



能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

生物质生物转换技术

Biomass Biological Conversion Technologies

刘荣厚 沈飞 曹卫星 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

生物质生物转换技术

Biomass Biological Conversion Technologies



刘荣厚 沈飞 曹卫星 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书根据作者多年从事生物质能源教学与研究的经验及研究成果,全面系统地介绍了生物质生物转换技术的概念、分类,生物质的物理化学特性,生物质厌氧消化的原理,禽畜粪便及蔬菜废弃物厌氧消化制取沼气技术,木质纤维素原料预处理及其沼气发酵技术,沼气发酵残余物的肥料化利用技术,甜高粱茎秆及汁液储藏技术,甜高粱液态发酵制取乙醇技术,甜高粱固态发酵制取乙醇技术,甜高粱茎秆木质纤维素残渣预处理及乙醇发酵技术,以期对我国生物质能源研究与开发起到积极的推动作用。

本书可供从事新能源和可再生能源领域的高校师生、研究人员、管理人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

生物质生物转换技术/刘荣厚,沈飞,曹卫星著. —上海:上海交通大学出版社,2015

(能源与环境出版工程)

ISBN 978-7-313-14172-9

I. ①生… II. ①刘…②沈…③曹… III. ①生物能源—能量转换—研究
IV. ①TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288222 号

生物质生物转换技术

著 者: 刘荣厚 沈 飞 曹卫星

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 苏州市越洋印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 433 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-14172-9/T

定 价: 98.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 22.75

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-68180638

能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主 任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委 员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑 平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄 震(上海交通大学副校长、教授)

编 委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泱(浙江大学能源工程系系主任、教授)

顾 璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入21世纪以来,短短十年间(2002—2012年),全世界一次能源总消费从96亿吨油当量增加到125亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从10万亿元人民币猛增到52万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量28.8亿吨油当量竟有57.7%发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,规划能源新技术的研发和应用。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果；

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍，为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考；

三是优化能源与环境专业教材，为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书，满足人才培养对教材的迫切需求；

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线，重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题，主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、大气污染与气候变化等专业方向，汇集能源与环境领域的关键性技术和成果，注重理论与实践的结合，注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块，其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果，也包括能源与环境工程一线的理论 and 实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作；黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值，出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家，组建了学术指导委员会和编委会，并召开了多次编撰研讨会，商谈丛书框架，精选书目，落实作者。

该学术丛书在策划之初，就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注，与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审，Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*)，《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权，John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

翁史烈

2013年8月

前 言

随着能源消耗的迅速增长和化石能源利用所带来严重的环境污染,生物质能源的研究和开发,已成为国内外众多学者研究和关注的热点。能源生产和消费革命,关乎发展与民生,因此,从根本上解决我国的能源问题,不断满足经济和社会发展的需要,保护环境,实现可持续发展,除大力提高能源效率外,加快开发利用生物质能源势在必行。生物质生物转换技术是生物质能转换技术之一,是用微生物发酵方法将生物质能转变成燃料物质的技术,主要包括沼气技术和燃料乙醇技术。沼气是利用人畜粪便、农作物秸秆、有机废物通过厌氧发酵产生的以甲烷为主的混合气体,通过燃烧产生热能。在我国,沼气技术的发展历史悠久,在过去的几十年里,沼气不仅解决了我国农村能源短缺问题,而且在农村环境保护、生态建设等方面发挥了积极的作用。乙醇又称酒精,是由C、H、O三种元素组成的有机化合物。燃料乙醇是未加变性剂的、可作为燃料用的无水乙醇。自20世纪70—80年代我国就开始了燃料乙醇的开发与利用研究工作。目前,燃料乙醇已在我国多个省市进行使用试点,在我国车用燃料替代体系中发挥着重要的作用。生物质生物转换技术的能源产品沼气及燃料乙醇因其性能优势,使得该技术的开发有着广阔的应用前景。因此,发展生物质生物转换技术对能源的有效利用和可持续发展都具有重要意义。

本书根据作者多年从事生物质能源教学与研究的经验,从沼气技术和燃料乙醇技术的发展需求入手,针对各种典型原料的厌氧消化制取沼气技术及甜高粱茎秆制取乙醇技术进行了深入探讨,以作者多年研究成果为基础,全面系统地介绍了生物质的物理化学特性,沼气技术及甜高粱发酵制取乙醇技术的原理、工艺及设备。本书主要包括生物质生物转换技术的概念、分类、生物质的物理化学特性、典型生物质特性的研究;生物质厌氧消化的

原理,禽畜粪便厌氧消化制取沼气技术中不同温度、不同接种量、不同料液浓度条件下厌氧发酵过程中产气特性及其营养成分变化,蔬菜废弃物厌氧消化制取沼气技术;木质纤维素原料预处理技术,碱预处理对芦笋秸秆厌氧发酵产沼气的影响,酸预处理对水稻秸秆厌氧发酵产沼气的影响,氨预处理及氨-生物联合预处理对小麦秸秆厌氧发酵产沼气的影响;沼气发酵残余物做基肥及沼液追肥对小白菜产量、品质及土壤养分含量的影响;甜高粱茎秆汁液浓缩及防腐剂储藏技术,甜高粱茎秆自发气调储藏和自然干燥长效储藏的研究;甜高粱液态发酵基本原理及工艺,固定化酵母转化甜高粱茎秆汁液生产乙醇的工艺参数及营养微环境的调控与优化;甜高粱固态发酵转化乙醇技术的工艺,自然干燥的甜高粱茎秆复水固态发酵生产乙醇的因素分析与优化,甜高粱茎秆乙醇固态发酵多联产工程实例与分析;木质纤维素乙醇生产基本原理与工艺,SO₂-蒸汽预处理甜高粱茎秆残渣高浓度基质酶水解发酵制取乙醇研究,不同方法预处理甜高粱茎秆残渣酶水解及乙醇发酵的研究等内容,以期对我国生物质能源研究与开发起到积极的推动作用。本书可供从事新能源和可再生能源领域的高等院校师生、研究人员、管理人员和工程技术人员参考。

本书由上海交通大学刘荣厚教授、四川农业大学沈飞教授和上海交通大学曹卫星博士共同撰写,其中,刘荣厚撰写第1章、第2章、第3章和第4章;沈飞撰写第6章、第7章和第8章;曹卫星撰写第5章;最后由刘荣厚教授统稿。本书素材主要来源于上海交通大学农业与生物学院生物质能工程研究中心承担的多项项目,包括欧盟项目、国家自然科学基金项目、农业部项目、公益性行业(农业)科研专项、上海市科委项目等的研究报告,此外,刘荣厚教授所指导完成的博士后研究报告、博士学位论文、硕士学位论文,以及他们在学术期刊发表的论文也是本书材料的主要来源。博士后梅晓岩及很多研究生,包括博士研究生(沈飞、曹卫星、孙辰等)和硕士研究生(王远远、覃国栋、吴晋锴、王璐、黄历、郝元元、汪彤彤等)参与了研究工作及研究报告或学位论文的撰写,在此表示诚挚的谢意。上海交通大学出版社的杨迎春编辑对本书的撰写给予了热情指导,在此表示感谢。

本书在编写过程中,同时也参考了大量国内外同行专家及学者撰写的著作以及其他技术资料等,在此表示深深的谢意。由于书中内容涉及面广,加之编者水平有限,书中存在的错误和不足之处,欢迎读者批评指正。

目 录

第 1 章 生物质生物转换技术概述及生物质的特性	001
1.1 生物质生物转换技术概述	001
1.1.1 生物质生物转换技术的分类	001
1.1.2 生物质资源	002
1.1.3 发展生物质生物转换技术的重要性	003
1.2 生物质的特性	004
1.2.1 生物质的化学组成	004
1.2.2 生物质的工业分析与元素分析	004
1.2.3 生物质的热值	005
1.2.4 生物质的物理和热特性	006
1.3 典型生物质特性的研究	008
1.3.1 试验材料采集与制备	008
1.3.2 生物质化学组成的比较与分析	009
1.3.3 生物质的工业分析和元素组成的比较与分析	014
1.3.4 三个地区玉米秸秆特性分析	019
参考文献	021
第 2 章 粪便和蔬菜废弃物制取沼气技术	023
2.1 生物质厌氧消化的原理	023
2.1.1 厌氧消化的原理	023
2.1.2 沼气发酵的工艺条件及工艺类型	025
2.1.3 有机废弃物产甲烷潜力分析	026
2.1.4 无活动盖底层出料水压式沼气池的构造及工作原理	026
2.2 禽畜粪便厌氧消化制取沼气技术	028
2.2.1 试验装置与方法	028
2.2.2 不同温度条件下厌氧发酵过程中产气特性及其营养成分的变化	032
2.2.3 不同接种量条件下厌氧发酵过程中产气特性及营养成分的变化	042

2.2.4	不同料液浓度对厌氧发酵过程中产气特性及其营养成分的变化	050
2.2.5	小结	060
2.3	蔬菜废弃物厌氧消化制取沼气技术	062
2.3.1	材料与方法	062
2.3.2	发酵过程 pH 值的变化	064
2.3.3	发酵过程 VFA 的变化	065
2.3.4	发酵过程氨态氮的变化	066
2.3.5	发酵过程产气量的变化	067
2.3.6	发酵过程甲烷含量的变化	068
2.3.7	小结	069
	参考文献	069

第 3 章 木质纤维素原料预处理及其沼气发酵技术 072

3.1	木质纤维素原料预处理技术	072
3.1.1	物理法预处理	072
3.1.2	化学法预处理	073
3.1.3	生物法预处理	074
3.2	碱预处理对芦笋秸秆厌氧发酵产沼气的影响	074
3.2.1	材料与方法	075
3.2.2	NaOH 预处理及其沼气发酵后木质纤维素的变化	076
3.2.3	NaOH 预处理时间对沼气发酵产气效果的影响	077
3.2.4	芦笋秸秆粒径大小对沼气发酵产气效果的影响	080
3.2.5	NaOH 预处理质量分数对沼气发酵产气效果的影响	082
3.2.6	小结	084
3.3	酸预处理对水稻秸秆厌氧发酵产沼气的影响	085
3.3.1	材料与方法	085
3.3.2	水稻秸秆组分的变化	086
3.3.3	不同浓度的酸处理对日产气量的影响	087
3.3.4	不同浓度的酸处理对 pH 值的影响	087
3.3.5	不同浓度的酸处理对甲烷含量的影响	088
3.3.6	不同浓度的酸处理对总产气量的影响	088
3.3.7	小结	089
3.4	氨预处理对小麦秸秆厌氧发酵产沼气的影响	089
3.4.1	氨预处理时间对小麦秸秆厌氧发酵产沼气的影响	089
3.4.2	氨预处理浓度对小麦秸秆厌氧发酵产沼气的影响	094

3.5 氨—生物联合预处理对小麦秸秆厌氧发酵产沼气的影响	097
3.5.1 生物预处理的微生物添加量的影响	097
3.5.2 生物预处理 pH 值的影响	102
参考文献	106
第4章 沼气发酵残余物的肥料化利用技术	108
4.1 沼气发酵残余物作基肥对小白菜产量、品质及土壤养分含量的影响	108
4.1.1 材料与方法	108
4.1.2 不同施肥处理对小白菜产量的影响	126
4.1.3 不同施肥处理对小白菜品质的影响	127
4.1.4 不同施肥处理对土壤养分含量的影响	130
4.1.5 小结	133
4.2 沼液追肥对小白菜生物学性状、产量和品质的影响	133
4.2.1 材料与方法	134
4.2.2 不同沼液施用浓度对小白菜生物学性状的影响	135
4.2.3 不同沼液施用浓度对小白菜产量的影响	138
4.2.4 不同沼液施用浓度对小白菜品质的影响	139
4.2.5 小结	142
参考文献	142
第5章 甜高粱茎秆及汁液储藏技术	144
5.1 甜高粱茎秆汁液浓缩储藏技术	144
5.1.1 甜高粱茎秆及其汁液成分分析	145
5.1.2 甜高粱茎秆汁液浓缩储藏	146
5.1.3 浓缩储藏方法的应用前景	150
5.1.4 小结	151
5.2 甜高粱茎秆汁液防腐剂储藏技术	151
5.2.1 防腐剂及其储藏原理	152
5.2.2 添加防腐剂储藏甜高粱茎秆汁液技术	153
5.2.3 小结	169
5.3 甜高粱茎秆采后生理特性及自发气调储藏的研究	169
5.3.1 甜高粱茎秆储藏	169
5.3.2 甜高粱茎秆采后呼吸代谢特性	171
5.3.3 小结	177

5.4	甜高粱茎秆自然干燥长效储藏的研究	178
5.4.1	甜高粱茎秆干燥储藏方法	178
5.4.2	甜高粱茎秆干燥储藏过程中各指标的变化	179
5.4.3	小结	187
	参考文献	188
第6章	甜高粱液态发酵制取乙醇技术	190
6.1	甜高粱液态发酵基本原理及工艺	190
6.1.1	甜高粱液态发酵的基本原理及生化过程	190
6.1.2	甜高粱液态发酵生产乙醇的基本工艺	192
6.2	甜高粱汁液乙醇发酵前处理技术研究	194
6.2.1	壳聚糖对甜高粱茎秆汁液澄清性能的影响	194
6.2.2	壳聚糖预处理甜高粱茎秆汁液参数优化及验证	197
6.2.3	预处理后及对照的汁液性质及乙醇发酵情况比较	200
6.2.4	小结	202
6.3	固定化酵母转化甜高粱茎秆汁液生产乙醇:工艺参数调控与 优化	203
6.3.1	发酵温度的影响	204
6.3.2	发酵 pH 值的影响	205
6.3.3	固定化酵母粒子填充率的影响	207
6.3.4	混合搅拌转速的影响	209
6.3.5	主要工艺参数优化	211
6.3.6	固定化酵母混合糖发酵动力学	220
6.3.7	小结	224
6.4	固定化酵母转化甜高粱茎秆汁液生产乙醇:营养微环境的调控与 优化	224
6.4.1	不同甜高粱品种的组分分析及乙醇发酵的研究	225
6.4.2	主要营养元素对甜高粱茎秆汁液乙醇发酵的调控	229
6.4.3	甜高粱茎秆汁液碳/氮调配对乙醇发酵的影响及优化	238
6.4.4	微量元素对甜高粱茎秆汁液乙醇发酵的影响与调控	246
	参考文献	253
第7章	甜高粱固态发酵制取乙醇技术	256
7.1	甜高粱固态发酵转化乙醇技术的工艺	256
7.2	自然干燥的甜高粱茎秆复水固态发酵生产乙醇可行性及因素分析与	

优化	257
7.2.1 自然干燥并长期干燥储藏后甜高粱茎秆复水乙醇发酵可行性分析	258
7.2.2 自然干燥的甜高粱茎秆乙醇固态发酵影响因素分析	259
7.2.3 自然干燥甜高粱茎秆乙醇固态发酵工艺优化	274
7.2.4 小结	280
7.3 甜高粱茎秆乙醇固态发酵多联产工程实例与分析	281
7.3.1 工程及工艺概况	281
7.3.2 工程生产能耗分析	285
7.3.3 工程经济性分析	287
7.3.4 小结	292
参考文献	292
第8章 甜高粱茎秆木质纤维素残渣预处理及乙醇发酵技术	295
8.1 木质纤维素乙醇生产基本原理与工艺	295
8.1.1 木质纤维素原料生产乙醇基本原理	295
8.1.2 纤维素类物质乙醇转化的一般流程	296
8.2 SO ₂ -蒸汽预处理甜高粱茎秆残渣高浓度基质酶水解发酵制取乙醇 研究	298
8.2.1 研究过程与主要方法	301
8.2.2 原料组分分析及预处理条件评价	303
8.2.3 不同水解条件下对高基质浓度纤维素酶水解的影响	307
8.2.4 不同的发酵条件对高基质浓度水解液发酵的影响	314
8.2.5 小结	321
8.3 不同方法预处理甜高粱茎秆残渣酶水解及乙醇发酵的研究	322
8.3.1 主要研究过程与方法	322
8.3.2 甜高粱茎秆原料主要成分及表观变化分析	324
8.3.3 预处理前后甜高粱茎秆残渣主要成分变化	325
8.3.4 酶水解过程中糖分含量的变化	328
8.3.5 不同预处理方法对甜高粱茎秆残渣水解及后续发酵的影响	330
8.3.6 预处理前后结构分析	332
8.3.7 小结	334
参考文献	335
索引	338

第 1 章 生物质生物转换技术概述及生物质的特性

生物质是自然界中有生命的、可以生长的各种有机物质,包括动植物和微生物。生物质能是由太阳能转化而来的以化学能形式储藏在生物质中的能量。自 2006 年 1 月 1 日起施行的《中华人民共和国可再生能源法》将生物质能的含义解释为:生物质能,是指利用自然界的植物、粪便以及城乡有机废物转化成的能源。与传统的矿物燃料相比,生物质资源具有明显的特点,即可再生性和无污染性。生物质的基本来源是由绿色植物通过光合作用把水和二氧化碳转化成碳水化合物而形成。因此,绿色植物利用太阳能进行光合作用是维持地球上千百万种生物生存下去的基础。可以通过各种生物质能转换技术把生物质能加以利用。

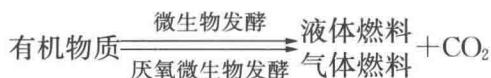
1.1 生物质生物转换技术概述

1.1.1 生物质生物转换技术的分类

通常把生物质能通过一定的方法和手段转变成燃料物质的技术称为生物质能转换技术。生物质能转换技术总的可分为直接燃烧技术、生物转换技术、热化学转换技术和其他转换技术 4 种主要类型^[1]。

1.1.1.1 生物质生物转换技术定义

生物质生物转换技术是生物质能转换技术之一,是用微生物发酵方法将生物质能转变成燃料物质的技术,其通式为



通常产生的液体燃料为乙醇,气体燃料为沼气。

1.1.1.2 生物质生物转换技术的分类

生物质生物转换技术主要分为乙醇技术和沼气技术两种类型。

1) 乙醇技术

乙醇(ethanol)又称酒精,是由 C、H、O 三种元素组成的有机化合物,乙醇分