



胡松 杨海平 廖奇志 编
Hu Song, Yang Haiping, Liao Qizhi

Research for Clean and Renewable Energy
Biomass Energy

清洁与可再生能源 研究

生物质能

研究生论文精选（一）

Selected Theses of Master Graduates
(Volume I)



中国水利水电出版社
China Water & Power Press



ICARE

华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院
China-EU Institute for Clean and Renewable Energy
at Huazhong University of Science & Technology

生物质能

胡 松 杨海平 廖奇志 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书收录了近两年中欧清洁与可再生能源学院获得中欧双学位的部分硕士毕业生在生物质能利用方面的中英文优秀论文。这些论文涉及生物质燃烧、气化等多种利用方式,并探讨效率、污染物排放以及经济性等多个方面,是探索培养中欧合璧人才的结晶,体现了中欧导师合作指导研究生的成果。

本书文笔流畅,内容广泛,信息量大,对于高等学校相关专业师生、相关行业的科技人员和管理工作者以及关注这个领域的公众来说,是有价值的参考书。

Abstract

This book is a collection of outstanding theses in both Chinese and English languages, from graduates of the China - EU Institute for Clean and Renewable Energy's (ICARE) double master's degree programme in the recent two years. Concerned with subjects including pollutant emission control, energy efficiency and economic efficiency in utilizations of biomass energy including biomass burning and gasification, these theses are fruits of labor from students and their advisors at ICARE, and represent the achievements of China - EU joint - education in energy technologies. The information in this book should prove the value for educators, students, researchers, managers and all people interested in the field of biomass energy.

图书在版编目(CIP)数据

生物质能 / 胡松, 杨海平, 廖奇志编. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2015. 3
(清洁与可再生能源研究)
ISBN 978-7-5170-3018-8

I. ①生… II. ①胡… ②杨… ③廖… III. ①生物能
源—研究 IV. ①TK6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第047014号

书 名	清洁与可再生能源研究 生物质能
作 者	胡 松 杨海平 廖奇志 编
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	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 25.5印张 678千字
版 次	2015年3月第1版 2015年3月第1次印刷
定 价	64.00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

编 委 会

(Editorial Committee)

主 任 (Directors of editorial committee)

黄树红 胡 松 Dider Mayer

委 员 (Committee members)

(按首字母排序)

Alain Thorel	Amaya Martinez	Antonia Gil	Antonio Valero
蔡顺康	陈 娣	陈 刚	陈汉平
程 强	程晓敏	Christian Beauger	Cristobal Cortes
Dong Wei	Edward Bentley	Enrico Bocci	Enrico Pandeli
Floryan De Campo	George Caralis	Georges Kariniotakis	
何 刚	黄素逸	黄亚继	黄云辉
胡 辉	胡 茜	胡平放	Hubert Thieriot
Ian Forbes	Inmaculada Arauzo		Joaquim Nassar
Laurent Fulcheri	Laurent Catoire	黎 斌	李 箭
李敬东	李学敏	廖奇志	林一歆
刘劲松	刘 洋	Luis Romeo	罗小兵
Michel Aublant	Michel Farine	Pere Roca i Cabarrocas	
Philippe Barboux	Pier Ugo Foscolo	蒲 健	Reddy Kotte
Robert Miles	舒水明	舒朝晖	Stephen McPhail
Takis Chaviaropoulos	Vasileios Riziotis	王 军	谢春华
徐静平	闫云君	杨 晴	杨海平
杨君友	姚 洪	易 辉	曾祥斌
张军营	周文利	邹雪城	邹旭东

丛书主编 (Chief editors of serial books)

黄树红 胡 松 Dider Mayer

前言

清洁与可再生能源包括太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能以及清洁利用的传统能源等。随着传统能源日益紧缺和对环境带来的压力,清洁与可再生能源的开发与利用得到世界各国的广泛关注,越来越多的国家颁布了鼓励发展的政策和措施,清洁与可再生能源的产业规模和对社会发展的影响力正在不断增强,是进一步促进绿色经济以及社会可持续发展的重要因素。中国和欧盟都是世界上的主要经济体,也是主要的能源消费经济体,双方在能源领域的合作对世界的可持续发展有重大意义。

华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院(China-EU Institute for Clean and Renewable Energy,简称 ICARE)是由中国政府和欧盟委员会共同发起建立的中外合作办学机构,得到了中国政府和欧盟资助。是中欧能源合作的一个节点。中国华中科技大学与法国巴黎高科作为牵头大学,联合中国东南大学、中国武汉理工大学、意大利罗马大学、西班牙萨拉戈萨大学、希腊雅典国家技术大学、英国诺森比亚大学、法国佩皮尼昂大学等共6个国家9所重要大学和国际水资源办公室共同创办该学院。学院旨在为清洁和可再生能源领域培养高素质人才,搭建中国和欧洲的专家、学者和研究机构长期深度合作的平台,满足中国经济社会可持续发展以及中国融入世界可持续发展对清洁与可再生能源人才和技术日益增长的需求。学院于2012年3月获得中国教育部批准,正式启动办学,已培养了一批能源领域的中欧双硕士毕业生。

《清洁与可再生能源研究》丛书是一套集合了中欧清洁与可再生能源学院双硕士毕业生中英双语优秀学位论文的论文集。本套丛书包含太阳能热利用、太阳能电池、风能、生物质能、新型电池及电池材料、能源效率等。中欧清洁与可再生能源学院成立以来,已经有100多位中国教授和60多位欧洲教授在学院授课和指导研究生。本丛书反映了这些中国与欧洲学者和他们指导的学生现阶段在清洁与可再生能源方面从事的工作,是探索培养中欧双硕士人才的成果展示,也是中欧导师合作指导研究生的结晶。希望此丛书的出版,能勉励中欧清洁和可再生能源学院毕业生勇于承担时代赋予的使命与责任,在清洁与可再生能源领域发挥所长,实现自我,为中国与世界的清洁与可再生能源事业与社会的可持续发展做出自己的贡献;同时将他们的研究进展系统地介绍给公众,抛砖引玉,为从事清洁与可再生能源行业的科技人员、管理人员以及大专院校相关专业的学生提供参考。

感谢中国政府和欧盟委员会的资助!感谢中国教育部、商务部、科技部和欧盟驻北

京使团的指导、关心和爱护！感谢中共湖北省委、湖北省人民政府、中共武汉市委、武汉市人民政府的支持和帮助！感谢法国驻华使馆和法国驻武汉总领馆的协助！感谢华中科技大学、巴黎高科、东南大学、武汉理工大学、罗马大学、萨拉戈萨大学、雅典国家技术大学、诺森比亚大学、佩皮尼昂大学、国际水资源办公室的直接领导和参与！感谢华中科技大学相关职能部门和兄弟院系的悉心指教和鼎力合作！

感谢所有参与中欧清洁与可再生能源学院授课、指导学生、面试与答辩、运行与管理的教师、客座专家和工作人员！

感谢所有中欧清洁与可再生能源学院学生贡献的聪明才智！

编委会
2015. 2

Preface

Clean and renewable energy encompasses solar, wind, biomass, geothermal, marine energy and other clean energy sources, as well as traditional energy resources developed using cleaner methods. As the consumption of traditional energy resources and the environmental pollution pressures increase, the development and utilization of clean and renewable energy have received worldwide attention. With increasingly more nations enacting policies that encourage its development, the clean and renewable energy industry has grown fast in scale and influence, becoming an important facilitator of green economic and sustainable development. China and the European Union are both major economies of the world, as well as great energy consumers. China – EU collaboration in energy sectors will play an important part in the world's sustainable growth.

China – EU Institute for Clean and Renewable Energy (ICARE), is an institute jointly initiated, established and sponsored by the Chinese government and the European Union. As a key node in China – EU energy cooperation, ICARE is a collaboration between 9 universities from 6 countries and the International Office for Water. The participating universities are China's Huazhong University of Science and Technology (HUST), Southeast University, and Wuhan University of Technology, and EU's ParisTech, National Technical University of Athens, University of Zaragoza, Northumbria University, Sapienza University of Rome, and University of Perpignan, with HUST and ParisTech functioning respectively as hosts on the Chinese and European sides. The goal of ICARE is to cultivate high quality talents in fields of clean and renewable energy to facilitate a platform for the long – term and in – depth cooperation between Chinese and European professors, experts, researchers and research institutes, and to satisfy the increasing demands for talents and technologies of clean and renewable energy promoted by economic and social development in China. In the March of 2012, ICARE started its operation with the accreditation by the Ministry of Education of China. In the following two years, 100 students have graduated from ICARE with both Chinese and EU master's degrees.

The *Clean and Renewable Energy Research* series is a collection of outstanding master's theses in both Chinese and English languages, from the graduates of the ICARE double master's degree programme. The series consist of volumes dedicated to Solar Thermal Utilization, Energy Storage Batteries, Wind Energy, Biomass Energy, New Type Battery and Battery Material, and

Energy Efficiency. Since its establishment, more than a hundred professors from China and more than sixty professors from EU have lectured and worked as supervisors for master's candidates at the institute. These articles are fruits of labor from students and their supervisors at ICARE, and represent the achievements of China – EU cooperation in the education of energy technologies. It is our hope that with the publication of the book series, ICARE graduates can be encouraged to shoulder the responsibilities of our times, realize their potential in the field of clean and renewable energy, and make their own contributions to the sustainable development of China and of the world. It is also hoped that the series can introduce the works of ICARE to the public, serving as references for educators, students, researchers and managers interested in clean and renewable energy.

We hereby wish to express our gratitude for the financial support of the Chinese government and the European Union, and for the guidance from the Ministry of Education, the Ministry of Commerce, and the Ministry of Science and Technology of China, and the Delegation of the European Union to China and Mongolia. We are grateful for the support from the CPC Hubei Provincial Committee, the People's Government of Hubei Province, the CPC Wuhan Municipal Committee, and the People's Government of Wuhan Municipality, and for the assistance of French Embassy in China and Consulate General of France in Wuhan. We appreciate the direct participation of Huazhong University of Science and Technology, ParisTech, Southeast University, Wuhan University of Technology, Sapienza University of Rome, University of Zaragoza, National Technical University of Athens, Northumbria University, University of Perpignan, and the International Office for Water. We have the same heartfelt gratitude for our colleagues at Huazhong University of Science and Technology, whose help and cooperation are indispensable for the institute's success.

Our thanks to all the professors, teachers, visiting researchers and institute staff who contributed to the courses, supervision, student interviews, examinations, operation and management of ICARE.

Last but not least, our thanks to all ICARE students for their works.

Editorial Committee
2015. 2

目录

前言

Preface

1

生物油浆气化特性试验与模拟研究

汪翔

001

2

城市生活垃圾的燃烧特性研究

邢智炜

067

3

燃煤电站生物质掺烧基础理论与经济性分析

姚瑶

113

4

低压条件下垃圾焚烧飞灰碳酸化固碳脱毒实验研究

雷俊

177

5

Research on characteristics of bioslurry pyrolysis/gasification and modeling of bioslurry plasma gasification

Wang Xiang

225

6

Combustion characteristics of municipal solid waste

Xing Zhiwei

297

7

Enzyme-catalyzed Synthesis of the Dimeric Acid Polyester Polyol from Biodiesel

Yao Xiaozhu

345

生物油浆气化特性试验与模拟研究

学位申请人：汪 翔

中 方 导 师：陈汉平 [华中科技大学]

欧 方 导 师：Laurent Fulcheri [巴黎高科]

摘 要

生物质能是世界第四大能源，具备环境友好和可再生等特性。但是，生物质本身存在分布分散、体积大、含水量高和能量密度低等缺点，导致运输成本高和前处理过程复杂，严重阻碍生物质的规模化高效利用。随着热解技术的日益成熟，生物质能够被更深程度地转化为生物炭、生物油和燃气。由于生物炭和生物油具有高能量密度，于是可以提出一种新的方法——将生物炭粉悬浮于生物油中制备生物油浆以提高其运输能力和能量密度，尤其适用于远距离运输。因此通过生物油浆技术能够在一定程度上解决生物质在常规利用中普遍存在的问题，使生物质的规模化和高效率利用成为可能。

本研究将围绕生物油浆的高温高效率等离子体气化展开。为检测制得的生物油浆能否满足燃料的燃烧/气化需求，首先将对其相关理化特性进行测试，包括原料的工业分析和元素分析、发热量，生物炭颗粒的粒径分布，生物油浆的体积密度、静态稳定性及流动特性等。测试结果表明，当生物炭浓度小于 20wt% 时，制得的生物油浆能够很好地满足燃料的燃烧/气化需求，同时高温和低生物炭浓度有利于生物油浆的流变特性。

为探究生物油浆在常规热转化技术下的热解/气化特性，分别在热重分析仪和实验室规模的固定床反应系统上研究不同升温速率和不同热解制焦温度下的生物油浆的 CO_2 气化反应性以及不同温度和不同气化介质对反应特性的影响。实验结果表明，在热重实验中，快升温速度下的生物油浆的 CO_2 气化阶段活化能最低，而 800°C 的热解制焦温度为最佳。在生物油浆气化实验中，发现高温和水蒸气的加入有利于 CO 和 H_2 的产生，但是 CO_2 气氛会抑制 H_2 和 CH_4 的生成。

为进一步深入探讨生物油浆的等离子体气化特性，将分别从理论模型和试验两个方面同步进行，考虑建模的复杂程度，先仅对生物油进行研究。在利用 Chemkin 建立的生物油高温水蒸气气化反应机理的基础上，建立基于三相交流等离子体反应器的计算流体动力学和反应动力学耦合的生物油浆气化模型，以模拟进料速率、 N_2 载气流量和模型化合物比例对模拟结果的影响。在试验方面，将进行在三相交流等离子体反应系统上的纯 N_2 温度测试试验，然后将其同非绝热条件下的模拟结果进行比较，最后模拟非绝热条件下的生物油浆等离子体气化反应。模拟和试验工作表明，选用 C_7H_8 和 C_{10}H_8 的混合物作为生物油的模型化合物，并利用 Chemkin 建立的生物油高温水蒸气气化反应机理，从热动力学角度验证是可行的。在绝热条件下的计算流体动力学和反应动力学耦合模型中，得到最佳反应条件下的生物油转化率为 100%，能量利用率为 32.3%，同时在该条件下不同 $\text{C}_{10}\text{H}_8/\text{C}_7\text{H}_8$ 比对气体成分和转化率的影响很小。在非绝热条件下考虑 DTRM 辐射模型的温度场模拟结果能够对三相交流等离子体 N_2 试验的温度场进行预测，但是在该模型中加入生物油后，模拟结果表明能量利用率很低，主要是因为大量散热的存在，因此在实际试验中应加强保温措施，提高能量利用率。

关键词：生物油浆；气化；等离子体；CFD

摘要	3
1 绪论	9
1.1 研究背景	9
1.2 研究现状	11
1.3 研究内容	15
2 生物油浆理化特性与热重 CO_2 气化反应性研究	16
2.1 样品特性分析	16
2.2 生物油浆 CO_2 气化反应性研究	21
2.3 本章小结	24
3 生物油浆热解气化特性实验研究	25
3.1 实验设备和方法	25
3.2 热解实验	26
3.3 水蒸气气化实验	29
3.4 CO_2 气化实验	31
3.5 不同气氛下生物油浆气化的产气特性	32
3.6 本章小结	33
4 生物油高温水蒸气气化机理探究	34
4.1 模型化合物的选择	34
4.2 高温水蒸气气化机理的建立	34
4.3 Chemkin 模型的建立、检验和敏感性分析	36
4.4 本章小结	40
5 绝热条件下生物油等离子体气化二维 CFD 及反应动力学耦合模型	41
5.1 三相交流等离子体反应器结构型式	41
5.2 数学模型	41
5.3 Fluent 耦合模型敏感性分析	43
5.4 本章小结	51
6 非绝热条件下的模型与试验温度场的比较	52
6.1 三相交流等离子体反应系统简介	52
6.2 N_2 试验数据分析	54
6.3 非绝热条件下的模拟分析	55
6.4 试验结果与模拟结果的比较	56
6.5 非绝热条件下的生物油气化模拟	58
6.6 本章小结	59

7 总结与展望 61

7.1 总结 61

7.2 研究创新点 62

7.3 建议和展望 62

参考文献 63

图 目 录

图 1-1 生物油浆制备及利用流程图 11

图 1-2 生物油浆供应链流程图 12

图 1-3 结合生物柴油的生物油浆利用方法 13

图 1-4 研究内容流程图 15

图 2-1 生物炭的颗粒粒径分布含量 19

图 2-2 生物炭的颗粒粒径分布累积含量 19

图 2-3 不同生物炭浓度对生物油浆静态稳定性的影响 19

图 2-4 不同温度对生物油浆表观黏度的影响 (0wt% 生物炭) 20

图 2-5 不同生物炭浓度对生物油浆表观黏度的影响 (20℃) 20

图 2-6 不同升温速率下生物油浆 CO₂ 气化失重曲线 22

图 2-7 10K/min 下的失重速率曲线 22

图 2-8 20K/min 下的失重速率曲线 22

图 2-9 50K/min 下的失重速率曲线 22

图 2-10 不同制焦温度下生物油浆焦的 CO₂ 气化失重曲线 24

图 2-11 不同制焦温度下生物油浆焦的 CO₂ 气化失重速率曲线 24

图 3-1 常压固定床反应系统实验台架 25

图 3-2 温度对生物油浆热解三态产物分布的影响 26

图 3-3 温度对生物油浆热解气体产物的影响 27

图 3-4 生物炭浓度对生物油浆热解三态产物分布的影响 28

图 3-5 生物炭浓度对生物油浆热解气体产物的影响 29

图 3-6 温度对生物油浆水蒸气气化气体产物的影响 30

图 3-7 主要气体不同时间段下的产量 31

图 3-8 温度对生物油浆 CO₂ 气化气体产物的影响 32

图 3-9 不同气氛下主要气体产量比较 33

图 4-1 C₇H₈ 和 C₁₀H₈ 的高温水蒸气气化简化反应机理 34

图 4-2 PFR 模型示意图 37

图 4-3 C₇H₈ 和 C₁₀H₈ 的水蒸气气化动力学计算结果 (T&T winner) 38

图 4-4 C₇H₈ 和 C₁₀H₈ 的水蒸气气化 Chemkin 计算结果 38

图 4-5 不同反应物流量下的碳转化率和能量利用率
(H₂O/C = 1, C₁₀H₈/C₇H₈ = 1, t = 4s) 39

图 4-6 不同 H₂O/C 的碳转化率和能量利用率
(反应物流量为 0.31g/s, C₁₀H₈/C₇H₈ = 1, t = 4s) 39

图 4-7	不同 $C_{10}H_8/C_7H_8$ 下的碳转化率和能量利用率 (反应物流量为 0.31g/s , $H_2O/C = 1.2$, $t = 4\text{s}$)	39
图 4-8	不同 $C_{10}H_8/C_7H_8$ 下 H_2 随 H_2O/C 的变化情况	39
图 4-9	不同 $C_{10}H_8/C_7H_8$ 下 CO 随 H_2O/C 的变化情况	39
图 5-1	三相交流等离子体反应器剖面图	41
图 5-2	三相流等离子体反应器结构尺寸	41
图 5-3	高温下的 N_2 性质	44
图 5-4	25% 进料速率下的反应温度场	45
图 5-5	50% 进料速率下的反应温度场	45
图 5-6	75% 进料速率下的反应温度场	45
图 5-7	100% 进料速率下的反应温度场	46
图 5-8	不同进料速率下的沿反应器中心线的温度分布	46
图 5-9	不同进料速率下的沿反应器中心线的速度分布	46
图 5-10	不同进料速率下的气体产物 (剔除 N_2) 体积含量	47
图 5-11	不同进料速率下的生物油转化率和 CO 转化率	47
图 5-12	不同 N_2 流量对沿反应器中心线分布的温度的影响	48
图 5-13	不同 N_2 流量对沿反应器中心线分布的速度的影响	48
图 5-14	不同 N_2 流量下的气体产物 (剔除 N_2) 体积含量	49
图 5-15	不同 N_2 流量下的生物油转化率和 CO 转化率	49
图 5-16	不同 C_7H_8 含量对产气 (剔除 N_2) 特性的影响	50
图 5-17	不同 C_7H_8 含量对生物油转化率、 CO 转化率和能量利用率的影响	51
图 6-1	三相交流等离子体反应系统	52
图 6-2	三相交流等离子体发生装置和模型	53
图 6-3	石墨电极腐蚀现象	53
图 6-4	反应器的总散热量	54
图 6-5	等离子体区与反应区的散热百分比	54
图 6-6	反应器总散热量拟合曲线	54
图 6-7	反应区的散热百分比拟合曲线	54
图 6-8	热电偶测温曲线	55
图 6-9	非绝热条件下考虑 DTRM 辐射模型的温度分布曲线	56
图 6-10	反应器内壁温度在考虑和未考虑 DTRM 辐射模型下的温度分布比较	56
图 6-11	模拟残差曲线	58
图 6-12	模拟温度场分布	59

表 1-1	世界生物质能产量	9
表 1-2	中国生物质能产量	10
表 2-1	生物油和生物炭以及棉秆的元素分析和工业分析	16
表 2-2	GC-MS 实验测试工况	17
表 2-3	GC-MS 实验升温程序	17
表 2-4	生物油中的部分有机化合物	17
表 2-5	不同升温速率下 CO_2 气化动力学参数	23
表 2-6	不同制焦温度下 CO_2 气化动力学参数	24
表 3-1	生物油浆热解主要气体产量	28
表 3-2	温度对生物油浆热解产气特性的影响	28
表 3-3	不同生物炭浓度下热解三态产物分布实验值与计算值的比较	28
表 3-4	生物油浆热解主要气体产量	29
表 3-5	生物油浆水蒸气气化主要气体产量	30
表 3-6	温度对生物油浆水蒸气气化产气特性的影响	30
表 3-7	生物油浆 CO_2 气化主要气体产量	32
表 3-8	温度对生物油浆 CO_2 气化产气特性的影响	32
表 4-1	C_7H_8 和 C_{10}H_8 的高温水蒸气气化机理	35
表 5-1	模型边界条件	43
表 5-2	鼓风雾化器模型的具体参数	44
表 5-3	不同进料速率对反应器各部分热通量的影响	47
表 5-4	不同进料速率对能量利用率的影响	48
表 5-5	不同 N_2 流量对反应停留时间的影响	49
表 5-6	不同 N_2 流量对反应器各部分热通量的影响	50
表 5-7	不同 N_2 流量对能量利用率的影响	50
表 6-1	考虑 DTRM 辐射模型后的模型边界条件	55
表 6-2	考虑 DTRM 辐射模型的反应器各部分热通量	56
表 6-3	热电偶误差计算结果	57
表 6-4	试验和模拟的温度比较结果	58
表 6-5	模拟气体特性、热通量和气化指标	59