



应用生物技术大系

Comprehensive Series of Applied Biotechnology

生物质燃烧装备理论与实践

刘圣勇 等著



科学出版社

生物质燃烧装备理论与实践

刘圣勇 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本研究生物质(秸秆)成型燃料燃烧装备的专著,内容包括国内外生物质成型燃料燃烧装备发展现状,生物质成型燃料燃烧特性分析及装备设计,对生物质成型燃料燃烧装备热性能、空气流动场、炉膛温度场、炉膛气体浓度场、结渣特性的试验研究,生物质成型燃料装备技术经济评价,以及对生物质成型燃料装备的改进设计、生物质成型燃料机烧炉设计。本书对生物质成型燃料装备的开发和利用具有实际指导意义。

本书可供农业工程、能源工程、生物能源等领域的科研及工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

生物质燃烧装备理论与实践 / 刘圣勇等著. —北京: 科学出版社, 2016.1

ISBN 978-7-03-045535-2

I. ①生… II. ①刘… III. ①生物燃料—燃烧设备 IV. ①TK16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 206469 号

责任编辑: 王 静 李 迪 / 责任校对: 张怡君

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 刘新新

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 13

字数: 259 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《生物质燃烧装备理论与实践》编著委员会

主 任 刘圣勇

副 主 任 张 品 秦立臣 孙晓林 沈桂富

作 者 (按姓氏笔画排序)

王鹏晓 付帮升 向广帅 刘圣勇 刘洪福

刘婷婷 阮艳灵 孙晓林 李 刚 李 荫

李文雅 李伟莉 苏超杰 沈桂富 张 品

张义俊 青春耀 郑凯轩 胡明阁 姚善厚

秦立臣 夏许宁 郭前辉 陶红歌 黄 黎

温宝辉 谢海江 管泽运 翟万里

主 审 张全国 雷廷宙 李文哲

前 言

目前,全球能源消耗基本每年加速递增,化石能源资源逐年减少,能源紧缺凸显出了生物质能源资源巨大的市场潜力。在经历了多次世界性石油危机之后,国际上对生物质能源的广泛利用得到了重新认识和发展。中国是一个农业大国,约50%的人口居住于农村地区,一方面生物质资源极其丰富,农作物秸秆资源总量达7.4亿多吨,相当于3.17亿多吨标准煤;另一方面农村能源普遍短缺,农村生活用能还处在依赖低品位利用生物质能源阶段,能源供求矛盾十分突出,每年有2亿多吨的生物质秸秆被废弃或荒烧,造成了严重的空气污染和雾霾,极大地影响了社会、经济、环境、生态和人们的生活,成为各级政府关切的一个严重的社会问题。

生物质成型燃料是将秸秆、稻壳、锯末、木屑等生物质废弃物,用机械加压的方法,使原来松散、无定形的原料压缩成具有一定形状、密度较大的固体成型燃料。其具有体积小、密度大、储运方便;燃烧稳定、周期长;燃烧效率高;灰渣及烟气中污染物含量小等优点。生物质成型燃料技术可将结构疏松的生物质成型后作为高品位的能源加以有效利用,是解决能源短缺问题的支柱能源之一。实现生物质成型燃料的规模化生产和应用,既能缓解农村优质能源短缺问题,又是减少生物质秸秆荒烧、改善空气环境质量的有效途径。

目前,我国对生物质成型燃料燃烧所进行的理论研究很少,对生物质成型燃烧的点火理论、燃烧机理、动力学特性、空气动力场、结渣特性及确定燃烧装备主要设计参数的研究才刚刚开始,关于生物质成型燃烧理论与数据还没人系统提出,而关于生物质成型燃料特别是秸秆成型燃料燃烧装备设计与开发几乎是个空白。基于上述情况,我们编著了这本书,对生物质成型燃料燃烧装备研制及相关空气动力场、结渣特性及确定燃烧装备主要设计参数等进行试验与研究,获得生物质成型燃料燃烧装备各项性能指标及燃烧空气流动场、温度场、浓度场、结渣性能、主要设计参数变化规律,使读者了解生物质成型燃料燃烧装备设计、运行及技术的理论基础,同时为生物质成型燃料燃烧装备开发提供实际指导。本书可供生物能源、农业工程、能源工程等领域的科研人员、工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业教师及研究生的参考用书。

本书内容分为4部分:第一部分(第1章)介绍了国内外生物质成型燃料燃烧装备发展现状;第二部分(第2~10章)通过对生物质成型燃料的燃烧特性分析,

设计出 I 型生物质成型燃料燃烧装备, 通过在该燃烧装备上进行生物质成型燃料燃烧热性能、空气动力场、热力特性、结渣特性、主要设计参数等试验, 获得生物质成型燃料燃烧装备各项性能指标及相关参数变化规律, 并对该生物质成型燃料燃烧装备进行技术经济评价; 第三部分 (第 11、12 章) 对 I 型生物质成型燃料燃烧装备进行改进设计, 并对改进的 II 型生物质成型燃料燃烧装备进行热性能评价试验; 第四部分 (第 13、14 章) 在 I 型、II 型生物质成型燃料燃烧装备的基础上, 设计生物质成型燃料机烧炉, 并对其进行燃烧性能评价试验。

本书由刘圣勇担任编著委员会主任, 张品、秦立臣、孙晓林、沈桂富担任副主任, 作者有王鹏晓、付帮升、向广帅、刘圣勇、刘洪福、刘婷婷、阮艳灵、孙晓林、李刚、李荫、李文雅、李伟莉、苏超杰、沈桂富、张品、张义俊、青春耀、郑凯轩、胡明阁、姚善厚、秦立臣、夏许宁、郭前辉、陶红歌、黄黎、温宝辉、谢海江、管泽运和翟万里。在试验装置的设计、制造及试验过程中, 得到了能源系张百良、赵廷林、杨群发等老师, 农机系李保谦、王万章、李祥付、花恒明等老师, 机械系唐予桂老师, 交通系李遂亮、王新伟、陈亮、王导南等老师, 电子系周彩虹、姬少龙、刘新萍等老师, 机电工程学院实习工厂徐波厂长, 以及河南省太康锅炉厂武乐峰、张辉、张善思同志的大力支持与帮助, 在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在不足和疏漏之处, 敬请各位专家及读者提出宝贵意见, 以使本书日臻完善。

著 者

2015 年 3 月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 国外生物质成型燃料燃烧装备发展现状	1
1.2 我国生物质成型燃料燃烧装备发展现状	2
2 生物质成型燃料燃烧特性理论分析	4
2.1 生物质成型燃料点火理论分析	4
2.1.1 点火过程	4
2.1.2 影响点火的因素	4
2.1.3 点火特性	5
2.2 生物质成型燃料燃烧机理分析	5
2.3 生物质成型燃料燃烧动力学方程分析	6
2.3.1 生物质成型燃料燃烧动力学方程	6
2.3.2 差热峰面积	9
2.3.3 差热结果分析	9
2.4 生物质成型燃料燃烧速度及影响因素分析	10
2.4.1 生物质成型燃料燃烧速度表示方法	10
2.4.2 生物质成型燃料燃烧速度影响因素分析	11
2.5 生物质成型燃料燃烧特性	12
2.5.1 生物质燃料特性	12
2.5.2 原生物质燃烧特性	13
2.5.3 生物质成型燃料燃烧特性	13
2.6 本章小结	14
3 I型生物质成型燃料燃烧装备的设计	15
3.1 燃烧装备设计指导思想	15
3.2 燃烧装备主要设计参数	15
3.3 生物质成型燃料燃烧装备设计	16
3.3.1 燃烧装备结构总体设计	16
3.3.2 燃烧装备热效率、燃料消耗量和保热系数计算	17
3.3.3 炉膛及炉排的设计	19

3.3.4	辐射受热面的设计	19
3.3.5	对流受热面的设计	22
3.3.6	燃烧装备引风机选型	22
3.4	本章小结	26
4	I 型生物质成型燃料燃烧装备热性能试验与分析	28
4.1	试验目的	28
4.2	试验方法及使用仪器	28
4.2.1	试验方法	28
4.2.2	试验所用仪器	30
4.3	试验结果与分析	31
4.3.1	过量空气系数与生成 CO 的关系	31
4.3.2	过量空气系数与生成三原子气体 RO ₂ 的关系	37
4.3.3	过量空气系数与生成 NO _x 的关系	39
4.3.4	过量空气系数 α_{py} 与烟尘含量 YC 的关系	40
4.3.5	过量空气系数与主要热损失的关系	41
4.4	本章小结	44
4.5	问题与建议	45
5	I 型生物质成型燃料燃烧装备空气流动场试验与分析	46
5.1	试验目的与类别	46
5.2	试验仪器与方法	46
5.2.1	试验仪器	46
5.2.2	测试方法与步骤	46
5.3	试验结果与分析	48
5.3.1	双层炉排燃烧方式试验结果与分析	48
5.3.2	对单层炉排燃烧的数据分析	54
5.4	本章小结	57
6	I 型生物质成型燃料燃烧装备炉膛温度场试验与分析	58
6.1	试验目的与意义	58
6.2	试验仪器与方法	58
6.2.1	试验仪器	58
6.2.2	试验方法	58
6.3	试验结果与分析	59
6.3.1	双层炉排与单层炉排燃烧垂直方向温度分布	59
6.3.2	双层炉排与单层炉排燃烧炉膛在深度方向温度分布	62
6.3.3	双层炉排燃烧与单层炉排燃烧炉膛在宽度方向温度分布	65

6.4	本章小结	70
7	I 型生物质成型燃料燃烧装备炉膛气体浓度场试验与分析	72
7.1	试验目的与意义	72
7.2	试验仪器、方法与内容	72
7.2.1	试验主要仪器	72
7.2.2	试验方法	73
7.2.3	试验内容	74
7.3	试验结果与分析	74
7.3.1	双层炉排燃烧	74
7.3.2	单层炉排燃烧	83
7.4	本章小结	88
8	燃烧装备结渣特性研究	90
8.1	研究目的与意义	90
8.2	试验方法与所用仪器	91
8.2.1	试验方法	91
8.2.2	试验所用仪器	91
8.3	试验结果与分析	91
8.3.1	生物质成型燃料的熔融特征温度与灰渣成分	91
8.3.2	生物质成型燃料结渣性能评价	92
8.3.3	生物质成型燃料沾污性能评价	94
8.3.4	结渣机理	96
8.3.5	I 型生物质成型燃料燃烧装备试验结果与分析	97
8.4	本章小结	100
9	燃烧装备主要设计参数的确定	102
9.1	确定燃烧装备主要设计参数的目的与意义	102
9.2	燃料装备主要设计参数的提出	102
9.3	确定燃烧装备主要设计参数试验的方法	103
9.3.1	试验所用仪器	103
9.3.2	试验方法	103
9.4	试验结果与分析	108
9.4.1	双层炉排燃烧试验结果与分析	108
9.4.2	单层炉排燃烧试验结果与分析	108
9.5	本章小结	111
10	I 型生物质成型燃料燃烧装备技术经济评价	112
10.1	评价目的与意义	112

10.2	评价方法	112
10.2.1	技术评价方法	112
10.2.2	经济性评价方法与指标	113
10.3	评价	114
10.3.1	技术评价	114
10.3.2	经济分析	114
10.4	本章小结	117
11	I 型生物质成型燃料燃烧装备改进设计	120
11.1	生物质成型燃料的参数选取	120
11.2	I 型生物质成型燃料燃烧装备本体改进设计	122
11.3	I 型生物质成型燃料燃烧装备炉膛及炉排的改进设计	124
11.4	I 型生物质成型燃料燃烧装备辐射受热面改进设计	127
11.5	I 型生物质成型燃料燃烧装备对流受热面改进设计	128
11.6	风机的选型	129
11.7	本章小结	131
12	II 型生物质成型燃料燃烧装备的热性能试验	132
12.1	试验目的	132
12.2	试验依据	132
12.3	试验仪器	132
12.4	试验内容及结果分析	132
12.4.1	正平衡试验结果比较	132
12.4.2	反平衡试验结果比较	133
12.4.3	试验结果分析	135
12.5	本章小结	141
13	生物质成型燃料机烧炉的设计	142
13.1	机烧炉主要设计参数	142
13.2	机烧炉结构形式设计及辅助计算	143
13.2.1	机烧炉结构形式设计	143
13.2.2	辅助计算	144
13.3	机烧炉炉排和炉膛的设计	147
13.4	机烧炉炉拱的设计	148
13.4.1	动量设计法	148
13.4.2	动量设计法计算的假定	149
13.4.3	动量设计法的计算方法	149
13.4.4	前、后拱尺寸确定原则	150

13.4.5 炉拱基本尺寸计算	152
13.5 受热面的设计	153
13.5.1 辐射受热面的设计	153
13.5.2 对流受热面的设计	159
13.5.3 受热面的热力计算汇总	162
13.6 送引风系统的设计	165
13.6.1 烟道的阻力计算	165
13.6.2 风道的阻力计算	168
13.6.3 风机的计算和选择	169
13.7 本章小结	171
14 生物质成型燃料机烧炉燃烧性能的评价试验	172
14.1 炉膛及炉排燃烧性能的评价试验	172
14.1.1 试验目的	172
14.1.2 试验方法	172
14.1.3 试验仪器	172
14.1.4 试验内容及测试结果	173
14.1.5 试验结果分析	174
14.2 受热面及送引风系统性能评价试验	179
14.2.1 试验目的	179
14.2.2 试验方法	180
14.2.3 试验仪器	181
14.2.4 试验结果与分析	181
14.3 本章小结	188
参考文献	190

1 绪 论

1.1 国外生物质成型燃料燃烧装备发展现状

随着社会经济的发展与人们生活水平的提高,木材下脚料、植物秸秆的剩余量越来越大,由于这些废弃物都是密度小、体积膨松、大量堆积,销毁处理不但需要一定的人力、物力,而且污染环境,因此世界各国都在探索解决这一问题的有效途径。

美国在20世纪30年代就开始研究压缩成型燃料及燃烧技术,并研制了螺旋压缩机及相应的燃烧装备(Grover and Mishra, 1995)。日本在20世纪30年代开始研究机械活塞式成型技术处理木材废弃物,1954年研制成棒状燃料成型机及相关的燃烧装备,1983年前后从美国引进颗粒成型燃料成型技术及相应燃烧装备,并发展成了日本压缩成型及燃烧的工业体系,到1987年有十几个颗粒成型工厂投入运行,年产生物颗粒燃料十几万吨,并相继建立了一批专业燃烧装备厂(Dogherty and Wheeler, 1994)。70年代后期,由于出现世界能源危机,石油价格上涨,西欧许多国家如芬兰、比利时、法国、德国、意大利等也开始重视压缩成型及燃烧技术的研究,各国先后有了各类成型机及配套的燃烧装备。法国开始用秸秆的压缩粒作为奶牛饲料,近年来也开始研究压缩块燃料及燃烧装备,并达到了应用阶段(Osobov, 1967)。比利时研制成功了“T117”螺旋压块机及联邦德国KAHL系列压粒机及块状燃料炉(Neale, 1987)。意大利的阿基普公司开发出一种类似于玉米联合收割机的大型秸秆收获、致密成型的大型机械,能够在田间将秸秆收割、切碎、榨汁、烘干、成型,生产出瓦棱状固体成型燃料,其生产率可达 $1\text{hm}^2/\text{h}$,并研制出简易型燃烧炉具(Dogherty, 1989)。

20世纪80年代,亚洲除日本外,泰国、印度、菲律宾、韩国、马来西亚也已建了不少固化、碳化专业生产厂,并已研制出相关的燃烧装备。国外成型的主要装备有颗粒成型机(pellet)、螺旋式成型机(extruder press)、机械驱动冲压成型机(piston presses with mechanical drive)和液压驱动冲压式成型机(piston presses with hydraulic drive)(Demiras and Sahin, 1998)。

20世纪90年代,日本、美国及欧洲一些国家生物质成型燃料燃烧装备已经定型,并形成了产业化,在加热、供暖、干燥、发电等领域已普遍推广应用。按其规模可分为小型炉(small scale)、大型锅炉(large boiler)和热电联产锅炉(combined heat and power boiler)(Taylor and Hennah, 1991);按用途与燃料品种可分为木材

炉 (wood stove)、壁炉 (fireplace)、颗粒燃料炉 (pellet stove)、薪柴锅炉 (boiler for firewood)、木片锅炉 (boiler for wood chips)、颗粒燃料锅炉 (boiler for pellets and grain)、秸秆锅炉 (boiler for straw)、其他燃料锅炉 (boiler for other fuels) (Thomas, 1999); 按燃烧形式可分为片烧炉 (chip-fired boilers or cutting string-fired boiler)、捆烧炉 (batch-fired boiler or small bale-fired boiler)、颗粒层燃炉 (pellet-fired boiler) 等 (Faborade and Callaghan, 1986)。这些国家生物质成型燃料燃烧装备具有加工工艺合理、专业化程度高、操作自动化程度好、热效率高、排烟污染小等优点, 但相对于我国, 这些装备存在着价格高、使用燃料品种单一、易结渣、电耗高等缺点, 不适合引进。东南亚一些国家生物质成型燃料燃烧装备大多数为碳化炉与焦炭燃烧炉, 直接燃用生物质成型燃料的装备较少, 同时这些燃烧装备存在着加工工艺差、专业化程度低、热效率低、排烟污染严重、劳动强度大等缺点, 燃烧装备还未定型, 还需进一步的研究、实验与开发, 这些国家生物质成型燃料燃烧装备也不适合引进我国。随着全球性大气污染的进一步加剧, 减少 CO_2 等有害气体净排放量已成为世界各国解决能源与环境问题的焦点。由于生物质成型燃料燃烧 CO_2 的净排放量基本为零, NO_x 排放量仅为燃煤的 $1/5$, SO_2 的排放量仅为燃煤的 $1/10$, 因此生物质成型燃料直接燃用是世界范围内解决生物质高效、洁净化利用的一个有效途径。

1.2 我国生物质成型燃料燃烧装备发展现状

由于能源危机, 生物压块作为一种可再生能源得到人们的重视, 我国从 20 世纪 80 年代, 便开始对生物质固化成型进行研究, “七五”期间, 中国林业科学研究院林产化学工业研究所通过对引进的样机消化吸收, 系统地进行了成型工艺条件实验, 完成了木质成型装备的试制, 并建成了年产 1000t 棒状燃料生产线。其后, 西北农业大学对该技术的工艺做了进一步的研究和探讨, 先后研制出了 X-7.5、JX-11、SZJ-80A 三种型号的秸秆燃料成型机。“八五”期间, 作为国家重点攻关项目, 中国农业机械化科学研究院能源动力研究所、辽宁省能源研究所、中国林业科学研究院林产化学工业研究所、中国农业工程研究设计院对生物质冲压挤压式压块技术装置进行了攻关, 推进了我国对固化成型研究工作。随着生物质致密技术和碳化技术研究成果的出现, 我国生物质致密成型产业也有了一定的发展。20 世纪 90 年代以来, 我国部分省市能源部门、乡镇企业及个体生产者积极引进成型技术, 创办生产企业, 全国先后有 40 多个中小型企业开展了这方面的工作, 并进行了产业化生产, 形成了固化成型的良好势头。我国发展的压缩成型机可分为两种: 螺旋挤压式成型 (screw extruder) 和液压冲压式成型机 (piston presses with hydraulic drive) (张百良等, 1999), 国内螺旋挤压式成型机在运行的曾有 800 多台, 单台生产能力多在 100~200kg/h, 电机功率为 7.5~18kW, 电加热效率为 2~4kW,

生产的成型燃料多为棒状,直径为 50~70mm,单位产品电耗 70~100kW·h/t,但目前有部分产品由于多方面因素影响而停产了。由此可看出国产成型加工装备在引进及设计制造过程中都不同程度地存在这样或那样的技术与工艺方面的问题:以木屑为原料市场和资源的针对性差,成本高;螺旋挤压装备磨损严重,寿命短(60~80h),耗电高,成型装备单台生产率低(100~980kg/h),规模小,不能满足商业化的要求;对秸秆压缩成型基础理论方面的研究很薄弱,关键技术难以解决,无法满足生物质压缩成型装备开发与生产的需要;对秸秆成型燃料燃烧理论及燃烧特性方面的研究不够深入,先进的秸秆成型燃料专用燃烧装备少,限制了秸秆成型燃料的大量生产,严重制约了秸秆成型行业的发展。这就有待于人们去深入研究、开发,逐渐解决秸秆在成型方面的问题。

我国秸秆成型原料丰富,成型后的燃料体积小、密度大、储运方便;成型燃料致密,无碎屑飞扬,使用方便、卫生;燃烧持续稳定、周期长;燃烧效率高;燃烧后,灰渣及烟气中污染物含量小,是清洁能源,有利于环境保护。因此,生物质成型燃料是高效洁净能源,可替代化石能源用于生产与生活领域。成型燃料的竞争力也会随着化石能源价格上涨,对环境污染程度增加及生物质成型燃料技术水平提高、规模增大、成本降低而不断增大,在我国未来的能源消耗中将占有越来越大的比例,应用领域及范围也逐步扩大。

对生物质成型燃料燃烧的理论和技术研究是推动生物质成型燃料推广应用的一个重要因素。目前,我国对秸秆成型燃料燃烧所进行的理论研究很少,对生物质成型燃烧的点火理论、燃烧机理、动力学特性、空气动力场、结渣特性及确定燃烧装备主要设计参数的研究才刚刚开始,关于生物质成型燃烧理论与数据还没人系统提出,关于生物质成型燃料特别是秸秆成型燃料燃烧装备设计与开发几乎是个空白。20 世纪以来,北京万发炉业中心从欧洲(荷兰、芬兰、比利时)引进、消化、吸收生物质颗粒微型炉(壁炉、水暖炉、炊事炉具),这些炉具适应燃料范围窄,只适用木材制成的颗粒成型燃料,而不适合于以秸秆、野草为原料的块状成型燃料,原因是秸秆、野草中含有较多的钾、钙、铁、硅、铝等成分,极易形成结渣而影响燃烧,同时价格也比较贵,这种炉具不适合中国国情。在我国一些单位为燃用生物质成型燃料,在未弄清生物质成型燃料燃烧理论及设计参数的情况下,盲目地把原有的燃烧装备改为生物质成型燃料燃烧装备,改造后的燃烧装备在空气流动场分布、炉膛温度场分布、浓度场分布、过量空气系数大小、受热面布置等方面存在不合理现象,严重影响了生物质成型燃料燃烧正常速度与正常状况,致使改造后的燃烧装备存在着热效率低、排烟中的污染物含量高、易结渣等问题。

为了使生物质成型燃料能稳定、充分地直接燃烧,以解决上述问题,根据生物质成型燃料燃烧理论、规律及主要设计参数重新设计与研究生物质成型燃料专用燃烧装备是非常重要的,也是非常紧迫的。

2 生物质成型燃料燃烧特性理论分析

生物质成型燃料燃烧特性是设计生物质成型燃料燃烧装备的基础，生物质成型燃料燃烧特性与木块、煤的燃烧特性有一定差别。为了使生物质成型燃料燃烧装备主要设计参数确定得更加合理、准确，设计出的燃烧装备能够有较高的燃烧效率与较小的污染，必须对生物质成型燃料燃烧特性加以认真的研究与分析。

2.1 生物质成型燃料点火理论分析

2.1.1 点火过程

生物质成型燃料的点火过程是指生物质成型燃料与氧分子接触、混合后，从开始反应，到温度升高至激烈的燃烧反应前的一段过程。实现生物质成型燃料的点火必须满足：生物质成型燃料表面析出一定浓度的挥发物，挥发物周围要有适量的空气，并且具有足够高的温度。生物质成型燃料的点火过程是：①在热源的作用下，水分被逐渐蒸发溢出生物质成型燃料表面；②随后生物质成型燃料表面层燃料颗粒中有机质开始分解，在其过程中有一部分挥发物可燃气态物质分解析出；③局部表面达到一定浓度的挥发物遇到适量的空气并达到一定温度，便开始局部着火燃烧；④随后点火面渐渐扩大，同时也有其他局部表面不断点火；⑤点火面迅速达到生物质成型燃料的整体火焰出现；⑥点火区域逐渐深入到生物质成型燃料表面一定深度，完成整个稳定点火过程（Koufopamos and Can, 1989）。点火过程可形象地用图 2.1 表示。

2.1.2 影响点火的因素

（1）点火温度：对相同燃点的成型燃料来讲，点火温度越高，点火时间越短，点火越容易（Goldstein, 1997）。

（2）生物质种类：不同种类的生物质，其燃点高低、挥发分多少、水分含量高低不同，其点火的难易程度不同（Williams and Home, 1994）。

（3）外界的空气条件：成型燃料的点火也是燃烧过程，除燃料自身条件外，还需一定的外界空气条件，点火时属低速燃烧过程，燃烧处于动力区，只需少量

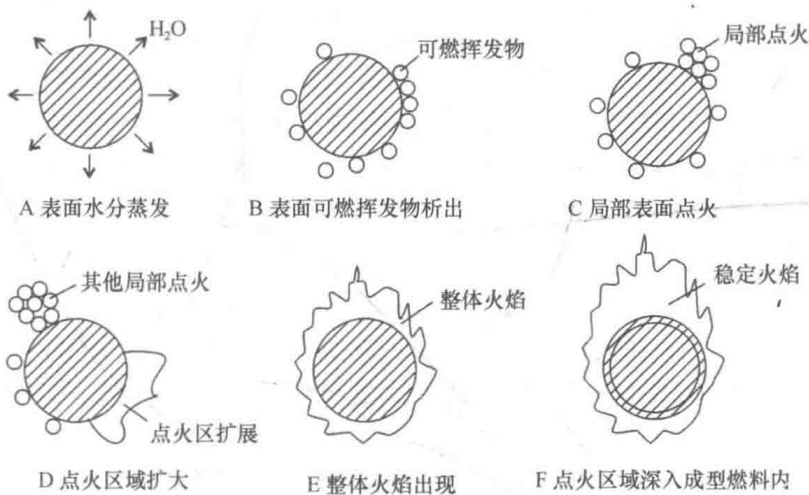


图 2.1 生物质成型燃料点火模型

外界空气量，空气量太大、太小都不利于成型燃料的点火 (Naude, 2005)。

(4) 生物质成型密度：生物质成型密度越大，挥发分从里向外逸出速度及氧气从外向里的扩散速度越慢，其点火性能越差；反之，点火越容易 (Williams and Home, 1994)。

(5) 生物质成型燃料含水率：生物质成型燃料的含水率越高，水的汽化消耗的热量越多，其点火能量消耗越大，其点火性能变差；反之，点火越容易。

(6) 生物质成型燃料的几何尺寸：生物质成型燃料的几何尺寸越大，其单位质量生物质的表面积越小，挥发分与氧气接触面积越小，反应速度越慢，点火越难；反之，点火越容易 (Stamm, 1956)。

2.1.3 点火特性

生物质成型燃料一般是由高挥发分的生物质在一定温度下挤压而成，在高压成型的生物质燃料中，其组织结构限定了挥发分的由内向外析出速度及热量由外向内的传播速度减慢，且点火所需的氧气比原生物质有所减少，因此生物质成型燃料的点火性能比原生物质有所降低 (Roberts and Clough, 1963)。但其远远高于型煤的点火性能，从总体趋势分析，生物质成型燃料的点火特性更趋于生物质点火特性 (Tinney, 1965)。

2.2 生物质成型燃料燃烧机理分析

生物质成型燃料燃烧机理的实质是静态渗透式扩散燃烧，燃烧过程就从着火

后开始。①生物质成型燃料表面可燃挥发物燃烧，进行可燃气体和氧气的放热化学反应，形成橙黄色火焰；②除了生物质成型燃料表面部分可燃挥发物燃烧外，成型燃料表层部分的碳处于过渡区燃烧形成橙红色较长火焰；③生物质成型燃料表面仍有较少的挥发分燃烧，但更主要的是燃烧向成型燃料更深层渗透。焦炭的扩散燃烧，燃烧产物 CO_2 、 CO 及其他气体向外扩散，进行中 CO 不断与 O_2 结合成 CO_2 ，成型燃料表层生成薄灰壳，外层包围着淡蓝色短火焰；④生物质成型燃料进一步向更深层发展，在层内主要进行碳燃烧（即 $2\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CO}$ ），在球表面进行一氧化碳的燃烧（即 $2\text{CO} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CO}_2$ ），形成比较厚的灰壳，由于生物质的燃尽和热膨胀，灰层中呈现微孔组织或空隙通道甚至裂缝，较少的短火焰包围着成型块；⑤燃尽灰壳不断加厚，可燃物基本燃尽，在没有强烈干扰的情况下，形成整体的灰球，灰球表面几乎看不出火焰，灰球会变成暗红色，至此完成了生物质成型燃料的整个燃烧过程（Hajaligol and Chem, 1982）。燃烧过程可形象地用图 2.2 表示。

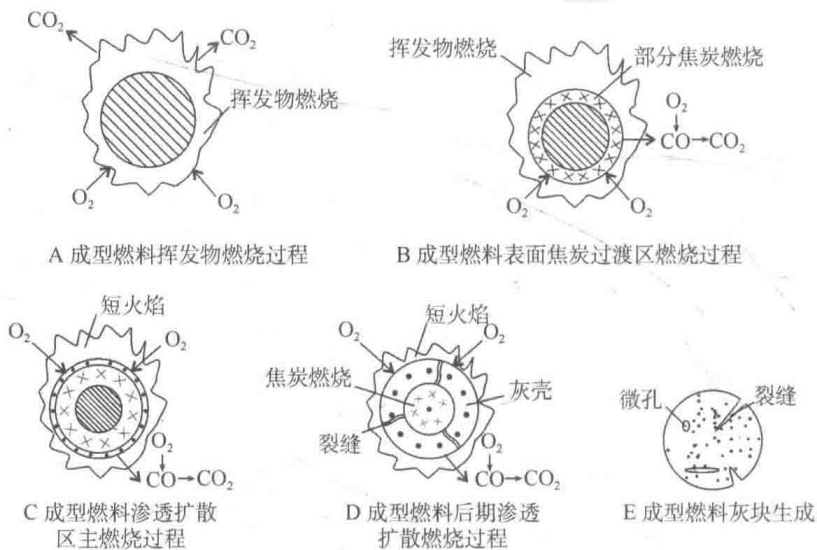


图 2.2 生物质成型燃料燃烧模型

2.3 生物质成型燃料燃烧动力学方程分析

2.3.1 生物质成型燃料燃烧动力学方程

生物质成型燃料燃烧动力学是研究生物质成型燃料燃烧过程中化学反应推动力的科学，具体来说是研究影响生物质成型燃料燃烧化学反应速度的因素是什么，以及它们是怎样影响生物质成型燃料燃烧化学反应速度的，从而揭示生物质成型燃料燃烧