5 ~ 1.5	1.2 ~ 2.4
洋葱	2.4	0.7	4.1
蒜	5.1	1.3	1.8
萝卜	2.3 ~ 3.5	0.9 ~ 1.9	3.1 ~ 5.8
胡萝卜	4.5 ~ 7.5	1.9 ~ 3.8	7.0 ~ 11.4
芜菁	4.3	2.0	10.0

(2) 猪舍面积的确定 猪舍的面积根据下式进行计算确定。

$$F = kn + c$$

$$n = \frac{V\rho R V_0}{GST}$$

式中 F ——猪舍面积，米²；

k ——生猪重量调节系数，一般取 0.8 ~ 1.2，小猪取下限，大猪取上限；

c ——舍温、通风调节系数；

n ——猪的养殖头数；

V ——沼气池净空容积，米³；

ρ ——发酵料液密度，千克/米³；

G ——每头猪每天的产粪量（湿重），千克；

S ——沼气发酵原料中干物质的含量，%；

T ——原料在沼气池内的滞留时间，天；

R ——发酵料液质量分数，%；

V_0 ——沼气池装料容积（%），通常取 90%。

(3) 沼气灯数量的确定 大棚内沼气灯的主要作用是燃烧沼气释放热量和二氧化碳气肥。沼气灯数量一般按每 50 米²大棚面积设置一盏的计算确定。当点燃沼气灯的目的是为了增温和增光时，燃烧时间应放在凌晨 5：30 ~ 8：30；而当点燃沼气灯的目的是为了提高二氧化碳含量时，燃烧时间安排在凌晨 6：00 ~ 8：00，并且大棚放风前 30 分钟应熄灭沼气灯。

(4) 沼气池容积的确定 沼气池的容积由猪所产生的粪便量来确定，可根据以下公式进行求取。

$$V = \frac{CM + W}{\rho R} \times T$$

式中 M ——每头猪每天所产粪便量，千克/天；

W ——每天粪便稀释所需水量，千克/天；

T ——原料在沼气池内滞留时间，天；

ρ ——进入沼气池的原料密度，千克/米³；

R ——沼气池装料率（%），一般取 85%。

沼气池的容积也可按经验值依养猪数量的多少来确定，一般情况下，2~3 头猪（体重为 50 千克，下同）需建 6~7 米³，4~5 头猪需建 7~9 米³，6~8 头猪需建 8~10 米³。

6.1.2.3 模式日光温室设计

（1）日光温室的采光设计 为了最大限度的提高日光温室的温度，以满足温室内作物的生长要求，所以应尽可能让太阳光多透入温室内。要使日光温室实现良好的采光，需要对以下 5 个参数进行合理的设计。

最佳方位角的设计。冬季太阳高度角低，为了争取太阳辐射多进入温室室内，建造温室应采取坐南朝北，方位通常为正南，中午太阳光与温室东西延长线垂直。北纬 38°以南地区，由于冬季气候较温暖，早晨温度又不很低，可早揭帘，且上午光质好，而作物上午的光合作用强度较高，应尽量增强午前的光照，温室方位角采取南偏东 5°~10°为宜（称之为抢阳），提早 20~40 分钟接受到太阳的直射光，对作物光合作用是有利的。但是高纬度地区冬季早晨外界气温很低，提早揭开草苫，室内温度下降较大，所以，一般采用正南的方位角。而北纬 41°以北地区冬季气候寒冷，昼夜温差较大，早晨温度低，往往晨雾大，早晨揭帘时间不能过早，温室方位以南偏西 5°~10°为好（称之为抢阴），以适当延长午后的光照时间有利于作物生育，并为夜间贮备更多的热量。当然，方位角的确定还要考虑当地冬季的主导风向的影响。如果北纬 41°以北地区，冬季主导风向为西北风，就不宜采用南偏西的方位。反之，北纬 38°以南区，如果冬季主导风向为东北风，亦不宜采用南偏东方位。

建造日光温室方位角的正南、正北，不是磁南、磁北。各地有不同的磁偏角，确定方位角需根据所处的区域加以矫正。表 6-2 为我国不同地区磁偏角。

采光屋面角的设计。采光屋面角是指日光温室屋面切线与水平线的夹角。日光温室通过透明屋面接受太阳直射光、散射光和

地面反射光，三者当中直射光占主要地位。照射到温室前屋面的薄膜表面的直射光，一部分被反射掉，一部分被薄膜和其表面附着的灰尘吸收，剩余的才能透射到室内。光线透过率的大小主要决定于反射率。反射率的大小与光线的入射角有关，入射角越小，透过率越大，入射角越大，反射率也越大，透过率就越小，以垂直照射屋面的直射光进入日光温室的辐射量最大。然而当日光温室参数确定以后，由于太阳高度角随时在发生变化，要使光线总是垂直照射日光温室屋面是不可能的。但是直射光对透明薄膜的透过率与光线的入射角不是直线关系。当入射角在 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内变化时，光的透过率与垂直入射的透过率相差不大，光线入射角只要不大于 40° ，直射光透过率的下降不超过 4%；而入射角在 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间时，透过率减弱的程度也较小；只有当入射角大于 45° 时，透过率才较明显减小；当入射角大于 60° 时（见图 6-8），透过率急剧下降。透明薄膜的这一特性为日光温室棚面设计提供了方便条件。

表 6-2 我国不同地区磁偏角

地 区	磁 偏 角	地 区	磁 偏 角
漠 河	11°00′(西)	许 昌	3°40′(西)
齐 齐 哈 尔	9°54′(西)	徐 州	4°27′(西)
哈 尔 滨	9°39′(西)	西 安	2°29′(西)
大 连	6°35′(西)	太 原	4°11′(西)
北 京	5°50′(西)	包 头	4°03′(西)
天 津	5°30′(西)	南 京	4°00′(西)
济 南	5°01′(西)	合 肥	3°52′(西)
呼 和 浩 特	4°36′(西)	郑 州	3°50′(西)
长 春	8°53′(西)	武 汉	2°54′(西)
满 洲 里	8°40′(西)	南 昌	2°48′(西)
沈 阳	7°44′(西)	银 川	2°35′(西)
赣 州	2°01′(西)	杭 州	3°50′(西)
兰 州	1°44′(西)	拉 萨	0°21′(西)
遵 义	1°25′(西)	乌 鲁 木 齐	2°44′(西)
西 宁	1°22′(西)		

塑膜覆盖日光温室的光照设计以冬至日为基点。冬至日前后正

是北方温室主生产期。当冬至日温室光照符合要求时，其他时日就没有问题了。为了便于分析，可以把光照设计简化为倾角为 α 的单斜面温室的光照设计，如图 6-9 所示。

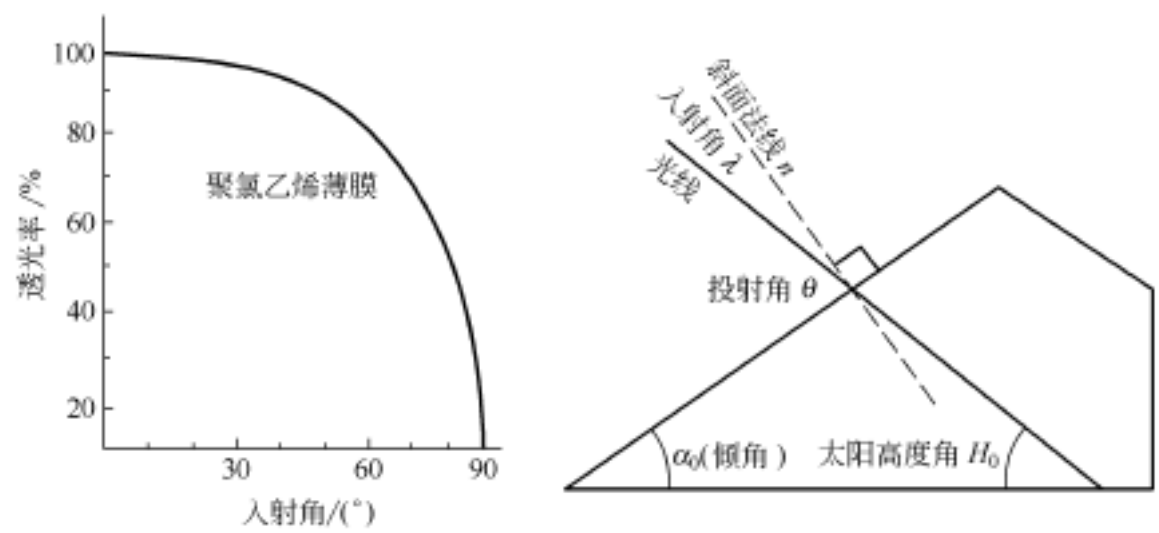


图 6-8 入射角与透光率的关系

图 6-9 光照示意

当冬至日正午太阳光垂直照射到斜面时， $\lambda = 0$ ， $\alpha = 90^\circ - H_0$ （ H_0 为冬至日正午太阳高度角），此时塑膜光照透过量最大。但是满足该条件的温室脊高会太高，结构上不合理。而当非垂直入射时，有投射角 $\theta = 90^\circ - \lambda = \alpha + H_s$ （ H_s 为太阳高度角）。如前所述，当 $\lambda \leq 40^\circ$ 时的光照与垂直入射效果相差不大，即当正午满足 $\alpha = 90^\circ - 40^\circ - H_0$ 时，其光照与垂直入射效果差不多。

正午太阳高度角计算公式为 $H_0 = 90^\circ - \varphi + \delta$ ，（ φ 为纬度， δ 为太阳赤纬角）。冬至日太阳赤纬角为 -23.45° ，则有 $H_0 = 66.55^\circ - \varphi$ 。冬至日正午时刻 $\alpha = 55^\circ - H_0 = -16.5^\circ$ 。通常把满足 $\alpha = -16.5^\circ$ 的屋面采光角称之为合理采光屋面角。

从光线的反射率来考虑，在入射角未大于 40° 时，透过率的降低幅度不大，但是这种条件下，只是正午很短时间投射角达到 50° ；午前和午后绝大部分时间，太阳对温室采光面的投射角均小于 50° ，达不到合理的采光状态，也就不能更多地获取太阳辐射能。因此温室生产仅仅能保证冬至日正午能达到较好的光照条件

是不够的。经过多年的实践，农业专家提出了温室生产冬至日前后每天应能保证有 4 个小时以上较好的光照条件。也就是要求冬至日 10 时~14 时，太阳对温室前屋面的投射角都能大于或等于 50°。这样在进行日光温室采光设计时，应在冬至日正午入射角 40°为参数设计的合理采光屋面角基础上，在 北纬 32°~43°之间，增加 9.1°~9.28°。这就是张真和提出的合理采光时段理论的基本点。

考虑到太阳位置冬季偏低，春季升高的特点，对用于冬季的温室，主要透光面的坡度应大些，用于春季的温室，主要透光面的坡度应小些。另外，由于每天清晨和傍晚，太阳位置偏低，正午前后太阳位置偏高，透光屋面靠近低脚的部分，坡度应大些，靠近中脊部的坡度应小些。从这个角度考虑，温室前屋面的形状以采用自底角向后至采光屋面的 2/3 处为圆拱形坡面，后部 1/3 部分采用抛物线形屋面为宜。

图 6-10 为鞍 型日光温室不同位置 α 的变化情况。

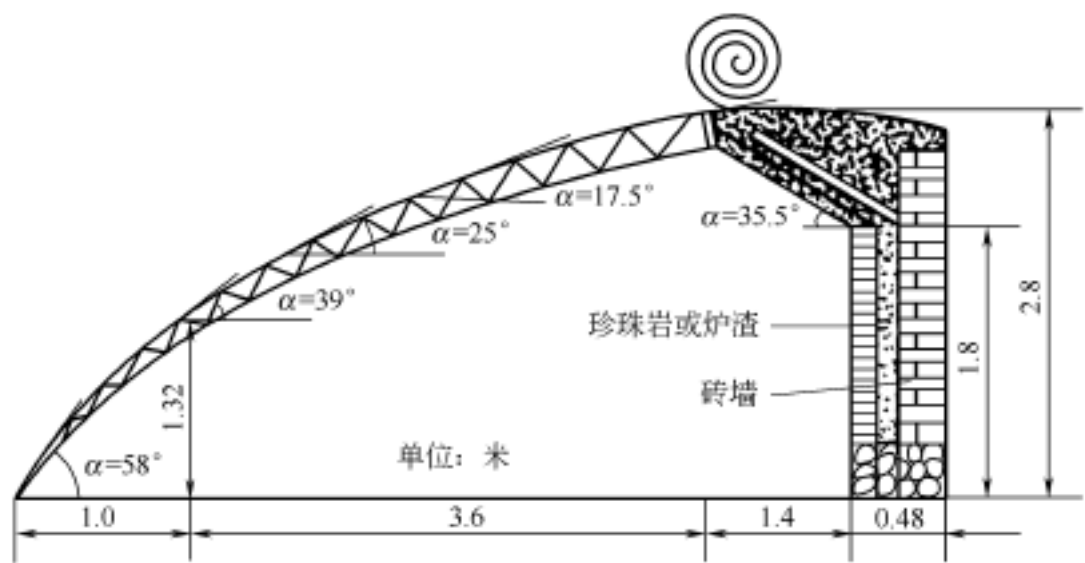


图 6-10 鞍 型日光温室结构示意图

由图 6-10 可以看出，该日光温室前屋面底角地面处的切线角度较大为 58°，这主要为了使温室整体结构、造型以及使用面积和作业空间更合理。

采光屋面形状的设计。节能型日光温室屋面形状有两大类：一类是由一个或几个平面组成的直线形屋面；另一类是由一个或几个曲面组成的曲线形屋面。这两种屋面形状相比较，以曲线形屋面为佳，曲线形状可采用椭圆、双曲线、半圆、对数、抛物线等，不论采用哪种曲线形式，光照效果差别不大，从而为曲线形屋面的设计提供了方便。

后屋面仰角和宽度的设计。日光温室后屋面仰角是指温室后屋面与后墙顶部水平线的夹角，后屋面宽度是指其水平投影长度。后屋面仰角和宽度对温室采光影响较大。后屋面仰角的设计以大于当地冬至正午时刻太阳高度角 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 为宜。在北纬 $32^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 地区，后屋面仰角应为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ，纬度越低后屋面仰角就应越大一些，反之则相反。后屋面不应太宽，否则春、秋季节太阳高度角增大时，室内遮阳面积过大，影响后排作物的生育和产量形成，一般后屋面的投影长以 $0.8 \sim 1.2$ 米为宜，过小不利于保温。后屋面的仰角应视温室使用季节而定，但至少应略大于当地冬至正午的太阳高度角，以保证冬季阳光能照满后墙，以增加室内的热量。

结构比设计。结构比是指温室骨架材料面积与温室总透光面积之比。结构比小的温室，透光率高，反之则相反。木结构的温室，其屋面的结构比为 0.25 ；大型金属结构温室，屋面的结构比为 0.2 ，金属架的塑料温室，遮光率在 5% 。选择刚度大、尺寸小的建材，减少窗框、立柱是提高透光率的重要措施之一。

(2) 日光温室的保温设计 要使日光温室内的温度满足作物正常生育的需要，关键靠科学的采光设计，最大限度地获取太阳辐射能，同时还要尽可能阻止热量流失，用以维持作物生长必需的温度水平，所以合理的保温设计极为重要。日光温室的保温性与温室墙体结构，后屋面及前屋面的覆盖物等有关。

墙体。节能型日光温室的墙体有两大类：其一是单质墙体，即由单一材料做成的墙体，如土墙、砖墙、石墙等；其二是异质复

合墙体，即在墙体内层使用蓄热能力强的材料作承重墙，而在承重墙和外层保护墙之间则选用保温能力强的材料所建造的墙体。之所以建造异质复合墙体，主要是考虑到蓄热能力强的材料，其保温性能差，而保温能力强的材料，其蓄热能力差。所以，要想使温室墙体既保温又蓄热，就应采用异质复合保温墙体。异质复合多功能保温墙体结构如图 6-11 所示。

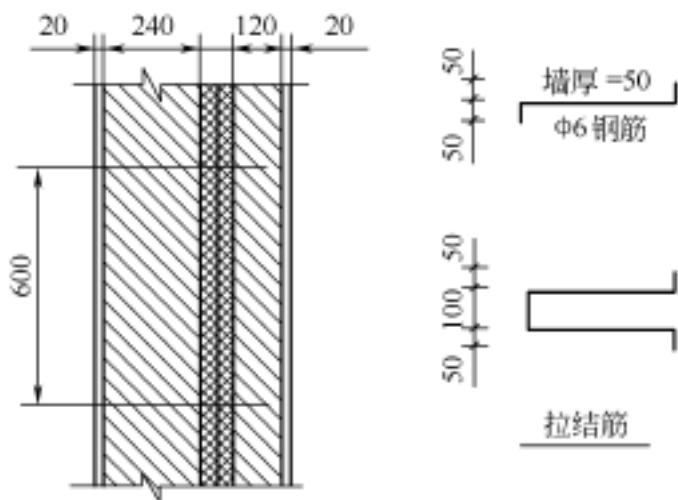


图 6-11 异质复合多功能保温墙体结构

异质复合墙之间所用的保温材料可采用珍珠岩、干燥处理的稻草、麦秆、炉渣灰等。部分墙体材料的导热性能见表 6-3。

表 6-3 材料热导率		瓦/ (米 ² · 开)	
材料名称	热 导 率	材料名称	热 导 率
砖	0.81	干木板	0.058
草 苫	0.086	炉灰渣	0.22
稻 草	0.093	聚苯乙烯	0.032 ~ 0.042
夯实土	1.16	加草黏土	0.76
珍珠岩	0.02 ~ 0.047	PVC	0.163
锯 末	0.093	PE	0.198
稻 壳	0.093	纸	0.14 ~ 0.23
芦 苇	0.14		

复合墙体保温层的厚度要由热阻计算给出。部分复合墙体的热阻见表 6-4。

表 6-4 复合墙体热阻值

序号	墙体结构(由内向外)	热阻/ (米 ² · 开/ 瓦)
1	24 厘米砖、3 厘米苯板、12 厘米砖	1. 22
2	24 厘米砖、4 厘米苯板、12 厘米砖	1. 87
3	24 厘米砖、6 厘米苯板、12 厘米砖	1. 82
4	24 厘米砖、8 厘米苯板、12 厘米砖	2. 22
5	24 厘米砖、10 厘米苯板、12 厘米砖	2. 62
6	24 厘米砖、12 厘米苯板、12 厘米砖	3. 02
7	24 厘米砖、珍珠岩 6 厘米、12 厘米砖	1. 48
8	24 厘米砖、珍珠岩 12 厘米、12 厘米砖	2. 33
9	24 厘米砖、空气间层 6 厘米、12 厘米砖	0. 80

后屋面。后屋面的主要功能是保温。后屋面保温对温室来说很重要，其保温性能应优于墙体，一般其热阻值要比墙体高 30 % 左右，其做法如图 6-12 所示。便宜的做法是采用稻、麦草作保温材料。后屋面的厚度的设置方面，在冬季较温暖的河南、山东和河北南部地区，厚度可在 30 ~ 40 厘米；东北、华北北部、内蒙古等寒冷地区，厚度应增至 60 ~ 70 厘米。

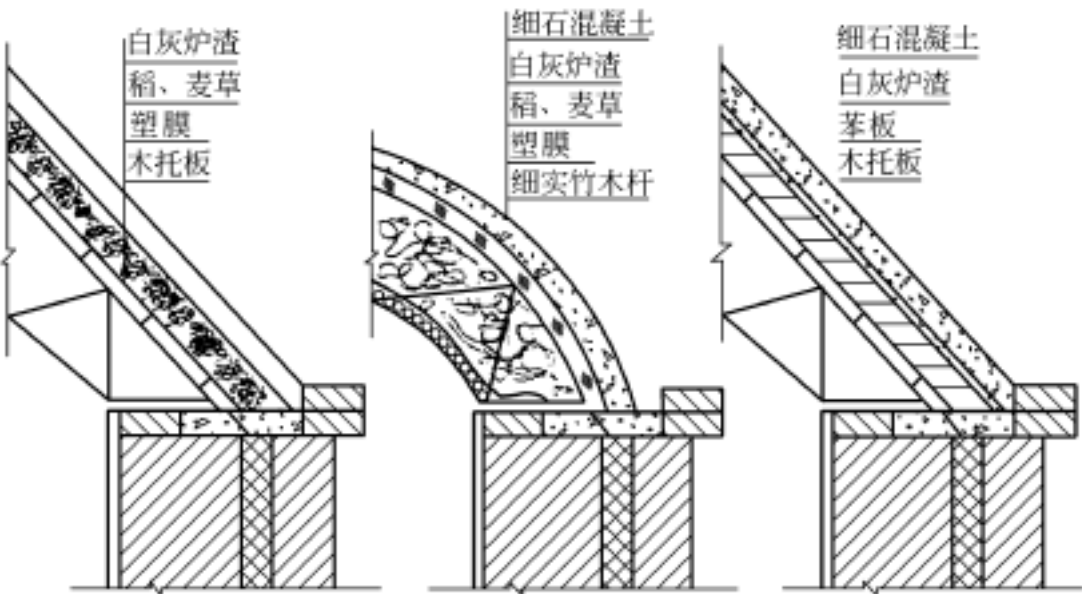


图 6-12 后屋面做法示意

以东北地区为例，后屋面较理想的做法自下而上是：20 毫米

厚木板（防腐处理或下铺一层采条布或塑膜）、120 毫米厚苯板、1:5 白灰炉渣找坡 80 毫米厚、30 毫米厚 C20 细石混凝土（内配大孔目的钢丝网）防水层。图 6-12 为几种后屋面做法示意。

前屋面覆盖。透明的前屋面夜间保温至关重要，作物温室主要的散热面，由其散失的热量约占温室总散热量的 73% ~ 80%。

在冬季气候较暖地区，一般以草苫覆盖；在寒冷地区则常常采取双层覆盖，即在草苫下再附加一层纸被，纸被一般由 4 ~ 6 层牛皮纸缝合而成；严寒地区则多以棉被和轻质保温被覆盖。草苫作为最传统的覆盖物，由于其本身热导率小，再加上其中间有许多层空气间隔，隔热保温性能良好，一般稻草苫保温效果为 6 ~ 10 。在草苫下加牛皮纸被不仅增加了空气间隔层，而且阻断了通过草苫缝隙处的散热，4 层牛皮纸被保温效果为 5 ~ 7 ，厚度为 0.1 毫米的 PVC 膜保温效果为 2 ~ 3 。

防寒沟。在严寒与寒冷地区，日光温室四周应设防寒沟，至少在南底脚应通长设防寒沟，对减少地中横向传热损失作用显著。一种做法是南地脚外侧或内侧用 50 ~ 80 毫米厚聚苯板埋入地面下 800 ~ 1000 毫米，另一种做法在南地脚外侧挖宽 400 毫米、深 500 ~ 600 毫米的槽，内填用塑膜包覆的稻、麦草或马粪等物，上部覆土盖实，覆土应向前有坡度避免渗水。

(3) 温室跨度及高度设计 温室跨度指从温室北墙内侧到南向透明屋面底角间的距离。温室跨度的大小，对于温室的采光、保温、作物的生育以及人工作业等都有很大影响。在温室高度及后屋面长度不变的情况下，加大温室跨度，会导致温室前屋面角度和温室相对空间的减小，从而不利于采光、保温、作物生育及人工作业。目前认为日光温室的跨度以 6 ~ 8 米为宜，若生产喜温的园艺作物，北纬 40° ~ 41° 以北地区以采用 6 ~ 7 米跨度最为适宜，北纬 40° 以南地区可适当加宽。

温室高度是指温室屋脊到地面的垂直高度。跨度相等的温室，降低高度会减小温室透明屋面角度和比表面积以及温室空间，不利于采光和作物生育；增加高度会增加温室透明屋面角度和比表面积

以及温室空间，有利于温室的采光和作物生育。据计算：在温室跨度为 6 米，温室高度为 2.4 ~ 3.0 米范围之内，高度每降低 10 厘米，其透明屋面角度大体降低 1°，这样，2.4 米高温室与 3.0 米高温室相比，其太阳辐射能减少 7% ~ 9%。但如果温室过高，不仅会增加温室建造成本，而且还会影响保温。因此，一般认为，6 ~ 7 米跨度的日光温室，在 北纬 40° 以北，如生产喜温作物，高度以 2.8 ~ 3.0 米为宜；北纬 40° 以南，高度以 3.0 ~ 3.2 米为宜。若跨度大于 7 米，高度也相应再增加。图 6-13 和图 6-14 分别为辽沈型和改进冀优型节能日光温室结构尺寸图。不同纬度日光温室结构参数见表 6-5。

表 6-5 不同纬度日光温室结构参数 米

高度 纬度	跨 度				
	$L = 6.0$	$L = 6.0$	$L = 6.0$	$L = 6.0$	后坡投影 L_2
32 °	$H_{01} = 1.95$	$H_{01} = 2.15$	$H_{01} = 2.34$	$H_{01} = 2.54$	1.00
	$H_{02} = 2.67$	$H_{02} = 2.94$	$H_{02} = 3.21$	$H_{02} = 3.48$	
33 °	$H_{01} = 1.97$	$H_{01} = 2.17$	$H_{01} = 2.38$	$H_{01} = 2.59$	1.20
	$H_{02} = 2.68$	$H_{02} = 2.96$	$H_{02} = 3.23$	$H_{02} = 3.51$	
34 °	$H_{01} = 2.07$	$H_{01} = 2.28$	$H_{01} = 2.50$	$H_{01} = 2.72$	1.20
	$H_{02} = 2.79$	$H_{02} = 3.08$	$H_{02} = 3.37$	$H_{02} = 3.66$	
35 °	$H_{01} = 2.17$	$H_{01} = 2.39$	$H_{01} = 2.62$	$H_{01} = 2.85$	1.20
	$H_{02} = 2.90$	$H_{02} = 3.20$	$H_{02} = 3.50$	$H_{02} = 3.81$	
36 °	$H_{01} = 2.27$	$H_{01} = 2.51$	$H_{01} = 2.74$	$H_{01} = 2.98$	1.20
	$H_{02} = 3.02$	$H_{02} = 3.33$	$H_{02} = 3.64$	$H_{02} = 3.96$	
37 °	$H_{01} = 2.32$	$H_{01} = 2.57$	$H_{01} = 2.82$	$H_{01} = 3.07$	1.30
	$H_{02} = 3.07$	$H_{02} = 3.40$	$H_{02} = 3.72$	$H_{02} = 4.05$	
38 °	$H_{01} = 2.43$	$H_{01} = 2.69$	$H_{01} = 2.94$	$H_{01} = 3.20$	1.30
	$H_{02} = 3.19$	$H_{02} = 3.53$	$H_{02} = 3.86$	$H_{02} = 4.20$	
39 °	$H_{01} = 2.53$	$H_{01} = 2.80$	$H_{01} = 3.07$	$H_{01} = 3.34$	1.30
	$H_{02} = 3.31$	$H_{02} = 3.66$	$H_{02} = 4.01$	$H_{02} = 4.36$	

续表

高度 纬度	跨 度				后坡投影 L_2
	$L = 6.0$	$L = 6.0$	$L = 6.0$	$L = 6.0$	
40°	$H_{01} = 2.53$	$H_{01} = 2.80$	$H_{01} = 3.09$	$H_{01} = 3.37$	1.50
	$H_{02} = 3.29$	$H_{02} = 3.65$	$H_{02} = 4.02$	$H_{02} = 4.83$	
41°	$H_{01} = 2.63$	$H_{01} = 2.92$	$H_{01} = 3.22$		1.50
	$H_{02} = 3.41$	$H_{12} = 3.40$	$H_{12} = 3.50$		
42°	$H_{01} = 2.74$	$H_{01} = 3.04$	$H_{01} = 3.35$		1.50
	$H_{02} = 3.53$	$H_{12} = 3.40$	$H_{12} = 3.50$		
43°	$H_{01} = 2.85$	$H_{01} = 3.16$	$H_{01} = 3.48$		1.50
	$H_{12} = 3.20$	$H_{12} = 3.40$	$H_{12} = 3.50$		

$\alpha_{12} = 32.47^\circ$ $\alpha_{12} = 34.22^\circ$ $\alpha_{12} = 35.42^\circ$

注： L 为日光温室内跨度。 H_{01} 为日光温室脊高低限值。 H_{02} 为日光温室脊高高限值， H_{12} 为介于 H_{01} 与 H_{02} 之间的值。

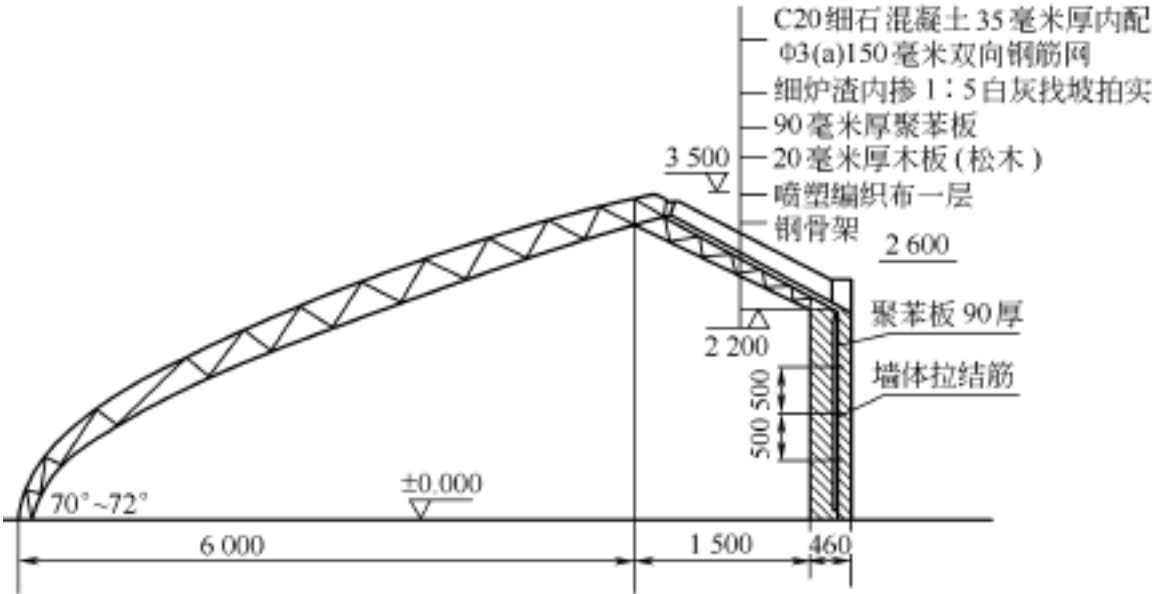


图 6-13 辽沈 型节能日光温室结构尺寸 (单位: 毫米)

(4) 温室骨架设计 日光温室屋面骨架材料在有条件的地方, 以选择强度较大的钢骨架为宜, 它适宜工厂化生产的日光温室, 可以保证温室无柱、断面小、遮光少且承载力高, 使用年限长, 维护少, 缺点是一次性投入较大。

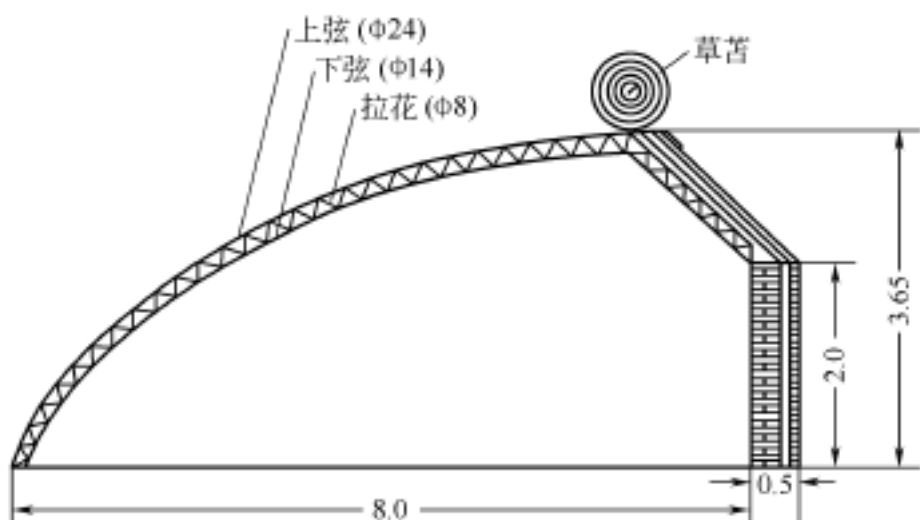


图 6-14 改进冀优 型节能日光温室结构尺寸 (单位: 米)

大跨度的钢骨架上弦一般为 $3/4$ " 钢管 (壁厚 2.75 毫米) 下弦用 $\Phi 14$ 钢筋、加强筋用 $\Phi 12$ 钢筋焊接制成; 跨度 7.0 米、7.5 米日光温室钢骨架一般上弦用 $1/2$ " (壁厚 2.75 毫米) 钢管, 下弦用 $\Phi 12$ 钢筋、加强筋用 $\Phi 10$ 钢筋焊接制作, 跨度不大于 6.5 米钢骨架一般上弦用 $1/2$ " 钢管或 $\Phi 12$ 钢筋, 下弦用 $\Phi 10 \sim \Phi 12$ 钢筋, 加强筋用 $\Phi 10$ 钢筋焊接制作。架距为 0.9 ~ 1.1 米。钢制骨架焊好后须平整, 平整后刷防锈漆, 立架时一定要保证钢制平面桁架的垂直度, 纵向拉结筋用 $\Phi 10 \sim \Phi 12$ 钢筋。

另一种较好无柱骨架为 GRC 材料制成, 即加筋的抗碱玻璃纤维增强水泥骨架, 其特点是轻质、高强、寿命长、免维护。与 GRC 骨架近似的近年发展起来的带筋轻烧镁材料制作的骨架使用效果也较好, 但强度不如 GRC 骨架。

竹木骨架, 由圆木立柱、柁木、檩木拱杆、悬梁等构成。一般温室纵向 3 米一根立柱, 横向 3 排, 柱顶部放柁木和悬梁。然后前坡放置 5 厘米左右宽竹片, 每 60 ~ 80 厘米宽一根, 后坡用檩条与后墙相接。

钢筋混凝土预制件与竹木拱杆混合骨架。这种骨架是柱、柁、檩采用钢筋混凝土预制件, 而拱架采用竹片或适当粗细的竹竿, 做法同竹木结构。

另一种是 8 镀锌铁线与竹木钢筋混凝土骨架。这种骨架是柱、椽、檩采用钢筋混凝土预制件，悬梁或斜梁用圆木杆或圆竹竿，其上纵向每 35 ~ 40 厘米拉一道 8 铁丝，作承重拉索，拉索在山墙外埋入地下，用地锚固定在铁丝上，每隔 70 厘米左右安细竹竿或竹片，其上覆膜。

无论采用哪种骨架，必须满足承重和风压、雪压的要求。我国部分城市风压、雪压参数如表 6-6 所示。

表 6-6 我国部分城市积雪深、雪压和风压

城 市	积雪深/ 厘米	雪压/ 帕	风压/ 帕
哈 尔 滨	41	450	400
齐 齐 哈 尔	17	300	450
长 春	18	350	500
沈 阳	20	400	450
大 连	16	400	500
天 津	16	350	350
石 家 庄	14	200	300
呼 和 浩 特	30	300	500
北 京	24	300	350
太 原	16	200	300
洛 阳	25	250	400
济 南	15	200	400
青 岛	19	250	500
西 安	22	200	350
乌 鲁 木 齐	48	600	600
银 川	17	100	500
兰 州	8	150	300
西 宁	18	250	350

(5) 温室场地选择 从采光的角度考虑，为了充分采光要选择南面开阔、干燥向阳、无遮荫的平坦矩形地块。在坡地上建设温室时，应选择向南或东南有小于 10 °的缓坡地较好，有利设置排灌系统，坡降走向北高南低。

考虑到风力和风向对温室的影响，为了减少放热和风压对结构

的影响，要选择避风向阳地带。冬季有季候风的地方，最好选在迎风面有丘陵、山地、防风林或高大建筑物等挡风的地方，但这些地方又往往形成风口或积雪过大，因此，在这些地方选址时，要事先调查了解当地的气象资料。另外，从有利通风换气和促进作物的光合作用的角度考虑，要求场地四周不要有障碍物，高温季节不窝风，所以要调查风向、风速的季节变化，结合布局选择地势。在农村宜将温室建在村南或村东，不宜与住宅区混建。为了有利保温和减少风沙的袭击而确保生产安全，还要注意避开河谷、山川等造成风道、雷区、雹线等灾害地段。

在场地土壤的选择方面，为适宜作物的生长发育，应选择土壤肥沃疏松、有机质含量高、无盐渍化和其他污染源的地块。一般要求壤土或沙壤土，最好3~5年未种过瓜果、茄果类蔬菜以减少病虫害发生。用于无土栽培的园艺设施，在建筑场地选择时，可不考虑土壤选择。为使基础牢固，要选择地基土质坚实的地方。否则修建在地基土质松软，如新填土的地方或沙丘地带，基础容易下沉，避免因加大基础或加固地基而增加造价。

考虑到灌溉的需要，要选择靠近水源、水源丰富，水质好，pH中性或微酸性，无有害元素污染，冬季水温高，最好是深井水的地方。为保证地温，有利地温回升，要求地下水位低，排水良好；地下水位高不仅影响作物的生育，还易造成高湿条件引发病害，也不利于建造锅炉房等附属设施。

为了便于运输和建筑，应选离公路、水源、电源等较近交通运输便利的地方。这样不仅便于管理、运输，而且方便组织人员实施对各种灾害性天气采取措施。为了使物料和产品运输方便，通向温室区的主干道宽度要保证可以使两辆汽车并行或对开。

温室区位置要避免建在有污染源的下风向，以减少对薄膜的污染和积尘。因为设施生产需要大量的有机肥，如果建温室群，位置最好选在有大量有机肥供应的场所，在规模化养鸡场、养猪场、养牛场和养羊场的附近。

6.1.2.4 模式能流分析与计算 模式的生产过程实际上是一个能量与物质的转化过程。在自然生态系统中，通过绿色植物的光合作用，太阳能被转化成为有机物的化学能，贮存于植物体内。这些贮存的化学能随绿色植物进入食物链。在流经食物链各环节的过程中，生物质被微生物消化分解，贮存的化学能亦经过不同的转化过程最终以热能的形式散失到空气中，这就是自然生态系统的能量流动过程。而以沼气为纽带的生态温室农业生态系统作为人为控制和管理生态系统，其能量流路径和流量大小不同于自然生态系统，而在很大程度上取决于对该系统的调控与管理，其实质上是对农业系统施加除太阳能以外的其他辅助能量，并通过合理的结构设计，尽可能提高太阳能和这些辅助能量转化利用效率，以增加系统的产出。而通过能流分析和计算，可以发现系统结构是否合理和生产过程中的薄弱环节，从而提出改进措施，以使模式的设计更科学、合理。

能流分析计算时，首先必须将整个系统的结构分析清楚，明确系统、子系统、亚子系统的边界。系统结构及其边界确定后，分析测定能量输入与输出，输入能包括自然输入能和人工辅助能，输出能包括产品、副产品及其废弃物所含的能量。从最低一级的亚子系统开始逐级测定汇总计算出整个系统的能量输入与输出，并绘制出表示系统各组分之间能量交换和流动的能流图。

这里选取“四位一体”模式为例对这类模式的能流情况进行介绍。

从模式大系统分析，进入模式的能量主要是太阳能，其次是辅助能（包括生物辅助能和工业辅助能），第三是自然辅助能。模式输出的主要是各种生物能和散失到环境中去的热能。

进入日光温室的太阳能，有 3 个方面的去向：一是被作物群体反射掉，约占总光能的 10% ~ 20%；二是被作物群体漏射到地面上，被土壤吸收，约为 50% ~ 80%，在高度繁茂的作物群体中，这部分光能可减少到 5% ~ 10%；三是被作物吸收，约占 10% ~ 85%。然而在作物可能吸收的光能中，并不是全部都能用

于光合作用，只有波长为 400 ~ 700 纳米的光，才能为作物叶绿体吸收，这一部分辐射称为光合有效辐射（PAR），约占太阳辐射总量（Q）的 47% ~ 49%。对 PAR 的最大利用率平均为 26.25%，这是光合作用的最大理论效率。实际上光合作用效率受很多条件的限制，最大太阳能利用率大致为 5%（对 PAR）及 2.5%（对 Q）。

除太阳能外，对生态系统输入的其他形式的能量，统称为生态系统的辅助能。农业生态系统接受系统外输入的辅助能，包括自然辅助能和人工辅助能，辅助以太阳辐射能为起点的食物链能量转化过程。自然辅助能的形式有沿海和河口的潮汐作用，风、雨、蒸发作用和流水等，由于“四位一体”生态温室系统是人工控制系统，自然辅助能对其作用可以忽略不计；人工辅助能包括生物辅助能和工业辅助能两种，前者指来自生物有机物的能量，如生物质燃料、劳力、畜力、有机肥、饲料、种子、种畜等，工业辅助能又称商业能、化石能，包括直接工业辅助能和间接工业辅助能，直接工业辅助能指石油、煤、天然气、电等形式投入农业生态系统的能量。间接工业辅助能指以化肥、农（兽）药、机具、农用塑料薄膜、生长调节剂和农用设施等产品形式投入的辅助能，这类以间接工业辅助能形式投入的物质，辅助食物链能量转化为主要的农业生产过程。

辅助能输入在人工生态系统中发挥着重要作用，辅助能主要通过改善农业生态系统中的一些生态限制因子，改善农业生态系统机能，从而提高农业生产力。此外，辅助能在高产良种和高产栽培技术等方面的应用也是增产的主要原因。向系统投入辅助能量的边际投入量和边际增产量之间的关系一般呈先升后降趋势。即使在人力、物力、财力比较充裕的情况下，也不应当向系统中毫无节制地投入辅助能量，而应使投能量最佳化。

这里将模式的系统分为 2 级，即模式系统和种植子系统、养殖子系统、沼气子系统 3 个子系统。3 个子系统与整个大系统的能量输入与输出情况见图 6-15。

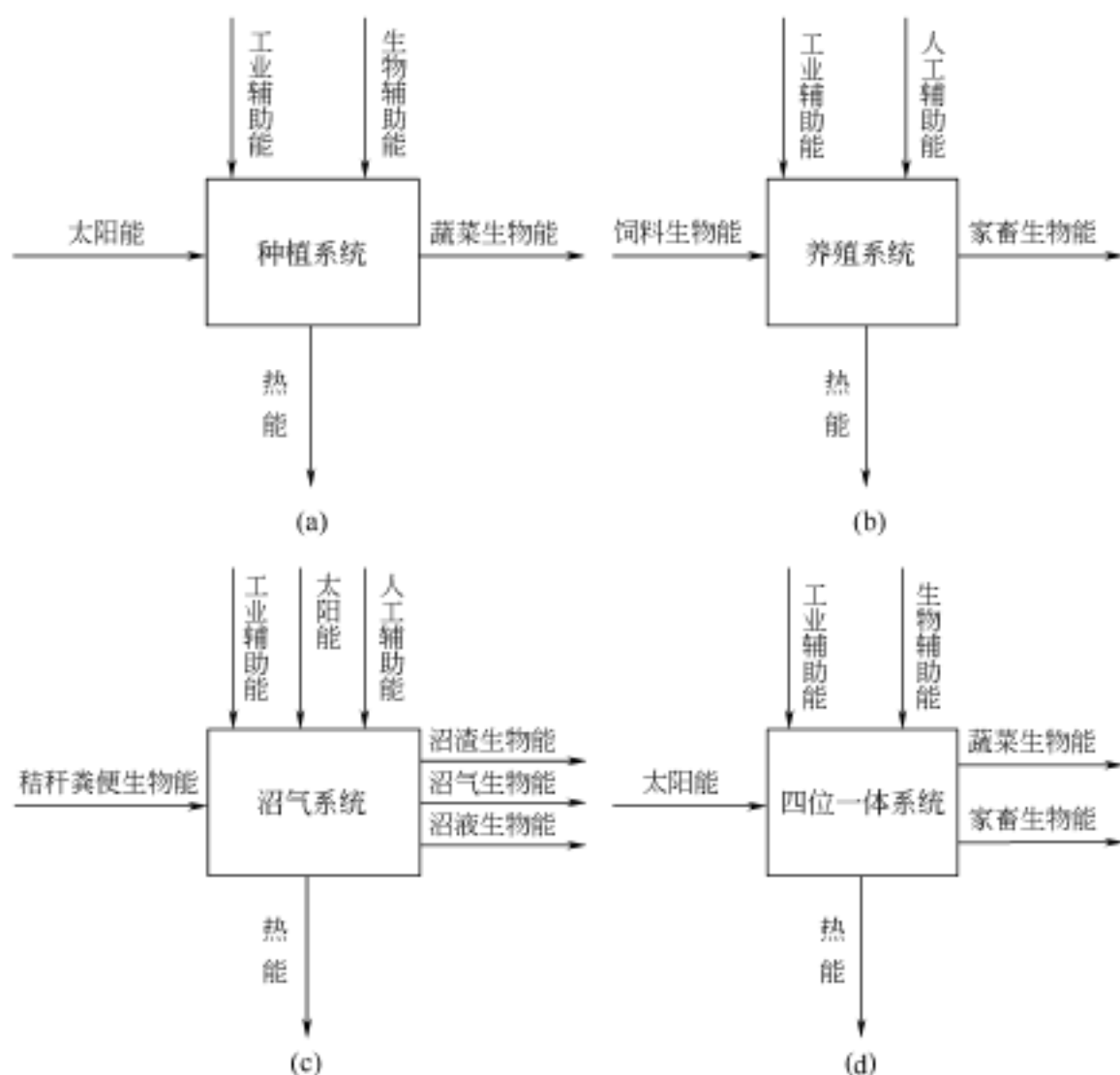


图 6-15 “四位一体”系统及其子系统能量平衡

根据系统和各个子系统的能量平衡图明确了各自的能量输入和输出后，接下来的工作就是对各项能量的大小进行测定，一些能量的测定方法可参考本章第二节相关内容。能量测定完成后，即可根据测定结构绘制能流图。图 6-16 为一“四位一体”生态温室模式的能流图。

为便于读懂能流图，下面对能流图所用到的系统符号语言及其用法加以简要介绍。

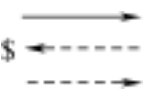


系统边框 (system frame): 用于表示系统边界的矩形框。确定系统边界应界定其三维空间，例如分析一个

城市系统要界定其政区边界、地表以下（如 10 米）界面和城市上空（如 100 米高）界面三者范围。



能量来源 (source, 或简称“能源”): 从系统边界外输入的各种形式的能量 (物质) 均为“能源”, 包括纯能流、物质、信息、基因、劳务等。所有从系统外界输入的“能源”均以圆形符号表示, 按太阳能值转换率由低至高顺序从左至右排列于矩形边界外, 左边下方从低转换率的太阳光能开始到上边、右边排列, 直到信息、人类劳务 (高转换率)。能量系统图的底边框则不绘任何“能源”符号。



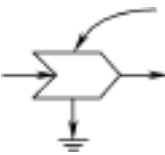
流动路线 (pathway line): 实线表示能流、物流、信息流等生态流的流动路线和方向; 虚线表示货币流; 个别要特别强调的物流可用点线表示。箭头表示流动方向, 有的线不带箭头表示流动方向不定或双向流动。



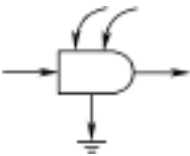
热耗失 (heat sink): 表示有效能 (available energy, 或潜能 potential) 消耗散失, 成为不再具有做功能力、不能再被利用的热能。此符号表示能量第二定律, 任何能量转化过程均有些能量耗散流失, 故此符号与生产者、消费者、贮存库、相互作用键、控制键等连接。通常在能量系统图四方框的底边绘一个热耗失符号, 与系统内存在热耗散的组分相连, 表示系统及各组分的热耗失。热耗失只用于表示耗散退化能, 故不与能物流路径连接。



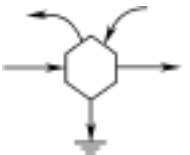
贮存库 (storage tank) 系统中贮存能量、物质、货币、信息、资产等的场所, 如生物量、土壤、有机质、地下水、海滩河丘等资源。“贮存库”为流入与流出能量的过渡; 流入与流出同一类型能量 (物质), 且度量单位相同。



相互作用 (interaction): 表示不同类别能流相互作用并转化成另一能流。低能值转换率的低能质能流从图左边进入, 较高能质的能流从上边进入; 经过相互作用而转化形成的能流从右边输出。不同能量相互作用和转化, 伴随部分能量耗散流失。



生产者 (producers): “生产者”符号绘于能量系统图内左方, 它接受不同类别的物质和能量, 经相互作用“生产”形成产品 (products)。因此, “生产者”包含不同类别能量的相互作用和贮存过程。有时为了更详尽表示, 可在生产者符号内绘上“相互作用键”和“贮存库”符号及它们的关联。“生产者”包括植物之类的生物生产者以及工业生产者等。



消费者 (consummers): “消费者”符号绘于系统图内右方, 它从生产者获取产品和能量, 并向生产者反馈物质和服务。生产者可以是动物种群, 或者是诸如社会消费群体等。“消费者”符号内常包含“相互作用键”和“贮存库”。消费者在系统中有不同等级之分, 一般没有详细表达; 二级消费者符合位于一级消费者的右方。

从图 6-16 可以看出, 该“四位一体”生态温室模式系统生产过程中, 共输入总能量 1109820 兆焦, 输出总能量 25630 兆焦, 输入与输出的比例为 43 : 1。在各种能量输入中, 太阳能是主要的能量来源, 占总能量输入的 93.43%, 辅助能输入中以有机肥为主体, 占辅助能输入的 59.98%。在能量输出中, 饲养系统较高, 占

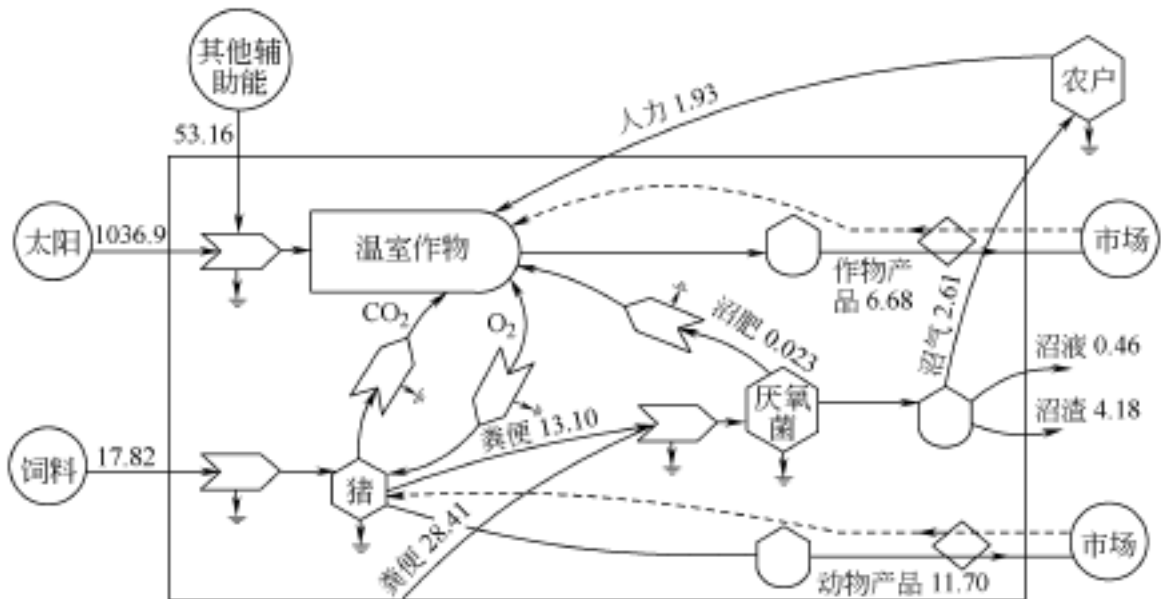


图 6-16 “四位一体”生态温室能流 (单位为 10³ 兆焦)

总能量输出的 45.65%，其次为沼气发酵系统占 28.28%，再次为种植系统占 26.07%。

从上述分析可以看出，该模式种植系统尚未达到我国种植业人工辅助能产投比 2.42 的高标准，也没有达到无机能投入全国高产 38.1 吉焦/公顷的水平。因此，对本例所提到的“四位一体”生态温室模式而言，还需对系统进一步进行优化设计。除种植系统因受光合作用效率的限制，且对于大多数作物目前已经实现了保护地高产栽培，光能利用率已经较高，产量上升空间较小外，在提高沼气发酵系统能量转化率、饲养系统饲料转化率和缩短育肥时间灯方面尚有很大的提升潜力。

6.2 以沼气为纽带的生态果园模式

6.2.1 模式组成、原理及特点

以沼气为纽带的生态果园模式的主要组成要件包括：沼气池、畜禽舍和果园。其中沼气池起着为果园的生产提供沼肥和沼气的功能，而畜禽养殖承担着为沼气发酵提供原料的功能。这类模式的设计依据生态学、经济学、能量学原理，以农户土地资源为基础，以沼气为纽带，以太阳能为动力，以牧促沼，以沼促果，果牧结合，建立起生物种群互惠共生、食物链结构健全、能量流和物质流良性循环的生态果园系统，充分发挥果园内的动植物及光、热、气、水、土等环境因素的作用，从而实现无公害果园的产业化和农业的可持续发展。

这种类型的生态农业模式较典型的有北方“中部地区生态果园”模式，南方“猪—沼—果”模式，西北“五配套”模式等。3 种模式的组成及功能示意图 6-17、图 6-18 和图 6-19。

这些模式的特点可以归纳总结为以下几点。

利用沼气的纽带作用，将养殖业、果树种植业有机联结起来形成的农业生态系统，实现了物资及能量在系统内的合理流动，从而最大限度的降低了农业生产对系统外物质的需求，即降低了对农药、化肥等农业基本生产资料的需求，增强了系统自我维持的能

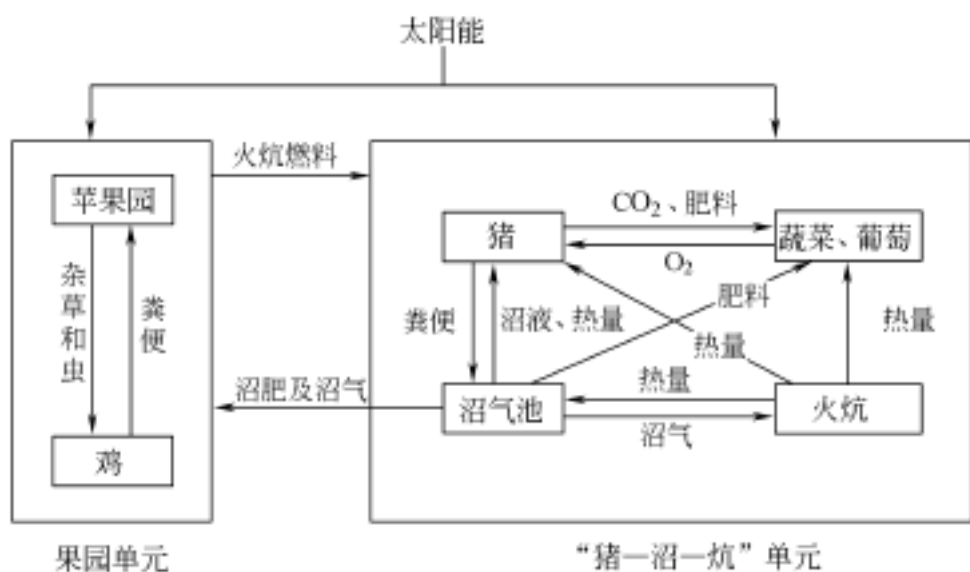


图 6-17 “中部地区生态果园”模式组成及能质流动示意



图 6-18 南方“猪—沼—果”模式组成及能质流动示意

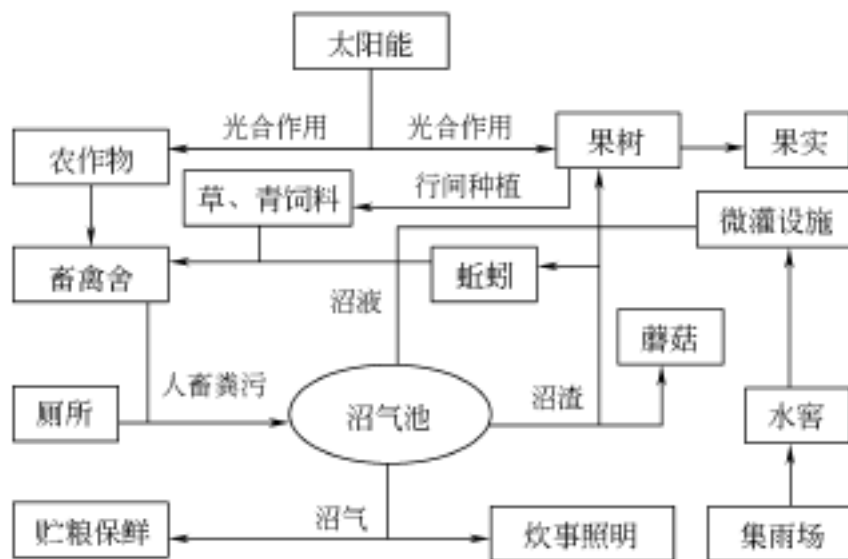


图 6-19 西北“五配套”模式组成及能质流动示意

力，同时，也使得农业生产的成本显著下降。

在基本内容相同的前提下，每种模式充分考虑了与其应用区域的地貌、气候、水土等特征相适应，如“五配套”模式考虑到我国西北缺水的显著，增加了水窖、滴灌等内容，而“中部地区生态果园”模式则考虑到当地冬季气候寒冷增加了猪舍火炕，从而体现了模式鲜明的地域性。符合我国地理纬度跨度大、地理、气候差别大的现实，为我国各地因地制宜的选择应用这种生态农业模式提供了技术保障。

这些模式都具有便于建造、操作和管理的特点，与我国农村的现有的经济基础和生产力水平相适应，从而为模式的大范围推广应用提供了可能。

在保证模式基本建设内容沼气池、果园、猪舍的前提下，模式建设内容易于扩展，如可增加沼渣种蘑菇、养殖蚯蚓，果园内养鸡、养林蛙等内容，可根据使用者的具体情况对模式建设内容进行丰富，从而最大限度的发挥模式的功能。

6.2.2 模式设计

6.2.2.1 模式结构布局 模式结构布局安排的总体指导思想是：在符合生态学原理的基础上，结构布局应有利于实现物质和能量的良性流动，有利于使用者的管理和操作，有利于平面和空间资源的最大限度开发和利用。因此，猪舍和沼气池原则上应建在果园内或者旁边，不宜远离果园。以上3种模式的结构布局情况见图6-20、图6-21、图6-22。

由于上述3种模式在建设内容的设计方面有其地域性，所以从设计的角度分析，内容和侧重点不尽相同，为便于分析，下面分别对3种模式的主要建设内容的设计加以阐述。

6.2.2.2 中部地区生态果园模式建设内容设计 从图6-17可以看出，模式的建设内容可以分为两部分，即果园和“猪—沼—炕”单元，这里重点介绍后者的设计。

(1) “猪—沼—炕”单元总体设计 该单元作为以沼气为纽带的生态型果园的主要的技术接口组合，在模式中发挥着为果园提供

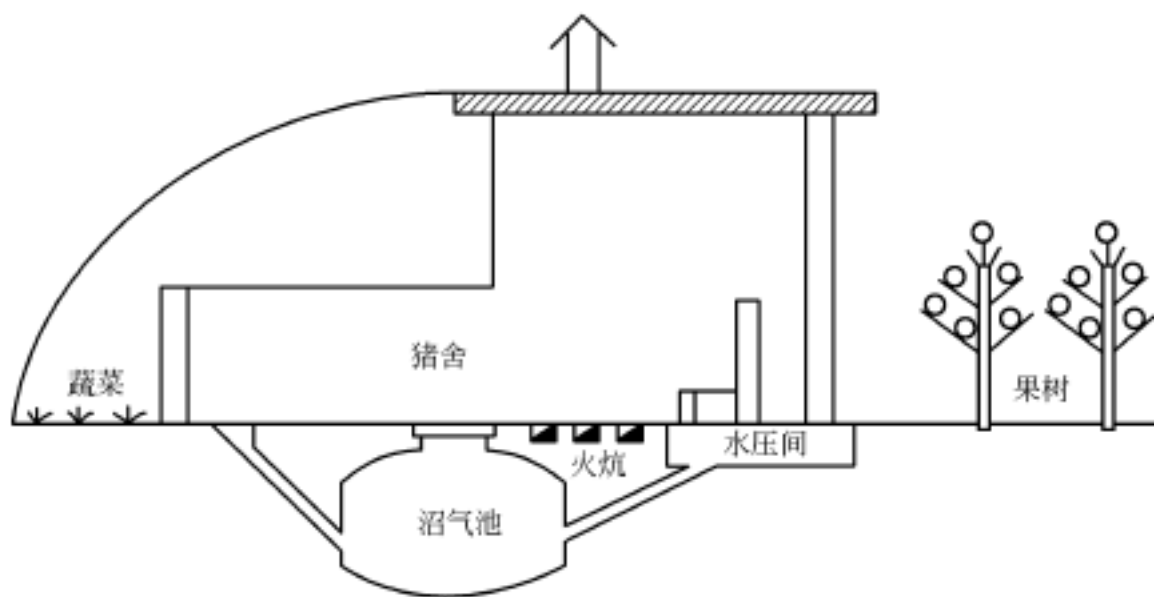


图 6-20 “中部生态果园”模式结构布局示意

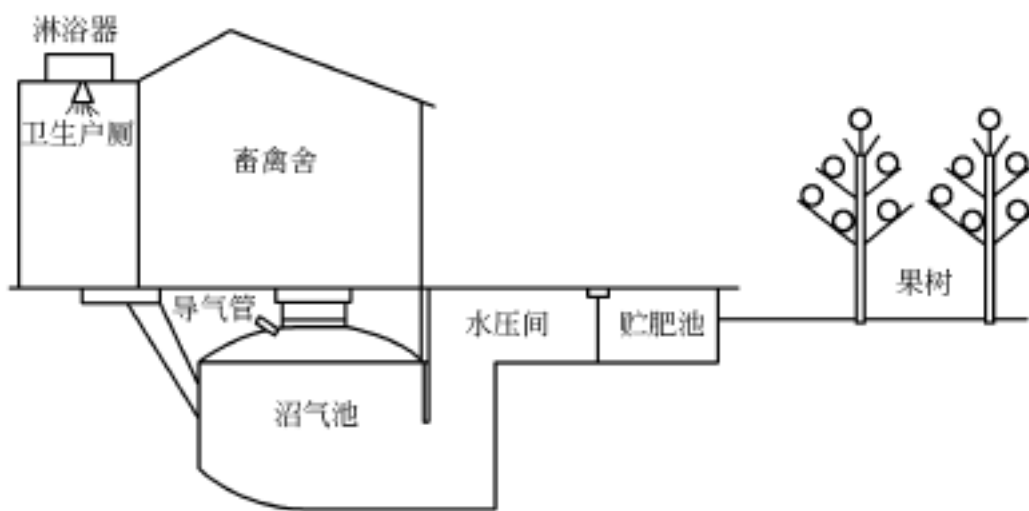


图 6-21 南方“猪—沼—果”模式结构布局示意

有机肥、杀虫剂、营养液、诱蛾燃料等功能，也就是为果园提供实现生态化生产所需主要物质的加工场所，所以其运行效果的好与差将直接影响着果园能否实现生态化生产。

该单元遵循以下工作原理。在果树生长季节，特别是夏季，温度较高，此时应给猪舍提供降温措施以利于猪的生长，该单元采取的措施是让葡萄等藤类植物在温室棚架上攀爬形成遮阳层。同时，这段时间环境温度可以很好地满足沼气发酵的需要，产生的沼气主

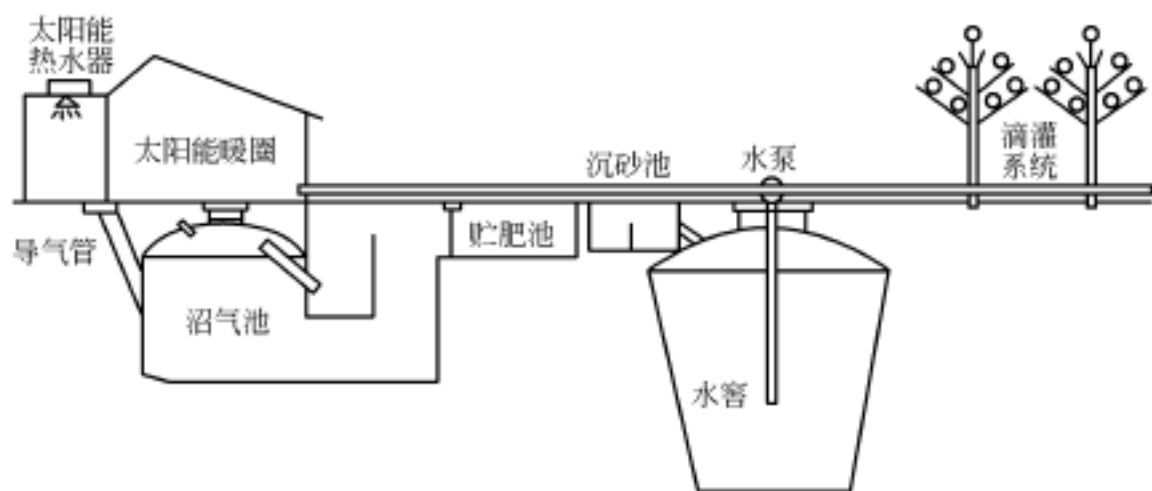


图 6-22 西北“五配套”模式结构布局示意

要用于诱蛾沼气灯，灭杀飞蛾，降低果园虫害的发生。沼液则喷施于果树叶面，一方面为果树提供速效养分，另一方面还可有效杀灭蚜虫、螨虫等害虫。到了冬季，环境温度下降，猪的生长和沼气发酵都受到影响，虽然通过温室可以起到加温的作用，但遇到下雪等阴雨天气，太阳能不起作用，为了解决这一问题，将火炕加温设施加入单元设计中。火炕可以解决两个方面的问题，一是为猪舍加温，二是解决了冬季沼气排空造成的空气污染问题。发酵产生的沼气通过火炕提高了猪舍和其下部的土壤的温度，加快了猪的生长速度，从而可以为沼气发酵提供更多的原料；同时猪舍温度的升高也使沼气池进料温度升高，反过来会进一步提高沼气池的产气率。所以通过火炕使该单元内部各组成构件之间形成了一个相互促进的有机链条。

(2) 火炕 从上面的论述可以看出，火炕的设置在于“猪—沼—炕”单元中发挥着重要的联结作用。单元设计过程中之所以采用火炕作为猪舍的加温设施，主要是考虑到火炕的热惰性较其他散热装置要大，也就是火炕停火后依靠其自身蓄热还可在相当长一段时间内为猪舍提供热量。另外为了满足养猪过程中对热水的需求，火炕设计成炕连灶形式。灶设计成双燃料灶，除了可以燃用沼气外，还可燃用薪柴——果园有大量修剪下来的果枝可供利用，所以灶膛按

燃用柴草进行设计。使用沼气时可以将沼气灶放进灶膛。

为了使炕面温度保持均匀，不致使局部温度过高，对猪造成伤害，在结构设计上采用花洞炕，建筑材料选用砖和混凝土。根据烟气在炕内的流动情况不同，可将火炕分为直洞炕和花洞炕（花直洞炕和花横洞炕），见图 6-23。从图 6-23 可以看出，花洞炕内烟气流动路径是迂回前进的，所以烟气行进路程长于直洞炕，从而延长了烟气在炕内的停留时间，加之花洞炕较直洞炕传热面积大，所以花洞炕的传热效果要优于直洞炕。

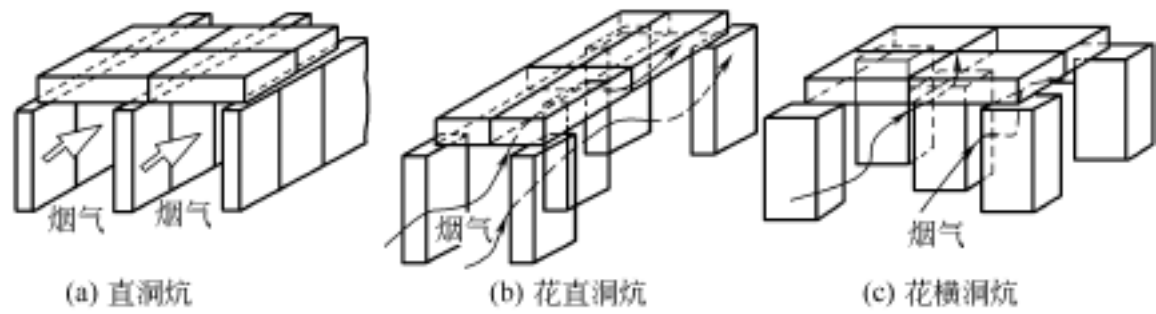


图 6-23 各种炕洞基本单元的组成示意

同时，为了增加烟囱抽力，要求烟囱保温性能好，考虑到这一点，设计中将烟囱与猪舍墙壁设计为一体，这样就可增加烟囱的保温性能，提高其抽力。火炕平面剖切结构见图 6-24。

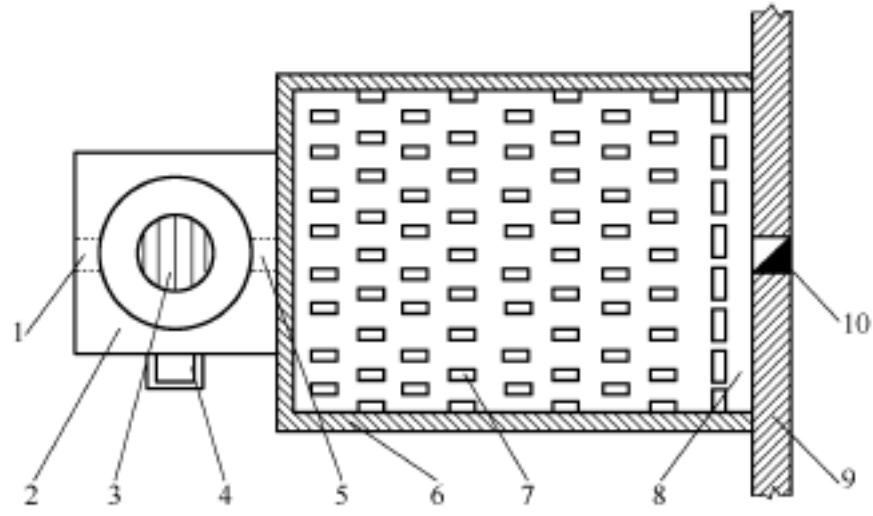


图 6-24 火炕平面剖切结构示意图

- 1—灶门；2—灶台；3—炉箅；4—落灰坑；5—喉眼；6—炕壁；
7—分烟砖；8—烟道；9—墙壁；10—烟囱

火炕的散热面积可根据以下公式进行计算。

$$F_{\text{炕}} = \frac{Q}{3.6\alpha(t_{\text{炕}} - t_{\text{内}})P}$$

式中 Q ——最冷月每天需火炕加热时间段猪舍散热量，千焦；
 α ——火炕与猪舍之间对流换热系数，瓦/（米²·摄氏度），
可取 3~4；
 $t_{\text{炕}}$ 、 $t_{\text{内}}$ ——火炕壁面温度和猪舍内部空间温度，℃；
 P ——最冷月火炕每天供热时间，小时。

散热量 Q 可根据下式进行确定。

$$Q = \frac{3.6PF_{\text{围}}(t_{\text{内}} - t_{\text{外}})}{\frac{1}{\alpha_{\text{内}}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{外}}}}$$

式中 $F_{\text{围}}$ ——猪舍围护结构总面积，米²；
 $t_{\text{外}}$ ——最冷月每天需火炕加热时间段猪舍外环境平均温度，℃；
 $\alpha_{\text{内}}$ 、 $\alpha_{\text{外}}$ ——猪舍围护结构内外表面换热系数，瓦/（米²·摄氏度）；
 δ ——猪舍围护结构各层材料厚度，米；
 λ ——猪舍围护结构各层材料的热导率，瓦/（米·摄氏度）。

(3) 猪舍 猪舍的设计重点考虑满足几方面的要求：猪的活动、喂食、冬季保温、通风、夏季降温、沼气池的进料等。猪舍的结构参见图 6-20。

猪舍的尺寸可按后墙高度 2.6~2.8 米，前墙高度 0.8 米，南北跨度 6 米进行设计，东西跨度以养猪规模大小按每头猪 1~1.2 米²的面积确定。在后墙处留 0.8~1 米宽的人行通道，猪床与人行道间的隔墙高 0.8 米，下边设饲槽。在后墙或左右墙靠后墙部位留出小门，门高 1.7 米，宽 0.7 米，以方便到猪舍作业，在后墙中央或左右墙距地面 1.3 米高出留高 40 厘米，宽 30 厘米的通风窗。

猪床要用混凝土浇筑，水泥砂浆抹平处理，要高出自然地面

20 厘米，猪床地面要按前低后高的方式抹成 5% 的坡度坡向沼气池进料口。在猪舍地面沼气池的进料口顶部要高出地面 2 厘米，顶口用钢筋做成算子，钢筋之间的距离以保证粪便顺利进入沼气池为宜。

猪舍前部的拱杆可采用竹竿、也可采用加筋的抗碱玻璃纤维增强水泥骨架，具体可根据当地的经济条件和资源条件加以确定。拱杆尺寸的设计可参考本章第一节日光温室设计部分。

(4) 沼气诱蛾灯 沼气灯光的波长在 300 ~ 1000 纳米之间，许多害虫对于 300 ~ 400 纳米的紫外线有较强的趋光性。夏秋季节，正是沼气池产气和各种害虫发生的高峰期，利用沼气灯光诱蛾在杀灭害虫的同时，还可利用捕杀的害虫养鸡、养鸭、养鱼，从而可以一举多得。

沼气灯与沼气池相距在 30 米以内时，用直径 10 毫米的塑料管作沼气输气管，超过 30 米时应适当增大输气管的管径。也可以在沼气管中加少许水，产生气液局部障碍，使沼气灯产生忽闪现象，增强诱蛾效果。为起到杀蛾的效果，在沼气灯下放置一只盛满水的水盆，水面上滴入少许食用油，当害虫大量涌来时，落入水中，被水面浮油粘住翅膀死亡，以供鸡、鸭采食。

点燃沼气灯诱蛾的时间应根据害虫前半夜多于后半夜的规律，掌握在天黑至午夜 12 时为宜。

6.2.2.3 南方“猪—沼—果”模式建设内容设计 南方模式的建设主要包括畜禽舍、沼气池和果园 3 部分，每个部分都是模式系统循环利用不可缺少的设施，建设的质量直接关系到模式能否发挥出好的效益。在模式设计时，应做到沼气池与猪舍、厕所的三结合。三结合的布置可根据图 6-25 进行选择。

以下重点介绍模式猪舍和果园的设计。

(1) 猪舍 猪舍地址选择不积水、向阳的缓坡，使猪舍阳光充足，地势高燥，利于冬季保温。同时，还需要对水源和土壤进行勘察，选择有充足水量，水质良好，便于取用和进行卫生防疫的水源，土质结实和渗水性强的砂质壤土处建场。同时要便于日常

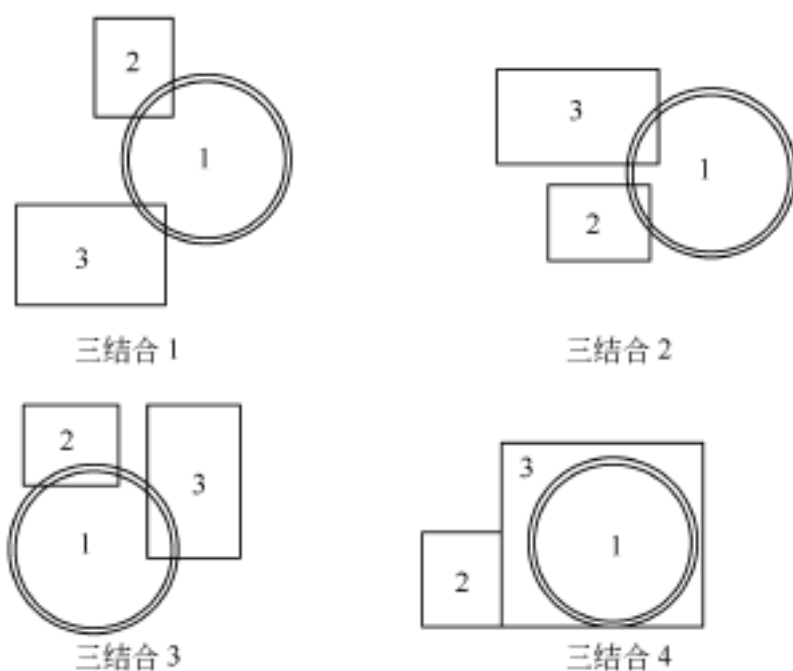


图 6-25 常用三结合沼气池布置示意

1—沼气池；2—厕所；3—猪舍

管理。

猪舍的朝向关系到猪舍的通风、采光和排污效果，要根据当地主导风向和太阳辐射情况确定。猪舍朝向一般为坐北朝南，偏东 12° 左右，或者坐西北朝东南。猪舍之间的距离，应以能满足光照、通风、卫生防疫和防火要求为原则，不要过大，也不宜过小，一般南向的猪舍间距离，可为猪舍屋檐高的3倍，其他类型的猪舍应为屋檐高的3~5倍。

猪床作为生猪活动的重要场所，其面积要适宜，做到既有效利用空间，又利于生猪的饲养。猪床的面积一般按一头妊娠哺乳母猪 5.5米^2 ，公猪 10.5米^2 ，断乳仔猪 0.5米^2 ，肥育猪 $0.9\sim 1.1\text{米}^2$ 的标准进行设计。猪舍活动场地的面积按每头成年猪 1.2米^2 的标准进行确定。

猪舍的窗直接影响保温和通风，应该根据猪床面积来确定，但是，南窗比北窗设置多些，一般以窗宽120厘米、高100厘米、距地面90~100厘米为宜。猪舍前墙一侧设置一个宽度为60厘米，高度为90~120厘米的门，向内侧开放。

猪舍外围应建排粪和污水沟道，沟宽 15 厘米、深 10 厘米，沟底呈半圆形，向沼气池方向呈 2% ~ 3% 的坡度倾斜。南方模式猪舍的剖面图和平面图见图 6-26、图 6-27。

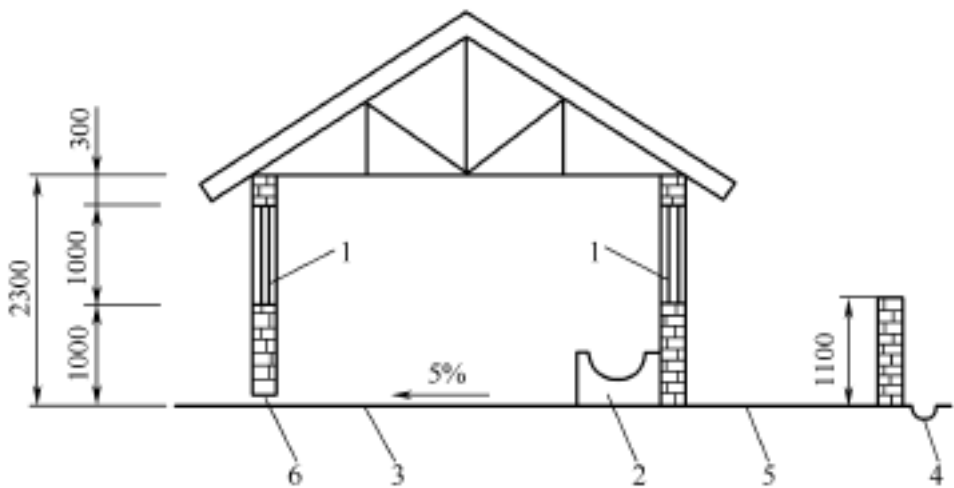


图 6-26 南方模式猪舍剖面图（单位：毫米）

1—通风窗；2—食槽；3—猪床；4—沟道；5—运动场；6—溢留口

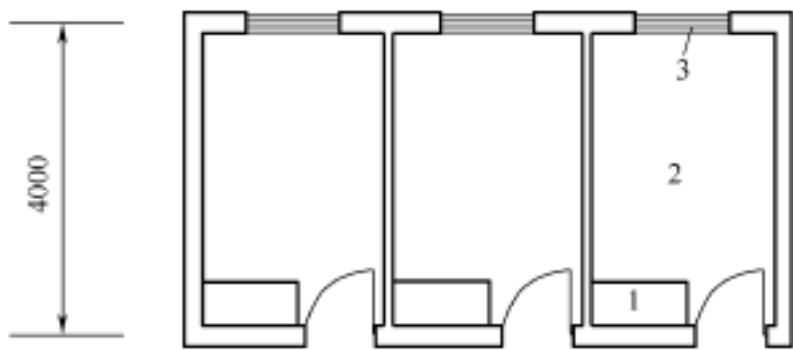


图 6-27 南方模式猪舍平面图（单位：毫米）

1—食槽；2—猪床；3—通风窗

(2) 果园 果园的气候条件、土壤肥力、地下水位等因素是影响果树生长的重要因素。因此，慎重选择坡地建园，对充分发挥模式的潜力具有极其重要的意义。园地选择好后，应按标准，高质量的建好果园，因为这直接关系到果园的经济生产能力。不同的果树品种，建园的要求是不一样的，针对我国南方地区栽培面积广的为橙类果树，且这类果树栽培技术和建园标准也比其他

果树要求高，同时，考虑到我国南方地区多为低山、丘陵的地理特征，因此，本节主要阐述在这类地区建橙类果树园的建园技术。

园地选择。园地的选择要考虑果树生长对气候、土壤、地形地貌和水源等要求。从气候角度考虑，应选择温度、湿度、降水、光照等条件适宜的地方；从对土质的要求考虑，应选择土层深厚、质地疏松、肥沃、保水保肥力强和排水良好的轻质砂壤土为好；在地形方面，没有过多的限制，平地、浅丘、深丘、山地、沙滩地和水库、湖泊周围及河流两旁隙地，都可以建园，但要注意避开“冷湖”和“风口”，以免造成冻害。在红壤丘陵地或山地建园，应选择的坡度在 25°以下的缓坡或坡地，在坡向上，应尽量选择坐北朝南、西、北、东三面环山、南面开口、冷空气能自行排出的地形，在河滩地、平地建园，则要求地下水位低于 1 米以上，否则会影响果树的生长；考虑到果园取水的方便性，园地应选择离水源近、取水灌溉方便的地方。

园地规划。园地建设前，应根据因地制宜、先进实用的原则，进行合理规划，以提高土地利用率，防止水土流失，方便果园管理。橙类果园建设要重点规划建好道路系统和水利系统。

道路系统的规划。果园的道路系统由主路、干路和支路组成。主路的位置应适中，贯穿全园，少占耕地，布局合理，便于运送果品和生产资料。主路是连接公路和果园的主要运输道路，力求精短，路宽须能保证通过大型汽车，可按 5~6 米规划。干路是果园内部、小区的联系线，路宽能保证小四轮汽车行驶则可，一般为 2.5~3 米。支路是生产机具和工作人员的通行道路，宽 1~1.5 米即可。对于修筑梯田的果园可以利用边埂作人行道，不必另开支路，对于小型果园，只要劳动强度不大，也可以不设置道路，以尽量利用有限的土地。

水利系统。果园内的水利系统主要有两个功能，即“排水”和“灌水”，因此水利系统的规划与设计也围绕着实现这两个功能来开

展。坡地建果园要在山顶设立贮水池，其大小以确保果园旱季灌溉为准，并设置排蓄水沟、纵沟和梯台背沟，三种沟相互畅通。在丘陵山地建果园，在最上层梯台的上方和山脚环山公路的内侧，都应各开一条排蓄水沟，以防止山洪冲刷园内梯台和公路，也可用于蓄水防旱。横沟大小根据上方集雨面积而定，一般沟面宽 1 米、底宽 0.8 米、深 0.8 米。山脚环山公路内侧沟可小一些。山腰横沟可不必挖通，每隔 10 米左右留一堤埂，比沟面低 20 厘米左右，横沟要与纵沟连通，做到排、蓄两便。纵沟是顺着果园上下的机耕道、人行道两侧开挖，宽为 0.4 米，深 0.2 米左右，在与两侧梯台内壁沟相连处挖一深坑，以缓冲水流，也可蓄水。在每个梯台内侧应挖一条背沟，与纵沟相连，深 0.2 米，宽 0.3 米左右，每隔 3~5 米挖一深坑，起防止水土流失和蓄水的作用。当然，沟道的规格不是一成不变的，主要是根据果园的排灌要求确定沟的大小。在平地建园，水利系统就不复杂了，重点是要在果园内和四周开挖畅通沟道，解决果园积水问题。

整地。整地包括修筑道路、排灌设施、修整梯台、挖定植沟等内容。

修筑道路、排灌设施。在果园规划完成后，钉上木桩，放线施工。首先修筑主路，然后修筑干路，最后修支路。道路修筑完成后，着手进行排灌设施的施工。首先开挖果园上方拦洪沟，切断山水，接着测定蓄水池的位置，开挖水池，然后挖出主干道、机耕道两侧的排水沟。

梯台修整。道路和排灌系统施工完成后，果园地即被划分成一个个的小区。在全园统一规划后，可以小区为单位施工，修筑水平梯台。根据坡地坡度的大小，可采用等高做梯台的方式建园， 15° 以上坡地，以做等高梯台为宜。梯台由梯面、梯壁、边埂和背沟组成。梯面宽度和梯壁高度因坡度大小而异，以脐橙为例，梯面宽度与梯壁高度可参考表 6-7。随着坡度的增大，梯面加宽，梯壁也相应增高，施工量也就越大，可采用复式梯地或隔坡式梯地，见图 6-28。

表 6-7 脐橙种植的梯面宽度与梯壁高度参考值

山坡坡度/ (°)	梯面宽度/ 米	梯壁高度/ 米	山坡坡度/ (°)	梯面宽度/ 米	梯壁高度/ 米
5 ~ 10	8	0.6 ~ 1.2	15 ~ 20	4	1.3 ~ 1.8
10 ~ 15	4 ~ 4.5	0.9 ~ 1.5	20 ~ 25	4	1.8 ~ 2.4

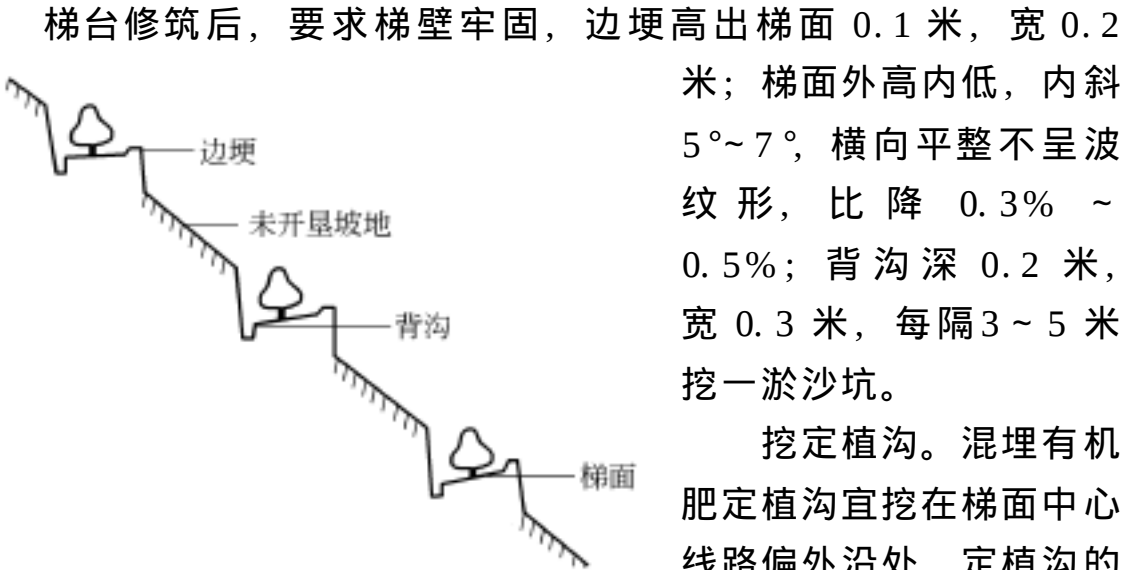


图 6-28 隔坡式梯地纵断面示意

植前，应在定植沟内混埋粗有机质作基肥，如绿肥、山草、畜禽粪等。待沟土下陷沉淀后，即可定植。

苗木定植。苗木定植是果园建设上的又一项重要内容，应注重苗木定植质量，否则会造成苗木成活率低，久久不能投产。

栽植密度。栽植密度要根据果树品系和砧木、栽培环境、栽培技术等因素综合分析确定，一般情况下，在丘陵山地种植橙类果树的株距为梯面宽度的 $\frac{2}{3}$ 。实施计划密植时可在两株间加密一株，而不能安排成梯面窄而株距宽的栽植方式，这样土地、光能利用都不尽合理。在平地栽植时，橙类果树常用的栽植密度为：株距 3.5 ~ 4.0 米，行距 3.0 ~ 5.0 米，每 667 米² 株数控制在 33 ~ 63 株。

栽植方式。果树栽植方式应在确定栽植密度的前提下，结合经济利用土地，便于管理等因素来决定。橙类果树常用的栽植方式有长方形、正方形、三角形和梯地等高栽植等。

长方形栽植。它是当前生产上广泛采用的一种栽植方式，特点

是行距小于株距，通风透光，便于机械操作和管理。橙类果树采用这种栽植方式有 2 米 × 1.5 米、3 米 × 1 米、4 米 × 1 米、3 米 × 1.5 米、3 米 × 2 米、4 米 × 2 米等不同规格。

正方形栽植。株距和行距相等，相邻 4 株相连而成正方形。其特点是通风透光良好，管理方便，但不宜于密植。

三角形栽植。这种方式株距大于行距，各行互相错开而呈三角形排列。此种栽植可提高单位面积上的株数，但不便于管理和操作。

等高栽植。适于坡地采用，这种栽植方式的通风透光条件也较好。

栽植准备和时期。果树栽植前，要先挖好栽植穴，施足底肥。每个定植穴施人、畜粪尿 10 ~ 20 千克，磷肥 0.15 ~ 0.5 千克，湿沼渣 30 千克，与土壤充分拌匀填入穴内。有条件的还可填营养土。定植穴完成一、二个月后，可选择春季种植，即果树春芽萌动前的 2 月底至 3 月，也可秋季栽植，即 9 月下旬至 10 月秋梢老熟后进行，春季种植苗木容易成活，秋季种植常会遇秋旱，要注意保证灌溉，且不宜太迟，以免气温过低，不利于根系生长和苗木恢复生机，冬季还应注意抗寒。近年来，赣南地区采取营养钵育苗方式，选择在初夏时节，即春梢老熟后的 5 ~ 6 月初种植，成活率也很高。但要防伏旱，及时做灌溉工作。

苗木定植。将苗木根系充分舒展后，覆满细土，并用手轻轻将苗木向上提，捅动数次，细土填满根际空隙；再用脚踏实后，覆盖一层松土至根茎处。定植苗木忌过浅过深，否则影响成活和生长。定植后，浇足定根水，待水渗透完后，再盖一层松土。定植 1 ~ 2 个月后，应注意及时进行病虫害防治、施肥、灌水和中耕除草等工作。春季发芽展叶后，应进行成活性情况检查，找出死株原因，及时补栽。

6.2.2.4 西北“五配套”模式建设内容设计 模式的主要建设内容包括沼气池、太阳能暖圈、集水系统、灌溉系统、蚯蚓养殖等主要内容，其中沼气池和暖圈的设计可参考其他章节，本节重点介绍

集水系统、灌溉系统、蚯蚓养殖等建设内容的设计。

(1) 集水系统 集水系统包括为果园配套的收集和贮蓄地表径流雨、雪等水资源的集水场、水窖等设施，除供沼气池、园内喷药及人畜生活用水外，还可弥补关键时期果园滴灌、穴灌用水，防止关键时期缺水对果树生育的影响。

集水系统规划设计主要考虑集水能力、水窖容积和为果园节水补灌一次的最低需水量等因子，保证一定面积的集水场能充分蓄积一定的水量，使之满足相配套的蓄水容量和补灌最低需水量。

集水能力设计。气候、地貌、土壤、植被及地面处理等是影响坡面产流的重要因素，在不考虑引导和输水损失时，集水场的集水量根据下式计算：

$$F_p = \frac{E_y R_p}{1000}$$

式中 F_p ——保证率等于 P 的年份单位集水面积上的全年可集水量，米³/米²；

E_y ——某种集水材料全年的集水效率，%；

R_p ——保证率等于 P 的年降雨量，毫米。

水窖设计。根据结构力学分析，采用拱形窖顶、圆台形窖体的水窖结构，能保证水窖窖体在蓄水和空置时都能保持相对稳定。这种结构的水窖容积和几何尺寸通过以下公式计算。

$$\text{窖顶} \quad V_1 = \frac{\pi f(3d_1^2/4 + f^2)}{6}$$

$$\text{窖体} \quad V_2 = \frac{\pi h(d_1^2 + d_2^2 + d_1 d_2)}{12}$$

式中 d_1 ——窖体上口净空直径，米；

d_2 ——窖体下口净空直径，米，根据理论分析和工程实践，
 $d_2 = d_1 - 0.5$ ；

h ——窖体深度，米，根据力学分析， $h = 1.5 d_1$ ；

f ——窖顶净空矢高，根据力学分析， $f = 0.25 d_1$ 为宜。

水窖容积 V 由一定集水面积的集水量 W 决定。

$$V = W = \frac{H_{24p} F N}{1000}$$

式中 H_{24p} ——频率为 P 的 24 小时最大降雨量，毫米，水窖设计一般取 $P = 10\%$ ；

F ——水平投影集水面积，米²；

N ——集水场地面径流系数，根据试验，土质路面、场院取 0.45；沥青路面、水泥场院取 0.85 ~ 0.9。

沉沙池设计。集水场蓄积雨水，经引水沟渠或暗管引至沉沙池，通过沉沙池降低径流水中的泥砂含量，沉沙池一般放在距水窖进水口 2 ~ 3 米处，长、宽分别由下列公式计算。

$$B = \sqrt{\frac{F_s Q}{5 V_e}} \quad L = 3 B \quad V_e = 0.563 D_c^2 (r - 1)$$

式中 B 、 L ——分别为沉沙池的宽和长，米；

D_c ——设计泥沙标准粒径，毫米；

r ——为泥沙颗粒密度，克/厘米³；

Q ——设计流量，米³/秒；

V_e ——设计标准粒径的沉淀速度，米/秒；

F_s ——蓄水系数，一般取 2。

(2) 滴灌系统 设计滴灌子系统是将水窖中蓄积的雨水通过水泵增压提水，经输水管道输送、分配到滴灌管滴头，以水滴或细小射流均匀而缓慢地滴入果树根部附近。结合灌水可使沼气发酵子系统产生的沼液随灌水施入果树根部，使果树根系区经常保持适宜的水分和养分。

滴灌指标设计。滴灌指标包括灌水定额 I 、灌水周期 T 和灌水时间 t 。

灌水定额是果树在某一生育时期 1 次灌溉的用水量，其值与土壤质地、年份、果树品种和生育阶段等因素有关，常根据下式计算。

$$I = \frac{0.1 h m (\beta_1 - \beta_2) r_1}{r_2}$$

式中 h ——计划土壤湿润层深度，厘米；

m ——土壤灌溉湿润比，%；

β 、 β ——分别为以土体积分数表示的适宜土壤含水量的上限和下限，%；

n_1 、 n_2 ——分别为土壤和水的容重，吨/米³。

灌水周期 T 是前后两次灌溉之间的时间间隔，常用下式计算。

$$T = \frac{I}{E_a}$$

式中 E_a ——灌溉中日耗水量，米³/天。

灌水时间 t 是完成一次灌水定额所需的时间，根据下式计算。

$$t = \frac{IS_1 S_2 \eta}{q}$$

式中 S_1 、 S_2 ——分别为滴头和毛管间距，米；

q ——滴头流量，升/小时；

η ——滴灌灌水利用系数。

(3) 输配水泵及管路、滴头 水泵的选型。水泵的选型包括泵型及牌号的选择，滴灌常用自吸式水泵。牌号的选择主要包括泵功率、设计扬程和流量，在原动机功率给定的条件下，实际选用的泵功率应为动力机功率的70%~90%。泵的设计扬程及流量依滴头的工作压力及滴水量选定，考虑到管路压力损失及滴头位置到供水水位的高差，泵的扬程可初步按滴头工作压力的1.2~1.4倍选取，待管路参数确定后重新选定。

输水管的选取。输水管常用低密度聚乙烯管 (SPE)，管内径及长度依照管路许可的压力损失，一般由下式计算确定。

$$[\Delta H] = H_y - H_g - H_s - \sum \Delta H_i$$

式中 H_y ——水泵的设计扬程，米；

H_g ——滴头的工作压力，米；

H_s ——滴头额定压力位置与水源水面的高差，米；

$\sum \Delta H_i$ ——管路中管件及吸水管部分的压力损失。

上述各项，仅管件的压力损失与输水管内径有关不能预先确

定，其余均可预先确定。一般管件压力损失较小，为简化计算，在预选管径时，可忽略不计。

输水管在给定流量条件下的真实压力损失 ΔH 可用下式计算。

$$\Delta H = S_0 Q^f L + \frac{4L\xi Q^4}{5g\pi^3 d^5}$$

式中 S_0 ——与管材内径有关的阻力系数；

f ——与管材有关的系数；

ξ ——弯管弯曲 180 时的阻力系数；

Q ——流量，米³/秒；

d ——管内径，毫米；

L ——管长度，米。

令真实压力损失不大于许可压力损失，即 $\Delta H \leq [\Delta H]$ ，并预先选出适当的管内径，便可求得管子的长度。

滴头的选取。滴头选取的主要依据为滴头的滴灌强度不超过土壤的允许滴灌强度，并考虑在原动机功率给定的条件下，所选用的泵能否提供所选滴头所需的工作压力及流量。一般选用抗堵性能好、使用寿命长的低压大流量滴头和调压式滴头，优选补偿式滴头和内镶式滴头。

(4) 蚯蚓养殖 蚯蚓是一种喜欢生活在富含有机质和湿润土壤中的环节动物，通过蚓体分泌多种酶来分解易腐性有机物，转化为自身或其他生物易于利用的营养物质，分解转化率约为每条每天 0.5 克。在适宜环境和充足食料的条件下，蚯蚓的生长繁殖速度极快，每年约为 50 倍。蚯蚓具有能够分解转化大量有机废物、快速富集养分和生长繁殖的生物特性。蚯蚓分陆生蚯蚓和水生蚯蚓两类，其中绝大部分为陆生蚯蚓，而在有机废弃物的处理工艺中绝大部分使用的为水生蚯蚓。

从设计的角度考虑，模式利用沼渣养殖蚯蚓主要是对蚯蚓养殖床的设计。要对养殖床进行合理设计，首先应了解蚯蚓的生长受哪些环境因素的影响。蚯蚓的生长繁殖主要受温度、湿度、酸碱度、光照和通气性等条件的影响。

温度与通风。蚯蚓属变温动物，它对温度适应范围较广，一般要求在 5~35℃ 之间，生长繁殖的最适宜温度为 15~25℃。当温度降到 10℃ 时蚯蚓停止饮食，降到 5℃ 以下时进入冬眠状态，当温度超过 30℃ 时生长发育受到抑制，温度达 35℃ 时进入夏眠状态，0℃ 以下和 40℃ 以上时会导致蚯蚓的大量死亡。蚯蚓是好氧动物，利用其体表进行呼吸，不断地吸收氧气，并排出二氧化碳。蚯蚓生长的温度环境与通气有很大的关系。在低温状态时，有机质内部的化学反应较缓慢，内外气体交换的速率可充分满足其化学反应中的耗氧需求，而所产生的二氧化碳等废气也可及时被交换出来，所以蚯蚓养殖床内温度可保持动态平衡，此时蚯蚓不会受到高温、缺氧及毒气的伤害。如果蚯蚓养殖床内部的温度随气温而升高到足以使好气性腐败细菌繁殖时，分解有机质的速率增大，内外气体交换的速率和交换量逐渐满足不了对氧的大量需求，最终发生了内部缺氧，从而可产生高热的发酵作用代替了氧化分解反应，高温和毒气将威胁到蚯蚓的生存。此时，这就需要设法增强蚯蚓养殖床的通气效果。气体流通程度的好坏与小气候环境的平衡运行具有至关重要的调节效应。通气良好，不仅仅是释放热量，平衡了温度，同时有力控制了有机质的毒性反应，保证了氧气的输入交换量和毒气的释放。为保证通气效果，应根据外界温度条件，对饲料堆放的厚度进行控制。

湿度。蚯蚓本身属喜湿性动物，其可在湿度为 45%~80% 的环境中生存。且在卵茧的孵化中，其对湿度的稳定性要求则更高。适当的湿度是蚯蚓体液平衡、酸碱平衡、代谢平衡的基本保证，是关系到蚯蚓生存的重要因素。因此蚯蚓的饲料必须经常浇水保持湿润，湿度过大过小都会影响到蚯蚓的生长发育。蚯蚓生活环境的湿度保持在 60%~70% 为最佳，低于 55% 不利于蚯蚓生长发育，低于 40% 会引起蚯蚓干瘪失水死亡，高于 80% 时，通气性降低，含氧量下降，易造成蚯蚓闷气或中毒死亡。

酸碱度。蚯蚓的生长繁殖与饲料的 pH 值有着密切的关系，蚯蚓能忍受环境的 pH 值范围比较大，大约在 5~9，但是其饵料

以中性或微酸性为好。超过此范围，蚯蚓就会出现脱水、变干、萎缩、体色变黑紫，感觉迟钝，或者往外逃走。

光照。蚯蚓对光的要求极其复杂，就其整体大环境而言，蚯蚓畏光避光，就其生理运动和生态要求而言又丝毫不可缺少光。光对于蚯蚓的生理运动，包括蛋白质的分解、维生素的合成等都显得十分重要。光对于蚯蚓生态环境中的多种平衡要素，如温度、通气、湿度等更显得不可缺少。光对蚯蚓生理运动过程中的需求量极弱，仅仅只需要散射光的反射即可满足能量的需求。在完全无光的条件下，蚯蚓会表现出各种相关的维生素缺乏症，从而严重地影响和破坏了肌体内蛋白质的分解与再合成，以致殃及蚯蚓的生命。但是蚯蚓又极其畏光，稍稍强烈的光，甚至是较强的散光也对蚯蚓的生理活动带来不利，一旦光照过强或时间过长，蚯蚓表皮即干枯、脱水，表皮对光的敏感性也很快减弱或丧失，自调信号中断，继而被光杀死。所以，在利用蚯蚓处理沼渣时，对光的控制一定要严格。

模式配套用蚯蚓养殖床的修建应因地制宜，可选择在大棚内建造，也可选择建在棚外，可建在地面上，也可建成半地下式。

采用半地下式蚯蚓养殖床，修建时自地面下挖 0.5 米深，地面上修砌 0.2~0.3 米，四周用砖砌（不用灰、泥灌缝），下面做成土底。上边盖细铁丝网、牛毛毡或黑色塑料薄膜，以起到防鼠、蟾蜍等天敌，以及遮光和防雨的作用。

采用地上式蚯蚓养殖床，修建时选择地势较高且向阳的地面作蚓床。蚓床下的泥土须拍实。床体用砖围砌，后墙高 1.3 米，前墙高 0.3 米。为防止积水渗进床内，床的四周需挖排水沟。为满足通风要求，床的两头留对称的风洞，后墙留排气孔。冬季床面要搭架覆盖薄膜防风，上面加盖草席保温。夏季拆除塑料薄膜，可在饵料上盖 10~15 厘米的湿草，并搭简易凉棚遮荫防雨。

6.2.3 模式能流分析与计算

本节以中部地区生态果园系统为例，并以孟州市东小仇镇中部地区生态果园模式示范工程为研究对象分析这类模式的能量流动情

况。首先将模式系统划分为生态型猪舍、沼气池、果园 3 个子系统。

6.2.3.1 生态型猪舍子系统 模式采用的生态型猪舍为砖木结构，主要由太阳能温室、微型地炕，猪舍、蔬菜区等部分组成，猪舍总面积 80 米²，其中温室内的蔬菜面积为 20 米²。该猪舍的前拱架用竹木材料搭成，冬季用塑料薄膜覆盖，并依靠微型地炕辅助供暖；夏季用葡萄、丝瓜等绿藤类植物遮荫，降低猪舍的温度。而在猪舍的南墙外部（猪舍皆为东西方向坐落）栽培一些蔬菜，形成太阳能日光温室蔬菜区。由于沼气池、猪舍与日光温室联建，其二氧化碳浓度明显高于普通日光温室的二氧化碳浓度，对蔬菜的生长非常有利，试验结果表明蔬菜的产量和质量都有明显提高，黄瓜和番茄的增产率在 20% ~ 30% 之间，维生素 C 和可溶性糖的含量分别增加 10% 以上，这是优于普通日光温室的一大特点。

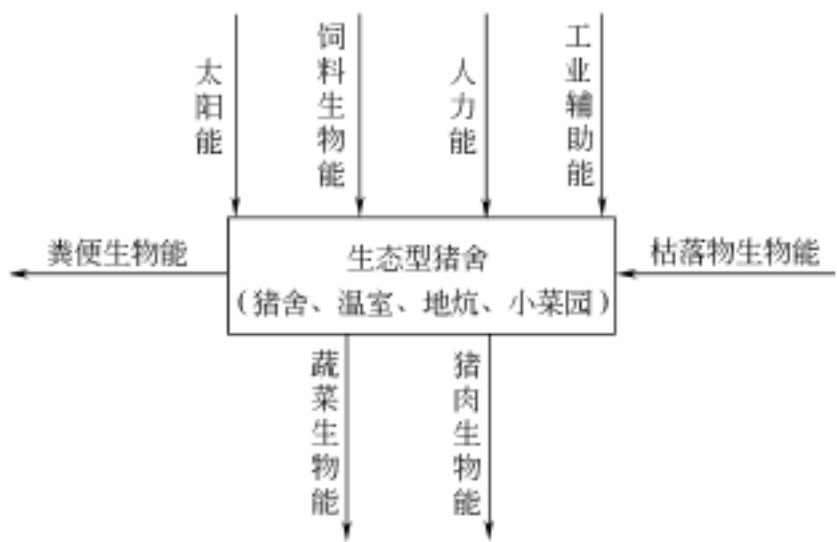


图 6-29 生态型猪舍子系统的能量平衡模型

在生态果园中的猪舍内部设微型地炕，冬季可烧枯落物（果树枝）向猪舍内供暖，每年出栏重 100 千克的猪 20 头左右，共需饲料 5 吨，其中需玉米 2.8 吨，麦麸 1.0 吨，专用饲料 1.0 吨，精饲料 0.2 吨，即料肉比为 2.5 : 1；按每头猪的年排粪便量 600 千克计算，每个果园出栏 20 头猪的年排粪量约为 12000 千克，粪便的干物质含量按 20% 计算，则年排干粪量（总固体量 TS）为 2400

千克。生态型猪舍内的 20 米² 蔬菜面积，年产蔬菜 250.0 千克左右。生态型猪舍子系统的能量平衡模型如图 6-29 所示，其能量计算测定结果如表 6-8 所示。

表 6-8 生态型猪舍子系统的能量平衡结果

项 目	每年数量	能量折算系数	能流量/ (兆焦/ 年)
太阳能输入	401760.00 兆焦	1.00 兆焦/ 兆焦	401760.00
饲料能	5000.00 千克	11.19 兆焦/ 千克	55931.50
人力能	578 小时	0.75 兆焦/ 小时	433.60
工业辅助能	30.00 千瓦时	11.90 兆焦/ 千瓦时	357.00
枯落物生物能	200.00 千克	17.50 兆焦/ 千克	3500.00
干粪便生物能	2400.00 千克	17.76 兆焦/ 千克	42624.00
蔬菜生物能	250.00 千克	0.88 兆焦/ 千克	220.00
猪肉生物能	2000.00 千克	16.87 兆焦/ 千克	33740.00

- 注：1. 劳动力工作时间的人力能折算系数平均按 0.75 兆焦/ 小时计算。
2. 工业辅助能主要指电力，其等价热值按 11.9 兆焦/ 千克计算。
3. 各类生物质能折算系数即低位发热量，按国家标准 GB 5186—85 实验测定。

6.2.3.2 沼气池子系统 本例所涉及的沼气池一般建在果园南端的太阳能温室内，池容为 10 米³，粪便自动进入沼气池，经发酵产生沼气，供给系统内居民煮饭、照明和夜晚用来诱捕蛾等用，沼渣作肥料用。平均每年进入沼气池的干猪粪（TS）2400 千克，年产沼渣肥（干重）1562 千克，年产沼气 840 米³，所产沼渣肥全部用于果园。沼气池子系统能量平衡模型如图 6-30 所示，其能量计算测定结果如表 6-9 所示。

表 6-9 沼气池子系统的能量平衡结果

项 目	每年数量	能量折算系数	能流量/ (兆焦/ 年)
干粪便生物能	2400.00 千克	17.76 兆焦/ 千克	42624.00
人力能	365.00 小时	0.75 兆焦/ 小时	273.75
沼气	840.00 米 ³	18.10 兆焦/ 米 ³	15204.00
沼渣能	1652.00 千克	15.82 兆焦/ 千克	26134.64

表 6-9 结果表明，该分系统的总能量输入为 42897.75 兆焦/ 年，其中输入的干粪便的生物质能占 99.36%。而系统的总输出能

为 41338.64 兆焦/ 年，所产沼气能量为 15204.00 兆焦/ 年，利用粪便生产沼气的能量转化率为 32.88%。而所产沼渣的生物能占总输出能的 63.22%，全部作为有机肥料代替化肥施用于果园，能生产出无公害苹果，并使苹果的含糖量增加，口感较好。

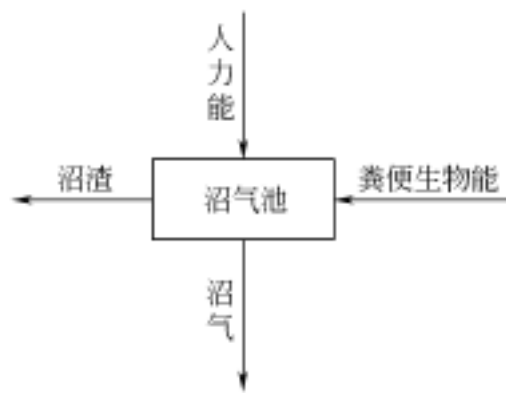


图 6-30 沼气池子系统能量平衡模型

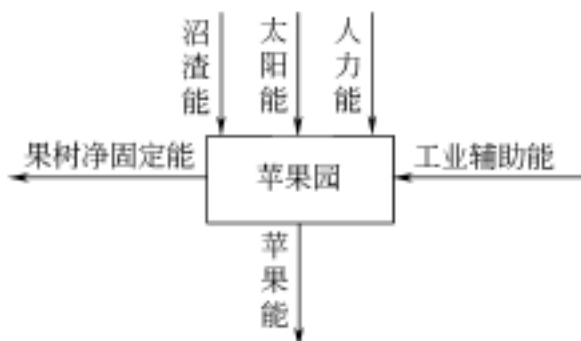


图 6-31 果园子系统能量平衡模型

6.2.3.3 果园子系统 本例中的苹果园面积为 0.3 公顷（即 5 亩左右），成龄苹果树 100 棵左右，树龄均为 8 年，采用长方形栽植方式，株行距为 4 米 × 6 米，年产苹果 10000 千克。试验结果表明孟州市全年的太阳总辐射能为 5022 兆焦/ 米²，而该示范点的苹果树从 3 月份开始长出第一片芽，到 11 月份叶子落完，在这 9 个月的时间内接收到的总太阳辐射能为 4264 兆焦/ 米²。同时，本文依据国家标准 GB 5186—85（生物质燃料发热量测试方法）规定的测试方法，测定出苹果树的空气干燥基低位发热量平均为 17.84 兆焦/ 千克，其各部分的空气干燥基低位发热量分别为树干 18.12 兆焦/ 千克、树枝 17.50 兆焦/ 千克、树叶 19.02 兆焦/ 千克、树根 15.88 兆焦/ 千克、苹果 18.98 兆焦/ 千克。可以明显看出，苹果树各部分的发热量因其土壤类型、生长季节、组成成分、日照强度、植物体内养分含量等的不同而有差别，其中苹果叶的发热量最高，果、枝、干次之，根最低。但苹果树的落叶均归还给土壤，落叶所贮存的能量在系统内继续传递和转化是土壤中微生物等生命活动的主要能源。因此，作为枯落物之一的落叶中蓄积能量是维持生态系统物质循环和稳定性的重要环节。同时，苹果树是一个动态生长过

程，该果园全年依靠光合作用净累积的生物质为 1000 千克，其净固定能量达 17840 兆焦/ 年，果园有效面积按 2900 米² 计算，则果树接收到的总太阳辐射能为 12365600 兆焦，即知该果园的光能利用率为 0. 14%。果园子系统能量平衡模型如图 6-31 所示，其能量计算及测定结果如表 6-10 所示。

表 6-10 果园子系统能量平衡结果

项 目	每年数量	能量折算系数	能流量/ (兆焦/ 年)
太阳能输入	12365600 兆焦	1. 00 兆焦/ 兆焦	12365600
工业辅助能	200 千瓦时	11. 90 兆焦/ 千瓦时	2380. 00
人力能	1095 小时	0. 75 兆焦/ 小时	821. 25
沼渣能	1652 千克	15. 82 兆焦/ 千克	26134. 64
苹果能	10000 千克	18. 98 兆焦/ 千克	189800
果树净固定能	1000 千克	17. 84 兆焦/ 千克	17840

6. 2. 3. 4 生态果园系统能量平衡 生态果园系统能量平衡依据能量转换与守恒定律，采用“黑箱”方法进行，其能量平衡模型如图 6-32 所示，能量平衡结果如表 6-11 所示。

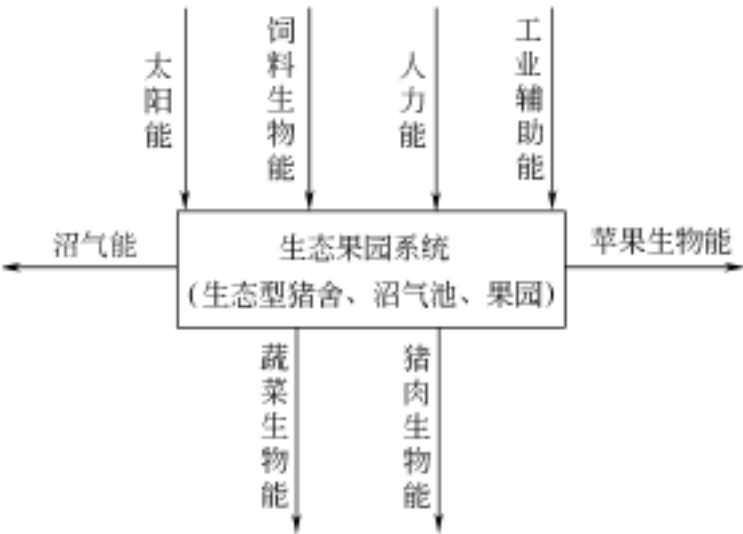


图 6-32 中部地区生态果园系统能量平衡模型

根据上述分析测定和计算结果绘制生态果园系统能流图，见图 6-33。图 6-33 所示中部地区生态果园系统能量流动情况表明如下。

表 6-11 中部地区生态果园系统能量平衡结果

项 目	每年数量	能量折算系数	能流量/ (兆焦/ 年)
太阳能输入	12767360 兆焦	1.00 兆焦/ 兆焦	12767360
工业辅助能	230 千瓦时	11.90 兆焦/ 千瓦时	2737
人力能	2038 小时	0.75 兆焦/ 小时	1528.60
饲料能	5000.00 千克	11.19 兆焦/ 千克	55931.50
蔬菜生物能	250.00 千克	0.88 兆焦/ 千克	220.00
猪肉生物能	2000.00 千克	16.87 兆焦/ 千克	33740.00
苹果能	10000 千克	18.98 兆焦/ 千克	189800
沼气能	840.00 米 ³	18.10 兆焦/ 米 ³	15204.00
果树净固定能	1000 千克	17.84 兆焦/ 千克	17840

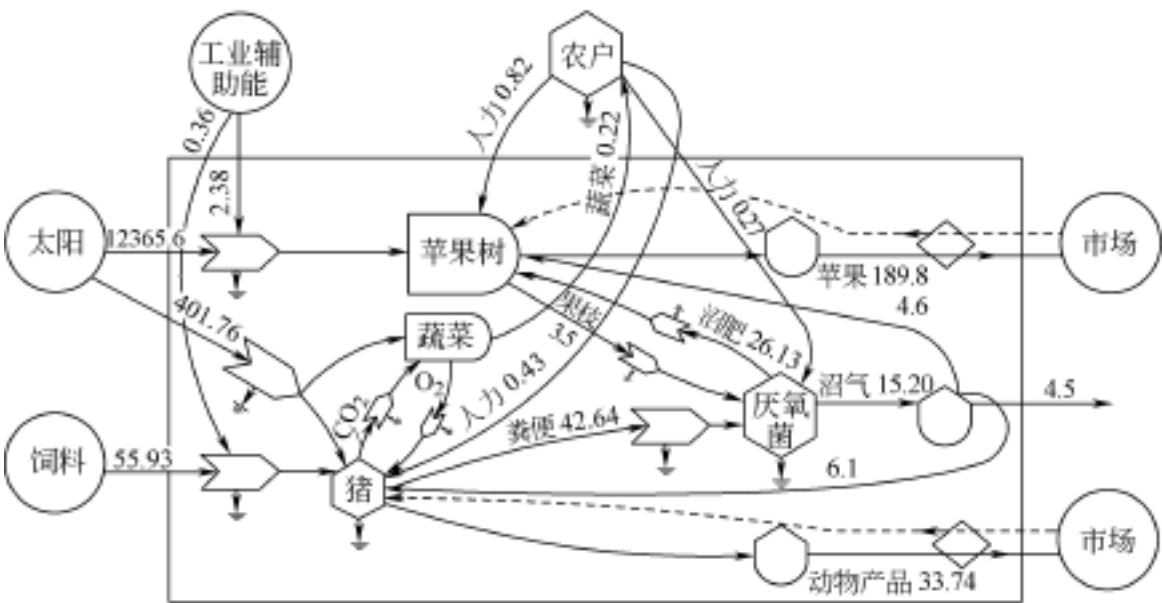


图 6-33 中部地区生态果园能流图 (单位为 10³ 兆焦)

整个生态果园系统输入的工业辅助能主要是电能，总输入量为 2737 兆焦/ 年，占除太阳能之外的总输入能的 4.55%，主要用于生态型猪舍和果园。

在整个生态果园系统的运行过程中，人力是不可缺少的主要动力，输入该系统的人力能总量为 1528.60 兆焦/ 年，占除太阳能之外的总输入能的 2.54%。用于生态型猪舍、沼气池和果园等子系统的人力能分别为 433.6 兆焦/ 年、273.75 兆焦/ 年和 821.25

兆焦/年，即分别占总人力能 28.37%、17.91%与 53.73%，表明人力能的 50%以上能量投入到了果园子系统。

生态型猪舍子系统输出的生物能为 76584 兆焦/年，其中猪肉生物能 33740 兆焦/年、蔬菜生物能 220.00 兆焦/年，占 44.34%，作为无公害农牧产品全部输出到系统外。而其余粪便生物能达 42624 兆焦/年，全部输入到沼气池子系统中进行沼气化无公害处理，并生产出 840 米³沼气和 1652 千克的沼渣，沼渣作为替代化肥的有机肥全部用于果园子系统，提高土壤肥力和果品质量。

生态果园系统的总输出能为 238964 兆焦/年，其中苹果能为 189800 兆焦/年，占总输出能的 79.43%，表明了苹果生产在生态果园系统的主体地位。同时，生态果园系统输出的猪肉生物能为 33740 兆焦/年，占总输出能的 14.12%，已成为生态果园系统输出的一个主要能流。

生态果园系统输入的太阳能为 12767360 兆焦/年，而系统内果树的太阳能转化率仅为 0.14%，当地利用太阳能的潜力还较大。

在生态果园系统的运行过程中，输入的饲料能 55931.5 兆焦/年，占除太阳能之外的总输入能的 92.91%，成为输入生态果园系统的一个主要能流。畜产品猪肉的能量输出为 33740 兆焦/年，且用饲料生产猪肉的能量转换效率高达 60.32%。

生态果园中的果树经光合作用，将输入到果园分系统中的太阳能等各种能量转化成生物质能，其中大部分以果品的形式输出到系统外，部分以落叶、枯枝的形式返还给果园，其余的部分则变成果树自身累积的生物质能，果树年净累积生物质约为 1000 千克，年净固定能量为 17840 兆焦/年。

6.3 以沼气为纽带的生态农场模式

6.3.1 发展背景

以沼气为纽带的生态农场是随着规模化养殖业的发展而发展起

来的。20 世纪 90 年代以来，随着中国经济的迅猛发展和人民生活水平的提高，以及政府制定的“菜篮子”工程的顺利实施，中国的养殖业得到了快速发展，且发展呈现出向集约化、规模化和现代化方向发展的趋势，规模养殖占总量的比例不断上升，规模越来越大，分布趋于集中。据统计，我国规模化养殖场的养殖量约占全国养殖总量的 10%，规模化奶牛场的养殖量约占全国养殖总量的 43%，规模化养鸡场的养殖量约占全国养殖总量的 20%。而且这些规模化养殖场有近 80% 集中分布在人口稠密、环境保护压力大的经济发达地区，如北京、山东、江苏、浙江、上海、广东、辽宁等地区。

随着畜牧业的快速发展，畜禽粪便的产量也在不断增加。据有关部门研究，1995 年中国猪、牛、羊及家禽产生的粪便量约为 17.3 亿吨，而到了 1999 年，仅规模化养殖场排放的粪便量就已接近 17 亿吨。但是，实际上由于大中型养殖场粪便一般采用水冲式进行收集，所以粪便污水的量要远远高于粪便量。如 1999 年中国规模化养殖场的粪便的排放量不足 17 亿吨，而实际排放的粪便污水总量却超过 200 亿吨，其数量是粪便量的 10 多倍。

养殖业的发展在改善人们的生活，促进经济发展的同时，也带来了严重的污染问题。畜禽粪便对环境的污染主要表现在 3 个方面，即水体污染、大气污染和土地污染。

畜禽粪便每年向水体排放的污染物的量是非常大的。据国家环保总局南京环科所和上海市对上海集约化畜禽养殖场粪便进行的调查，畜禽粪便进入水体的流失率高达 25% ~ 30%，据此保守估算 1995 年中国主要畜禽粪便污染物 COD、BOD、NH₃-N、TP 和 TN 的流失量分别为 728.26 万吨、498.83 万吨、132.20 万吨、41.95 万吨和 245.50 万吨。而同期工业废水的 COD 的排放量为 768.57 万吨，由此可以看出中国畜禽行业的 COD 排放量已接近全国工业废水的 COD 排放量。另外，中国氮肥的正常流失率在 8% ~ 20%，磷肥的正常流失率为 5%，按此计算，畜禽粪便氮、磷的流失量大于化肥的流失量，约为化肥流失量的 122% 和 132%。

因此，可以说，畜禽养殖污染正日益成为中国水体污染的主要因子。大量的氮、磷等营养元素排入水体后，会造成严重的水体富营养化问题。

畜禽养殖场刚排出的禽畜粪便含有氨气、硫化氢等有害气体，在未能及时清除或清除后不能及时处理时其臭味将成倍增加，产生甲基硫醇、甲硫醚、二甲胺及多种低级脂肪酸等有恶臭的气体，不仅危及周围居民的健康，而且也会影响场内禽畜的生长。同时养殖业还排放有大量的温室效应气体 CH_4 。作为温室效应气体的主要成分之一，其对全球气候变暖的贡献率大约为 15%，其中 70% 来自于农田土壤活动、农作物秸秆燃烧及禽畜养殖业等 3 方面。

由于大量的畜禽粪便得不到及时有效的处理，所以很多粪便被堆放在养殖场附近的土地上，长时间的堆放就会对土地造成污染。据资料报道，北京有大中型畜牧场 2500 家，蛋鸡场 901 个，因堆粪占据土地 1200 公顷。多个堆粪场附近的农田由于粪水的直接侵蚀使数千公顷的农田失去生产价值。此外粪尿中大量氮、磷渗入地下，使地下水中硝态氮、硬度和细菌总数超标。

为了控制畜禽养殖业带来的日益严重的环境污染问题，国家环保总局 2001 年 12 月发布了“畜禽养殖业污染物排放标准”（GB 18596—2001），该标准 2003 年 1 月 1 日开始实施。

对规模化养殖场废弃物的处理，目前多采用以生物处理为主的方法加以处理，其中以沼气处理技术为核心处理养殖粪便污水的能源与环境工程，由于其所具有的处理过程符合生态学规律，运行成本相对较低，且能使废弃物实现资源化利用等特点日益受到了重视，成为很多规模化养殖场处理污染物的首选工艺。

6.3.2 养殖场粪便污水沼气生态化处理模式

6.3.2.1 模式工艺流程 在规模化养殖场粪便污水处理工艺的设计方面，应遵循因地制宜的原则，根据养殖场的规模、位置、所处的环境等情况进行具体设计。从综合利用和生态化处理的角
度，目前常采取的有以下 3 种类型的工艺，见图 6-34、图 6-35、



图 6-34 综合利用模式 A 工艺流程



图 6-35 综合利用模式 B 工艺流程

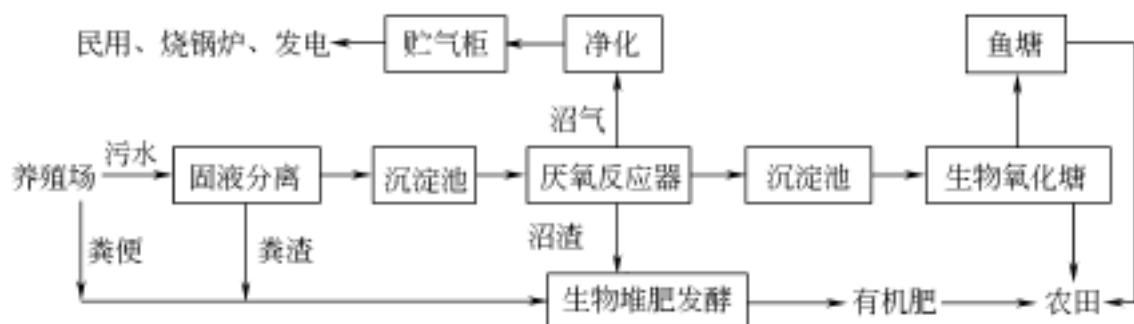


图 6-36 综合利用模式 C 工艺流程

图 6-36。

上述 3 种模式适应情况和工艺特点不尽相同，下面分别就它们各自的适应条件和特点加以说明。

(1) 模式 A 的适应条件及工艺特点 该模式适用条件：产生粪便污水量在 50 吨以下的养殖场，如出栏 5000 头以下的养猪场；养殖场周围应有较大规模的鱼塘、农田、果园和蔬菜地可供沼液、沼渣的综合利用；沼气用户与养殖场距离较近；养殖场周围环境容量大，环境不太敏感和排水要求不高的地区。

模式工艺特点：畜禽粪便污水可全部进入处理系统，进水 COD 为 10000 ~ 20000 毫克/升；厌氧工艺可采用全混合厌氧池、

厌氧接触反应器 (ACR)、升流式污泥床反应器 (USB); 有机负荷 $1 \sim 2.5$ 千克 COD/ (米³ · 天), HRT 为 $8 \sim 10$ 天, COD 去除率 $75\% \sim 85\%$, 池容产气率 $0.6 \sim 1.0$ 米³/ (米³ · 天), 厌氧出水 COD 为 $1500 \sim 3000$ 毫克/ 升; 沼气利用方式为民用或小规模集中供气; 沼液、沼渣进行综合利用, 建立以沼气为纽带的良性循环的生态系统, 提高沼气工程的综合效益。

工艺优点: 工艺简单, 管理、操作方便; 沼气的可获得量高; 工程投资少, 运行费用低, 投资回收期短。

工艺缺点: 工艺处理单元的效率不高; 处理后的浓度仍很高, 易污染周围环境; 污染物就地消化综合利用, 配套所占用的土地资源多。

(2) 模式 B 的适应条件及工艺特点 该模式适用条件: 大型农场, 有充足的土地可销纳沼液和沼渣, 沼气用于发电, 养殖场周围环境容量大, 环境不太敏感和排水要求不高的地区。

模式工艺特点: 畜禽粪便污水可全部进入处理系统, 进水 COD 为 $10000 \sim 20000$ 毫克/ 升; 厌氧反应器多采用塞流式反应器、厌氧塘; 有机负荷一般在 1 千克 COD/ (米³ · 天) 以下, HRT 为 $20 \sim 50$ 天, SRT 为 $50 \sim 100$ 天, COD 去除率 85% 左右, 沼气多用于发电; 沼液、沼渣用于农场土地灌溉, 提高沼气工程的综合效益。

工艺优点: 与模式 A 相同。

工艺缺点: 沼气产量受环境温度影响较大, 影响发电系统的稳定运行; 不适宜于完全采用水冲方式收集粪便的养殖场, 尤其在采用塞流式反应器条件下; 反应器达到稳定运行状态耗时较长, 可长达 $1 \sim 2$ 年; 厌氧塘防渗层出现问题时易对地下水造成污染。

(3) 模式 C 的适应条件及工艺特点 该模式适应条件: 日产生粪便污水量 $50 \sim 150$ 吨的养殖场, 如年出栏 $5000 \sim 15000$ 头的养猪场; 养殖场周围应配套有较大面积的稳定塘; 养殖场周围应有一定的环境容量, 对污染不太敏感, 排水要求一般的地区。

模式工艺特点：养殖场必须实行清洁生产、干湿分离，畜禽粪便直接用于生产有机肥料，尿和冲洗污水进入处理系统，进水 COD 为 7000 ~ 12000 毫克/升；厌氧工艺可采用厌氧滤器（AF）、上流式厌氧污泥床反应器（UASB）。有机负荷 2.4 ~ 4 千克 COD/（米³·天），HRT 为 5 天，COD 去除率 80% ~ 85%，池容产气率 1.0 ~ 1.2 米³/（米³·天），厌氧出水 COD 为 700 ~ 1500 毫克/升；污水后处理采用稳定塘或自然生态净化设施，HRT 为 50 ~ 100 天，出水 COD 为 150 ~ 500 毫克/升；沼气可用于民用、烧锅炉或小型发电；有机肥的生产一般采用简单的生物堆肥工艺。

工艺优点：工艺处理单元的效率较高，管理、操作方便；处理后排放的污水浓度较低，能基本满足农田灌溉的要求，而且对周围环境的影响较小；工程投资较少，运行费用低，投资回收期较短。

工艺缺点：需要配套较大面积的稳定塘对厌氧出水进行后处理，而且稳定塘的处理效果易受环境条件影响；由于粪便直接用来生产有机肥，所以沼气的获得量相对较低；处理后的污水仍需要一定的自然生态环境销纳。

6.3.2.2 模式典型案例

案例 1 杭州浮山养殖场沼气生态工程

杭州浮山养殖场是一个村办的养鸡、养猪、养鱼的综合性养殖场，并种植 32.47 公顷水稻、4 公顷茶叶、13.67 公顷西湖莼菜，年饲养蛋鸡 3 万只，肉鸡 12 万只，商品猪 5000 头。每天排放畜禽粪便污水 90 吨左右。1988 年建成 200 米³ 沼气工程，处理 3 万只蛋鸡的粪便污水；随后于 1990 年又建成 500 米³ 沼气工程，处理 5000 头商品猪的粪便污水。该项目应用厌氧生物技术对畜禽粪便进行资源化开发和多次利用，既制取了优质气体燃料，又开发了再生饲料和优质有机肥，同时治理了污染，从而建立起以沼气为纽带的良性生态循环。杭州浮山养殖场废水处理与综合利用工程工艺流程如图 6-37 所示。

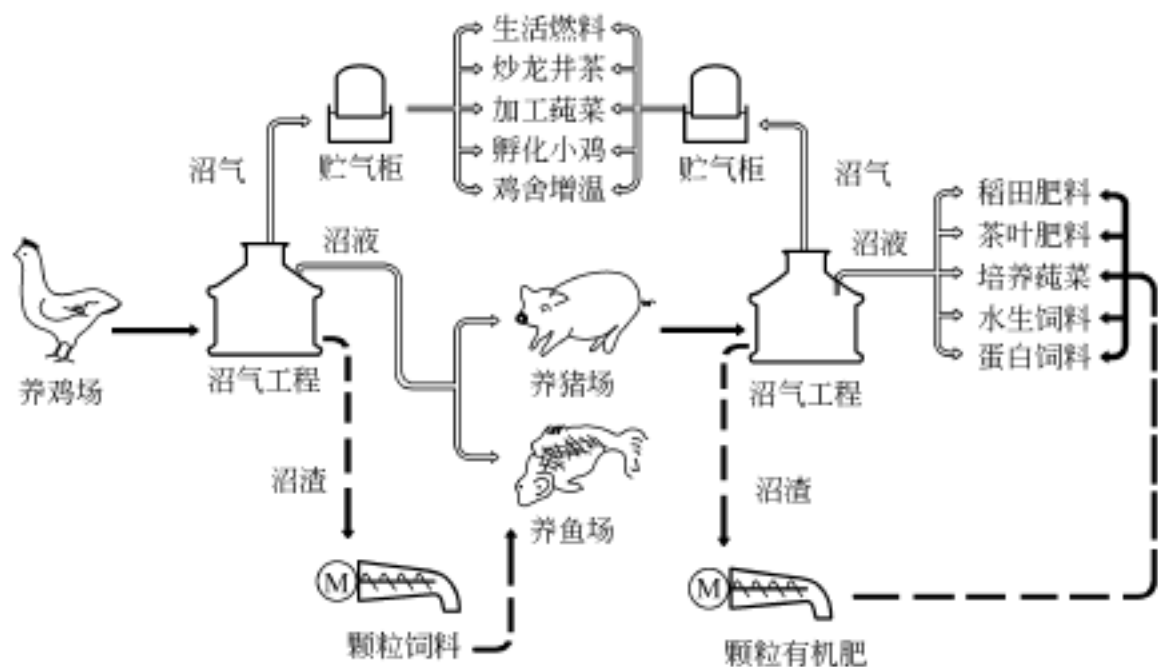


图 6-37 浮山养殖场沼气生态工程工艺流程

运行情况：4~11 月份常温发酵，温度范围 18~28℃，12~3 月份利用外加热源增温，发酵温度 18℃，具体运行情况见表 6-12。

表 6-12 杭州浮山养殖场厌氧反应器运行数据

项目 反应器	HRT / 天	有机负荷 [千克 COD (米 ³ ·天)]	进水 COD 浓度 (毫克/升)	出水 COD 浓度 (毫克/升)	COD 去 除率 / %	沼气平 均产量 (米 ³ /天)	装置产气 率/[米 ³ / (米 ³ ·天)]
鸡粪 UBF	6.6	2.8	16500	1600	80~90	246	1.24
猪粪 UBF	8	2.4	15270	1400	80~90	472	0.94

工程投资：包括建筑工程、设备及安装费用和土地费用。200 米³ 鸡粪 UBF 反应器，168900 元；500 米³ 猪粪 UBF 反应器，602545 元；合计 771467 元（1990 年造价）。

浮山养殖场应用沼肥替代化肥，用作农作物的基肥和追肥，显著降低了化肥的用量，降低生产成本，提高了粮食产量和品质。通过沼肥的应用，明显提高了土壤有机质的含量，改良了土壤结构，提高了土地肥力，将 200 亩低产田改造成了高产、优质、高效的“吨粮田”。沼肥应用产生的效果见表 6-13 和表 6-14。

表 6-13 沼肥应用替代化肥和粮食增产情况 千克/ 亩

年份 项目	1988 年	1989 年	1990 年	1991 年
化肥用量	154	120	98	45
粮食产量	725	809	913	962

表 6-14 连续使用沼肥 4 年后土壤改良效果

项目 试验区	有机质 / %	全氮 / %	碱解氮 / $\times 10^{-6}$	速效氮 / $\times 10^{-6}$	速效钾 / $\times 10^{-6}$
沼肥使用区	4. 77	0. 315	329	196	115
化肥使用区	3. 17	0. 199	207	25	72

案例 2 加利福尼亚奶牛场沼气生态工程

该奶牛场饲养有 1000 头奶牛，奶牛粪首先利用刮板进行清除，剩余的粪使用水进行冲洗，再加上挤奶间的冲洗水一起送进密封式厌氧塘内进行发酵，发酵产生的沼气用来发电，发电产生的余热用来加热奶牛冲洗水，在寒冷季节则用来为厌氧塘增温以保证沼气产率。该工程每年可产生 504111 千瓦时的电能，同时回收 2954 千焦的热能。由于农场有充足的土地，所以厌氧塘产生的沼肥就地用于农场的灌溉。该工程在取得良好生态效益的同时，也产生了很好的经济效益。工程为农场带来的收益情况是：净现值 NPV 达到 36075 美元，其中沼气发电占 23476 美元；内部收益率为 11.8%，沼气发电为 6.2%；投资回收期 6.2 年，沼气发电为 8.3 年。该养牛场废水处理与综合利用工程工艺流程见图 6-38。

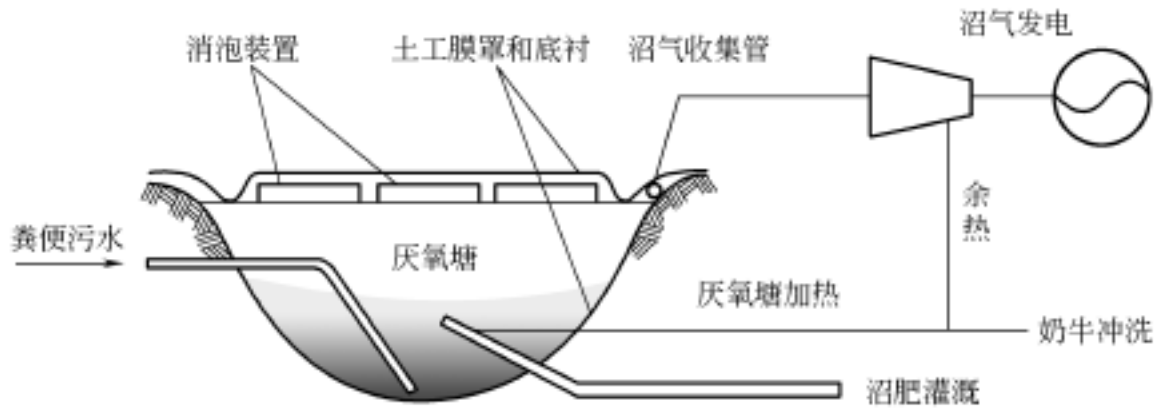


图 6-38 加利福尼亚奶牛场沼气生态工程工艺流程

案例 3 杭州市蛋鸡试验场沼气生态工程

杭州蛋鸡试验场饲养蛋鸡 20 万只，设计规模为年产鲜蛋 2500 吨，是杭州市重点菜篮子工程。由于集约化饲养，鸡粪相对集中，加上长流水槽及严格的冲洗消毒和防疫措施，污水排放量大。平均每天排放鸡粪 28 吨，污水 250 吨。为了解决鸡粪和污水的治理，1991 年投资 95 万元建成了 750 米³ 沼气发酵装置和配套的稳定塘和养鱼塘等。该蛋鸡试验场厌氧消化工艺采用二步厌氧消化和复合式上流厌氧污泥床发酵工艺，工程由固液分离、厌氧消化、沼气输配和后处理 4 部分组成。养鸡场每天产生的干鸡粪经收集、堆沤发酵后，作为肥料出售，收集率 80%，其余鸡粪与冲洗水混合，进入废水处理系统。厌氧处理单元采用 250 米³ 一级 UBF 厌氧反应器中温发酵，用于处理高浓度的鸡粪污水，采用 500 米³ 二级 UBF 厌氧反应器处理一级厌氧出水 and 其余冲洗污水，常温发酵。经厌氧消化后的出水，少部分作为营养液用于无土栽培和茶园肥料，大部分经跌落曝气后进入稳定塘和鱼塘，稳定塘总面积 2.67 公顷，分兼性塘、好氧塘和水生植物塘，处理后的出水 COD 浓度 100 ~ 150 毫克/升，达到环保排放要求，再流入鱼塘后排放。工程运行情况见表 6-15，工艺流程见图 6-39。

表 6-15 杭州蛋鸡场厌氧反应器运行数据

项目 反应器	HRT / 天	有机负荷 [千克 COD (米 ³ · 天)]	进水 COD 浓度 (毫克/升)	出水 COD 浓度 (毫克/升)	COD 去 除率 / %	沼气平 均产量 (米 ³ /天)	装置产气 率/[米 ³ / (米 ³ · 天)]
一级 UBF	4	3.36	14000	2400	80 ~ 85	320	1.28
二级 UBF	2	1.6	3200	800	75	300	0.6

6.3.2.3 模式用主要反应器类型

(1) 全混合厌氧反应器 全混合厌氧反应器又称传统或常规消化池，已有百余年的历史。消化池常用密闭的圆柱形池，如图 6-40 所示。废水定期或连续进入池中，经过消化处理的污水连同污泥一起排出消化器，在全混合反应器的溢流料液中，污泥的浓度同反应器里的浓度相同，也就是说固体连同污泥的滞留时间与水力滞

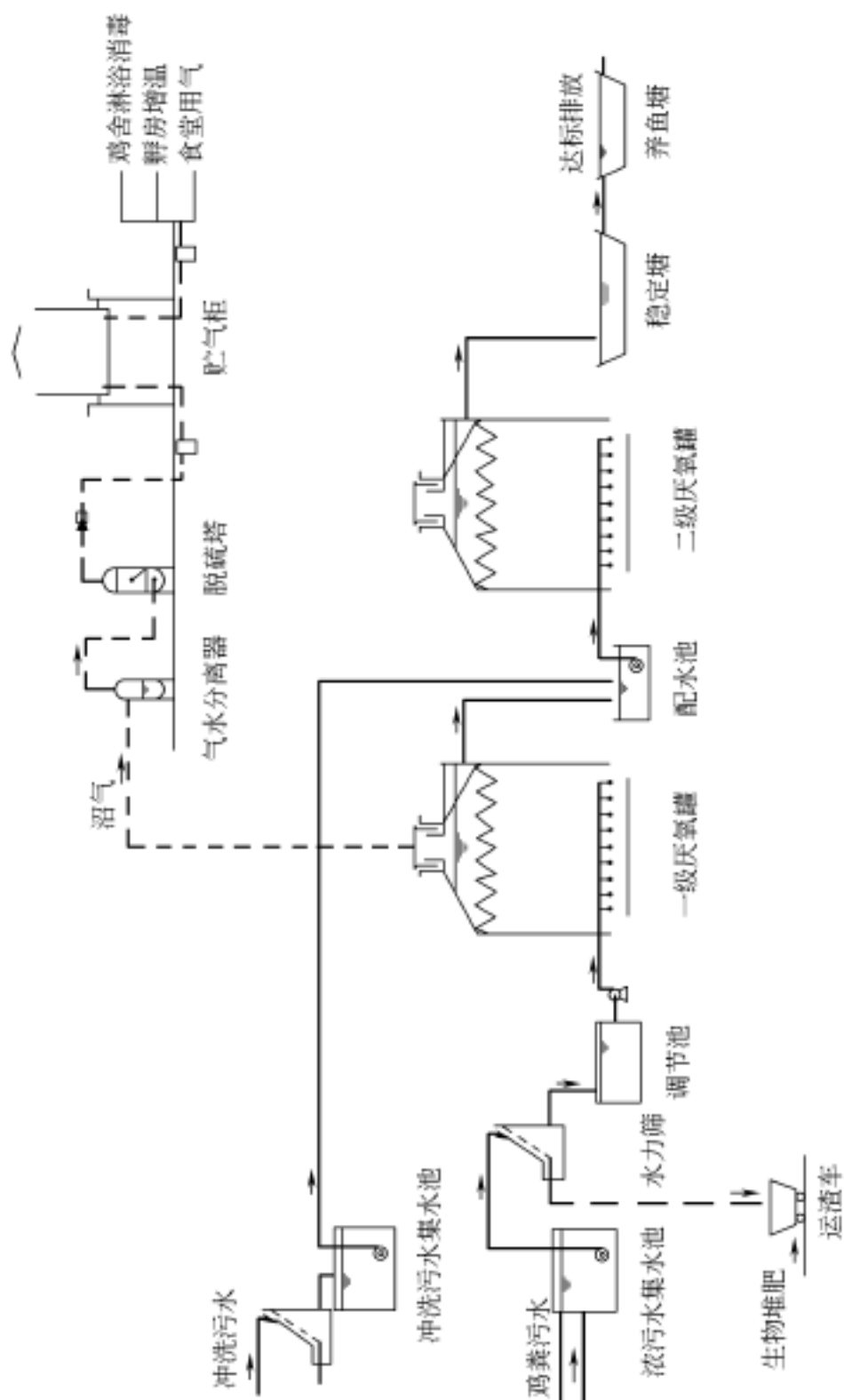


图 6-39 杭州市蛋鸡场沼气生态工程工艺流程

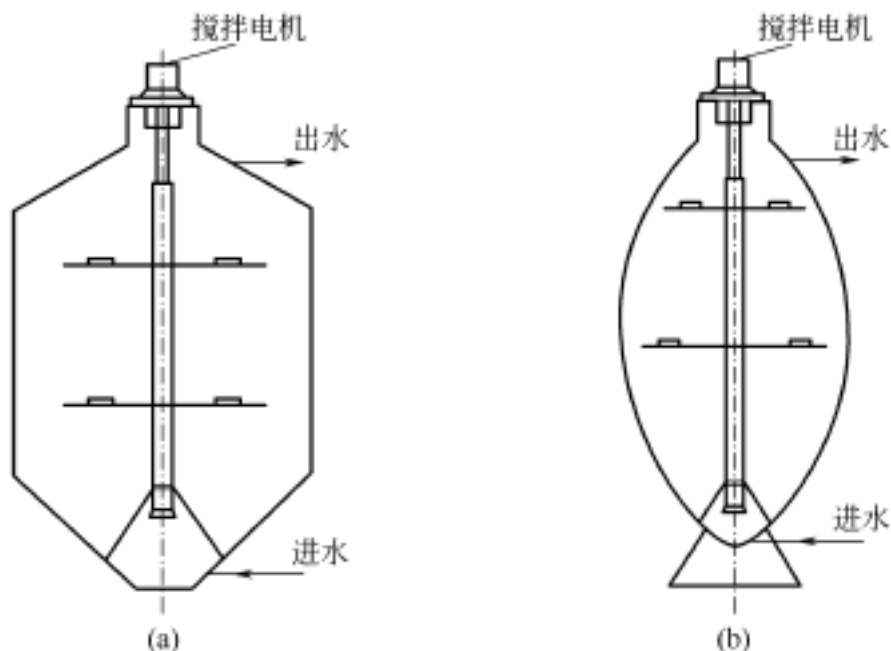


图 6-40 两种全混合厌氧反应器结构示意图

全混合消化池的特点：可以直接处理悬浮固体含量较高或颗粒较大的料液，而且结构较简单，但存在着厌氧污泥流失严重的缺点；
对无搅拌的消化器，还存在料液的分层现象严重，微生物不能与料液均匀接触，温度也不均匀，消化效率低等缺点

留时间相同。消化器内繁殖起来的发酵微生物随时会随溢流而排出，于是消化器中污泥的浓度限制在 5000 毫克 MLSS/ 升左右水平。特别是在短水力滞留时间和低浓度投料的情况下，则会出现严重的污泥流失问题，就导致厌氧消化效率降低。为此，就要求控制较长的水力滞留时间来维持消化器的稳定运转，以达到处理废物无害化的要求。全混合消化器的池径可以从几米至三四十米，柱体部分的高度约为直径的 $1/2$ ，池底圆锥形，以利排泥。一般都有盖子，以保证良好的厌氧条件，收集沼气和保持池内温度，并减少池面的蒸发。为了使进料和厌氧污泥充分接触、使所产的沼气泡及时逸出而设有搅拌装置，常用搅拌方式有 3 种：机械搅拌，即用电机驱动桨叶等机械进行搅拌；气体搅拌，即用压缩机将沼气从池顶抽出，再从池底充入，循环沼气进行搅拌；液体搅拌，即池内设有射流器，由池外水泵压送的循环消化液经射

流器喷射，在喉管处造成真空，吸进一部分池中的消化液，形成较强烈的搅拌。在一般情况下每隔 2~4 小时搅拌 1 次。在排放消化液时，通常停止搅拌，经沉淀分离后排出上清液。液体搅拌主要包括射流式搅拌和泵循环搅拌两种。各种搅拌方式的优缺点及适用情况参见表 6-16。

表 6-16 搅拌方式性能比较

搅拌方式	适用池形	搅拌半径 / 米	搅拌装置能耗 (千瓦时/米 ³)	优 缺 点
机械搅拌	纺锤形 椭圆形	3~6	0.2~0.3	电耗小, 适于大中型沼气工程, 要求搅拌轴与器盖密封严
射流搅拌	纺锤形 椭圆形	<5	0.8~1.2	结构简单, 无活动部件, 对各种发酵原料都适应, 电耗大, 不易搅拌均匀
泵循环搅拌	方柱形、锥形、椭圆形、其他	视布水点来确定	2.5	方法简单, 适合于多种发酵工艺, 大、中、小沼气消化器均能使用
气体搅拌	方柱形、锥形 椭圆形	<10	0.5	电耗较低, 搅拌强度大, 适用于一般沼气发酵工艺的消化器

(2) UASB 反应器 上流式厌氧污泥床反应器，简称 UASB 反

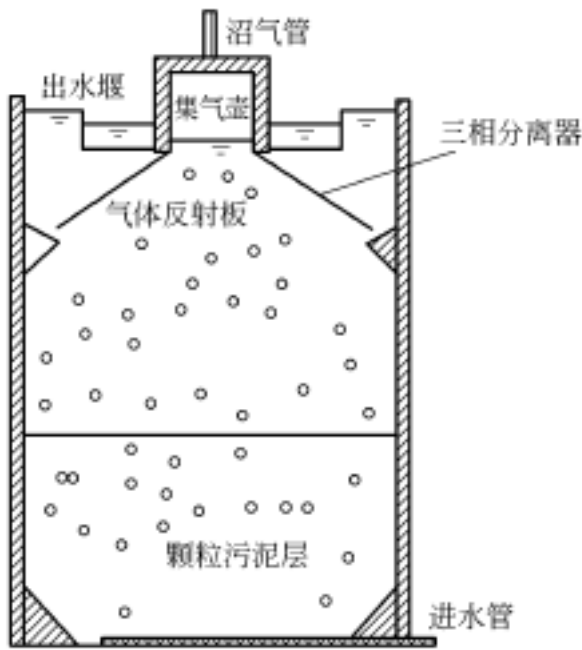


图 6-41 UASB 反应器结构示意图

应器，是由荷兰的 G .Lettinga 等人在 20 世纪 70 年代初研制开发的。污泥床反应器内没有载体，是一种悬浮生长型的消化器，其构造如图 6-41 所示。UASB 反应器由反应区、沉淀区和集气室三部分组成。在反应器的底部是浓度较高的污泥层，称污泥床，在污泥床上部是浓度较低的悬浮污泥层，通常把污泥层和悬浮层统称为反应区，在

反应区上部设有气、液、固三相分离器。废水从污泥床底部进入，与污泥床中的污泥进行混合接触，微生物分解废水中的有机物产生沼气，微小沼气泡在上升过程中，不断合并逐渐形成较大的气泡。由于气泡上升产生较强烈的搅动，在污泥床上部形成悬浮污泥层。气、水、泥的混合液上升至三相分离器内，沼气气泡碰到分离器下部的反射板时，折向气室而被有效地分离排出；污泥和水则经孔道进入三相分离器的沉淀区，在重力作用下，水和泥分离，上清液从沉淀区上部排出，沉淀区下部的污泥沿着斜壁返回到反应区内。在一定的水力负荷下，绝大部分污泥颗粒能保留在反应区内，使反应区具有足够的污泥量。

反应区中污泥层高度约为反应区总高度的 $1/3$ ，但其污泥量约占全部污泥量的 $2/3$ 以上。由于污泥层中的污泥悬浮量大，底物浓度高，酶的活性也高，有机物代谢速度较快，因此，大部分有机物在污泥层被去除。研究结果表明，废水通过污泥层已有 80% 以上的有机物被转化，余下的再通过污泥悬浮层处理，有机物总去除率达 90% 以上。虽然悬浮层去除的有机物不多，但是其高度对混合程度、产气量和过程稳定性至关重要。因此，应保证适当悬浮层乃至反应区高度。

(3) AF 反应器 氧生物滤池又称厌氧固定膜反应器，其原理如图 6-42 所示。大部分厌氧微生物以生物膜的形态附着在填料表面，少部分以厌氧活性污泥的形态悬浮于填料的间隙中。当污水流经填料时，在生物膜的吸附与代谢和填料截流的共同作用下，污水中的有机污染物得以分解与去除。分解过程中产生的沼气则收集于滤池顶部的集气罩内并引出池外。

根据滤床内水流方向的不同，厌氧生物滤池可分为升流式、降流式和平流式 3 种。在升流式厌氧生物滤池内，污水从池底进入，从池上部排出；在降流式厌氧生物滤池内，污水的进流与处理水的出流恰好相反。在平流式生物滤池内，污水从滤池前段下部进入，处理水从滤池后段上部溢流排出，顶部设气室，底部设污泥排放口。无论是在升流式厌氧滤池内，还是在降流式厌氧滤池内，厌氧

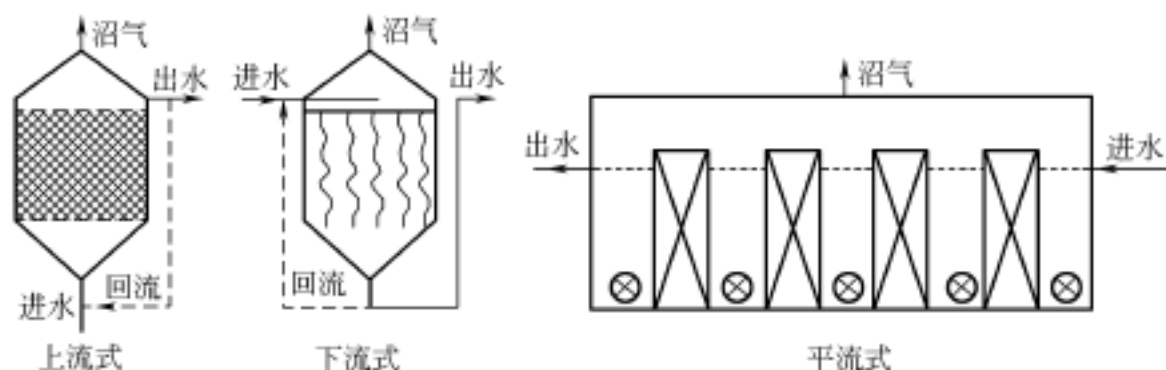


图 6-42 几种不同类型 AF 反应器结构示意图

微生物总量沿池高度分布都是很不均匀的，在池进水部位高，相应的有机物去除速度快。当废水中有机物浓度高时，特别是进水悬浮固体浓度和颗粒较大时，进水部位容易发生堵塞现象。而平流式则可以很好地避免这一问题的发生。为了解决这一问题，还可采取出水回流，部分充填载体，采用软性填料等方法。

填料是厌氧生物滤池的主要结构特征。厌氧生物滤池内的填料可分为硬性填料和柔性填料两类。硬性填料主要包括碎石、卵石、焦炭和各种形式的塑料填料等。硬性填料最大的缺点是随着生物膜的不断生长，孔隙率逐渐变小，最终导致填料堵塞。尤其对悬浮固体含量较高的污水，这一问题变得更加突出。而柔性填料恰恰可以很好地解决这一问题。柔性填料主要指一些人造纤维填料，与硬性填料相比，柔性纤维填料具有孔隙率大且可变、比表面积大、不易堵塞等特点。由于畜禽粪便污水是一种高浓度、高悬浮物含量的污水，所以如果采用 AF 对其进行处理，应该选用柔性填料。

(4) UBF 反应器 UBF 是由 Guiot 等人于 1984 年提出的将 UASB 和 AF 结合在一起的新型厌氧反应器。这种复合厌氧反应器有 3 种不同的结构布置形式：第一种是将填料装在反应器的上部；第二种是将填料装在反应器的下部；第三种是将污泥床和填料床进行前后布置。对第一种结构布置形式来说，由于在反应器下部不装填料，可以减少堵塞现象的发生，而装在上部的填料，可以发挥填

料有效截留污泥的能力，提高反应器内的污泥量，即提高反应器内的生物量，从而可以使反应器很好的应对水质和负荷发生突变对反应器造成的冲击。这种结构布置形式中滤器实际上起着 UASB 中三相分离器的作用。另外，在给水处理有机负荷率较高时，滤器同时还兼有去除 COD 的功能。图 6-43 是美国环保署在马里兰州所建的一个复合厌氧反应器示范工程的结构示意。

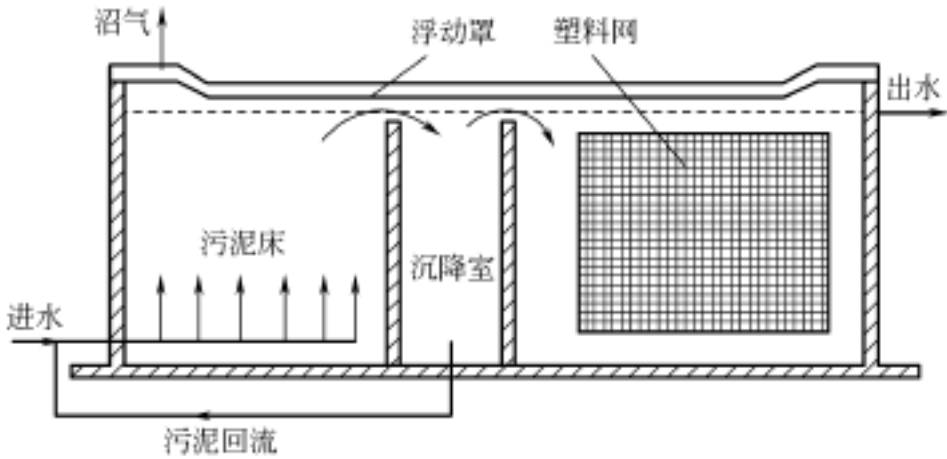


图 6-43 UBF 反应器结构示意

该反应器在结构上采用的是第三种布置形式。反应器由 3 个隔室组成，第一隔室是一个没有三相分离器的 UASB，由第一隔室出来的废水进入第二隔室，即污泥沉降室，经过污泥分离的废水最后进入由塑料网作填料的厌氧滤器内，经过进一步处理后由此排出。就水的流态而言，污水在 UASB 及在 AF 内呈混流状态，但在各个反应室之间则呈推流状态，所以说这种结构布置方式可以将推流反应器和混流反应器的特点集于一体。示范工程所处理的废水的水质情况如下：COD 1285 毫克/升；BOD₅ 434 毫克/升；TSS 500 毫克/升，随着季节的变化进水的温度在 17 ~ 19 之间变动。反应器在平均 HRT 为 16 小时的情况下的 COD，BOD₅ 以及 TSS 去除率分别达 65%，63% 和 83%。

(5) 塞流式厌氧反应器 塞流式厌氧反应器 (plug-flow digester) 在结构上常被设计成长形水槽，多建在地下，上部用柔性袋进行密封，见图 6-44。料液定期从反应器的一端加入，然后缓

慢的以推流方式向反应器另一端流动，在流动过程中不同时间进入反应器的料液彼此不相掺混，随着料液在反应器内的流动，有机质被分解转化为沼气，沼气被上部的密封柔性膜收集。为保护上部的柔性膜并维持反应器发酵温度，一些塞流式反应器在上部建简易温室或用玻璃纤维毯进行隔热处理。反应器多在中温条件下运行，HRT 为 20~30 天。混合坑是塞流式反应器一个重要组成部分，它的作用是将原料的 TS 浓度调整到 11%~13%。许多养殖场建造的混合坑作为粪便贮存池用，可以贮存 1 天的粪便。这种反应器在美国主要被用于处理奶牛场和肉牛场粪便。美国于 1979 年在宾夕法尼亚州的 Mason Dixon 奶牛场建造了第一个投入商业化运行的塞流式反应器，用于处理 600 头牛产生的粪便。

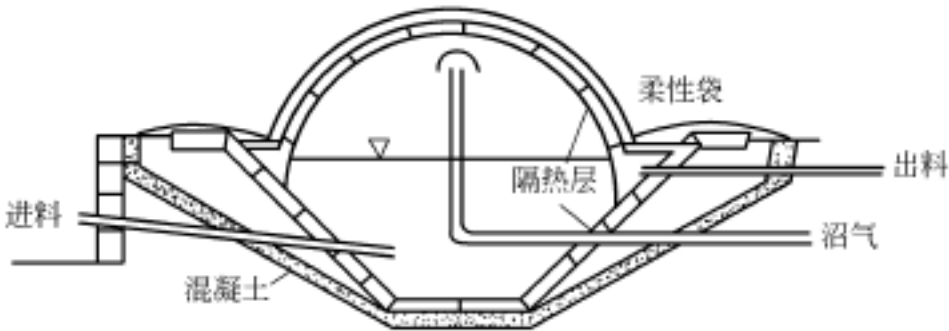


图 6-44 塞流式反应器结构示意图

(6) 厌氧塘 厌氧塘是生物氧化塘的一种，是做有防渗层的污水处理塘。结构较为简单的厌氧塘参见图 6-38，图 6-45 所示为美国 ADI-BVF 厌氧塘结构示意图。该厌氧塘地下部分采用的是混凝土结构，深 3~4 米，地上部分采用的是土围堰，内部采用斜坡形池底，外部做有土围堰。最大水深可达 7~9 米。塘上部盖有土工膜上盖，土工膜下部衬有一层聚乙烯隔热层。土工膜沿塘的周边密封，以起到收集沼气、保温、控制臭气排放等作用。上盖被设计成折叠板式或槽式以便于收集和排放雨水。厌氧塘内部被分隔成两个反应区，污水通过布置在厌氧塘底部污泥床区的布水器均匀的分配到第一反应区。污水流经一系列“气-固-液”三相分离器，以防止污泥进入厌氧塘上部。该厌氧塘还安装有短时间间歇运行的低速搅

拌器。ADI-BVF 厌氧塘一般用作低负荷厌氧处理工艺，容积负荷 $1.0 \sim 2.0$ 千克 COD/ (米³ · 天)。厌氧塘一般不设置加温装置，一般可在 15 ~ 25 条件下运行，当负荷非常低时，COD 去除率可达到 80 % ~ 90 %。

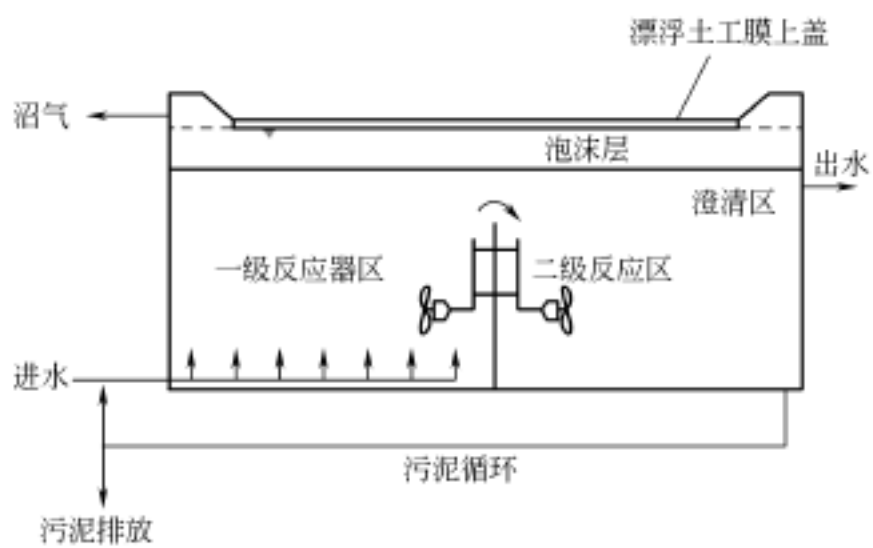


图 6-45 ADI-BVF 厌氧塘结构示意图

6.3.3 规模化养殖场沼气反应器设计

由于沼气工程设计所涉及的内容很多，以下只从反应器的角度，选择两种养殖场沼气工程应用较多的反应器，即 UASB 反应器和厌氧塘，介绍它们的设计方法。而无论何种反应器的设计，首先都需要确定所处理的废水的水量 and 水质。

6.3.3.1 粪便污水排放量及水质的确定 准确计算并确定粪便污水水质和排放量的大小是确定厌氧工程规模的前提，因此，这里介绍规模化养猪场、养鸡场和养牛场粪便及污水的确定方法。在确定规模化养殖场沼气工程规模时主要依据以下 12 个方面的因素。

畜禽养殖场年出栏数量。

畜禽常年存栏数量，如存栏公猪、带仔母猪、空怀母猪、妊娠母猪、仔猪、不同体重育肥猪等的数量。

饲喂方式和饲料品种。

养殖工艺。

粪便清除方式。

每天饮用和冲洗水量。

养殖场所处区域的气候条件。

养殖场所处区域环境条件和当地环保部门对养殖场排放水质要求。

沼气项目建设地点的地理位置、地质条件。

养殖场周围的可利用资源和现有设施情况，如农田、蔬菜田、鱼塘、果园、茶园等。

1 养殖场的能源供应、消耗和利用方式。

2 养殖场附近地区村镇和农户的能源供应、消耗和利用方式。

畜禽排泄的粪尿量以及畜禽养殖业排放的废水量，由于受到饲养方式、管理水平、畜舍结构、漏粪地板的形式和清粪方式等的不同而差异较大。现有的统计资料尚不充分，不同统计资料提供的数值也不尽相同，以下介绍几种类型畜禽养殖场粪便污水排放确定方法。

(1) 猪粪尿和污水量的确定

猪排泄粪尿量的估算。尽管猪粪尿排泄量受到环境因子、饲料质量、饮用水量等影响，但一般可采用下列公式估算。

$$Y_f = 0.530 F - 0.049 \qquad Y_u = 0.205 + 0.438 W$$

式中 Y_f ——粪便排泄量，千克；

F ——饲料采食量，千克；

Y_u ——尿排泄量，千克；

W ——饮水量，千克。

以此为依据计算的猪排粪量和排尿量见表 6-17 和表 6-18。

表 6-17 猪排粪量 千克

体 重		20	40	60	80	100
限 饲	饲料采食量	0.91	1.43	1.95	2.47	2.99
	排粪量	0.43	0.71	0.99	1.26	1.54
任 饲	饲料采食量	1.39	1.95	2.31	2.77	3.23
	排粪量	0.69	0.93	1.18	1.42	1.66

表 6-18 猪排尿量					千克
体 重	20	40	60	80	100
饮水量	5. 12	5. 58	6. 04	6. 50	6. 96
尿排泄量	2. 45	2. 65	2. 85	3. 05	3. 26

依据表 6-17 和表 6-18，可以估算出每头猪在不同生长阶段排泄的粪尿量，见表 6-19。

表 6-19 育肥猪不同生长阶段排泄的粪尿量					千克	
体 重		20	40	60	80	100
粪尿量	限饲	2.88	3.36	3.84	4.32	4.79
	任饲	3.14	3.58	4.03	4.47	4.92

每头猪每天需水量。每头猪每天的需水量可参照下列数据。

带仔母猪	30 ~ 60 升	肥猪	15 升
公猪、空怀母猪、 妊娠母猪	20 ~ 30 升	断奶仔猪	5 升

冲洗水量。传统养殖人工清粪方式，平均每头猪冲洗水量 10 ~ 15 升。工厂化养猪水冲清粪方式，平均每头猪冲洗水量 20 ~ 30 升。

根据上述方法，可以估算出养猪场排放的粪便量和污水量，从而为沼气项目的设计提供最基本的设计依据。表 6-20 是根据上述方法计算出的万头规模猪场猪粪污水排放量。表 6-21 是有关猪粪污水的污染物特性的一些数据。

表 6-20 年出栏万头规模猪场猪粪污水排放量					
项 目	饲养周期 / 天	存栏数量 / 头	平均排粪尿量 / [千克/ (头 · 天)]	平均冲洗水量 / [千克/ (头 · 天)]	产生污水量 / (吨/ 天)
母猪	365	500	6. 72	30	18. 36
公猪	365	25	6. 41	26	0. 81
仔猪	49	1380	2. 91	10	17. 82
育肥猪	105	2920	5. 95	20	75. 77

(2) 鸡粪和污水量的确定 养鸡场每只鸡日排泄粪便量为 0. 1 ~ 0. 11 千克/ (只 · 天)。养鸡场冲洗水额定量为 1. 10 ~ 1. 25 千

克/ 只。鸡粪污水的水质如表 6-22 所示。

表 6-21 猪粪污水的污染物特性

项 目	TS %	COD / (毫克/ 升)	BOD / (毫克/ 升)	NH ₃ -N / (毫克/ 升)	SS / (毫克/ 升)	pH
未清除猪粪的污水	1.5 ~ 2.5	13000 ~ 20000	6500 ~ 10000	2120 ~ 2500	11000 ~ 25000	6.8 ~ 7.2
清除猪粪的污水	0.3 ~ 0.6	6000 ~ 10200	3500 ~ 6000	500 ~ 1200	3000 ~ 5000	6.5 ~ 6.8

表 6-22 鸡粪污水的水质

项 目	TS %	COD / (毫克/ 升)	BOD / (毫克/ 升)	NH ₃ -N / (毫克/ 升)	SS / (毫克/ 升)	pH
鸡粪污水	2.0 ~ 2.5	15000 ~ 30000	7000 ~ 15000	2500 ~ 4400	12000 ~ 22000	6.5 ~ 7.5

(3) 奶牛场粪尿和污水量的确定 奶牛场排放的粪尿与污水包括以下 4 部分：牛粪尿、牛圈冲洗水（含淋浴水）、挤奶消毒水、牛奶桶清洗水。

一头体重 600 千克的奶牛日排粪量为 20 千克，排尿量为 34 千克，养牛场冲洗水量为 500 ~ 800 升/ (头 · 天)。奶牛粪尿的组分如表 6-23 所示。

表 6-23 奶牛粪尿的组分

成分 排泄物	BOD / (毫克/ 升)	TSS / (毫克/ 升)	TN / (毫克/ 升)	P ₂ O ₅ / (毫克/ 升)	K ₂ O / (毫克/ 升)	pH 值
牛粪	24500	119000	9430	4400	1500	7.2 ~ 8.2
牛尿	4000	5000	8340	40	18900	7.2 ~ 8.2

根据国外资料，1 头 450 千克体重的肉牛每年排泄氮量达 430 千克。一个具有 3200 头肉牛的规模化养牛场每年排放氮量达 1400 吨，它相当于 26 万人口当量的排氮量（每人每年排氮量按 5.4 千克计）。表 6-24 为不同年龄的牛的粪尿排泄量。

表 6-24 不同年龄的牛的粪尿排泄量

项 目	1 ~ 6 月小牛	12 月小母牛	18 月小母牛	12 月小肉牛	奶牛
体重/ 千克	140	270	380	400	500
粪尿量/ (升/ 天)	7.00	14.0	21.0	27.0	45.0

6.3.3.2 UASB 反应器的设计 UASB 的设计涉及多方面的因素，包括废水水质，容积负荷率，水力上升流速，反应器容积，布水器，三相分离器等。

(1) 废水水质 废水的成分对反应器内污泥的颗粒化有多方面的影响，并可以引起泡沫以及浮渣层的形成，处理高蛋白质和脂肪含量的废水时更易出现这些问题。在 UASB 设计时，废水当中颗粒物与溶解性 COD 的含量的比值是需要重点考虑的因素，也是决定是否采用 UASB 工艺的决定性因素。

(2) 反应器容积负荷 不同废水浓度，不溶性 COD 比率，出水 TSS 浓度条件下，UASB 容积负荷的确定可参考表 6-25 给出的推荐值。UASB 反应器在 30 ~ 35 条件下处理多种废水，当容积负荷率在 12 ~ 20 千克 COD (米³ · 天) 之间时，COD 去除率可达到 90% ~ 95%，HRT 可降低到 4 ~ 8 小时。当要求 COD 去除率低于 90%，且出水高 TSS 含量可以接受时，可以采用更高的水力上升流速，以使反应器内形成密度更大的颗粒污泥，从而使反应器容积负荷可以进一步提高。

表 6-25 UASB 容积负荷推荐值
(COD 去除率 85 ~ 95%，发酵温度 30)

废水 COD 含量 / (毫克/ 升)	不溶性 COD 比率	反应器容积负荷率/ [千克 COD (米 ³ · 天)]		
		絮状污泥	颗粒污泥， 高 TSS 去除率	颗粒污泥， 低 TSS 去除率
1000 ~ 2000	0.10 ~ 0.30	2 ~ 4	2 ~ 4	8 ~ 12
	0.30 ~ 0.60	2 ~ 4	2 ~ 4	8 ~ 14
	0.60 ~ 1.00	不能采用	不能采用	不能采用
2000 ~ 6000	0.10 ~ 0.30	3 ~ 5	3 ~ 5	12 ~ 18
	0.30 ~ 0.60	4 ~ 8	2 ~ 6	12 ~ 24
	0.60 ~ 1.00	4 ~ 8	2 ~ 6	不能采用
6000 ~ 9000	0.10 ~ 0.30	4 ~ 6	4 ~ 6	15 ~ 20
	0.30 ~ 0.60	5 ~ 7	3 ~ 7	15 ~ 24
	0.60 ~ 1.00	6 ~ 8	3 ~ 8	不能采用
9000 ~ 18000	0.10 ~ 0.30	5 ~ 8	4 ~ 6	15 ~ 24
	0.30 ~ 0.60	不能采用	3 ~ 7	不能采用
	0.60 ~ 1.00	不能采用	3 ~ 7	不能采用

当废水中 COD 以可溶性 COD 为主时，采取不同发酵温度时反应器容积负荷的确定可参照表 6-26 给出的推荐值。

表 6-26 UASB 容积负荷推荐值
(以可溶性 COD 为基质且其去除率 85% ~ 95%，污泥浓度 25 克/ 升)

发 酵 温 度/	反 应 器 容 积 负 荷 率/ [千 克 COD/ (米 ³ · 天)]			
	VFA 废 水		非 VFA 废 水	
	范 围	典 型 值	范 围	典 型 值
15	2 ~ 4	3	2 ~ 3	2
20	4 ~ 6	5	2 ~ 4	3
25	6 ~ 12	6	4 ~ 8	4
30	10 ~ 18	12	8 ~ 12	10
35	15 ~ 24	18	12 ~ 18	14
40	20 ~ 32	25	15 ~ 24	18

(3) 水力上升流速 水力上升流速作为 UASB 的一个重要设计参数，主要取决于反应器的进水流量和反应器的水平截面积。水力上升流速的设计推荐值见表 6-27。在处理 COD 完成可溶或部分可溶的废水时，表面水力流速可分别允许出现短时间 6 米/ 小时和 2 米/ 小时的高峰值。

表 6-27 UASB 水力上升流速和高度推荐值

废 水 类 型	水 力 上 升 流 速/ (米/ 小 时)		反 应 器 高 度/ 米	
	范 围	典 型 值	范 围	典 型 值
COD 近似完全可溶	1. 0 ~ 3. 0	1. 5	6 ~ 10	8
COD 部分可溶	1. 0 ~ 1. 25	1. 0	3 ~ 7	6
生活污水	0. 8 ~ 1. 0	0. 8	3 ~ 5	5

水力上升流速通过下式计算确定。

$$v = \frac{Q}{A}$$

式中 v——设计上升流速，米/ 小时；
A——反应器横截面积，米²；

Q ——进液流量，米³/小时。

(4) 反应器容积和其他尺寸 UASB 反应器一个重要的设计参数是容积负荷或水力停留时间。一般来说，废水浓度较低时，反应器容积的计算主要取决于水力停留时间，而在较高浓度下，反应器容积则主要取决于容积负荷的大小。而畜禽粪便废水是一种高浓度有机废水，所以其容积的设计要根据容积负荷来进行，具体设计可根据以下公式进行。

$$V_n = \frac{QS_0}{L_{org}}$$

式中 V_n ——反应器液体部分有效容积，米³；

S_0 ——进水 COD 浓度，千克 COD/米³；

Q ——进液流量，米³/小时；

L_{org} ——反应器有机负荷率，千克 COD/(米³·天)。

为了确定气体收集器以下反应器总的容积，常采用有效系数，该有效系数指的是污泥床部分与下部反应器的比率，该系数可在 0.8~0.9 之间选取，这样反应器总的液体部分容积可通过下式计算确定。

$$V_L = \frac{V_n}{E}$$

式中 V_L ——反应器液体部分总容积，米³；

E ——有效系数。

反应器液体部分总容积确定后，就可根据下式计算反应器液体部分的高度。

$$H_L = \frac{V_L}{A}$$

式中 H_L ——反应器液体部分高度，米。

要确定反应器的总高度，还需考虑集气罩部分的高度，这部分的高度一般可在 2.5~3 米之间取值，这样，反应器的总高度就可根据下式确定。

$$H_T = H_L + H_G$$

式中 H_T ——反应器总高度，米；

H_G ——反应器集气部分的高度，米。

在确定反应器高度过程中，还需考虑下列因素与反应器高度的关系。

高流速会增加污水系统扰动，因此会增加污泥与进水有机物之间的接触。

过高的流速会导致污泥流失，因此为滞留污泥，上升流速不能超过一定的限值，从而反应器的高度也就会受到限制。

在采用传统的 UASB 系统的情况下，上升流速的平均值一般不超过 0.5 米/小时。

深度对于厌氧消化效率的影响与 CO_2 的溶解度有关，反应器越深，在废水中的溶解度就越高，因此，pH 值越低，如果低于最优值，就会危害反应器的消化效率。

土方工程随池深增加而增加，但占地面积则相反，同时高度的选择应该使污水进水或出水的能量消耗尽可能低。

一般来说，最经济的反应器高度一般在 4 ~ 6 米之间，并且大多数情况下这也是系统最佳的运行范围。反应器高度的推荐值见表 6-27。

在确定了反应器的容积和高度之后，对矩形池还需确定反应器的长宽比。对于矩形和正方形池在同样的面积下正方形池的周长比矩形池要小，从而矩形池需要更多的建筑材料。矩形池长宽比在 4 : 1 以上费用增加十分显著。但是从布水均匀性考虑，矩形池长宽比较大比较合适。从布水均匀性和经济性两方面综合考虑，矩形池长宽比在 2 : 1 以下较为适宜。

(5) 布水器 布水器是 UASB 反应器很关键的部件，它对于保证污水和污泥之间的充分接触，最大限度发挥反应器内厌氧污泥的作用是非常重要的。因此，一般采用多点进水方式，使进水较均匀地分布在污泥床断面上。所以布水点密度的大小对布水的均匀性无疑是非常重要的。表 6-28 是 Lettinga 等人给出的布水点数目的确定方式。

表 6-28 UASB 反应器布水点数量的计算依据

污 泥 类 型	反应器容积负荷 /[千克 COD/ (米 ³ · 天)]	每个布水点平均占有面积 / 米 ²
稠絮状污泥 (> 40 千克 TSS 米 ³)	< 1.0	0.5 ~ 1
	1.0 ~ 2.0	1 ~ 2
	> 2.0	2 ~ 3
中等浓度絮状污泥 (20 ~ 40 千克 TSS m ³)	1.0 ~ 2.0	1 ~ 2
	> 3.0	2 ~ 5
颗粒污泥	< 2.0	0.5 ~ 1
	2.0 ~ 4.0	0.5 ~ 2
	> 4.0	> 2

布水系统的进水方式大致可分为脉冲进水和连续进水两种方式。连续进水方式包括一管一孔配水方式，一管多孔配水方式和分枝式配水方式。

一管一孔配水方式的特点是一根配水管只服务一个配水点，所以只要保证每根配水管流量相等，即可实现每个配水点的均匀配水。为了保证每一个配水点达到其应得的进水流量，配水箱（或配水渠）多置于反应器的顶部，这样布置有两方面的优点，一是当某一布水管或布水头出现堵塞的时候通过配水箱液面的升高可以观察得到，二是当堵塞不是很严重的情况下，随着配水箱液面的升高，布水管内的压力增大，从而可以自行消除堵塞。图 6-46(a) 为采用这一布水方式的布水器的原理。

一管多孔配水方式是采用在反应器池底配水、横管上开孔的方式布水，其中几个进水孔由一个进水管负担。为了均匀配水，要求出水流速不小于 2.0 米/秒，以便使出水孔阻力损失大于穿孔管的沿程阻力损失。配水管的直径最好不小于 100 毫米，配水管中心距池底的距离一般为 20 ~ 25 厘米。在一根管上均匀布水虽然在理论上是可行的，但在实际上是很难实现的。因为这种系统随着使用时间的增加不可避免有些孔口会发生堵塞。而进水将从没有堵塞的其他孔口重新分配，从而导致在反应器池底的进水不均匀分布。考虑

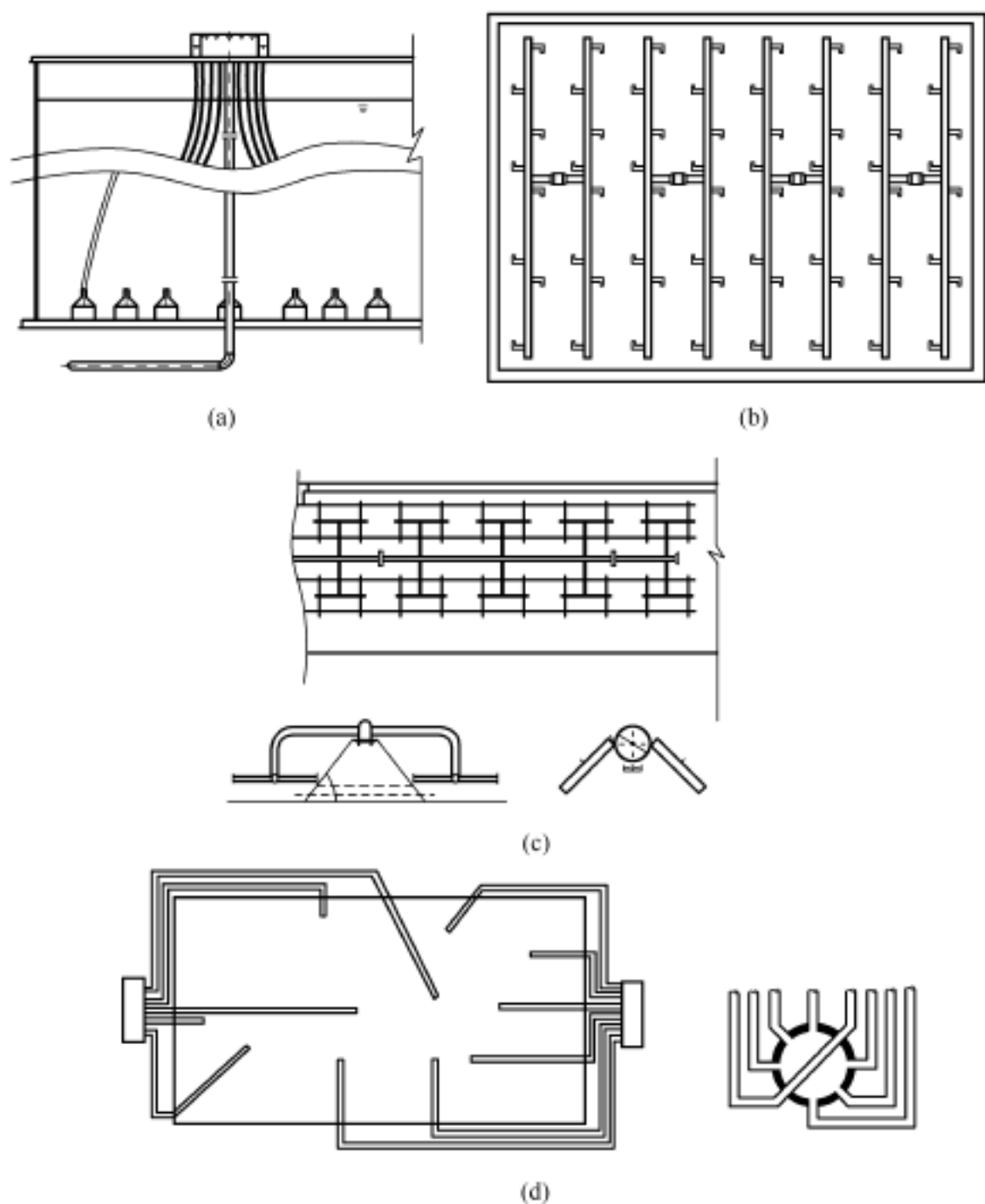


图 6-46 几种布水器结构原理示意

到这种现象，应该尽可能避免在一根管道上有过多开口。这种配水方式的原理参见图 6-46(b)。

分支配水方式实际上是一种多级配水方式，其原理如图 6-46(c) 所示。为了配水均匀，配水支管一般采用对称布置，各支管出

水口位于所服务区域的中心，向下距池底约 20 厘米，管口对准池底所设的反射锥体，使射流向四周均匀散开。这种形式的配水系统需采用较长的配水支管以增加沿程阻力，以达到布水均匀的目的。

脉冲进水方式可以使底层污泥交替进行收缩和膨胀，有助于底层污泥的混合。一般说来，一定的布水强度能促进反应区污泥床底部颗粒污泥的混合，促进污染物与污泥的充分接触，强化反应速率。同时也有利于底层颗粒污泥上黏附的微小气泡脱离，防止其浮升于悬浮层，减少污泥的流失量。但是如果布水强度过大，会造成短路，从而使一部分进水短流穿过污泥层，直接进入悬浮层，使出水水质恶化。所以，布水强度的合理与否决定了这种布水方式效果的好坏。图 6-46(d) 是德国专利所介绍的进水系统平面分布及配水设备示意。在反应器的底平面上均匀设置许多布水管（管口高度不同），从水泵来的水通过配水设备流进布水管，从管口流出。配水设备是由一根可旋转的配水管与配水槽构成，配水槽为一圆环形，配水槽内分隔为若干单元，每个与一同进反应器的布水管相连。从水泵来的水管与可旋转的配水管相连接。工作时配水管旋转，在一定时间间隔内，污水流进配水槽的一个单元，由此流进一根布水管进入反应器。这种布水对反应器来说是连续进水，而对每个布水点而言，则是间隙进水，布水管的瞬间流量与整个反应器流量相等。

(6) 三相分离器 气、液、固三相分离器是 UASB 反应器的重要结构特征，它对污泥床的正常运行和获得良好的出水水质起十分重要的作用。它同时具有两个功能，其一是收集从分离器下的反应区产生的沼气；其二是使在分离器之上的悬浮物沉淀下来。UASB 的三相分离器的构造有多种型式，到目前为止，大型生产上所采用的三相分离器多为专利。图 6-47 是几种不同类型的三相分离器结构示意，图 6-47 中 (c)、(d) 分别为德国专利结构，其特点是使混合上升和污泥回流严格分开，有利于污泥絮凝沉淀和污泥回流。图 6-47(c) 设有浮泥挡板，使浮渣不能进入沉淀区。图 6-47(e) 为多层三相分离器，这种分离器可以进一步提高气液分离的

效果。

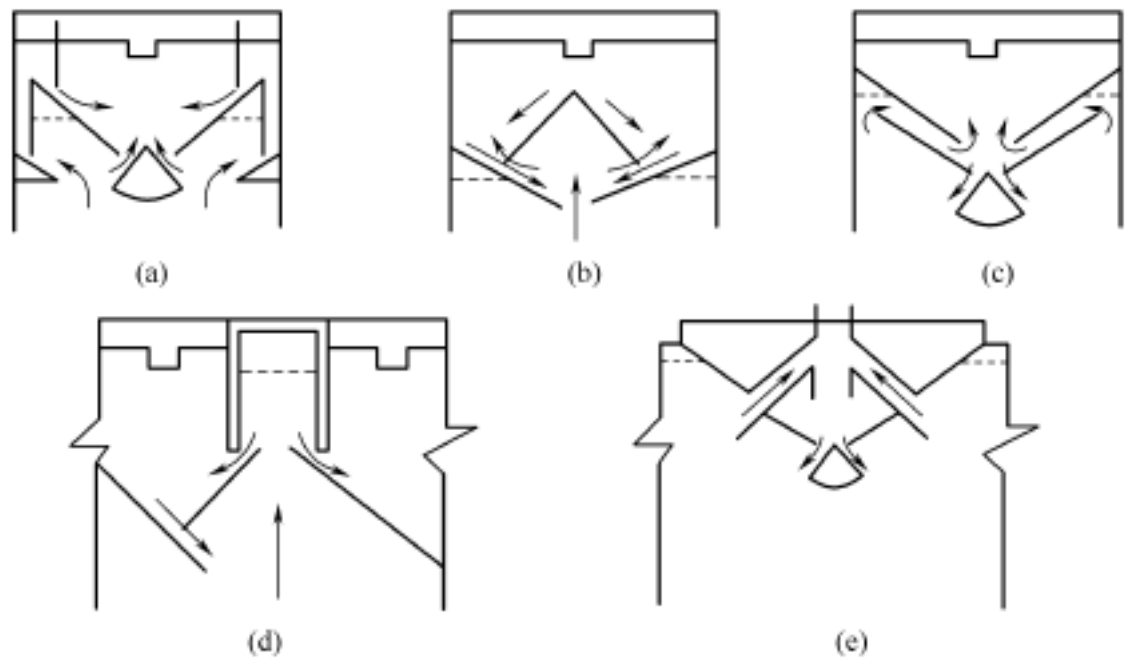


图 6-47 几种不同类型的三相分离器结构示意图

一般来说，UASB 的三相分离器的设计应遵循下列原则。

沉淀区斜壁角度的设计应能使沉淀在斜壁上的污泥不积聚，顺利返回反应区内，该倾角一般为 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。

沉淀区的表面负荷应在 $0.7 \text{ 米}^3 / (\text{米}^2 \cdot \text{小时})$ 以下，混合液进入沉淀区之前，通过入流孔道（缝隙）的流速不大于 2 米/小时 。

反射板与入流孔道（缝隙）之间的遮盖应该在 $100 \sim 200 \text{ 毫米}$ ，以防气泡进入沉淀区影响沉淀。

应防止气室产生大量泡沫，并控制好气室的高度，防止浮渣堵塞出气管，保证气室出气管畅通无阻。为了做到这一点，主要应控制好分离器下气液界面的沼气释放速率，适当的气体释放速率是 $1 \sim 3 \text{ 米}^3 / (\text{米}^2 \cdot \text{小时})$ (低浓度污水达不到这个速率)。从实践来看，气室水面上总是有一层浮渣，其厚度与水质有关。因此，在设计气室高度时，应考虑浮渣层的高度。此外还需考虑浮渣的排放。

在集气室的上部应该设置消泡喷嘴，当处理污水产生严重泡沫问题时用以消泡。出气管的直径应该足够大以保证从集气室引

出沼气，尤其是在产生泡沫的情况下。

分离器相对于出水界面的位置，该位置决定了反应区和沉淀区的比例。在多数 UASB 反应器中沉淀区是总体积的 15% ~ 25%；在反应器的高度为 5 ~ 7 米时集气室的高度应该在 1.5 米左右。

三相分离器的设计包括沉淀区设计、回流缝设计和气液分离设计。下面以图 6-48 为例说明设计计算方法。

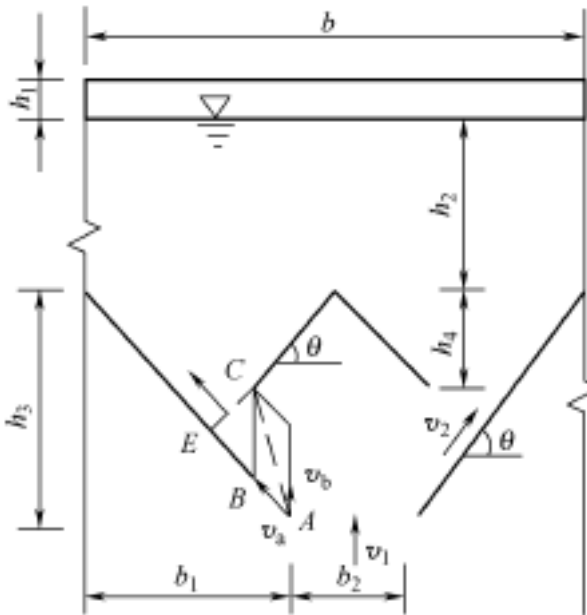


图 6-48 三相分离器几何尺寸关系

沉淀区设计。三相分离器沉淀区的设计方法与普通二次沉淀池的设计相似，主要考虑两项因素，即沉淀面积和水深。沉淀区的面积根据废水量和沉淀区的表面负荷确定，由于在沉淀区内的厌氧污泥与水中残余的有机物尚能产生生化反应，有少量的沼气产生，对固液分离有一定的干扰。这种情况在处理高浓度有机废水时可能更为明显，所以建议表面负荷一般应小于 $1.0 \text{ 米}^3/(\text{米}^2 \cdot \text{小时})$ ，三相分离器集气罩（气室）顶以上的覆盖水深 h_2 可采用 $0.5 \sim 1.0$ 米，集气罩斜面的坡度 θ 应采用 $55^\circ \sim 60^\circ$ ，沉淀区斜面（或斗）的高度建议采用 $0.5 \sim 1.0$ 米。不论何种形式三相分离器，其沉淀区的总水深应不小于 1.5 米，并保证在沉淀区的停留时间为

1.5 ~ 2.0 小时。

回流缝设计。由图 6-48 可知，三相分离器由上、下二组重叠的三角形集气罩所组成，根据几何关系可得：

$$b = \frac{h_b}{\tan \theta}$$

式中 b_1 ——下三角形集气罩底的 1/2 宽度，米；

θ ——下三角形集气罩斜面的水平夹角，一般可采用 $55^\circ \sim 66^\circ$ ；

h_b ——下三角形集气罩的垂直高度，米。

$$b_2 = b - 2b_1$$

式中 b_2 ——相邻两个下三角形集气罩之间的水平距离，米；

b ——单元三相分离器的宽度，米。

下三角形集气罩之间的污泥回流缝中混合液上升流速 (v_1) 可用下式计算。

$$v_1 = \frac{Q}{S_1}$$

式中 v_1 ——回流缝中混合液上升流速，米/小时；

Q ——反应器设计废水流量，米³/小时；

S_1 ——下三角形集气罩回流缝的总面积，米²。

S_1 可用下式表示：

$$S_1 = b_2 \times l \times n$$

式中 l ——反应器的宽度，即三相分离器的长度，米；

n ——反应器的三相分离器单元数。

为了使回流缝的水流稳定，污泥能顺利地回流，建议流速 $v_1 < 2$ 米/小时。

上三角形集气罩与下三角形集气罩斜面之间回流缝的流速 (v_2) 可用下式计算。

$$v_2 = \frac{Q}{S_2}$$

式中 S_2 ——上三角形集气罩回流缝的总面积，米²。

S_2 可用下式表示：

$$S_2 = c \times l \times 2n$$

式中 c ——上三角形集气罩回流缝的宽度，米。

c 即为图 6-48 中的 C 点至 AB 斜面的垂直距离 CE ，建议 $CE > 0.2$ 米。

为了使回流缝和沉淀区的水流稳定，确保良好的固液分离效果和污泥的顺利回流，要求满足条件：

$$v_2 < v_1 < 2.0 \text{ 米/小时}$$

气液分离设计。由图 6-48 可知，欲达到气液分离目的，上、下二组三角形集气罩的斜边必须重叠，重叠的水平距离（ AB 的水平投影）越大，气体分离效果越好，去除气泡的直径越小，对沉区固液分离效果的影响越小。所以，重叠量的大小是决定气液分离效果好坏的关键。

由反应区上升的水流从下三角形集气罩回流缝过渡到上三角形集气罩回流缝再进入沉淀区，其水流状态比较复杂。当混合液上升到 A 点后将沿着 AB 方向斜面流动，并设流速为 v_a ，同时假定 A 点的气泡以速度 v_b 垂直上升，所以气泡的运行轨迹将沿着 v_a 和 v_b 合成速度的方向运行，根据速度合成的平行四边形法则，则有：

$$\frac{v_b}{v_a} = \frac{\overline{AD}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AB}}$$

要使气泡分离后进入沉淀区的必要条件是：

$$\frac{v_b}{v_a} > \frac{\overline{AD}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{AB}}$$

气泡上升速度（ v_b ）与其直径、水温、液体和气体的密度、废水的黏滞系数等因素有关。当气泡的直径很小（ $d < 0.1$ 毫米）时，在气泡周围的水流呈层流状态时， $Re < 1$ ，这时气泡的上升速度可用斯托克斯（Stokes）公式计算， $v_a = v_b$ 。

6.3.3.3 厌氧塘的设计

(1) 厌氧塘的设计规定 厌氧塘的设计一般应遵循以下规定。

厌氧塘前应设置格栅。格栅间隙不大于 20 毫米。厌氧塘前宜设置普通沉砂池。至少需设两格。处理高油脂含量废水时，厌氧

塘前应设置除油设备。一般多采用重力分离法。

进水水质与传统二级处理的要求相同。有害物质容许浓度应符合《室外排水设计规范》的规定。进水硅酸盐的浓度不宜大于 500 毫克/升, 进水 BOD_5 N $P = 100 \quad 2.5 \quad 1$ 。

厌氧塘的构造及主要尺寸如下。厌氧塘一般为矩形, 长宽比为 $(2 \sim 2.5) : 1$; 深度由超高 (h_1)、有效水深 (h_2)、贮泥深度 (h_3) 和塘面冰冻深度 (h_4) 4 部分组成。 h_1 一般为 0.6 ~ 1.0 米, 塘越大, 超高应相应增加。 h_2 可采用 2.0 ~ 5.0 米。 h_3 的设计值 ≥ 0.5 米。 h_4 因绝大部分包含在 h_2 中, 设计时可不单独计算。

堤坝坡度按垂直 水平计, 堤内坡度为 $(1.5 : 1) \sim (1 : 3)$; 堤外坡度为 $(1 : 2) \sim (1 : 4)$ 。塘底采用平底。

厌氧塘进口设在塘底部, 高于塘底 0.6 ~ 1.0 米。如进水含油脂较多, 进水管直径 ≥ 300 毫米。厌氧塘出水管应位于水面下, 淹没深度 ≥ 0.6 米, 应在浮渣层或冰冻层以下。

厌氧塘至少应有两座, 可采用并联, 以便其中之一可临时停止运行。单塘面积不得大于 $8000 \sim 40000$ 米²。

(2) 厌氧塘设计方法 厌氧塘的设计计算方法包括有机负荷法和完全混合数学模型法。有机负荷法是一种经验方法; 采用完全混合数学模型的关键是如何获得合理的反应速度常数, 若常数选择不当, 则会导致计算结果偏离当地的实际情况。

厌氧塘的有机负荷法有 3 种, 分别为 BOD 表面负荷、BOD 容积负荷和 VSS 容积负荷。对养殖废水来说, 主要采用 VSS 容积负荷。对下列几种废水, 建议 VSS 容积负荷为: 家禽粪尿废水 0.063 ~ 0.16 千克 VSS/ (米³ · 天); 奶牛粪尿废水 0.166 ~ 1.1 千克 VSS/ (米³ · 天); 猪粪尿废水 0.064 ~ 0.32 千克 VSS/ (米³ · 天); 挤奶间废水 0.197 千克 VSS/ (米³ · 天); 屠宰废水 0.593 千克 VSS/ (米³ · 天)。

当没有类似的废水处理数据可供利用时, 可按全混合流态拟合厌氧塘, 故有:

$$\frac{S_e}{S_0} = \frac{1}{1 + k\theta}$$

式中 S_e 、 S_0 ——分别为厌氧塘进水、出水 BOD_5 浓度，毫克/升；
 θ ——厌氧塘水力停留时间，天；
 k ——厌氧塘反应速率常数，天⁻¹。

上式中反应速率常数 k 与废水性质、BOD 负荷、水温、水力停留时间等多种因素有关。在进水 BOD_5 为 80 ~ 400 毫克/升，BOD 表面负荷为 300 ~ 2000 千克 BOD_5 / (10⁴ 米² · 天)，水力停留时间 θ 为 1 ~ 6 天时， k 值与温度的关系曲线如图 6-49 所示。

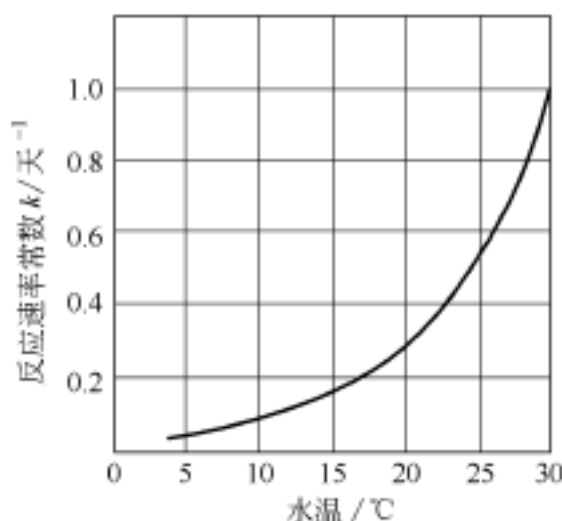


图 6-49 厌氧塘反应速率常数 k 与水温的关系曲线

根据所得到的 k 值及设计要求，即可求算厌氧塘的容积以及表面积。

(杨世关 关树义)

主要参考文献

- 1 王兆骞主编．中国生态农业与农业可持续发展．北京：北京出版社，2001
- 2 张壬午等编著．农业生态工程技术．郑州：河南科学技术出版社，2000
- 3 George Tchobanoglous, et al. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 北京：清华大学出版社，2003
- 4 方正明，刘金铜等著．生态工程．北京：气象出版社，2002
- 5 王凯军等著．UASB 工艺的理论及工程实践．北京：中国环境科学出版社，2000

- 6 蓝盛芳等编著. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002
- 7 周孟津主编. 沼气实用技术. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 8 骆世明主编. 农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 2001
- 9 苑瑞华主编. 沼气生态农业技术. 北京: 中国农业出版社, 2002
- 10 李长生主编. 农家沼气实用技术. 北京: 金盾出版社, 2004
- 11 杨世关等. 生态果园模式中“猪—沼—炕”单元研究与设计. 中国沼气, 2004, 3
- 12 张全国, 杨世关等. 中部地区生态果园的沼气系统研究. 太阳能学报, 2003, 2
- 13 农业部科技教育司、辽宁省能源研究所编. 塑膜覆盖节能日光温室图集. 2000
- 14 马世俊, 李松华主编. 中国的农业生态工程. 北京: 科学出版社, 1987
- 15 陈阜主编. 农业生态学. 北京: 中国农业大学出版社, 2003
- 16 邱凌等. 黄土高原生态果园工程模式设计研究. 西北农林科技大学学报, 2001, 29(5)
- 17 张培栋. “四位一体”生态农业模式能流研究: [硕士学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 2002
- 18 农业部科技教育司、辽宁省农村能源办公室编. 北方农村能源生态模式. 北京: 中国农业出版社, 1995
- 19 张福曼主编. 设施园艺学. 北京: 中国农业大学出版社, 2001
- 20 陈贵林主编. 蔬菜温室建造与管理手册. 北京: 中国农业出版社, 2000

第 7 章 沼气能源利用技术

目前, 无论发达国家还是发展中国家, 都在致力于可再生能源的研究, 以应付传统能源带来的能源危机和环境恶化。传统的能源如煤、石油等属于不可再生资源, 随着时间的推移, 它们的使用受到很大限制, 并且会带来严重的环境污染, 所以人们不得不寻找其他的代用燃料。在众多代用燃料中, 沼气是一种良好的代用燃料。沼气属于地面生物质能源, 无色、无臭、无味, 完全燃烧时火焰呈浅蓝色, 温度可达 $1400 \sim 2000$, 并放出大量的热。燃烧后的产物是二氧化碳和水蒸气, 不会产生严重污染环境的气体。1 米³ 沼气的热值约 $18017 \sim 25140$ 千焦, 相当于 1 千克原煤或 0.74 千克标准煤, 是一种优质的气体燃料。沼气最早便是作为农村生活燃料进行使用的, 并为人们广泛接受。随着能源危机的加剧及人们环境保护意识的加强, 以沼气作为发动机燃料, 直接驱动加工作业机具和发电机以代替石油, 在我国 20 世纪 70 年代开始受到国家的重视, 成为一个重要的课题被提出来。到 80 年代中期我国已有上海内燃机研究所、广州能源所、四川省农机院、南充地区农机所、武进柴油机厂、泰安电机厂等十几家科研院所、厂家对此进行了研究和试验。在我国, 沼气机、沼气发电机组已形成系列化产品。除此以外, 一种清洁、高效、噪声低的发电装置——沼气燃料电池装置近年来在日本和欧美国家开始受到广泛重视, 我国与日本也开始了在这一领域的合作研究。

7.1 沼气的成分和燃烧特性

7.1.1 沼气的成分和物理性质

7.1.1.1 沼气的成分 沼气是一种混合气体, 其成分不仅取决于发酵原料的种类及相对含量, 而且随发酵条件及发酵阶段的不同而

变化。当前使用的沼气发酵原料有：农村养殖厂废弃物、农业作物废弃物、糖厂和酒精厂等工业生产中废弃物、垃圾等。不同的原料及发酵过程产生的沼气成分变化很大。但是，无论哪种方法产生的沼气，主要成分都是甲烷和二氧化碳，当沼气消化器处于正常稳定发酵阶段时，按容积比来计算：甲烷约占 50% ~ 70%，二氧化碳约占 30% ~ 40%，此外，还含有少量的一氧化碳、氢、硫化氢、氧和氮等气体，见表 7-1。沼气是无色气体，略有气味是因含少量硫化氢的缘故。

表 7-1 沼气成分测定

测 定 单 位	沼气成分体积分数/ %							
	CH ₄	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	C _m H _n	O ₂	H ₂ S
鞍山市污水处理厂	58.2	31.4	1.6	6.5	0.7		1.6	
西安市污水厂	53.6	30.18	1.32	1.79	9.5	0.42	3.19	
四川省化学研究所	61.9	35.77			1.88	0.186	0.23	0.034
四川省德阳园艺场	59.28	38.14			2.12	0.039	0.40	0.021
农展馆警卫连	64.44	30.19			1.97		0.4	
沼气用具批发部	63.1	32.8	0.03		2.53	1.145	0.34	0.055
北京市通县苏庄	57.2	35.8			3.5	1.626	1.8	0.074

作为混合气体，沼气的物理性质由组成沼气的单一气体的性质和相对含量来确定。沼气中各单一组分的物理特性如表 7-2 所示。

表 7-2 沼气中各单一组分的物理特性

项 目	CH ₄	H ₂	O ₂	N ₂	H ₂ S	CO ₂	空气	水蒸气	CO
相对分子质量	16.04	2.016	32.0	28.0	34.076	44.0	29.0	18.0	28.0
容 重 (千 克 / 米 ³)	0.7174	0.0899	1.429	1.250	1.5363	1.9771	1.293	0.833	1.2506
相对密度 (对 空气的相对密度)	0.5448	0.0695	1.105	0.967	1.188	1.5289	1.000	0.644	0.9671
气 体 常 数 [千 焦 / (千 克 · 开)]	52.87	420.63	26.50	30.26	34.90	19.27	29.27	47.1	30.27
绝热指数	1.309	1.407	1.401	1.404	1.32	1.304	1.4	1.335	1.403

续表

项 目	CH ₄	H ₂	O ₂	N ₂	H ₂ S	CO ₂	空气	水蒸气	CO
热 导 率/[瓦/ (米 · 开)]	0. 0258	0. 150	0. 021	0. 021	0. 0132	0. 0118	0. 021	0. 139	0. 0194
临界温度/	- 82. 5	- 240	- 118	- 147	100. 4	31. 1	- 140	374	31. 1
临界容重/ (千 克/ 米 ³)	162	31	430	311		468	310		301
临界压力/ 兆帕	45. 8	12. 8	47. 7	33. 5	88. 9	72. 9	37. 2	325	34. 5
动力黏度 × 10 ⁶ / 帕 · 秒	10. 5	8. 6	19. 6	16. 98	11. 9	14. 0	17. 5	9. 22	16. 8
定压比热容/[千 焦/ (千克 · 开)]	0. 517	3. 394	0. 219	0. 248	0. 237	0. 198	0. 240	0. 443	0. 249
低热值/ (兆焦/ 米 ³)	33. 95		0	0	23. 04	0			11. 96
高热值/ (兆焦/ 米 ³)	37. 71		0	0	25. 04	0			2. 39
化学计量空燃 比/ (千克/ 千克)	17. 68		0	0	4. 01	0			2. 71

7. 1. 1. 2 沼气的物理性质

(1) 沼气的密度、相对密度 沼气的密度是指单位容积沼气所具有的质量，单位为千克/ 米³。沼气的密度可以根据沼气的成分，利用沼气中各单一组分的密度来计算。 ρ^0 记为沼气密度， ρ_i 为沼气中第 i 种组分的密度， x_i 为该组分的容积含量（容积成分），则沼气的密度为：

$$\rho^0 = \sum \rho_i x_i \tag{7-1}$$

沼气的相对密度是指沼气的密度和空气的密度之比，以 γ 来表示：

$$\gamma = \rho^0 / 1. 293 \tag{7-2}$$

沼气的相对密度随沼气中二氧化碳含量变化而变化，当二氧化碳含量达到 50% 时，沼气的 γ 大于 1，此时的沼气比空气重，泄露后不易扩散；但是，正常稳定生产的沼气中二氧化碳含量一般小于 40%，沼气较易扩散。

(2) 沼气的湿含量 沼气中一般都含有不同程度的水蒸气，尤其是高温、中温发酵，水蒸气含量较多。沼气中实际水蒸气的含量可以用沼气的绝对湿度来进行表示。将沼气作为理想气体看待，设 ρ_v 为沼气的绝对湿度， V 为沼气的体积， m_v 为沼气中水蒸气的质量， P_v 为沼气中水蒸气的分压力， T 为沼气的温度。则：

$$\rho_v = m_v / V = P_v / R_g T \quad (7-3)$$

一定温度下，沼气的最大绝对湿度为：

$$\rho_{sv} = P_{sv} / R_g T \quad (7-4)$$

式中 P_{sv} ——该温度下水蒸气的饱和蒸气压。

为了反映沼气的潮湿程度，用相对湿度来描述沼气中水蒸气的含量，用 ϕ 来表示：

$$\phi = P_v / P_{sv} \quad (7-5)$$

值介于 0 ~ 1 之间， $\phi = 1$ 时沼气中水蒸气含量达到最大，此时的沼气称为饱和湿沼气。 ϕ 值越大，说明沼气越潮湿。

在工作计算中，可以用式 (7-6) 把某状态下的湿沼气体积换算成标准状态下干沼气的体积。

$$V_{d0} = \frac{273}{273 + t} \times \frac{B + P - P_v}{101325} V_w \quad (7-6)$$

式中 V_{d0} ——标准状态下干沼气体积， 米^3 ；

V_w ——温度为 t 、压力为 p 时湿沼气的体积， 米^3 ；

B ——工作状态下大气压；帕；

P ——沼气的表压力，帕；

P_v ——沼气中水蒸气的分压力，帕；

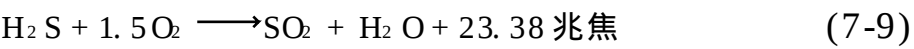
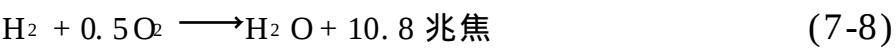
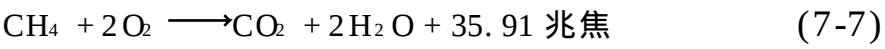
t ——沼气的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

7.1.2 沼气的燃烧特性

沼气中主要成分甲烷的着火温度较高，这样沼气的着火温度相对更高，沼气中大量存在的二氧化碳对燃烧具有强烈的抑制作用，所以沼气的燃烧速度很慢。通过对甲烷-空气混合气的燃烧试验和研究表明，甲烷-空气的混合气在发动机的燃烧中具有优异的排放

和抗爆性，在诸多代用燃料中，沼气备受青睐。

7.1.2.1 沼气的燃烧特点 由于沼气中有气体燃料 CH₄、惰性气体 CO₂，还含有 H₂S、H₂ 和悬浮的颗粒状杂质。当沼气和空气按一定比例混合后，一遇明火马上燃烧，散发出光和热。沼气燃烧时的化学反应式如下：



沼气中的主要成分 CH₄ 易燃、易爆，空气中 CH₄ 的最低、最高爆炸极限为空气体积的 2.5% ~ 15.4%（在 20℃ 时，含量为 16.7 ~ 102.6 克/米³）；而 CO₂ 的存在，又使沼气的燃烧速度降低，使燃烧平稳。沼气的燃烧速度很低，其最大燃烧速度为 0.2 米/秒，不足液化石油燃烧速度的 1/4，仅为炼焦气燃速的 1/8。因为燃烧速度低，当从火孔出来的未燃气流速度大于燃烧速度时，容易将来不及燃烧的沼气吹走，从而形成脱火。因此，沼气燃烧的稳定性差。当沼气完全燃烧时，火焰呈蓝白色，火苗短而急，稳定有力，同时伴有微弱的滋滋声，燃烧温度较高。沼气与其他燃料特性的比较见表 7-3。

表 7-3 沼气与其他燃料特性的比较

特 性	沼 气				其 他 燃 料			
	主 要 成 分			沼气混 合物	汽 油	柴 油	天 然 气	氢 气
	CH ₄	CO ₂	H ₂ S					
体积百分比	55 ~ 57	24 ~ 44	0.2 ~ 0.6	100	100	100	100	100
净热值/ (兆焦/ 米 ³)	10	—	6.3	6.5	8.9	10	10.4	2.9
总热值/ (兆焦/ 米 ³)	11.1	—	—	7.2	9.5	10.7	11.5	3.6
空气需要量/ (米 ³ / 米 ³)	9.52	—	2.38	6.2				2.38

续表

特 性	沼 气				其 他 燃 料			
	主 要 成 分			沼气混 合物	汽 油	柴 油	天 然 气	氢 气
	CH ₄	CO ₂	H ₂ S					
火 焰 速 度/ (厘米/ 秒)	43	—	—	36 ~ 38	80			
点 火 爆 炸 极 限/ %	5 ~ 15	—	4 ~ 45	6 ~ 12	0.6 ~ 8	0.6 ~ 6.5	43	100 ~ 280
点 火 温 度/	700	—	270	650 ~ 750	250	210	4 ~ 16	4 ~ 75
临 界 压 力/ 巴	47	75	90	75 ~ 89	2	—	640	560
临 界 温 度/	- 82.5	31	100	- 82.5	260	—	—	
正 常 密 度/ (千克/ 米 ³)	0.72	1.98	1.54	1.2	0.7 ~ 0.76	0.82 ~ 0.84	—	
甲 烷 值	100	73	—	135			0.79	
辛 烷 值 ROZ	105			> 120	91 ~ 93			

1 巴 = 10⁵ 帕。

7.1.2.2 沼气的着火及空气需要量

(1) 沼气的着火及其理论空气需要量 任何可燃混合物的燃烧都必须经过着火阶段才能进行燃烧。着火阶段是燃烧阶段的准备过程，是由于温度的不断升高而引起的。当燃气中可燃气体由于温度急剧升高，由稳定的氧化反应转变为不稳定的氧化反应而引起燃烧的一瞬间，称为着火。甲烷的着火温度大致为 632.3 ，而沼气中由于含有二氧化碳，其着火温度高于甲烷的着火温度，大约为 650 ~ 750 。

燃料在燃烧时，如果燃料中所含有的碳、氢、硫都分别与氧化合生成二氧化碳、水蒸气、二氧化硫，这种燃烧就称为完全燃烧。燃料燃烧时所需的氧气都是从空气中取得的，使 1 千克（或 1 米³）燃料完全燃烧时供给的最少空气量称为“理论空气需要量”。沼气燃烧时的理论空气需要量可由式（7-11）来确定。

$$V^0 = \frac{1}{21} (\sum x_i V_i^0 - x_o) \quad (7-11)$$

式中 V^0 ——沼气的理论空气需要量，米³/米³；
 x_i ——沼气第 i 种可燃组分的容积成分，%；
 V_i^0 ——沼气中第 i 种可燃组分的理论氧气需要量，由各可燃组分的完全燃烧化学反应式确定，参见表 7-5，米³/米³；
 x_o ——沼气中氧气的容积成分，%。

(2) 沼气的实际空气需要量及其过量空气系数 在实际燃烧装置中，为了使燃料充分完全燃烧，所供应的空气量往往较理论空气量多，此时供应的空气量称为实际空气需要量，用 V 来表示。实际空气需要量与理论空气需要量之比称为过量空气系数，用 α 表示，即：

$$\alpha = \frac{V}{V^0} \quad (7-12)$$

从理论上说， $\alpha=1$ 时，燃料就能完全燃烧，燃料中的可燃物质可充分地氧化，在这种情况下可燃混合气中燃料与空气的比例最恰当，此时的可燃混合气称为“化学计算恰当”的混合气（或简称化学当量混合气）。但是在实际燃烧时，由于燃料和空气混合情况不可能完全达到理想状况，为了保证沼气的完全燃烧， α 值大于 1。实际运行时， α 的大小取决于沼气的燃烧产物和燃烧设备的运行情况。对于民用及公用燃烧设备一般为 $\alpha=1.3 \sim 1.8$ ，对于工业燃烧设备一般应控制在 $\alpha=1.05 \sim 1.2$ 。在保证燃烧完全的情况下，尽量使 α 趋近于 1。如果 α 过大，会降低燃烧温度，增加排烟热损失，从而使热效率降低。由于燃烧所需的空气量和由此产生的烟气是设计和改造各种燃烧装置所必需的基本数据，同时也是设计空气供给装置、烟囱、烟道等设备和计算烟气温度（或炉温）、炉子热效率和热平衡的基本数据，因此合理选择和计算 α 值显得尤为重要。

(3) 沼气的着火浓度极限 当可燃气体与空气混合时，只有当可燃气体的含量在一定的界限内时，该混合气体方可燃烧，则称可燃气

体的该界限为着火浓度极限，分为上限和下限。沼气与助燃气体混合，形成可燃混合气，其中，沼气过多或过少均达不到着火条件。如可燃混合气中沼气过多，则氧气成分就少，只能使一部分沼气起氧化反应，因而生成的热量就少，这少量的生成热不能使混合气达到着火温度，因此就不能燃烧；反之，如在混合气中可燃气体的量过少，燃烧生成的热量也少，同样不可能使可燃气体达到着火温度，因此，也不能燃烧。达到着火温度时，混合气中可燃气体所占的最大体积分数称为着火浓度上限；所占的最小体积分数成为着火浓度下限。可见，沼气的着火浓度极限极大地影响着沼气的燃烧特性。而影响沼气着火浓度极限的因素有以下几个方面：混合气体的温度，当提高混合气体的初始温度时，对大多数烃类燃料-空气混合气来说，可使着火浓度极限范围变宽，试验表明，温度对着火浓度极限的影响主要反映在上限，而对下限则没有什么影响；混合气的压力，当混合气的压力较高时，压力对着火浓度极限几乎没有影响，当混合气的压力逐渐下降时，压力对着火浓度极限的影响才显示出来，但对于不同的气体，压力的影响作用亦不相同；混合气中惰性气体的含量，一般说来，混合气中惰性气体含量增加时，其着火浓度上限和下限均会提高。根据试验资料，当甲烷在沼气中的浓度不同时，沼气的燃烧极限会有所变化，如表 7-4 所示。

表 7-4 沼气的燃烧浓度极限（体积分数）

项 目	CH ₄ (50 %)	CH ₄ (60 %)	CH ₄ (70 %)
	CO ₂ (50 %)	CO ₂ (40 %)	CO ₂ (30 %)
上 限	26. 1 %	24. 44 %	20. 13 %
下 限	9. 52 %	8. 3 %	7. 0 %

从表 7-4 中可以看出，当沼气中甲烷成分增加时，燃烧范围减小，上限、下限均相应降低；当甲烷浓度降低时，其燃烧范围增大，上限、下限也相应提高。由于在着火浓度极限内的燃气-空气混合气，在一定的条件下，例如在密闭的空间里，会瞬间完成着火燃烧而形成爆炸，因此着火浓度极限又称为爆炸极限。了解着火浓度极限对

安全使用沼气是非常重要的，而着火浓度极限一般由试验测定。

7.1.2.3 沼气的燃烧产物及其热值 燃气经燃烧后所生成的烟气统称为燃烧产物。由于烟气中携带的灰粒和未燃尽的固体颗粒所占比例极小，因此，一般不考虑烟气中的固体成分。燃气的燃烧产物与燃烧的完全程度有很大关系，即与空气的供给量密切相关，所以进行燃烧产物分析时，必须考虑 α 值。下面讨论一下沼气在理论空气需要量及实际空气供给量情况下产生的相应烟气成分及烟气体积。

(1) 沼气的理论烟气体积及实际烟气体积 沼气在 $\alpha \geq 1$ 的情况下燃烧时，燃烧产物由以下成分组成。

沼气中可燃成分的完全燃烧产物， CO_2 ， H_2O ， SO_2 。

燃料和空气中所含有的氮。

过剩空气中未被利用的 O_2 ，这一项只有空气过量时存在。

水蒸气。

当 $\alpha = 1$ 时，此时产生的烟气体积称为理论烟气体积，用 V_y^0 表示，即：

$$V_y^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (7-13)$$

式中 V_{CO_2} ——每千克沼气完全燃烧产生的 CO_2 及沼气本身携带的 CO_2 体积， $\text{米}^3/\text{千克}$ ；

V_{SO_2} ——每千克沼气完全燃烧产生的 SO_2 及沼气本身携带的 SO_2 体积， $\text{米}^3/\text{千克}$ ；

V_{N_2} ——每千克沼气完全燃烧后所得烟气中的理论氮气体积及沼气本身携带的氮气体积， $\text{米}^3/\text{千克}$ ；

$V_{\text{H}_2\text{O}}$ ——每千克沼气完全燃烧后所得烟气中的理论水汽体积及沼气本身携带的水蒸气体积， $\text{米}^3/\text{千克}$ 。

式 (7-13) 中的每一项体积均可由沼气的组成和燃烧化学方程式求出。包含水汽在内的烟气称为“湿烟气”。如把水汽从湿烟气中除去，则得到不含水汽的“干烟气”。

当实际供气量大于理论供气量，即 $\alpha > 1$ 时，沼气可以完全燃烧，但此时的烟气体积，除了上述理论烟气体积外，还需考虑过剩空气量以及由过剩空气带入的水汽量，此时的烟气体积称为“实际烟气体积”。

量”，记为 V_y 。

$$V_y = V_y^0 + (\alpha - 1)V^0 + 0.00161 d(\alpha - 1)V^0 \quad (7-14)$$

式中 d ——空气的湿含量；

V^0 ——沼气的理论空气需要量，米³/千克；

α ——沼气燃烧时实际的过量空气系数。

当实际供气量小于理论供气量时，会造成沼气燃烧不完全，此时烟气成分与完全燃烧时的烟气成分大不相同，可能会出现诸如 CO、H₂S、CH₄ 等可燃气体组分。

(2) 沼气的热值 燃料的热值是燃料的一个重要特性，它取决于燃料中可燃组分的多少，是指单位质量或单位体积的燃料完全燃烧时所能释放出的最大热量，是衡量作为能源的燃料的一个重要指标。燃料的热值分为高热值和低热值。高热值是燃料的实际最大可能发热量，其中包含燃料中元素氢燃烧后形成的水及燃料中本身含有的水分的汽化潜热。由于实际燃烧过程中，燃料燃烧后产生的水分以水蒸气的形式随烟气一起排放掉了，因此这部分热量无法使用，燃料的实际发热量其实是低热值，即从高热值扣除了这部分汽化潜热后所净得的发热量。

沼气燃烧时具有实际意义的同样是低热值，它的低热值可由沼气中各单一可燃气体的低热值计算得到，具体为：

$$Q_{\text{net},d} = \sum X_i Q_{\text{net},di} \quad (7-15)$$

式中 $Q_{\text{net},d}$ ——沼气的低热值，大致为 22154 ~ 24244 千焦/米³；

$Q_{\text{net},di}$ ——沼气中第 i 种可燃组分的低热值，参见表 7-5，千焦/米³；

X_i ——沼气中第 i 种可燃组分的体积成分。

7.1.2.4 沼气的燃烧温度及燃烧火焰传播速度 燃料的燃烧温度是指燃料燃烧时所放出的热量传给气态的燃烧产物而产生的温度。理论燃烧温度是在绝热的条件下燃烧，考虑到高温时燃烧产物的离解吸热影响所求得的燃烧温度。在 $\alpha = 1$ 的完全燃烧情况下，燃烧温度最高； α 不等 1 时的燃烧温度要降低，而且，随 α 偏离 1 的程

度越大，燃气的燃烧温度下降越多。沼气的理论燃烧温度在 1807.2 ~ 1943.5 之间，实际燃烧温度低于理论燃烧温度，由实际空气过剩系数、空气中氧气含量、燃烧热量损失及燃料与空气的预热情况决定。 α 越接近 1，空气中氧含量越高，热损失越小，燃烧前对空气及燃料预热的越好，均会使沼气的燃烧温度升高。

在实际工程中，一般用点火的方法使燃气-空气的混合气着火，着火处形成一层极薄的燃烧层，这层高温燃烧焰面不断加热相邻的可燃混合气，当相邻混合气达到着火温度时，就开始形成新的焰面，这样，焰面就不断向未燃气体方向推移，从而使每层气体都相继经历加热、着火和燃烧过程，这个现象称为火焰的传播。未燃气体与燃烧产物的分界面称为焰面，焰面向前传播的速度称为火焰传播速度，用 u 来表示，单位为米/秒。

沼气的火焰传播速度很低，这是由沼气的组成决定的。沼气中大量存在的甲烷的火焰传播速度在诸多的单一可燃气体中是最低的，而二氧化碳的存在又进一步限制了沼气燃烧时火焰的传播速度，其最大传播速度只能达到 0.2 米/秒，仅为炼焦气的 $1/4$ ，液化石油气的 $1/2$ 。

7.1.2.5 沼气中各单一可燃气体的燃烧性能参数及沼气的主要特性参数 表 7-5 给出了沼气中各单一可燃气体的燃烧性能参数，沼气的主要性能参数则可以根据相应的公式精确计算出来。表 7-6 给出了沼气的主要特性参数，该参数是在甲烷含量分别为 50%、60%、70%，二氧化碳的相应含量为 50%、40%、30% 时，对沼气性能参数的一种简化计算。

表 7-5 沼气中各单一可燃气体的燃烧性能参数

项 目		CH ₄	H ₂	CO	H ₂ S
理论氧气需要量/ (米 ³ / 米 ³)		2	0.5	0.5	1.5
热值/ (千焦/ 米 ³)	高热值	39808	12742	12638	25341
	低热值	38873	10783	12638	23362
着火温度/		680 ~ 750	530 ~ 590	630 ~ 650	300 ~ 400

续表

项 目		CH ₄	H ₂	CO	H ₂ S
理 论 烟 气 量/ (米 ³ / 米 ³)	二氧化碳	0. 998		0. 995	1. 006
	水蒸气	1. 924	0. 964		0. 975
	氮气	7. 554	1. 883	1. 885	5. 712
	总计	10. 486	2. 848	2. 880	7. 693
以 空 气 助 燃 的 理 论 燃 烧 温度/		2013	2210	2370	1900
空气助燃下最大法向火焰的 传播速度/ (米/ 秒)		0. 38	2. 80	0. 56	
常 压 及 273K 条 件 下 爆 炸 极 限 (体 积 分 数) / %	下 限	5	4. 0	12. 5	4. 3
	上 限	15	75. 9	74. 2	45. 5

表 7-6 沼 气 的 主 要 特 性 参 数

特 性 参 数		CH ₄ (50%)	CH ₄ (60%)	CH ₄ (70%)
		CO ₂ (50%)	CO ₂ (40%)	CO ₂ (30%)
低热值/ (千焦/ 米 ³)		17937	21524	25111
理论空气需要量/ (米 ³ / 米 ³)		4. 76	5. 71	6. 67
理论烟气量/ (米 ³ / 米 ³)		6. 763	7. 914	9. 067
理论燃烧温度/		1807. 2 ~ 1943. 5		
爆炸极限 (体积分数) / %	下 限	9. 52	8. 8	7. 0
	上 限	26. 1	24. 44	20. 13
火焰传播速度/ (米/ 秒)		0. 152	0. 198	0. 243

7. 2 沼 气 净 化 及 输 配 工 艺

从发酵装置里出来的沼气中含有二氧化碳、硫化氢、水蒸气及固体杂质颗粒。二氧化碳和水的存在会降低沼气的热值，阻碍沼气的燃烧；而硫化氢的存在，不仅加速输送管路及配件的腐蚀，还会对人身安全造成极大的威胁。因此，作为燃料，沼气在使用前一般需要脱水、脱硫化氢。如果为了提高沼气燃烧质量，减少沼气收

集、输送费用，降低沼气对管路及贮气设备的腐蚀，还应考虑脱除沼气中的二氧化碳、氮气等惰性气体成分。

7.2.1 沼气脱水原理及装置

从发酵装置出来的沼气含有饱和水蒸气，根据沼气的用途可用3种方法将其去除。

7.2.1.1 冷分离法 冷分离法是利用压力能变化引起温度变化，使水蒸气从气相中冷凝下来的方法。常用的有两种流程。

节流膨胀冷却脱水法。一般用于高压燃气，经过节流膨胀或低温分离，使部分水冷凝下来。这种方法简单、经济。

加压后冷却法。如净化气在0.8兆帕压力下冷却脱水温度与常压供气露点的关系见表7-7。

表 7-7 净化气 0.8 兆帕压力下的冷却脱水温度与常压供气露点关系

0.8 兆帕时脱水温度/	8	6	4	2	0	- 2	- 4
常压 供气 露点/	- 18.5	- 19.9	- 21.3	- 22.8	- 24.3	- 25.8	- 27.2

从表 7-7 可见，净化气在 0.8 兆帕压力下冷却，脱水温度在 - 4 以上，而常压供气露点却一般要低于 - 18.5 ，管道中的净化气温度基本上不会低于该露点的温度，因而就不会出现冷凝水。

对于高、中温沼气为脱除部分水蒸气可进行初步冷却。冷却方式有 3 种，即管式间接冷却、填料塔式直接冷却和间-直混合冷却。对于上述装置需要冷却源和热交换器。为了满足不同脱硫剂合理量的要求，对高、中温沼气需要考虑适当冷却降温，脱除沼气中部分水蒸气。

为了避免沼气在管道输送过程中所析出的凝结水对于金属管路的腐蚀或堵塞阀门，则常采用在管路的最低处安装凝水器的方法，并将沼气中冷凝下来的水蒸气聚积起来定期排除，以使其后的沼气内所含水分减少，如沼气从 30 降至 15 ，则 1 米³ 沼气冷却后可去除 17.5 克水。

7.2.1.2 溶剂吸收法 属于这类脱水剂的有氯化钙、氯化锂及甘醇类。

氯化钙价格低廉，损失少（0.0016 ~ 0.006 克/米³），但与油类相遇时会乳化，溶液能产生电解腐蚀。“露点降”小（11 ~ 20 ），与 H₂S 接触又会产生沉淀，为此目前已逐渐淘汰。

氯化锂溶液吸水能力强，腐蚀性较小，不易加水分解，“露点降”也较大（22 ~ 37 ），明显优于氯化钙，但价格昂贵。

甘醇类脱水剂性能要优越得多，二甘醇和三甘醇吸水性能都较强，二甘醇的“露点降”为 17 ~ 33 ，三甘醇更大，为 28 ~ 47 。二甘醇在脱水过程中有雾沫夹带；三甘醇较少，但有液烃存在时易起泡，需添加消泡剂。三甘醇易达到 98% 以上再生，二甘醇再生则不易超过 95%。因此，三甘醇使用最多，但初期投资较高。

7.1.2.3 固体物理吸收法 吸附是在固体表面力作用下产生的，根据表面力的性质分为化学吸附（脱水后不能再生）和物理吸附（脱水后可再生）。

能用于沼气脱水的有硅胶、活性氧化铝、分子筛以及复式固定干燥剂，后者是综合了多种干燥剂的优点。各种干燥剂的特点见表 7-8。

表 7-8 各种干燥剂的特点

脱 水 剂	优 点	缺 点	使 用 情 况
硅胶	吸附能力好,吸水选择性强	遇液态水,油料易碎,处理量大时失效快	使用于处理量大,含水量不大的情况
活性氧化铝	吸附能力较好,再生温度低,在液态水中不易碎	活性丧失快,特别是酸性气体较多时	适用于含酸性气体少的燃气
分子筛	吸附能力较好,对高酸性气体的脱水可用抗酸性分子筛	成本稍高	适用于处理量较大,露点降要求高的气体

与溶液脱水比较，固体吸附脱水性能远远超过前者，并具有下列优点、缺点。

优点。能获得露点极低的燃气；对燃气温度、压力、流量变化不敏感；设备简单，便于操作；较少出现腐蚀及起泡等现象；

使用于少量燃气的廉价脱水过程。

缺点。基本建设投资大；压力降一般较高；易于中毒或破碎；耗热较多；吸附和再生都不是连续操作。

7.2.1.4 沼气脱水装置 对于大型沼气利用工程，沼气的脱水可以在板式塔或填料塔内完成；对于小型沼气利用系统，像农村户用沼气，则可以采用干燥剂脱水或冷凝器脱水。

(1) 干燥剂脱水装置 利用干燥剂脱水时，干燥剂装在容器中，沼气自下而上流过容器。使用一段时间后，干燥剂需要再生，具体结构如图 7-1。

(2) 脱水板式塔、填料塔 对于沼气的脱水量较大时，可采用化工吸收操作中的板式塔或填料塔进行水分的脱除。板式塔和填料塔的结构和设计参数可参阅《化工原理》。

7.2.2 沼气脱硫工艺及装置

沼气中含有微量的硫化氢，硫化氢是无色气体，有类似腐烂鸡蛋的恶臭味，剧毒、易溶于水，其水溶液呈酸性，能与碱生成盐，可用碱溶液来吸收除去气体中硫化氢。硫化氢具有极强的急性毒性，空气中浓度为 140 毫克/米³（标）时，会引起结膜炎和角膜炎，当浓度大约为 280 毫克/米³（标）时会造成昏迷，呼吸瘫痪甚至死亡。低

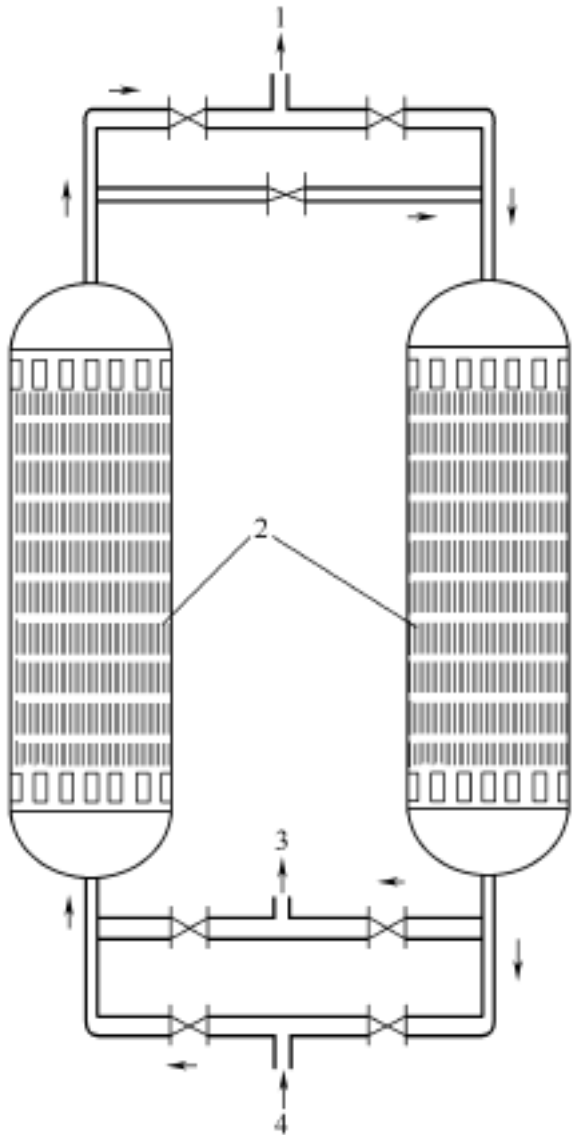


图 7-1 干燥剂脱水装置
1—干燥沼气出口；2—吸水剂；3—再生气出口；4—含水沼气出口

浓度硫化氢引起的症状有头痛、呕吐、失眠、乏力，眼睛和黏膜发炎。因此国家环境卫生标准规定，硫化氢气体含量在居民区的空气中不得超过 0.00001 毫克/升，在工厂车间不得超过 0.01 毫克/升，在城市煤气中不得超过 0.02 毫克/升。因为硫化氢含量达 0.6 毫克/升时可使人在 0.5 ~ 1 小时内致死，含量在 1.2 ~ 2.8 毫克/升时可使立即致死。但根据实验数据，不同原料产生的沼气中硫化氢的含量均超过此规定值：

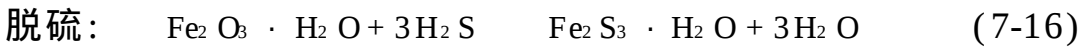
城市粪便处理厂沼气中含有	7.56 ~ 7.59 毫克/升
屠宰场沼气中含有	1.7 ~ 1.96 毫克/升
禽畜厂沼气中含有	1.22 ~ 1.79 毫克/升
酒厂沼气中含有	0.96 ~ 1.15 毫克/升
垃圾填埋场沼气中含有	1.0 ~ 1.15 毫克/升

从上面的数据可以看到，人造沼气中硫化氢的含量均超出了卫生标准，因此在使用沼气时，必须首先对沼气进行脱硫化氢处理。除了对人身安全造成威胁外，硫化氢还会在空气中及潮湿环境条件下，对管道、燃烧器以及其他金属设备、仪器仪表等造成强烈腐蚀：硫化氢燃烧生成的二氧化硫，遇水生成硫酸分子，腐蚀周围设备，污染环境。接触到金属，特别是有色金属就要发生腐蚀，例如，会使沼气发动机的轴承和一些配合表面腐蚀，使发动机的润滑油变质，从而加快发动机磨损。沼气脱硫方法一般可分为直接脱硫和间接脱硫两大类，直接脱硫就是将沼气中硫化氢气体直接分离，而间接脱硫是指采用具体方法，减少或抑制沼气生产中硫化氢气体的产生。沼气直接脱硫方法按原理可分为湿式法和干式法两类，湿式法主要有水洗法、K₂CO₃法、改良 K₂CO₃法、砷碱法和碱性盐液法等；干式法主要有氧化铁法、活性炭法等。对于硫化氢含量较少的沼气可以采用干式法中的常温氧化铁法直接脱除硫化氢，该法同样适用于农村户用沼气的脱硫。农村沼气池产生的沼气一般含有 1 ~ 3 克/米³ 的硫化氢，可以在农户家中沼气输送管路中串接一脱硫器，内装氧化铁脱硫剂把沼气中的硫化氢吸收掉，从而达到净化沼气、消除硫化氢危害的目的。但当硫化氢含量高时，如超过 10

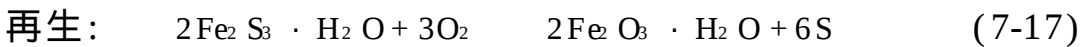
克/米³时，一般应先采取湿式法对硫化氢进行粗脱，再用氧化铁干法进行精脱。

7.2.2.1 沼气干法氧化铁脱硫 沼气干法脱硫适用于含硫量较低的燃气，日处理量较小。该法工艺简单、成熟可靠、造价低，能达到较高的净化程度。但采用此法时设备笨重，间歇式干法脱硫还存在更换脱硫剂时劳动强度大、污染环境、废脱硫剂难以处理等问题。

(1) 干法氧化铁脱硫工艺 干法脱硫是在圆柱状脱硫塔内装填一定高度的脱硫剂，沼气自下而上通过脱硫剂，H₂S 被去除，实现脱硫过程，污水处理厂常用的脱硫剂为氧化铁，其颗粒为圆柱状，氧化铁脱硫的原理如下。



由上面的反应方程式可以看出，Fe₂O₃ 吸收 H₂S 变成 Fe₂S₃，随着沼气的不断产生，氧化铁不断吸收 H₂S，当吸收 H₂S 达到一定的量，H₂S 的去除率将大大降低，直至失效。Fe₂S₃ 可以还原再生，与 O₂ 和 H₂O 发生化学反应还原为 Fe₂O₃，原理如下。



由化学反应方程式 (7-16)、式 (7-17) 可以看出，Fe₂O₃ 吸收 H₂S 变成 Fe₂S₃，Fe₂S₃ 要还原成 Fe₂O₃，需要 O₂ 和 H₂O，因此沼气在干法脱硫之前不需进行脱水处理，只需通过空压机在脱硫塔之前向沼气中投加空气即可满足脱硫剂还原对 O₂ 的要求。

沼气直接进入脱硫塔通过脱硫剂，同时投加空气，脱硫剂吸收 H₂S 失效，空气中的 O₂ 和沼气中的饱和水将失效的脱硫剂还原再生成 Fe₂O₃，此工艺即为沼气干法脱硫的连续再生工艺。

氧化铁存在着多种形式，而只有 α-Fe₂O₃ · H₂O 和 γ-Fe₂O₃ · H₂O 这两种形态能作为脱硫剂。氧化铁吸收硫化氢的反应速度视其与氧化铁表面的接触程度而变化，要求脱硫剂的孔隙率应不少于 50%。氧化铁法脱硫时，沼气中的 H₂S 在固体氧化铁 Fe₂O₃ · H₂O 的表面进行反应，沼气在脱硫器内的流速越小，接触时间越长，反应进行得越充分，脱硫效果也就越好。当脱硫剂中的硫化铁

含量达到 30% 以上时，脱硫效果明显变差，脱硫剂不能继续使用，需要再生。将失去活性的脱硫剂与空气接触，把 $\text{Fe}_2\text{S}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 氧化析出硫磺，即可使失去活性的脱硫剂再生。由于再生时析出硫沉积在氧化铁的表面，有时竟达到氧化铁含量的 2.5 倍以上，所以要将其中的硫分离出来，或更换新的脱硫剂，此为间断式干法脱硫工艺。

(2) 氧化铁脱硫剂的种类

天然沼铁矿。 α -型氧化铁含于沼铁矿中， γ -型氧化铁含于铝土矿生产三氧化二铝的废渣中。颗粒直径为 1 ~ 2 毫米的占 85% 以上的沼铁矿，按比例掺入木屑（或稻壳）和熟石灰，其质量比为沼铁矿 95%、木屑 4% ~ 4.5%、熟石灰 0.5% ~ 1%。装箱前应均匀喷洒 30% ~ 40% 的水分。天然沼铁矿脱硫剂含高价铁 50% ~ 60%，脱硫效率高，这种沼铁矿在我国黑龙江省的伊春、天津的蓟县及北京的怀柔县等地均有生产。

商业开发的常温氧化铁脱硫剂。目前我国有很多厂家从事氧化铁脱硫剂的生产，例如，北京南郊科星净化剂厂生产的 TTL-1 型常温氧化铁脱硫剂，山西汾阳催化剂厂生产的 TG 型常温氧化铁脱硫剂，四川江油 857 脱硫剂厂生产的 XJ-1 型氧化铁脱硫剂等。这类脱硫剂以氧化铁为主要活性组分，添加多种助剂，形状、性能各不相同，有粉状的，也有条状的。

转化炉炼钢赤泥。转化炉炼钢赤泥中主要含有氧化铁、氧化钙、氧化锰、三氧化二铝、二氧化硅等。其中氧化铁的含量在 45% ~ 70% 之间，主要以 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的形式存在。当直接利用炼钢赤泥作脱硫剂时，应将赤泥晾干，粉碎成 90 目/分米以下的粉末，当 pH 值低于 8 时可掺加少量熟石灰。当沼气中 H_2S 含量低于 400 毫克/米³ 时，赤泥与木屑（或稻壳）的质量比为 1 (1 ~ 2)；如 H_2S 大于 500 毫克/米³ 时，赤泥与木屑的质量比为 1 (0.5 ~ 1)。装箱前脱硫剂的含水量应达到 30% ~ 40%。

硫铁矿灰。硫铁矿灰是硫酸厂的副产品，其中含有活性氧化铁 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，大约在 12% 左右。用硫

铁矿灰与木屑按 1 : 2 混合，加入 0.5% 的熟石灰，使其 pH 值为 8 ~ 9，含水分 30% ~ 40% 即可使用。

新型脱硫剂。目前国内出现了许多新型的脱硫剂，如上海市煤气公司研究所研究的 PM 型成型脱硫剂，当硫化氢平均浓度达到 1.84 克/米³ 时，一次工作硫容可达 25.5%。当出口硫化氢大于 20 毫克/米³ 时需进行间歇再生。该脱硫剂应用于沼气时，可以增大孔径，从而提高硫化氢的脱除率。河北轻化工学院及石家庄市煤气站联合研制的 SW 型脱硫剂，该脱硫剂即是利用硫酸厂的生产废渣，经活化后进行脱硫。在常温常压下，把 800 克粒径为 2 ~ 10 毫米的 SW 型脱硫剂，装入直径为 5 厘米、23 厘米高的脱硫柱中，在河北新华第一制药厂进行试验，试验中发现，当沼气中硫化氢含量达到 3000 ~ 6000 毫克/米³、气速为 0.1 米/秒、接触时间为 60 秒时，该脱硫剂吸附一次后工作硫容为 7.75%，再生一次后累计工作硫容为 12.29%，再生二次后累计工作硫容达 21.43%，再生三次累计工作硫容达 30.3%。与国外同系列脱硫剂比较，各项指标均达到国际同类产品水平。而且，该类脱硫剂使用、再生方便，废脱硫剂还可作为制取硫酸的原料；同济大学环境工程学院采用鹅卵石作为填料，对污泥厌氧消化产生的沼气直接进行脱硫处理，当 H₂S 含量高达 2000 毫克/米³ 时，脱硫率大于 98%，出口 H₂S 含量小于 20 毫克/米³，采用空气再生处理后，其脱硫率可保持在 98% 以上。

(3) 脱硫剂的基本性能指标 脱硫剂的硫容从一定程度上反映了脱硫剂脱除硫化氢的能力，硫容的计算公式如下。

$$\text{硫容}(\%) = \frac{\text{净化气中 H}_2\text{S 浓度(克/米}^3\text{)} \times \text{通入沼气量 (克/米}^3\text{)} \times \left[\frac{32}{34} \right] \times 100}{\text{脱硫剂质量(克)}} \quad (7-18)$$

脱硫剂的脱硫效率可由式 (7-19) 进行计算：

$$\text{脱硫效率} = \frac{\text{入口 H}_2\text{S 浓度} - \text{出口 H}_2\text{S 浓度}}{\text{入口 H}_2\text{S 浓度}} \times 100\% \quad (7-19)$$

沼气中因含二氧化碳较高，要彻底清除其中的硫化氢，使其达到民用燃料和发动机燃料标准，脱硫剂的选择就非常重要。一般使用硫铁矿灰或炼钢赤泥作脱硫剂时，首先将其进行活化处理以提高其一次工作硫容及累计硫容；当选用厂家生产的成型脱硫剂时，要对脱硫剂进行综合比较。成型脱硫剂，如柱状、环状、条状脱硫剂，适宜采用脱硫塔；天然沼铁矿和粉状脱硫剂，要使用箱型脱硫器。

脱硫剂主要的技术指标应满足一定的要求，具体如表 7-9 所示。

表 7-9 脱硫剂技术指标

技 术 指 标 名 称		指 标	
		合 格 品	一 极 品
穿 透 硫 容 重/ %		≥ 20. 0	≥ 22. 5
颗 粒 径 向	平 均 值/ %	≥ 50. 0	≥ 60. 0
抗 压 碎 强 度	强 度 低 于 30 牛/ 米 的 颗 粒 百 分 数/ %	≤ 10. 0	
磨 耗 率/ %		≤ 10. 0	

7.2.2.2 干法氧化铁脱硫装置及流程

(1) 脱硫塔及其设计要点

脱硫塔。大型沼气工程中的脱硫装置一般为塔式，如图 7-2 和图 7-3 所示。这种塔由碳钢壳组成，内有可移动的筐子，每筐内装有两层放在木架上的氧化物。筐的构造为：当它们放在塔内可形成一中央进气管。管的每一段开有长方形孔，气体经过此孔进入每个筐的两层氧化物之间的空间。气体与氧化物接触后，流入筐与塔壳间的环隙内，并由此通至出口。通常脱硫塔放在湿法脱硫（粗脱）、脱碳之后，在脱硫塔前需设置汽水分离器，而且必须有足够的分离能力，在操作中，实现“ 严禁带液 ”。沼气工程中脱硫一般由多个塔组成，其中 1~2 个备用。

脱硫塔设计要点。根据当前大中型沼气工程的实际情况及

沼气中硫化氢的浓度范围确定。

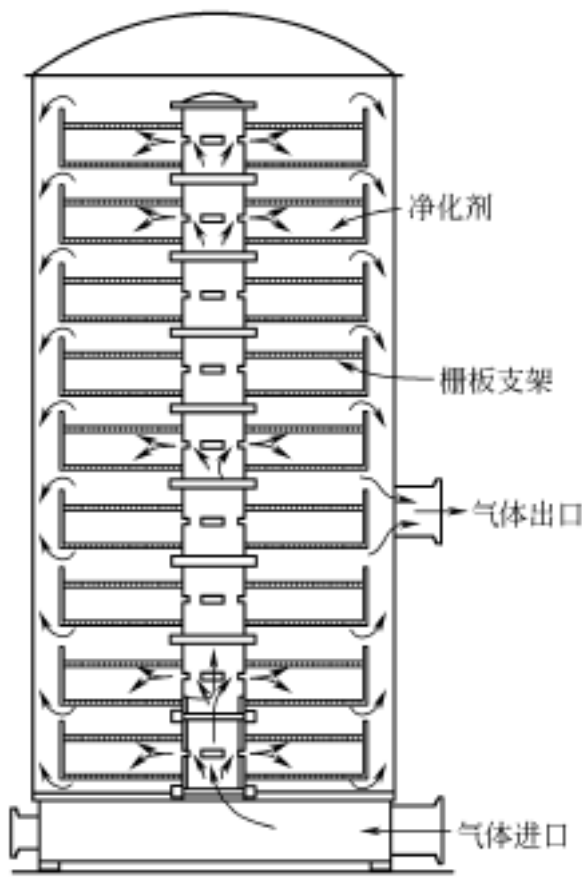


图 7-2 脱硫塔

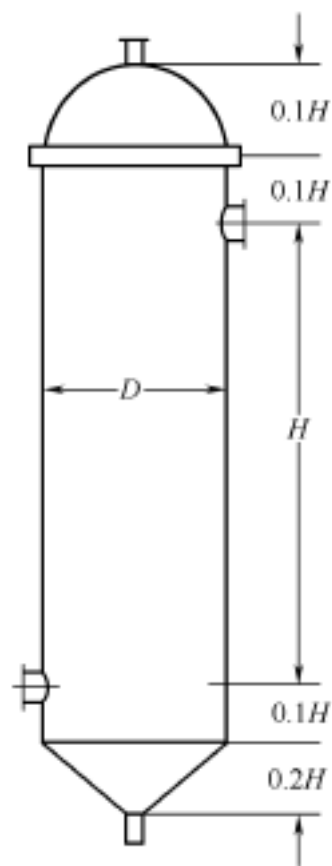


图 7-3 脱硫塔外形尺寸

- 一级脱硫： H_2S 在 2 克/米³。
- 二级脱硫： H_2S 在 2 ~ 5 克/米³。
- 三级脱硫： H_2S 在 5 克/米³ 以上。

a. 脱硫剂的装填量。脱硫剂的装填量取决于原料气的气量、硫含量和设计脱硫剂的使用寿命，以 V 来表示脱硫剂的装填量，则 V 为：

$$V = \frac{CQ t}{W d} \times 10^{-9} \tag{7-20}$$

- 式中
- V ——脱硫剂装填量，米³；
 - C ——进口气体中 H_2S 的浓度，毫克/米³（标）；
 - Q ——原料气流量，米³（标）/ 小时；
 - t ——脱硫剂使用寿命，小时；

W ——脱硫剂原粒度的质量穿透硫容，%；

d ——脱硫剂的质量堆密度，吨/米³。

注意：使用式 (7-20) 进行计算时，要考虑穿透硫容所受的影响，进行适当的调整。比如，双塔串联硫容可相应提高 50%；在较高的 CO₂ 含量下 (> 5%)，绝大部分的脱硫剂的硫容均要降低约 25%。

b. 脱硫塔的直径。脱硫塔的直径应满足以下两个条件：一般情况下，粗脱硫时取高径比为 3~4，精脱硫时的高径比为 2~3，当高径比增大时，脱硫效果提高，但同时压力损失增大，因此，在满足压力损失的情况下，尽量取上限值；脱硫塔内常用气体的线速度为 0.1~0.3 米/秒，当线速度下降时，通过气膜的传质能力亦下降，提高线速度，会使脱硫效果提高，但同时会增加床层阻力。

(2) 典型氧化铁脱硫净化工艺流程 高压氧化铁法的典型流程如图 7-4 所示。实际上可以用 1~4 个装氧化铁的反应器，但流程上只表示出两个。连续的和周期性的床层再生管路系统也表现于图 7-4 中，在两塔流程上，一个塔处于从含硫气体中脱除 H₂S 的周期，而另一个塔则处于再生循环或更换海绵铁床层的周期。流程图上，含硫气体自上而下地通过床层。

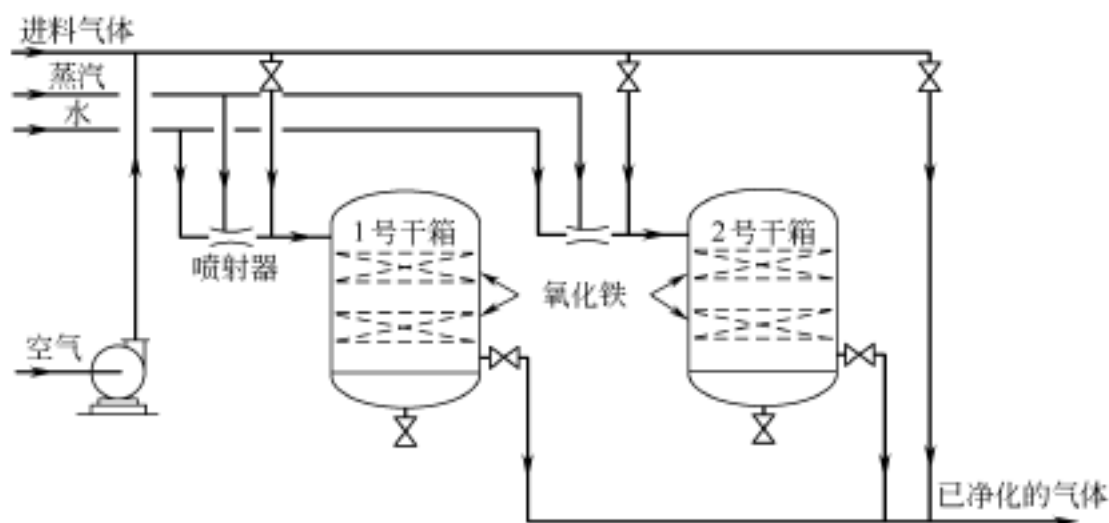


图 7-4 典型氧化铁法脱硫工艺流程

采用周期性再生时，塔要操作到床层为硫所饱和，且 H_2S 开始出现于净化气流之中。此时，塔从脱硫运行中切换下来，使空气循环通过床层以再生氧化铁。由于再生反应是放热反应，其速度必须控制，因而再生操作应小心地进行。

不论采用何种再生过程，一个给定的氧化铁床层都将逐渐失活，最终需要更换。因此，在设计流程图中的塔时，应使之在更换床层时尽量减少困难。更换床层是有危险的，因为床层卸料时，由于暴露于空气而引起的剧烈温升，会导致床层自燃，打开塔与空气接触时必须十分小心，在开始卸料操作前整个床层应该淋湿。

氧化铁必须在碱性条件下操作，用加入纯碱的方法维持合适的 pH 值。因为氧化铁必须保持水合形式，通常还要向氧化铁上加水。这样也为纯碱的加入提供了方便的途径。此外，床层的操作温度必须维持低到足以防止水合水蒸发而使氧化铁失活，操作温度应不超过 110°C 。

采用连续再生的场合，在含硫气体处理前要先把少量空气加入其中。这部分空气能连续地按上述反应再生与 H_2S 反应后的氧化铁。延长了塔的运行寿命，但却可能会降低一定重量床层所能脱除的 H_2S 总量。

(3) 氧化铁法连续净化流程 当使用连续净化工艺脱硫时，一般是三个串联的硫化床吸附塔组成（图 7-5），塔中填充人工氧化铁粒状净化剂。颗粒由氧化铁、锯屑、水泥和石灰组成，并经活化后提高其性能，颗粒直径为 $12.7 \sim 19.0$ 毫米。颗粒由塔顶加入，靠重力向下慢慢移动至塔底经密封阀排出。如果气体中缺氧不能氧化，则排出的氧化铁颗粒应进行活化与过筛，然后再进行硫的萃取。从 1 号塔出来的氧化铁经处理后送入 2 号塔。2 号塔出来的氧化铁经过筛与活化后送给 1 号塔。由于氧化铁颗粒在流动、输送和筛分过程中磨细，而筛分出一部分细粉，因此必须补充新的氧化铁颗粒。这部分新料送入 3 号塔，由此塔出来的颗粒经筛分与活化后送给 2 号塔。这个流程实现了净化和氧化铁净化剂处理的连续化操

作。它的缺点是氧化铁的最终含硫量仅能达到满载量的 30%。

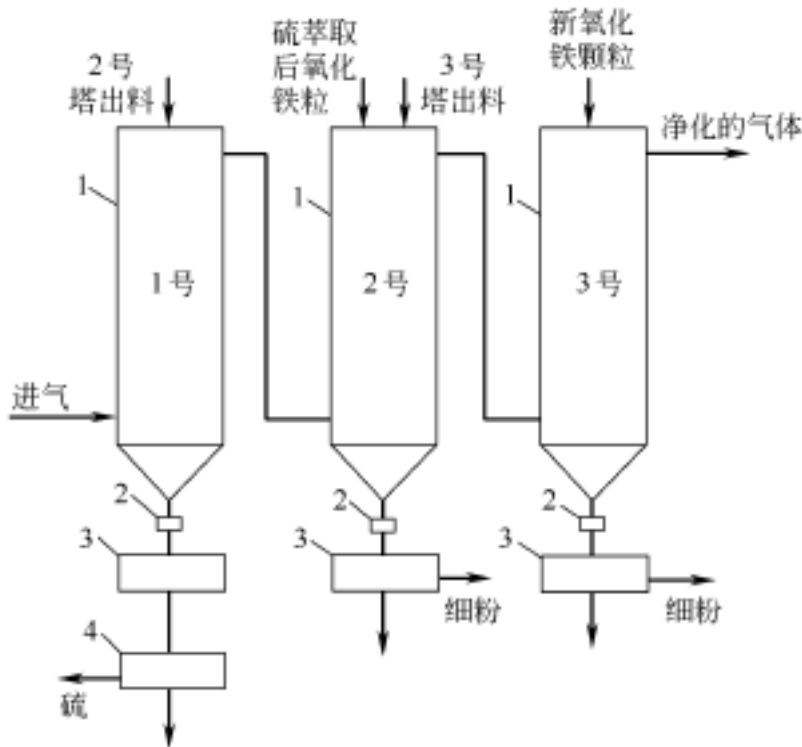


图 7-5 氧化铁法连续净化装置流程

1—流动床吸附塔；2—密闭卸料阀；3—筛分与活化器；4—硫萃取装置

再生的氧化铁可继续净化硫化氢气体，这种循环可以重复很多次。但是由于在氧化铁表面上生成的元素硫不断增加，致使氧化铁的活性表面积逐渐减少，并且氧化铁颗粒之间的空隙逐渐堵塞，床层的压力损失增加，最后，必须清除元素硫，净化过程才能继续进行。

清除元素硫的方法有燃烧法和溶剂萃取法两种。燃烧法就是将元素硫燃烧，氧化成高浓度二氧化硫气体进一步生产硫酸。溶剂萃取法是用选择性溶剂，如二硫化碳、过氯乙烯或甲苯萃取硫，然后用蒸馏法或结晶法回收硫。

普通氧化铁脱硫剂使用时如脱硫塔出口气体中 H_2S 浓度大于 1 毫克/米³（标）或使用要求指标，可用空气进行再生，再生时的操作条件：空速为 0.5 ~ 1.40 米³/小时；压力为常压；温度为 30 ~ 60 。由干法脱硫连续再生工艺可知，1 体积的 H_2S 完全反应要消

耗 0.5 体积的 O_2 ，根据脱硫试验，脱硫剂吸收氧气的效率为 50% ~ 67%，如按吸收效率 60% 计，那么脱除 1 体积 H_2S 需要 0.83 体积的 O_2 （即 4 体积的空气），由此确定脱硫连续再生工艺空气的投加量其计算过程繁琐，可操作性差，且难于实现自动控制。由于氧化铁再生是一强放热反应，再生时必须十分细心操作。再生过程中有严重刺激性的 SO_2 气体产生，对环境有污染。再加上有的脱硫剂的一次硫容可满足使用 1 年以上的需要，故多已不使用再生方法。

(4) 农村户用沼气脱硫器及安装注意事项 图 7-6 中是一种常见的农村沼气脱硫器。主体为塑料吹塑而成的薄壁圆柱壳体，两端加带接口的塑料盖，内装脱硫剂。

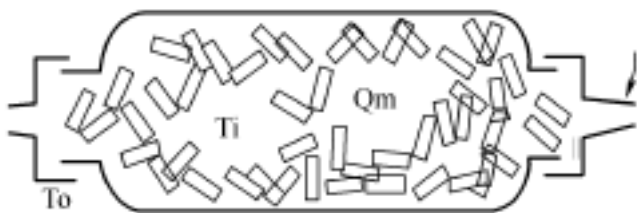


图 7-6 农村户用脱硫器

沼气由入口进入脱硫器，经脱硫后由出口流向灶具。在这个过程中，脱硫器内因热化学反应要产生热量。产生的热量一部分用于使脱硫剂升温，一部分通过脱硫器的壳壁向周围散失，还有一部分被流出的气体带走。根据计算处于正常脱硫工作状态时，脱硫器内平均温度增高不到 1℃。但是脱硫剂经过长时间的使用后，需要对脱硫剂进行再生。再生时将脱硫剂取出，在脱硫器外进行再生反应。但是，如果用户操作不当，在沼气池出料时没有采取一定的措施，而是任由空气倒流进脱硫器，然后流向沼气池消除出料引起的负压，脱硫器中将由于脱硫剂的再生产生高温，使脱硫器的塑料壳被熔穿。由此可见，沼气池出料时让空气流经脱硫器是十分危险的。但是出料时，为消除沼气池内负压，让空气不经过脱硫器而进入沼气池是容许的，这样一来沼气池内的气体中空气就占了较大比例。当打开灶具，这些空气就会流经脱硫器，但与前述情况不同的是，这时气体流速（0.5 米³/ 小时）远低于出料时因非正常操作引

起气体倒流进脱硫器时的流速，因此再生反应的强度应低得多，仅使脱硫器产生有限温升，不会造成不利影响。

由于出料对脱硫器的影响，正确的出料操作是在脱硫器之前通过打开旁路开关或拔掉管接头，让空气不经过脱硫器而直接进入沼气池消除负压。此外，为让效率降低的脱硫剂再生，应将脱硫剂从脱硫器中取出，平摊在无易燃物且通风良好的场地上，让其安全地进行再生反应。正常的脱硫反应产热很少，没有任何安全问题。每次正常出料后虽然沼气中空气比例较大，但打开灶具让这种气体以正常流速通过脱硫器所产生的热量不会引起危险。

(5) 微量硫分析仪 脱硫塔进、出口气体中硫化物的形态和含量的分析是监控脱硫指标的重要仪器。过去脱硫比较粗放，多用化学分析方法与微库仑等方法进行分析。随着脱硫精度的提高与测试技术的进步，在脱硫工段中，不论是精脱还是粗脱，都应配备微量硫分析仪，因为它可同时测定不同形态的有机硫含量，且灵敏度高。目前，国内最常用的是 HC-2 型（湖北省化学研究所）与 WL-SP852 型（西南化工研究院）微量硫分析仪。

7.2.2.3 沼气湿法脱硫原理及装置 湿式氧化法脱硫是将硫化氢在液相中氧化成元素硫的一种脱硫方法，这种方法的流程比较简单；可以直接得到元素硫。主要用于处理硫化氢浓度较低，而二氧化碳浓度较高的气体。液相氧化法对硫化氢的吸收有一定的选择性。这种脱硫方法的缺点是溶液吸收硫化氢的硫容量低，因此溶液循环量大和回收硫的处理设备大。适用于除去每天少于 10 吨硫的气体。

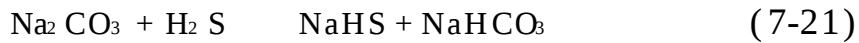
硫化氢氧化为元素硫是借助溶解于溶液中的载氧体来实现的，此类方法很多。有 20 世纪 50 年代开发的砷碱溶液 Giammarco-Vetrocoke 法，不过砷有毒性，这类方法目前已很少使用；20 世纪 60 年代开发的苯醌氧化-还原反应的脱硫工艺，比较著名的是蒽醌二磺酸钠法（Stretford）。

ADA 是蒽醌二磺酸钠的英文缩写，因此这种方法也叫 ADA 法。这种方法所用的吸收溶液是加入少量的 2,6-蒽醌二磺酸钠或

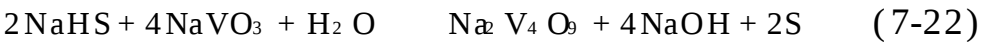
2,7-蒽醌二磺酸钠作催化剂的 Na_2CO_3 水溶液。最早的 ADA 法所需反应时间要半小时，因此设备庞大，硫容量低，副反应多，脱硫效果差。现运行的工业装置中，在溶液中添加适量的偏钒酸钠、酒石酸钾钠及三氯化铁后已提高脱硫效率，称作改良 ADA 法。

(1) 改良的 ADA 法脱硫基本原理 改良的 ADA 法脱硫过程可用 4 个反应来概括。

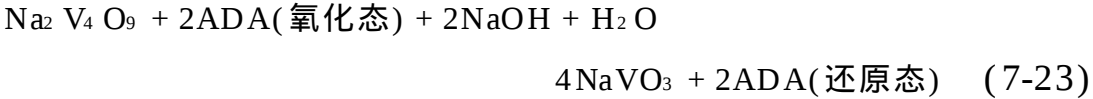
在脱硫塔内，当 $\text{pH} = 8.5 \sim 9.2$ 时，在被湿润的填料表面上，稀碱液 (Na_2CO_3 水溶液) 吸收 H_2S ，生成 NaHS 。



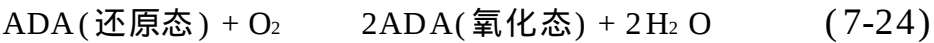
在液相中 NaHS 被偏钒酸钠氧化成元素 S，偏钒酸钠还原成焦钒酸钠。



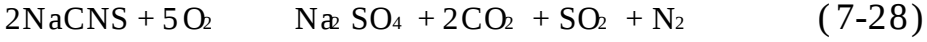
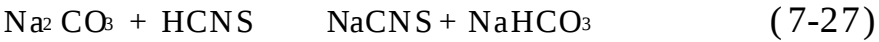
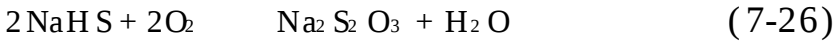
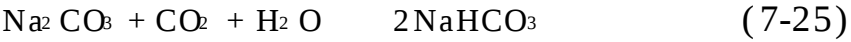
具有还原性的焦钒酸钠与氧化态 ADA 反应生成还原态的 ADA，焦钒酸钠则被 ADA 氧化再生成偏钒酸钠。



还原态的 ADA 在再生塔中被空气中的氧氧化成氧化态的 ADA，再生后的溶液循环使用。



当原料气中含有 CO_2 、 O_2 、 HCNS 时，会产生下列副反应。



因为沼气中不可避免的存在以上杂质，上述副反应一定存在。但是，这些副反应消耗了一定量的 Na_2CO_3 ，从而降低了溶液的吸收能力。另外，当脱硫液中的 NaCNS 和 Na_2SO_4 杂质积累到一定量后，为确保正常生产，必须排放部分溶液以提高吸收能力，在生产过程中应补充相应数量的脱硫液。

(2) ADA 法脱硫工艺流程 ADA 法中应用到的湿法脱硫塔及再生塔结构如图 7-7、图 7-8 所示，该法的工艺流程如图 7-9 所示。ADA 法脱硫工艺过程为：从脱水装置进来的原料气，进入脱硫塔底部，通过塔内填料层时，与塔顶喷淋而下的脱硫液逆流接触，根据反应式 (7-21)，稀碱液吸收硫化氢生成 NaHS ，塔顶出来的净化气中硫化氢含量下降到 20 毫克/米³。脱硫气体由塔顶放出，经分离器分离出液滴后送入下一工序。吸收了硫化氢的溶液在塔器和反应槽中完成式 (7-22) 和式 (7-23) 两步反应后用循环泵送入再生塔，同时在塔底鼓入空气使溶液再生，尾气由塔顶排放。再生溶液经液位调节器进入脱硫塔顶部循环使用。

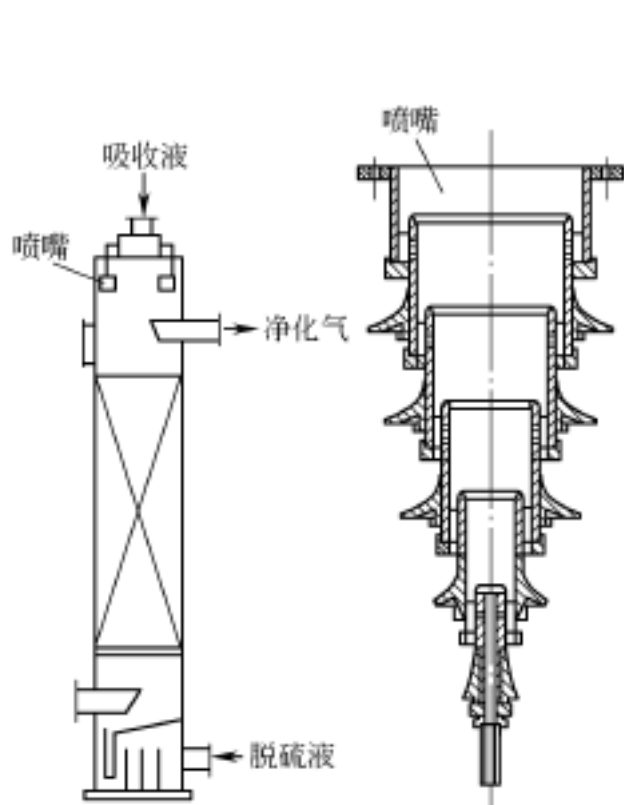


图 7-7 湿法脱硫塔示意

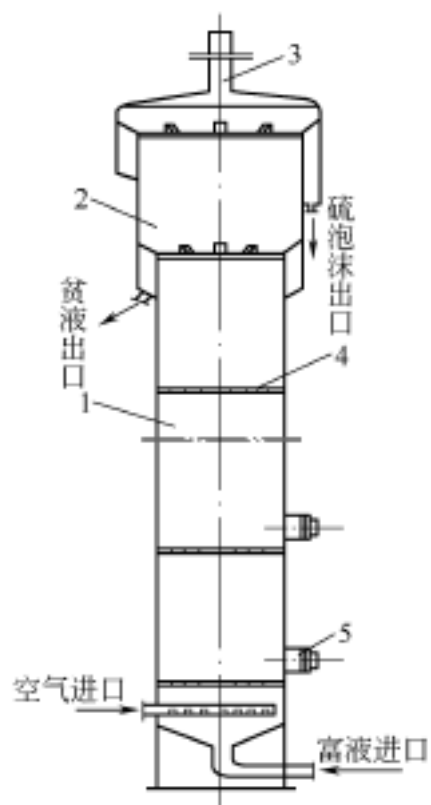


图 7-8 再生塔示意

1—塔体；2—放大部分；3—放空管；4—空气分布板；5—人孔

7.2.2.4 其他脱硫方法的研究

(1) 生物法脱硫研究 浙江大学环保系方士等研制了利用反应

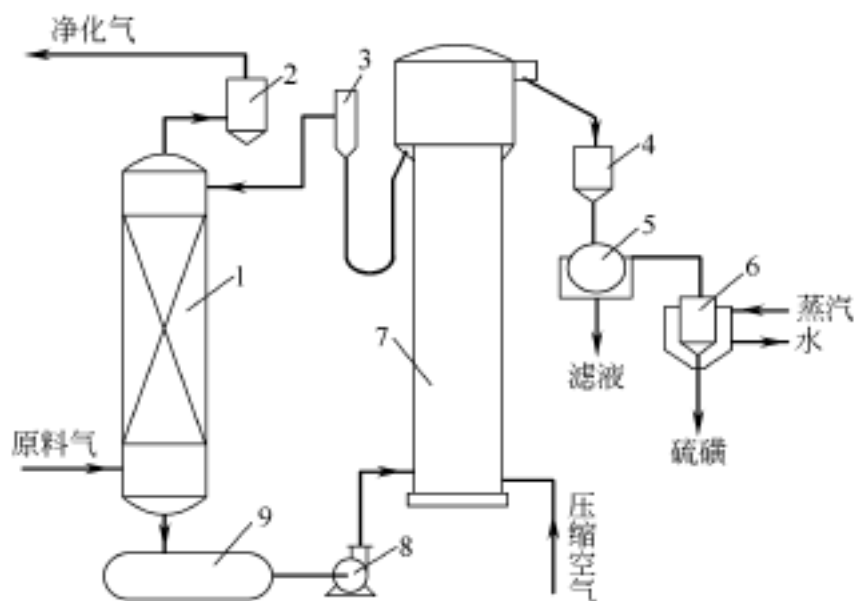


图 7-9 改良常压 ADA 法脱硫流程

1—脱硫塔；2—分离器；3—液位调节器；4—硫泡沫槽；5—真空过滤机；
6—熔硫釜；7 - 脱硫塔；8—循环泵；9—溶液循环槽（反应槽）

塔外曝气、介质循环供氧处理沼气中的 H_2S 的新方法，结果表明：一定成分的硫代硫酸钠培养液可以富集培养出效果良好的脱硫污泥，在反应器中脱硫污泥可以高效地去除 H_2S ，当进气 H_2S 浓度为 1.1 克/米^3 ，进气量为 0.34 升/分钟 时，去除率可达 98.6% ， H_2S 最大负荷为 15.9 毫摩/（升·天） ；当进气 H_2S 浓度为 2.44 克/米^3 ，进气量为 0.17 升/分钟 时，去除率为 100% ， H_2S 负荷可达 17.6 毫摩/（升·天） ，系统运行的最佳酸度为 $pH1.9 \sim 2.0$ ，尾气中残留氧的浓度不超过 0.56 克/米^3 ，远远低于国家标准，且具有较强的抗冲击负荷能力。

生物法脱硫流程和装置见图 7-10，本实验系统对沼气中 H_2S 含量的变化有较大的缓冲能力，在 H_2S 含量变化较大时基本不受影响，失常状态可以在短时间内自动恢复。沼气通过流量计进入生物反应塔，营养介质通过液泵从贮槽中不断抽入生物反应塔，然后自塔底回流至贮槽，形成稳定的循环，空气通过气泵连续地鼓入介质槽，使介质液体中含有足够的溶解氧。

(2) 萘醌法脱硫研究 萘醌法由日本东京煤气公司首先用于焦

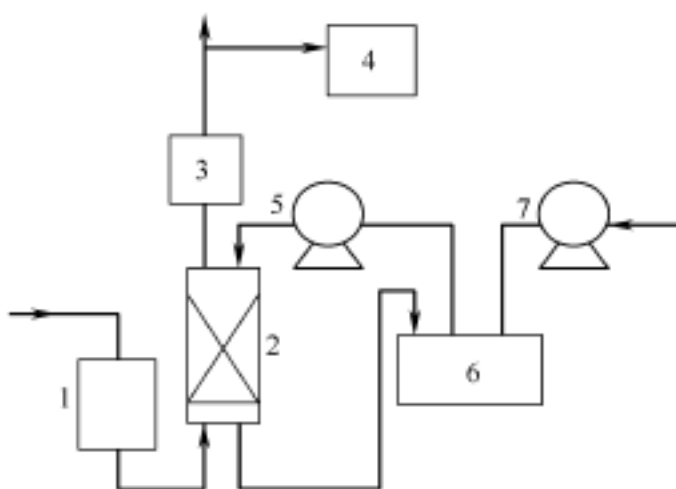


图 7-10 生物法脱硫流程和装置

1—流量计；2—生物反应塔；3—出气取样点；4—尾气吸收液；

5—液泵；6—介质贮槽；7—气泵

炉气裂化石油气的脱硫。当用于沼气脱硫时，由于沼气中二氧化碳含量较高，与吸收剂反应后降低了吸收剂的硫容，必须对吸收剂的组成进行研究。为了提高吸收剂对硫化氢的选择性，减少二氧化碳对吸收效果的影响，在吸收剂内加入少量 FeCl_3 ，同时加入乙二胺四乙酸螯合剂（EDTA）起稳定作用。通过降低吸收剂的 pH 值，用少量的 NaOH 补充 Na_2CO_3 损失，尽量缩短停留时间，可以有效地阻止因二氧化碳吸收消耗 Na_2CO_3 的反应。吸收过程中 Fe^{3+} 络合离子被还原成 Fe^{2+} 络合离子，再生过程中又被氧化成 Fe^{3+} 络合离子。

含 H_2S 沼气经计量后进入吸收塔下部，与从塔顶喷淋而下的吸收液逆流接触。吸收硫化氢的液体进入再生塔顶部，与底部通入的空气逆流接触，再生后的吸收液经沉降过滤分离出粗硫磺，吸收液循环使用。萘醌法脱除沼气流程见图 7-11。

萘醌法用于脱除沼气中硫化氢时，对吸收液的组成进行适当改进，可以使脱硫率达到 99% ~ 99.5%。吸收和再生操作都可以在常温、常压下进行。吸收液的适宜配方为： Na_2CO_3 为 25%，1,4-萘醌-2-磺酸钠（NQS）浓度为 12 摩/米³， FeCl_3 浓度为 10%，EDTA 浓度为 0.15%，液相 pH 值 8.5 ~ 8.8，吸收操作的液气比

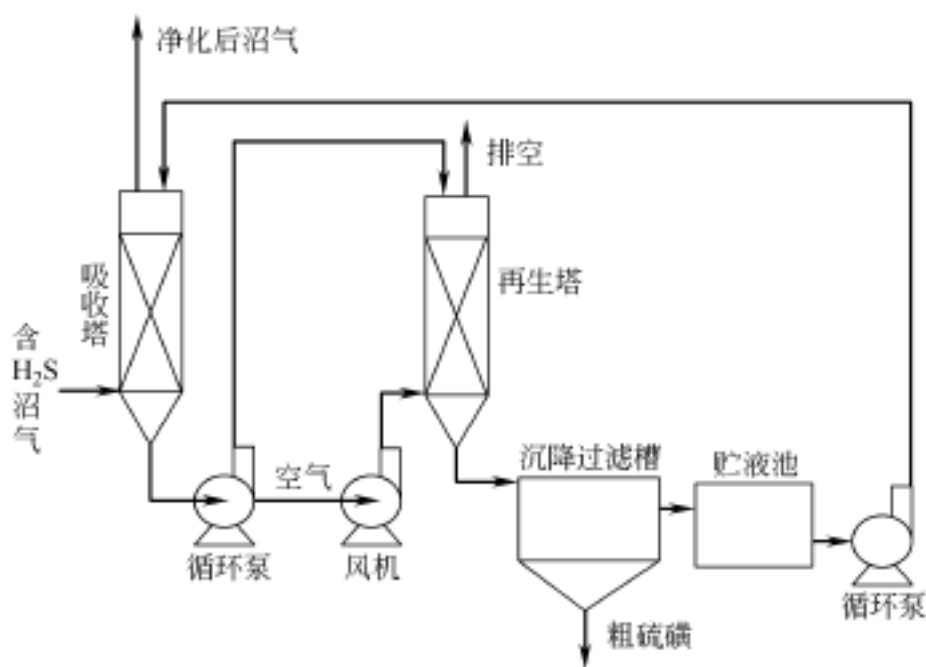


图 7-11 萘醌法脱除沼气流程

(升/米³) 为 11~12。

(3) 双塔吸收法提纯沼气 日本某市用双塔式吸收法提纯沼气，装置简图如图 7-12 所示，这种装置具有组成简单、成本低、操作简便的特点。第一吸收塔用处理水吸收大部分 CO₂ 和 H₂S，第二吸收塔用 NaOH 溶液，这样可节省 NaOH 的用量。用此装置提纯沼气，CH₄ 的回收率高，运行稳定可靠。

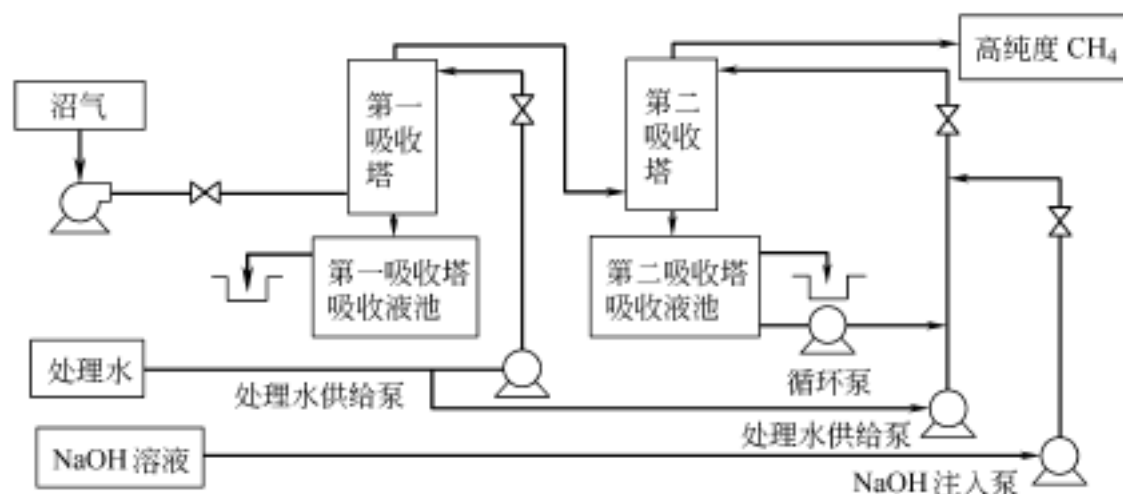


图 7-12 双塔式吸收法提纯沼气

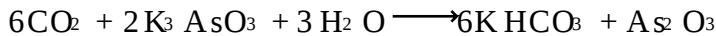
7.2.3 沼气中二氧化碳的去除

随着科学技术的不断提高，工厂生产废弃物、污水处理厂中的污泥、大型畜牧养殖厂的粪便，甚至垃圾填埋场都能作为沼气厌氧菌的养料以生产沼气，即工业沼气正在或将要大量生产。对于工业沼气来说，目的是作为燃料来使用的。为了提高燃料的热值、降低沼气输配管路的阻力、减少沼气输送管路的腐蚀，有必要对沼气进行脱除二氧化碳的处理。

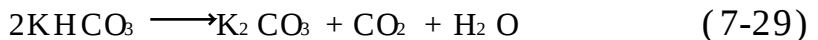
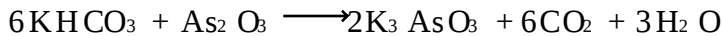
7.2.3.1 G-V 法脱除二氧化碳的工艺流程及装置 G-V 法是一种能有效脱出 CO_2 的方法，该法最早根据医学研究成果发展而来。

(1) 工作原理 G-V 法利用少量有机物或大量无机物作为热碳酸钾法的活化剂，以去除二氧化碳。吸收和再生反应式如下。

吸收



再生



在 G-V 脱除 CO_2 循环中，溶液中的活化剂起两种作用。首先，它作为一个催化剂增加了 CO_2 吸收速率，它也改善了解吸，容许用较低温度的气体空气代替较高温度的蒸汽来再生。其次，对于一定量的碳酸钾溶液，催化剂可起增加 CO_2 吸收量的作用。从反应式 7-29 可见，与常规的碳酸钾溶液相比，用了催化剂的碳酸盐溶液可能有两倍的理论酸气吸收量。

(2) 蒸汽再生 G-V 法 用蒸汽再生的 CO_2 脱除装置的典型流程示于图 7-13。酸性气体进入吸收塔底，向上流动与吸收塔顶板上进入的碳酸盐贫液逆流接触。净化气离开吸收塔顶富液从吸收塔底流到闪蒸罐，闪蒸罐内的压力下降使相当多的 CO_2 从碳酸盐溶液中闪蒸出来。部分再生了的溶液从闪蒸罐底流经换热器。溶液从换热器流到再生塔顶，由于温度升高及压力进一步下降，在此处从

溶液中又进一步汽提出 CO_2 来。

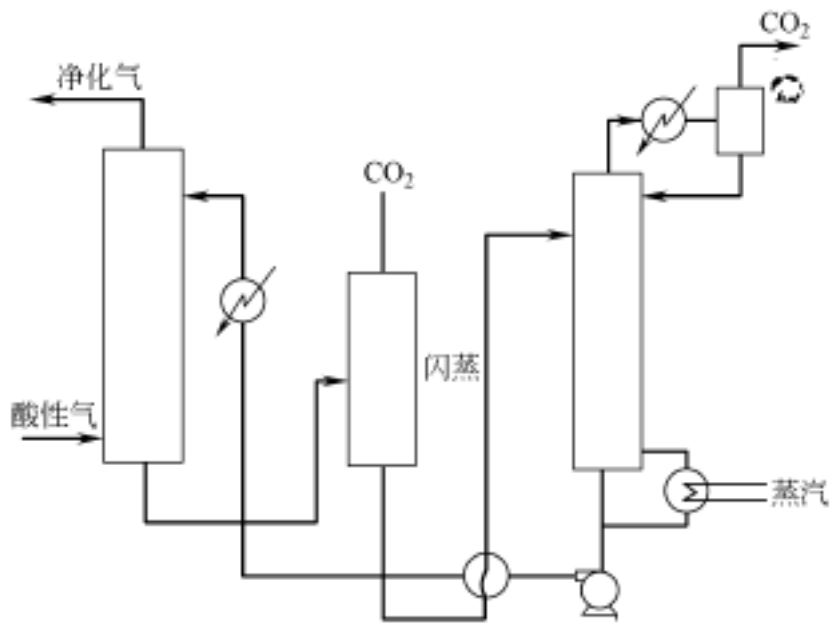


图 7-13 蒸汽再生的 G-V 法

随溶液在再生塔内向下流动与重沸器发生的蒸汽逆流接触，从溶液中汽提出了剩余的 CO_2 。 CO_2 出塔后通过冷凝器及收集器，在此处除去冷凝水并作为回流用泵送返再生塔。借助间接蒸气加热向重沸器供热。贫液离开再生塔底，用泵将贫富液经过换热器及冷却器，然后到吸收塔顶。

(3) 空气再生 G-V 法 使用空气再生的 G-V 法脱除 CO_2 过程如图 7-14 所示，在操作上和蒸汽再生是十分类似的。然而，没有贫富液换热器，因为溶液的热量在汽提塔被汽提空气带走了。为了预热进入闪蒸罐的富液，使用了一个蒸汽加热器。汽提是借助一股进入再生塔底的、预热了而且以水饱和了的空气与碳酸盐溶液的逆流接触而获得的。离开再生塔顶的 CO_2 与空气流经冷水洗涤，其作用是使 CO_2 -空气混合物离开装置时得到最大的热回收和最小的水损失。离开减湿器（冷凝器）的水流被用来加热并预热饱和进入汽提塔底的空气。冷却了的 CO_2 -空气混合物排放了，离开汽提塔底的再生了的溶液返回吸收塔顶。需要一个空气鼓风机使空气有足够的压力流过预饱和器、汽提塔和减湿器。

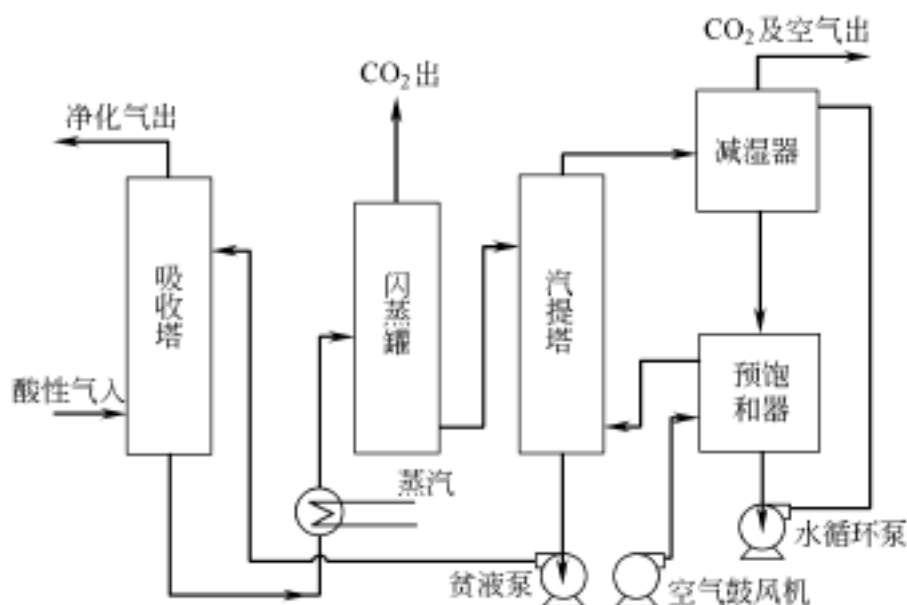


图 7-14 空气再生 G-V 法除 CO_2 流程

7.2.3.2 氨水法脱除 CO_2 的工艺流程 氨水法脱除 CO_2 ，既可以除掉 CO_2 ，又可以除掉 H_2S 。利用氨水法除 CO_2 时，需首先对沼气进行加压。氨处理装置包括一个氨吸收塔、低压快速蒸发缸、萃取塔和重沸器、溶剂冷却器、泵和回流系统。氨处理装置基本设备见图 7-15。

加压后的沼气进入吸收塔下段，并向上与半浓氨和稀氨在吸收塔内的塔板上形成逆流。为有效去除 CO_2 ，吸收塔分成两个区段。 CO_2 浓度高的气体在塔的下部与中等浓度的氨接触，能去除大量的 CO_2 。浓氨从吸收塔底部送到快速蒸发缸内，在缸内由于减压，去除大量的 CO_2 。部分再生溶剂（半浓氨）从快速蒸发器进入到吸收塔的较上部位，进一步和含 CO_2 的气流接触。

气流继续在吸收塔内上升，与热再生溶剂低浓度的氨接触，热再生溶剂（低浓度的氨）吸收 CO_2 ，使气体中 CO_2 含量降低到设计要求水平。

从快速蒸发缸内抽出少量的半浓氨送到萃取塔加热再生，产生稀氨。半浓氨进入萃取塔内的顶部下流接触中间物质。氨重沸器的热沸蒸汽升入塔内和氨成逆流接触，并使从快速蒸发缸流出的氨气

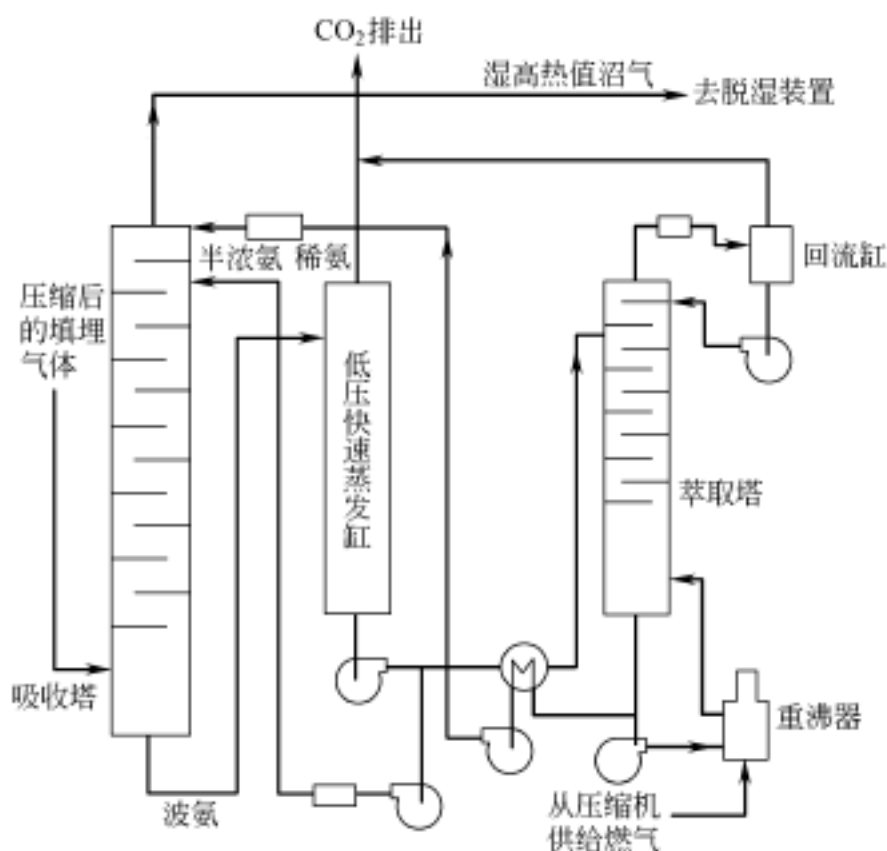


图 7-15 氨水法脱除 CO₂ 工艺流程

中残存的 CO₂ 分离。

用塔顶蒸汽冷却凝汽器，将热汽从萃取塔的顶部提取出来。冷凝物和 CO₂ 在回流缸分离，冷凝物被泵送到萃取塔的顶部做回流冷却，CO₂ 和部分蒸汽被排入大气，稀氨通过冷却器后泵回吸收塔，完成循环。

为消除浓氨气流带来的杂质，可用活性炭过滤。这样去除 CO₂ 后的沼气就可以流入脱水装置等待脱水。

7.2.4 沼气的输配

7.2.4.1 沼气输配工艺路线 对于农村户用沼气池及小型农村沼气工程，由沼气池产生的沼气通过低压输送管路输送到沼气用具处，这种供气方法可以设沼气贮罐，也可以不单独设置沼气贮罐。在这种供气方式下管路系统简单，容易维护管理，不需要加压费用，供气可靠性大，但供气压力低，当用户分散时，输气管路长，

要求管径大，并且在用气高峰时，管道末端用户灶前压力不足，炉灶燃烧不好。因此，该供气方式只适用于供应区域范围小的情况。具体的工艺路线如下所示。

沼气池（或贮气罐）→凝水器→脱硫器→压力表→调压器

沼气用户

而对于大型沼气工程，例如酒精厂、大型养殖厂、污水处理厂等发酵产生的沼气，在大多数情况下，需要对沼气首先进行加压贮存，然后通过中压或中、低压两级供气方式将沼气供应给用户。中压供气即首先将沼气加压至上千毫米水柱后送入沼气贮罐，然后进入中压管路，在用户处设置调压器，减压后供给沼气用具。中压供气适合大型沼气工程，这样可以节约大量的管道费用。但该种供气方式要求用户调节好沼气用具前的阀门，以进行调压，否则，将会因用户压力未调节好，而影响沼气用具的燃烧效率。具体的工艺路线如下所示。

厌氧发酵器→沼气脱水装置→加压装置→压力表

中压供气管→贮罐→脱硫（及脱 CO₂）→单向阀

沼气用户

或采用中、低压供气方式进行供气。在供气系统中设置调压站，可以比较稳定地保持所需供气压力。但是由于系统中设置了压送设备和调压器，维护管理较复杂，费用较高。在供气时需要动力，当停电时则不能保证供气。具体的工艺路线如下所示。

厌氧发酵器→沼气脱水装置→加压装置→压力表

调压器→贮罐→脱硫（及脱 CO₂）→单向阀

沼气用户

在以上供气方式中，沼气脱除硫化氢及二氧化碳的过程可以放置在加压之前进行。而对于垃圾填埋场产生的沼气来说，在对沼气

进行处理之前，还需首先要对其进行收集，然后再采用上述工艺路线进行沼气的贮存和输送。垃圾填埋场沼气收集管网示意如图 7-16。

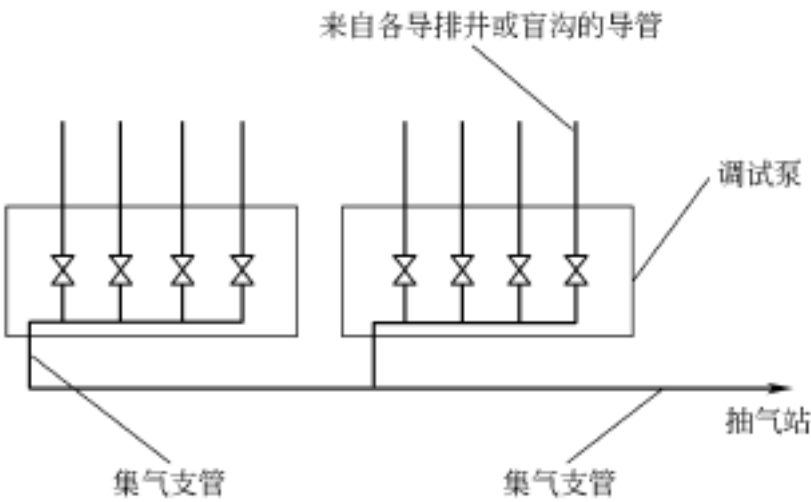


图 7-16 垃圾填埋场沼气收集管网示意

7.2.4.2 沼气贮罐 现有的沼气贮罐有两个基本类型： 低压，不高于 500 厘米水柱，即 0.05 个大气压； 高压，达到 5~7 个大气压。低压贮气罐可分为： 水封式贮气罐，或湿式贮气罐； 非水封式贮气罐，或干式贮气罐。这两种类型都是容量可变的贮气罐，但是罐内几乎是恒压。

湿式贮气罐由下列部分组成：充满水的贮罐或水池；借助于特有装置悬吊着的钟形罩，好像一个开口进入水池内的倒置贮罐。但是湿式贮罐已逐渐被低压干式贮气罐所代替。干式贮气罐是一个有顶和底的圆筒或多棱空心柱，在圆筒中有严密地紧贴在圆筒壁上的活动圆盘（活塞），气体装在活塞的下面；当贮气罐内充气时，活塞升起，用气时，活塞就落下。贮气罐中气体压力的大小决定于活塞的质量，因此它几乎始终保持不变。活塞对罐壁由于摩擦引起的压力损失非常小，完全可以忽略。干式贮气罐中的压力通常保持在 150 厘米水柱左右，可以有很大的容量，但考虑到贮罐高度过大引起的操作上的困难，一般采用大直径、低高度的贮罐。

7.2.4.3 沼气输送管路及设计 沼气作为一种能源向广大用户进行供应就需要输配系统。沼气的输配系统是指自气源厂至用户前的一系列沼气输配设施的总称。对于大型沼气供气工程来说，它主要由不同压力的沼气管网、调压室、储配站等组成。而在低压沼气管网系统中，主要包括低压管网及相应的管路附件。

(1) 沼气输气管和管件的选用 管道在工程建设中占有相当重要的位置，工程设计师们希望选用性能可靠、运行安全、使用寿命长、施工方便、经济的管路。管道在输配系统投资中占 60%，因此，合理选择管材对安全可靠、经济的供气工程是至关重要的。

管材的选择。输送沼气的管网必须具有良好的机械性能、耐腐蚀性能、抗震性能和气密性能。常用钢管、铸铁管、镀锌管等。在农村户用沼气中，以塑料管居多；而对于大型的沼气工程，室外管应选择钢管或铸铁管，室内则可选用塑料管。

钢管具有较高的抗拉强度、韧性和抗冲击性，并具有良好的可塑性，易于焊接，气密性能得到保证。由于管壁较薄，易受腐蚀。在选用钢管时，直径在 150 毫米以下时，选直焊缝管；大于 150 毫米时，选螺旋卷焊钢管。钢管壁厚，应不小于 3.5 毫米，在街道红线内不小于 4.5 毫米；当穿越重要障碍物和土壤腐蚀性极强的地段时，应不小于 8 毫米。

塑料管，近年农村多选用高压聚乙烯（PE）为原料的半硬管。这种管安装方便，气密性好，价廉物美，适宜室外使用，很受用户欢迎，已逐步取代了 PVC 硬管。室内管宜选用聚氯乙烯透明软管。

管径的选择。输气管管径的大小，与沼气燃烧效果有直接的关系。输气管内径的大小主要由沼气池或沼气贮罐到沼气用具的距离、沼气流量的大小和管道压力损失等因素决定。一般说来，对于农村户用沼气池，距离沼气用具为 10 米左右时，可选用管径为 8 毫米的输气管；距离为 20 米左右时，可选用管径为 10 毫米的输气管。而大型沼气工程的输气管径则要较大，一般为 20 毫米以上，这是由于大型沼气工程距离沼气用具较远，沿途产生的压力损失

较大。

对于沼气的输送，最大气速为 4.6 ~ 9.1 米/秒，初速为 1.8 ~ 3.0 米/秒。在选择管子直径时，可合理选择经济、安全的流速，从而达到节约动力和管材的目的。

管件的选用。管路的管件有三通、四通、弯头、管接头等，这些管件均已标准化，使用时根据管径直接进行选取。对于塑料管，管接头端部有密封节，以防止塑料管的松动与脱落。为使每种管件均能适应内径为 8 ~ 12 毫米的软塑料管，管件可制成带有一定锥度的结构。对于钢管，使用管件时，根据管子内径直接选用标准管件即可。

沼气管道上的阀门多采用球阀、旋塞阀、逆止阀和闸板阀等。沼气阀门应气密性好、动作灵活、开关迅速、检修方便、耐腐蚀性好。管网中阀门数量应尽量少，以能维持和满足运行的最低限度要求为准。

(2) 管路的水力计算

沼气最大流量的确定。计算流量的大小，直接关系到沼气输配管网的经济性和供气的可靠性。在计算小范围的输配干管、里弄和街坊支管或户内管时，居民生活和公共建筑的计算流量，要求计算的数据精确一些，应按所有燃气用具的额定耗气量和同时工作系数来确定。计算公式如下。

$$Q = K \sum nq \quad (7-30)$$

式中 Q ——沼气计算流量，米³/小时；

K ——沼气用具的同时工作系数；

$\sum nq$ ——全部用具的额定耗气量，米³/小时；

n ——同一类型的沼气用具数；

q ——某一种沼气用具的额定耗气量，米³/小时。

计算流量的确定，既比较复杂，又极其重要。由于沼气集中供气规模都较小，多数在 1000 户左右，可采用同时工作系数法来确定计算流量。表 7-10 给出了同时工作系数的经验值。而 K 值的确定应根据调查和测定，通过数理统计分析取得。

表 7-10 居民生活用双眼灶和热水器组合时的同时工作系数

设备类型	灶具数 <i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
双眼灶	<i>K</i> (规范)	1.00	1.00	0.85	0.75	0.68	0.64	0.60	0.58	0.55	0.54	0.48
	<i>K</i> (上海)	1.00	0.81	0.68	0.60	0.54	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.68
	<i>K</i> (原苏)	1.00	0.84	0.73	0.59	0.48	0.41	0.36	0.32	0.29	0.27	0.24
双眼灶加 热水器	<i>K</i> (规范)	0.8	0.55	0.47	0.42	0.39	0.36	0.33	0.31	0.29	0.27	0.24
	<i>K</i> (原苏)	0.75	0.64	0.52	0.39	0.375	0.36	0.35	0.33	0.32	0.31	0.28
设备类型	灶具数 <i>n</i>	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	400
双眼灶	<i>K</i> (规范)	0.45	0.4	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.34	0.31	0.29
	<i>K</i> (上海)	0.36	0.32	0.31	0.3	0.29	0.29	0.28	0.27	0.27	0.25	
	<i>K</i> (原苏)	0.23	0.22	0.21	0.21	0.207	0.21	0.2	0.20	0.20		0.17
双眼灶加 热水器	<i>K</i> (规范)	0.22	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18		
	<i>K</i> (原苏)	0.26	0.24	0.205	0.193	0.186	0.18	0.17	0.17	0.16		0.14

管路水力计算。在实际的管道设计计算中，为了简化流量、管道长度、管径等的计算，一般均采用经验公式，目前广泛采用的是普耳公式。

$$Q=0.316K\sqrt{\frac{d^5\Delta P}{SLK_1}}$$

(7-31)

- 式中
- Q ——沼

气

计

算

流

量

，

米³/

小

时

；

d ——

管

道

内

径

，

厘

米

；

ΔP ——

压

力

降

，

帕

；

S ——

沼

气

的

相

对

密

度

；

L ——

管

道

计

算

长

度

，

米

；

K ——

依

管

径

而

异

，

不

同

管

径

的

K

值

列

于

表

7-11

；

K_1 ——

管

段

局

部

阻

力

系

数

，

$K_1=1.1$

。

表 7-11 不同管径的 *K* 值

<i>d</i> 毫米	15	19	25	32	38	50	75	100	125	≥ 150
<i>K</i>	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50	0.52	0.57	0.62	0.67	0.707

在进行沼气钢管的计算时，可利用已有的天然气低压钢管水力计算图表，因该图表所取燃气容重为 1 千克/ 米³，所以使用时要根

据不同的沼气容重进行相应的修正。

低压管网压力降的分配。由于低压沼气管道直接连着用户燃烧器，其压力的大小应能保证沼气用具的正常燃烧。因此，低压沼气管道压力降的大小及分配要考虑到各种因素。根据普耳公式，燃烧器适应的压力波动范围为标准燃烧压力的 0.64 ~ 1.44。对于沼气低压供气管网，规定燃具前最高压力为额定压力的 1.5 倍，最低压力为额定压力的 0.75 倍。这样，低压管网压力降即为燃具额定压力的 0.75 倍。按“家用沼气灶”标准，规定燃烧器额定压力为 800 帕或 1600 帕，因此，低压管网的计算压力降为 600 帕或 1200 帕。室内管道计算压力降一般取为 80 ~ 100 帕，沼气流量计阻力损失取为 120 帕。

在使用表 7-12 时，要根据实际供气情况，对计算得到的压力降分配进行适当的调整，流量计的压力损失根据实际选用的流量计压力损失确定。

表 7-12 低压管网压力降的具体分配							帕
燃具额定压力	贮气柜出口压力	燃具前最小允许压力	允许总压力降	压 力 降 分 配			
				干管	支管	室内管	沼 气 流 量 计
800	1200	600	600	300	100	80	100 ~ 120
1600	2400	1200	1200	800	200	100	100 ~ 120

7.2.4.4 沼气输送管路的铺设

(1) 农村户用沼气管道的铺设 农村户用沼气外管道一般采用埋地敷设，20 米左右的距离可选用内径为 11 毫米、外径 15 毫米、壁厚 2 毫米、每米重约 0.08 千克的塑料管。

室内管道及灶具和灯的分支管采用横平竖直的明设，可选用管内径为 8 毫米、外径 10.6 毫米、壁厚 1.3 毫米、每米重约 0.04 千克的优质聚氯乙烯管子或优质红泥塑料管。

管道附件的配置。室外管道附件：导气短管选用内径 10 毫米的铜质管，可直接与 PE 半硬管连接；直通、三通、弯头采用外插式过盈配合，不需胶水粘接，其密封是靠管与接头的互相挤压达到

密封。室内管道附件：开关的通道选用内径 5 毫米铜质管；变径、直通、三通、四通、弯头采用内插式过盈配合，不需胶水粘接，靠管与接头的互相挤压达到密封。压力表：选用低压盒式沼气压表，该产品为玻璃 U 形管液位式压力表的换代产品，大部分零部件采用质量轻、制造工艺简单、耐磨的高强塑料（ABS 工程塑料、聚甲醛）为主要原料；该表外形美观，使用方便，比较直观，体积小，质量轻，便于携带和运输。

(2) 冷凝水排放装置 沼气管路上应设置冷凝水排放装置。为排除沼气管道中的冷凝水，在铺设管道时应有一定的坡度，以便在低处设凝水器，将汇集的水排出。

瓶形冷凝水排放装置。装置是把 T 形管装在有水的瓶内，在瓶的中央有专门保持 T 形管正确位置的导管，其结构简图如图 7-17 所示。

这种结构装置平日要注意瓶内的水位是否正确，有时可能会过分地蒸发而缺水；也可能由于雨水而使其过量。特别是深埋地下处，往往由于暴风雨产生的积水会超过主输气管的水平位置，这时水压会大于沼气压，积水就进入输气管道内而堵塞管道。

虹吸管冷凝水排放装置。虹吸管装置作为沼气输气管的接头连接，其结构简图如图 7-18。这种装置在瓶形装置的基础上经过改进，在瓶侧增设一根虹吸管，利用沼气压造成一定的水位差，使瓶内多余的冷凝水会自动排出。当因暴风雨而积水时，会产生与瓶形装置相同的故障。

(3) 大型沼气工程管网的配置

管路系统的管线可以用掩埋法铺设，也可建在地表面上或从地面上抬高，影响这些选择的因素是气候条件、美学、土地使用以及施工费用等。安装在地表上面最容易维修保养，安装在地表下面可不受紫外光影响、不受外界破坏，冬季管内的冷凝液不冻结。若安装在地表下面施工，可将管道放置在地表面上后再用土覆盖，也可将管道置于沟槽内再用土回填。可根据具体情况施工。

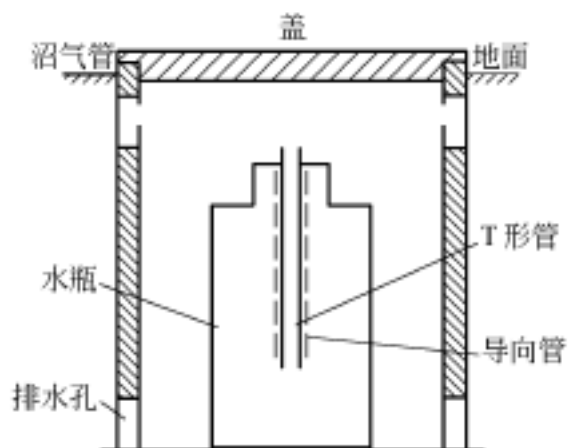


图 7-17 瓶形冷凝水排放装置

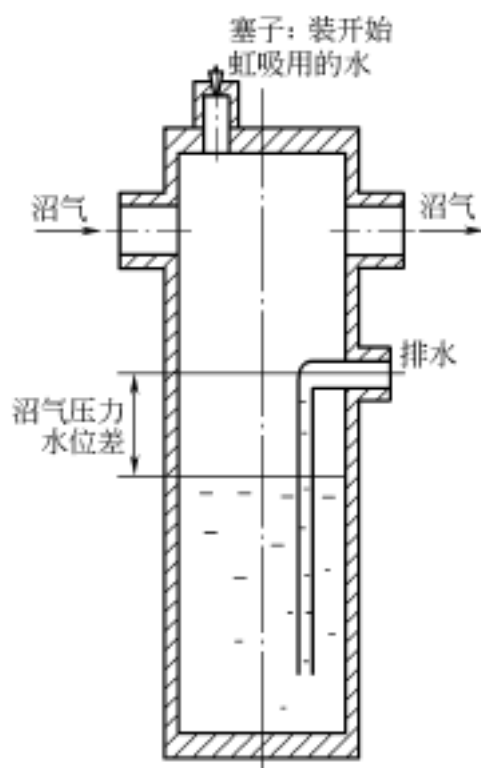


图 7-18 虹吸管冷凝水排放装置

管网应设在远离交通干线的地方，避免车辆通行震压；管道应远离易燃、易爆的物品，并远离易腐蚀的液体；不要与水管、热力管、电缆线等同沟敷设；地下管道应与其构筑物基础保持 2 米的水平净距，便于施工和维修，避免挖沟动土伤损其他构筑物；管道坡度一般不小于 0.005，最好就坡度铺设；在管道最低处应设排水器，一般每 200 ~ 250 米设置一个，以避免管道积水，影响气体输送和燃烧。为防止地基沉降造成管路断裂，在管道接口处用抗压性较强的硬橡胶管。

保证用气压力和供气量。尽量缩短线路，减少气体阻力，降低成本；室外干管布置最好采用环形，多路径供气；正确计算管网压力降和各管段的沼气流流量，选择合适的管径；根据用气需要，装配相应的调压器，使沼气的压力符合灶具要求；管网的施工应请有施工资质的专业队伍承担，确保管网的安装质量。

贮气罐中沼气向外输出时，为了安全，同时安装单向阀和

阀门，进入炉具点燃前安装沼气调压器，保证燃烧正常安全。调压器是沼气输配系统中，用以调压、节气，有利于安全供气和提高热效率的一种设备。通常用于集中供气工程中，将较高的沼气压力调节到燃具的额定压力。目前，常用的为 TZ-1 型沼气调压器，其结构如图 7-19 所示。调压器进口与贮气柜引出的管道相连，出气口与燃具相连。调节螺丝用以控制弹簧，顺时针拧得越紧，出气口压力调得越高；薄膜起平衡压力的作用；直导式活门可控制沼气流量的大小。

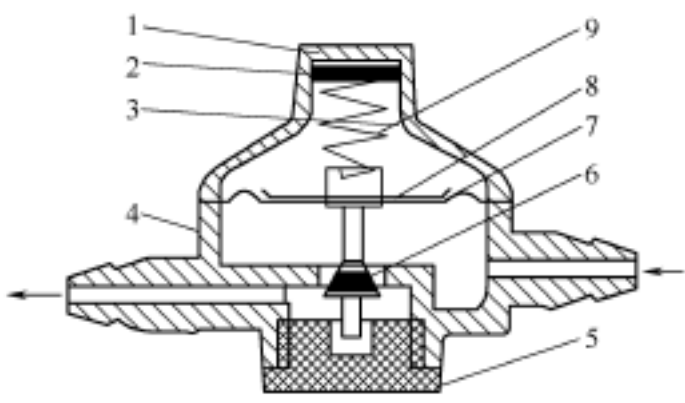


图 7-19 TZ-1 型沼气调压器结构简图

- 1—上盖；2—调节螺丝；3—上壳体；4—下壳体；5—下盖；
- 6—直导式活门；7—薄膜；8—托盘；9—弹簧

来自贮气柜的沼气由调压器入口进入，经活门环缝的节流减压后，流入薄膜下部的空间，薄膜上部弹簧的压力与薄膜下部的沼气压逐步达到平衡。然后按燃具额定压力送到炉具前。当进气口压力偏高时，活门被顶起，环缝变窄，使薄膜上下压力达到平衡；反之，当进气口压力下降，活门下降，环缝变宽，仍使薄膜上下压力平衡，满足供气。因此，无论进气口压力如何变化，出气口压力都能稳定在一定的范围内，使流量达到使用要求。

7.2.4.5 沼气输送管网的管理及输送管路故障的判断及排除

(1) 沼气输送管网的管理 管网投入正常运转后，应注意日常管理和维修，确保沼气的输送和供气。应有专人负责，定期检查管网系统，发现问题，及时组织维修；管道应定期涂刷防锈漆，延长

其使用寿命；不得沿管网砌灶、生火、建锅炉房点火等，以免发生爆炸等意外事故；定期查漏，用肥皂液在管道、法兰接口、承插接口、螺纹接口和容易漏气的部位涂抹，如有气泡发生，证明漏气，应及时维修；如为塑管，注意鼠咬和人为损坏，室外地上部分最好用破棉布、岩棉等包裹，以免冻坏；熟悉图纸，掌握管网走向和配件部位，便于维修和扩建延伸管路。

(2) 沼气输配系统故障的判断及排除 一般说来，沼气输配系统的故障主要是“漏、堵、水阻”，漏是指管路漏气；堵是指管路被折、压、异物堵塞等；水阻是指管路中有冷凝水，阻止了沼气的正常输送。

管路漏气的判断及处理。管路漏气可用两种方法来判断：一是将管路一头堵住，在另一头向系统吹气后迅速堵住，观察压力表，水柱下降说明漏气；另一种方法是将整个输配系统开关全部关闭后，压力表水柱时有小幅波动，也可断定系统有漏气现象。断定系统漏气后，软管用“分段查漏法”来确定漏气处。方法是从导管处开始，将输气管分段捏紧，捏紧一段观察一次压力表。若水柱下降说明漏气处还在前面，当压力表水柱不降时，漏气处就在现捏紧的地方到上一次捏紧处之间。这时可在这一段输气管上涂肥皂水以确定是否漏气。当输气管有漏洞时，应将这节输气管截去，用两通重新连接好；也可拆除漏段更换新管。

管路被堵的判断及处理。如果输配系统某一开关打开后，压力表水柱下降幅度很大，甚至降到“零”压处，开关关上后压力表水柱又回到原位。则可断定管路被堵。管路被堵的地方多在折角、导气管、连接件、管道经常受压处。应按先易后难分段查找，根据受堵情形进行处理。

管路水阻的判断及处理。如果输配系统某一开关打开后，压力表水柱上下大幅波动，沼气炉燃烧火力时强时弱，沼气灯忽明忽暗，有时还能听到气流冲击水的声音，可以断定管路有水阻。水阻处一般在输配系统的最低处。维修时，首先检查排水装置，排除其故障；然后用高压气筒赶水，方法是一人在输气管一头打气，一

人在输气管另一头用手堵住管口，当管内气压增大后，突然松手，反复几次后，管内水可被冲掉。

7.3 沼气燃具及其设备

7.3.1 沼气的燃烧方法及燃烧器

7.3.1.1 沼气的燃烧方法 沼气燃烧方法分为：扩散式燃烧、大气式燃烧和无焰式燃烧。

(1) 扩散式燃烧 沼气与空气不预先混合的燃烧称为扩散式燃烧，其一次空气系数为 0。扩散式燃烧所需的氧气将依靠扩散作用从周围大气中获得，燃烧过程处于扩散区内。燃烧速度和燃烧完全程度主要取决于燃气和空气混合的完全程度，而燃气与空气的混合是靠燃气与空气之间的扩散作用来实现的。因此，扩散燃烧的速度主要取决于扩散速度。扩散有两种形式：在层流状态下，燃气分子与空气分子之间的扩散叫层流扩散；在湍流状态下，燃气分子团与空气分子团之间的扩散叫湍流扩散。在沼气的扩散燃烧法中，除采用特殊的稳焰装置外，一般都是层流扩散燃烧，很难达到湍流扩散燃烧。扩散燃烧由于没有预先混入空气，故不会发生回火现象，它只能产生脱火，这是扩散燃烧的最大优点。湍流扩散燃烧目前是工业上应用较为广泛的燃烧方法之一，但需采用人工稳焰方法使扩散火焰稳定。

实验资料表明，可燃气体中氢和一氧化碳分子的热稳定性较好，在 2500 ~ 3000 的高温下也能保持稳定。而各种碳氢化合物的热稳定性较差，它们的分解温度较低，如甲烷为 683 ，乙烷为 485 ，丙烷为 400 ，丁烷为 435 。一般来说，碳氢化合物的分子量越大，稳定性越差。而且温度越高，分解反应越强烈，如甲烷在 950 时只分解 26%，但在 1150 时将分解 90%。碳氢化合物分解后将产生游离的炭黑，如果炭黑来不及燃烧就会被烟气带走，引起不完全燃烧损失，同时也对大气造成污染。这是在一般民用炊事用具中不宜采用扩散式燃烧的原因之一。

(2) 大气式燃烧 燃气中预混部分空气而进行的燃烧称为大气

式燃烧，其一次空气系数 $0 < \alpha < 1$ 。空气混入的方式可以为机械鼓风，也可以利用燃气本身的压力带入，一般民用炊事燃烧器的热负荷较小，故均是依靠燃气本身压力带入的。大气式燃烧在工农业生产和人民生活中得到了广泛的应用，尤其是民用炊事燃烧器，绝大多数采用的都是大气式燃烧方法。

(3) 无焰式燃烧 随着燃气在工农业上的广泛应用，对燃气的燃烧提出了较高的要求。首先，要求燃烧的热强度高；其次，要在损失最小的情况下，将燃气的化学能转变为热能，并获得较高的燃烧温度。这就要求燃烧过程的化学未完全燃烧及过剩空气量均应最小。这些要求是扩散式燃烧和大气式燃烧所无法满足的，因此，在大气式燃烧的基础上出现了无焰式燃烧，它是在燃烧前燃气与所需的空气全部混合的燃烧。进行无焰燃烧的条件如下。

燃气和空气在着火前按化学计量比混合均匀。

设置专门的火道（或网格等），使燃烧区内保持稳定的高温。

因此，无焰式燃烧的热强度高，每立方米燃烧室容积每小时可达到 $100 \sim 1000$ 兆焦，相当于扩散燃烧的 $100 \sim 1000$ 倍。无焰式燃烧的燃烧温度和完全燃烧程度均很高，且燃烧过程的过剩空气量少，一般 $\alpha = 1.05 \sim 1.10$ 。因此，热效率非常高。但是，无焰式燃烧的稳定性差，容易产生回火现象，在燃烧器中为防止回火，头部结构就必须设计得复杂而笨重。所以，这种无焰式燃烧器主要应用于工农业生产的加热装置中，且因其燃烧时不产生火焰，故也宜用于民用炊事的热、煮、炒等灶具。

7.3.1.2 沼气燃烧器 按沼气燃烧方式的不同，沼气燃烧器分为扩散式燃烧器、大气式燃烧器和无焰式燃烧器，在实际应用中后两种燃烧器使用较多。

(1) 扩散式燃烧器

最简单的扩散式燃烧器是在一根管子上钻上一排火孔，沼气在压力下进入管道并从火孔中逸出。这时，沼气没有和空气预先混合。在燃烧室内（或无燃烧室）沼气依靠扩散作用和空气混合并逐

渐燃烧。图 7-20 为几种扩散式沼气燃烧器的结构形式。

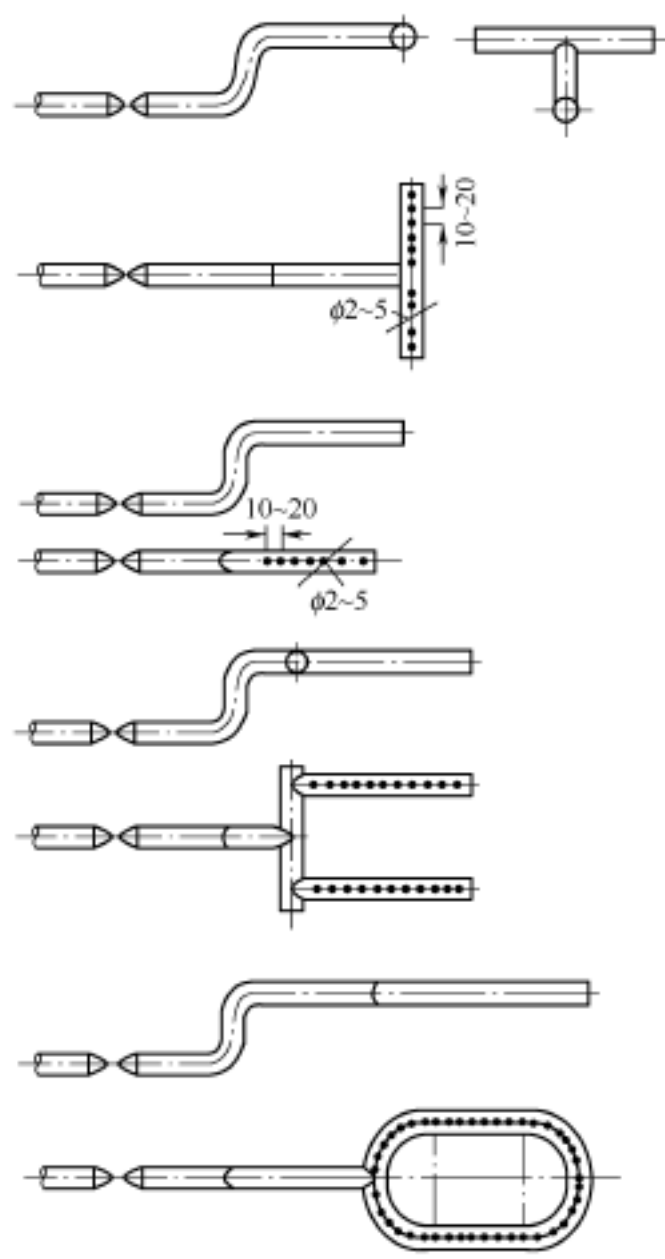


图 7-20 几种扩散式沼气燃烧器的结构形式 (单位：毫米)

扩散式燃烧器的使用范围。扩散式燃烧器中沼气燃烧稳定，这种燃烧器结构简单，使用便利，可用低压沼气 (30 ~ 40 毫米水柱甚至更低)。但该燃烧器中火焰太长，需要很大的燃烧容积和高的过剩空气系数，燃烧温度较低。因此，扩散式燃烧器适用于燃烧温度要求不高，但要求燃烧均匀的地方，例如纺织工业、食品工业、小型铸铁加热炉、热水器等。

扩散式燃烧器的设计要点。燃烧器的火孔直径在 0.5 ~ 5 毫米之间，如果孔径小，则容易堵塞。燃烧器火孔间的最大距离，应能保证点火时能传火；最小距离不应使相近火孔的火焰合并，造成燃烧的恶化。

每一燃烧器的管上不宜有两排以上的火孔，否则将恶化空气和沼气的混合。

为了保证燃烧的稳定，火孔燃烧面积应为沼气管总断面的 70 % ~ 80 %。燃烧器的形式应能使空气自由通向每一火孔，因此，最好采用栏栅形式。过剩空气系数取为 1.2 ~ 1.6。

(2) 大气式燃烧器

大气式燃烧器的构造及工作原理。图 7-21 为大气式燃烧器的结构简图。大气式燃烧器是根据大气式燃烧方法设计的，由头部及引射器两部分组成，其工作原理如下：燃气在一定压力下，以一定流速从喷嘴流出，进入吸气收缩管，燃气靠本身的能量吸入一次空气，在引射器内燃气与一次空气混合，然后，经头部火孔流出，进行燃烧，形成大气燃烧火焰。

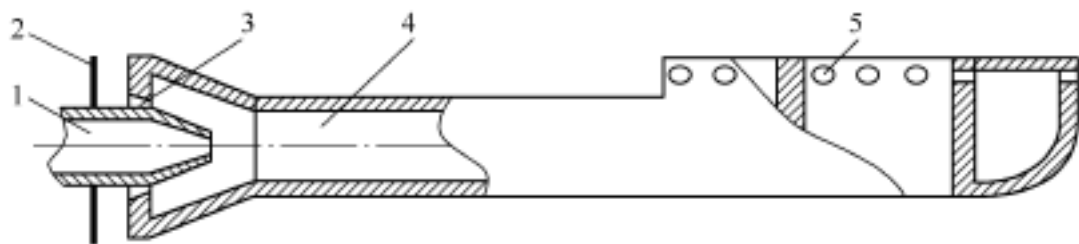


图 7-21 大气式燃烧器的结构简图

1—喷嘴；2—调风板；3—一次空气口；4—混合管；5—火孔

大气式燃烧器的一次空气系数通常为 0.45 ~ 0.75。根据燃烧室工作状况的不同，过剩空气系数通常在 1.3 ~ 1.8 范围内变化。

大气式燃烧器通常利用沼气引射一次空气，根据沼气压力的不同，分为低压引射与高（中）压引射两种，前者多用于民用燃具，后者多用于工业装置。当沼气压力不足时，可利用加压空气来引射沼气。

大气式燃烧器由引射器和燃烧器头部两部分组成，比扩散式燃

烧器燃烧时火焰短、燃烧热强度大、燃烧温度高、燃烧效率较高、燃烧较完全、不需送风设备，因此，适用于家庭及公用事业中的燃气用具如家用炉、热水器、沸水器及食堂灶，在小型锅炉及工业炉上也有应用，其中单火孔大气式燃烧器在中小型锅炉及某些工业炉上广泛应用。

大气式燃烧器的设计要点。为了保证最前及最后的火孔具有相同的焰高，燃烧器头部的截面积比火孔总面积应大 $1.7 \sim 2.5$ 倍。火孔深度最好取直径的 $2 \sim 3$ 倍，以保证速度场的均匀分布和提高沼气燃烧的稳定性。设计大气式燃烧器时，应特别注意二次空气的供给，常采用以下措施。

- a. 将二排火孔叉开排列。
- b. 火孔作成凸出的形状。
- c. 火孔的最小间距不能使火焰合并。

为了防止火焰的产生，一次空气系数不应小于 0.3 。

(3) 无焰式燃烧器 无焰式燃烧器中沼气和燃烧所需的全部空气预先混合，并且能在很小的过剩空气系数下 ($\alpha = 1.05 \sim 1.10$) 达到完全燃烧，燃烧过程中火焰很短，火焰外锥几乎完全消失甚至看不见，这种燃烧器一般采用引射器吸入空气，经混合后在高温网格或小孔式火道中完成燃烧，因此具有无焰的特性。

无焰式燃烧器种类很多，在沼气燃烧设备中使用较多的是多孔板式无焰燃烧器、多孔陶瓷板式红外线无焰燃烧器、金属网红外线无焰燃烧器、组合式沼气红外线燃烧器等。

多孔板式燃烧器也称表面式燃烧器，这种燃烧器的燃烧在炙热的耐火板表面上进行，很快达到高温，经 $1 \sim 2$ 分钟能达到 900°C ，接近于完全燃烧产物离开表面时的烟气温度。这种燃烧器的燃烧孔道的尺寸小，使沼气-空气在多孔板极薄的表面层内达到着火温度。燃烧器开始工作时，沼气和空气混合气体在多孔材料的外部加热，之后，由于表面温度的升高，沼气的加热与燃烧略进入表面层内。当这种燃烧器的热负荷一定时，多孔板厚度方向温度的分布是均匀的，沼气的燃烧过程在离板表面相同距离

的各点进行完毕，多孔板的厚度不大于 50 ~ 60 毫米。这种燃烧器不适用于热负荷很大的工业炉或锅炉，应用范围很小，只有在为了获得辐射热时才采用。

多孔陶瓷板红外线无焰燃烧器，该燃烧器的头部壳体上安装若干块多孔陶瓷板，陶瓷板由高岭土（54%）、海城滑石（25%）、高温耐酸硼质玻璃（14%）、工业氧化铝（2%）、煤粉或焦粉（5%）等粉料压制成型，焙烧而成。要求该燃烧器能耐高温、耐急热。当冷水滴到灼热的板面上时，不应产生裂纹。该燃烧器多采用孔径一般为 1.2 ~ 1.5 毫米的多孔陶瓷板。

金属网红外线无焰燃烧器是 20 世纪 60 年代才发展起来的，头部是由两层耐高温的金属网和一层普通金属托网组成，托网上面是一层耐高温的细网，称为内网，最上一层是耐高温的粗网。称为外网，内网与外网之间间隔 8 ~ 10 毫米。托网的作用是托住内网防止下沉，内网是燃烧网，沼气在其表面燃烧产生 800 ~ 1000 的高温，外网的作用是促进稳定燃烧，增强辐射能力并保护内网。为防止使用中内网热变形，一般在组装前对内网进行退火、压制伸缩圈、扎丝和热整形等处理。组装时各层网与壳体间要用螺栓、垫片和压条紧固密封，以防渗漏。

组合式沼气红外线燃烧器是由多孔陶瓷板和金属网红外线燃烧器组合而成。这种燃烧器的头部是在多孔陶瓷板的外表面 10 ~ 12 毫米处加一层耐高温的金属网，可采用 8 ~ 10 目/英寸铁铬铝网，这种组合结构能使沼气在陶瓷板与金属网之间燃烧，金属网可防止脱水；陶瓷板可防止回火；因而具有较好的稳定性。而辐射器辐射面的温度比陶瓷板红外线辐射器提高约 100 ~ 130 ，辐射效率提高 10% 左右。

7.3.2 民用沼气燃具及其设计

7.3.2.1 家用沼气灶

(1) 家用沼气灶的种类及结构 家用沼气炉灶的种类虽然繁多，其结构也因用途不同而有所差别，但它们都有一定的共性，即它们基本上由燃烧器、供气系统、阀体、点火装置和其他部件 5 大

部分组成。其中燃烧器是燃气炉灶的主要部件，可分为大气式燃烧器和无焰式燃烧器（红外线辐射器）两种。良好的无焰式燃烧器的热效率高于大气式燃烧器，是因无焰式燃烧器的外壳可保持燃气空气混合，气体在进入辐射器头部之前具有一定的静压，并将燃气混合气均匀地分配。分配板安装于引射器出口端的外壳内侧上，能均匀分配燃气与空气混合气体，对提高无焰式燃烧器的热效率非常有益。而大气式燃烧器就没有分配板，因此要想提高大气式燃烧器的热效率就必须从分配板上入手，特别是沼气炉具，原因是沼气的热值低，要保证沼气炉灶具有一定热负荷，必须增加它的流通截面积，随之加大了偏流现象，所以更需要在沼气炉具上加装分配板。它由喷嘴、调风板、引射器、燃烧器头、火盖（又叫菊花头）等组成，火盖就是组成内圈火孔和外圈头孔的压盖。引射器是由短管、收缩管、喉管、扩散管等组成。燃烧器头其水平方向为圆环形通道，此通道的截面为矩形。引射器在燃烧器头的左下方其走向为前后走向，引射器与燃烧器头之间有一过渡段的空腔体，空腔体与燃烧器头的交接，其交接面积大约只占燃烧器头通道面积的 $1/4$ 。当沼气从喷嘴以一定的速度喷出时，引射器内沼气流体的压力低于外界压力，外界空气就自动进入引射器，沼气和空气自动混合，混合气体从引射管通过交接面孔到燃烧器头，然后分为前后两股沿圆环通道流动至整周，再通过火盖的孔冒出来，被火花点燃后与空气进行第二次混合燃烧。由于任何物质运动都具有惯性，同时气体在流动的过程中存在摩擦阻力，因此当沼气与空气混合气体从引射器管通过交接面孔到燃烧器头时保持了惯性，其次在流动过程中受到流动阻力的作用，有绝大部分的沼气与空气的混合气是直接通过此孔再通过火盖的火孔冒出直接参与燃烧，因此只有少许的混合气体会分成前后两股沿圆环形通道流动而且越来越少。此情况也能通过燃烧的火焰形状看出，即靠近引射器混合气管一侧的火焰长，而背离的那一侧火焰短。

(2) 沼气灶的安装、使用注意事项 要安全、高效地使用沼气，使沼气充分燃烧，获得较高的燃烧效率，必须掌握沼气灶具的

使用、调节技术和维护管理知识。

要正确安装压力表的位置，沼气灶前压力的大小直接影响燃烧效果。一般说来，灶前压力高于额定压力时，其流速及流量过大，会使热效率降低。当灶前压力低于额定压力时，其热负荷随之降低，这时虽然灶具的热效率有所提高，但是，延长了炊事时间或者不能满足炊事要求。农村户用沼气池的压力在一昼夜间变化较大，早晨池内压力高，晚上压力低。为了保证灶前压力稳定，在灶前输气管上装一阀门，在阀门与灶具间装一“U”形压力计，以控制灶前压力为额定压力。为了稳定气压可以适当增大水压间，当沼气池内压力不足时，可向池内加水添料，压缩池内沼气，增强输送沼气的压力和速度。

正常工作时，调风板（一次空气）要开足。除脱火、回火或个别情况需要暂时关小一下调风板外，其他时间均应开足风门，否则会形成扩散燃烧。当燃烧不正常，产生虚焰时，可稍微转动喷嘴，使其前进或后退，调到产生短而有力的蓝色火焰为止。特别是新购置的灶具，必须先清除内部粘着的砂粒、铁屑。

使用沼气灶时，吊火高度应适当。沼气燃烧火焰分为内锥和外锥，火焰内锥与外锥之间的温度最高，一般可达 1200℃ 以上，因此，应注意灶面与锅底的距离，使锅底处于内外锥之间，充分利用火焰高温，提高燃烧效率。吊火高度由锅架来实现。锅架高度是指支架顶部与火孔的距离，它根据灶具的类型不同，通过实验来确定，如北京型沼气灶，当锅支架高度为 16 毫米时，测得热效率为 61%；锅支架高度为 24 毫米时，热效率为 56.9%。

7.3.2.2 沼气灯

(1) 沼气灯的结构 沼气灯是把沼气的化学能转变为光能的一种小型的红外线辐射器，它由喷嘴、引射器、泥头、纱罩、反光罩和玻璃灯罩等主要部分组成。灯的头部的由多孔陶瓷燃烧头及纱罩组成一个混合式辐射器。沼气通过输气管，经喷嘴进入气体混合室，与一次空气（从气孔进入）混合，然后从泥头喷火孔喷出燃烧、在燃烧过程中得到二次空气补充。燃烧在多孔陶瓷泥头和纱罩

之间进行，由于燃烧温度较高，纱罩上的硝酸钍在高温下氧化为氧化钍。而氧化钍是一种白色的结晶体，它在高温下能激发出可见光来，因此当辐射器点燃后，可以放出强烈的可见光，这种发光原理与汽灯的原理是相似的。一盏沼气灯的照明度相当于 60 ~ 100 瓦白炽电灯，其耗气量只相当于灶具的 $1/6 \sim 1/5$ 。

沼气红外线辐射器的引射性能直接影响辐射器的正常燃烧和稳定性。在条件允许的前提下，应尽可能使用较高的气源压力，这对保证引射器吸入所需的空气量并使沼气和空气充分均匀混合，以及使其有足够的头部静压，并对保持辐射器稳定燃烧都有好处。

(2) 沼气灯安装及使用注意事项

新灯使用前，应不安纱罩进行试烧，如火苗呈浅蓝色，短而有力，均匀的从泥头孔中喷出，呼呼发响，火焰又不离开泥头燃烧，无脱火、回火等现象，表明灯的性能好，即可关闭沼气阀门，待泥头冷却后安上纱罩。

新纱罩初次点燃时，要求有较高的沼气压，以便有足够的气量将纱罩烧成球形。对已燃烧、发好的纱罩，在点灯时，启动压力应徐徐上升，以免冲破纱罩。

点灯时，应先点火后开气，待压力升至一定高度、燃烧稳定、亮度正常后，为节约沼气，可调旋开关稍降压力，但亮度仍可不变。

(3) 沼气灯故障的排除

纱罩外层出现蓝色飘火，经久不消失，是因为带进的空气不足，应将灯盘按顺势针方向旋转，逐渐加大空气进气量，调至不见明火，发出白光，亮度最佳为止。调节后，如仍出现飘火，这是喷嘴孔径过大，应更换孔径小的喷嘴。

纱罩不发白光而呈红色时，是因为沼气太少或空气太多，应将灯盘按反时针方向旋转，逐渐减少空气进气量，调节后如仍出现红火，应更换大孔径的喷嘴。

沼气在纱罩外燃烧，灯光发红，调节无效，是由沼气灯结

构不合理导致，例如，引射器太短、喷嘴孔过大或不同心、烟气排除不良、泥头破损或纱罩未扎牢，应更换所需的零部件或另选结构合理的沼气灯。有时燃烧处于良好状态，而灯不发白光，这是纱罩质量不佳或存放时间过长受潮的缘故，应马上更换纱罩。

沼气灯不发火，是因为喷嘴堵塞，应取下喷嘴，用缝衣针扎通；沼气灯光不稳，则说明输气管中积水较多或管道不畅通，可打开排冷凝水的阀门排除管道内的冷凝水或疏通管道。

7.3.2.3 沼气热水器

(1) 沼气热水器的结构 沼气热水器与其他燃气热水器的结构基本相同，只是沼气热水器中的燃烧器适用于沼气。热水器一般由水供应系统、燃气供应系统、热交换系统、烟气排除系统和安全控制系统 5 个部分组成。当前多采用后制式热水器，其运行可以用装在冷水进口处的冷水阀，也可以用装在热水出口处的热水阀进行控制。

(2) 沼气热水器安装及使用注意事项

热水器严禁安装在浴室里，可以安装在通风良好的厨房或单独的房间内。

安装热水器的房间高度应大于 2.5 米。房间必须有进气孔、排气孔，其有效面积不应小于 0.03 平方米，最好有排风扇。房间的门应与卧室和有人活动的门厅、会客厅隔开，朝室外的门窗应向外开。

7.3.2.4 沼气孵禽加热器 在农村利用加热装置来孵化禽蛋已很普遍，沼气作为一种清洁能源，当用于孵禽加热器（图 7-22）时具有控温精确、操作方便、节约能源等特点，该类加热器分为气热式和水热式两种结构。

气热式结构的主要部件包括燃烧器、燃烧器支架、燃烧执行器、数显控温仪、散热器。燃烧器支架是支撑燃烧器的主体，用钢板焊接成型。燃烧执行器由电子元件构成，装在铁壳或塑壳盒内，在得到开始燃烧或停止燃烧信号时，自动打开气门或关闭气门。燃

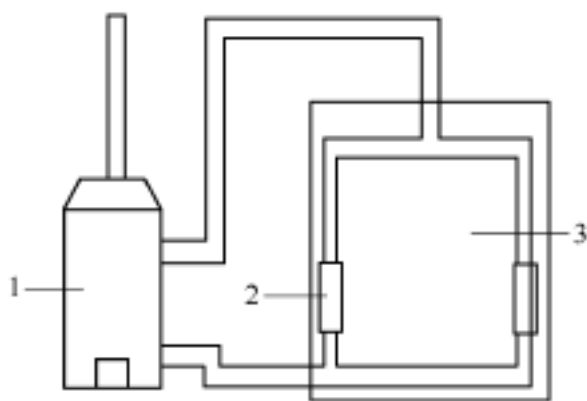


图 7-22 沼气孵禽加热器结构示意图

1—燃烧器；2—散热器；3—孵化箱

烧器根据所需热量设计而成，以适应各种不同容蛋量的孵化机。数显控温仪可控制胚胎各发育时期的温度，并便于远距离监视与阅读。散热器也称传热器，将燃烧器产生的热量传给孵化箱内的禽蛋。当孵化箱内温度没有达到设定值时，燃烧执行器接到数显控温仪发出开始燃烧

的加温信号，打开气门，向燃烧器供气加热，使孵化箱内温度上升；温度达到设定值时，数显控温仪发出停止燃烧信号，燃烧执行器关闭气门，燃烧器渐停加热。孵化箱内温度低于设定值时，又重复上述过程。水热式结构的主要部件包括沼气热水炉、炉水控温器、燃烧器、热水管道、电磁阀、管道泵、散热器、均温风扇、孵化控温器、超温报警器等。控制过程：先设定炉内热水温度，当炉内水温低于设定值时，自动点火燃烧器通气燃烧，炉内水温达到设定值时，自动点火燃烧器关闭，停止加热。孵化箱内设有孵化控温器，当孵化箱内温度没有达到设定值时，电磁阀打开，热水通过散热器、均温风扇将热量传给禽蛋；温度达到设定值时，电磁阀关闭，散热器所存热水立即被管道泵抽走，散热器余热很快随均温气流消散。如果控温系统出现故障，温度超过设定值，报警系统会发出报警声，告知值班人员前往处理。由于 1 米^3 沼气产生的热量相当于 6 千瓦时电产生的热量，因此，采用沼气作为孵禽热源，经济效益相当可观。

7.3.3 沼气燃具的设计

7.3.3.1 沼气燃具的流量 沼气燃具工作状态流量，是指燃具在工作温度和压力状态下，单位时间内通过燃具的沼气体积，通常以小时计。该流量需要通过流量计实际测到，一般测量时以 3 分钟为一基准，则工作状态下流量的计算式为：

$$V_0 = \frac{V_t}{t} \times 60 \times f_1 \quad (7-32)$$

式中 V_0 ——燃具的流量，米³/小时；

V_t ——在时间 t 内通过的气体体积，米³；

t ——允许气体通过的时间，分钟；

f_1 ——流量计的校正系数， $f_1 = \frac{\text{标准瓶容积}}{\text{流量计上的流量}}$ 。

7.3.3.2 燃具的热负荷 沼气燃具的热负荷是指单位时间内燃具所输出的热量，一般以单位小时计，单位为兆焦/小时。燃具的热负荷由燃具在额定压力下需要完成的加热工艺要求来确定，即沼气灶应能满足爆炒、蒸煮的要求，沼气取暖或烘干炉应能满足取暖房间和烘干产品的加热要求，沼气热水器应能满足加热水量及加热时间的要求。

确定燃具热负荷的方法（国标 GB 3606—83 家用沼气灶标准）如下。

按家庭人口、生活水平来确定，在家用沼气灶具技术标准中规定，沼气灶的热负荷分别为 2000 千卡/小时、2400 千卡/小时及 2800 千卡/小时 3 种，即 2.2 千瓦、2.8 千瓦、3.3 千瓦 3 种。

按被加热对象所需的热量和燃具的热效率、升温时间来确定热负荷。

$$I = \frac{KCG(T_2 - T_1)}{\eta t} \quad (7-33)$$

式中 I ——燃具的热负荷，千卡 / 小时；

K ——安全系数，取 $K = 1.28 \sim 1.4$ ；

C ——被加热物质的比热容，千卡/（千克·摄氏度）；

T_1, T_2 ——被加热物质的初温和终温， ；

η ——燃具的热效率，%；

t ——被加热物质升温所需要的时间，小时。

1 卡 = 4.1840J。

若已经知道燃具的流量及沼气的热值，则燃具的热负荷可由式 (7-34) 进行计算。

$$I = V_0 Q_H \quad (7-34)$$

式中 I ——沼气燃具的热负荷，兆焦/小时；

V_0 ——沼气燃具的流量，米³/小时；

Q_H ——沼气的热值，兆焦/米³。

7.3.3.3 沼气燃具的热效率 沼气燃具的热效率是指被燃具加热的物质吸收的热量与燃具所放出的热量比，即有效利用的热量占沼气放出热量的百分比，用 η 来表示热效率。

$$\text{即：} \quad \eta = \frac{\text{被加热物质吸收的热量 (千焦)}}{\text{燃具释放的热量 (千焦)}} \quad (7-35)$$

热效率的高低与沼气的燃烧过程和传热过程等因素有关，是多因素影响的综合性参数。家用沼气燃具的热效率，采用加热水的方法来进行测定，经测定的数据按式 (7-36) 进行计算。

$$\eta = \frac{CG_p (T_2 - T_1)}{V_0 Q_H} \quad (7-36)$$

式中 η ——燃具的热效率，%；

C ——水的比热容，4.186 千焦/(千克·摄氏度)；

G_p ——被加热的水量，千克；

T_1, T_2 ——分别为被加热水的初温和终温，℃；

V_0 ——沼气消耗量，米³；

Q_H ——沼气的热值，千焦/米³。

7.4 沼气发电

沼气发电始于 20 世纪 70 年代初期。当时，国外为了合理、高效地利用在治理有机废弃污染物中产生的沼气，普遍使用往复式沼气发电机组进行沼气发电。使用的沼气发电机大都是属于火花点火式气体燃料发动机，并对发动机产生的排气余热和冷却水余热加以充分利用，可使发电工程的综合热效率高达 80% 以上。通常每 100 万吨的家庭或工业废物就足以产生充足的甲烷作为燃料供一台 1 兆

瓦的发电机运转 10 ~ 40 年。在我国 20 世纪 70 年代沼气发电开始受到国家的重视，成为一个重要的课题被提出来。到 80 年代中期我国已有上海内燃机研究所、广州能源所、四川省农机院、南充地区农机所、武进柴油机厂、泰安电机厂等十几家科研院所、厂家对此进行了研究和试验。在我国，沼气机、沼气发电机组已形成系列化产品。目前国内从 8 千瓦到 5000 千瓦各级容量的沼气发电机组均已先后鉴定和投产，主要产品有全部使用沼气的单燃料发动机及部分使用沼气的双燃料沼气-柴油发动机。

7.4.1 沼气发电系统概述

构成沼气发电系统的主要设备有沼气发动机、发电机和热回收装置。沼气经脱硫器由贮气罐供给燃气发动机，从而驱动与沼气内燃机相连接的发电机而产生电力。沼气发动机排出的冷却水和废气中的热量通过热回收装置进行回收后，作为沼气发生器的加温热源。图 7-23 以污泥消化器产生的沼气发电系统来说明沼气发电过程。

从废水处理厂出来的污泥进入一次消化槽和二次消化槽，在消

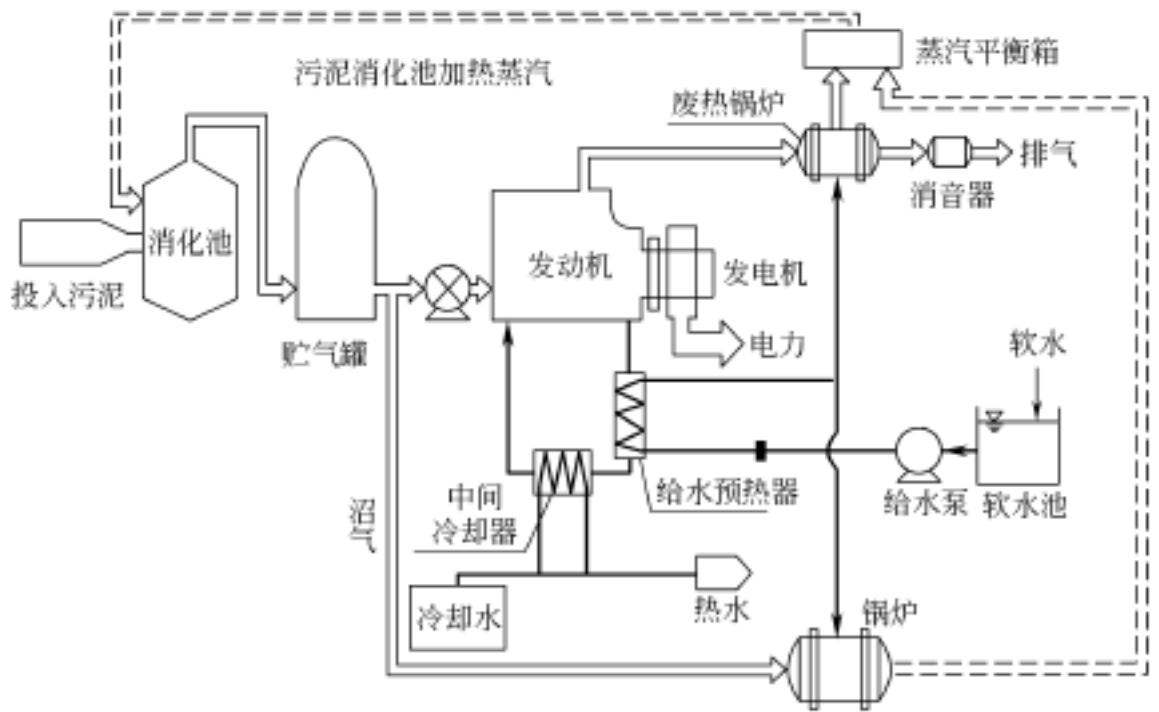


图 7-23 日本某污水处理厂沼气发电装置流程

化槽中产生的沼气首先经脱硫器进入球形贮气罐，然后由此输送入沼气发电装置中。作为发动机燃料的沼气中甲烷的含量必须高于50%，不必要进行二氧化碳的脱除，因为少量二氧化碳对发动机有利，使其工作平稳，减少废气中有毒物的含量。从发电装置出来的废沼气进入热交换器中，将热量释放出来，用来加热进行厌氧发酵的污泥，从而提高沼气的发生率。

7.4.2 沼气发动机装置

在我国，有全部使用沼气的单燃料沼气发动机及部分使用沼气的双燃料沼气-柴油发动机。表 7-13 为两种发动机的性能比较。

表 7-13 两种发动机的性能比较

项 目	单 燃 料 式 发 动 机	双 燃 料 式 发 动 机
点火方式	电点火方式	压 缩 点 火 方 式
原理	将“空气沼气”的混合物在气缸内压缩,用火花塞使其燃烧,通过活塞的往复运动得到动力	将“空气燃料气体”的混合物在气缸内压缩,用点火燃料使其燃烧,通过活塞的往复运动得到动力,是复合燃料发动机
优点	不需要辅助燃料油及其供给设备 燃料为一个系统,在控制方面比可烧两种燃料的发动机简单 维修较可烧两种燃料的发动机简单 发动机价格较低	用液体燃料或气体燃料都可工作 对沼气的产量和甲烷浓度的变化能够适应 如由用气体燃料转为用柴油燃料在停止工作,发动机内不残留未燃烧的气体,因而耐腐蚀性好
缺点	工作受到供给的沼气的数量和质量的影响	用气体燃料工作时也需要液体辅助燃料 需要液体燃料供给设备 控制机构稍复杂 价格较单燃料式发动机稍高

近十几年由于农村家庭责任制、大中型的工厂化畜牧场的建立及环境保护等原因，我国的沼气机、沼气发电机组已向两极方向发展。农村主要向 3~10 千瓦沼气机和沼气发电机组方向发展，而酒厂、糖厂、畜牧场、污水处理厂的大中型环保能源工程，主要向单

机容量为 50 ~ 200 千瓦的沼气发电机组方向发展。国外，绝大多数小型沼气发电机均由原汽油机改装而成，其功率大都下降，一般下降 15% ~ 20%，而柴油机改装成小功率的沼气机很少，原因在于其控制系统均采用电子调速系统来控制混合器，增加了成本。在国内，大多数小功率沼气机的改装都以柴油机为主，功率相对下降 10% ~ 15%，主要原因为沼气中含甲烷量少，发动机工作容积不变，不能增加混合气热值所致，热效率在 33% ~ 36% 之间。

7.4.2.1 单燃料发动机 单燃料发动机又称为全烧式发动机，在沼气产量大的场合可连续稳定地运行，适合在大、中型沼气工程中使用，可以使用天然气发动机，亦可由柴油机改装而成。由于气体燃料的组分、热值、物理性能、着火温度、爆炸极限、燃烧特性存在很大差异，当利用天然气发动机燃烧沼气时，需对发动机的相关部件进行必要的调整或改装，例如发动机的空气-燃气混合器，在改装时，空气阀的通径基本不变，燃气阀的通径需扩大 1.4 倍左右；此外，还应根据发动机对空燃比和调节特性的要求，确定燃气阀芯的型号，设计若干组阀座与阀芯的配合方案，以备筛选。

即使是同一种气体燃料，其燃烧特性同样会因产地、原料、成分的不同而不同。所以气体燃料的发动机必须根据实际的燃气特性进行现场调试，以达到预期的技术技能和经济指标。沼气发电机组调试的目的是根据现场实际的燃料特性，将空燃比和点火提前角调整到最佳范围，使发动机达到设计的性能指标。空燃比的调整是关键，在调试过程中应对沼气燃料的成分和空燃比进行随机监控，以便随时调整调试的方向。

国内也有将四冲程的液体燃料发动机改装成为气体燃料发动机的，这种改装比改装为双燃料发动机复杂，因为液体燃料发动机本身缺少点火装置。若将柴油机改烧沼气，需作如下几项工作：确定降低压缩比及燃烧室形状所必需的机器改装；设计沼气的进气系统和沼气-空气混合器结构；设计气体调节系统及其与调速器的联动机构；设计点火系统。若是由汽油机改烧沼气则不需要再

做 、 、 项工作。

图 7-24 是一单燃料沼气发动机，在原 6160 柴油机的基础上改装而成。基本工作原理为：沼气与空气在混合器内形成可燃混合气，被吸入气缸后，当活塞压缩接近上止点时，由火花塞点燃进行燃烧做功。单燃料沼气发动机一般存在燃烧速度慢、后燃严重、排气温度高与热负荷大等问题，为了加快混合气的燃烧速率，可以通过提高压缩比，加强混合气的气流扰动，提高点火能量等措施来实现。考虑到沼气与柴油不同的物理化学特性，针对沼气燃烧速度慢的特点，可以采用能改善其燃烧性能的快速燃烧方法，具体为：

采用紊流型燃烧室（如图 7-25），使得燃烧室内产生强度很大的紊流和尺度很小的微涡团，提高沼气-空气混合气的燃烧速度，缩短快速燃烧期； 沼气的主要成分是甲烷，抗爆性能很好，可以选择高压压缩比； 为了防止排气管“放炮”，采用的气阀重叠角比原柴油机减少 60°曲轴转角。

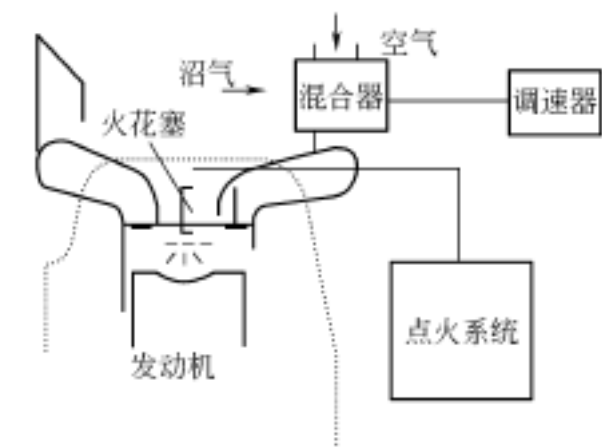


图 7-24 火花塞点火式单燃料
沼气发动机示意



图 7-25 紊流型燃烧室示意

7.4.2.2 沼气-柴油双燃料发动机及装置 沼气-柴油双燃料发动机是对柴油机的进气混合系统和双燃料调节系统进行改装得到。其工作原理是：沼气与空气在混合器中形成可燃混合气，被吸入气缸后，当活塞压缩接近上止点时，向燃烧室内喷入少量引燃柴油，柴油燃烧后点燃缸内混合气进行燃烧做功。双燃料发动机在正常运行

情况下，其引燃柴油量在 8% ~ 20%（单位时间内引燃油耗量与改装前该发动机在额定工况下柴油耗量的比值）之间。双燃料发动机的特点是在燃气不足甚至没有的情况下可增加进行燃烧的柴油量，甚至完全烧柴油，以保证发动机运行正常。因此，使用起来比较灵活，适用于产气量较少的场合（如农村地区的小沼气工程中）。这种方案的最大优点就是可以利用少量的引燃柴油压燃后点燃沼气。因为哪怕只有 5% 左右的柴油，其着火能量就会大大高于火花塞点火的能量，就有可能使沼气的着火滞后期乃至整个燃烧期缩短，从而解决沼气机的严重后燃、高排温与热负荷大等问题。任何一台四冲程柴油机都不必更换主要零件，就可以改装成为柴油-沼气机。我国采用的双燃料沼气发动机，没改变原柴油机结构，可保证在运行状态时转换为全烧柴油工作。保留了原燃油系统，在保证喷油嘴零件有足够的冷却强度情况下确定的节油指标能达到国际公认的最佳范围。国外柴油机改为柴油-沼气双燃料机若供油系统不变，其节油率为 70% ~ 85%，但其热量利用率低于原柴油机。我国的双燃料发动机，从 1974 年先后有四川省农机院、上海内燃机研究所、中科院广州能源所等十几个科研单位从事这方面的研究试验工作，并取得很好的成绩，改装后的机组，操作极其简单方便，其节油率在 75% 以上，发电机组的主要性能指标达到我国 GB 2819—81《交流工频移动电站通用技术条件》所规定的指标范围。目前国内较多使用双燃料发动机（单燃料发电机组多为石油部门采用），但是大中型双燃料发动机采用手动调节，工作可靠性差，操作困难，而且操作人员不能离开机组，工作强度大。双燃料发动机的结构示意图如图 7-26。

7.4.2.3 沼气发动机的输出功率 沼气发动机的性能除了结构设计因素外，它在某种程度上取决于沼气的特征。发动机的输出功率对于自然吸气式沼气发动机来说，与所燃用的沼气空气混合气的低热值有关。目前大部分沼气发动机都是用柴油机改制的，在发动机的各项性能指标不变的前提下，通过式 (7-37) 可确定改装后的沼气发动机的输出功率。

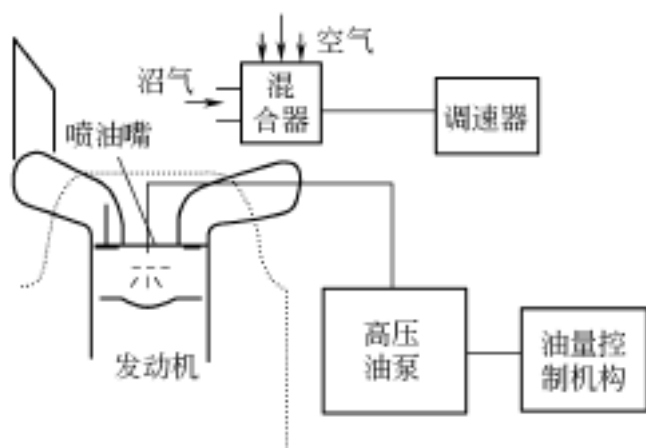


图 7-26 沼气-柴油双燃料发动机的结构示意图

$$P_1 = P \frac{H_{ZKL}}{1 + H_{TKL}} \quad (7-37)$$

式中 P_1 ——改装后沼气发动机的功率，千瓦；

P ——原柴油机的功率，千瓦；

H_{ZKL} ——沼气-空气混合气的低热值，兆焦/米³；

H_{TKL} ——天然气-空气混合气的低热值，兆焦/米³。

有资料显示，发动机其他参数不变，尽管沼气的低热值比天然气要低得多，但是如果两者混合气的低热值相差不大，则改装后的沼气发动机的输出功率与原柴油机相比，相差不大。沼气消耗率因惰性气体不参加燃烧反应而且要吸收一部分热量作为废气排出而增大，现在国内外普遍认为柴油机改装沼气发动机，其热效率下降约 15%，燃气消耗率比较高。

7.4.2.4 发动机排放物 发动机排放的有害物主要为 CO、NO_x、碳氢化合物（HC）以及少量的 SO_x 和颗粒排放物。根据高温 NO 的反应机理，产生 NO 的要素是温度、氧浓度和反应时间，在足够的氧浓度下，温度越高、反应时间越长，生成的 NO 就越多。由于沼气发动机的燃烧速度慢，燃烧温度较低，NO_x 比柴油机低得多；沼气中含有大量的 CO₂（20% ~ 50%），且本身含有一定量的 CO 组成成分，燃烧时氧气浓度相对柴油机低，因而 CO 和碳氢化合物（HC）的排放相对高；沼气是一种生物类气体燃料，颗粒显然比

柴油机排放少；至于 SO_x ，排量虽然很少，但是排入大气中，会形成酸雨，危害极大。因此，为减少沼气发动机有害排放物生成，必须对沼气进行净化处理，尤其是脱硫处理；还可适当提高压缩比以减少有害物质的排放。实际压缩比与发动机配气相位、速度和负荷大小有关，因而是个变量，提高实际压缩比，提高终了压缩温度和压力，有利于提高混合气的燃烧效率，缩短燃烧时间，降低沼气消耗率，使混合气充分快速地燃烧，减少有害排放物的生成。且沼气中甲烷含量高，具有很好的抗爆性能，所以压缩比可大幅度提高；采用高能点火系统可有效增加火焰传播速度，缩短滞燃期，避免后燃严重、排温增高的恶果，使污染降低；为了减少污染，还可对气体排放物进行后处理。

7.4.2.5 沼气发电余热回收方法 为了提高沼气发电系统对沼气的利用率，应对沼气发电过程中废气和发动机冷却系统中产生的余热加以充分利用，具体利用方法可用图 7-27 简单说明。

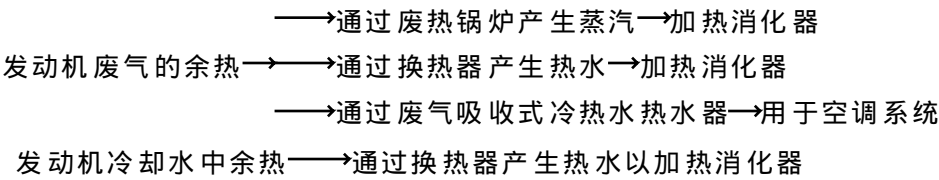


图 7-27 沼气发电系统余热利用方法

沼气发电系统能积极、有效地利用沼气，可以将沼气中约 30% 的能量变为电力，40% 的能量变为热能。沼气发动机在完全满足人们对环保严格要求的同时，利用四冲程、高压点火、涡轮增压、中冷器、稀释燃烧等技术，通过沼气在气缸内燃烧做功，将沼气的化学能转换成机械能。与此同时，利用热回收技术可将燃气内燃机中润滑油、中冷器、缸套水和尾气排放中的热量充分回收利用而组成热动力机组。一般从发动机热回收系统中吸收的热量以 90 的热水形式供给热交换中心使用。内燃机正常回水温度为 70 。在污水处理厂中可利用这一热量给消化池进行加热。燃气内燃机机械效率通常达 40%，热效率可达 50%，总效率高达 90%。通常在 O_2 为 5% 的情况下燃烧后排放的 $\text{NO}_x \leq 500$ 毫克/米³，完全满足

环保的要求。因此，通过沼气发动机利用沼气是一种非常理想的途径。

7.4.3 沼气燃料电池

利用燃料电池发电，是国际上能源研究的一个热点。由于燃料电池的能量利用率高，对环境基本上不造成污染，目前国际上对燃料电池的研究投入了大量的人力、物力。

7.4.3.1 燃料电池技术及产品 燃料电池是近年来技术发展进步最快的产业之一，它是把燃料中的化学能直接转化为电能的能量转化装置，如质子交换膜燃料电池（PEMFC），其工作原理是：氢气被送到负极，经过催化剂作用，氢原子中两个电子被分离出来，这两个电子在正极的吸引下，经外部电路产生电流，失去电子的氢离子（质子）可穿过质子交换膜，在正极与氧原子和电子重新结合为水。由于氧可以从空气中获得，只要不断给负极供应氢，并及时把水（蒸汽）带走，燃料电池就可以不断地提供电能。

燃料电池具有下列优点： 能量转化效率高，燃料电池的能量转换效率理论上可达 100%，实际效率已可高达 60% ~ 80%，为内燃机的 2 ~ 3 倍； 不污染环境，燃料电池的燃料是氢和氧，生成物是清洁的水； 寿命长，燃料电池本身工作没有噪声，没有运动件，没有振动。所以燃料电池是一种近乎零排放的动力源，它不经历热机卡诺循环过程而直接把燃料的化学能转变成电能，故燃料电池应用技术被美国《时代周刊》列为 21 世纪十大高新科技之首。燃料电池的高效率、无污染、建设周期短、易维护以及低成本的潜能将引发 21 世纪新能源与环保的绿色革命。如今，在北美、日本和欧洲，燃料电池发电正以奋起直追的势头快步进入工业化规模应用的阶段，将成为 21 世纪继火电、水电、核电后的第四代发电方式。

由于具有燃料利用效率可达 80%、不排放有害气体、容量可根据需要而定等优点，所以燃料电池受到了各方面的极大关注。各国政府都在这方面增加研发资金，推动其商业化的进程。在国外容量为 3 千瓦、5 千瓦、7 千瓦等热电联用的燃料电池正在源源不断地进入家庭，数百千瓦的燃料电池正在源源不断地进入旅馆、饭

店、商厦等场所。为了获得氢燃料，目前在非纯氢燃料电池前均加了燃料改质器（也称重整器），如日本大阪燃气与三洋电机两公司开发出以天然气为燃料的家用千瓦级固体高分子燃料电池，以天然气为燃料的 24 小时不间断型家用燃料电池。随着燃料电池商业化的发展，实现家庭发电将像用煤气灶与煤气罐配合使用一样方便，打开气阀就可以发电和供热水。

燃料电池的工作原理和普通电池一样，是将物质的化学键能直接转化为电能的一种装置。在普通的电池中，用来提供化学键能的物质在使用一定时期以后，要么需要进行充电才能继续使用，要么则完全换新的。但是，只要向燃料电池的电极供给“燃料”和氧化剂，则燃料电池就可以连续地进行由化学键能向电能的直接转化。由燃料电池的工作原理（图 7-28）可见，燃料电池由阳极和阴极所组成，在阳极和阴极之间为导离子的电解质，根据电解质的不同而有不同类型的燃料电池。阳极和阴极都是用多孔的材料制成，以便燃料和氧化剂进行良好的接触。在阳极上，燃料气体被氢氧化物、氧化物和来自电解质的碳酸盐离子所氧化而生成 H_2O 、 CO ，并产生电子。如果在阳极和阴极间用导线连接，则电子就会从阳极流向阴极。在阴极上氧化剂被来自阳极的电子离子化，而生成氢氧化物、氧化物或碳酸盐离子，这些离子通过电解质由阴极流向阳极，从而形成了整个电流回路。

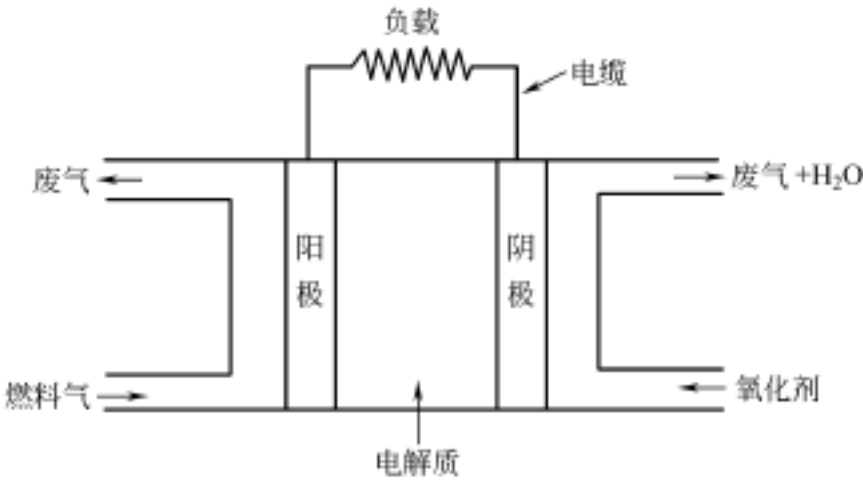


图 7-28 燃料电池的结构和工作原理

由于燃料电池中电解质和反应化学物质之间需要有很大的接触空间，因而每个燃料电池元件的尺寸和功率受限制，一般为几十瓦一个电池元件，然后将多个燃料电池元件组装成较大的组件。一个功率为 100 千瓦的组件占地面积约 0.2 米²。对于不同的燃料电池，由于所采用的电解质不同，因而其运行温度、电效率以及废气的排气温度均不相同。能够在较高温度下运行的燃料电池，其废气的排气温度也较高，因而可以通过余热利用来提高整个系统的效率。表 7-14 为几种基本的燃料电池的性能比较。

表 7-14 几种基本的燃料电池的性能比较

燃料电池类型	电解质	燃料	运行温度 /	电效率 / %	排气温度 /
碱性燃料电池 (AFC)	KOH (氢氧化钾)	H ₂	100	40	70
固体聚合物燃料电池 (SPFC)	聚合物	H ₂	100	40	70
磷酸燃料电池 (PAFC)	H ₃ PO ₄ (磷酸)	H ₂	200	40	100
熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC)	Li ⁺ K ₂ CO ₃	H ₂ , CO, HC	650	50	400
固体氧化物燃料电池 (SOFC)	ZrO ₂ (氧化锆)	H ₂ , CO, HC	1000	55	1000

表 7-14 所列的 5 种基本燃料电池可分为两大类：头三种 AFC、SPFC 和 PAFC 采用氢气作燃料，运行温度较低，属于第一代燃料电池；后两种 MCFC 和 SOFC 可用氢气、一氧化碳和碳氢化合物（HC）作燃料，可在较高的温度下运行，是第二代燃料电池。

固体氧化物燃料电池采用固体氧化物作为电解质，除了高效、环境友好的特点外，它无材料腐蚀和电解液腐蚀等问题；在高的工作温度下电池排出的高质量余热可以充分利用，使其综合效率可由 50 % 提高到 70 % 以上；它的燃料适用范围广，不仅能用 H₂，还可直接用 CO、天然气（甲烷）、煤气化气、碳氢化合物等作燃料，这类电池最适合于分散和集中发电。

目前世界上已安装使用的燃料电池约 300 套，多数采用天然气

为原料，其中安装在美国某公司的 1 号机和安装在日本大阪煤气公司的 2 号机，累计运行时间相继突破了 4 万小时。

7.4.3.2 沼气燃料电池及发电装置 沼气燃料电池是将经严格净化后的沼气，在一定的条件下进行烃裂解反应，以产生出以氢气为主的混合气体（氢气含量达 77%），然后将此混合气体以电化学方式进行能量转换，实现沼气发电。德国科隆市 RODENKIRCHEN 污水处理厂使用的发电机组即为一例。据介绍，该机组由 5 部分组成，分别为沼气净化装置、加热裂解（反应）室、转化器、磷酸电化学电池装置和逆变器，其中后 4 部分为一体，总尺寸为 5m × 2.5m × 3m。国内只有广州市番禺水门种猪场正在建设由日本政府提供的 200 千瓦的沼气燃料电池装置。该沼气燃料电池由 3 个单元组成：燃料处理单元、发电单元和电流转换单元。

燃料处理单元。该单元主要部件是沼气裂解转化器（改质器），它以镍为催化剂，将甲烷转化为氢气。

发电单元。把沼气燃料中的化学能直接转化为电能。

电流转换系统。主要任务是把直流电转换为交流电。

燃料电池产生的水蒸气和热量可供消化池加热或采暖用，排出废气的热量也可用于加热消化池。

日本一座日处理污水 20 万立方米的处理厂，所用的沼气燃料电池发电与传统沼气发电的经济效益比较见表 7-15。

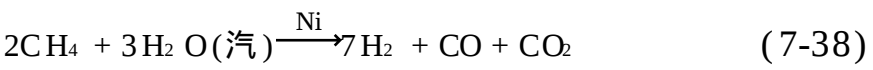
表 7-15 沼气燃料电池发电与传统沼气发电的经济效益比较

项 目	发 电 方 式	
	燃 料 电 池 (200 千 瓦 × 4)	沼 气 发 电 (600 千 瓦)
沼气用量/ (米 ³ / 天)	6804	6804
年发电量/ 千瓦	56.1 × 10 ⁵	44.2 × 10 ⁵
发电设备耗电量/ (千瓦时/ 年)	- 3.3 × 10 ⁵	- 3.6 × 10 ⁵
年供电量/ 千瓦时	52.8 × 10 ⁵	40.6 × 10 ⁵
年节省电费/ 万日元	7392	5684
年建设费/ 万日元	72000	71000
年运行费/ 万日元	6248	5056
年盈利 万日元	1144	628

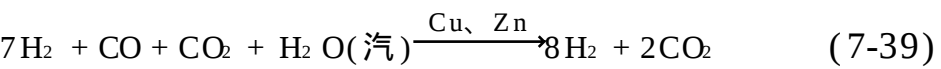
由表 7-15 可见，沼气燃料电池基建投资和运行费比沼气发动机发电高，但发电量大，沼气燃料电池的发电量为 28 千瓦/米³，传统的沼气发电为 21 千瓦/米³，沼气燃料电池的年盈利自然高。

7.4.3.3 沼气燃料电池的发电原理 沼气燃料电池是将沼气化学能转换为电能的一种装置，它所用的“燃料”并不燃烧，而是直接产生电能。它的发电过程由 3 个单元完成。

燃料处理单元。该单元主要部件是改质器，它以镍为催化剂，将甲烷转化为氢气，反应如下（参与反应的水蒸气来自发电单元）。



为了降低 CO 的浓度，在铜和锌的催化作用下，混合气体在改质器后的变成器中得到进一步的改良，反应如下。



发电单元。发电单元基本部件由两个电极和电解质组成，氢气和氧化剂（O₂）在两个电极上进行电化学反应，电解质则构成电池的内回路，其工作原理如图 7-29。

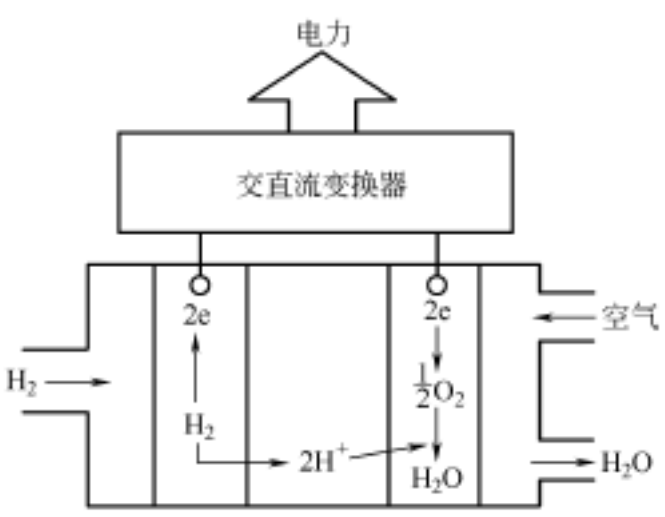
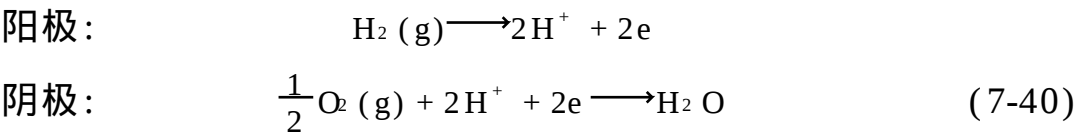


图 7-29 磷酸型沼气燃料电池工作原理

含氢气的混合气体从阳极进入电解质电化学电池组。在电池组中有一特制的膜将其阴阳两极分开，而此膜对离子具有选择性。氢气在电池组的阳极被分解为电子和氢离子，由于电子不能通过膜且

在电极的作用下，经逆变器从阳极流向阴极，电子的定向流动形成直流电流，进而在逆变器的作用下转化成交流电输出；同时氢离子从膜扩散到阴极，与从阴极进入电池组的空气中的氧气以及外围电路中的电子反应，形成水（若在阳极中输入的是纯的氢气，则产生的废气仅是水蒸气而已）。氢氧结合产生的热能由换热器输出成为可利用的有效热。

电解质可采用磷酸，其发电效率虽较低，但温度低（约200 ）。在磷酸电解质中，电池反应如下。



电子通过导线时，形成直流电。燃料电池由数百对这样的原电池组成。

电流转换系统。主要任务是把直流电转换为交流电。燃料电池产生的水蒸气、热量可供消化池加热或采暖用。排出废气的热量也可用于加热消化池。

7.4.3.4 作为燃料电池原料的沼气的预处理 为了满足燃料电池对燃料的要求，必须首先对沼气进行预处理。沼气中的有用成分是甲烷，燃料电池要求甲烷的浓度在90%以上，其他成分如CO₂、H₂S等对燃料电池有不利影响。表7-16是沼气用作燃料电池时各种气体含量的限制值及超过此限值时对燃料电池的影响。

表 7-16 燃料电池对气体的限制值

有 害 物 质	限 制 值	对燃料电池的影响
H ₂ S	7.12 毫克/ 米 ³ 以下	缩短内部催化剂的寿命
HCl	1.0 % 以下	
SO _x	0.5 % 以下	
NO _x	1.0 % 以下	使内部催化剂能力低下
F 化合物	1.0 % 以下	
O ₂	1.0 % 以下	
粉尘	0.003 克/ 米 ³ 以下	对脱硫催化剂有不利影响 使催化剂压力损失增大
CO ₂	10 % 以下	
CH ₄	90 % 以上	

从表 7-16 可以发现，用作燃料电池原料的沼气，其净化过程非常关键。除了对沼气进行脱硫处理外，还必须对沼气中的氮化物、二氧化碳、粉尘进行清除，以使燃料电池正常、高效地运行。

7.4.4 沼气发电在国内的应用状况及前景

沼气作为农村生活燃料已为人们所接受，沼气作为发动机燃料，直接驱动加工作业机具和发电机以代替石油，沼气发电在我国 20 世纪 70 年代就开始受到国家的重视，国内对此进行了长足的研究。目前国内已建成了好几座大型沼气发电工程，例如，浙江省最大的酒精生产厂——长征化工厂，建成了设计容量为 1000 千瓦的沼气发电站，发动机由天然气发动机改装而成，单机最大功率达 450 千瓦，既解决了酒糟液的处理问题，又生产了高质量的能源；江苏泗洪酒厂距洪泽湖 15 公里，毗邻淮海水系，该厂引进澳大利亚的废水处理技术，建成了 1500 千瓦的沼气发电及热利用系统，使环境保护与节能相结合；安徽亳州市酒精厂系古井贡酒厂配套企业，现年产食用酒精 1.5 万吨，成为亳州市骨干企业，为改善淮河水系水质污染现状，1992 年，安徽省计委批准本企业污水治理工程及沼气发电工程立项。该项目总投资 300 万元，其中沼气发酵工程投资 200 万元，沼气发电工程 100 万元。沼气工程现日处理酒糟液 400 米³，已于 1994 年 9 月投入运行。该厂沼气发电项目，每年可创效益 114.8 万元，其中直接经济效益 94.8 万元，三年半就可回收全部投资；国内许多大城市，如南京市、杭州市、深圳市都已建成垃圾处理厂沼气发电工程，这些工程的建立将大大改善城市居住环境，减轻城市污染，由废弃物产生的电能又缓解了城市的电力紧张问题。

沼气发电装置比其他热动力设备或发电装置的热效率都高。国外最先进的沼气发动机组加上余热利用以后的综合热效率最高可达 88%，再加上沼气燃料电池的研制和应用，沼气高效、无污染的发电利用方式必将在国内、国际得到广泛利用。因此，沼气发电不仅对于大型酒精厂、垃圾填埋场、大型牲畜养殖厂意义重大，在解决废物处理问题、美化环境的同时能产生高质量的能源，创造出巨大

的经济效益和社会效益；而沼气发电对我国农村地区来说同样具有巨大的现实意义。农村地区，沼气原料充足，而农村缺电现象在我国又非常普遍。如果利用农业生产废弃物、牲畜粪便来发酵产沼气，则沼气发电产生的电可以通过电缆送到每家每户，提前实现全部家用设备电气化，既方便又干净，用不完的电还可以并入大电网中，这是最科学、合理、高效应用沼气能源的途径。由此可见，沼气发电对于缓解我国农村电力紧张状况同样具有重要的作用。

(徐桂转)

主要参考文献

- 1 张百良主编. 农村能源工程学. 北京: 中国农业出版社, 1997
- 2 张全国等编. 燃烧理论及其应用. 郑州: 河南科学技术出版社, 1993
- 3 万仁新主编. 生物质能工程. 北京: 中国农业出版社, 1992
- 4 周孟津主编. 沼气生产利用技术. 北京: 中国农业大学出版社, 1999
- 5 傅忠诚等编. 燃气燃烧新装置. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984
- 6 朱世勇主编. 环境与工业气体净化技术. 北京: 化学工业出版社, 2001
- 7 李献嘉主编. 煤气燃烧器. 北京: 化学工业出版社, 1966
- 8 [苏] C. A. 博布罗夫斯基. 天然气管路输送. 北京: 化学工业出版社, 1985
- 9 程桂花主编. 合成氨. 北京: 化学工业出版社, 1998
- 10 涂晋林, 吴志泉主编. 化学工业中的吸收操作——气体吸收工艺与工程. 北京: 化学工业出版社, 1994
- 11 简弃非. 沼气燃料电池及其在我国的应用前景. 中国沼气, 2003, 21 (3): 32~34
- 12 林荣忱, 周伟丽等. 城市污水处理厂沼气发电的两种方式. 城市环境与城市生态, 1999, 12 (3): 57~59
- 13 王世逵. 沼气发电在国内的发展. 中国沼气, 1997, 15 (4): 40~42
- 14 熊树生, 楚书华等. 活塞式内燃机燃用沼气的研究. 太阳能学报, 2003, 24 (5): 688~692
- 15 夏来庆, 陈泽智等. 火花点火式沼气发动机高效燃烧的研究. 浙江大学学报 (自然科学版), 1997, 31 (3): 293~299
- 16 刘朗. 安徽省亳州市酒精厂沼气发电工程简介. 中国沼气, 1997, 15 (2): 36~37
- 17 陈泽智, 陈红岩等. 改善火花点火式沼气发动机性能的原理与实现方法. 农业机械学报, 1998, 29 (1): 15~18
- 18 陈泽智. 生物质沼气发电技术. 环境保护, 2000, 10: 41~42
- 19 夏来庆, 陈泽智等. 浅谈沼气发电技术及其应用. 农村电气化, 1996, 8: 20~21

- 20 朱玲玲, 陈秀莲等. 完善家用沼气炉具使用性能与提高热效率. 中国沼气, 2003, 21 (4): 39~40
- 21 王和雄, 孙传志. 一种新型独特的沼气发电机. 给水排水, 1999, 25 (9): 64
- 22 陈勇, 郑彪等. 沼气-柴油双燃料发动机发电机组防飞车装置的研制. 柴油机, 1998, 3: 15~18
- 23 刘乔明, 汤东等. 沼气发动机概述. 江苏大学学报 (自然科学版), 2003, 24 (1): 15
- 24 邱凌. 沼气灶具的最佳使用效果研究. 中国沼气, 1995, 13 (2): 20
- 25 梅翔, 王嘉立. 沼气燃烧工艺系统的设计. 中国沼气, 1995, 13 (2): 27
- 26 岳登贵, 刘惠萍等. PM 成型脱硫剂在沼气中的应用试验. 中国沼气, 1997, 15 (4): 34
- 27 任爱玲, 郭斌等. SW 型脱硫剂脱除沼气中 H_2S 的研究. 河北化工, 1998, 5: 59
- 28 田晓东, 强健等. 大中型沼气工程技术讲座 (五), 沼气的脱硫与工程运行管理. 可再生能源, 2003, 3: 58
- 29 何群彪, 戈成. 污泥厌氧消化中的沼气脱硫技术研究. 上海环境科学, 1995, 14 (7): 18
- 30 石磊, 赵由才等. 垃圾填埋沼气的收集、净化与利用综述. 中国沼气, 2004, 22 (1): 14
- 31 逢辰生. 美国高热值填埋沼气的加工处理. 北京节能, 1997, 1: 34
- 32 曾友为. 农村沼气脱硫剂使用中的热现象分析. 中国沼气, 2002, 20 (4): 41
- 33 李玉俊. 浅谈垃圾场沼气收集管网设计. 中国沼气, 2003, 21 (4): 25
- 34 彭爱华, 汪建华. 脱硫器在户用沼气中的应用. 农村能源, 1998, 5: 22
- 35 方士, 陈国喜等. 生物塔外曝气法去除沼气中 H_2S 的研究. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2000, 26 (1): 46~50
- 36 牛克胜, 孙严声. 沼气干法脱硫连续再生工艺综述. 中国沼气, 2003, 21 (1): 26~27
- 37 汪建华, 彭爱华. 沼气输配系统的合理配置. 中国沼气, 1998, 16 (3): 25
- 38 田晓东, 强健等. 大中型沼气工程技术讲座 (二), 工艺流程设计. 可再生能源, 2002, 6: 16
- 39 陈勇, 夏来庆等. 沼气燃料热化学分析及沼气发动机性能评价. 中国沼气, 1998, 16 (2): 8
- 40 田晓东, 强健等. 大中型沼气工程技术讲座 (四), 沼气工程的前处理与输配系统. 可再生能源, 2002, 3: 53
- 41 田晓东, 强健等. 大中型沼气工程技术讲座 (六), 吉林省大中型沼气工程实例. 可再生能源, 2003, 4: 57

第 8 章 以沼气技术为基础的生态 农产品技术经济评价

技术经济与经济建设关系非常紧密，它是科学决策的基础，使技术先进性和经济合理性融为一体。在现今经济建设中，要发展哪些新技术，淘汰哪些技术；要上哪些项目，如何上这些项目，都需要正确的决策。而正确的决策来源于正确的评价。沼气作为一项生态农业技术，在进行投资或者推广前，对其进行技术经济论证和可行性研究是必要的，也是科学的。

8.1 技术经济评价的基本理论

技术经济评价的基本理论主要有：资金的时间价值理论、边际产出和机会成本原理、技术方案的比较原理、市场供需预测原理、经济效果原理等。

8.1.1 资金的时间价值原理

当资金投入到社会再生产过程中后，在流通—生产—流通领域的循环中，由于劳动能创造价值，使资金在生产过程中产生利润，发生增值。即处于不同时间的资金，其价值也不相同。资金只有在运动过程中才能增值，静止的资金是不会产生增值的。资金本身并不能创造价值。资金的增值是资金在运动过程中同劳动者的生产活动相结合后，由劳动者创造的更多的价值。这种多创造的价值，反映在资金数量上就表现为资金增值，这是资金时间价值的本质。

资金时间价值的不同反映了资金运动过程中增值能力的不同，资金时间价值的大小通常用利息或者利率度量。所以当人们决定投资时，他至少希望所投入的资金可以获得与银行利息相当或更大的

收益，如果得不到宁可把钱存进银行。对于项目进行成本-效益评价分析时必须考虑时间价值，即利用货币时间价值这一参数把不同时间发生的项目成本和效益折算到同一基准年去计算，这样不可比较的不同时间发生的项目成本和效益便可以比较了，人们称这种时间价值参数为贴现率。

8.1.2 比较原理

技术经济学是一门选优的科学，在研究中，总是把不同的技术方案、技术措施进行比较来选优。“有比较才能鉴别”，或者说要推广一项技术必须通过比较，比其他技术先进才能决策。在技术经济分析的众多方法中，比较法是最基本的方法。进行方案比较时，常用的分析方法有成本效益分析法、边际效益分析法、货币时间价值分析法、承担费用分析法、综合评价分析法、价值工程分析法等。要进行方案的比较，必须有比较的基础。而进行方案比较的基础，就是看参选方案是否具有可比性，如果具有可比性，才可以进行比较，否则就不能进行直接比较，需要经过处理以后才能比较。技术经济分析的可比性主要表现在如下几方面。

8.1.2.1 满足需要的可比 满足需要的可比即参加比选的各方案都能不同程度地满足需要。例如不同运输方案进行比较时，参选备选的可行方案都应能同程度地满足运输量、运输距离以及时间上的要求。如果参与比较的各备选在满足需求方面出现程度不同的差异，则应当采取补救措施，使之变为可比，在计算技术方案的劳动消耗时，应当计入补偿措施的劳动消耗。

8.1.2.2 消耗费用的可比 由于各备选方案的技术特点不同，其消耗费用的特点也不同。一个技术方案的消耗费用通常用建设投资费用和年经营费用这两项综合指标来表示。只比较其中任何一项指标都不能正确反映技术方案的经济性，必须对反映建设和年经营费用的指标进行综合计算，才能区分不同技术方案的优劣。

8.1.2.3 价格的可比 价格可比有两方面的含义：一是参与比较的各方案应采用同一时间的价格指标，如果只能采用不同时间的价格指标时，则应当换算为可比价格指标；二是所使用的价格指标应

能真正反映商品的实际价值。价格是经济分析与评价的基础。现行价格的定价标准不一，有的是由产品的成本和利润定价，有的是由市场供求关系决定，有的是由国家或者部门根据各种政策制定。由于各种因素的影响，现行价格往往会与实际价值背离，这样如果用现行价格作不同方案计算时的价格标准，就不一定具备可比性。要满足价格上的可比条件，在现行价格与实际价值背离的情况下，就应在计算时对价格进行调整，采用影子价格、国际价格或者选用适当方法进行价格调整。

8.1.2.4 时间的可比 “一寸光阴一寸金”，时间就是效益。相同数量的产品、资金、资源，早生产或迟生产、早消耗或迟消耗、早占用或迟占用，其经济效果就不一样。早建成、早投产，就能早日发挥效益，为国家创造更多的财富；资金占用越早，占用时间越长，支付的利息就越多。生产年限长或短，其效益也不同。这就表明技术方案的经济效果除了有数量的概念之外，还具有时间的概念。因此时间因素的可比，也是技术方案比较具备的条件之一。时间可比，就是指方案的投入和产出的计算时间应当一致，计算基准年要相同，使用年限要相当，计算期要一致。例如要比较两台使用年限不同的同类型设备经济效益时，甲设备的使用年限是3年，乙设备的使用年限为2年，则应按使用年限的最小公倍数来确定计算期，也就是把6年作为计算各项经济指标的依据。

8.1.3 边际产出和机会成本原理

边际产出和机会成本都属于微观经济学的概念。边际产出可定义为：在其他生产要素投入量不变的条件下，每增加一个单位的某种生产要素所增加的产出。可用公式表示为

$$\text{边际产出} = \frac{\text{产出的增量}}{\text{某生产要素投入量的增加}}$$

该原理用于生产，可以使投资者很方便的确定自己的生产规模，即只要生产者的生产其边际产量所带来的收入等于增加单位产量所追加的成本时，生产者单位便可得到最大利润，而不要变动生产规模。

所谓机会成本，就是把一定资源在用于生产某种产品时所放弃的可能生产另一种产品的利益，或者说，机会成本是利用一定资源获得某种收益时放弃的另一种收益。机会成本概念的产生来源于这样一个现实：资源的稀缺性。资源的稀缺性决定了人类只有充分考虑了某种资源用于其他用途的潜在收益后，才能做出正确的决策，使用有限的资源得到有效的利用。

由此可见，机会成本并不是通常意义的成本，不是实际发生的支出，只是一种理论上的成本或观念上的成本，其作用在于寻求最佳利用资源的方案。因为在进行某项决策时，对若干方案比较选优，就是将准备放弃的方案可能取得的最佳效益看作所选定方案的机会成本。显然，当有限资源不能同时用于两个以上被选方案时，只有把失去的机会可能产生的收益也考虑进去，才能对备选方案最终取得的收益进行更为全面的技术经济分析，才能实现对有限资源的最佳利用和配置。机会成本是选择最佳方案的重要依据，在项目的经济评价中有着广泛的应用。

8.1.4 经济效果原理

人类所从事的任何社会活动都有一定的目的性，而且都可以获得一定的效果，这些效果称为该项活动的劳动成果。如各种物质产品、劳务等。物质生产领域的活动效果往往可以用一系列经济指标来定量表示，而非物质生产领域的活动效果一般很难用指标来定量表示。但是，取得一定的劳动成果必然要付出一定的代价，即必须投入一定数量的物化劳动和活劳动，付出的代价通常称为劳动消耗。

在技术经济分析中涉及的经济效果问题，主要是研究物质生产领域内各种活动的劳动成果与劳动消耗的关系。因此，经济效果可以表述为：人们在经济活动中的劳动成果与劳动消耗的比较。这里的劳动消耗包括生产过程中的直接劳动消耗、劳动占用、间接劳动消耗 3 部分。直接劳动消耗指技术方案在生产运行中所消耗的原材料、燃料、动力、生产设备等物化劳动消耗以及劳动力等活劳动消耗。劳动占用通常指技术为正常进行生产而长期占用的用货币表现

的厂房、设备、资金等，通常分为固定资金和流动资金两部分。间接劳动的消耗是指在技术方案实施过程中社会发生的消耗。

8.1.5 资源替代原理

8.1.5.1 资源替代的原则 资源在开发利用中，为提高经济效益，资源相互替代是经常发生的，甚至是不可避免的。例如美国通用电气公司的工程师麦尔斯对于公司急需的短缺材料石棉板用一种经过化学处理后而具备防火功能的纸板来代替，从而解决了资源问题。但是资源替代并非任意，而是遵循一定的原则。

(1) 资源替代的条件

功能相同、价格不同的资源可以相互替代。通常是廉价资源取代昂贵资源。

功能相同、种类不同的资源可以替代。如用机器替代人作农业生产动力。

种类相同、效用不同的资源可以替代。通常质优、效用高的资源替代质次、效用低的资源。如高品位优质燃料替代劣质燃料。

被置换的资源必须转移用于其他部门。如农村沼气化后，富余的秸秆应还田作肥料或者饲料等其他用途，继续发挥其效用，以同时取得资源替代和资源转移的经济效益。

(2) 资源替代的有限性 资源替代一般是渐进的，即所谓递减替代。例如煤炭资源从开发、利用到取代柴草资源，就是递减过程，农业生产中用机械替代人力作业，人工劳动逐渐减少。由于机器是人操纵的，作业工程也需要一定的辅助劳力，因此人工减少到一定程度后就不再减少了。这表明资源替代有时是有限度的。

资源替代合理与否的衡量标准，是替代前后经济效益是否提高。如果置换后资源的效益大于置换前的效益，则方案是可取的，反之，则不可取。

8.1.5.2 资源替代的边际分析 由于资源价格差异，不同的资源组合其经济效益是不同的。因此，研究、确定最佳资源组合，充分

发挥资源的效用具有重要的意义。

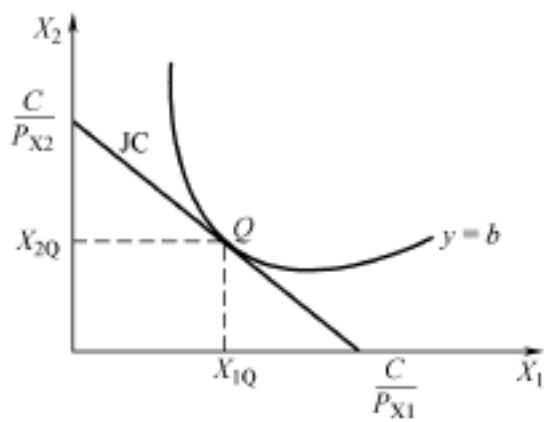


图 8-1 不同资源投入组合的等产量曲线
TC—总成本 (total cost)

图 8-1 示出了不同资源投入组合的等产量曲线 ($y = b$)。资源 X_1 和 X_2 可以相互替代。两者以不同的比例进行组合均可生产等量的产品。 ΔX_1 表示替入资源的增加量, ΔX_2 表示换出资源的减少量, 则 ΔX_1 与 ΔX_2 的比值就称为资源边际替代率。边际替代率, 即在等产量条件下, 两种资源投入的增

减比率。它表示替代资源 X_1 增加一个单位投入时换出资源 X_2 相应变化量。增加、减少资源的投入量, 资源的成本也将相应增减, 用公式表示为:

$$\Delta G_1 = \Delta X_1 \cdot P_{X1}$$

$$\Delta G_2 = \Delta X_2 \cdot P_{X2}$$

式中 ΔG_1 ——替入资源成本增量;
 ΔG_2 ——换出资源成本减量;
 P_{X1} ——资源 X_1 的单位价格;
 P_{X2} ——资源 X_2 的单位价格。

当资源成本增加量大于资源成本减少量时, 则替代总成本增加, 在产量 (收益) 一定条件下, 其纯收入将减少; 当资源成本增量小于资源成本增加时, 则总成本降低, 纯收益增加; 当资源成本增量等于资源成本减量时, 表示总成本已经降至最低, 纯收益达到最大。

$$\Delta X_1 \cdot P_{X1} = \Delta X_2 \cdot P_{X2}$$

则

$$\frac{\Delta X_2}{\Delta X_1} = \frac{P_{X1}}{P_{X2}}$$

上式表明, 相互替代资源的替换率等于其单价的反比时, 总成本最低, 资源替代效益最大。这就是通常所说的边际替代原理。

资源替代总成本 $C = X_1 P_{X1} + X_2 P_{X2}$ ，是以 X_1 轴上截距 ($= C/P_{X1}$, $X_2 = 0$ 时) 的点与 X_2 轴上截距 ($= C/P_{X2}$, $X_1 = 0$ 时) 的另一点的连线，见图 8-1。在此斜线上的任一点所表示的两种资源配合的总成本均相等，故被称为等成本线。等成本线与等产量曲线相切的切点 Q ，其斜率与边界替换率相等，是两种资源替代的最佳经济点，对应的 X_{1Q} 和 X_{2Q} 投入量即在该产出水平下成本最低的最佳资源组合。

8.2 经济效益评价方法

8.2.1 经济效益与经济效果

在前面提到了经济效果的概念，从经济效果的概念可以看出，经济效果实际上是人们从事经济活动的一种必然结果，这种结果可能符合社会需要，也可能不符合社会需要；而经济效益是指符合生产目的和社会需要，能够通过市场实现其价值和使用价值的劳动成果，即按照有用成果原则来衡量和评价的经济效果。所以，经济效果与经济效益是两个既有联系又有区别的不同概念，不应该将其等同起来加以混用。这里需要指出的是，在技术经济分析中，评价经济效果时必须遵循有用成果原则。在以后的分析中，都是按照有用成果原则来评价经济效果，所提到的经济效果概念与经济效益在内涵上可以等同。

8.2.2 经济效益的表示

经济效益是劳动成果与劳动消耗的比较，而这种比较可以用“比值法”和“差值法”两种方法表示。

8.2.2.1 比值表示法 比值表示法是以除法形式表示经济效果的一种方法，它的最大特点是以双计量单位表示，可用双计量单位的多种表示方法设计多种既带共性，又带特殊性的经济效益指标，这也是研究经济效益十分重要、必须掌握的基础知识，被广泛用于物质生产领域和非物质生产领域。它也有两种表示形式。

$$\text{经济效益} = \text{有用成果} / \text{劳动消耗}$$

$$\text{经济效益} = \text{劳动消耗} / \text{有用成果}$$

8.2.2.2 差值表示法 差值表示法是以减法形式表示经济效益的一种方法。它以绝对量形式表示，这种表示法最大的优点是简单、易算、一目了然，既可以用于生产领域，也可以用于流通、消费领域。这种方法有两种表达式。

(1) 经济效益 = 有用成果 - 劳动消耗 该表示方法量纲要求严格，不论是有用成果，还是劳动消耗，都必须以价值形式表示，否则就不可以进行减法计算。这属于一种正指标体系系列，差值越大越好。由于计算结果是以“利润”形式出现，所以应用很广，特别是商业、服务等行业。应该注意的是不能把利润额的大小视为经济效益的唯一表现。利润额的增加究竟是否反映经济效益的提高，还要看新增产出与新增投入的比较，如果新增投入大于新增产出，则效益是下降的。因此这种方法的应用是有局限性的，在现实经济评价中，还需要采取其他方法予以补充。

(2) 经济效益 = 劳动消耗 - 有用成果 该方法量纲要求同上，都是以价值形式表示。这属于一种反指标体系系列，差值负值越大越好，常用于表示“亏损”、“赤字”、“逆差”。

8.2.2.3 差值-比值表示法 这是一种用差值表示法和比值表示法相结合来表示经济效益大小的方法，表达式为：

$$\text{经济效益} = (\text{有用成果} - \text{劳动消耗}) / \text{总消耗}$$

$$\text{经济效益} = (\text{有用成果} - \text{劳动消耗}) / \text{总成果}$$

前者为单位消耗所得的利润额（如资金利润率）；后者为单位产出所得的利润（如产值利润），都属于正指标体系。

8.2.3 经济效益评价的指标体系

评价能源技术经济效果，需要计算生产中投入的劳动耗费与产出的有用效果的比例关系。为此必须设置若干能够表述技术经济效果内涵的数值指标，以便定量分析。由于社会生产和需要的复杂性，技术经济效益反映在不同范围、不同层次来计算和分析，才能正确地评价一个技术措施或方案的技术经济效果的大小。这就需要有一套科学的评价方法和指标体系。这个指标体系应由一些必需的相关、相互制约的指标所组成。有了这一套科学的全面的经济效益

指标和指标体系，不仅可以衡量技术方案经济效益的大小，并且可以洞察取得这些经济效益的物质技术要素和经济条件，发现反映实现技术方案投入和产出的成果之间的因果关系和函数关系。同时也可用其评价各种技术方案、技术措施、技术政策的取舍，并指出经济合理程度，为各层的技术经济决策提供定量分析结果和科学依据。

8.2.3.1 技术经济分析指标体系的设计原则 技术经济分析指标是用以反映项目经济效果的，因此技术经济分析指标体系也就是经济效果指标体系。经济效果问题涉及生产、建设、流通等各个领域，涉及工业、农业等国民经济各个部门，因此，要设计一个包罗万象的普遍适用的指标体系是十分困难的。但仍然可以从任何领域、任何部门的共同点出发来进行设计。因为任何经济活动都要消耗一定的资源，即都要有投入；而且任何经济活动都要求获得一定的劳动成果，即都要有产出，因此，可以根据这些共同特点来设计技术经济分析的指标体系。在设计经济效果的指标体系时必须遵循以下基本原则。

指标概念确切，符合科学性。这是一条最根本的原则。指标的设计同经济效益的科学概念相一致，含义确切，计算范围明确。

可比性。即所用数据要在数量、质量、价格、费用、时间等方面符合可比条件。

实用性，并便于操作。设计的指标与指标体系简明易懂，符合统计口径，符合数理逻辑，便于数学表达和数学计算。

通用性。所用指标除了适用于本部门、本地区的指标外，应设计符合国家评价考核要求的指标以及与国际上相适应的通用指标。

8.2.3.2 经济效益指标体系的构成 经济效益是有用成果与劳动消耗的比较。经济效益指标是由反映有用成果和劳动消耗的经济指标所组成。所以指标的性质，可归为 3 种类型。

(1) 反映劳动成果的指标 有用成果指标是经济指标，不一定

是反映经济效益的指标，但在计算经济效益又是不可少的，主要指标如下。

数量指标。是以实物形式表示的有用成果指标。如合格产品产量、销售量、工业总产值、净产值、销售收入、国民生产总值、利润总额、利税总额等。

产品品种指标。是衡量满足国民经济需要程度和技术水平的有用成果指标。如品种数量、新品种数量、新品种替代老品种数量和百分率。

质量指标。表明技术方案对社会需要在质量上的满足程度，如彩电开箱合格率、供电频率、优质品数量和优质品率、产品合格率等。另一些质量指标，如废品数量和废品率、返修率是反效益指标，数值越大，其经济效益越差，是从反面反映有用成果的指标。

时间指标。即从时间的角度反映方案经济效果的指标，如技术方案的建设周期、投产时间、达产时间、产品生产周期等。

其他指标。如劳动条件的改善、劳动环境质量的提高、重要设施的安全保障等方面的指标。

(2) 反映劳动消耗的指标 劳动消耗指标是经济指标，不一定是反映经济效益的指标，但在计算经济效益时也是不可少的。主要指标如下。

投资指标。是指建设项目或方案所需要的资金。如固定资产投资、流动资金、自由资金、借入资金等。

成本指标。产品成本是以价值（货币）形式表示的生产一定品种、一定数量的合格产品所消耗的物化劳动和活劳动费用之和。如车间成本、工厂成本、销售成本、经营成本、单位产品成本等。

(3) 反映经济效益的指标 经济效益指标是有用成果指标和劳动耗费指标相比较的指标，也是经济指标。由于反映劳动成果与劳动消耗对比关系的形式以及经济效益指标的作用不同，因此技术经济效益指标可以分为绝对经济效益和相对经济效益两类指标。

绝对经济效益指标。绝对经济效益指标是反映劳动成果与劳动耗费对比关系的指标，它主要说明技术方案本身经济效益的大小，是评价技术方案经济性的主要依据，也可用于不同方案的比较。绝对经济效益指标主要有净现值、内部收益率等动态指标，以及投资回收期、投资收益率等静态指标，在财务评价中计算的资金利润率、成本利润率等也属于绝对经济效益指标。

相对经济效益指标。相对经济效益指标主要是用以进行不同方案比较指标，即通过比较，说明不同方案的经济性的优劣，从中择优的经济效益指标。若备选方案的劳动成果相同（即收益相同），则相对经济效益即劳动耗费指标，只比较劳动消耗的大小就可以区分被选方案的优劣，如总费用、年费用、差额投资回收期等。若被选方案的劳动耗费相同，则相对经济效益指标为劳动成果指标，此时只需要比较备选方案的劳动成果大小就能判断方案的优劣，如产品产量、工业增加值等。

相对经济效益指标只能从一个方面反映技术方案的经济性，如费用指标只能反映技术方案劳动消耗的大小，收益指标只能反映技术方案劳动成果的大小等，不能据以判断技术方案本身是否经济可行，只能用于进行方案比较和方案选优。

8.2.4 经济效益评价的基本方法

经济效益的评价，按照是否考虑时间因素的影响，可以分为动态评价和静态评价；按照评价角度的不同，可以分为财务评价和国民经济评价。经济性的好坏是通过经济指标来反映的，这些经济指标按照是否考虑时间因素，可以分为动态经济评价指标和静态经济评价指标，这些指标还可以根据资金的回收速度或清偿速度、获利能力和资金使用效率 3 个方面分为时间性指标、价值性指标和比率性指标。

这里从静态和动态的不同角度，对经济效益评价方法作一介绍。

8.2.4.1 静态评价方法 静态评价不考虑资金的时间因素，计算方法比较简单。它常常用于投资方案的初选阶段，如投资项目的机

会研究和初步可行性研究阶段。静态评价方法计算投资回收期、投资收益率、追加投资回收期以及年计算费用等。

(1) 投资回收期 所谓投资回收期，是指投资回收的期限，是指以项目的净收益抵偿全部投资（包括固定资产投资和流动资产投资）所需要的时间，简记为 P_t 。通常所说的，该项目可以在某年以内回收，就是人们自觉使用投资回收期这一指标来评价项目。

投资回收期是考察项目在财务上的投资回收能力的主要静态评价指标。通常用年表示，一般是从建设年开始算起，若从投产年起算，应该予以注明。其表达式为：

$$\sum_{t=1}^{P_t} (CI - CO)_t = 0$$

式中 P_t ——投资回收期；
 t ——期数，一般为年份；
 CI ——现金流入量；
 CO ——现金流出量；
 $(CI - CO)_t$ ——第 t 年净现金流量。

投资回收期也可以根据现金流量表（全部投资）中累计净现金流量求得。

$$\text{投资回收期} = \text{累计净现金流量开始出现正值年份数} - 1 + \frac{\text{上年累计净现金流量的绝对值}}{\text{当年净现金流量}}$$

在财务评价中，将计算得到的投资回收期 P_t 与行业基准投资回收期 P_c 比较，当 $P_t \leq P_c$ 时，表明投资项目可以在规定的年限内通过年净收益收回，项目在经济上是可行的；反之则说明全部投资无法在规定的年限内收回，项目是不可行的。如果同一项目有多种方案，在其他条件相近的情况下，一般认为投资回收期最短的方案为最优方案。

投资回收期计算简单，所需原始数据较少，它反映初始投资得到补偿的速度，是衡量项目清偿能力的重要指标。用投资回收期来

取舍方案，实际上是以投资支出的回收快慢作为决策依据，从缩短资金占用周期、发挥资金的最大效益、加速扩大再生产的角度来说，在评价方案时采用投资回收期是必要的，它不仅在一定程度上反映项目的经济性，而且反映项目的风险大小。因为项目决策面临着未来很多不确定性因素，这种不确定性所带来的风险随着时间的延长而增加。为了减少风险，就必然希望投资回收期越短越好。但是投资回收期没有考虑投资回收以后的净收益情况，因此不能准确地反映项目的盈利程度；同时它也不能反映方案的净收益在时间上的分布差异。早期净收益多的方案，可以将回收的资金用于其他方面，从而获得较多的早期效益，在投资回收期相等的情况下，早期净收益多的方案显然优于净收益较少的方案，这一点从投资回收期指标中是反映不出来的。由此可见，静态投资回收期的应用是有局限性的，所以在应用的时候必须将该指标与其他指标联合使用。

当未来情况很难预料而投资者又特别关心资金的补偿时，回收期可以作为方案的辅助性指标。

(2) 投资收益率 投资收益率，也叫投资效果系数，是指项目达到设计生产能力后年均净收益与总投资的比值。计算公式如下：

$$E = \frac{NB}{I}$$

式中 I ——总投资，指固定资产投资 + 固定资产投资方向调节税 + 建设期利息 + 流动资金；

NB ——达产年净收益或年均净收益。

投资收益率是考察单位投资盈利能力的静态指标。它的经济含义是：每投资 1 元钱，项目投产后的一年正常年份所能赚得的净利润额。用投资收益率评价方案，也只有将实际方案的投资收益率 E 和标准投资收益率 E_A 相互比较，如果 $E \geq E_A$ ，则所评价的方案在经济上是可行的。

(3) 追加投资回收期 追加投资回收期也称差额投资回收期，是用多投资的方案得到的超额收益或节约的费用来回收超额投资的

期限，是用增量分析的方法进行方案比较的评价指标。

$$T = \frac{I_1 - I_2}{C_2 - C_1}$$

式中 I_1, I_2 ——分别为两个方案的投资额， $I_1 > I_2$ ；

C_1, C_2 ——分别为两个方案的年生产成本（包括年经费用和折旧额）， $C_1 < C_2$ 。

求得的追加投资回收期 T 应与基准投资回收期 T_A 作比较，如果：

$T < T_A$ ，投资大的方案为优；

$T > T_A$ ，投资小的方案为优；

$T = T_A$ ，两方案等价。

如果两方案的产出不同，其差额投资回收期可用两方案的单位产品投资差额与单位产品经营成本差额之比求得。

8.2.4.2 动态评价方法 动态评价方法是以资金的时间价值为基础的评价方法，考虑了资金的时间因素，比较符合资金的运动规律，使评价更加符合实际。这对投资者树立资金周转观念、利息观念、投入产出观念，合理利用建设资金，提高技术经济效果都具有十分重要的意义。

动态评价方法主要有净现值、内部收益率、动态投资回收期、效益成本比率、年度费用以及增额收益率等。

(1) 净现值 净现值是指按照某个设定的折现率，将项目计算期内各年净现金流量折现到建设初期的现值之和。它是考察项目在计算期内赢利能力的动态评价指标，简记 NPV，其表达式为：

$$NPV = \sum_{t=1}^n (CI - CO)_t (1 + i)^{-t}$$

以净现值判别方案是否应予以接受，可按照以下原则。

$NPV \geq 0$ ，说明方案在计算期内不仅达到设定的报酬水平，而且还有额外收益，方案可取。

$NPV < 0$ ，说明该技术方案达不到预期的获利能力，方案应当放弃。

净现值是衡量项目收益能力的指标，但它的大小与项目的投资

规模关系不密切。不同的投资量可以获得相同的净现值，而相同的投资量又可以得到不同的净现值。投资规模大的方案，可能有多一些的方案可供选择，但不一定是经济效益最好的方案。因为净现值指标不能反映方案资金的使用效率。对于资金有约束的方案，在评价时决策者需要同时考虑资金的使用效率，这时就需要使用另外的指标。为此，引入净现值率指标。

(2) 净现值率 净现值率 (NPVR)，又称为净现值指数，是指项目或方案的净现值与总投资现值的比值，反映单位投资现值所获得的收益。它主要用于资金有约束的方案的选择，反映资金的使用效率。其计算公式为：

$$NPVR = \frac{NPV}{I_P}$$

式中 I_P ——投资（包括固定资产投资和流动资金）的现值。

净现值率作为单个项目的评价指标时， $NPVR \geq 0$ 时，说明方案除满足设定的投资收益率外，还可以获得投资的超额收益，方案在经济上可行，否则不可取。多方案比较时，以大者为优。

(3) 内部收益率 内部收益率是使计算期内各年净现金流量现值之和为零时的折现率。内部收益率可由求解下式得出：

$$NPV = \sum_{t=1}^n (CI - CO)_t (1 + IRR)^{-t} = 0$$

式中 IRR ——内部收益率，简单地说，内部收益率就是 $NPV(IRR) = 0$ 。

由上面的公式可以看出，内部收益率与净现值的表达式基本相同，但是计算程序不同。 IRR 的计算是 n 次方程，计算比较复杂，可以借助计算机计算，如果手工计算，可以用试算法和线性内插法。

内部收益率求出后，应与基准收益率 i_0 比较，如果 $IRR \geq i_0$ ，说明方案可以达到基准折现率的获利水平，方案可以接受；否则方案不可取。多方案比较时，一般以内部收益率大者为优。

内部收益率，能反映项目自身的盈利能力，它是项目占用的尚

未回收资金的获利能力，而不是项目初期投资的获利能力。

(4) 益本比 益本比是指投资项目在寿命期内，收益的现值和费用的现值和之比。计算公式为

$$B/C = \frac{\text{净效益(现值或年值)}}{\text{净费用(现值或年值)}}$$

在单方案评价时，若 $B/C \geq 1$ 时，则必有 $NPV \geq 0$ ，项目可取，反之是不可取的。对于单个方案项目的评价 B/C 和 NPV 两个指标是一致的。但是，在多方案评价时， B/C 最大，不一定 NPV 最大，因而不一定是最有利的。

通常 B/C 用于独立方案的评价，不能用于互斥方案的比较和选择，也不能用于经济寿命有相当大差别的多方案选优。世界银行将 B/C 只用于投资成本相当小、经济费用和效益相当高的项目。在这种情况下，经济收益率可能是很高的，因此效益成本率也就更有意义。

(5) 动态投资回收期 动态投资回收期，是按照给定的基准贴现率，投资方案所有净收益的现值等于所有投资现值所需要的时间，其表达公式为：

$$\sum_{t=1}^T (CI - CO)(1 + io)^{-t} = 0$$

动态投资回收期的计算也可以采用列表算法，其使用公式为：

$$T = \text{累计净现金流量开始出现正值的年份数} - 1 + \frac{\text{上年累计净现金流量折现值的绝对值}}{\text{当年净现金流量折现值}}$$

动态投资回收期克服静态投资回收期未考虑资金时间价值的缺点。

8.3 不确定分析

项目的技术经济分析一般使用历史的统计数据或经验数据，对未来的状况、经济态势进行预测和判断，并且假定所采用的数据在

项目的整个寿命期内不变。但是在项目的整个寿命期内，由于影响方案技术经济效果的政治、经济形势、资源条件、技术发展等宏观或微观条件未来的变化带有不确定性，加上预测方法和工作条件的局限性，对项目评价中所采用的价格、投资、成本、产量等数据可能不完全正确，使得方案经济效果预测值与实际值可能有偏差，从而给投资者和经营者带来风险。为了预测项目所承担的风险程度，分析项目在财务上和经济上的可靠性，有必要作进一步的分析，这项工作就是不确定性分析。本节将讨论几种项目经济评价中常用的不确定性分析方法。

8.3.1 盈亏平衡分析

8.3.1.1 盈亏平衡分析的概念 盈亏平衡分析是通过盈亏平衡点分析项目成本与收益的平衡关系的一种方法。盈亏平衡分析(BEP)就是当建设项目的收入和支出达到平衡点时，所需最低生产水平点或销售水平点。其含义是最低必须生产多少产品或者最低必须有多少销售收入，才能使收支达到平衡。它主要是通过确定项目的产量盈亏平衡点，分析、预测产品产量（或生产能力利用率）对项目盈亏的影响。盈亏平衡点也可以用生产能力利用率、达到设计能力时的产品单价、销售收入等来表示。

盈亏平衡分析方法根据生产成本及销售收入与产量（销售量）之间是否有线性关系，又分为线性盈亏分析和非线性盈亏平衡分析。这里主要介绍线性盈亏平衡分析。

8.3.1.2 线性盈亏平衡分析

(1) 线性盈亏平衡分析的几个假定条件 进行线性盈亏平衡分析，除了应具备盈亏平衡分析共有的前提条件外，还应该满足以下假设条件。

生产单一产品。如果同时生产几种产品，换算成为单一产品计算。

生产量等于销售量，不存在产品滞销现象。

产量变化，销售单价不变，从而销售收入是销售量的线性函数。

产量变化，单位可变成本不变，从而总成本是产量的线性函数。

采用投产后某一正常生产年份的数据。

实际上上述条件不可能一成不变，因此将影响盈亏平衡分析结果的准确性。

(2) 线性盈亏平衡分析方法 线性盈亏平衡分析 (BEP) 点通常根据正常生产年份的产品产量或销售量、可变成本、固定成本、产品价格和销售税金及附加等数据求得。

盈亏平衡分析 (BEP) 点可以有多种表达，一般是从销售收入等于总成本费用即盈亏平衡方程式中导出的，即 $B = C$ ，其中：

$$B = PQ$$

$$C = C_f + C_v Q$$

当盈亏平衡时，则有：

$$PQ^* = C_f + C_v Q^*$$

$$Q^* = \frac{C_f}{P - C_v}$$

式中 B ——总的销售收入，元；

C ——总成本，元；

Q^* ——盈亏平衡点对应的产量；

C_f ——固定成本，元/吨；

C_v ——单位产品变动成本，元/吨；

P ——产品单价，元/吨。

盈亏平衡点可以用图解法和计算法确定。

图解法。图解法是通过绘制盈亏平衡图的方法来分析量、本、利的关系，找出盈亏平衡点。以产量 Q 为横坐标，总收入 B (或者总支出 C) 为纵坐标。

销售收入函数与总成本函数线图 8-2。

由图 8-2 可见，销售收入与总成本线交于盈亏平衡点 (BEP)，此时所对应的产量 Q^* 为盈亏平衡时的产量，即产量为 Q^* 时总收入等于总支出，利润为零。在 BEP 左边的阴影区域，总成本大

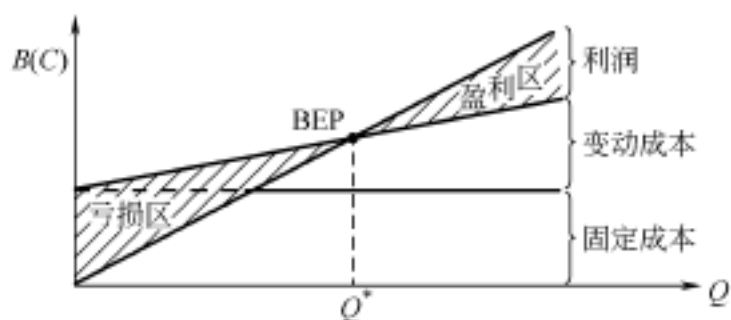


图 8-2 销售收入与总成本关系

于销售收入，为亏损区，两线之间的差额为亏损额。在 BEP 右边的阴影区域，销售收入大于总成本，为盈利区，两线之间的差额为盈利额。在分析中，根据点的位置和可能条件，可以采用降低成本、扩大销售等措施，尽量使平衡点下移，从而提高投资效益。

代数解析法。代数解析法是根据已知的数据，用代数方法进行盈亏平衡分析。除了用上面提到的以产量表示的盈亏平衡点，还有以销售收入、生产能力、已达到设计能力时的产品单价表示的盈亏平衡点。

$$\text{即} \quad \text{BEP (销售收入)} = P \times \frac{C_f}{P - C_v - T}$$

$$\text{BEP (生产能力利用率)} = \frac{Q^*}{Q_0} \times 100\%$$

$$\text{BEP (销售单价)} = P = \frac{C_f + C_v Q_0}{Q_0}$$

式中 Q_0 ——项目涉及生产能力，吨/年；

T ——单位产品税金，元/吨。

8.3.2 敏感性分析

敏感性分析是通过分析，预测项目主要因素发生变化时对经济评价指标的影响，并确定其影响程度。项目对某因素的敏感程度可以表示为该因素按一定比例变化时引起评价指标变动的幅度，也可以表示为评价指标达到临界点（如内部收益率等于基准收益率）时允许某个因素变化的最大幅度，即极限变化。

在项目计算期内可能发生变化的因素有产品产量（生产负荷）、产品价格、产品成本、或主要原材料与动力价格、固定资产投资、建设工期以及汇率等。敏感性分析通常是分析这些因素单独变化或多因素变化时对经济评价指标的影响。根据每次变动因素数目的不同，敏感性分析方法可以分为单因素敏感性分析和多因素敏感性分析。

敏感性分析方法不仅可以使决策者了解不确定性因素对项目评价指标的影响，从而提高决策的准确性；还可以启发决策者对那些较为敏感的因素进行定性分析研究，以提高预测的可靠性。

由此可见，在敏感性分析中，必须回答以下问题：一是当各种经济参数的估计误差在多大范围内仍然不影响在确定情况下的分析结果，即原来得出的结论仍然有效；二是研究这些经济参数变化与项目的经济效果变化之间的关系怎样，找出对方案经济性影响大的敏感方案。敏感性分析的一般步骤如下。

确定分析指标。在敏感性分析中，不可能也无需对所有经济指标都作敏感性分析，应该根据项目的实际情况选择主要指标进行分析。经常选用的有，投资回收期、净现值、内部收益率等，也可分析盈亏平衡点对某些因素的敏感度。

选择不确定因素。可以根据项目的特点，选择那些对投资效益指标影响较大或者数据资料可靠性不大的因素作为不确定性因素，例如，产（销）量、售价、固定资产和流动资产投资、固定成本和变动成本、建设期、项目寿命期、折现率和外汇汇率等。

计算敏感性强弱程度，找出敏感性因素。把选定的某个或者多个不确定性因素设定在其可能变动的范围内，将其他因素固定，重复计算各种不确定性因素的变化对经济指标影响的具体数值。然后采用敏感性分析计算表或者分析图的形式，把不确定性因素的变动与经济指标的对应数量关系反映出来。能使经济指标相对变化最大的或者分析图标中曲线斜率最大的因素，就是敏感性因素。

明确敏感性因素变化的最大极限值。敏感性因素对可能发

生最大变化的终极点称为最大极限值。与项目效益指标的临界值相对应的因素不利变化值为最大允许极限值。项目对不确定因素的敏感程度就可以用经济效益指标达到某些临界点，例如内部收益率等于基准收益率、净现值等于 0 时，得到某个不确定性因素变化的最大幅度，如果该不确定因素的变化超过了该极限，项目不可行；如果最大幅度在该极限内，则说明该项目风险不大。明确因素变化的最大极限值和最大允许极限值，可以找出较为敏感的因素，并及时采取必要的措施，防止和限制其超过最大预计现值，减少投资风险。

8.4 社会效益评价

8.4.1 社会效益评价的内容

项目的社会效益是指在国民经济评价中没有反映出来的效益，对现实社会发展目标所作的贡献以及影响。社会发展目标包括人口、生态环境、自然资源、科技进步、劳动就业、卫生保健、居民收入和消费、住房与生活服务、教育、文化生活以及社会保障等各方面。一般社会效益指标包括项目的技术进步效益、项目节约时间的效益、促进地区经济发展、促进各部门经济发展、促进国民经济发展等，有些指标可以定量计算，有些只能定性分析。

社会效益的评价指标可以分为定量效益指标和定性效果两大类指标。

用定量的价值形式表示的社会经济效益指标主要有收入分配效益、劳动就业效益、综合能耗、环境保护以及相关投资等。

用非定量的定性指标来表示的社会效益指标诸如先进技术的引进社会基础设施、环境保护、生态平衡、资源利用、地区开发和经济发展、城市建设的发展、人口结构和工业经济结构的改变以及人民科学文化水平的提高、产品功能质量、审美效果、政治、军事因素等。

8.4.2 社会效益评价的方法

项目社会效益评价的方法，主要有社会调查法、预测法、分析

评价法等。这里主要介绍分析评价法。项目的社会因素是很复杂的，很多是无形的，甚至是潜在的。有的社会因素可以采用一定的计算公式定量计算，有的社会因素难以采用一定的量纲、采用统一的计算式计算。因此各个国家的社会效益评价方法是很不一样的，有的以定量为主，有的以定性为主，也有的是定量和定性相结合。

我国的社会效益评价采用定量和定性分析相结合，参数评价与经验判断相结合的方法，能定量的尽量定量，不能定量的指标则用定性分析。

8.4.2.1 定量分析方法 定量分析一般要有统一的量纲，一定的计算公式与判别标准（参数）通过数量演算反映评价结果。一般来说，用具体数据说话，看起来比较直观，比较科学。但是对于项目的社会效益评价来说，大量的、复杂的社会因素都要进行定量计算，难度很大。在这种情况下，往往需要通过某些假设、权重以及各种参数等方法达到定量分析的目的。

我国的社会效益评价采用定量分析和定性分析相结合，参数评价和经验判断相结合的方法，能定量的尽量定量，不能定量的指标则定性分析。在社会效益评价中，定量指标常常选用以下几个方面。

(1) 就业效益指标 就业效益指标是指项目单位投资所能提供的就业机会，就业人数越多，则就业效益越大，社会效益越大。就业效益指标可按单位投资就业人数计算。

$$\text{单位投资就业人数} = \frac{\text{项目新增的就业人数 (人)}}{\text{项目投资 (万元)}}$$

项目新增就业人数包括直接就业人数和间接就业人数。

$$\text{直接就业人数} = \frac{\text{本项目新增的就业人数 (人)}}{\text{本项目直接投资 (万元)}}$$

$$\text{间接就业人数} = \frac{\text{相关项目新增就业人数 (人)}}{\text{相关项目投资 (万元)}}$$

上式中本项目新增就业人数一般是指项目投入生产经营后正常

生产年份新增的固定就业人数，不包括项目建设期增加的临时就业人数。如果项目投入生产经营后，主要是解决临时就业问题，例如林业项目，其临时就业人数可按劳动部门的有关标准折算为固定就业人数计算。相关项目新增就业人数一般是指项目直接相关的配套项目，如铁路专用线，港口以及其他公共服务设施等未列入本项目投资的工程增加的就业人数。计算时应注意新增就业人数与投资的计算口径一致。

由于项目创造就业机会，往往与项目采用的技术和经济效益密切相关。劳动密集型企业与资金密集型企业，就业效益相差很大。前者创造就业机会多，后者增加就业人数少但是技术经济效益高。行业不同，产品不同，单位投资创造的就业机会也会相差悬殊。因此，在评价就业效益指标时，应根据项目的行业特点，分析企业属于劳动密集型或者资金、技术密集型企业；并结合地区劳动就业情况进行具体分析。一般来说，从社会就业角度考虑，在待业率高的地区，特别是经济效益相同的情况下，就业效益大的项目应该为优先项目。如果当地劳动力紧张，或拟建项目属于高新技术产业，就业效益指标的权重就应当减小，可以作为次要的或者仅供参考的评价指标。

(2) 收入分配效益指标 从国家宏观经济层次分析来看，收入分配指标分析是社会在一定时期内创造的价值，即国民收入在社会集团或者社会成员之间的分配效益分析。从项目的微观层次分析看，收入分配分析是指项目净收益对社区居民的收入分配效果。收入分配效果指标是检验项目收益分配在国家、地方、企业、职工之间的分配比例是否合理。一般用以下指标表示：

国家收益比重 = $(\text{项目上交国家的税金} \div \text{项目总收益}) \times 100\%$

地方收益比重 = $(\text{项目上交地方的税金} \div \text{项目总收益}) \times 100\%$

企业收益比重 = $(\text{企业收益} \div \text{项目总收益}) \times 100\%$

职工收益比重 = $(\text{职工收益} \div \text{项目总收益}) \times 100\%$

这里的企业收益指企业纳税后收益。

(3) 节约自然资源指标 自然资源指国家的土地、水资源、矿

产资源、生物资源、海洋资源等直接从自然界获得的物质与能量。自然资源是投资项目最重要的物质来源。例如，固定资产投资项目一般要占用国家的土地（包括耕地）、耗用水资源；以矿产为原料的项目还要耗用各种矿产资源，渔业项目要耗用海洋资源等。

一般项目涉及何种资源就要分析评价何种资源。如工业项目以分析评价节约能源，节约水资源、节约耕地等；水库建设要分析评价节约土地、少占耕地等；学校、医院等建设也要分析评价节约耕地的指标等。

对于节约能源、节约耕地、节约水资源一般可采用以下公式计算。

节能指标——项目的综合能耗。

项目的综合能耗是指项目在正常生产年度内每生产 1 单位净产值所消耗的能源。

项目的综合能耗 = 项目的年综合能耗 ÷ 项目的净产值

综合能耗的评价标准是：项目的综合能耗 ≤ 行业规定定额。

占用耕地指标——单位占用耕地。

单位投资占用耕地 = 项目占用耕地面积（亩）÷ 项目总投资（万元）

单位投资占用耕地指标根据同类项目的经验予以评定。

节约水资源指标——单位产品耗水量。

单位产品耗水量 = 项目年生产耗水量 ÷ 主要产品生产量

单位产品耗水量有主管部门按行业规定的定额考核。

8.4.2.2 定性分析方法 定性分析方法是采用文字描述来说明事物性质的分析方法。定性分析在可能的情况下，应尽量采用直接或者间接的数据，以便更准确的说明问题的性质或结论。如项目对环境的影响，可以用项目建成前后的水质指标的变化来表示项目对环境的影响。

定性分析方法和定量分析方法一样，必须确定其分析评价的基准线，也就是必须有一个衡量的标准。在进行“有项目”和“无项目”的对比分析时也要在可比的基础上进行，还要制定定性分析的

调查提纲，并要在衡量其影响重要程度的基础上，对各种指标进行权重排序，以方便综合分析评价。

8.4.3 社会效益和经济效益的关系

社会效益是指经济活动对于人口素质、伦理道德、生活质量、社会安全等方面带来的后果。经济效益是可以进行定量计算其价值量大小的经济活动后果，而社会效益一般难以定量计算。由于二者在很大程度上缺乏可比性，因此，经济效益与社会效益关系的处理非常复杂。

技术方案实施所产生的效益是综合性的，所以经济效益是衡量方案优劣的重要指标但不是唯一指标。因此，对方案进行评价时，既要考虑其经济效益，也要考虑社会效益。如果方案的经济效益和社会效益是一致的，那么方案的优劣很容易判断。如果两者不一致，情况就比较复杂。如技术方案的经济效益好，但是社会效益不好，即技术方案的实施可以带来财富的增加，但是对于人口素质的提高、生活状况的改善、社会秩序的稳定等有一定的副作用。或者是方案的经济效益不好，但是社会效益好，对于这种情况，从微观经济的角度是不予考虑的，在方案选择中也将被淘汰。但是，随着经济的不断增长，将越来越明显地呈现出社会效益高于经济效益的趋势，这种趋势也将影响着方案选择。因此，在处理经济效益和社会效益的关系时，既要做到经济上有利，又要对社会有益，如果二者出现矛盾，从当前来看，应当在尽量不危害社会的前提下，依据经济效益精心评价；从长远看，则应在尽可能提高经济效益的同时，以社会效益的好坏决定取舍。

8.5 技术经济可行性分析方法

工程项目投资决策前，对项目建设的必要性、可能性、合理性所进行的调研、分析、比较、择优和技术经济论证的全过程即可行性研究。项目实施的成功与否，关键在于投资决策是否正确，这就要求在投资项目确立之前对其实施的可行性以及潜在的效益进行全面的分析、论证和评价，即进行投资项目的可行性研究。它属于项

目设计和建设的前期工作，注重投资经济效益的研究，一般要回答：技术上是否先进、适用，经济上是否合理、有利，建设上是否可行等问题，并选优、推荐最佳方案，提交决策。

8.5.1 可行性研究阶段及内容

8.5.1.1 可行性研究阶段 可行性研究主要用于投资项目的决策，在项目确立之前，首先分析项目在技术上、经济上、财务上和其他方面的可行性，综合全面的论证项目的技术经济效果，从而保证投资的合理性和可行性，防止错误决策。

一般来说，完整项目的可行性研究包括 3 个阶段：机会研究阶段、初步可行性研究、详细可行性研究（又称可行性研究）、评价和决策。

机会研究是鉴别可能发展成投资项目的工业机会，寻求投资应用于那些优先发展的部门或机会，进行合理的投资导向。在我国，应根据国民经济发展的长远规划和行业地区规划、经济建设方针、建设任务和技术经济决策，在一个确定的地区或部门内，结合资源情况，市场预测和建设布局等条件，寻找有利的投资机会，选择投资方向。其对建设投资和生产成本的估算精度要求 $\pm 30\%$ 左右；所需时间为 1 ~ 3 个月；所需费用约占投资总额的 0.2% ~ 1%。

初步可行性研究的内容和结构与详细可行性研究基本相同，主要区别在于所得资料的详尽程度不同，研究的深度不同。对建设投资和生产成本的估算精度要求 $\pm 20\%$ 左右；所需时间大约为 3 ~ 5 个月，所需费用约占投资总额的 0.25% ~ 1.25%。如果项目的机会研究着眼于投资可能性时，初步可行性研究是必不可少的，而如果机会研究具有足以进入可行性研究阶段时，有时也可以越过初步可行性研究阶段。

详细可行性研究简称可行性研究。这个阶段的工作是建设项目投资决策的基础，为项目决策提供技术、经济、社会和商业方面的评价依据，因此是投资前最重要的研究工作。需要对项目进行深入的技术、经济和市场销售上的论证。在这一阶段对投资和生

产费用的估计要求精确度为 $\pm 10\%$ 以内；小项目研究工作需要花费的时间大约是 0.5~1 年左右，大项目约 1~2 年左右；小项目所需费用约占总费用的 $1\% \sim 3\%$ ，大型或者复杂的项目约占总费用的 $0.8\% \sim 1\%$ 。

8.5.1.2 可行性研究的内容 我国社会主义经济是公有制基础上的社会主义市场经济，实行国家宏观调控与市场调节相结合的经济体制和运行机制。根据这一特色和我国的国情，进行可行性研究时必须以党和国家关于发展经济建设的各项方针政策为指导，以国民经济发展规划为依据，以市场需求为前提，以经济效益为核心，对建设项目进行全面地分析和论证。可行性研究的具体内容因项目的性质、规模、用途不同而有所差别，有所侧重，但基本内容大体相同。一般包括以下几方面的内容。

项目背景。说明建设项目的目的、历史背景，国家有关方针、政策，投资的必要性和经济意义等。

市场分析。通过调查研究，了解市场的现状；通过市场预测，把握市场的发展趋势；以便为编制产品大纲提供可靠依据。市场调查的主要内容有：市场范围、产品种类、规格、数量和价格，市场需求影响因素等。

设计规模。根据市场需求分析和产品大纲，确定合理的生产规模以及发展远景，使产品适销对路。

建设条件。根据产品大纲和生产规模，确定对原材料、燃料、电力、零配件等物料条件和外协条件的要求，研究其经济性和供应的可能性。根据落实情况进行反馈，必要时应调整，使之与可能的物质条件相适应，防止因原料、能源供应不足，导致企业开工不足，从而造成长期的经济损失。

厂址选择。厂址选择对企业的成败与发展有重大的影响。应根据设计规模、生产需要、环保要求等选择环境条件适宜、资源较丰富、地理位置适中、交通方便的厂址。以利于就近利用物料、能源、劳力，缩短工期，节约基本建设投资，早投产、早收益，并可以节省运费，降低成本，提高经济效益。

技术选择。根据建设条件 and 设计规模等进行技术选择。确定工艺流程、技术水平以及设备选型，并进行反馈。必要时还应对产品大纲、生产能力、建设条件等做相应的修正与调整，使之更加协调与匹配。

总体设计。根据上述选择进行总体设计，通盘考虑生产、生活以及管理的需要，确定合理的配置方案。

企业组织与管理。根据生产与经营的需要，确定生产管理组织机构；设定岗位，定编人员。

投资估算。根据上述选择结果，进行投资、成本估算，确定资金来源。

经济评价。对项目的经济效益进行计算、分析，从企业财务和国民经济方面进行评价。

1 综合分析评价。从技术、经济、社会、政治等方面综合评价项目的可行性。

8.5.1.3 可行性研究报告格式 可行性研究的最后成果是编制成一份可行性研究报告作为正式文件。这份文件既是报审决策的依据，也是向银行贷款的依据，同时，也是向政府主管部门申请营业执照和有关部门或单位合作谈判、签订协议的依据。因此，可行性报告应有一定的格式，具体如下。

总论

- a. 项目提出的背景，投资的必要性和经济意义。
- b. 研究工作的依据范围。

市场需求和拟建规模。

原材料、能源以及公用设施情况。

工艺技术和设备的选择。

厂址选择。

环境保护。

企业组织、劳动定员和人员培训。

项目实施进度的建议。

投资费用、产品成本与资金筹措。

工程项目财务评价。

1 工程项目国民经济评价。

2 结论与建议。

综上所述，可行性研究的内容是全面的，不仅仅是对项目进行经济性评价，而且是项目可行性研究的中心内容。经济性评价包括国民经济评价和企业财务评价，下面对企业财务评价和国民经济评价作一简单介绍。

8.5.2 企业财务评价和国民经济评价

关于经济性评价的指标和如何做好经济评价，已经在本章第二节作了阐述。企业财务评价和国民经济评价都是运用这些经济指标来评价项目的经济性的，只是两者评价的角度不同。

企业财务评价是站在企业的立场上，考察、衡量投资项目的盈利程度、市场竞争能力、抗风险能力，以确定其财务可行性；它是从企业角度出发，从微观方面分析评价项目的经济效益，以确定其经济合理性。

国民经济评价是站在国家立场上，从国民经济整体角度考察项目建设需要国家付出的代价及对国民经济发展、社会发展的贡献程度，以确定项目的宏观可行性及合理性；它力求最有效的利用社会资源，满足人民的物质和文化需要，促进国民经济的全面发展。

8.5.2.1 企业财务评价的主要内容 企业财务评价要考察项目的货币收支情况、盈利亏损状况和借款偿还能力，以及互不确定状态条件下的企业财务效果，主要分析方面有：盈利能力分析、清偿能力分析、外汇效果分析、不确定性分析和其他财务效果分析。

(1) 盈利能力分析 盈利能力分析包括财务现金流量分析和利润分析。

财务现金流量分析是从企业财务角度出发，分析项目计算期内现金流入和现金流出状况，并进行相应指标计算。财务现金流量分析一般包括全部投资财务现金净流量分析和自有资金财务现金流量分析。全部投资财务现金流量分析不考虑投资来源方式，分析全部

投资的财务效果；自有资金财务现金流量分析以项目投资中企业自有资金为计算基础，将国内外借款本息按计划归还方式作为项目现金流出，评价企业自有资金投资的财务效果。

财务现金流量分析的主要计算指标有：财务内部收益率 FIRR、财务净现值 FNPV、静态投资回收期 T。这些指标的计算以项目财务现金流量分析为基础，按本章第二节的方法进行。进行财务分析时，财务现金量按照项目计划实施后的预计财务货币收支为基础确定，计算 FNPV 指标时采用基准折现率，计算出的 FIRR 指标也以基准折现率为评价基准值。进行财务现金流量分析需要编制财务现金流量表，包括以全部投资为分析基础的全部投资现金流量表和以自有资金为分析基础的自有资金现金流量表。

利润分析又称益损分析，是从企业财务角度出发，考察项目计算其各年的益损、税金、税后利润分配等状况，以及项目的财务投资效果。益损分析一般配合项目益损表进行，项目益损表主要反映项目各期收益、成本、销售税金、利润总额、所得税和税后利润分配等数据，相应计算指标包括投资利润率、投资利税率和资本金利润率等。

(2) 清偿能力分析 清偿能力分析是从项目的具体财务条件和国家有关财政规定处罚，分析项目计算期内各年的财务状态，考察项目的偿债能力，包括清偿固定资产投资借款的能力和偿付流动资产的能力。

在考察固定资产投资借款偿还能力时，还款方式将影响各年的还款额和还款期限。常见的还款方式有：等额偿还法、等额本金法、等额利息法、一次偿付法、尽早偿还法。根据国际惯例，借贷双方在借款合同上要明确规定借款偿还的方式和期限。

对于项目偿付流动债务的能力，计算指标有：流动比率和速动比率。

流动比率，反映项目各年偿付流动债务的能力，计算公式为：

$$\text{流动比率} = \frac{\text{流动资产总额}}{\text{流动负债总额}} \times 100\%$$

速动比率，反映项目快速偿付债务的能力，指标计算为：

$$\text{速动比率} = \frac{\text{流动资产总额} - \text{存货}}{\text{流动债务总额}} \times 100\%$$

流动比率和速动比率可以根据资产负债表计算。

清偿能力分析一般配合报表有：资金来源与运用表、资产负债表及还本付息计算表。

(3) 财务外汇分析 财务外汇分析包括外汇平衡分析和外汇效果分析。

财务外汇平衡分析配合外汇平衡表进行，用以考察项目各年的外汇余缺，对外汇短缺的项目，要提出解决办法。

财务外汇效果分析是对有产品出口创汇的项目，计算分析项目计算期内财务外汇流动状况。计算的评价指标一般有：财务外汇净现值、财务换汇成本。财务外汇净现值是以一定折现率计算的项目计算期内财务外汇流量对零期的时值，它反映项目实际用汇或创汇情况。财务换汇成本表明换取单位外汇现值发生的财务国内投入的现值，是取得外汇的人民币成本。

(4) 不确定性分析 在进行了以上诸方面的确定性分析后，还应对项目进行不确定性分析，包括平衡点分析、概率分析和敏感性分析。不确定性分析一般只在财务评价中进行，国民经济评价中有时也进行概率分析和敏感性分析。

(5) 其他效果分析 其他效果分析考察项目实施除了上述效果外，对企业财务的效果，可以根据项目实际情况对其他财务效果进行定性描述。

8.5.2.2 国民经济评价的主要内容 项目国民经济评价的主要内容包括：经济盈利能力分析、经济外汇效果分析、其他国民经济效果分析。

(1) 经济盈利能力分析 经济盈利能力分析是从国家整体角度出发，分析项目在计算期内各年的国民经济效益和费用，并计算相应的经济效果指标，进行项目的国民经济评价。

项目经济盈利能力分析一般包括全部投资经济效益分析和国内

投资经济效益费用分析。全部投资经济效益费用分析不考虑投资来源国别，以全部投资作为计算基础，评价全部投资的经济效果；国内投资经济效益费用分析则考虑了投资来源国别，以国内投资作为计算基础，将国外借款的本息偿还作为费用支出，计算国内投资的经济效果。

经济盈利能力分析的主要评价指标是经济内部收益率 EIRR、经济净现值 ENPV、经济净现值率 ENPVR。在项目初选时也可以选用投资净收益等静态指标。在项目经济现金流量确定后，各指标的计算按第二节的方法计算。

(2) 经济外汇效果分析 涉及产品出口创汇以及替代进出口节汇的项目要进行外汇效果分析，分析项目计算期内外汇流入和流出，并计算相应的评价指标。

经济外汇效果分析的评价指标有：经济外汇净现值、经济换汇成本、经济节汇成本。

经济外汇净现值是按国民经济评价重效益、费用的划分原则，采用影子价格、影子工资和社会折现率计算、分析、评价项目实施后对国家外汇收支影响的重要指标，用以衡量项目对国家外汇的真实净贡献（创汇）或消耗（用汇）。

经济换汇成本是分析、评价项目实施后在国际市场上的竞争能力，进而判断项目产品是否应该出口的指标，它的评价标准是：经济换汇成本 $\leq$ 影子汇率，表明项目产品国际竞争力强（以较少的国内投入取得外汇），易于出口。

经济节汇成本是对有产品替代进口节汇的项目计算的外汇效果评价指标，目的是判断项目的产品是否适于替代进口，其评价标准是经济节汇成本 $\leq$ 影子汇率，表明项目产品替代进口时经济合理的，宜于采用，否则是不经济的，不宜采用。

(3) 社会效果分析 除以上经济分析外，项目的国民经济评价往往还需要分析项目实施后可能对国家和社会产生的效果，一般是难以量化的经济效果和非经济效果。其他效果分析可以结合项目的具体情况，对就业、政治、国防、技术进步、环境保护和其他社会

经济效果进行定性分析，有时也可以采用一些实物指标或价值指标予以说明。

总的说来，社会效果的评价指标可以分为定量效果指标和定性效果指标两大类。

用定量的价值形式表示的社会经济效果指标主要有收入分配效果、劳动就业效果、综合能耗、环境保护以及相关的投资等。

用非定量化的定性指标来表示的社会效果指标诸如先进技术的引进，社会基础设施、环境保护、生态平衡、资源利用、地区开发和经济发展、城市建设的发展、人口结构和工业经济结构的改变以及人民科学文化水平的提高、产品功能质量、审美效果、政治、军事因素等。

除了对以上这些定量和定性指标作分析外，还要针对项目的不同性质特点、不同情况和实际要求，有重点地进行定量和定性分析评价。

8.5.2.3 财务评价和国民经济评价的区别 项目的国民经济评价与财务评价有以下几点重要区别。

评价的目标不同。财务评价主要是考察项目的企业财务盈利程度；而国民经济评价主要是考察项目对国民经济发展的贡献程度。

对项目的投入产出计算角度和范围不同。财务评价是从企业角度出发，在其经济核算范围内，对项目进行计算分析；经济评价则从国家角度出发，其计算范围较广，超越了一个企业的范围。

计算的效益不同。财务评价通常只计算和分析项目的直接经济效益，即项目的内部效益；而国民经济评价还应计算项目的间接（或相关）经济效益，即项目的外部效果。

价格标准不同。财务评价考察的是企业的盈利性，受企业经济核算调价和国家价格体系的限制，只能以国家的现行价格来计算项目的投入与产出；而国民经济评价所考察的是社会效益，因此只能按影子价格（计算价格）进行计算分析。

财务评价和国民经济评价尽管有很多区别，但两者关系十分密

切。企业财务评价是国民经济评价的基础和前提；国民经济评价是对企业经济评价的补充和发展。一般情况下，它们是统一的，但有时也会出现矛盾。当两种评价的结论相互矛盾时，应以国民经济评价结论来决定项目的取舍，并在可能的情况下尽量兼顾企业的局部利益。

8.5.3 可行性研究的作用

可行性研究是建设项目的工作的起点，又是投资决策、工程设计等一系列工作的基础和依据，它的主要作用如下。

作为确定建设项目的依据。可行性研究报告是主管部门审查建设项目、做出投资决策的主要依据。

作为编制设计任务书的依据。

作为筹措资金、申请贷款的依据。

作为与有关单位谈判签约的依据。

作为工程设计、设备研制、订货，施工设备的依据。

作为企业组织管理、劳动定员、职工培训等工作安排的依据。

由上可见，可行性研究是项目投资前期的主要工作内容。它为投资决策提供科学依据，可以合理确定投资方向，提高投资的经济效益，在经济建设中具有重要意义。我国已将可行性研究列入基建程序，肯定了它在基本建设中的地位和作用。

8.6 案例分析——沼气成本及效益分析

沼气利用具有经济、社会、生态等多方面的效益。其中，有的可用货币价值度量，有的难以货币化；有的可以定量化，有的则难以定量化。此外，沼气效益的大小还与综合利用程度的高低密切相关。沼气用作炊事燃料与沼气用作动力燃料，沼液、沼渣用于肥田与沼液用于养鱼、沼渣用于培养食用菌，其产出效益显然不同。一般是综合利用程度越高，效益越显著，项目评价越复杂。这里仅以沼气用于炊事、沼液沼渣用于肥田的简单利用模式为例，说明用成本-效益现值分析法来评价南部县农村家用 8 米³ 沼气池直接经济效

益的方法。

(1) 投入的生产费用

建池费用。包括材料（水泥、砂石、钢材、涂料），用工费（技工、小工劳动报酬和招待费等）和配套装置费（灶具、灯具、压力计、管道等），可根据用量和单价进行计算。坚持费用因地制宜，现取为 1200 元，其中材料费用 830 元，占 69.17%；劳工费用 200 元，占 16.67%；设备费 150 元，占 12.5%；其他不可预见费 20 元，占 1.67%。

投料费。发酵原料为粪料，产气率较高且进出料省工。投料费可按农户人畜年产粪量和单价计算。由于粪料尚无确定价格不便计算，近似地视为与产出的沼肥的效益相当，均忽略不计。

管理费用。包括大出料用工（按每年一次）和维修（每两年一次）工费，平均每年 100 元。

维修费。这里的维修费用是指维修材料、零件费用，平均每年 25 元。

、 两项组成沼气池运行成本，每年 125 元。其中用工费占 80%。

(2) 产出效益

沼气。为简化计算，假设沼气池在年初建成，池容产气率 $0.25 \text{ 米}^3 / (\text{米}^3 \cdot \text{天})$ ，年产沼气 730 米^3 ，且各年的产气量相等。产出的价值以与它等量用能的农家燃料的费用替代，按下式计算：

沼气的价值 = (沼气的热值 × 沼气灶热效率) ÷ (被替代燃料的热值 × 炉灶热效率) × 替代燃料的价格

沼气的热值为 20935 千焦/米^3 ，沼气灶热效率 60%，薪柴热值为 14236 千焦/米^3 ，柴灶热效率 25%，柴价 0.12 元。则：

$$\begin{aligned}\text{沼气价值} &= (20935 \times 0.6) \div (14236 \times 0.25) \times 0.12 \\ &= 0.423 \text{ 元/米}^3\end{aligned}$$

$$\text{年效益为 } 730 \times 0.423 = 308.79 \text{ 元}$$

沼肥。评价沼肥肥效价值，关键是要了解投入沼气池发酵的有机物主要养分（氮、磷等）的保存率及传统堆沤制造肥方法中

主要养分的保存率。据资料显示，人畜粪便的投入沼气发酵全氮保存率为 114%，氨态氮增加 20% 以上，磷、钾等养分没有明显损失。据某农业技术手册提供的资料，沼气发酵全氮保存率比敞口池沤肥保存率 68% 增加 46 个百分点，敞口池沤肥中磷、钾保存率仅为 63.36% 和 66.67%。据此推算，每口沼气池每年所产沼肥与敞口池堆肥相比可增值 200 元左右。

由此可见沼肥用于肥田，其数量和肥效均比直接施用粪肥高，具有增产的效果。其产出效益实际大于投料费用。为简化计算，近似视为与投料费相等，两相抵消。

沼气池的成本和效益。如表 8-1 所示（沼气池使用寿命 15 年，投资机会成本 10%）。据表 8-1 数据计算可知：累计成本现值 = 2150.75 元；累计效益现值 = 2348.73 元；益本比 = 1.09；投资回收期 = $12 - 1 + \left| -20.14 \right| \div 58.62 = 11.34$ 年；净现值 = 184.29 元；内部收益率 IRR = 11.6%。

表 8-1 沼气池的成本和效益 元

时间 / 年	折现因子(投资机会成本)							累计净效 益现值 (8)
	成本 (1)	效 益 (2)	净效益(3) = (2) - (1)	$(1 + i)^{-n}$ (4)	成本现值 (5) = (1) × (4)	效益现值 (6) = (2) × (4)	净效益现值 (7) = (3) × (4)	
0	1200	0	- 1200	1	1200	0	- 1200	- 1200
1	125	309	184	0.9091	113.6375	280.9119	167.2744	- 1047.94
2	125	309	184	0.8264	103.3	255.3576	152.0576	- 895.885
3	125	309	184	0.7513	93.9125	232.1517	138.2392	- 757.646
4	125	309	184	0.683	85.375	211.047	125.672	- 631.974
5	125	309	184	0.6209	77.6125	191.8581	114.2456	- 517.728
6	125	309	184	0.5645	70.5625	174.4305	103.868	- 413.86
7	125	309	184	0.5132	64.15	158.5788	94.4288	- 319.431
8	125	309	184	0.4665	58.3125	144.1485	85.836	- 233.595
9	125	309	184	0.4241	53.0125	131.0469	78.0344	- 155.561
10	125	309	184	0.3855	48.1875	119.1195	70.932	- 84.6288
11	125	309	184	0.3505	43.8125	108.3045	64.492	- 20.1368
12	125	309	184	0.3186	39.825	98.4474	58.6224	38.4856
13	125	309	184	0.2897	36.2125	89.5173	53.3048	91.7904
14	125	309	184	0.2633	32.9125	81.3597	48.4472	140.2376
15	125	309	184	0.2394	29.925	73.9746	44.0496	184.2872

(3) 敏感性分析 从沼气池成本效益分析中可知，用工费和材料费在成本中占的比例较大。其中劳动力价格和砂石、水泥价格是主要变动因素。而沼气的产气率和替代燃料（薪柴）价格则是影响产出效益的主要因素。因此，在敏感性分析（表 8-2、表 8-3）中，劳动力价格、材料价格、薪柴价格和产气率作为不确定因素，以内部收益率作为分析指标。

表 8-2 敏感性分析（一）

时间 / 年	劳动力价格 ± 20 %			建池材料价格 ± 20 %		
	成本	收益	净收益	成本	收益	净收益
0	1240/ 1160	0	- 1240/ 1160	1366/ 1034	0	- 1366/ 1034
1	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
2	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
3	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
4	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
5	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
6	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
7	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
8	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
9	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
10	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
11	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
12	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
13	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
14	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184
15	145/ 105	309/ 309	164/ 204	125/ 125	309/ 309	184/ 184

表 8-3 敏感性分析（二）

时间 / 年	薪柴价格 ± 20 %			沼气池产气率 ± 20 %		
	成本	收益	净收益	成本	收益	净收益
0	1200/ 1200	0	- 1200/ 1200	1200/ 1200	0	- 1200/ 1200
1	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
2	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
3	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
4	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
5	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03

续表

时间 / 年	薪柴价格 ± 20 %			沼气池产气率 ± 20 %		
	成本	收益	净收益	成本	收益	净收益
6	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
7	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
8	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
9	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
10	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
11	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
12	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
13	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
14	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03
15	125/ 125	370. 97/ 247. 31	245. 97/ 122. 31	125/ 125	370. 55/ 247. 03	245. 55/ 122. 03

对上述 4 个变量分别按 ± 20 % 的变动幅度，计算出成本、效益和内部收益率的相应变化，以便从中找出敏感性因素。

(4) 社会效益分析 社会效益分析这里仅仅从劳动力效益和环境效益两方面来分析评价。

劳动力效益评价。在评价农村使用沼气节省劳动力的价值时，必须分析沼气池投料管理所用的劳动时间和用于施肥增加的劳动时间，再与传统的打柴、炊事、施肥所用的劳动时间进行比较，来评价农村使用沼气的劳动力效益比较合理。

按沼气池投料管理及畜禽圈卫生要求，每天需要清除粪便入池一次，每次约 10 分钟，每年折合劳动力 8 个；每年投入的有机物经发酵后，约有 60% 的有机物被消化，余下 40% 有机质（即腐殖质）形成有机质浓度约 5% 的沼肥 15 吨。假设 15 吨沼肥全部用于作物，共需施肥劳动力 15 个，与施用堆沤肥所需劳力（6 个）相比，增加施肥劳力 9 个，两项合计共 17 个劳力。

根据本人多年生活在农村的经历，满足一家 5 口人炊事用能（不含饲养、烤火用能），一年需要 2.2 吨柴草，一个劳动力一天可打柴草 100 千克（干物），一年需要 22 个劳动力；每天还需要生火添柴 1.5 小时，一年折 68 个劳动力，总计 90 个劳动力。使

用沼气后，可节省上山打柴割草劳动力（饲养和烤火用能可用农作物剩余秸秆或果枝解决），节省生火添柴时间，与传统的打柴、炊事、施肥所耗的 90 个劳力相比，农村使用沼气后实际年节省劳力 73 个。

环境效益评价。人畜粪便投入沼气池发酵后，能有效地将寄生在人畜粪便的细菌性病源、病毒性病源、寄生性病源及蚊蝇虫卵沉降杀灭。据广西卫生防疫站试验对比，经沼气发酵后的人畜粪便，寄生虫卵数量从投入时平均值 1774.9 个/升，减少到 83 个/升，减少 98.8%，蚊蝇虫卵未被检出。其卫生效果目前在农村没有何种处理方法（化学和高温处理除外）可比。

人畜粪便直接投入沼气池发酵，在沼气池密闭条件下，微生物分解物质和能量代谢呼吸释放出的惰性物质可在池内循环利用，不存在堆沤方法产生的环境污染；人畜粪便经过沼气池发酵，可直接用于作物肥料、养鱼、喂猪、浸种或直接排入河流，不产生二次污染；农村使用沼气，还能有效地减少传统炊事烟熏火燎所带来的红眼病、哮喘病等疾病。

(5) 评价结论 农村发展沼气池，是一项投资少、见效快、一次投资长期受益的好项目；是多层次有效综合利用农业有机物质，实现农业可持续发展战略的一项有效技术；是解决农村燃料短缺，提高用能品质，促进农民增收节支的有效途径；是保护生态，改善农村卫生环境的有效措施；是农村全面建设小康社会的必由之路，应加快推广。

(岳建芝)

主要参考文献

- 1 张百良主编. 农村能源技术经济及管理. 北京: 中国农业出版社, 1995
- 2 国家计划委员会建设部发布. 建设项目经济评价方法与参数. 第二版. 北京: 中国计划出版社, 1993
- 3 李振球, 欧阳康主编. 技术经济学. 大连: 东北财经大学出版社, 1999
- 4 徐莉, 陆菊春等主编. 技术经济学. 武汉: 武汉大学出版社, 2003
- 5 杭育编著. 技术经济学. 上海: 世界图书出版公司, 1997

- 6 吴添祖主编. 技术经济学概论. 北京: 高等教育出版社, 1997
- 7 傅家骥主编. 工业技术经济学. 第三版. 北京: 清华大学出版社, 1996
- 8 徐晓峰著. 技术经济学. 北京: 中国发展出版社, 1996
- 9 任玉珑, 陈迅主编. 技术经济学. 重庆: 重庆大学出版社, 1999
- 10 吴泽宁, 于鲁季等主编. 工程经济原理及应用. 北京: 气象出版社, 1996