

“十一五”国家重点图书出版规划项目



应用生物技术大系

Comprehensive Series of Applied Biotechnology



生物能源技术与工程化

张百良 著



科学出版社

www.sciencep.com

TK6
Z073

“十一五”国家重点图书出版规划项目

应用生物技术大系

生物能源技术与工程化

张百良 著

711
2073 科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本研究生物能源技术与工程化的专著,内容包括生物能源技术及生物能源资源现状与评价;高效厌氧生物反应器、生物燃气燃烧设备研制及应用;生物甲醇、生物乙醇、生物柴油生产工艺及技术;生物质成型燃料技术与设备研发、工程化及评价。本书集中体现了生物能源技术和设备的研究思路、技术路线、研究方法、试验过程及应用效果,具有突出的创新性和实践性。

本书适用于生物能源、环境工程、生物化工、农业工程等领域的科研及工程技术人员,也可作为高等院校相关专业研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

生物能源技术与工程化/张百良著. —北京:科学出版社, 2009

(应用生物技术大系)

ISBN 978-7-03-025769-7

I. 生… II. 张… III. 生物能源-应用-研究 IV. TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 182444 号

责任编辑:夏 梁 陈珊珊/责任校对:张小霞

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009 年 12 月第一次印刷 印张: 39 插页: 1

印数: 1—2 000 字数: 925 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

编著委员会

主任委员

张百良

副主任委员

徐桂转 杨世关 宋安东

委员

张百良 徐桂转 杨世关 宋安东 樊峰鸣
王许涛 王吉庆

参加编写人员

张百良	马孝琴	杨世关	朱灵峰	王吉庆	刘圣勇
宋安东	张杰	樊峰鸣	张敏	吴明作	徐桂转
丁一	刘俊红	赵青玲	王许涛	宋华民	赵兴涛
金显春	苏同福	刘东	王久臣	郑戈	蔡宪杰
谷胜利	岳建芝	金听祥	何鸿玉	杨继涛	胡张保
刘亚纳	张彦	任天宝	翁伟	刘会丽	杨波
兰维娟	罗志华	张培远	冯淑文		

序 —

10 多年来,世界各国对保持经济社会可持续发展与改善生态环境问题的关注日益突出。由于人类活动导致的全球气候变化致使干旱、洪涝等极端灾害频繁、作物减产、粮食安全保障受到威胁。大量消耗石化能源带来的温室气体排放与环境污染、石化资源的日益短缺,促使世界各国广泛重视可再生能源开发,纷纷加强了对可再生能源科学技术及其产业化工程的研究。特别是,国际石油价格大幅度振荡,进一步激起了各国对石化能源利用前景的特别关注,各经济大国都制定了相关中长期发展战略,绘制了技术路线图,数倍增加了对生物能源等可再生能源开发研究的投入,寻求补救本国能源稳定供给不足、解决能源问题的新途径。其中因生物质资源丰富、可以再生、利用途径较多,因此,成为全球可再生清洁能源研究的重点方向之一。

人类从燧人氏发明人工取火开始,生物质能就成为人类赖以生存的能源之一。生物质能主要来源于植物和动物废弃物。植物生物质含有热值高的木质素,可以直接燃烧取得热能;又含有含量很高的,可以转化成能量密度较高的生物乙醇、甲醇、二甲醚等液体能源的纤维素、半纤维素、淀粉、糖类;有的还含有含量很高的脂肪、油液,可以炼制成柴油和其他液态燃料。生物质能的主要成分是碳氢化合物,因此,加工过程中对大气的污染较小,但也存在资源广域分布、能量密度小、预处理成本高等问题。目前已有较好的科学技术基础和多种形式的有效应用方式,人们关心的重点之一是如何有效利用其取代部分液态燃料,如生物乙醇、生物柴油等,减少温室气体排放,其间,生物质能利用工程化问题的研究成为关键之一,因为工程是科学知识与技术发明转化为现实生产力的关键环节。工程化研究可以架起科学发现、技术发明与产业发展的桥梁,是促进产业革命和社会进步的强大杠杆。科学技术研究的工程化要关注科学要素、技术要素、经济要素、管理要素、社会要素、文化要素、制度要素和环境要素等多要素的集成、选择和优化。工程思维所追求的价值目标是知识价值与经济价值、社会价值、环境价值、人文价值等的融合。新的工程理念和工程观要求工程活动要建立在遵循自然规律和社会规律的基础上,坚持以人为本,环境友好,促进人、自然和社会的协调发展。即使在现代,科学、技术要形成大规模、直接的生产力,仍然离不开工程化这一关键环节。

张百良教授长期从事生物质能研究,重视技术工程化的研究与试验,把工程化的研究试验作为课题的重要研究内容。例如,生物固体燃料研究,从秸秆的物理化学特性、燃烧特性、力学特性到秸秆成型燃料成套设备的研制、推广应用;还涉及广域分布式资源的收集、运输、经营管理和政策建议等,旨在使成型生物质资源化,变为环境友好的新能源原料和农民增收的新产业;生物气体燃料研究,从秸秆收集、储存,到沼气发生器-发电系统设计,从实验室转移到工厂进行系统的工程试验;生物质液体燃料,从爆破预处理等多方面开始秸秆乙醇基础性研究,目前已在企业进行工程化中试。该书发表的大量原始实验结果和分析,近万个实验数据,数百幅表、图,均来源于作者领导的学

术团队的试验实践，多个动力学模型反映了有关研究获得的规律，对于促进我国农业生物质能开发利用及其产业化工程技术研究具有重要参考价值。

为此，我愿意向同行推荐这一具有创新意义、内容丰富的专著。希望将有更多的专家、学者，为协力推进我国生物质能科学技术的工程化研究，作出更好、更大的贡献。

汪懋华

中国工程院院士
中国农业工程学会理事长
2008年12月

序 二

能源紧缺已经成为世界面临的共性问题，其中尤以石油为甚。我国石油消费的近半数依靠进口。生物能源的开发利用已经成为我国能源发展的重点。

利用粮食制乙醇等措施解决能源问题显然不符合我国确保粮食安全的国策。张百良教授等著的《生物能源技术与工程化》正是以农业生产的副产品——秸秆为主要对象，研究制备沼气、乙醇，或粉碎加压制成型燃料、利用酶催化剂制备生物柴油等。这些都是当前国内外探索研究的主攻方向。

该书不是以编著已有知识为主，而是以国际上生物能源开发利用领域中的关键问题为重点，探索新的技术，如探索比以淀粉（粮食）为原料更困难的，以秸秆纤维为原料制备乙醇的技术，作者利用汽爆秸秆预处理技术成功地实现了这一目标；利用内循环式厌氧反应器提高沼气产出率，这些都具有鲜明的创新性，已达到国际水平。尤其是该书不是停留于实验室内的试验研究与论文的发表，而是力求工程化。例如，作者对生物秸秆成型燃料的研究不仅完成了秸秆成型特性与设备的研制，还成功开发了适合这类燃料的燃烧炉，以便于成果的推广。

该书为了便于读者熟悉生物能源这一新领域的研究成果，编入了热力工程学与生物学相关基础知识以及技术经济的评价方法。该书对生物能源的核心技术、瓶颈问题、我国的发展现状、能源发展的路线图等研究都颇有针对性和现实意义。

总之，该书具有以下特点：研究内容紧密针对核心技术，理论密切联系实际，研究成果力求工程化。该书的出版将对我国生物能源的研究、开发与推广以及这一领域高级人才的培养均具有重要意义。



中国工程院院士
东北农业大学教授
2008年11月16日

序 三

张百良先生曾任河南农业大学校长，他既是一位教育家，又是农业工程领域著名专家。面对全球能源危机，面对祖国石化能源的相对短缺，张百良教授以他自己的远见卓识，关注我国的农村能源事业，经教育部批准，于1981年在河南农业大学创办了我国第一个农村能源专业，他也把自己的精力迅速投向农村能源的教学和科研上来，经过10多年的成果积累，1995年出版了专著《农村能源工程学》一书，对推进我国农村能源事业发挥了重要作用。

时间又过去10多年，张先生的新著《生物能源技术与工程化》即将出版问世，我对他表示热烈的祝贺和称赞。这本书的最大特点是理论研究比较深入，技术工程化研究特色鲜明。丰富的内容取材于他和他培养的30多位博士研究生和硕士研究生在生物能源方面的研究成果，这些问题包括生物气体燃料，如“沼气厌氧（IC）反应器研究”、“秸秆汽爆技术及其在发酵中的应用”等；生物液体燃料，如“秸秆纤维乙醇关键技术研究及秸秆纤维预处理研究”等；生物固体燃料，如“双向液压成型燃料技术及成套设备”等。

我国是一个农业大国，随着粮食的大量生产也必然带来大量的秸秆，在历史长河中，秸秆既是农村人的燃料，也是家家生火、户户冒烟的土能源。但随着农村人口的增加和社会的进步，传统意义上的秸秆利用已经不适应现代社会需求，而且直接分散的秸秆燃烧利用，也会带来严重的环境污染。

因此，研发既节能又环保的秸秆利用技术便成为我国应予特别重视的课题。张百良教授领导他的团队，急国家之所急，想人民之所想，花费20余年时间，推出了秸秆成型燃料技术等成果，并将其作为国内生物能源技术实现工程化的范例深入研究，在把成果推向生产实际的同时将其精华编辑在即将出版的书中以飨读者。举此一例是想说明《生物能源技术与工程化》理论联系实际的特色。

我在此为该书写序，一方面是对该书的出版表示祝贺；另一方面，也想表达我对在我国发展生物能源的支持和关切。



中国工程院院士

长安大学教授

2008年12月18日

前 言

近 10 年来中国经济每年以 9% 以上的速度持续、稳定、快速增长, 能源消费同样大幅度增加。中国由 20 世纪 80 年代的石油出口国, 已变成一半消费量依靠进口的世界能源消费第二大国。能源消费持续快速增长带来的环境和生态问题已引起中国乃至世界的关注。

1973 年第一次世界能源危机期间, 纽约石油期货价格由每桶 3 美元飙升到每桶 12 美元。2008 年也是一个石油价格发生剧烈变化的年份, 石油期货价格由 5 月的 147.27 美元降到 12 月的不足 40 美元。石油价格的这种无规律的、不可控的急剧变化牵动着整个世界的神经, 引发世界恐慌。油价也带动了煤价, 中国原煤价格 10 年间提高了近 10 倍。能源价格的上涨导致了世界粮食价格暴涨, CPI 和 PPI 急剧波动, 严重威胁世界经济的健康发展, 以及人类生活的和谐与稳定。为了应对这种状况, 世界各国, 尤其是发达国家和正在快速进行现代化建设的发展中国家纷纷从政治、经济、外交甚至军事的角度制定了应对措施, 以确保本国的能源安全。

生物能源的可储存、可运输、可转换、可再生性是其其他可再生能源不可比拟的, 因此, 世界各国在新形势下均采取了强有力的经济 and 政策措施来推动生物能源的发展。中国有数以亿计的生物能源, 其历来是中国农村生活和生产的支柱能源, 所以, 可预料生物能源在将来的高品位能源构成中仍将占有重要位置。

中国政府 2007 年 12 月发表的能源政策白皮书声明: 要走有中国特色的能源发展道路, 今天和将来都绝不其他国家 and 地区构成能源威胁。中国从长远利益出发, 已确立了能源发展的战略构想, 其基本点是, 把化石能源的开采、可替代能源的开发, 能源的高效利用、环境安全问题构成一个建设系统, 分别给予促进发展的依赖条件。具体内容包括能源进口、开采和储备, 核能利用, 生物能源等可再生能源开发, 能源节约和供给体制改革等。

本书今天应势出版, 作者为其准备了至少 10 年。与一般知识性和技术性的编著书籍相比, 本书具有几个鲜明特点: 首先, 它有突出的创新性。全书的素材均来自作者 10 余年间与其 30 多个研究生围绕生物能源这个主题所开展的研究和实践成果, 每项课题的研究都是站在全国甚至世界的高度, 针对本领域的核心问题而开展。其次, 它有很强的实践性。作者在研究过程中发表了 100 余篇论文, 但并没有停留在论文阶段不前, 而是不失时机地将研究成果向生产力转化, 积极推进技术的工程化进程。这些研究成果有的获得国家专利并成功用于生产, 有的在企业进行中试, 有的又与国内外合作进入了更深层次的研究。最后, 它体现了较强的基础性。书中每个篇章都涉及基础性研究内容, 并原原本本保留了研究过程和结果。

全书共分五部分。生物能源述评由张百良教授撰写。第一篇生物气体燃料, 由华北电力大学杨世关博士 (南京大学博士后)、张杰博士 (清华大学博士后), 河南城建学院

王许涛博士等撰写，全篇由杨世关博士组织编辑；第二篇生物液体燃料，由河南农业大学宋安东博士（山东大学博士后），华北水利水电学院朱灵峰博士，河南农业大学徐桂转博士、宋华民博士等撰写，全篇由宋安东博士组织编辑；第三篇生物质固体成型燃料，由国能生物发电集团有限公司樊峰鸣博士、马孝琴博士（浙江大学博士后），华北水利水电学院赵青玲博士，河南城建学院刘俊红博士等撰写，全篇由樊峰鸣博士组织编辑；第四篇生物能源资源，由河南农业大学吴明作博士后，中国海洋石油总公司丁一博士，农业部科技教育司王久臣硕士等撰写，全篇由王许涛博士组织编辑。徐桂转博士、杨世关博士和王吉庆博士对全书进行编辑，张百良教授对全书进行统审定稿。

在全世界对生物能源表现出极大关注的形势下，希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用。由于试验条件的不同，以及技术路线的差异，读者在研究或实践过程中可能会发现一些与本书数据和结论存在差异的地方，这是学术活动的正常表现，我们愿与广大研究工作者和工程技术人员开展探讨和合作。作为一门新兴学科，生物能源的发展涉及诸多科学技术领域，我们倍感能力不足，水平有限，因此，本书难免有疏漏和缺陷，敬请有关专家和广大读者批评指正。

著 者

2008 年 12 月

目 录

序一	
序二	
序三	
前言	
生物能源述评	1

第一篇 生物气体燃料

1 内循环厌氧反应器研究	13
引言	13
1.1 IC 反应器水力特性研究	15
1.1.1 试验设备及试验系统流程	15
1.1.2 IC 反应器水力特性试验	15
1.2 IC 反应器技术性能试验研究	22
1.2.1 材料与方法	22
1.2.2 结果与分析	24
1.3 IC 反应器基质降解动力学特性研究	26
1.3.1 IC 反应器基质降解动力学模型的建立	26
1.3.2 IC 反应器基质降解动力学分析	29
1.4 IC 反应器颗粒污泥特性研究	30
1.4.1 材料与方法	30
1.4.2 结果与分析	31
1.5 蚓粪对厌氧发酵的促进作用及对 IC 反应器污泥颗粒化的影响	34
1.5.1 蚓粪对厌氧发酵效果影响试验	35
1.5.2 蚓粪对 IC 反应器污泥颗粒化的影响	39
1.6 结论	44
2 IC 反应器处理猪粪废水条件下厌氧污泥颗粒化研究	46
引言	46
2.1 IC 反应器处理猪粪废水启动初期的工艺条件研究	48
2.1.1 试验材料与方法	48
2.1.2 试验方法	49
2.1.3 结果与分析	49
2.2 IC 反应器启动过程中颗粒污泥的培养	54
2.2.1 试验材料和方法	54
2.2.2 试验方法	55

2.2.3 结果与分析	56
2.3 IC 反应器处理猪粪废水运行条件下颗粒污泥特性的变化	75
2.3.1 试验方法	75
2.3.2 结果与分析	76
2.4 结论	82
3 秸秆预处理及厌氧发酵产沼气研究	84
引言	84
3.1 蒸汽爆破设备及工作原理	85
3.1.1 传统汽爆(汽喷)工艺	85
3.1.2 蒸汽爆破设备结构及参数	86
3.2 汽爆预处理影响因素及汽爆物料结构特性	88
3.2.1 材料和方法	89
3.2.2 结果与分析	90
3.3 蒸汽爆破预处理秸秆发酵生产沼气试验研究	103
3.3.1 材料和方法	103
3.3.2 结果与分析	105
3.4 粉碎粒径对玉米秸秆厌氧发酵的影响	115
3.4.1 材料和方法	115
3.4.2 结果与分析	116
3.5 NaOH 处理对玉米秸秆厌氧发酵的影响	118
3.5.1 材料和方法	118
3.5.2 结果与分析	119
3.6 结论	122
4 生物质气化烤烟系统研究	124
引言	124
4.1 第一代生物质气化烤烟系统	126
4.1.1 系统设计	126
4.1.2 关键技术研究	128
4.1.3 系统运行试验	132
4.2 第二代生物质气化烤烟系统	135
4.2.1 系统组成	135
4.2.2 系统运行试验	137
4.2.3 结论	139

第二篇 生物液体燃料

5 生物质原料气合成甲醇研究	143
引言	143
5.1 秸秆类生物质热化学法制甲醇合成气的试验研究	145
5.1.1 秸秆类生物质热化学法制原料气	145
5.1.2 秸秆类生物质制合成气试验	147

5.2 秸秆类生物质煤气催化合成甲醇试验研究	149
5.2.1 甲醇合成方法与工艺流程	149
5.2.2 合成试验	151
5.2.3 试验结果与分析	153
5.3 秸秆气化合成气制备甲醇工艺条件试验研究	160
5.3.1 试验设计	160
5.3.2 试验部分	161
5.4 秸秆气化合成气合成甲醇的动力学试验研究	169
5.4.1 试验设计	169
5.4.2 试验结果与分析	170
5.5 秸秆类生物质合成甲醇的热力学性质研究	177
5.5.1 试验部分	177
5.5.2 秸秆合成气合成甲醇反应的反应热	178
5.5.3 合成甲醇反应的平衡常数及平衡组成	181
5.6 结论	185
6 生物质纤维燃料乙醇生产工艺试验研究	186
引言	186
6.1 固态培养降解秸秆木质素试验研究	188
6.1.1 材料和方法	188
6.1.2 结果与分析	191
6.2 木质素降解酶降解秸秆木质素试验研究	203
6.2.1 材料和方法	203
6.2.2 结果与分析	204
6.3 玉米秸秆稀酸预处理试验	208
6.3.1 材料与方法	208
6.3.2 结果与分析	209
6.4 秸秆双酶糖化条件试验及木质素降解对秸秆糖化效果的影响	210
6.4.1 材料与方法	210
6.4.2 结果与分析	211
6.5 戊糖发酵菌种的对比研究	224
6.5.1 材料与方法	224
6.5.2 结果与分析	225
6.6 戊糖和己糖同步发酵生产燃料乙醇条件试验研究	229
6.6.1 材料与方法	229
6.6.2 结果与分析	229
6.7 基于秸秆糖化液脱毒预处理的试验研究	233
6.7.1 抑制物的作用机制分析	233
6.7.2 不同脱毒方法对秸秆糖化液发酵生产乙醇研究	234
6.8 玉米秸秆糖化液发酵生产乙醇试验研究	236
6.8.1 材料与方法	236

6.8.2	玉米秸秆糖化液发酵乙醇关键工艺条件试验研究	236
6.8.3	玉米秸秆糖化液发酵条件优化	238
6.8.4	汽爆玉米秸秆糖醇转化率	239
6.9	BPSS&CF 秸秆纤维燃料乙醇生产工艺的试验研究	241
6.9.1	工艺流程总体设计	241
6.9.2	工艺流程	241
6.9.3	主要操作要点及技术指标	242
6.9.4	技术分析	243
6.10	结论	244
7	脂肪酶催化植物油制取生物柴油的研究	246
	引言	246
7.1	分析、测试方法	248
7.1.1	材料与方法	248
7.1.2	原料油成分分析方法及结果	249
7.1.3	生物柴油中脂肪酸甲酯的测定及酯交换率的计算	250
7.2	脂肪酶间歇催化菜籽油制取生物柴油的研究	253
7.2.1	脂肪酶催化菜籽油间歇反应试验	253
7.2.2	响应面法优化试验	258
7.2.3	脂肪酶重复使用及间歇催化菜籽油的放大试验	262
7.2.4	脂肪酶间歇催化菜籽油酯交换反应机制及动力学研究	264
7.3	脂肪酶间歇催化桐油制取生物柴油的研究	267
7.3.1	脂肪酶间歇催化桐油反应试验	267
7.3.2	响应面法优化试验	269
7.3.3	脂肪酶间歇催化桐油的实验室放大试验	273
7.3.4	脂肪酶间歇催化桐油酯交换反应催化的机制及动力学研究	274
7.4	菜籽油连续制取生物柴油的研究	276
7.4.1	试验材料和方法	276
7.4.2	试验结果分析与讨论	277
7.4.3	膨胀床连续生产生物柴油的工艺研究	283
7.5	桐油连续制取生物柴油的研究	287
7.5.1	试验材料和方法	287
7.5.2	结果与讨论	287
7.6	生物柴油提取及性能测试试验	291
7.6.1	生物柴油真空蒸馏提取试验	292
7.6.2	生物柴油产品性能测试方法及测试结果	294
7.7	结论	298
8	生物柴油用固体催化剂试验研究	300
	引言	300
8.1	固体碱催化剂制备试验研究	301
8.1.1	试验流程与材料、仪器	301

8.1.2 催化剂材料及制备方法选择	303
8.1.3 固体催化剂制备试验	306
8.2 催化剂的表征	310
8.2.1 试验仪器与方法	310
8.2.2 结果与分析	311
8.3 生物柴油制备试验研究	313
8.3.1 试验方法	313
8.3.2 结果分析	314
8.4 催化剂失活及再生试验	316
8.4.1 试验方法	316
8.4.2 结果与分析	316
8.4.3 催化剂优化试验	321
8.5 结论	324

第三篇 生物质固体成型燃料

9 生物质液压成型机优化设计及其工程化试验	327
引言	327
9.1 液压秸秆成型机的主要设计参数	328
9.1.1 秸秆压缩成型正交试验	329
9.1.2 生产率与冲杆直径和单位能耗关系	337
9.1.3 锥度、锥长与压力、密度关系试验	340
9.2 秸秆压缩成型参数模拟	340
9.2.1 成型压力与成型燃料密度的关系	340
9.2.2 相同温度不同含水率条件下的成型参数	341
9.2.3 不同温度相同含水率条件下的成型参数	343
9.3 HPB-IV型生物质成型机的改进设计及工程试验	344
9.3.1 液压系统的设计	344
9.3.2 成型机的结构设计	346
9.3.3 成型设备系统改进设计指标及参数	347
9.3.4 改进后成型机工作流程	348
9.3.5 改进成型机试验及结果分析	349
9.4 生物质液压成型机能耗测试及分析	349
9.4.1 加热系统能耗测试及分析	350
9.4.2 进料系统的能耗测试及分析	352
9.4.3 液压系统的能耗测试分析	354
9.5 节能降耗的措施	355
9.5.1 加热系统节能措施	355
9.5.2 进料系统节能措施	355
9.5.3 液压系统节能措施	356
9.6 结论	357

10 秸秆成型燃料燃烧设备设计基础	359
引言	359
10.1 秸秆成型燃料燃烧动力学特性试验	359
10.1.1 秸秆燃烧动力学特性的试验	360
10.1.2 秸秆成型燃料燃烧动力学特性	366
10.1.3 秸秆成型燃料的实际锅炉燃烧工况	374
10.2 生物质(秸秆)成型燃料燃烧设备的设计计算	376
10.2.1 生物质成型燃料燃烧特性	376
10.2.2 生物质成型燃料燃烧设备的设计参数	377
10.2.3 生物质成型燃料燃烧设备设计	378
10.3 生物质成型燃料燃烧设备热性能	386
10.3.1 测试试验	386
10.3.2 试验结果与分析	387
10.4 生物质成型燃料燃烧设备空气流动场试验与分析	395
10.4.1 试验	395
10.4.2 试验结果与分析	396
10.5 燃烧设备炉膛温度场试验与分析	403
10.5.1 试验	403
10.5.2 试验结果与分析	404
10.6 燃烧设备炉膛气体浓度场试验与分析	411
10.6.1 试验	411
10.6.2 试验结果与分析	412
10.7 生物质成型燃料燃烧设备的结渣特性	414
10.7.1 试验	414
10.7.2 试验结果与分析	415
10.8 燃烧设备主要设计参数的确定	422
10.8.1 主要设计参数	422
10.8.2 试验结果与分析	422
10.9 结论	425
11 我国生物质成型燃料规模化研究	426
引言	426
11.1 秸秆成型燃料设备综合评价	427
11.1.1 秸秆成型燃料设备选择	427
11.1.2 利用秸秆成型燃料能量分析	431
11.2 秸秆资源的收集与预处理	433
11.2.1 秸秆资源的收集	433
11.2.2 秸秆成型燃料生产原料的供应	435
11.3 松弛密度对秸秆成型燃料规模化生产的影响	436
11.3.1 秸秆成型燃料的松弛密度	436
11.3.2 原料粉碎粒度和含水率对秸秆成型燃料松弛密度的影响	437

11.3.3 讨论	439
11.4 秸秆成型燃料的储运性能对规模化技术的影响	442
11.4.1 秸秆成型燃料耐久性的概念	442
11.4.2 试验	443
11.4.3 试验结果与分析	444
11.5 秸秆成型燃料的燃烧性能对规模化应用的影响	450
11.5.1 试验	451
11.5.2 试验结果与分析	451
11.6 秸秆成型燃料的规模化经营措施	455
11.6.1 我国农村对秸秆成型燃料的市场需求	456
11.6.2 秸秆成型燃料规模化经营障碍	458
11.6.3 秸秆成型燃料规模化发展建议	459
11.7 秸秆成型燃料的价格方案	461
11.7.1 影响秸秆成型燃料价格的因素	461
11.7.2 秸秆成型燃料的价格补贴	462
11.8 秸秆成型燃料规模化生产应用示范案例	464
11.8.1 案例介绍	465
11.8.2 案例的基本信息	467
11.8.3 秸秆成型燃料的生产与应用	467
11.8.4 秸秆成型燃料对村庄能源结构和生态环境的影响	471
11.9 生物质成型燃料规模化机制设计	473
11.9.1 研究路线	473
11.9.2 分析模型	473
11.9.3 理论基础	474
11.9.4 生物质成型燃料推广的利弊	477
11.9.5 生物质成型燃料推广机制设计与政策建议	478
11.10 结论	481
12 秸秆成型燃料燃烧形成的沉积与腐蚀问题研究	483
引言	483
12.1 秸秆成型燃料燃烧形成沉积的影响因素	487
12.1.1 试验材料和装置	487
12.1.2 影响沉积形成因素的试验与分析	489
12.2 秸秆燃烧过程中沉积腐蚀的形成过程与机制	492
12.2.1 试验	493
12.2.2 沉积腐蚀的形成过程与机制	493
12.3 沉积、腐蚀对锅炉的危害	501
12.3.1 沉积对受热面换热效率的影响	501
12.3.2 沉积对锅炉受热面的腐蚀	506
12.4 降低锅炉的沉积与腐蚀的措施	507
12.4.1 自然预处理法	507