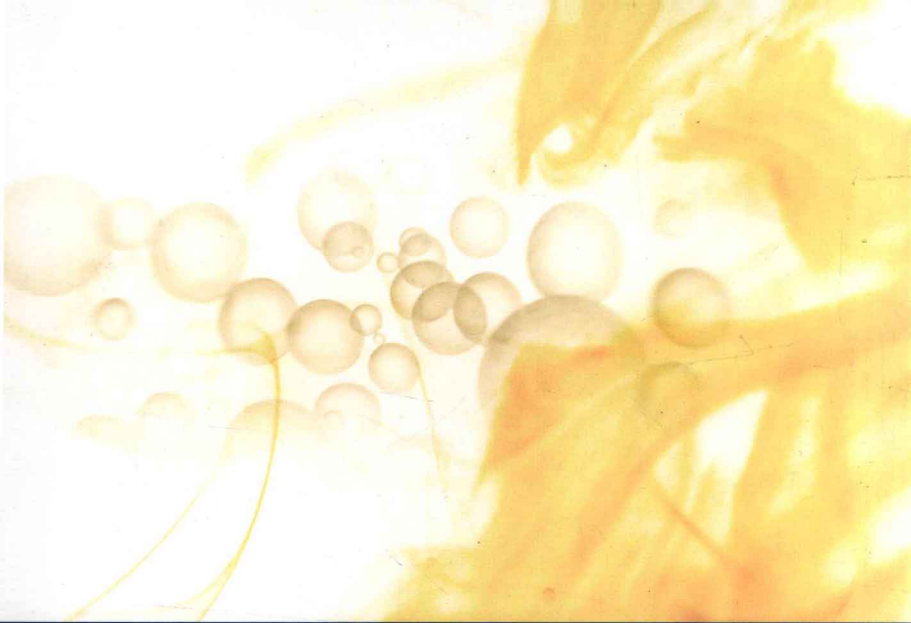




生物甲烷

(下册)

Biomethanation II

[丹] Birgitte K. Ahring 著

郭金玲 胡为民 龚大春 金 虎 译

邹 坤 黄永文 李天乐 审



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

生物甲烷

(下册)

Biomethanation II

[丹] Birgitte K. Ahring 著

郭金玲 胡为民 龚大春 金 虎 译

邹 坤 黄永文 李天乐 审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

Translation from English language edition;

Biomethanation II

by Birgitte K. Ahring

Copyright © 2003, Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

北京市版权局著作权合同登记号: 图字 01 - 2012 - 4018

图书在版编目 (C I P) 数据

生物甲烷. 下册 / (丹) 艾雯著; 郭金玲等译. --
北京: 中国水利水电出版社, 2012. 10

书名原文: Biomethanation II

ISBN 978-7-5170-0250-5

I. ①生… II. ①艾… ②郭… III. ①甲烷 IV.
①S216.4

中国版本图书馆CIP数据核字 (2012) 第240378号

书 名	生物甲烷 (下册)
原 书 名	Biomethanation II
原 著	[丹] Birgitte K. Ahring
译 者	郭金玲 胡为民 龚大春 金虎
审 定	邹坤 黄永文 李天乐
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	140mm×203mm 32 开本 6.625 印张 178 千字
版 次	2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	18.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

内 容 提 要

厌氧发酵生物技术具有能耗低、适应面广等特点，在生物能源和生物环保中具有巨大的应用前景。本书共4章，系统阐明了厌氧消化过程的应用，厌氧颗粒污泥和生物膜反应器，异生物质的厌氧生物转化，厌氧反应器的监测和控制。

本书不仅对沼气的生产具有指导意义，还可作为生物工程和生物科学学生以及科研工作者的参考学习用书。

郭金玲	三峡大学	化学与生命科学学院
胡为民	三峡大学	化学与生命科学学院
龚大春	三峡大学	化学与生命科学学院/ 艾伦麦克德尔米德再生能源研究所/ 新能源研究院
金 虎	武汉新华扬生物有限公司	
邹 坤	三峡大学	
黄永文	宜昌市环保研究所	
李天乐	安琪酵母股份有限公司	

原版 序言

1776 年 11 月, Alessandro Volta 完成他的经典实验, 搅乱一个浅湖的沉积物, 收集气体, 并演示这种气体具有可燃性。生物甲烷科学从此诞生。科学家和工程师一直致力于这种复杂的厌氧生物工艺, 以获得厌氧分解过程中有价值的甲烷气体。在 20 世纪, 开发了两条主要的工艺路线: 利用稳定的活性污泥厌氧消化, 从人畜粪便或家庭废弃物产生生物气。最近, 重点考虑厌氧处理的卫生效益和它对致病菌和其他污染源的影响。产生一个安全排放物在农耕地上重复利用与从特定废弃物中产生最大产率的沼气具有同等重要的作用。因此近几年提高温度消化已经成为主要趋势, 一直在发展中。

厌氧消化要求许多菌群在整个降解工艺中的一致行动, 完成它们的特定作用。在厌氧工艺中有细菌和古菌参与, 但无论怎么样, 真核微生物的重要性仍然不太清楚。在 20 世纪后期阐明了复杂的微生物群落的动力学基本规律, 引入了内在物种的氢转移, 并进行了验证。通过分离共生菌, 特别是挥发性脂肪酸中间体的氧化, 对理论给出了强烈支撑。最近利用分子技术为研究原位生物甲烷工艺中菌群提供工具。然而, 直到现在为止, 主要热点仍在于证明特定微生物菌群的动力学变化上, 而很少去评价生物甲烷工艺中不同菌群的特定活动。在未来, 我们可以期望生物分子技术应用于研究整个工艺

特定菌群的行为中更多的动力学研究。特别是古菌，存在微生物免疫力，如红细胞古生物群，在反应器中扮演了有意义的微生物部分，但无法进行常规培养。因此，提高目前未培养微生物的分离技术仍然是未来的主要任务。

废弃物厌氧消化在处理废水、粪便和固体废弃物方面，在整个世界均具有应用价值。大多数国家的科学家、工程师和公司正在从事这个技术的不同领域的研究和开发。尽管厌氧消化的实施已经实验室水平，但仍然有大量改进空间。仍然缺乏对颗粒化工艺的理解、US-AB 厌氧微生物彼此无载体的固定化的基础。和其他任何生物工艺一样，厌氧消化需要进一步控制和优化调控。然而，直到现在都没有直接评价生物工艺的合适的传感器，厌氧生物反应器一般通过对生物甲烷和甲烷产生 pH 值和温度的测定间接控制。对挥发性有机酸的在线控制新的技术开发仍然是主要方向，利用红外控制系统能将价格降到合理水平。希望将来有一个大规模厌氧生物反应器系统更好地表现处理复杂的混合物基于在线控制工艺，利用控制软件更好管理这些工厂。

除了废水处理外，厌氧消化工艺可以在增加其他生物物质转化工艺的价值如从木质纤维素材料气化、生物乙醇或氢气方面具有较大价值。木质纤维素的转化将留下大量未接触的原料，将对工艺的整个经济性是一个负担，需要做进一步处理。厌氧消化在其他方面能转化残余物，从初级产物转化到有价值的甲烷，降低成本和初级产物的环境负担。

生物甲烷是一个既涉及基础又涉及应用的研究领域。主要新的开发需要多学科一起工作和利用各个领域的竞争优势。关于生物甲烷的两卷书，包括一系列现代生物化工和生物技术的进展构建在基本理念中，因此结合两个角度给出了该领域的完整的面貌。第一卷是给出了厌氧消化方面更多的基础方面，而第二卷主要集中在更多的应用方面和利用厌氧工艺的前景。因此两卷书对环境微生物学、厌氧生物技术和环境工程的科学家和实践者都有价值。新的基础知识和实践的首次结合和大多数章节的一般特性也将为教育界提供一定的价值。

本卷编辑感谢在置备有关这两卷生物甲烷的所有作者的做出的巨大贡献、团结和合作。

Lyngby, January, 2003

Birgitte K. Ahring

沼气作为一种生物能源，在世界各国得到广泛应用。“十一五”期间我国农村分散式沼气工程在国家和地方政府的财政支持下得到了大力的发展，同时也出现了几个集中产供气的示范工程，但是像欧美那样走向商业化集中供气的企业还很少。随着对环保的要求日益提高，企业发酵废水或生物质含量高的企业，进行厌氧处理制备沼气的资源化利用方式，将逐步成为主要的循环经济模式。其中利用最好的是河南天冠集团，日产沼气 10 万 m^3 ，真正走向了产业化。但是沼气的产气效率和高效运行，仍然是当今厌氧发酵产沼气研究的重点领域。

随着我国经济的快速发展，我国废弃生物质资源和城市垃圾逐渐增多。据调查统计，2010 年全国秸秆理论资源量为 8.4 亿 t，可收集资源量约为 7 亿 t。秸秆品种以水稻、小麦、玉米等为主。其中，稻草约 2.11 亿 t，麦秸约 1.54 亿 t，玉米秸约 2.73 亿 t，棉秆约 2600 万 t，油料作物秸秆（主要为油菜和花生）约 3700 万 t，豆类秸秆约 2800 万 t，薯类秸秆约 2300 万 t。2010 年，秸秆综合利用率达到 50%~60%，利用量约 5 亿 t。其中，作为饲料使用量约 2.18 亿 t，占 31.9%；作为肥料使用量约 1.07 亿 t（不含根茬还田，根茬还田量约 1.58 亿 t），占 15.6%；作为种植食用菌基料量约 0.18 亿 t，占

2.6%；余下40%的秸秆仍然未得到充分利用。我国目前每年城市垃圾量为1.3亿t，预计到2020年，全国每年城市垃圾量将达到2亿t以上。这些可再生资源为商业化沼气的发展和技术需求提供了新的机遇和挑战。

鉴于生物能源的迅猛发展，三峡大学新能源研究院生物质研究所课题组组织博士、教授对德国 Springer 出版社《Biomethanation II》进行了翻译。本书共4章，系统阐明了厌氧发酵微生物技术设备、工艺和控制技术。分别由三峡大学郭金玲博士、胡为民博士、龚大春博士，武汉新华扬生物有限公司金虎博士负责翻译。三峡大学邹坤教授、宜昌市环保研究所黄永文教授级高级工程师、安琪酵母股份有限公司李天乐高级工程师对全书进行了审订。

厌氧发酵生物技术具有能耗低、适应面广等特点，在生物能源和生物环保中具有巨大的应用前景。本书不仅对沼气的生产具有指导意义，还可作为生物工程和生物科学学生以及科研工作者的参考学习用书。

由于译者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

龚大春

2012年5月

目 录

原版序言

译者序

1 厌氧消化过程的应用	1
1.1 引言	1
1.2 影响沼气工艺的因素	3
1.2.1 温度	4
1.2.2 pH 值	5
1.2.3 抑制物	5
1.3 高浓度废弃浆液的消化	7
1.3.1 概述	7
1.3.2 工艺和工厂构建	8
1.3.3 病原体灭菌	10
1.3.4 生活垃圾和工业垃圾共消化	11
1.3.5 工艺罐的构造	13
1.3.6 典型设备	14
1.3.7 操作实例	21
1.4 高固体含量废弃物的消化	22
1.4.1 城市固体废弃物的预处理	23
1.4.2 后处理	24
1.4.3 生物处理	24
1.4.4 厌氧处理固体废弃物工艺小结	30
参考文献	31
2 厌氧颗粒污泥和生物膜反应器	35
2.1 引言	35

2.2	生物膜反应器	38
2.3	颗粒污泥反应器	41
2.3.1	颗粒污泥特征	44
2.3.2	颗粒化控制因素	49
2.4	新型的颗粒污泥或生物膜反应器	56
2.5	结论	59
	参考文献	60
3	异生物质的厌氧生物转化	74
3.1	异生物质的危害	74
3.1.1	异生物质带来的问题	75
3.1.2	厌氧降解的困难	76
3.1.3	异生物质的去除策略	77
3.2	芳香族异生物质的厌氧转化	78
3.2.1	芳香环生物降解的共性	78
3.2.2	表面活性剂的厌氧转化	85
3.2.3	多环芳烃的厌氧转化	96
3.2.4	邻苯二甲酸酯的厌氧转化	103
3.2.5	多氯联苯的厌氧转化	107
3.2.6	卤代酚	115
3.2.7	杀虫剂的厌氧降解	122
3.3	利用生物反应器处理异生物质	127
3.3.1	UASB 反应器	127
3.3.2	连续搅拌式反应器 (CSTR)	129
3.3.3	其他厌氧反应器	130
3.3.4	结论	132
3.4	生物强化	132
3.4.1	原位生物强化	132
3.4.2	反应器中的生物强化	133
3.5	展望	134

参考文献	135
4 厌氧反应器的监测和控制	148
4.1 引言	148
4.1.1 反应器和废弃物类型	149
4.2 控制系统的基本结构	154
4.3 过程监测	157
4.3.1 气体的产生及其组成	157
4.3.2 中间体	162
4.3.3 无机化学成分	165
4.3.4 有机物的间接测量	168
4.3.5 代谢活性测量	169
4.4 操纵变量	173
4.4.1 水力停留时间、污泥龄和有机负荷率	173
4.4.2 pH 值	174
4.4.3 碳酸氢盐碱度	175
4.4.4 温度	176
4.4.5 废弃物管理或共消化	176
4.5 控制进展	177
4.5.1 简单控制器	177
4.5.2 自适应控制器	181
4.5.3 其他控制方案	186
4.6 结论	192
参考文献	193

1 厌氧消化过程的应用

Irini Angelidaki¹ · Lars Ellegaard² · Birgitte Kjøer Ahring³

1 Environment & Resources, The Technical University of Denmark, Denmark

2 BWSC, Denmark

3 Environmental Microbiology & Biotechnology, The Technical University of Denmark, Denmark

在新千年来临之际,废弃物的管理在许多国家已经成为一个首要的政治问题。今天,其中一个最主要的问题是如何应用一种环境可接受的方法来处理不断增长的废弃物。生物废弃物,如城市、农业以及工业有机污染物和受污染的土壤等,按传统的方式处理通常是堆放于废渣填埋地,甚至不经过任何环境保护处理措施就投放于海洋或湖泊中。最近一段时间,焚烧废弃物和控制废渣填埋均有所改善,并且一种新的垃圾分类以及资源/能源回收循环利用方式正在发展中。从各方面来说,通过厌氧消化过程处理生物废弃物是将有机污染转换成如能量(以生物甲烷的形式)和肥料产品等有用产品的最佳选择。其他的废弃物处理措施,如废渣填埋和有机废弃物的焚烧已经越来越少被采用且变得不合法。不管是在欧洲还是其他国家,都倾向于生物学处理方式,即从食物产品和供应链组分中回收有机废弃物中矿产品和营养物。从一般废弃物中除去相对湿的废弃有机物,可以使得用于焚烧部分的热量比更高,同时与废渣填埋相比,可以得到更多用于填埋的稳定部分。

关键词: 厌氧消化; 反应器; 共消化; 生物废弃物; 固体废弃物; 料浆; 粪便; 工业废弃物

1.1 引言

厌氧消化是一种生物加工过程,此过程中有机化合物被分步

氧化和还原，转化成它的最简单氧化物形式 (CO_2) 和它的还原物形式 (CH_4)。许多微生物在无氧条件下能催化该过程。该过程的主要产品是二氧化碳和甲烷，同时有少量的氮气、氢气、氨和硫化氢生成（通常不足所产生气体总量的 1%）。这些气体产品统称为沼气，厌氧降解工艺通常叫做沼气生产工艺。在去除碳的同时，与有机化合物结合的无机矿物质和盐以它们可溶的无机物形式进入发酵液体中。

沼气工艺是一个自然发生的过程，它可以在一系列厌氧条件下进行，如海洋、新鲜水的淤泥、阴沟淤泥和泥浆等。

在能源紧张的今天，开发该工艺具有重大的意义。①相对于有氧分解过程，该工艺能在细菌数量的低增长条件下实现有机物质的高度还原；②该工艺所产生的沼气可以被用于生产不同形式的能量（热能和电能）或者被处理后作为汽车燃料。

沼气与天然气相比燃烧值低，所以具有一些特殊用途，如用做汽车燃料。表 1.1 对沼气和天然气燃烧值的高低进行了比较。

表 1.1 沼气与天然气的燃烧值

气体	含 65% 甲烷的沼气	含 55% 甲烷的沼气	天然气
高燃烧值 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) STP ^①	7.1	6.0	12.0
低燃烧值 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) STP ^①	6.5	5.5	10.8

① STP（标准温度和压力），即在温度 0°C 、 1atm 下的体积。

沼气生产工艺已经为人们认知和利用很多年，尤其是 20 世纪 70 年代能源价格上涨后，该工艺重新受到关注，这是因为迫切需要找到一种替代能源来减轻对化石燃料的依赖。沼气工艺具有突出的优点：一是在废弃物厌氧降解过程中，环境得到了改善；二是沼气原料是通过光合作用从大气中固定二氧化碳时产生的，沼气燃烧时不会额外增加二氧化碳到大气中。

厌氧降解工艺是在封闭体系中进行的，其反应条件是能够维持微生物有机体系的最适可控环境条件。这个工艺能够被用来快速有效降解不同的废弃物材料。现阶段主要有以下四个部分的

应用：

(1) 处理城市污水厌氧降解过程中初级和二级污泥。该工艺被用于稳定和减少污泥，同时生产沼气，可用于污染处理过程中设备的部分能耗。这一应用已经在工业化国家广泛推广，并将其和先进的家畜污水处理系统联合使用。

(2) 处理生物质生产、食品加工或者发酵工业产生的工业废水。这种类型的污染通常处理量大，能够很成功地在直接排放到环境或者污染体系之前通过厌氧降解方式处理掉，产生的沼气能够用于满足过程的能耗。随着环境越来越受关注，此厌氧工艺的应用也越来越广泛。

(3) 处理家畜污染。目的是产生能量和提高粪肥的质量。由于对粪肥的使用、分配和储存的规定越来越严格，这个工艺的应用也随之增长，特别是在动物产品比重较大的国家。

(4) 在新的工业园区，应用规模化的厌氧降解工艺来处理城市固体废弃物的有机部分。其目的首先是为了减少其他处理体系污染物的量，例如，废渣填埋和焚烧车间等体系；其次是为了回收这类废弃物中的营养物质，用于农业地区。

1.2 影响沼气工艺的因素

沼气工艺作为一个复杂的生物过程受到许多环境因素的影响。

相互依赖的细菌是该工艺最关键的因素。在不稳定的操作条件下，中间产品，如挥发性脂肪酸和醇类，以不同的速率积累，速率的变化取决于酶的底物和可能存在的许多不稳定性因素。因此，中间产物积累量的改变，直接影响该沼气工艺的混乱度。

能够影响该体系平衡的最重要环境因素是温度、pH 值、底物组成和有毒抑制物。

1.2.1 温度

温度是影响细菌生长的最主要的环境因素之一。其影响厌氧细菌的方式与好氧细菌相同。生长速率常常随着温度的提高（到某一个限度）而提高，然而，当温度达到细菌能够生存的最高温度时，生长速率会迅速下降。温度除了影响细菌的生长速率外，也影响反应物料物理性质的变化，如黏度、表面张力和质量传递性质。除了体系的稳定状态主要依赖于温度外，温度自身的稳定性也很重要，因为，即使温度发生相当小的改变也会导致反应效率的下降，直到微生物适应为止。

在厌氧反应器中处理污染物通常在两个温度范围内进行：一个是 25~40℃ 左右，属于中温范围；另一个是高于 45℃，也就是通常说的高温范围。

据报道，在高温范围内厌氧消化污染物的优点很多。

在更高的温度下可以实现：

- (1) 消化速率更快，并且所需要的保留时间更短。
- (2) 处理相同量的污染物所需要的反应器容积更小。
- (3) 颗粒物质的水解速率和效率更高。
- (4) 更有效地破坏病原菌。

以前一直认为高温与过程的不稳定相关联，而多年的经验证明，大规模的沼气厂在高温条件下操作仍然可以稳定运行。

温度对降解速率有促进作用，温度的升高将提高甲烷的体积生成速率。Casali 和 Senior 发现，当温度从室温升高到 30℃ 时，垃圾中检测到甲烷的生成速率提高了 2.6 倍，当温度从 30℃ 提高到 40℃ 时，甲烷的生成速率提高了 3 倍。

然而，通过从有机物质中分离得到微生物产甲烷能力的考察，发现甲烷的产率在 30~60℃ 温度范围内变化不大。所以只有当负载速率很高或者保留时间很短时，温度对生长速率方面的影响才能显现。Varel 等在半连续反应器中降解菜牛的废弃物，实验表明，在很短的保留时间内温度对甲烷的生成速率的影响很明显。当保留时间缩短时，发酵过程只有在高温条件下才能正常