



新 能 源
New Energy
应用丛书

沼气工程系统设计 与施工运行

B iogas Systems Design,
Construction and Operation

■ 齐岳 郭宪章 主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

新能源应用丛书

沼气工程系统设计与 施工运行

齐 岳
郭宪章 主编

人 民 邮 电 出 版 社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

沼气工程系统设计与施工运行 / 齐岳, 郭宪章主编
— 北京: 人民邮电出版社, 2011. 1
(新能源应用丛书)
ISBN 978-7-115-24135-1

I. ①沼… II. ①齐… ②郭… III. ①沼气池—系统设计②沼气池—工程施工 IV. ①S216.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第215542号

内 容 提 要

本书详尽阐述了大中型沼气工程的设计原则, 厌氧发酵原理, 沼气利用技术, 沼气工程施工与验收, 沼气工程运行管理, 沼气的净化储存以及沼渣、沼液的综合利用。本书可以作为农村能源、环境工程及相关领域的科技人员和高等院校师生的参考书。

新能源应用丛书

沼气工程系统设计与施工运行

-
- ◆ 主 编 齐 岳 郭宪章
责任编辑 毕 颖
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14
字数: 318 千字
印数: 1—4 000 册
- 2011 年 1 月第 1 版
2011 年 1 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-24135-1

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号



序

进入 21 世纪后,由于全球经济快速发展和人口不断增长,世界一次能源消费量不断增加,而化石能源仍是能源消费的主体,使得温室气体及各种有害物质大量排放,生态环境不断受到威胁。1997 年的《京都议定书》要求国际社会采取行动,消除人为对气候系统的破坏;2009 年的哥本哈根会议进一步推动了各国在应对气候变化的行动中形成共识,温家宝总理也在大会上作出庄严承诺。在此背景下,世界各国都在积极研究并开发利用新能源特别是可再生能源,约束和减少全球温室气体的排放,中国政府已经把大力推动新能源与可再生能源发展作为国家的一项重大战略任务。

新能源的各种形式都是直接或者间接地来自于太阳或地球内部所产生的热能,包括了水能、太阳能、风能、生物质能、地热能、核聚变能、海洋能以及氢能等。新能源普遍具有污染少、储量大的特点,对于解决当今全球气候变化和环境污染问题,解决化石能源日趋枯竭以及保障能源安全供应等问题具有重要意义。从长远看,我们正处在以化石能源应用为主向新能源应用转变的过渡阶段,应抓住这次能源变革的机遇,加强对能源战略、能源结构、能源布局、能源政策、能源科技、能源价格以及能源合作等一系列重大问题的研究,明确发展目标,理清发展思路和工作方向。

在缓解能源、环境危机的双重压力下,太阳能热利用、沼气、农作物秸秆和生物制液体燃料等由于出色的节能减排效果和经济实用性,多年来已成为国家能源建设,特别是社会主义新农村建设中优先发展的重点领域。

人民邮电出版社顺应时代的需要,出版了这套“新能源应用丛书”。本套丛书包括已具规模效益的太阳能热利用工程和沼气工程,以及前景广阔的燃料乙醇工程和秸秆能源工程等项目,其作者均是相关领域有着丰富实践经验和理论水平的工程技术专家,各册书稿贯穿了实用有效的编写方针,对于新能源工程建设,有很好的指导性、可操作性和成果连续性。

相信“新能源应用丛书”的出版发行,可以为新能源领域的工程技术人员提供一个实用而有效的智力支撑,也可以成为面向广大干部群众的科普读物。

国务院参事、中国可再生能源学会理事长

2010 年 9 月 27 日



近年来,我国农村沼气工程建设力度加大,发展较快。农村沼气工程建设把可再生能源技术和高效生态农业技术结合起来,对解决农户炊事用能、改善农民生产生活条件、促进农业结构调整和农民增收节支、巩固生态环境建设成果具有重要意义。

沼气的核心是厌氧发酵,通过厌氧发酵不仅实现了畜禽粪便的资源化利用,把产生的沼气作为清洁能源,还可把沼液、沼渣直接用于养殖业和种植业,延长了生物和食物链条,全面提高了废弃物的利用率,推动了农村产业结构调整。沼气工程通过利用粪便、秸秆生产沼气和有机肥,推进农业生产从主要依靠化肥向增施有机肥转变,推进农民生活用能从主要依靠秸秆、薪柴向高品位的沼气能源转变,从根本上改变了传统的粪便利用方式和过量施用农药及化肥的农业增长方式,有效地节约水、肥、药等重要农业生产资源,减少环境污染,将畜牧业发展与种植业发展链接起来,促进了能量高效转化和物质高效循环,形成了“养殖业—沼气—有机肥料—高效种植业”循环发展的农业循环经济基本模式。

沼气工程的主要内容包括原料收集系统、原料预处理系统、厌氧发酵系统、沼气净化储存系统和沼气沼渣沼液利用系统 5 部分。沼气工程是一个系统工程,上述 5 个系统是沼气工程的骨架,沼气工程中的所有设备及装置的合理配套和技术集成都会影响整个工程的安全和质量,如温度控制系统、消防系统、电气控制系统等。目前,我国沼气工程正朝着设备标准化、模块化和自动化的方向发展。沼气罐标准设备已形成市场,罐体施工 80% 以上为机械施工,取代了过去现场焊接或现浇混凝土的施工方式;在配套设备方面,我国已研制成功了纯燃沼气发电机组,自动控制、脱硫脱水、固液分离等装置已形成系列化成熟产品。技术的进步和设备的成熟为大中型沼气工程建设稳步发展奠定了坚实的基础,未来沼气工程的建设将形成专业化施工、产业化发展的新局面。

本书在编写过程中,参考了国内外已经发表的有关资料,引用了编者多年的科研成果和工程实践经验,得到了中国农村能源行业协会、农业部规划设计研究院有关专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书由齐岳、郭宪章主编;佟启玉编写第 6 章;计苹、赵东顺编写第 7 章;由小卉、姚宗陆、宋成军参加了本书编写工作。另外,在编写过程中,参考了国内有关专家、学者的部分资料,在此表示衷心的感谢。

由于本书内容涉及面广,编者虽然收集了新的科研成果和内容,但受知识水平和实践范围所限,书中难免存在不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

第1章 沼气工程设计原则	1
1.1 沼气工程概述	1
1.1.1 沼气的定义、组成和分类	1
1.1.2 沼气的主要成分和特性	2
1.1.3 我国大中型沼气工程的发展现状	4
1.1.4 国外沼气工程发展现状	4
1.2 我国沼气工程相关政策、法规和标准	9
1.2.1 发展农村沼气的有关政策规定	9
1.2.2 发展农村沼气的相关法规	10
1.2.3 沼气工程设计有关标准、规范	10
1.3 沼气工程设计原则	11
1.3.1 沼气工程总体设计原则	11
1.3.2 沼气工程选址	11
1.3.3 沼气工程总体布置	11
1.4 沼气的工艺设计	13
1.4.1 工艺设计概述	13
1.4.2 典型工艺方案的介绍	13
第2章 厌氧发酵	16
2.1 厌氧发酵过程	16
2.1.1 厌氧发酵的原理	16
2.1.2 厌氧发酵过程的产酸阶段	16
2.1.3 厌氧发酵过程的产甲烷阶段	17
2.2 厌氧发酵的影响因素	18
2.2.1 温度	19
2.2.2 pH值	19
2.2.3 有毒和抑制性基质	20

2.2.4	营养物质	20
2.2.5	搅拌	21
2.2.6	碱度	23
2.2.7	负荷	24
2.3	不同原料的特性及产气量	27
2.3.1	原料特性指标	27
2.3.2	不同原料的产气量	31
2.3.3	污染物排放设计依据	32
第3章	前处理技术	35
3.1	格栅	35
3.1.1	格栅分类	35
3.1.2	格栅的设计	39
3.1.3	机械格栅	41
3.2	破碎	41
3.3	粉碎	43
3.3.1	一次粉碎工艺	43
3.3.2	二次粉碎工艺	44
3.4	沉砂	45
3.4.1	平流沉砂池的构造	45
3.4.2	平流沉砂池的设计	46
第4章	厌氧处理技术	49
4.1	全混合厌氧消化池	49
4.1.1	原理和特点	49
4.1.2	构造	51
4.1.3	设备与装置	51
4.1.4	设计计算	52
4.2	卧式推流厌氧消化器	56
4.3	升流式厌氧污泥床	58
4.3.1	升流式厌氧污泥床的特点	58
4.3.2	三相分离器	59
第5章	沼气利用技术	63
5.1	沼气净化技术	63
5.1.1	沼气脱水的原理和设备	63

5.1.2 沼气脱硫的原理和设备	64
5.2 沼气储存	70
5.2.1 储气装置的容积及其位置的确定	71
5.2.2 储气柜的分类	72
5.3 沼气输配与使用	78
5.3.1 沼气管道的布置	79
5.3.2 沼气输配管网的计算	81
5.3.3 常用管材	84
5.3.4 管道的连接	86
5.3.5 管道的试压和吹扫	88
5.3.6 沼气灶具	89
5.4 沼气发电	90
5.4.1 沼气发电机的分类	91
5.4.2 沼气发电的特点	92
5.4.3 沼气发电系统	92
5.4.4 沼气发电机组的设计	96
5.5 沼气使用安全	98
5.5.1 沼气中的有害组分	98
5.5.2 防止中毒的发生	100
5.5.3 防止燃气着火和爆炸	101
5.5.4 对中毒者的急救方法	101
第6章 发酵产物综合利用	102
6.1 沼气的综合利用	102
6.1.1 沼气在塑料大棚蔬菜生产中的应用	102
6.1.2 沼气保鲜柑橘	103
6.1.3 沼气储粮	106
6.2 沼渣沼液的出肥方式和利用技术	107
6.2.1 沼渣和沼液混合出料	107
6.2.2 沼液单独出料	108
6.2.3 沼渣单独出料	108
6.2.4 用沼渣制腐殖磷肥	109
6.3 沼液的综合利用	110
6.3.1 沼液的养分	110
6.3.2 沼液在种植业中的应用	111
6.3.3 沼液在养殖业中的应用	117
6.4 沼渣的利用	118

6.4.1	沼渣作肥料	119
6.4.2	沼渣在种植业中的应用	121
6.4.3	沼渣在养殖业中的应用	122
第7章	沼气工程的施工与验收	126
7.1	测量	126
7.1.1	测量准备	126
7.1.2	高程测量	127
7.2	土建施工	128
7.2.1	土方开挖	128
7.2.2	钢筋工程	128
7.2.3	模板工程	130
7.2.4	混凝土工程	132
7.2.5	砌体工程	134
7.2.6	屋面工程	135
7.2.7	门窗工程	135
7.2.8	抹灰工程	136
7.2.9	内墙饰面	138
7.3	管道系统安装	138
7.3.1	管道安装工艺流程	138
7.3.2	管道安装	141
7.3.3	管道安装技术措施	143
7.3.4	阀门、阀件及压力表温度计的安装	144
7.4	电气系统安装	144
7.4.1	施工工艺概述	144
7.4.2	施工技术要点	144
7.4.3	配电箱安装	146
7.4.4	电缆敷设	147
7.4.5	标志牌	148
7.4.6	管内穿线工程	148
7.4.7	器具安装	148
7.4.8	接地工程	149
7.4.9	电气调试	150
7.5	设备安装	151
7.5.1	设备基础的验收	151
7.5.2	设备安装	151
7.6	工程保证质量体系及保证质量措施	152

7.6.1 质量保证体系	152
7.6.2 质量保证技术措施	153
7.7 沼气工程常用设备	157
7.7.1 厌氧发酵罐	157
7.7.2 泵	160
7.7.3 常用阀门	167
7.7.4 搅拌设备	170
7.7.5 燃气流量计	172
7.7.6 固液分离设备	180
7.7.7 调压设备	184
7.7.8 沼气压缩机	186
7.7.9 阻火器	187
7.8 沼气工程的验收	188
7.8.1 验收程序	189
7.8.2 验收内容	189
7.8.3 验收方法和标准	191
7.8.4 沼气工程的渗漏检查	193
第8章 沼气工程运行管理	196
8.1 沼气工程的启动	196
8.1.1 沼气池运行前的试车	196
8.1.2 沼气池启动	196
8.2 沼气工程的运行及管理	199
8.2.1 沼气管网的运行管理	199
8.2.2 厌氧消化器的运行管理	201
8.2.3 储气柜的运行和维护	202
8.3 沼气站的安全防护	203
8.3.1 密闭空间作业安全管理	203
8.3.2 施工用火管理	204
8.3.3 工程运行管理	205
8.3.4 维护保养	206
8.3.5 安全操作	206
第9章 工程实例	208
9.1 北郎中村沼气工程	208
9.1.1 项目介绍	208

9.1.2 技术方案	208
9.1.3 工艺流程单体设计	210
9.2 黑龙江省农垦总局海林农场沼气工程	211
9.2.1 海林农场沼气集中供气工程基本情况	211
9.2.2 海林农场沼气工程效益分析	212
9.2.3 项目建设主要经验与启示	213
参考文献	214

1.1 沼气工程概述

1958 年，毛泽东同志在武汉、安徽等地视察农村沼气时指出：“沼气又能点灯，又能做饭，又能作肥料，要大力发展，要好好推广。”

1980 年 7 月，邓小平同志在四川视察农村沼气时指出：“发展沼气很好，是个方向，可以因地制宜解决农村能源问题，沼气发展要有一个规划，要有明确的奋斗目标和方向。要抓科研，沼气池也要搞‘三化’，即标准化、系列化、通用化，不这样不好管理，也保证不了质量”，“这是一件大好事，大家要重视一下。”1982 年 9 月小平同志再次强调，“搞沼气还能改善环境卫生，提高肥效，可以解决农村大问题。”

1991 年 3 月，江泽民同志在湖南考察农村沼气时指出：“农村发展沼气很重要，一可以方便农民生活，二可以保护生态环境。”

新一届中央领导集体重视并多次考察农村沼气。2003 年以来，胡锦涛同志在江西赣州、河南梁园区、河北张家口分别考察了农村沼气建设情况，并给予充分肯定。温家宝同志 2002 年 9 月批示：“发展农村沼气，既有利于解决农民生活能源，又有利于保护生态环境，确实是一项很有意义、很有希望的公益设施建设。积极稳妥地推进这项工作，必须坚持科学规划、因地制宜，必须加强领导，建立合理的投资机制，发挥国家、集体、农民的积极作用，必须把发展农村沼气同农业结构调整特别是发展养殖业结合起来，同农村改厕、改水等社会事业结合起来，同退耕还林、保护生态结合起来。开展这项工作，要通过典型示范，总结经验，逐步推广。”

1.1.1 沼气的定义、组成和分类

沼气工程是以农业废弃物和有机垃圾的厌氧消化为主要技术环节，集污水处理、沼气生产、资源化利用为一体的系统工程。沼气工程一般由原料收集系统、预处理系统、厌氧发酵系统、出料的后处理系统和沼气净化储存利用系统 5 部分组成，沼气工程全景如图 1-1 所示。沼气工程一般以畜禽粪便和有机垃圾为原料。因为规模化养殖场的粪尿排泄物及废水中含有的大量氮、磷、悬浮物及致病菌，所以污染物数量大而且集中，尤其以水质污染和恶臭对环境造成的污染最为严重。沼气工程一般采用中温厌氧发酵，可以有效解决污染问题。大中型

沼气工程是指沼气池单体容积在 50m^3 以上, 或沼气池总体容积在 100m^3 以上, 日产沼气在 50m^3 以上的, 具有原料预处理及沼气、沼渣、沼液综合利用配套系统的系统工程。

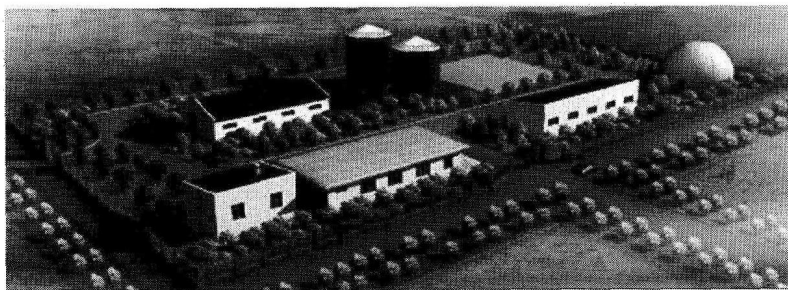


图 1-1 沼气工程全景

我国 NY/T667-2003 沼气工程分类标准根据沼气的单体装置容积、总体装置容积、日产沼气和配套系统的配置 4 个指标将沼气的规模分为大型、中型和小型 (见表 1-1), 其中单体装置容积和配套系统的配置为必要指标, 总体装置容积和日产沼气和为择用指标。确定规模时要根据两个必要指标和一个择用指标确定沼气的规模。

表 1-1

沼气工程规模分类指标

工程规模	单体装置容积 (m^3)	总体装置容积 (m^3)	沼气产量 (m^3/d)	配套系统的配置
大型	≥ 300	$\geq 1\,000$	≥ 300	完整的原料预处理系统, 沼渣、沼液综合利用系统, 沼气储存、输配和利用系统
中型	$300 > V \geq 50$	$1\,000 \geq V \geq 100$	≥ 50	原料预处理系统, 沼渣、沼液综合利用系统, 沼气储存、输配和利用系统
小型	$50 > V \geq 20$	$100 > V \geq 50$	≥ 20	原料计量、进出料系统, 沼渣、沼液综合利用系统, 沼气储存、输配和利用系统

注: 沼气产量是指在发酵温度高于 25°C 时总体装置的沼气产量。

1.1.2 沼气的主要成分和特性

沼气是一种混合气体, 其主要成分除甲烷 (CH_4) 外, 还含有二氧化碳 (CO_2)、硫化氢 (H_2S)、一氧化碳 (CO) 等气体, 有时还含有高级碳氢化合物 (C_mH_n)。沼气的成分随发酵原料、发酵条件和工艺流程的不同而不同。通常情况下, 甲烷含量为 $50\%\sim 70\%$, 二氧化碳含量为 $25\%\sim 40\%$, 其他气体含量较低。

甲烷是沼气中的主要燃烧成分, 影响沼气的特性。甲烷的分子式为 CH_4 , 属于最简单的有机化合物, 分子量为 16.04。甲烷是无色、无味的可燃性气体, 沸点为 -161.5°C , 比空气轻, 极难溶于水。甲烷和空气按一定比例混合, 遇火花会发生爆炸。甲烷的化学性质相当稳定, 一般不跟强酸、强碱或强氧化剂 (如 KMnO_4) 等起反应, 但在适当条件下会发生氧化、热解及

卤代等反应。甲烷的主要特性见表 1-2。甲烷在自然界分布很广，是天然气、沼气、坑气及煤气的主要成分之一。它可用作燃料及制造氢、一氧化碳、炭黑、乙炔、氢氰酸及甲醛等物质。

表 1-2 甲烷的主要特性

特 性	数 值	特 性	数 值
熔点 (°C)	-182.5	临界温度 (°C)	-82.6
沸点 (°C)	-161.5	临界压力 (Mpa)	4.59
相对密度	0.42 (-164°C)	闪点 (°C)	-188
相对蒸气密度	0.55	引燃温度 (°C)	538
饱和蒸气压 (kPa)	53.32 (-168.8°C)	爆炸上限 (%) (V/V)	15
燃烧热 (kJ/mol)	889.5	爆炸下限 (%) (V/V)	5.3

沼气的组分影响沼气的特性，不同组分沼气的特性参数见表 1-3。

表 1-3 不同组分沼气的特性参数

特性参数	CH ₄ 50%, CO ₂ 50%	CH ₄ 60%, CO ₂ 40%	CH ₄ 70%, CO ₂ 30%
密度 (kg/Nm ³)	1.374	1.221	1.095
相对密度	1.042	0.944	0.847
热值 (kJ/m ³)	17 937	21 542	25 111
理论空气量 (Nm ³ /Nm ³)	4.76	5.71	6.67
理论烟气量 (Nm ³ /Nm ³)	6.763	7.914	9.067
火焰传播速度 (m/s)	0.152	0.198	0.243

1. 密度

燃气的密度是指单位体积燃气的质量，一般是指在标准状态下（温度为 0°C，压力为 1 标准大气压）的密度，可按下式计算。

$$\rho^0 = \frac{\sum x_i \rho_i^0}{100}$$

式中： ρ^0 ——生物质燃气在标准状态下的密度，kg/m³；

x_i ——燃气中各组成气体的体积百分数，%；

ρ_i^0 ——燃气中各组成气体在标准状态下的密度，kg/m³。

其中，甲烷的密度为 0.717 kg/m³，二氧化碳的密度为 1.977 kg/m³。

在燃气的应用过程中，经常用燃气密度与干空气密度 (1.293 kg/m³) 之比来表征其特性，即相对密度。沼气的密度随沼气成分中二氧化碳体积分含量的变化而变化，当 CO₂ 含量为 50% 时，沼气的相对密度大于 1；当 CO₂ 含量为 40% 时，其相对密度小于 1。

2. 热值

每立方米沼气的热值约为 21 520kJ, 相当于 1.45 m^3 煤气或 0.69 m^3 天然气产生的热值。

3. 燃烧方式

在沼气燃料燃烧中, 由于燃料与氧化剂都是气态, 所以它属于一种均相燃烧。根据沼气是否预先与氧化剂混合, 沼气燃烧可分为预混燃烧和非预混燃烧两种方式。预混燃烧是指沼气与氧化剂预先按一定比例均匀混合, 形成可燃混合气, 再进行燃烧, 燃烧速率取决于化学反应速度, 燃烧过程受化学动力学因素控制。非预混燃烧是指沼气在燃烧前不预先与氧化剂混合, 而是在燃烧装置内边扩散边燃烧。此时, 燃烧过程主要受到化学动力学因素与扩散混合因素的影响, 如果燃烧过程主要受扩散混合因素控制, 则称为扩散燃烧; 如果燃烧过程主要受化学动力学因素控制, 则称为动力燃烧。

1.1.3 我国大中型沼气工程的发展现状

我国的大中型沼气工程工艺技术已日趋成熟, 配套设备已达到或接近国际先进水平。在沼气的配套技术方面, 可根据猪粪、鸡粪、牛粪等原料特性的不同, 对包括预处理系统、厌氧发酵系统、沼气输配系统、制肥系统、消化液后处理系统进行差异化的设计; 在发酵工艺方面, 生物厌氧发酵机理研究、不同粪便高效能发酵工艺(如 CSTR、UASB、USR、HCPF)的制定、沼气工程产气率、COD 去除率已居国际领先水平; 在配套设备方面, 我国已研制出纯燃沼气发电机组, 制罐、自动控制、脱硫脱水、固液分离等装置已形成标准化成熟产品。除此之外, 我国根据经济实力和具体国情, 还开发出两套以完全混合厌氧消化器(CSTR)和卧式推流厌氧消化器(HCPF)为主的“能源生态型”和以高效厌氧消化器(UASB、EGSB)与好氧处理(SBR、水生植物塘)相结合为主的“能源环保型”的典型处理工艺。

根据全国农村可再生能源统计, 截止到 2006 年底, 农业废弃物沼气工程达到 17 475 处, 年产沼气 $2.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中大型沼气工程共 1 228 处, 年产沼气约 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 中型沼气工程 4 050 处, 年产沼气约 $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 小型沼气工程 12 197 处, 年产沼气约 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$; 预计到 2010 年, 总供气量可达 $93 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这些工程的设计、建造和运行都为进一步规模化推广大中型沼气工程奠定了基础。在不同地区、不同自然条件下, 成功运行的沼气工程都从实践上验证了在我国开展大中型沼气工程的技术可行性。

1.1.4 国外沼气工程发展现状

沼气工程在德国比较有代表性, 下面以德国沼气工程的发展为例进行说明。

近年来, 沼气工程在德国得到了快速发展, 特别是在 2000 年其可再生能源法出台以后。2000 年之前的 10 年间, 德国沼气工程的数量增加了不到 1 000 处, 而从 2000 年到 2004 年的 4 年间就增加了 1 450 处, 到 2008 年底已经达到 4 000 处(整个欧洲大约在 5 000 处)。德国沼气工程总量历年的变化情况如图 1-2 所示。

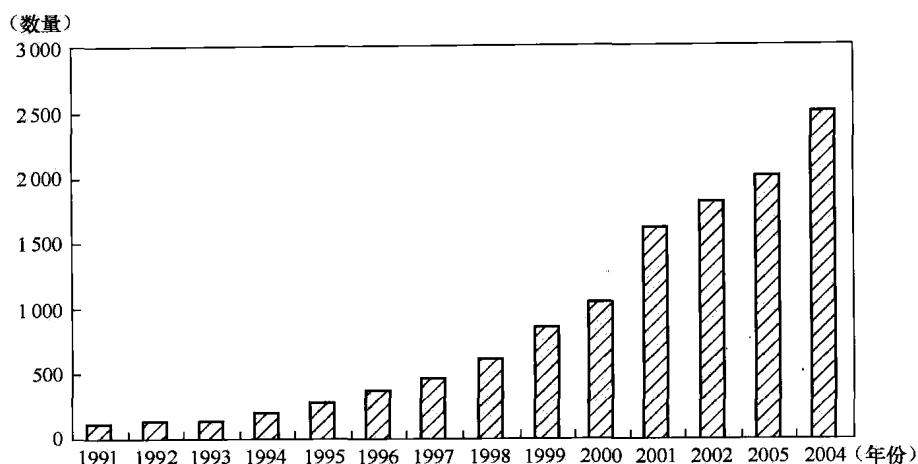


图 1-2 德国沼气工程总量历年变化情况

德国沼气工程发展主要有以下几个特点。

1. 主要采用全混合发酵工艺

在德国，建设沼气工程的主要目的是获取能源，因此追求最大原料产气率是这些工程最为重要的经济指标。从原料产气率角度分析，一些作物，如玉米、甜菜、甜高粱及大麦的干物质产气率可高达 $600 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{t}$ ，远远高于动物粪便的产气率，而动物粪便与这些原料掺在一起进行混合发酵，可以弥补这些原料氮源不足的问题，从而更有利于沼气的生产。此外，这些作物的单位产量也很高，比如种植 1 公顷甜菜可以收获 100t 甜菜和 26t 甜菜叶，而 1t 新鲜甜菜可生产 100 m^3 沼气。同时采用这两种原料有充足的资源保证。德国每年的秸秆产量大约为 4800 万吨，目前的畜牧业养殖规模大约为牛 1600 万头，猪 2600 万头，马 400 万匹，家禽 1.14 亿只，这些家畜和家禽每天产生的粪便所含干物质可达 5.75 万吨。因此，这种采用作物和粪便两种原料进行混合发酵的沼气工程在德国得到了快速发展。

由于混合发酵原料 SS 含量和 TS 浓度都比较高，适合采用全混合厌氧反应器。从采用的反应器类型看，约 90% 为立式全混合反应器；少数采用卧式反应器，主要用于含沙和纤维量高的原料，受结构限制，此类反应器的容积一般低于 300 m^3 ，还有不到 10% 的工程采用两种反应器联合应用的方式。随着材料技术的发展，一些工程采用了将发酵罐和储气柜一体化的设计，即在反应器的上部安装双层膜用以储存沼气，如图 1-3 和图 1-4 所示。

受结构的局限，这种反应器的容积最大不宜超过 1200 m^3 ，如果建造更大容积的反应器，则多采用如图 1-5 所示结构形式的反应器。

基于所用沼气发酵原料的特点，此类沼气工程设有固体原料进料装置，如图 1-6 所示。许多农场建的沼气工程多采用两个发酵罐串联发酵，其中第一个发酵罐采用连续进出料方式，其排出的料液进入第二个发酵罐储存并在其中继续产气，同时该罐兼作沼气储存装置。储存在第二个发酵罐的料液经过一段时间后被排放出来，然后作为有机肥喷施到农田里，所以不存在废液二次污染问题。

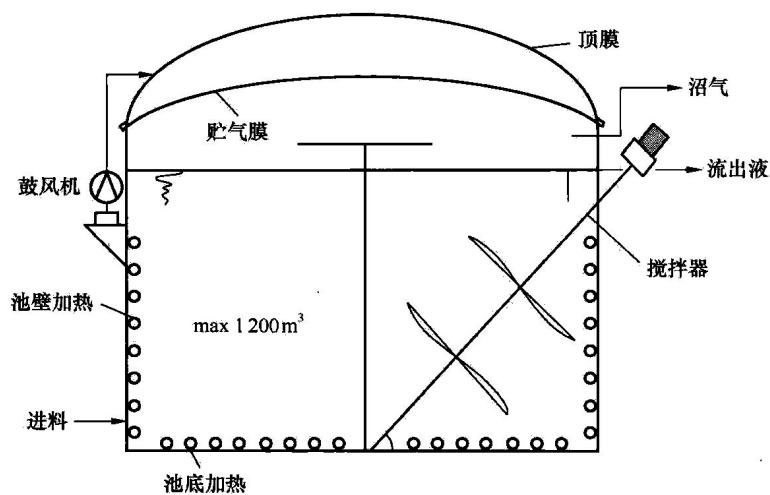


图 1-3 双层膜顶反应器结构示意图

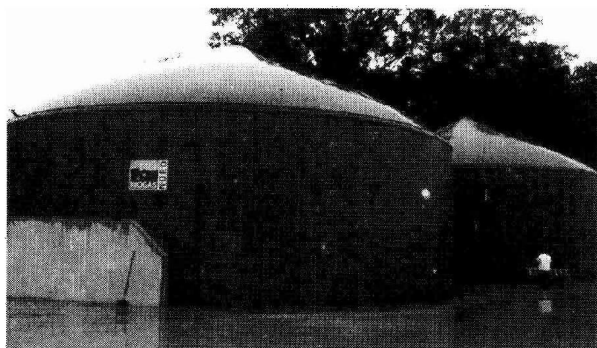


图 1-4 双层膜顶反应器照片

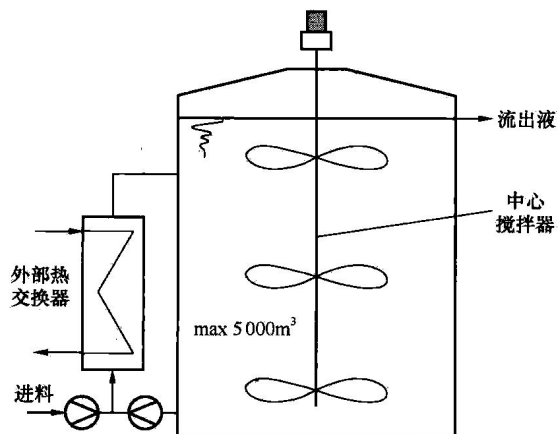


图 1-5 立式大型全混合反应器

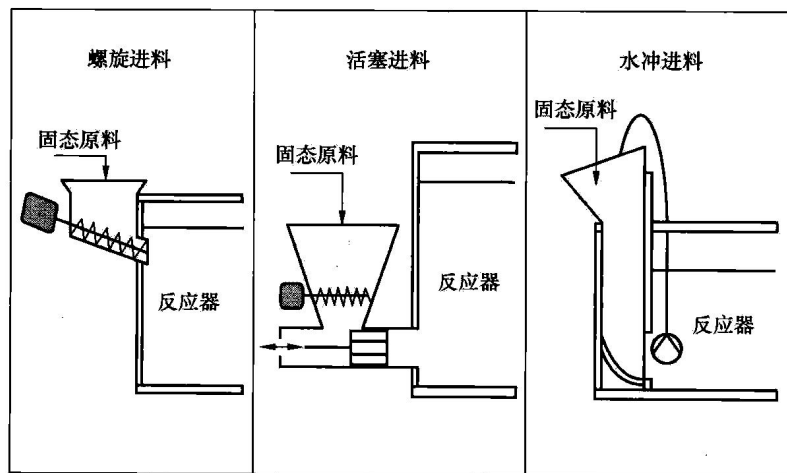


图 1-6 沼气池固体原料进料系统