



沼气工程

Biogas Engineering

邓良伟 等▲编著

 科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

沼 气 工 程

邓良伟 等编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书着眼整个沼气工程技术链,系统介绍了沼气工程各个功能单元的基本原理、技术特点以及设计、调试与运行需要注意的问题,并从沼气发酵工艺、结构、设备、控制等不同专业角度介绍沼气工程设计建造要求与技术关键,集知识性、资料性、实用性、系统性于一体。

本书可供沼气工程设计、运行管理以及决策人员使用,也可供环境工程、农村能源、生态农业等专业师生和科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

沼气工程/邓良伟等编著. —北京:科学出版社,2015.11

ISBN 978-7-03-045543-7

I. ①沼… II. ①邓… III. ①沼气工程 IV. ①S216.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 206291 号

责任编辑:郑述方/责任校对:冯铂

责任印刷:余少力/封面设计:墨创文化

科学出版社

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:19

字数:445 千字

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《沼气工程》编著者

第一章 刘 刘

第二章 郑 丹

第三章 邓良伟

第四章 宋 立 王智勇

第五章 王智勇

第六章 蒲小东

第七章 王智勇 王 兰 邓良伟

第八章 邓良伟

第九章 曾友为

第十章 宋 立 邓良伟

前言

沼气技术在可再生能源生产、环境污染治理和温室气体减排等方面发挥着重要的作用。经过近一百年的发展,沼气技术涉及的理论认知、发酵工艺、设备装置和运行管理都取得了长足的进步,其中以德国为代表的欧洲发达国家农场沼气工程最具代表性。我国沼气技术始于20世纪30年代,在发展初期以农村户用型沼气池为主,之后逐渐发展到大中型沼气工程。随着社会经济的发展,农民生活方式以及农业生产组织形式的转变,沼气工程将会是沼气技术发展的必然趋势。

在我国沼气技术大发展的同时,许多专著也相继出版。这些专著有的侧重基础理论介绍,有的侧重设计、施工与运行,有的侧重农村户用型沼气池。还缺少系统介绍沼气工程理论和技术的书籍。本书作者总结几十年经验,参考国内外文献资料,着眼整个沼气工程技术链,系统介绍了沼气工程各个功能单元,如沼气生产原料、原料预处理、沼气发酵工艺、沼气发酵装置材料与结构、沼气储存、沼气净化与提纯、沼气利用、沼渣沼液利用、电气与控制、沼气工程系统设计的基本原理、技术特点以及设计、调试与运行需要注意的问题等,并从沼气发酵工艺、结构、设备、控制等不同专业角度介绍沼气工程设计建造要求与技术关键,力求集知识性、系统性、实用性于一体。尽量做到内容详实、深入浅出、重点突出。希望对沼气工程设计、运行管理以及决策人员有所裨益。

本书作者均为多年从事沼气工程研究、设计、建设和调试工作的专业人员,具有比较厚实的研究沉淀和丰富的沼气工程设计调试经验。同时,作者多次访问、考察过德国、丹麦等欧洲国家先进的沼气工程,及时吸收了国际上最新的沼气工程技术与管理经验。本书的成稿还得益于农业部沼气科学研究所和国内老一辈沼气科研工作者与工程技术人员长期科研积累和工程经验的总结,在此,对前辈们的贡献表示崇高的敬意。书稿完成后,相近专业的作者对内容进行了互相校核,邓良伟审校了所有章节,施国中研究员、雷云辉高级工程师、申禄坤注册工程师参与了部分章节的审校,在此表示感谢。

本书编著者较多,给统稿校稿带来很大难度,加之编者水平有限,错误在所难免,希望本书读者给予谅解并提出宝贵意见。

作者

2015年6月

目 录

第一章 沼气生产原料	1
1.1 沼气发酵原料表征参数	1
1.2 沼气发酵原料产量与特性	4
1.2.1 农业类发酵原料	4
1.2.2 工业类发酵原料	10
1.2.3 市政废弃物类发酵原料	12
1.2.4 水生植物废弃物原料	14
1.3 原料的适应性和供应保障	15
参考文献	17
第二章 原料预处理	19
2.1 原料收集与运输	19
2.1.1 粪便类原料	19
2.1.2 秸秆类原料	19
2.2 原料贮存	20
2.2.1 秸秆贮存仓	21
2.2.2 液态原料贮存池	22
2.2.3 固态原料堆棚	22
2.3 除杂	23
2.3.1 格栅	23
2.3.2 除砂	27
2.4 提质	32
2.4.1 物理预处理	32
2.4.2 化学预处理	37
2.4.3 生物预处理	38
2.4.4 组合预处理	39
2.5 消毒	40
2.6 沼气发酵装置进料	41
2.6.1 液态原料的输送	41

2.6.2 固态原料的输送	44
2.6.3 液态原料的进料	44
2.6.4 固态原料的进料	45
参考文献	47
第三章 沼气发酵工艺	50
3.1 沼气发酵的生化过程	50
3.2 沼气发酵微生物	51
3.2.1 发酵性细菌	52
3.2.2 产氢产乙酸菌	52
3.2.3 耗氢产乙酸菌	52
3.2.4 产甲烷菌	52
3.2.5 硫酸盐还原菌	53
3.2.6 产酸菌与产甲烷菌之间的速率平衡	53
3.3 沼气发酵过程的优化	53
3.3.1 保持沼气发酵装置内足够数量的微生物	54
3.3.2 提高微生物的活性	55
3.3.3 加强微生物与底物的传质效果	59
3.4 沼气发酵工艺参数	60
3.4.1 沼气产量评估	60
3.4.2 水力停留时间	60
3.4.3 固体停留时间	60
3.4.4 水力负荷	61
3.4.5 有机负荷	61
3.4.6 容积产气率	62
3.5 沼气发酵装置容积确定	62
3.5.1 根据水力停留时间计算	62
3.5.2 根据投配率计算	62
3.5.3 根据容积负荷计算	63
3.5.4 根据容积产气率计算	63
3.6 沼气工程发酵工艺	64
3.6.1 完全混合式厌氧反应器	64
3.6.2 厌氧接触	68
3.6.3 厌氧滤池	71
3.6.4 升流式厌氧污泥床	73
3.6.5 厌氧颗粒污泥膨胀床	76
3.6.6 内循环厌氧反应器	78

3.6.7 厌氧序批式反应器	80
3.6.8 厌氧复合反应器	83
3.6.9 厌氧挡板反应器	84
3.7 沼气发酵装置启动与运行	85
3.7.1 沼气发酵装置调试启动	85
3.7.2 沼气发酵装置运行	87
参考文献	89
第四章 沼气发酵装置材料与结构	92
4.1 钢筋混凝土结构沼气发酵罐	92
4.1.1 材料	93
4.1.2 钢筋混凝土结构发酵罐设计的一般规定	95
4.1.3 沼气发酵罐基础设计	96
4.1.4 沼气发酵罐承载能力极限状态计算	97
4.1.5 沼气发酵罐正常使用极限状态验算	99
4.1.6 钢筋混凝土沼气发酵罐结构设计	100
4.1.7 配件及相关要求	101
4.2 钢板焊接结构沼气发酵罐	105
4.2.1 材料选用	105
4.2.2 焊接钢结构沼气发酵罐设计的一般规定	106
4.2.3 焊接钢结构沼气发酵罐结构设计	106
4.3 钢板卷制结构沼气发酵罐	117
4.3.1 卷制设备	117
4.3.2 材料	118
4.3.3 制作过程	118
4.3.4 防腐	120
4.3.5 基础	120
4.4 搪瓷钢板拼装结构沼气发酵罐	121
4.4.1 板块的选择	121
4.4.2 罐壁强度计算	122
4.4.3 罐体拼装	122
4.4.4 罐底安装	123
4.5 沼气发酵罐检验	124
4.5.1 对沼气发酵罐基础的基本要求	124
4.5.2 沉降观测	124
4.5.3 试水试压	126
参考文献	126

第五章 沼气储存	128
5.1 湿式储气柜	128
5.1.1 材料	130
5.1.2 设计	131
5.1.3 附属结构和设施	133
5.2 干式储气柜	133
5.2.1 刚性结构干式储气柜	133
5.2.2 柔性结构干式储气柜	135
5.3 产气储气一体化装置	141
参考文献	142
第六章 沼气净化与提纯	143
6.1 沼气特性与质量要求	143
6.1.1 沼气成分	143
6.1.2 不同沼气利用方式的质量要求	145
6.2 沼气净化技术	146
6.2.1 沼气脱水	146
6.2.2 沼气脱硫	149
6.2.3 除氧气、氮气	153
6.2.4 去除其他微量气体	153
6.3 沼气提纯技术	154
6.3.1 变压吸附 (PSA)	155
6.3.2 水洗	156
6.3.3 有机溶剂物理吸收	158
6.3.4 有机溶剂化学吸收	160
6.3.5 膜分离	161
6.3.6 低温提纯	163
6.3.7 沼气提纯技术的经济比较	163
参考文献	166
第七章 沼气利用	168
7.1 集中供气	168
7.1.1 用气量	168
7.1.2 供气压力	168
7.1.3 供气管网	169
7.1.4 气压调节	171
7.1.5 供气管道系统安装	174
7.1.6 居民生活用气	179

7.1.7 公共建筑(商业)用气	182
7.2 沼气发电	184
7.2.1 沼气发电机组	185
7.2.2 沼气发电余热利用	188
7.2.3 沼气发电并网系统	188
7.2.4 沼气发电对气质的要求	188
7.2.5 发电机组选型	189
7.3 沼气用作机动车燃气	190
7.3.1 沼气用作机动车燃料的气质要求	190
7.3.2 车用生物甲烷气的运输	190
7.3.3 压缩装置	191
7.3.4 储气罐	192
7.3.5 加气站设计基本原则	192
7.4 注入天然气管网	193
7.4.1 沼气注入天然气管网的气质要求	193
7.4.2 沼气提纯注入天然气管网	194
7.4.3 沼气不经提纯注入管网	196
参考文献	197
第八章 沼渣沼液利用	199
8.1 沼气发酵过程中营养物的转化及卫生效果	199
8.1.1 有机物降解	199
8.1.2 气味减少	199
8.1.3 卫生效果	199
8.1.4 破坏杂草种子	200
8.1.5 避免烧苗	201
8.1.6 肥效改进	201
8.2 沼渣沼液特性与质量标准	201
8.2.1 营养成分	201
8.2.2 污染物	203
8.2.3 卫生性能	204
8.2.4 质量标准	205
8.3 沼渣沼液质量管理	207
8.3.1 发酵原料质量管理	207
8.3.2 发酵过程质量管理	211
8.3.3 沼渣沼液测试	213
8.3.4 沼渣沼液储存	213

8.4 沼渣沼液农田利用	215
8.4.1 土地承载能力	215
8.4.2 沼渣农田利用方法	216
8.4.3 沼液农田利用方法	218
8.4.4 沼渣沼液施用机具	218
8.5 沼渣沼液的其他利用	220
8.5.1 沼渣沼液就地循环利用	220
8.5.2 能源利用	220
8.5.3 其他利用	220
8.6 沼渣沼液加工	221
8.6.1 固液分离	221
8.6.2 沼渣深加工	223
8.6.3 沼液深加工	224
参考文献	225
第九章 电气与控制	227
9.1 变配电系统	227
9.1.1 主接线	227
9.1.2 电负荷	228
9.1.3 电线和电缆	229
9.2 防雷保护	230
9.2.1 防雷装置	230
9.2.2 沼气工程防雷措施	231
9.3 电动机的继电-接触控制	233
9.3.1 继电-接触控制电路常用控制元件	233
9.3.2 三相异步电动机继电-接触控制电路	235
9.4 检测、控制仪表	237
9.4.1 检测仪表	238
9.4.2 显示仪表	240
9.4.3 控制仪表	241
9.4.4 执行器	242
9.4.5 自动化仪表盘	242
9.5 微机测控系统	243
9.5.1 微机测控系统的组成和分类	243
9.5.2 微机测控系统的智能元、器件	244
9.5.3 微机测控系统的设计原则	249
9.6 沼气工程微机测控方案案例	249

9.6.1 顺序及逻辑控制方案	249
9.6.2 沼气发酵反应器测控方案	250
参考文献	252
第十章 沼气工程系统设计	253
10.1 站址选择与布局	253
10.1.1 站址选择	253
10.1.2 沼气站平面布置	253
10.1.3 沼气站高程布置	257
10.2 管道、泵与阀门	258
10.2.1 管道	258
10.2.2 泵	260
10.2.3 阀门	262
10.3 沼气发酵装置的保温与加热	263
10.3.1 保温材料	263
10.3.2 加热	264
10.3.3 沼气工程热工计算	265
10.3.4 保温制作	273
10.4 给水及消防	277
10.4.1 给水系统	277
10.4.2 消防	278
10.5 安全防护	281
10.5.1 防火防爆	281
10.5.2 防毒防窒息	282
10.5.3 其他防护措施	282
10.6 职业卫生与防护	283
10.6.1 职业危害类别	283
10.6.2 职业危害防控	284
参考文献	286

第一章 沼气生产原料

发酵原料是维持沼气工程正常运行最基本的物质保障，只有充足的发酵原料才能保证沼气发酵微生物正常的生命活动，进行旺盛的、不间断的沼气生产。在一些沼气工程的设计过程中，一些人员盲目建设大规模的发酵装置，忽略发酵原料在沼气生产中的作用，造成建设成本的浪费，导致沼气发酵装置的利用效率不高。因此，原料数量与发酵装置容积的匹配十分重要。此外，不同的原料在物理、化学和生物学方面也有着不同的特性，要求采用的沼气发酵工艺也有所区别。本章首先介绍表征沼气发酵原料的几种重要参数，在此基础上，分别介绍农业类发酵原料、工业类发酵原料、市政废弃物和水生生物废弃物发酵原料的产生量、理化特性和产气性能，最后介绍原料保障方面需要注意的问题。

1.1 沼气发酵原料表征参数

1. 总固体 (Total Solid, TS)

总固体是指发酵原料在一定温度下蒸发、烘干后所剩余残渣的量，国外又称干物质 (Dry Matter, 简称 DM)，包括悬浮固体 (SS) 和溶解性固体 (DS) 两部分。可选用的烘干温度为 103~105℃ 或 180℃，选用 103~105℃ 烘干时总固体会保留结晶水和部分附着水，选用 180℃ 烘干时可除去全部附着水，通常情况下选用 103~105℃ 烘干。总固体的缺点是不能反映有机物的含量。TS 通常用百分含量表示，DM 通常用 g/L 或 mg/L 表示。TS 计算方法如下：

$$TS (\%) = \frac{W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中， W_1 为烘干前原料质量，单位是 g； W_2 为烘干后原料质量，单位是 g。

2. 悬浮固体 (Suspended Solid, SS)

悬浮固体是指发酵原料中不能通过一定孔径滤膜的固体物质，以 g/L 或 mg/L 表示。通常选用孔径为 0.45μm 滤膜过滤原料，经 103~105℃ 烘干后得到悬浮固体含量。

3. 挥发性固体 (Volatile Solid, VS)

将总固体在 550±50℃ 下灼烧 1h 后，剩余的固体为灰分，总固体减去灰分即为挥发性固体，国外又称有机干物质 (Organic Dry Matter, 简称 ODM)。挥发性固体主要包括原料中悬浮物、胶体和溶解性物质中的有机质。VS 通常用百分含量表示，ODM 通常用 g/L 或 mg/L 表示。VS 通常有两种表示方法，一种是挥发性固体占总固体的比例，计算方法为：

$$VS/TS (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_2} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中， W_3 为灰分质量，单位是 g。

另一种是挥发性固体占原料的比例，计算方法为：

$$VS(\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中, W_1 , W_2 和 W_3 的意义与式 (1-1)、式 (1-2) 相同。

4. 挥发性悬浮固体 (Volatile Suspended Solid, VSS)

将悬浮固体在 $550 \pm 50^\circ\text{C}$ 下灼烧 1h 后, 挥发的物质质量即为挥发性悬浮固体, 通常以 g/L 或 mg/L 表示。

5. 化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)

化学需氧量是指用化学氧化剂在加热条件下氧化原料中的物质所消耗氧化剂的量, 通常用氧消耗量表示, 以 mg/L 或 g/L 计。常用的氧化剂主要是重铬酸钾和高锰酸钾, 以重铬酸钾为氧化剂时测得的值称 COD_{Cr} , 简称 COD; 用高锰酸钾为氧化剂时测得的值称 COD_{Mn} 或高锰酸钾指数。COD 表征的是采用化学的方法原料中可被氧化的有机物质以及少量无机物的量, 也表示了原料中最大的化学能。常用的测试方法有重铬酸钾法、库仑法、快速密闭催化消解法 (含光度法)、节能加热法、氯气校正法等。

6. 生化需氧量 (Biochemical Oxygen Demand, BOD)

生化需氧量是指好氧条件下微生物将原料中的有机物分解所消耗氧的量, 以 mg/L 或 g/L 表示。由于微生物生化过程进行缓慢, 所以一般在 20°C 条件下原料经 5 天培养所消耗氧的量来表示, 记作 BOD_5 。 BOD_5 表征的是原料中可被微生物分解的有机物的量。常用的测试方法有稀释接种法、微生物传感器快速测定法、活性污泥曝气降解法等。

7. 总有机碳 (Total Organic Carbon, TOC)

总有机碳是以碳的含量表示原料中有机物质总量的综合指标。由于 TOC 的测定方法采用燃烧法, 因此能将有机物全部氧化, 所以它比 COD 或 BOD_5 更能准确表示原料中有机物的总量。主要测试方法有氧化燃烧-非分散红外吸收法、电导法、气相色谱法、湿法氧化-非分散红外吸收法等。

8. 可消化性

可消化性是指原料在沼气发酵过程中可被微生物降解的能力, 废水处理工程中通常称为可生物降解性或可生化性, 是表征原料特性的重要参数。对于特定的原料, 可消化性取决于原料中易降解有机物质的含量。同时, 沼气发酵原料中也含有一定量的难降解物质, 例如, 木质素、酚类等。此外, 原料中不同组分的降解也需要不同时间。在厌氧条件下, 小分子碳水化合物、挥发性脂肪酸和乙醇在几小时内就会降解, 蛋白质、半纤维素和脂类等物质的降解需要几天, 纤维素类物质的降解则需要几周才能完成。一些发酵原料含有油脂类物质, 这类物质沼气产量高、降解时间长, 相对于易降解物质来说, 需要建设容积更大的沼气发酵装置。但是, 在实际的设计当中, 从建设成本上考虑, 必须将获取最大沼气产量和缩短停留时间两个因素综合考虑。

用 BOD_5 和 COD 的比值也可表示原料的可消化性。COD 和 BOD_5 是两个常用的间接表示原料中有机物含量的指标, COD 采用化学氧化方法测得, BOD_5 采用微生物氧化测得。COD 中有一部分难以被微生物氧化降解的物质, 所以 COD 大于 BOD_5 。对于同一类原料, 通常采用 BOD_5 与 COD 的比值来表示原料可被生化分解的程度。一般认为 BOD_5/COD 小于 0.3 时, 原料难以生物降解, 不适合作为沼气发酵原料。正因为 COD 大于 BOD_5 , 所以在进行沼气发酵工艺设计时, 单纯的追求高 COD 去除率没有意义, 必须

考虑可生化部分有机物的降解率。

9. 碳氮比

碳氮比是指原料中碳元素含量与氮元素含量的比值,用 C/N 表示。碳元素为微生物活动提供能源,是形成甲烷的主要元素。氮元素是构成微生物细胞的主要物质。通常认为,沼气发酵原料的 C/N 宜为 20:1~30:1 (2009)。需要注意的是,并不是所有的碳元素和氮元素都可以被微生物所利用。例如,木质素、纤维素、半纤维素、葡萄糖都是碳元素的来源,但是厌氧微生物对木质素和葡萄糖的降解和利用能力就相差很多。当碳氮比过高时,沼气发酵过程不易启动,产气效果不好;当碳氮比过低时,过量的氮会转化成游离氨,造成氨中毒现象,抑制沼气发酵过程的正常进行。

10. pH

pH 是指液态原料中氢离子浓度的负对数, $\text{pH} = -\lg [\text{H}^+]$ 。测试方法包括玻璃电极法、便携式 pH 计法和试纸法等。对于半固态和固态原料,可以将样品和一定量的蒸馏水混合均匀后进行测试。由于沼气发酵体系具有较高的缓冲能力,发酵原料的 pH 可以是一个较宽的范围。总的来说,沼气发酵体系的缓冲能力决定于气体中二氧化碳的浓度、料液中氨的浓度和含水量。如果原料的 pH 过高或过低,超过了发酵体系的缓冲能力,应在进料之前将原料中和。如果在发酵过程中,发酵料液出现了轻微的酸化,应停止进料;若酸化现象较为严重,应在停止进料的同时,增加产甲烷菌种或采用草木灰、熟石灰中和发酵料液;更严重的酸化应进行大换料。

11. 原料产气率 (Biochemical Methane Potential, BMP)

原料产气率又称生物产甲烷势,由斯坦福大学 McCarty 课题组提出,表示发酵原料中有机物可被厌氧微生物降解的数量。由于大多数有机物不管在厌氧条件下或好氧条件下都可以被降解,所以 BMP 和 BOD 在大多数情况下的数值是接近的,只有原料可生物降解性较差时, BMP 和 BOD 在数值上才出现较大的差距 (2001)。

我国常用原料产气率来表示单位数量原料的沼气产量。含悬浮物较高的原料常用单位质量的总固体产气率 (m^3/kgTS) 或单位质量的挥发性固体产气率 (m^3/kgVS) 来表示,含悬浮物较低的原料常用单位质量的 COD 产气率 (m^3/kgCOD) 来表示。原料产气率有进料 TS、VS、COD 产气率和去除的 TS、VS、COD 产气率之分,前者单位为 $[\text{m}^3/\text{kgTS} (\text{VS 或 COD}) \text{ 添加}]$,后者单位为 $[\text{m}^3/\text{kgTS} (\text{VS 或 COD}) \text{ 去除}]$,未特别注明时,一般是指进料产气率。原料产气率通常采用单一原料批式发酵的方法来进行测试。

对于同一类发酵,不同文献介绍原料产气率数值有很大差异,主要是因为原料产气率通常有理论值、实验值和生产经验值。有的文献介绍原料产气率时,没有很好区分。碳水化合物的原料产气率理论值大约为 $0.37\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kgTS}$ 。当用 COD 作为原料浓度单位时,理论产气率为 $0.35\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kgCOD}$ 。实验值是采用一定方法在实验室测得的最大原料产气率,一般为理论值的 70% 左右。生产经验值是通过生产实践总结得出的原料产气率数值。

【例 1-1】 式 (1-4) 为葡萄糖生成甲烷和二氧化碳的理论化学反应方程式,每摩尔的葡萄糖理论上可以产生 3mol 的甲烷。葡萄糖的相对分子质量为 180,经计算每克葡萄糖在标况下 ($T=273\text{K}$, $p=1.01\times 10^5 \text{Pa}$) 完全反应可以产生 0.373L 甲烷气体。



若以 COD 计算, 1mol 葡萄糖相当于 192g COD, 经计算每克 COD 在标况下 ($T=273\text{K}$, $p=1.01\times10^5\text{Pa}$) 完全反应可以产生 0.350L 甲烷气体。

表 1-1 中给出了糖、蛋白质、脂肪这三种有机物的理论产气率。

表 1-1 三种主要有机理论产气量

有机物种类	原料产气率/ (m^3/kg)	
	甲烷	沼气
糖类	0.370	0.75
蛋白质	0.490	0.98
脂肪	1.040	1.44

1.2 沼气发酵原料产量与特性

理论上, 绝大部分有机物都可以作为沼气发酵原料, 这里将常用的沼气发酵原料分为四类: 农业类发酵原料、工业类发酵原料、市政废弃物类发酵原料和水生植物废弃物发酵原料, 并对其用作沼气发酵原料的优缺点、产量和产气特性进行论述。需要说明的是, 下文列举的不同发酵原料的产量及产气特性的数据, 是根据大量文献的报道以及工程调研获得, 具有一定的代表性, 但并不代表该类原料在任何条件的特性参数, 特别是原料产量数据, 应尽量以现场实测数据为准, 在无法得到实测数据的情况下, 进行沼气产量评估和沼气工程设计时, 可参考文中给出的数据。

1.2.1 农业类发酵原料

农业类废弃物是沼气工程最主要的发酵原料, 包括农业生产产生的废弃物和副产品。最主要的是畜禽养殖废弃物——粪便和污水。此外, 农作物废弃物和副产品 (各类秸秆、青草、废弃水果等) 也占较大的比例。在过去的十几年, 一些新的发酵原料也被广泛使用, 特别是在德国、奥地利、丹麦等国的沼气工程中, 其中最重要的就是能源植物, 主要包括木薯、甜菜、向日葵等。

1. 畜禽粪便

千百年来, 粪便污水直接还田作为有机肥料是养殖粪污处理最主要的方法。随着养殖规模的扩大和数量的增加, 养殖业污染日益严重。为了解决畜禽污染问题, 世界各国相继颁布了系列法律法规, 并开发了不同处理技术, 沼气发酵是最有前景的技术。近年来, 为了应对气候变化, 减少温室气体——甲烷的排放, 采用沼气发酵的方法处理利用畜禽粪污受到广泛的重视。据不同学者的估算, 我国畜禽粪便的年产量在 22.35~32.64 亿吨 (2006), 据此计算, 我国每年畜禽粪便的产沼气潜力在 1200 亿 m^3 左右。

畜禽粪污的产量, 一般通过产排污系数结合畜禽的存栏或出栏量来计算。畜禽养殖业的产排污系数是畜禽粪污处理工程设计的重要基础参数, 欧洲、美国、日本相继建立了畜禽粪便产排污系数的数据库。我国在畜禽粪污防治方面也做了大量的研究, 在《家畜粪便学》和《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查与防治对策》中, 给出了不同畜禽的粪污产生量的数据 (1997)。2009 年农业部科技教育司和第一次全国污染源普查领导

小组办公室联合发布了《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》，该手册对畜禽养殖业的产污系数、排污系数给出了定义，提出了畜禽养殖业粪污量的计算方法，并给出了我国不同地区的畜禽粪污排放系数、COD产生系数和氮磷含量（2009）。表 1-2 中给出的不同地区主要畜禽产污系数全部源自《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》。需要注意的是，表中产污系数是根据畜禽在不同的饲养阶段和体重下测得的数据，如果畜禽实际体重与参考体重不符，可以按照式（1-5）计算：

$$FP(FD)_{\text{site}} = FD(FD)_{\text{default}} \times W_{\text{site}}^{0.75} / W_{\text{default}}^{0.75} \tag{1-5}$$

式中， $FP(FD)_{\text{site}}$ 为折算后的产污系数； $FD(FD)_{\text{default}}$ 为表中给出的产污系数； W_{site} 为畜禽实际体重； W_{default} 为表中给出的参考体重。

表 1-3 给出的是其他畜禽的粪尿收集系数。另外，在用作沼气发酵原料计算时，还需考虑粪污的收集率。例如，奶牛粪便的收集率通常在 70% 左右，肉牛粪便的收集率在 80% 左右，夏季的收集率要低于冬季的收集率。猪、鸡等不需室外活动的畜禽粪污的收集率为 100%（2008）。