

马孝善 方士

厌氧消化技术



YANYANG
XIAOHUA JISHU

浙江科学技术出版社

厌氧消化技术

冯孝善 编著
方 士

浙江科学技术出版社

责任编辑：李卓凡

封面设计：詹良善

厌氧消化技术

冯孝善 方士 编著

*

浙江科学技术出版社出版

浙江新华印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本787×1092 1/32 印张9.5 字数212,000

1989年7月第 一 版

1989年7月第一次印刷

印数1—1,300

ISBN 7-5341-0179-4/X·1

定 价：3.50 元

内 容 提 要

本书是关于污水废物的厌氧消化处理技术的专著。全书分六章，分别介绍有关厌氧消化技术的基本过程与效用，污水与水质控制的基本知识，厌氧消化的工艺条件与工艺类型，厌氧消化的设计基础，以及厌氧消化系统运行的管理等内容。本书可供从事环境保护、给水排水、生物质能源开发利用等方面工作的技术人员、科研人员、管理干部以及大专院校有关专业的师生参考。

序

能源的开发和利用与国民经济的发展和人民生活水平的提高密切相关。根据能源科学家的预测，本世纪末到21世纪初，人类在能源利用上将发生第三次重大的变革。可再生能源中的生物质能源将在下世纪能源构成中占重要的地位。

沼气发酵是生物物质有效的转换技术之一，近十多年来在我国得到了较快的发展，并取得了丰硕的成果。为了进一步推动我国生物质能的利用，尤其是沼气的开发和利用，我们组织了浙江农业大学有关同志编写了《沼气发酵微生物学》、《厌氧消化技术》和《生物质能源概论》三本书稿交浙江科学技术出版社出版。

这是一项新的工作，由于我们在组织、审定等方面还缺少经验，如有错误和不足之处，请读者批评指正。

农牧渔业部农村能源环保办公室

1985年

前 言

随着人类活动的发展和人口的增长，大量的生活和工农业污水废物排入江河、湖泊和海洋，污染水源，破坏生活环境和生态环境，危害生产和人们的健康。由于生产和生活用的能源耗用量日益增加，矿物能源渐趋枯竭，造成能源供应紧张，成为影响社会经济发展的一个障碍。因此，防治污染，保护环境；节约能源，开发利用新能源，解决能源短缺的问题，已成为世界各国面临的重大任务。

在我国，保护和改善生活环境及生态环境，防治污染和自然环境破坏，已定为社会主义现代化建设中的一项基本国策，在能源建设上，制定了开发能源和节约能源并重的方针。

污水废物的厌氧消化处理，可以节约处理的能耗和处理设施的占地面积，剩余污泥生成量低；可使污水废物中的生物质能源转换成沼气，供燃用发电，便于控制污水废物中病原虫卵的传播；还是一种积制肥料的有效途径。因此，这是一项防治污染，同时开发利用生物质能源的污水废物的处理技术。它将治污、产气、综合利用三者相结合，使废物资源化，环境效益与经济效益相统一。无疑，发展污水废物厌氧消化处理技术的研究和应用，符合我国国情和我国环境保护与能源建设的方针政策。在国际上，这种产能或低能耗的厌氧处理技术也日益受到各国的高度重视，它的研究和推广应用正日益加强。

有关厌氧消化技术生物学原理的沼气发酵作用，已在本书的姐妹卷《沼气发酵微生物学》中论述；有关农村沼气发酵的

技术，已在《沼气工艺学》（徐曾符主编，农业出版社，1981）作了具体介绍，因此，本书主要从城乡污水废物的处理出发，介绍厌氧消化技术。为便于初次从事污水处理工作的读者参考，特将污水与水质控制方面的基本知识列为一章，作概括的介绍。

近代，国内外各种厌氧消化技术的发展较快，但除某些国家的污水污泥常规厌氧处理技术外，从总体来看，从装置到工艺尚未形成完善成熟的系统；新工艺尚缺少在生产上大规模和广泛应用的资料，以致本书的内容也难免有局限之处。然而，即便如此，我国近年来通过充分运用现有的有关资料，研究与应用密切配合，厌氧消化技术正迅速发展，并充分发挥它的经济效益和社会效益。

本书在作者为攻读生物质能研究方向与厌氧消化研究方向硕士研究生上课的讲稿基础上改写而成。现编入书中的“厌氧消化系统设计基础”一章的初稿为郑平与竺建荣两位同志所写。限于我们的水平，书中难免存在尚欠确切之处，敬希读者指正。

冯孝善

浙江农业大学环保系

目 录

第一章 厌氧消化技术引论	1
第一节 厌氧消化技术的过程与应用	1
一、 厌氧消化技术的基本过程	1
二、 厌氧消化技术的应用场合	7
第二节 厌氧消化技术的效用和效益	11
一、 节省处理有机污水废物的动力	11
二、 开发污水废物中的生物质能源	13
三、 减少污水废物处理中剩余污泥的生成量	21
四、 厌氧消化技术在处理高浓度有机污水中的效用	27
五、 厌氧消化技术处理污水的其他效用	32
六、 厌氧消化技术的经济效益	35
第三节 厌氧消化技术的展望	47
一、 回顾厌氧消化技术发展历史的印象	47
二、 厌氧消化技术的展望	49
第二章 废(污)水的特性及其水质控制	57
第一节 废水的特性	57
一、 废水的种类	58
二、 废水中的污染物及其特性	59
三、 废水的流量及其估算	63
第二节 废水水质控制基础	65
一、 废水水质控制标准	65
二、 控制水质的基本途径	69
三、 废水处理系统	69
四、 废水处理方法的评价与选择	72

五、 废水的生物可处理性评价	79
第三章 厌氧消化的工艺条件	82
第一节 厌氧条件	82
一、 厌氧消化作用的氧化还原电位条件	82
二、 氧化还原电位条件的影响因素与控制	85
第二节 温度条件	86
一、 温度条件的工艺类型	86
二、 温度条件对厌氧消化效用的影响	89
三、 温度条件的控制	91
第三节 酸碱度	94
一、 厌氧消化的 pH 值条件	94
二、 厌氧消化的碱度条件	97
三、 厌氧消化酸碱度条件的控制	98
第四节 搅拌	100
一、 搅拌的功用	100
二、 搅拌的方法	102
第五节 物料的性质	103
一、 可溶性与固态废物的粉碎度	103
二、 化学成分	104
三、 物料中微生物营养元素含量间的比例	105
四、 物料的碳氮比例	106
第六节 有机质负荷	108
一、 有机质负荷对厌氧消化效率的影响	108
二、 有机质负荷的控制	110
第七节 厌氧活性污泥	113
一、 厌氧活性污泥的浓度对废物处理效率的影响	113
二、 厌氧活性污泥的性质对废物处理效率的影响	114
第八节 抑制性或毒性物质的影响	116
一、 碱或碱土盐	116
二、 氨	118

三、 硫化物	119
四、 重金属	121
五、 其他抑制性或毒性物质	123
六、 添加剂	124
第九节 厌氧消化工艺条件的灵敏度	125
一、 工艺条件的灵敏度	125
二、 灵敏度指标	128
第四章 厌氧消化的工艺类型	130
第一节 厌氧消化工艺的基本类型	130
一、 分批厌氧消化、连续厌氧消化和半连续厌氧消化	130
二、 液体厌氧消化与固体厌氧消化	134
三、 一步厌氧消化与两步厌氧消化	139
四、 其他类型	150
第二节 厌氧消化器的基本类型	154
一、 常规厌氧消化器	154
二、 第一代厌氧消化器与第二代厌氧消化器	157
三、 悬浮生长型和附着生长型厌氧消化器, 混合式和塞流式厌氧消化器	160
第三节 几种重要的第二代厌氧消化器	162
一、 厌氧滤器	162
二、 上流式厌氧污泥床反应器	170
三、 厌氧流化床反应器与厌氧附着膜膨胀床反应器	179
四、 管道厌氧消化器	184
第五章 厌氧消化系统设计基础	190
第一节 厌氧消化动力学	190
一、 微观动力学和宏观动力学	190
二、 速度限制步骤	191
三、 基本动力学关系	191
四、 消化过程动力学	194
第二节 厌氧消化动力学常数的测定	207

一、 实验室测定用的厌氧消化反应器.....	203
二、 图解法求厌氧消化动力学常数.....	209
第三节 厌氧消化系统设计.....	217
一、 厌氧消化系统设计原则.....	218
二、 工艺设计参数.....	225
三、 厌氧消化器的结构设计参数.....	230
四、 厌氧消化器的评价与选择.....	238
五、 热工计算.....	252
六、 贮气柜的设计与计算.....	263
七、 厌氧消化系统的安全要求.....	269
第六章 厌氧消化系统运行的管理	263
第一节 厌氧消化系统的起动	263
一、 接种.....	263
二、 起动的基木方式与影响起动的因素.....	268
三、 起动障碍的排除.....	274
第二节 起动后厌氧消化系统的管理	275
一、 欠平衡消化作用的症状及其起因.....	276
二、 欠平衡消化作用的控制与纠正.....	278
三、 厌氧消化系统污泥持留量的调节.....	279
四、 厌氧消化系统的“停车”与再启用.....	280
参考文献	281

第一章 厌氧消化技术引论

厌氧消化技术的生物学原理是沼气发酵作用，即有机物质在缺氧的条件下，通过微生物的分解作用最终生成沼气的过程。把这种作用应用于处理城乡工农业废物，可以使废物无害化，所得的沼气可供燃用或发电，具有明显的经济效益和社会效益。人类几乎在研究沼气发酵作用的同时，就开始了将这种作用应用于制取沼气或处理废物的实践。近代，在能源建设和环境保护事业的推动下，厌氧消化技术受到世界各国的重视，正在发展成为一项重要的防治环境污染和开发生物质能源的废物处理技术。

第一节 厌氧消化技术的过程与应用

一、厌氧消化技术的基本过程

厌氧消化 (Anaerobic digestion) 技术的基本过程，实质是沼气发酵 (Biogas fermentation) 工艺过程。通常将污水废物类 (含有机物质) 物料，投入厌氧的装置内进行发酵，使其中有机质组分进行生物降解，并转化生成沼气。一般沼气含可燃性气体甲烷 50~70% (可供燃用)，含二氧化碳约 30~35%，还含少量其他气体，如氢、氨和硫化氢等。工艺过程的基本流程如图 1—1 所示。

1. 废物中有机质沼气发酵的总反应 各种废物在沼气发酵中的总反应，可用有机物 ($C_xH_yO_zN_j$) 转化成为甲烷、二氧化

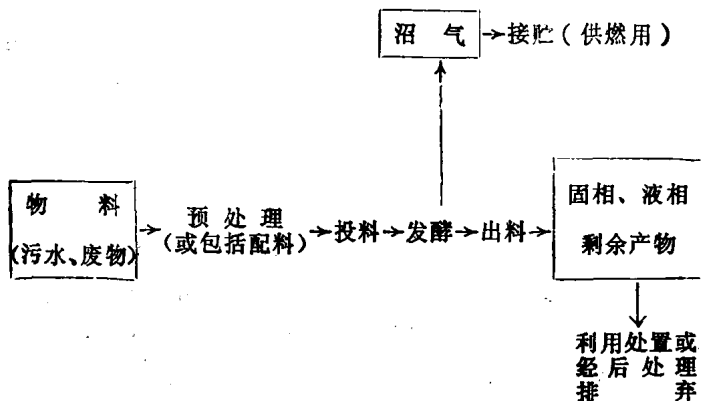
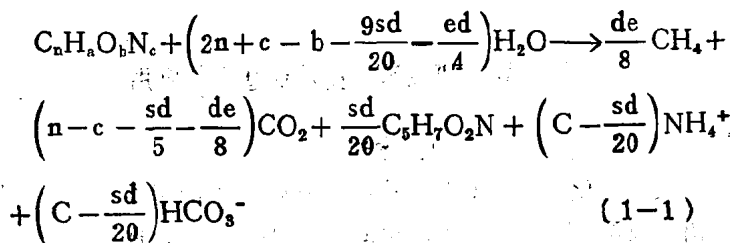


图 1-1 沼气发酵工艺的基本流程

碳和微生物细胞 ($C_5H_7O_2N$) 等产物的化学经验方程式表示 (McCarty, 1974):



式 1-1 中, 括号内的符号和数值为反应的平衡系数; 其中: $d = 4n + a - 2b - 3c$ 。s 值代表转化成细胞的部分废物, e 值代表转化成沼气的部分废物。

设 $s + e = 1$ (1-2)

s 值随废物成分、发酵装置中固体物质平均滞留时间 (Average solids retention time) (θ_c) 和微生物细胞本身腐解速度 (b) 而变化如下:

$$S = a_e \frac{(1 + 0.2b\theta_c)}{(1 + b\theta_c)} \quad (1-3)$$

式 1—3 中, 0.2 代表细胞腐解的残留系数, a_e 为转化成细胞的废物的最大系数值。

表 1—1 举例几种废物组分沼气发酵的 a_e 值 (以 COD 计的比值)。

表 1—1 几种废物组分沼气发酵的 a_e 值 (McCarty, 1972)

废物组分	碳水化合物	蛋白质	脂肪酸	生活污水污泥
化学式	$C_6H_{10}O_5$	$C_{16}H_{24}O_5N_4$	$C_{16}H_{32}O_2$	$C_{10}H_{19}O_3N$
a_e	0.28	0.08	0.06	0.11

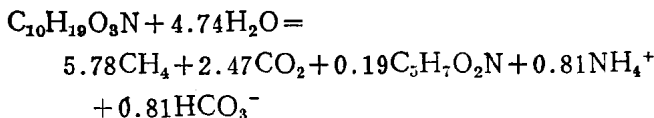
由式 1—1 的化学方程式也可以计算废物沼气发酵的有关参数。

例如, 生活污水污泥 ($C_{10}H_{19}O_3N$) 沼气发酵时, 假设平均滞留期 $\theta_c = 20$ 日, 细胞腐解速度 $b = 0.03/\text{日}$; $a_e = 0.11$ (按表 1—1)。将上述数值代入式 1—3, 即可得到 s 值:

$$S = 0.11 \frac{[1 + 0.2(0.03)(20)]}{[1 + 0.03(20)]} = 0.076$$

继而按式 1—2 可得到 $e = 1 - 0.076 = 0.924$,

最后代入式 1—1, 即得污水污泥沼气发酵的总反应式:



从此总反应式可见, 1 摩尔或 201 克的污水污泥, 在滞留期间为 20 日下沼气发酵, 可以产生 5.78 摩尔或 129 升* 的甲烷,

* 由摩尔值换算成标准状态下体积值时, 乘以系数 22.4 (升); 或按每克 CH_4 乘以系数 1.4 (升) 计。

2.74摩尔或55.33升二氧化碳, 0.19摩尔或21.5克的微生物细胞, 0.81摩尔或40.5克的碳酸氢盐碱度(以 CaCO_3 计)。此外, 反应式还指出沼气中甲烷含量约为:

$$\frac{5.78(100)}{(5.78+2.47)}=70\%;$$

细胞生成率为污泥量的11%。

2. 废物沼气发酵中的主要细菌类群及其作用 通常, 各种废物的组分复杂, 在沼气发酵中, 这些组分有赖于多种细菌进行分解; 从废物的开始分解, 至最终生成沼气的整个发酵过程, 依靠三大主要类群的细菌联合作用完成, 即产酸发酵细菌的水解、产酸发酵作用, 产氢产乙酸细菌的产氢产乙酸发酵作用, 和产甲烷细菌的产甲烷发酵作用。而且, 其中任何一个类群微生物的数量过多或过少, 功能过于活跃或不活跃, 都会破坏彼此间作用的动态平衡, 从而导致发酵不正常甚至失败。

沼气发酵中的主要细菌类群及其所引起的作用, 见图1—2所作的概括(参考Stafford等, 1980; Schoberth, 1981设计)。

3. “沼气发酵”与“厌氧消化” 沼气发酵与厌氧消化这两个术语实质均指同一过程或技术, 只是人们对不同领域或从不同角度上选用不同。

“沼气发酵”主要体现微生物学过程生成主要最终产物沼气的含义, 通常限于微生物发酵作用的研究上, 和应用这一作用开发生物质能源、制取沼气的领域中采用。“厌氧消化”则着重体现这一过程使有机物质降解、并转化成为无害气体而去除的含义, 往往在处理污水废物的领域中使用。

然而, 除了应用厌氧消化技术处理污水的初期, 对所产生的沼气未考虑利用外, 近代, 即使在处理污水废物中所谓厌氧消化, 也同样注重利用沼气的含义, 甚至从能源方面考虑作

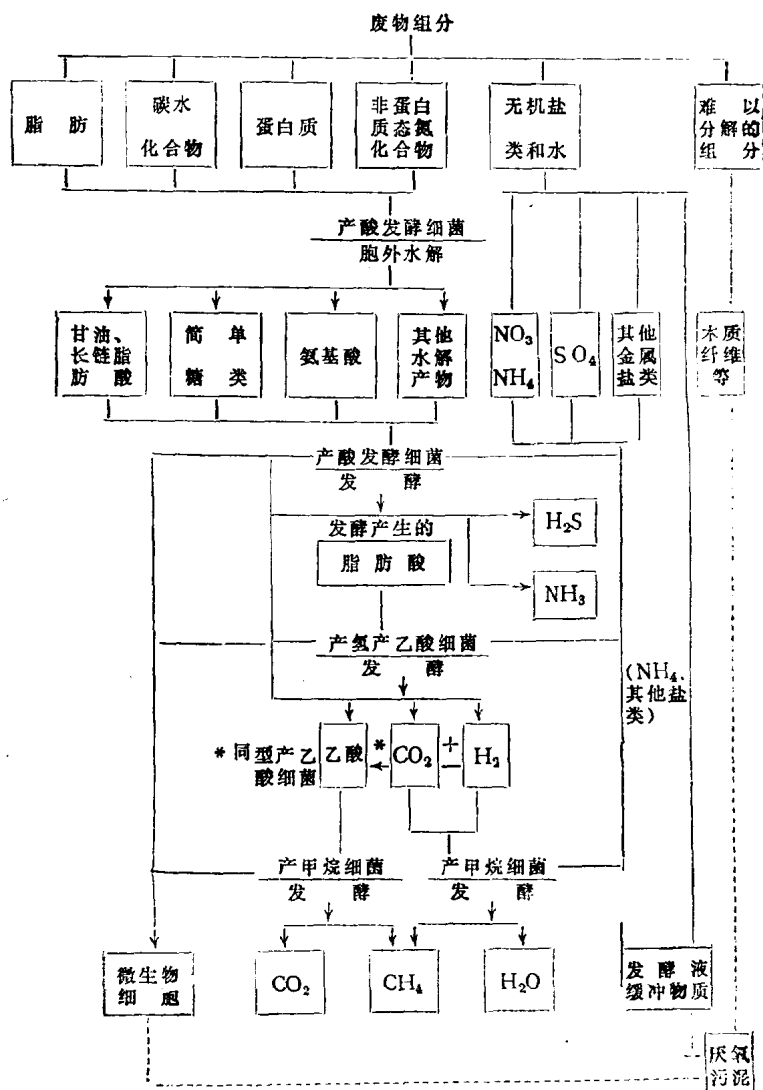


图 1-2 沼气发酵中主要细菌类群及其作用

为主要目标，来发展这一处理废物的技术。另一方面，在利用生物质能源制取沼气燃用为主要目的时，有时也称厌氧消化。因此，厌氧消化一词已应用较广，而且在厌氧消化技术应用的意义上，已经把处理废物与回收利用废物中的生物质能源这两者紧紧联系在一起了。

由于厌氧消化可以使污水废物中的绝大部分有机质彻底分解成为甲烷和二氧化碳为主的气体以及水（图1—3），只有小部分因难以降解和因转化成为微生物细胞体而以厌氧消化污泥的形式残存，故使有机物质在最大程度上消化去除。

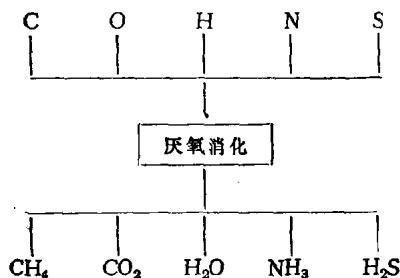
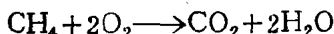


图1—3 厌氧消化的最终产物

甲烷被燃用时氧化成二氧化碳和水：



由此可见，有机物质经厌氧消化被最终分解成为大体上无害的气体和水，使废物无害化。这样的处理废物或处理的结果，又称为稳定废物或者废物稳定化 (Stabilization)，表示使废物转化成不再污染环境的稳定状态。

如果以其他类型的厌氧分解作用（即其他各种厌氧发酵作用）处理废物，除了有不可降解的成分和发酵微生物细胞体残留以外，有机物质只有一部分分解成为二氧化碳和水，而有相当部分仍然以有机质状态的发酵产物留存，于是还达不到在最