

学校编码: 10384

分类号____密级____

学号: 32420131152292

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

生物质气化模拟研究

Simulation Study of Biomass Gasification

曹斌奇

指导教师姓名: 刘运权教授

专业名称: 能源化工

论文提交日期: 2016年 04月

论文答辩时间: 2016年 05月

学位授予日期: 2016年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016年 05月

生物质气化模拟研究

曹斌奇

指导教师

刘运权
教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

生物质气化是生物质利用过程中热效率较高的一种方法，同时也是一种十分重要的可再生能源利用方式。本文采用 Aspen Plus 模拟软件，结合吉布斯自由能最小原理，建立了生物质气化反应器模型，模拟研究了不同操作参数对气化结果的影响，同时对三种气化剂下的气化结果进行了对比分析。

在三种气化剂的模拟结果中，同一操作参数对气化结果的影响有一定共通性：（1）随着气化温度的升高(600~900℃)，一氧化碳体积分数升高，二氧化碳和甲烷体积分数降低，但氢气体积分数变化不大；气体的热值升高（700℃以上），气体产率先升高后降低，气化效率略微升高。（2）随着 S/B 的增大(0.2~1.2)，氢气和二氧化碳体积分数升高，一氧化碳和甲烷体积分数降低，气体热值降低，气体产率升高，气化效率略微降低。（3）随着压力的升高(1~50atm)，氢气和一氧化碳体积分数降低，二氧化碳和甲烷体积分数升高，气体热值升高，气体产率降低，气化效率略微降低。（4）随着 ER 的增大(0~0.5)，二氧化碳体积分数升高，氢气、一氧化碳和甲烷的体积分数降低，气体热值、气体产率和气化效率迅速降低。（5）随着 CO₂/B 的增大(0~1.2)，氢气体积分数降低，一氧化碳体积分数有一定提高，二氧化碳体积分数升高，气体热值降低，气体产率升高，气化效率略微升高。

在相同条件下，不同气化剂的气化结果表现出明显差异。水蒸气气化产生的氢气体积分数最高，水蒸气-氧气气化次之，水蒸气-氧气-二氧化碳气化最低；水蒸气-氧气气化的一氧化碳体积分数最低，引入少量的二氧化碳能在一定程度上提高一氧化碳体积分数，达到与水蒸气气化中相近的数值；水蒸气气化产气热值、气体产率和气化效率都最高；水蒸气-氧气气化比水蒸气-氧气-二氧化碳气化的产气热值高，气化效率相近；700℃以上 10atm 以下的条件下，水蒸气-氧气-二氧化碳气化的气体产率比水蒸气-氧气气化高。

关键词：生物质气化 模拟 Aspen Plus 气化介质

Abstract

Biomass gasification is considered as one of the most promising technologies because it can convert renewable biomass resources into producer gas. In this study, based on Aspen Plus of process simulation software and the minimization principle of Gibbs free energy, a model for gasifier was developed. The effects of different reaction conditions on gasification performance were studied, and the results of gasification using three different gasification agents (H_2O , $\text{H}_2\text{O}-\text{O}_2$, $\text{H}_2\text{O}-\text{O}_2-\text{CO}_2$) were compared and analyzed.

Similar trends were observed for the effect of operating parameters on biomass gasification. (1) With the gasification temperature increasing from 600 to 900 °C, the volume fraction of carbon monoxide increased while the volume fraction of carbon dioxide and methane decreased, but the volume fraction of hydrogen was almost stable; the yield of the total producer gas increased firstly and then decreased; the heating value of producer gas increased (above 700 °C); the gasification efficiency slightly increased. (2) With the increase of S/B(0.2~1.2), the volume fraction of hydrogen and carbon dioxide increased; the volume fraction of carbon monoxide and methane decreased; the heating value of producer gas decreased; the yield of the total producer gas increased, and the gasification efficiency reduced slightly. (3) With the increase of the gasification pressure(1~50atm), the volume fraction of hydrogen and carbon monoxide reduced; the volume fraction of carbon dioxide and methane increased; the heating value of gas increased; the yield of the total producer gas reduced, and the gasification efficiency reduced slightly. (4) With the increase of equivalence ratio (0~0.5), the volume fraction of carbon dioxide increased, but the volume fraction of hydrogen, carbon monoxide and methane decreased; the heating value, gas yield and gasification efficiency decreased rapidly. (5) With the increase of CO_2/B (0~1.2), the volume fraction of hydrogen decreased, the volume fraction of carbon monoxide and carbon dioxide increased; the heating value of producer gas decreased; the yield of the total producer gas increased and gasification efficiency slightly increased.

Under the same gasification conditions, the results of using different gasification agents were significantly different. The volume fraction of hydrogen is the highest

among all components in producer gas when using steam as gasification agent, and it was reduced a little when using steam-oxygen and was the least when using steam-oxygen-carbon dioxide as gasification agent. The volume fraction of carbon monoxide was the lowest when using steam-oxygen as gasification agent. The volume fraction of carbon monoxide could be increased slightly when small amount of carbon dioxide was added into the gasification agent, which is close the contents with steam as gasification agent. The heating value of producer gas, the yield of producer gas and the gasification efficiency were the highest among all cases. The heating value of syngas when using steam-oxygen was higher than using steam-oxygen-carbon dioxide as gasification agent, but the gasification efficiency between them was almost same. The gasification efficiency of using steam-oxygen-carbon dioxide was higher than steam-oxygen as gasification agent at the conditions of temperature above 700 °C and pressure below 10 atm.

Keywords: biomass gasification; simulation; Aspen Plus; gasification agent

目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 生物质气化在国内外的研究现状	2
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	4
1.3 本文主要研究内容	5
第二章 生物质气化技术基础	6
2.1 生物质原料特性	6
2.1.1 生物学组成.....	6
2.1.2 化学组成.....	6
2.1.3 物理特性.....	7
2.2 生物质气化原理	7
2.2.1 生物质的干燥.....	7
2.2.2 生物质的热解.....	7
2.2.3 氧化反应	8
2.2.4 还原反应.....	8
2.3 生物质气化反应设备	8
2.3.1 固定床气化炉.....	9
2.3.2 流化床气化炉.....	11
2.3.3 气流床气化炉.....	13
2.4 生物质气化介质	13
2.4.1 空气气化.....	14
2.4.2 氧气气化.....	14
2.4.3 水蒸气气化.....	14
2.4.4 复合式气化.....	15
2.5 生物质气化过程基本参数	15

2.5.1 反应温度与压力.....	15
2.5.2 当量比与比消耗量.....	15
2.5.3 气体产率.....	16
2.5.4 气体组成和热值.....	16
2.5.5 气体 H ₂ /CO 比.....	16
2.5.6 气化效率.....	17
2.6 本章小结.....	17
第三章 生物质气化模型设计.....	18
3.1 生物质气化模型选择.....	18
3.2 基于 Aspen Plus 的生物质气化过程建模.....	19
3.2.1 模拟的假设条件.....	19
3.2.2 模拟方案设计.....	20
3.2.3 模拟流程图的建立.....	21
3.3 模型验证.....	22
3.4 本章小结.....	23
第四章 不同气化剂下条件参数对模拟结果的影响.....	24
4.1 水蒸气气化模拟条件参数的影响.....	24
4.1.1 模拟说明.....	24
4.1.2 温度对气化过程的影响.....	24
4.1.3 S/B 对气化过程的影响.....	26
4.1.4 压力对气化过程的影响.....	27
4.2 水蒸气-氧气气化模拟条件参数的影响.....	29
4.2.1 模拟说明.....	29
4.2.2 温度对气化过程的影响.....	29
4.2.3 S/B 对气化过程的影响.....	30
4.2.4 ER 对气化过程的影响.....	32
4.2.5 压力对气化过程的影响.....	34
4.3 水蒸气-氧气-二氧化碳气化模拟条件参数的影响.....	35
4.3.1 模拟说明.....	35
4.3.2 温度对气化过程的影响.....	35
4.3.3 S/B 对气化过程的影响.....	37

4.3.4 ER 对气化过程的影响.....	38
4.3.5 CO ₂ /B 对气化过程的影响.....	39
4.3.6 压力对气化过程的影响.....	41
4.4 本章小结.....	42
第五章 不同气化剂下的模拟结果对比分析.....	44
5.1 不同气化剂下氢气体积分数的对比.....	44
5.1.1 不同气化剂下温度对氢气体积分数的影响对比.....	44
5.1.2 不同气化剂下 S/B 对氢气体积分数的影响对比.....	44
5.1.3 不同气化剂下压力对氢气体积分数的影响对比.....	44
5.2 不同气化剂下一氧化碳体积分数的对比.....	45
5.2.1 不同气化剂下温度对一氧化碳体积分数的影响对比.....	45
5.2.2 不同气化剂下 S/B 对一氧化碳体积分数的影响对比.....	46
5.2.3 不同气化剂下压力对一氧化碳体积分数的影响对比.....	46
5.3 不同气化剂下气体热值的对比.....	47
5.3.1 不同气化剂下温度对气体热值的影响对比.....	47
5.3.2 不同气化剂下 S/B 对气体热值的影响对比.....	48
5.3.3 不同气化剂下压力对气体热值的影响对比.....	48
5.4 不同气化剂下气体产率的对比.....	48
5.4.1 不同气化剂下温度对气体产率的影响对比.....	49
5.4.2 不同气化剂下 S/B 对气体产率的影响对比.....	49
5.4.3 不同气化剂下压力对气体产率的影响对比.....	49
5.5 不同气化剂下气化效率的对比.....	50
5.5.1 不同气化剂下温度对气化效率的影响对比.....	50
5.5.2 不同气化剂下 S/B 对气化效率的影响对比.....	51
5.5.3 不同气化剂下压力对气化效率的影响对比.....	51
5.6 本章小结.....	52
第六章 总结与展望.....	53
6.1 总结.....	53
6.2 展望.....	54
参考文献.....	55
致谢.....	60

Table of Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background	1
1.2 Overseas and domestic research status	2
1.2.1 Overseas research status	2
1.2.2 Domestic research status	4
1.3 Main content of this paper	5
Chapter 2 Biomass Gasification Basic	6
2.1 Biomass material characteristics	6
2.1.1 Biological composition	6
2.1.2 Chemical composition	6
2.1.3 Physical property	7
2.2 Principle of biomass gasification	7
2.2.1 Drying	7
2.2.2 Pyrolysis	7
2.2.3 Oxidization	8
2.2.4 Reduction	8
2.3 Biomass gasification reactors	8
2.3.1 Fixed bed gasifier	9
2.3.2 Fluidized bed gasifier	11
2.3.3 Entrained flow gasifier	13
2.4 Biomass gasification agents	13
2.4.1 Air gasification	14
2.4.2 Oxygen gasification	14
2.4.3 Steam gasification	14
2.4.4 Mixed type gasification	15
2.5 Basic parameters	15
2.5.1 Temperature and pressure	15

2.5.2 Equivalence ration	15
2.5.3 Gas yield.....	16
2.5.4 Gas composition and calorific value	16
2.5.5 H/C ratio	16
2.5.6 Gasification efficiency	17
2.6 Conclusion	17
Chapter 3 Biomass Gasification Model Design.....	18
3.1 Model selection	18
3.2 Modeling with aspen plus	19
3.2.1 Assumptions	19
3.2.2 Conceptual design.....	20
3.2.3 Modeling flow chart.....	21
3.3 Model validation	22
3.4 Conclusion	23
Chapter 4 Effects of Parameters on the Results under Different Agent Combinations	24
4.1 Effects of parameters in steam gasification process	24
4.1.1 Modeling declaration	24
4.1.2 Effects of temperature	24
4.1.3 Effects of S/B	26
4.1.4 Effects of pressure	27
4.2 Effects of parameters in H₂O-O₂ gasification process	29
4.2.1 Modeling declaration.....	29
4.2.2 Effects of temperature	29
4.2.3 Effects of S/B	30
4.2.4 Effects of ER	32
4.2.5 Effects of pressure	34
4.3 effects of parameters in H₂O-O₂-CO₂ gasification process	35
4.3.1 Modeling declaration	35
4.3.2 Effects of temperature	35
4.3.3 Effects of S/B	37

4.3.4 Effects of ER	38
4.3.5 Effects of CO ₂ /B.....	39
4.3.6 Effects of pressure	41
4.4 Conclusion	42
Chapter 5 Results Comparison among Three Agent Combinations	44
5.1 H₂ concentration comparison	44
5.1.1 Effects of temperature	44
5.1.2 Effects of S/B	44
5.1.3 Effects of pressure	44
5.2 CO concentration comparison.....	45
5.2.1 Effects of temperature	45
5.2.2 Effects of S/B	46
5.2.3 Effects of pressure	46
5.3 Gas heating value comparison.....	47
5.3.1 Effects of temperature	47
5.3.2 Effects of S/B	48
5.3.3 Effects of pressure	48
5.4 Gas yield comparison.....	48
5.4.1 Effects of temperature	49
5.4.2 Effects of S/B	49
5.4.3 Effects of pressure	49
5.5 Gasification efficiency comparison	50
5.5.1 Effects of temperature	50
5.5.2 Effects of S/B	51
5.5.3 Effects of pressure	51
5.6 Conclusion	52
Chapter 6 Summary and Prospect.....	53
6.1 Summary	53
6.2 Prospect	54
Reference	55
Acknowledgements	60

第一章 绪论

1.1 研究背景

能源是人类社会发展的物质基础。随着经济飞速发展，能源的需求量不断增长，传统化石燃料消耗带来的环境污染及能源紧张问题已成为当今世界必须面对和解决的难题。开发新的可再生清洁能源，已成为全球面临的重要课题，世界能源布局已进入新一轮战略调整期^[1]。生物质能是人类利用最早的能源之一，分布极广，产量巨大，可再生而且易获得，其在全球能源消费结构中占有重要份额（15%），能源消耗总量仅次于煤、石油和天然气，位居世界第四，是目前应用最广泛的可再生能源，也是可再生能源中唯一一种可转换为高品位液体燃料的能源。据联合国开发计划署（UNDP）估计，生物质能前景可观，能够满足全世界能源需求总量的 65% 以上^[2]。

在我国，生物质能的利用程度仅次于煤，占能源消耗总量的 20%，但长期以来基本上都在农村作为一次能源使用，即生物质的直接焚烧，这种低水平的利用方式不可避免地造成了严重浪费与环境污染。近几年，我国对可再生能源的重视程度不断提高，先后制订了《可再生能源法》与《可再生能源中长期发展规划》，提出了我国生物质能在今后发展的主要方向和目标，为生物质发电技术的开发应用确立了政策上的基本保障。2015 年李克强总理的《政府工作报告》将生物质能纳入大力发展范畴，预示着生物质能产业有望得到国家战略层面更大的重视、更多的支持，并成为能源改革的重头戏。

生物质利用技术主要包括直接燃烧技术、沼气发酵技术、气化及发电技术、燃料乙醇技术、热解液化技术、间接液化技术和生物柴油技术等，生物质热解气化可获得燃气、生物油和生物质炭 3 种产物。高品位的燃气可以直接作为燃料用于供热与生产，也可利用燃气轮机等装置进行热电联供，还可以作为化工合成的原料使用；生物油可通过精炼分离进行提质改善，从而制取燃油或其它化工产品；生物质炭可用于制备活性炭与改善农田土壤，也可应用于碳燃料电池，还可作为锅炉燃料使用或进一步气化成燃气，从而实现生物质能的高效清洁利用^[3]。生物质气化是生物质利用过程中热效率最高的过程^[4]，是一种十分重

要的可再生能源利用方式，该技术早在 1992 年世界第十五次能源大会上便被确定为优先开发的新能源技术之一。生物质气化技术受到世界各国越来越广泛的重视，加强生物质气化技术的开发与应用有着非常深远的前景和意义。

表 1.1 国外生物质气化炉应用情况一览^[9]

Table 1.1 Overview of gasifier applications in foreign countries

国家	气化炉类型	原料	效率/%	规模 /t·d-1	应用
美国 Taylor	双流化床气化炉	可降解垃圾和废木料	发电效率 35~40	300~400	热电联产
美国 Silvagas	双流化床气化炉	木材	发电效率 35~40	540	热电联产和柴油
美国 Range Fuels	气流床气化炉	林业废弃物、木材	热效率 75	125	乙醇或混合醇
美国 Pearson	气流床气化炉	废木料、锯末、稻秆等	热效率 70.5	43	乙醇或混合醇
德国 CHOREN	气流床气化炉	能源作物、木材	热效率 90.5	198	合成柴油
丹麦 Carbona	鼓泡流化床	木材	发电效率 28	100~150	热电联产
芬兰 VIT	循环流化床	林业废弃物和副产物		60	合成柴油
芬兰 Foster	循环流化床	塑料、木材、轮胎、枕轨		336	热电联产
瑞典 CHRISGAS	循环流化床	木材、秸秆		86	热电联产
德国 Uhde	循环流化床	MSW	气化效率 81	15	燃料油
加拿大 Plasco	等离子体气化炉	MSW、塑料	热效率 75	100	发电
美国 InEnTec	等离子体气化炉	轮胎、渣炉、医疗废物		218	热电联产氢气、 甲醇和乙醇

1.2 生物质气化在国内外的研究现状

1.2.1 国外研究现状

早在 18 世纪末，煤气化技术已经出现在英国和法国，其气化燃气在不久后被用作伦敦市照明的主要燃料。19 世纪中叶，法国人开发出世界上第一台商业化的小型生物质气化炉，随后又在此基础上作了一些改良。第二次世界大战后，中东地区丰富而廉价的石油资源被大规模开采，石油成为大多数发达国家的主要能源物质，导致生物质气化技术的开发变得极为缓慢。1973 年世界能源危机爆发，化石能源的不可再生与分布不均等缺点被充分暴露，Gahly 等^[5]首次提出

将气化技术用于能量密度较低的生物质,生物质气化逐渐成为可再生能源的研究热点,并重新引起世界各国的关注和重视^[6,7-8]。

随着研发的不断深入与应用的逐渐拓宽,欧美各国的生物质气化技术在近几十年来取得了巨大进展。生物质气化设备的规模不断扩大,自动化程度与工艺复杂程度也逐渐提高,一系列已达到示范级别和商业化水平的各种类型的气化炉如表 1.1 所示。从当前来看,生物质气化技术较为先进与成熟的国家主要包括瑞典、芬兰、美国、丹麦、荷兰、奥地利、德国、意大利和加拿大等,供气与发电产业已实现了一定程度的规模化与商业化。在生物质气化合成甲醇方向,欧盟建立了 4 个 4.8~12t/d 的示范工厂。瑞典和丹麦正在推行生物质热电联产项目,实现供热供电一体化从而大幅提高利用效率。芬兰是对生物质资源利用最充分的国家,应用领域多样而且相关废弃物处理也更科学,开发了生物质气化合成氨技术用于化肥生产,开发了发电效率及热转化效率都较高的循环流化床锅炉技术。美国的生物质发电技术较为领先,在生物质气化合成乙醇方面也取得了不小的成绩,其生物质联合循环发电技术、生物质综合气化装置联合燃气轮发电技术、炭化气化木煤气发生技术等对国家经济结构优化有非常重要的价值^[9]。丹麦开发的三阶 TKE 下吸式气化炉技术已在数个国家实现市场化,其相应的生物质气化热电联产厂^[10]处理能力约为 1~10MW_{th}。德国是欧盟最大的生物质气化合成柴油生产国,其设计的下吸式气化炉联合内燃机发电机技术气化效率高达 90%,未来能源公司开发的 GSP 型气流床气化炉不仅拥有较短的停留时间与较高的气化强度,而且产物气中不含焦油。

1.2.2 国内研究现状

相对部分发达国家而言我国的生物质气化研究起步时间较晚,始于 20 世纪 80 年代。我国是能源消耗大国,生物质能源的研究与开发更显迫切。目前来说我国在生物质气化开发方面取得了一定成绩,但是技术水平与发达国家相比仍然落后不小,运行强度和效率较低,规模也比较小,气化产业主要由气化发电和农村气化供气组成,其中气化发电方面已有所突破。在气化炉设计方面,开发出了多种以木屑、稻壳、秸秆等生物质为原料的固定床和流化床气化炉,一系列供气、供电、供热等相关技术与产品已进入示范性应用阶段,可满足多种物料气化要求的不同类型气化炉如表 1.2 所示。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.