

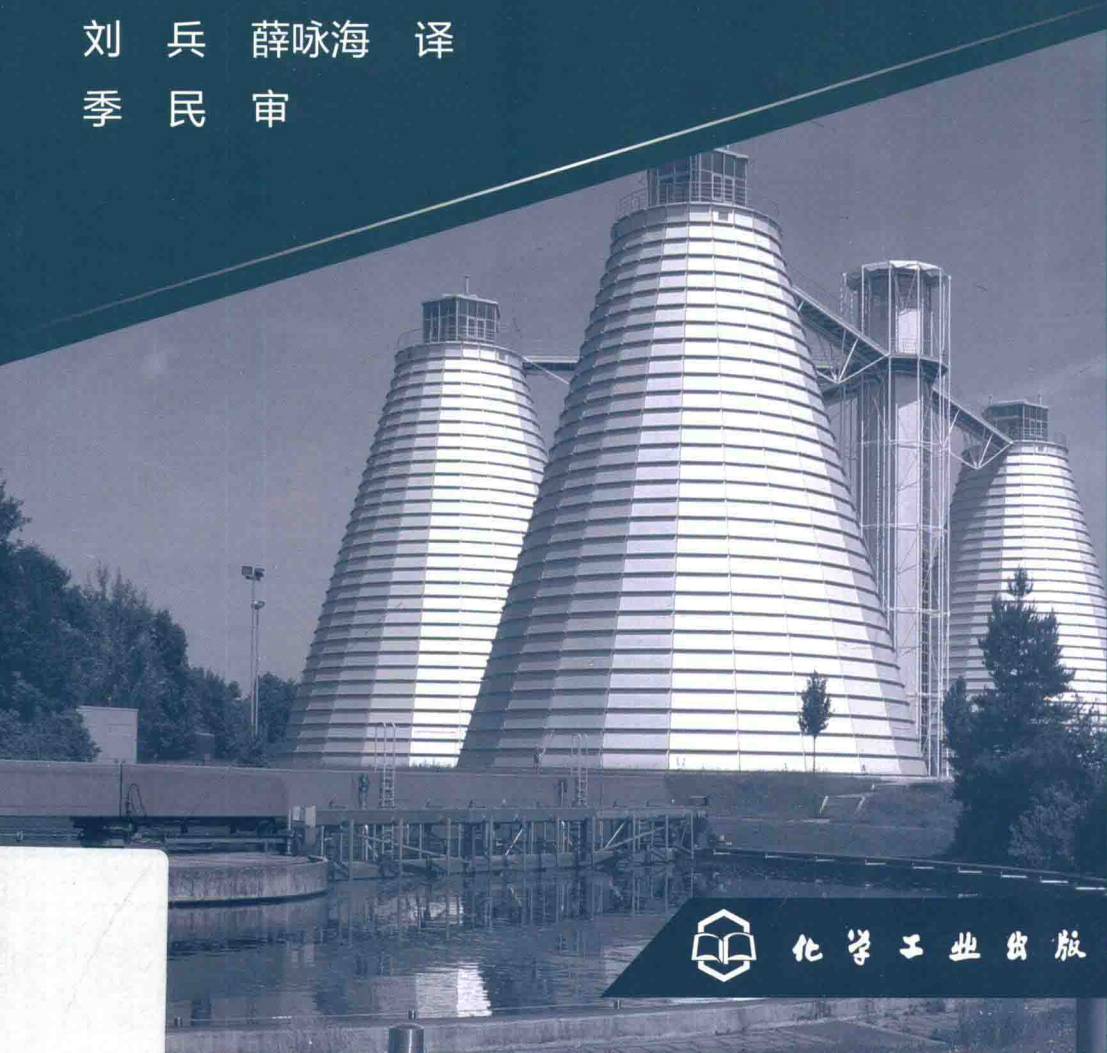
(メタン発酵)

甲烷发酵

[日] 野池达也 编著

刘 兵 薛咏海 译

季 民 审



化学工业出版社

(メタン発酵)

甲烷发酵

[日] 野池达也 安井英齐 佐藤和明 李玉友 等编著

刘 兵 薛咏海 译

季 民 审



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

甲烷发酵 / [日] 野池达也等编著; 刘兵, 薛咏海译. -- 北京:
化学工业出版社, 2014.2
ISBN 978-7-122-19504-3

I. ①甲… II. ①野… ②刘… ③薛… III. ①甲烷—发酵—
生产工艺 IV. ① S216.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 007953 号

METHANE HAKKOU

© TATSUYA NOIKE 2009 / © KAZUAKI SATO 2009 / © HIDENARI YASUI 2009 / © LI Yu-You 2009 /

© SHUICHI OCHI 2009 / © KATSUTOSHI SHIBUYA 2009

Originally published in Japan in 2009 by GIHODO SHUPPAN Co., Ltd.

Chinese translation rights arranged through TOHAN CORPORATION, TOKYO. & BEIJING HANHE
CULTURE COMMUNICATION CO., LTD.

本书中文简体字版由技报堂出版株式会社授权化学工业出版社独家出版发行。
未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分, 违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2014-0217

责任编辑: 徐 娟

责任校对: 宋 夏

文字编辑: 汲永臻

封面设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710 mm×1000 mm 1/16 17 1/2 印张 字数 321 千字 2014 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00元

版权所有 违者必究

序

《甲烷发酵》是由原日本东北大学野池达也教授及几位在厌氧技术方面有卓越研究的教授共同编写的。野池达也教授是国际上环境厌氧技术领域的著名专家，他在两相厌氧消化的物质分解机理、污泥热水解预处理强化厌氧消化技术、具脱氮功能的二段厌氧消化工艺、厌氧发酵产氢技术等方面取得了开创性研究成果，其中多项技术已在日本及国际上推广应用。野池达也教授对中国的厌氧消化产沼气的悠久历史以及农村沼气化的普及非常赞赏，对厌氧消化技术在中国的发展应用十分关注，愿意把自己带领的团队多年在厌氧消化领域的研究成果无私地奉献给中国读者，并邀请我们翻译此书，深感责任重大。

该书既有深入系统的厌氧消化基本理论论述，也包含对设计和运行管理指导性很强的实用性内容。具体内容包括厌氧消化的基本理论、厌氧消化工艺发展、工艺运行设计和运行控制、厌氧消化微生物学、生物气的高效利用等。该书适用于从事厌氧消化技术研究、设计和运行管理的工程技术人员，也可作为高等院校的学生学习参考用书。

废水、污泥及有机废物的厌氧发酵是生物能利用的重要途径，环境厌氧技术在我国越来越受到重视。相信这本书的翻译出版，有利于提高我国从事环境厌氧技术研究和工程应用技术人员的理论水平，促进环境厌氧生物能利用技术在我国更好地推广应用。

天津大学环境科学与工程学院

季民

2014年1月

前言

中国是世界上最早发现和利用沼气的国家之一，沼气在我们的日常生产、生活中扮演着重要角色。具有碳中和特性的沼气反应是利用我们每天生活、生产中产生的生物质废弃物作为原料在厌氧条件下进行的。沼气作为一种绿色节能环保的新型燃料，在资源循环利用、节能减排、防止全球变暖、保护大气环境和生态环境等方面具有重要作用。在注重环保的今天，沼气发酵应用技术更是受到世界上大多数国家的青睐和提倡。

译者刘兵现旅居日本，于北九州市立大学国际环境工学研究科资源循环研究室深造，师从安井英齐教授。安井英齐教授治学严谨，在厌氧发酵、数学模型模拟、废水处理等方面颇有建树，对学生循循善诱、因材施教。《甲烷发酵》一书是应安井英齐教授的要求和提点而翻译的。

《甲烷发酵》一书是野池达也团队几十年的学术成果，于2009年在日本出版。此书在日本已然成为行业内学习和参考的重要书籍。本书经译者历时一年多翻译成中文初稿，再经过字字凿凿查验修改而成。天津大学环境科学与工程学院季民教授对全书进行了系统性的理论检查和求证，给本书的翻译工作提出了专业性建议和指导。

借本书在中国出版的机会，感谢日本东北大学名誉教授、日本大学特任教授野池达也先生给译者翻译此书的机会和殊荣，感谢原书的作者：野池达也、佐藤和明、安井英齐、李玉友、落修一、河野孝志、涩谷胜利、松本明人。本书能够出版，也离不开安井英齐教授给予译者研究上的谆谆教导和生活上的悉心关怀，离不开天津大学季民教授在书

稿审阅和出版联络方面的鼎力支持，也离不开化学工业出版社各位工作人员在本书的统筹和出版方面的大力帮助，在此一并感谢。

由于译者的水平和能力有限，本书定会有翻译不当或疏漏之处，恳请广大读者多批评指正。

刘兵 薛咏海
2014 年 1 月

致中国读者



甲烷，在中文中通常被称作沼气。中国自古以来热衷于对于沼气发酵的实用研究，并且有世界上独一无二的沼气学会。我从学生时代就了解到中国对于沼气发酵研究有悠久历史，有世界最古老的沼气发酵产生生物能源历史。中国的早期发酵产业始于 19 世纪 20 年代，成形于 80 年代，成熟于 90 年代。到 2011 年末，全中国家庭用沼气发酵槽已达到 4300 万座，可供数十户家庭以上的沼气发酵设备已达到 7 万座， 1000m^3 以上的发酵槽已达到 5000 ~ 6000 座，中国在沼气发酵的使用研究方面取得了辉煌的成就。如今在中国，沼气发酵作为国家政策被大力推广，目前沼气年产量已达到 150 亿立方米的规模，这对实现节能减排目标起到了重要的作用。这些成果一直激励着日本从事沼气发酵研究的工程技术人员。

2011 年 3 月 11 日，日本发生了举世震惊的东日本大地震。地震引起的海啸诱发了核电站事故，导致许多地方遭到了毁灭性的破坏。该地区以沼气能源为中心，开发再生能源，通过食物、能源自产自销的新循环型社会的模式来对杂草丛生的灾区进行重建。中国在利用沼气发酵产生日常生活能源实用研究方面的成果，给予了承担日本震后灾区重建工作的我们莫大的勇气。

笔者曾参与沼气发酵技术的研究开发，一直希望日本的沼气发酵事业能像中国那样普及到家家户户。本书针对从事沼气发酵设施的设计和运行管理的各位同仁以及对即将从事沼气发酵研究的技术人员，包含了由基础到应用的内容。我们同时希望第 2 章沼气发酵过程理论和附录 A ~ D 对从事沼气发酵技术研究开发的各位学者能够有所帮助。

本书的中文版是由目前就读于北九州市立大学国际环境工程系能源循环化学专业的刘兵和薛咏海博士在忙碌的研究中历时约 2 年翻译而成的，这体现了他们对科学研究的热爱和专注。

天津大学环境科学与工程学院副院长季民教授在本书的出版发行方面给予鼎力支持，在此特表诚挚的谢意。另外，我也要由衷感谢负责本书中文版出版工作的化学工业出版社。

愿本书能够传递到中国从事沼气发酵事业研究的各位朋友手中，希望能够对读者有所帮助。

衷心希望本书能够为中日友好贡献一份力量。

野池达也
2014 年 1 月

原书序



对防止全球气候变暖具有贡献性的甲烷发酵技术

进入 21 世纪，防止全球气候变暖成为世界各国共同的使命。

2008 年 7 月 6 日 ~ 9 日，在北海道洞爷湖召开的八国集团峰会上提出了“到 2050 年全球温室气体排出量减少一半，各国分别实施削减排出量的中期目标”。大会总结并一致通过了“今后世界各国作为一个整体为防止全球气候变暖而共同努力”这一具有历史性成果的决议。我们作为世界的一员应该尽自己最大努力去减少温室气体的排放量，应该从依靠化石能量的当今社会中摆脱出来，迅速向低碳社会转化。

生态能源可以中和碳，是可再生并且用之不尽的，可代替化石燃料，可以有效地减少由化石燃料生成的二氧化碳，对防止全球气候变暖有极其重要的作用。

甲烷发酵法是利用厌氧细菌以生活污水污泥、人畜排泄物等废弃物中的有机物作为原料在进行稳定化、减量化的同时，分解产生生物能源，与其他处理方法相比对环境是最有益的。本系统中作为代替化石燃料的生物能源对削减二氧化碳的排放量效果显著且成本更低，还可以为后代节省有限的化石燃料。而且，发酵后的残渣产生的安全的液体肥料或者进行堆肥后的肥料非常适合农田的使用，对丰富土壤营养有着重要作用，同时非活性的碳素在土壤中掩埋又同时削减了二氧化碳的产生。甲烷发酵对循环型社会的形成和防止全球气候变暖等方面有着确实有效的功能。

本书是对地球环境时代甲烷发酵重要性的再次认识，总结了对永不枯竭的生物质废弃物的全面利用，以欧盟各国利用资源农作物生产生物

能源和甲烷发酵法在日本已经广泛普及和应用，本书是从基础到应用的全面介绍。

本书的编写人员是日本东北大学工学科研究生院土木工程专业环境保护研究室中从事甲烷发酵研究并以此作为毕生事业的研究者们。编写过程中佐藤和明博士、安井英齐博士和李玉友博士做了大量的统稿、编辑工作，他们为各章的整理付出了辛勤的汗水。

本书可以作为初学甲烷发酵的学习用书，以甲烷发酵作为研究课题的研究的参考用书，从事甲烷发酵设施设计和运行操作的工作人员的技术参考书，以及在从事新技术的开发研究的研究者的参考书。衷心希望本书能对循环社会的形成和防止全球变暖等方面做出一定的贡献。

本书从企划到编写、印刷、出版，技报堂出版株式会社编辑部长小卷慎氏给予了大力支持，在此表示衷心的感谢！

最后，从青年的时代开始我就在东北大学进行甲烷发酵研究，并教授甲烷发酵对环境保护方面的深远意义。请允许我将本书奉献给已故恩师松本顺一郎先生。

野池达也
2009年5月

原著编写人员名单

- 野池达也** 东北大学名誉教授
日本大学研究生院综合科学研究科 教授
(编写 1.1, 1.4.3 ~ 1.4.5, 1.5.1, 1.5.3 ~ 1.5.6, 8.1 ~ 8.3, 8.4.1 ~ 8.4.4, 10.1 ~ 10.5)
- 佐藤和明** 八千代 Engineering 株式会社国际事业部顾问 (原日本建设部土木研究所下水道部长)
(编写 1.4.1 ~ 1.4.2, 1.5.2, 4.5 ~ 4.7, 7.1 ~ 7.4, 8.4.5, 附录 D)
- 安井英齐** 北九州市立大学国际环境工学部能量循环化学科 教授
(编写 2.1 ~ 2.4, 附录 A, 附录 B, 附录 C)
- 李玉友** 日本东北大学工学科研究生院 教授
(编写 1.2 ~ 1.3, 3.1 ~ 3.4, 3.6 ~ 3.9)
- 落修一** 公益财团法人日本下水道新技术推进机构 资源循环研究部 副部长
(编写 6.1 ~ 6.6)
- 河野孝志** Takuma 株式会社 技术中心 技术开发部开发科
(编写 9.1 ~ 9.4)
- 涉谷胜利** 清水建设株式会社 技术研究所地球环境技术中心 上席研究员
(编写 5.1 ~ 5.4)
- 松本明人** 信州大学工学部土木工学科 副教授
(编写 3.5, 4.1 ~ 4.4)

目 录

第1章 甲烷发酵的研究和开发历史 / 1

- 1.1 甲烷发酵在地球环境保护和循环型社会形成方面的意义 / 2
- 1.2 甲烷的发现 / 2
- 1.3 基于微生物反应的甲烷生成 / 3
 - 1.3.1 初期的认识 / 3
 - 1.3.2 二阶段学说和化学解析的发展 / 3
 - 1.3.3 产氢乙酸共生细菌的发现和三菌群学说 / 4
 - 1.3.4 二相四阶段学说的确定 / 4
- 1.4 反应过程的开发 / 6
 - 1.4.1 厌氧消化反应过程的诞生 / 6
 - 1.4.2 分离型消化槽和加热技术的实施 / 7
 - 1.4.3 基于连续搅拌的高效消化 / 7
 - 1.4.4 甲烷发酵槽的设计 / 8
 - 1.4.5 餐厨垃圾的甲烷发酵 / 9
- 1.5 日本的甲烷发酵历史 / 10
 - 1.5.1 普及阶段 / 10
 - 1.5.2 污水污泥处理 / 10
 - 1.5.3 粪便处理 / 12
 - 1.5.4 工厂排水处理 / 13
 - 1.5.5 利用污泥再生处理中心对粪便和餐厨垃圾的混合处理 / 13

- 1.5.6 家畜粪便的处理 / 14

参考文献 / 15

第2章 甲烷发酵过程理论 / 17

- 2.1 根据投入有机物的组成分析简单推算甲烷转化率 / 18
 - 2.1.1 元素组成的利用 / 18
 - 2.1.2 COD 平衡的利用 / 19
 - 2.1.3 VS 成分的利用 / 20
 - 2.1.4 VS 成分和 COD 的换算 / 21
 - 2.1.5 活性污泥模型的利用 / 21
- 2.2 甲烷发酵过程中三菌群参与说和二相四段学说的地位 / 23
- 2.3 物质变化概要 / 24
 - 2.3.1 分解反应 / 25
 - 2.3.2 水解反应 / 28
 - 2.3.3 产酸反应 / 31
 - 2.3.4 异相氢转移反应 / 44
 - 2.3.5 甲烷生成反应 / 58
 - 2.3.6 其他厌氧微生物反应 / 63
 - 2.3.7 微生物的死亡和再增殖 / 65
- 2.4 温度的影响 / 65
- 2.5 相关的物理化学常数 / 66
 - 2.5.1 平衡常数 / 66

2.5.2 亨利系数 / 71

2.5.3 总传质系数 / 72

参考文献 / 76

第3章 各种甲烷发酵过程 / 81

3.1 甲烷发酵过程分类 / 82

3.2 完全混合法 / 83

3.2.1 工艺流程 / 83

3.2.2 特征和注意事项 / 87

3.3 厌氧接触法 / 88

3.3.1 工艺流程 / 88

3.3.2 特征和注意事项 / 88

3.3.3 应用实例 / 89

3.4 厌氧滤床法 / 90

3.4.1 工艺流程 / 90

3.4.2 特征和注意事项 / 91

3.5 厌氧流动床法 / 93

3.5.1 工艺流程 / 93

3.5.2 特征和注意事项 / 93

3.6 UASB 法和 EGSB 法 / 95

3.6.1 工艺流程 / 95

3.6.2 特征和注意事项 / 97

3.7 干式甲烷发酵 / 99

3.7.1 工艺流程 / 101

3.7.2 特征和注意事项 / 102

3.8 二相工艺 / 103

3.8.1 反应工艺 / 103

3.8.2 特征和注意事项 / 104

3.9 其他甲烷发酵工艺 / 106

参考文献 / 107

第4章 甲烷发酵的影响因素 / 111

4.1 温度 / 112

4.2 停留时间 (HRT 和 SRT) / 114

4.3 有机物负荷 / 115

4.4 搅拌及混合 / 116

4.5 pH 值、碱度和挥发性有机酸浓度 / 116

4.6 基质组成 (C/N 比) 和氨氮抑制 / 117

4.7 重金属的阻害和反应的促进 / 118

参考文献 / 120

第5章 甲烷发酵槽的运行管理 / 122

5.1 甲烷发酵工艺的启动运行 / 123

5.1.1 接种污泥的导入 / 123

5.1.2 运行管理指标 / 125

5.1.3 常态下的驯化 / 126

5.1.4 不稳定状态的原因 / 128

5.2 槽负荷和沼气产生量 / 128

5.3 有机酸的积蓄和酸败对策 / 129

5.4 稳定运行管理 / 130

参考文献 / 131

第6章 有机废弃物的甲烷发酵 / 132

6.1 生活污水污泥 / 133

【实例 1: 横滨市北部污泥资源化中心】/ 134

6.2 餐厨垃圾 / 135

【实例 2: 中空知卫生设施组合】/ 136

6.3 家畜粪便 / 138

【实例 3: 酪农学园大学】/ 139

6.4 草木植物 / 140

6.5 混合物 / 141

【实例 4: KAMPO 循环工业园】/ 142

【实例 5: 株洲市京华中心——株洲生物能源促进计划】/ 144

6.6 其他有机物 / 145

参考文献 / 145

第 7 章 沼气的有效利用 / 149

7.1 消化气体的成分和热量值 / 150

7.2 消化气体的利用 / 151

7.2.1 消化槽的加热 / 151

7.2.2 管理室的空调 / 151

7.2.3 都市燃气 / 151

7.2.4 汽车燃料 / 152

7.2.5 消化气体发电 / 152

7.2.6 燃料电池发电 / 155

7.3 沼气的精制 / 156

7.3.1 硫化氢的去除 / 156

7.3.2 二氧化碳的去除 / 157

7.3.3 硅氧烷的去除 / 159

7.4 热电联产 / 161

7.4.1 气体发电系统热量平衡计算模型概要 / 162

7.4.2 热平衡计算结果示例 / 164

7.4.3 热电联产的设立条件 / 165

参考文献 / 166

第 8 章 甲烷发酵的主要问题和对策 / 167

8.1 甲烷发酵系统的基本构成和主要问题 / 168

8.2 高浓度高温甲烷发酵的高效率化 / 168

8.3 氨氮积累和阻害的对策 / 169

8.4 消化液的处理 / 171

8.4.1 液肥利用 / 171

8.4.2 水处理 / 173

8.4.3 排入污水管道 / 173

8.4.4 消化液中氮和磷的去除 / 174

8.4.5 分别消化工艺 / 177

参考文献 / 180

第 9 章 氢气发酵工艺的可行性 / 182

9.1 厌氧细菌的氢气发酵 / 183

9.1.1 氢气生成的原理 / 183

9.1.2 厌氧产氢菌 / 185

9.1.3 工艺运行条件 / 188

9.2 氢气发酵工艺的效率 / 189

9.2.1 原料 / 189

9.2.2 反应槽 / 190

9.2.3 能量回收计算 / 190

9.3 氢气和甲烷二段工艺 / 190

9.4 氢气发酵的安全管理 / 191

参考文献 / 193

第 10 章 甲烷发酵的课题和展望 / 195

10.1 对日本生物能利用综合战略的期待 / 196

10.2 沼气作为运输用燃料对二氧化碳减排的优势 / 197

10.3 LOTUS 项目 / 198

10.4 日本普及中的课题 / 199

10.5 甲烷发酵新功能的开发展望 / 200

10.5.1 通过污水管道对餐厨垃圾进行资源回收 / 200

10.5.2 加入甲烷发酵的生物乙醇生产系统 / 201

10.5.3 通过生物甲烷生产氢气 / 201

10.5.4 有机氯化物的分解 / 202

10.5.5 农业有效利用 / 203

10.5.6 环境保护中甲烷发酵的地位 / 204

参考文献 / 205

附录 A 甲烷发酵的微生物学基础 / 206

A.1 依据碳源和能源的种类对细菌进行分类 / 207

A.2 依据电子受体的种类对细菌进行分类 / 208

A.3 依据电子供体氧化反应类型进行细菌分类 / 209

A.3.1 发酵 / 209

A.3.2 呼吸 / 210

A.3.3 发酵和呼吸的氢气(电子)处理 / 211

A.4 厌氧环境下生存微生物的群体构造 / 213

A.4.1 甲烷发酵槽的细菌群 / 213

A.4.2 真细菌种类 / 214

A.4.3 产甲烷菌的种类 / 216

A.5 分子生物学解析的意义 / 218

参考文献 / 222

附录 B 甲烷发酵的数学模型 / 224

B.1 数学模型的种类 / 225

B.1.1 黑匣子模型 / 225

B.1.2 白匣子模型 / 226

B.1.3 灰匣子模型 / 226

B.2 建立数学模型的注意事项 / 226

B.2.1 收支平衡参数的应用 / 226

B.2.2 模型的建立顺序和思路 / 228

B.2.3 基于物质收支平衡和速度论的相关表格的制作 / 229

B.2.4 参数的把握 / 231

参考文献 / 237

附录 C 甲烷发酵的化学过程 / 238

C.1 基质分解和细菌增殖的关系 / 239

C.2 菌体的元素 / 243

C.3 氧化还原反应 / 245

C.4 菌体的生成 / 247

C.4.1 最大收率理论 / 247

C.4.2 维持代谢反应的机理 / 251

C.4.3 最大比增殖速率和亲和常数理论 / 253

参考文献 / 256

附录 D 气体发电系统的热收支平衡的计算模型 / 258

D.1 污泥产生量、VS 量的季节变化的设定 / 259

D.2 模型消化槽的数据的确定 / 259

D.3 回流负荷与模型的结合 / 260

D.4 加热示范消化槽所需热量的计算 / 260

D.5 消化气产生量 / 262

D.6 发电量、废热回收量的计算 / 263

参考文献 / 263

第1章 甲烷发酵的研究和开发历史

>>>>

1.1 甲烷发酵在地球环境保护和循环型社会形成方面的意义

近年来,随着对气候变暖等全球范围的环境问题的关注,人们越来越认识到环境友好型新科技开发的重要性。

日本从 20 世纪 80 年代后期开始,城市生活垃圾和污水处理厂污泥排出量急速增加,使得填埋场用地逐渐成为了一个严重的问题。传统的城市废弃物处理技术都是把城市和地区环境保护放在了一个重要的位置,而缺少考虑针对全球范围的环境保护。因此,为了构筑全球范围环境低负荷型社会,新的环境保护技术的开发就成为了当务之急的研究课题。为了实现自然生态环境和人文环境的和谐协调发展,环境负荷最小化的新资源循环技术、新地球环境保护技术的开发是不可缺少的^[1]。世界各国正在多个科学领域对这个问题进行积极的研究探讨。

甲烷发酵法(即发酵法制甲烷)具有碳中和的特性,利用不会枯竭的污水污泥、餐厨垃圾和人畜排泄物等大量生物质废弃物作为原料,在这一点上,比其他的生物质能源生产工艺更具有生态环保的显著特征,对地球环境保护有着重要的意义。

甲烷发酵法具有以下特征。

(1) 利用厌氧细菌对生物质废弃物中的有机物进行分解产生甲烷这一能源物质,然后对甲烷进行回收利用产生电能,既能够节约化石燃料的使用,也可以削减二氧化碳排放量。

(2) 生物质的绝大部分有机物被转化为甲烷气体,发酵剩余的残渣被减量化,有利于残渣处理设施的小规模化。

(3) 甲烷发酵残渣易于进行堆肥化处理,其中的病毒和病原细菌残存少,免疫学安全性高。

(4) 甲烷发酵残渣可以作为优良的液体肥料或进行堆肥化加以利用。

(5) 大容量的甲烷发酵槽兼有蓄留槽的功能,对后阶段的稳定运行起充分的保障作用。

集众多优点于一身的甲烷发酵,不仅具有回收能源的优点,还能通过资源循环减少环境负荷、防止全球变暖,对建设循环型社会起着基础性作用。甲烷发酵在经济方面也具有众多优势。

1.2 甲烷的发现

从古代开始人们就知道在污浊的湖泊沼泽、池塘和河底的沉淀物(底泥)可以产生可燃性气体。早在距今 200 多年前的 1776 年,意大利物理学家 Alessandro Volta 在与他朋友 Campi 神父的书信中写道:“乘小舟用木棍在沼泽的底泥搅拌时有很多气体