

云南师范大学教材建设基金资助出版

沼气技术理论与工程

李建昌 主编



清华大学出版社

沼气技术理论与工程

李建昌 主编

参 编：张无敌 徐 锐 陈玉保 李 琼
尹 芳 刘士清 林卫东 王 强

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了沼气发酵的基础理论、工程技术以及综合利用。内容主要涉及沼气的发展历程及发展沼气的意义,沼气发酵微生物学及生化过程,沼气发酵基本参数及影响因素,沼气发酵工艺技术,农村户用沼气池和大中型沼气工程的设计、施工、设备及运行管理,沼气发酵的综合利用模式,玻璃钢沼气池。

该书具有较强的理论性、实用性和系统性,是一本适合于研究生、本科生和专科生学习沼气的教材,也是相关领域技术人员的有价值的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

沼气技术理论与工程/李建昌主编. —北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-45881-4

I. ①沼… II. ①李… III. ①沼气工程 IV. ①S216.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 294600 号

责任编辑:袁 琦

封面设计:何凤霞

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18.5

字 数:449 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

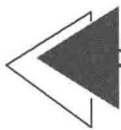
印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:48.00 元

产品编号:068275-01

前言



FOREWORD

沼气技术历经百年的发展,已进入了大规模实际应用阶段。利用沼气技术处理有机废弃物,不仅能回收清洁能源,又能有效地治理环境污染,已成为可再生能源发展的重要方向之一。

中国沼气的发展起始于 1929 年,自第一口沼气池在广东问世以来,迄今已有 80 年了。目前,中国在农村户用沼气池推广数量和技术等各方面在国际上均处领先地位,并逐步形成了以沼气为纽带的北方的“四位一体”模式和南方的“猪—沼—果”模式。中国农村沼气的普及从根本上改变了中国农村的生产生活用能模式。除农村沼气外,中国的大中型沼气工程也在中国蓬勃发展,特别是在经济发达地区,广泛用于畜禽养殖场粪便的处理。其目标已从 20 世纪的“能源回收”转移到“能源生态”,并与周围农业生产相结合,形成了以沼气为核心的有机农业生产模式。这些模式的形成充分体现了沼气的能源效益、经济效益、生态效益和社会效益。因而受到国际国内各地方及各级政府的高度重视。

目前,随着我国经济和社会的高速发展,面对国际国内越来越多的沼气建设项目,以沼气技术为核心的国际交流与合作日益频繁,因此迫切需要有一大批具有该领域专业知识和知识的人才。为此我们在多年教学的基础上编写了《沼气技术理论与工程》(中文版),并在教学中采用双语教学的手段,不仅为老师和学生均提供了一个提高英语综合运用能力的锻炼机会,同时将有助于扩大学生国际视野、使学生的知识体系与国际接轨。

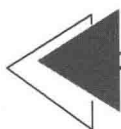
该教材主要涉及沼气发酵微生物学、沼气发酵生物化学、沼气发酵工艺与技术、农村沼气池的设计、大中型沼气工程的设计、沼气发酵综合利用,以及玻璃钢沼气池的介绍。本书不仅是研究生、本科生以及专科生的教材,同时也是相关领域专业技术人员的有价值的参考书籍。

由于编者水平有限,书中不足之处,将在今后的教学过程中不断完善。若本书能对您的学习有所帮助,我们将不甚欣慰。

编 者

2016 年 6 月

目 录



CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 沼气与沼气发酵	1
1.1.1 沼气	1
1.1.2 沼气发酵	2
1.1.3 沼气发酵系统	3
1.2 沼气的发展史	5
1.2.1 国外沼气的发展	5
1.2.2 我国沼气的发展	7
1.3 沼气的合理开发与利用	10
练习题	12
第 2 章 沼气发酵微生物	13
2.1 非产甲烷菌	13
2.1.1 细菌	13
2.1.2 真菌	18
2.1.3 原生生物	18
2.2 产甲烷菌	18
2.2.1 产甲烷菌的形态和结构	19
2.2.2 产甲烷菌的生理基础	27
2.2.3 产甲烷菌的分类	41
2.2.4 产甲烷菌的生长代谢	49
2.2.5 产甲烷菌的生长与条件	61
2.3 沼气发酵微生物间的相互关系	67
2.3.1 非产甲烷菌和产甲烷菌之间的相互作用	67
2.3.2 非产甲烷菌和产甲烷菌之间的种间氢转移	68
2.3.3 沼气发酵微生物优势种群的演替	68
练习题	70

第3章 沼气发酵的生化过程	71
3.1 甲烷形成理论	71
3.1.1 二氧化碳还原学说	71
3.1.2 甲基还原理论	72
3.1.3 巴克假说	73
3.1.4 甲烷形成过程中的基质流	73
3.2 沼气形成的生化过程	77
3.2.1 两阶段理论	77
3.2.2 三阶段理论	78
3.2.3 四阶段理论	80
3.3 复杂有机物的沼气发酵的途径	81
3.3.1 碳水化合物的降解	82
3.3.2 脂类化合物的代谢	87
3.3.3 蛋白质的消化机制	88
3.4 沼气潜力的计算和估计	89
3.4.1 Buswell 公式及原料的理论产气量	89
3.4.2 沼气潜力估算	91
3.5 沼气发酵热力学和动力学	95
3.5.1 沼气发酵热力学	95
3.5.2 沼气发酵动力学	99
练习题	105
第4章 沼气发酵的基本参数和影响因素	106
4.1 沼气发酵的基本参数	106
4.1.1 总固体	106
4.1.2 挥发性固体	107
4.1.3 水力滞留时间	107
4.1.4 污泥滞留时间和微生物滞留时间	108
4.1.5 有机负荷率	108
4.1.6 池容产气率	109
4.1.7 原料产气率	109
4.1.8 有机去除率	109
4.1.9 化学耗氧量	110
4.1.10 生化耗氧量	110
4.1.11 接种量	110
4.2 沼气发酵的影响因素	111
4.2.1 原料的影响	111
4.2.2 接种物的影响	114

4.2.3 氧化还原电位的影响	115
4.2.4 温度的影响	115
4.2.5 浓度的影响	117
4.2.6 pH 的影响	117
4.2.7 滞留时间的影响	117
4.2.8 有机负荷率的影响	120
4.2.9 搅拌的影响	121
4.2.10 其他化学物质的影响	122
练习题	124
第 5 章 沼气发酵工艺	126
5.1 沼气发酵工艺分类	126
5.1.1 发酵工艺类型	126
5.1.2 沼气发酵反应器分类	134
5.2 常规型厌氧反应器	135
5.2.1 农村户用沼气池	135
5.2.2 全混合式反应器	138
5.2.3 塞流式反应器	139
5.3 污泥滞留型厌氧反应器	140
5.3.1 厌氧接触反应器	140
5.3.2 升流式厌氧污泥床	141
5.3.3 膨胀颗粒污泥床	144
5.3.4 内循环厌氧反应器	145
5.3.5 升流式固体反应器	147
5.3.6 折流式反应器	148
5.4 附着型厌氧反应器	149
5.4.1 厌氧滤器	149
5.4.2 流化床和膨胀床	151
练习题	152
第 6 章 农村户用沼气池工程	153
6.1 农村户用沼气池池型	154
6.1.1 固定拱盖水压式沼气池	154
6.1.2 变形的水压式沼气池	155
6.1.3 浮罩式沼气池	158
6.1.4 预制钢筋混凝土板装配沼气池	159
6.2 农村户用沼气池设计	160
6.2.1 沼气池设计原则	160
6.2.2 沼气池设计参数	161

6.2.3	沼气池设计的主要问题	162
6.3	农村户用沼气工程的施工工艺	163
6.3.1	选定池形	163
6.3.2	建池时间的选择	164
6.3.3	建池地址的选择	164
6.3.4	施工工艺的选择	164
6.3.5	建筑材料的选择	165
6.3.6	土方工程	167
6.3.7	施工工艺及操作要点	168
6.3.8	密封层施工	170
6.3.9	质量检查验收	171
6.4	农村户用沼气池工程启动运行方法	171
6.5	农村户用沼气池工程日常管理与安全管理	173
6.5.1	日常管理	173
6.5.2	安全管理	175
	练习题	176
第7章	大中型沼气工程	177
7.1	沼气的分类	177
7.1.1	按规模和容积大小分类	177
7.1.2	按发酵温度分类	178
7.1.3	按发酵原料种类分类	178
7.1.4	按沼气的目的分类	178
7.2	大中型沼气工程工艺流程及参数	179
7.2.1	大中型沼气工程工艺流程	179
7.2.2	大中型沼气的工艺参数	180
7.3	大中型沼气工程工艺设计	186
7.3.1	大中型沼气工程的设计原则和依据	186
7.3.2	原料收集与预处理的设计	187
7.3.3	厌氧反应器的设计	188
7.3.4	沼气净化、储存与输配的设计	192
7.3.5	沼液沼渣固液分离	193
7.3.6	工艺流程图和总平面布置图的具体内容	193
7.4	大中型沼气工程的主要设备	195
7.4.1	固定格栅、水力筛网和格栅过滤机的特点及选用条件	195
7.4.2	布料系统特点及适用条件	197
7.4.3	搅拌装置	198
7.4.4	固液分离机的特点及选用条件	199
7.4.5	沼气净化、储存和输配设备	205

7.5 大中型沼气工程的施工与运行管理	217
7.5.1 大中型沼气工程的施工	217
7.5.2 大中型沼气工程的启动	219
7.5.3 厌氧反应器的运行管理	221
7.5.4 大中型沼气工程日常运行管理	222
7.5.5 大中型沼气工程的维护和故障处理	224
练习题	227
第8章 沼气发酵的综合应用	228
8.1 沼气的利用	228
8.1.1 沼气的热利用	229
8.1.2 沼气的非热利用	235
8.2 沼液的利用	237
8.2.1 沼液主要组成和特性	237
8.2.2 沼液用作肥料	238
8.2.3 沼液抗病虫害	240
8.2.4 沼液浸种和催芽	243
8.2.5 沼液无土栽培	245
8.2.6 沼液养殖	246
8.3 沼渣的利用	248
8.3.1 沼渣的定义和基本特性	248
8.3.2 沼渣用作肥料	249
8.3.3 沼渣栽培	252
8.3.4 沼渣养殖	256
8.4 沼气发酵的综合利用模式	259
8.4.1 以沼气为纽带的生态温室模式	260
8.4.2 以沼气为纽带的生态果园模式	262
8.4.3 以沼气为纽带的生态农场模式	268
练习题	271
第9章 玻璃钢沼气池简介	272
9.1 玻璃钢沼气池的性能与结构	272
9.1.1 玻璃钢材料	272
9.1.2 玻璃钢沼气池的研发与推广	273
9.1.3 玻璃钢沼气池的性能	273
9.1.4 商品化户用玻璃钢沼气池的结构	274
9.2 玻璃钢沼气池的生产、安装与启动	276
9.2.1 玻璃钢沼气池的生产工艺	276
9.2.2 玻璃钢沼气池的安装与启动	278

9.3 玻璃钢沼气池的日常管理与使用	281
9.3.1 沼气发酵的科学管理	281
9.3.2 沼气发酵的日常管理和安全使用	283
练习题	285
参考文献	286

绪 论

1.1 沼气与沼气发酵

1.1.1 沼气

沼气(biogas)是厌氧微生物在厌氧条件下分解代谢有机质而产生的可燃性气体。在沼泽、池塘、粪坑、阴沟,甚至是河道,湖泊和海洋等地方,通常可以看到有气体从水底污泥中冒出。如能将这些气体收集,便可发现它们能够被点燃,这便是人们所说的沼气。根据产气地点不同,沼气又称为污泥气、粪气、阴沟气等。由于沼气是由微生物分解代谢生物物质产生的,所以也称为生物气。沼气还可分为天然沼气和人工沼气:天然沼气是在自然环境中形成的,不便于收集利用;人工沼气则是在人为条件下如沼气池中产生的,便于收集利用。沼气的来源及命名如表 1.1 所示。

表 1.1 沼气的来源及命名

命名依据		名 称
产气地点	沼泽及池塘	沼气(marsh gas)、污泥气(sludge gas)
	阴沟	阴沟气(culvert gas)
	粪坑	粪料气(manure gas)
研究者	沃特	沃特可燃气(Volta combustible gas)
气体成分	主要为甲烷	甲烷气(methane gas)
形成原料	生物质	生物气(biogas)
制造方法	自然界形成	沼气、天然气(natural gas)
	人工制取	沼气、生物气
国家	印度	哥巴气(Gobar gas)也称牛粪气(cow manure gas)

沼气的成分主要由甲烷(CH_4)和二氧化碳(CO_2)组成,其中还有少量的硫化氢(H_2S)、氨气(NH_3)以及微量氢气(H_2)和一氧化碳(CO)等。因此沼气是一种混合气体。其主要成分含量随发酵的原料、条件和工艺而有所差异,通常情况下甲烷占 50%~70%(体积分数),二氧化碳占 30%~50%。是人们开展沼气利用的物质基础。

甲烷是沼气中的主要燃烧成分,影响着沼气的特性,如表 1.2 所示。甲烷是无色无味的可燃性气体,密度比空气小,极难溶于水。甲烷的化学性质相当稳定,一般不与强酸、强碱或强氧化剂(KMnO_4)等起反应,但在适当的条件下会发生氧化、热解及卤代等反应。与空气按一定比例混合,遇火花发生爆炸,爆炸上限 15.0%,下限 5.3%。由于甲烷的燃烧产物是二氧化碳和水,因此沼气是一种绿色可再生能源。

表 1.2 沼气的基本特性

甲烷含量(体积分数) 物理参数	50% CH_4	60% CH_4	70% CH_4
密度/(kg/m^3)	1.374	1.221	1.095
热值/(kJ/m^3)	17 937	21 542	25 111
火焰传播速度/(m/s)	0.152	0.198	0.243

当然甲烷也是一种温室气体。甲烷吸收太阳热量而引发的全球暖化的能力几乎是二氧化碳的 20 多倍。在自然环境中甲烷来源广泛,有动物胃部对食物的消化所产生的气体,也有农场或农村积存粪便的粪坑产生的气体,还有垃圾填埋场产生的气体等。这些气体,如果任其释放到大气中,那将会产生巨大的温室效应。

1.1.2 沼气发酵

沼气发酵(biogas fermentation)也称厌氧消化(anaerobic digestion)或甲烷发酵(methane fermentation),是多种微生物在厌氧环境下代谢有机质而产生沼气的过程。参与有机质分解代谢的这些微生物统称沼气发酵微生物或厌氧消化微生物。该过程主要涉及三个方面的内容:微生物、发酵原料和沼气池。

1. 微生物

在沼气发酵中,有机质在厌氧条件下变成沼气要经过一个极其复杂的生物化学过程,其中的任何变化都离不开沼气发酵微生物的作用。这些沼气发酵微生物是沼气发酵的核心,它们是由许多结构和功能迥异的微生物菌群组成的一个庞大的关系极其复杂的微生物体系,肩负着降解有机质产生沼气的重任。它们不仅存在于沼气池中,同时也广泛分布于自然界中,特别是湖泊、粪坑、污水和有机淤泥。

这些微生物有原生动物、真菌、细菌和产甲烷菌等,为方便研究,通常把它们分为非产甲烷菌(non-methanogens)和产甲烷菌(methanogens)两大类。非产甲烷菌负责水解有机质,为产甲烷菌提供食物;而产甲烷菌则担负着把水解产物转化为甲烷。

2. 发酵原料

在沼气发酵中,发酵原料是沼气发酵微生物的食物。能够被沼气发酵微生物利用的原

料多种多样。这些原料主要有:

- (1) 农业废弃物,如各种农作物、秸秆、蔬菜果园废弃物、杂草等含纤维素类物质较高的物质。
- (2) 林业废弃物,如树叶、树枝、树皮等。这类物质由于含有较高的木质素类物质,因而在沼气发酵中不易降解。
- (3) 动物粪便,如猪粪、牛粪、鸡粪,包括人粪等。
- (4) 有机废水,如城镇居民、生产加工工业等产生的有机废水。
- (5) 城市有机废弃物。

在这些有机废弃物中通常含有淀粉、纤维素、半纤维素、脂肪、蛋白质以及木质素。淀粉、纤维素、半纤维素、脂肪和蛋白质在沼气发酵中容易被沼气发酵微生物降解,而木质素却难以降解。

3. 沼气池

沼气池是由人工建造用于制取沼气的密闭装置,是沼气发酵微生物生长繁殖、原料降解、沼气产生和收集的场所。因此,在建造沼气池时,首先必须是不漏气、不漏水,以满足沼气发酵微生物生存的厌氧环境,其次才是满足其他工艺和用途的要求。根据体积大小、用途不同、工艺差别等有各式各样的沼气池。通常我们所见到的有农村户用沼气池和大中型沼气工程,它们是沼气建设和综合利用的核心。

沼气发酵与好氧发酵和堆肥发酵相比具有以下特点:

- (1) 沼气发酵微生物自身耗能少。在相同条件下,厌氧代谢所需的能量仅为好氧代谢的 $1/30 \sim 1/20$ 。
- (2) 沼气发酵是获得能源载体即甲烷的产能过程。与好氧过程产生的发酵热相比,沼气发酵产生的甲烷容易从体系中分离出来,便于开展利用。
- (3) 沼气发酵能够处理高浓度的有机废弃物或废水。与好氧处理一般只能处理 COD 为 1000mg/L 以下的有机废水相比,厌氧处理的 COD 可高达 $10\,000\text{mg/L}$ 以上。
- (4) 沼气发酵微生物对营养要求较低,能处理的有机废弃物多种多样。
- (5) 与一般堆肥处理相比,沼气发酵除了能回收甲烷外,还具有相当高的保氮、保肥作用。

1.1.3 沼气发酵系统

所谓系统是指同类事物按一定的关系联合起来,成为一个有机组织的整体。沼气发酵系统具有两层含义:①沼气发酵系统的内容,即指沼气发酵过程和其产物。产物应包括沼气和发酵残留物。②沼气发酵系统的综合利用,这些利用使整个“大农业”体系有机地结合成一个整体。

沼气发酵系统的输入功能表现为对有机废物的利用,其系统的输出为沼气和残留物;综合利用则是体现一个有组织整体的内部运行机制,涉及农、林、牧、副、渔的整个大农业体系。因此,沼气发酵系统的优化运行与农业有机结合,不仅拓宽了沼气发酵系统的外延,而且使该系统更具稳定性和生命力(图 1.1)。

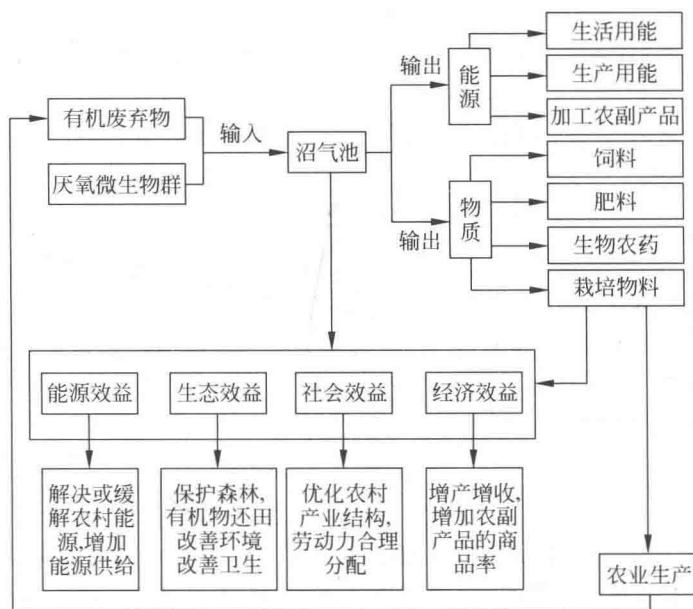


图 1.1 沼气发酵系统及综合利用

沼气发酵系统具有如下几方面的功能：

(1) 沼气发酵系统的能源效益。能够有效地解决农村能源紧张的问题，沼气本身属高品位的气体燃料，具有方便、卫生、热效率高等优点；同时能够用于加工农副产品，为乡镇企业提供能源。

(2) 沼气发酵系统的生态效益。沼气事业的发展有利于保护森林、改善农村生态环境，为农业的发展提供必需的生态条件；秸秆还田减少化肥农药的使用，对建立高产稳产农田，减少环境污染，都将起到十分重要的作用；秸秆、粪便等有机废弃物的利用、生活燃料的解决，对改善农户庭院卫生将有积极的意义。

(3) 沼气发酵系统的社会效益。沼气发酵系统与生态农业的紧密结合，能有效地引导发展因地制宜的农业生产，优化农村产业结构，合理布局农业生产；解放用于筹集生活燃料的劳动力，增加其他农业生产的劳动力投入；改善厨房卫生条件，保障农村人民身心健康。

(4) 沼气发酵系统的经济效益。沼气本身的经济效益虽然有限，但沼气及发酵残留物综合利用的经济效益则相当显著。全国许多地区的实践表明，把沼气及发酵残留物的综合利用贯穿整个农业生产，可取得十分可观的经济效益，有利于农业的持续稳定发展。

沼气发酵系统不仅能够解决农村能源短缺的问题，而且是综合利用生物质资源，促进农、林、牧、副、渔业的共同协调发展，提高农业经济效益，保护生态环境，实现农业生产良性循环和农业持续稳定发展，改善农村卫生条件的重要措施。从全国目前沼气的发展状况来看，沼气发酵系统与农业体系相结合将是中国农村实现现代化以及农民奔小康的重要途径。同时，这种发展模式完全适合于发展中国家的农业向现代化农业的转变。

1.2 沼气的发展史

1.2.1 国外沼气的发展

1. 早期的认识与发现

1630年,比利时布鲁塞尔的医生范海门特(van Helment)发现沼气池里的植物沉淀能产生沼气。他所记录的15种由植物分解过程产生的气体之一就有沼气,而且在肠道气体中亦有这种气体存在。这便是沼气发展过程中关于沼气发现的首次记录。

1677年,谢利(Shirly)也意识到消化道能产生可燃气体,然而他并不知道这是什么气体。

1776年,意大利的物理学家沃特(Alexander Volta)在沼泽上方发现一种可燃气体,并试图分析它的成分。他也注意到当搅动沼泽底的沉淀时会有许多可燃的气泡从沼泽表面释放出来。

1790年,普锐斯特里(Priestley)研究了这种未知气体并发表了一篇由植物分解所产生的可燃气体的论文。论文证实了沃特的观点。

1790年,丹东(Dalton)分析出了可燃气体中的组分。

1806年,威廉·亨利(William Henry)从含水的堆肥中得到了大约 $7/4$ 品脱(约0.83L)的混合气体。这些混合气体中约60%为二氧化碳,其余为甲烷和少量的氮气。之后他又提出沃特发现的“可燃气体”和甲烷实属同种气体。

1808年,英格兰的化学家休姆费锐·大卫(Humphrey Davy)开始了用牛粪与秸秆的混合物发酵产生沼气的研究。他收集到0.3品脱(约0.14L)的甲烷和0.6品脱(约0.28L)的二氧化碳。

1866年,贝坎姆(Bechamp)的一个学生,一位法国科学家提出甲烷的形成过程是一个微生物消化的过程,并且把这个过程命名为“Microzyma”。

1868年,贝坎姆证实甲烷来自于微生物对含碳化合物的分解。此外他通过使用乙醇作为唯一的碳源,碳酸盐作为缓冲剂,沉淀物作为接种物的发酵装置获得了甲烷。

1868年,罗马科学院院士瑞赛特(Reiset)用一堆牛粪造出了甲烷。

1875年,一位俄罗斯的学者波波夫(Popoff)和他的同事们一同发现了甲烷发酵是一个复杂的微生物过程。他们通过河流淤泥和纤维素的发酵获得了氢气和甲烷。

1879年,印度Bombay的来普(Matiunga Leper Asylum)建了一个通过人类废弃物的储存发酵生产沼气的沼气工厂。所产气体被用于照明,之后于1907年又用于电力供应。

1881年,第一台污水处理厌氧反应器由法国的路易斯(Louis Mouras)设计制造。麦卡迪(Mc Carty)建议把这一年定为人工污水处理沼气发酵装置的元年,路易斯为此发明装置的奠基人。

1882年,泰培纳(Tappeiner)公布了一项使用植物作为原料,生物肠道内的微生物作为菌种的发酵实验。在这个实验中他设置了三组平行实验。第一组添加抗病毒的作用物以阻止细菌生长,但保留可溶性酶的反应;第二组杀死细菌并通过煮沸使酶失活;第三组不做

任何处理。结果显示只有最后一组可以产出甲烷。

1883年,巴斯特(L. Pasteur)的另一个学生高扬(Ulysse Gayon)认为沼气可以由动物的粪便获得。1894年,巴斯特把这一结果呈交法国科学院,认为通过粪便发酵获得的沼气可用于照明和供热。

1884年,塔伯特(A. N. Talbolt)设计了一套与路易斯类似的装置(Mouras Automatic Scavenger)。

1889年,斯科特(W. D. Scott)建造了一套类似厌氧滤池原理的装置,通过厌氧过滤器除去水中大量的悬浮粒子。

1895年,英国人卡梅隆(Donald Cameron)设计了一套类似化粪池的装置。一年后他又在Exeter为处理污水建了一套装置,并且把产生的气体命名为污泥气(sludge gas),并用它为街道照明。

1899年,美国人克拉克(Harry W. Clark)提出通过产气迅速去除污水中的污泥的方法。基于此种观点,1904年英国人查韦斯(W. O. Travis)建成了菌种沼气池并且首次在Hamptor建成了一个双层沉淀式沼气池,称为Travis沼气池。

1914年,德国学者英姆霍夫(K. Imhoff)把Travis沼气池改装成了Imhoff沼气池。

1927年,Ruhreverband把Imhoff沼气池改装成了Conventional沼气池。

2. 近代沼气发酵的研究

1901年,Schengon描述了产甲烷菌的形态和特征并且提出了一个相当清晰的与其转化能力相关的观点。

1916年,Omellianskii首次分离出一种产甲烷菌(经鉴定非纯菌种)。

1930年和1934年,范尼尔(Van Niel)提出了二氧化碳还原形成甲烷的理论。

1936年,巴克(Baker)通过化学合成媒介的使用,在淤泥中培育出了产甲烷菌。同时他也获得了一种优质的可分解酒精、丙烷、丁烷的微生物。此外据说Heukelekiam和Heineman已经掌握了统计产甲烷菌种群数量的方法。

1950年,Hungate建立了一套沼气发酵技术,对后来产甲烷菌的研究作出了巨大的贡献。1956年,Bryant进一步发展了Hungat技术。

1950年,摩根(Morgen)和托普(Torpey)把搅拌器安装在了发酵罐内,完成了微生物菌种与污水的完全接触,研制了CSTR厌氧反应器。

1967年,Bryant分离纯化了奥美梁斯基(Omellianskii)甲烷杆菌,并证明了它是甲烷杆菌MOH菌株和“S”分解氢产丙酮有机菌的共生体,而非只是奥美梁斯基甲烷杆菌。这些研究成果进一步证明了沼气发酵中产氢乙酸产酸及产甲烷过程的存在。

1948年,布什威尔(Buswell)和索罗(Sollo)利用同位素标记的方法,对甲烷的形成进行了研究,提出了甲基转化形成甲烷的理论。

1956年,Barker根据二氧化碳还原理论和甲基还原理论,提出了巴克假设。认为乙酸在形成甲烷时,其甲基部分可直接还原形成甲烷,羧基部分可通过形成二氧化碳后,进一步还原生成甲烷。

1955年,G. J. Schroeffer成功研制了厌氧接触反应器,首次实现了水力滞留时间和污泥滞留时间的分离,为高效反应器的研制奠定了基础。

1961年, W. W. Eckenfelder 提出了沼气发酵四阶段理论。

1962年, R. E. McKinney 提出了沼气发酵二阶段理论。

1967年, O. W. Lawrence 和 P. L. McCarty 提出了目前普遍接受的沼气发酵三阶段理论。

1969年, Young 和 Mc Carty 研制了厌氧滤池反应器, 并于 1972 年成功应用于处理有机废水。

1970年, Mc Bride 和 Wolfe 首次从产甲烷菌 MOH 菌株中发现了产甲烷菌所特有的辅酶 M, 并于 1974 年确认了其结构。

1971年, S. Ghosh 根据厌氧消化原理研制了两相分离厌氧反应器, 使产酸相和产甲烷相分离, 提高了沼气发酵的产气效率。

1972年, P. Cheeseman 等同样从产甲烷菌 MOH 菌株中发现了产甲烷菌所特有的辅酶 F_{420} 。1978年, Erich 确认了其结构。

1974年, 荷兰瓦格林根大学的 G. Lettinga 研制出了 UASB 反应器, 其反应器内的三相分离器的设置成功实现了沼气发酵产物固液气的分离。

1977年, Carl Woese 等依据现代分子生物学的技术和手段, 对几百种微生物的 16SrRNA 进行比较, 认为古细菌既不属于真核生物, 也不属于原核生物(真细菌), 而是生命的第三种形式, 据此于 1990 年提出了生命三领域学说。

1978年, R. P. Gunsalus 和 R. S. Wolfe 从 *Methanobacterium thermoautotrophicum* 中分离获得了产甲烷菌所特有的辅酶 F_{430} 。

1979年, 首届国际厌氧消化大会在英国的卡迪夫大学召开, 世界各地厌氧消化领域的世界级专家和学者广泛交流和介绍了在厌氧消化研究所取得的成果。这次大会极大地促进了厌氧消化的发展。

1983年, M. Thomm, A. G. Wood 和 L. Meile 从产甲烷菌中分离获得了三种产甲烷菌的细胞质粒。

1992年, Carl R. Woese 正式表明产甲烷菌不是细菌, 而是属于古菌。

1996年, 完成了 *Methanococcus jannaschii* 全基因组序列的测定, 开起了产甲烷菌的现代分子生物学的研究方法。

1.2.2 我国沼气的发展

沼气在我国的发展和应用已经历了一个多世纪。从最初的罗国瑞式沼气池开始, 到目前广泛使用的户用沼气池和大中型沼气工程, 我国沼气推广使用数量世界第一, 沼气技术水平世界领先。期间的发展, 大体上可分为五个时期: 20 世纪 30 年代的第一代沼气池, 50 年代后期的第二代沼气池, 70~80 年代的第三代沼气池, 80~90 年代的第四代沼气池, 以及 2000 年以后的第五代沼气池。

1. 第一代沼气池——罗国瑞式沼气池

早期沼气称为瓦斯气, 沼气池称为瓦斯库。19 世纪末, 在广东潮梅一带民间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