



新 能 源
New Energy
应用丛书

秸秆能源化 技术与工程

S traw Energy
Technology and Engineering

■ 田宜水 孟海波 孙丽英 姚宗路 编著

2



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

新能源应用丛书

秸秆能源化技术与工程

田宜水

孟海波

孙丽英

姚宗路

编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

秸秆能源化技术与工程 / 田宜水等编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2010.11
(新能源应用丛书)
ISBN 978-7-115-23245-8

I. ①秸… II. ①田… III. ①秸秆—综合利用 IV.
①S38

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第109032号

内 容 提 要

本书首先就秸秆资源及其能源化利用做了介绍,然后重点对各类利用技术的工艺原理、设备安装、调试运行进行了讲解,通过案例分析,给出技术经济评价。

本书适合于从事秸秆能源化利用的工程技术人员阅读,同时也可作为大专院校相关专业教学的参考资料。

新能源应用丛书

秸秆能源化技术与工程

-
- ◆ 编 著 田宜水 孟海波 孙丽英 姚宗路
责任编辑 毕 颖
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市潮河印业有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 13.75
字数: 361千字
印数: 1—3 500册
 - 2010年11月第1版
2010年11月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-23245-8

定价: 38.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

进入 21 世纪后,由于全球经济快速发展和人口不断增长,世界一次能源消费量不断增加,而化石能源仍是能源消费的主体,使得温室气体及各种有害物质大量排放,生态环境不断受到威胁。1997 年的《京都议定书》要求国际社会采取行动,消除人为对气候系统的破坏;2009 年的哥本哈根会议进一步推动了各国在应对气候变化的行动中形成共识,温家宝总理也在大会上作出庄严承诺。在此背景下,世界各国都在积极研究并开发利用新能源特别是可再生能源,约束和减少全球温室气体的排放,中国政府已经把大力推动新能源与可再生能源发展作为国家的一项重大战略任务。

新能源的各种形式都是直接或者间接地来自于太阳或地球内部所产生的热能,包括了水能、太阳能、风能、生物质能、地热能、核聚变能、海洋能以及氢能等。新能源普遍具有污染少、储量大的特点,对于解决当今全球气候变化和环境污染问题,解决化石能源日趋枯竭以及保障能源安全供应等问题具有重要意义。从长远看,我们正处在以化石能源应用为主向新能源应用转变的过渡阶段,应抓住这次能源变革的机遇,加强对能源战略、能源结构、能源布局、能源政策、能源科技、能源价格以及能源合作等一系列重大问题的研究,明确发展目标,理清发展思路和工作方向。

在缓解能源、环境危机的双重压力下,太阳能热利用、沼气、农作物秸秆和生物制液体燃料等由于出色的节能减排效果和经济实用性,多年来已成为国家能源建设,特别是社会主义新农村建设中优先发展的重点领域。

人民邮电出版社顺应时代的需要,出版了这套“新能源应用丛书”。本套丛书包括已具规模效益的太阳能热利用工程和沼气工程,以及前景广阔的燃料乙醇工程和秸秆能源工程等项目,其作者均是相关领域有着丰富实践经验和理论水平的工程技术专家,各册书稿贯穿了实用有效的编写方针,对于新能源工程建设,有很好的指导性、可操作性和成果连续性。

相信“新能源应用丛书”的出版发行,可以为新能源领域的工程技术人员提供一个实用而有效的智力支撑,也可以成为面向广大干部群众的科普读物。

国务院参事、中国可再生能源学会理事长



2010 年 9 月 27 日



前言

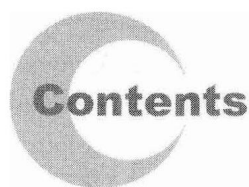
我国是能源消费大国，2009 年我国一次能源生产量为 28 亿吨标准煤，而能源消费总量达 31 亿吨标准煤。同时，我国也是化石能源非常短缺的国家，人均煤炭资源约 90 吨，仅为世界平均水平的 55.4%；人均石油可采储量 2.6 吨，仅为世界平均值的 11.1%；人均可开采天然气 1074 立方米，为世界平均值的 4.3%。能源供应主要依靠煤炭、石油和天然气等化石能源，而化石能源的资源有限性及其开发利用过程对生态环境造成的巨大压力，严重制约着社会经济的可持续发展。开发清洁的可再生能源已成为我国能源领域的一个紧迫课题。在太阳能、风能、水能、潮汐能、地热能和生物质能等可再生能源中，生物质能具有可再生和环境友好的双重属性，是唯一可存储和运输的可再生能源，是国家重点鼓励发展的领域之一。

农作物秸秆作为生物质能源的主要来源之一，是指在农业生产过程中，收获了小麦、玉米、稻谷等农作物以后，残留的不能食用的茎、叶等副产品。我国是农业大国，作物种类较多，具有丰富的秸秆资源，其中稻谷、小麦、玉米、棉花和油菜等主要农作物秸秆占很大比重。大力开发利用秸秆等生物质能源，既是我国开辟新的能源途径，缓解能源供需矛盾的战略措施，也是解决“三农”问题，保证社会经济持续发展的重要任务。

为适应我国生物质能源产业的快速发展形势，本书全面、系统地介绍了秸秆能源化利用政策，各类利用技术的原理、设计应用、设备安装、调试运行、技术经济评价等内容。

参与本书编写的有田宜水、孟海波、孙丽英、姚宗路等，全书由田宜水负责统稿。由于编者水平有限，书中难免会有错误和疏漏之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者



目录

第 1 章 绪论.....1	第 3 章 秸秆预处理技术.....32
1.1 秸秆的定义.....1	3.1 农作物秸秆的收储运.....32
1.1.1 禾本科作物植株的结构.....1	3.1.1 国外主要农作物秸秆收储运模式.....33
1.1.2 秸秆的组成成分.....2	3.1.2 案例分析.....36
1.1.3 秸秆与木材的比较.....3	3.1.3 我国农作物秸秆收储运模式.....39
1.2 秸秆的燃料特性.....4	3.2 农作物秸秆的干燥处理.....47
1.2.1 秸秆的工业分析和化学分析.....4	3.2.1 原料的干燥机理与特性.....47
1.2.2 秸秆燃烧的基本过程.....7	3.2.2 干燥方法与设备.....48
1.2.3 影响秸秆燃烧速度的因素.....9	3.3 农作物秸秆的粉碎.....51
1.3 我国秸秆能源化利用的产业政策.....10	3.3.1 原理与方法.....51
第 2 章 秸秆资源的评价.....13	3.3.2 工艺流程.....52
2.1 农作物秸秆.....13	3.3.3 粉碎机及其他粗加工机具.....53
2.1.1 总量.....13	3.3.4 评定与选用.....56
2.1.2 分布.....16	3.4 农作物秸秆的输送.....57
2.1.3 评价.....18	3.4.1 气流输送设备.....58
2.2 农产品加工剩余物.....20	3.4.2 螺旋输送设备.....59
2.2.1 总量.....20	3.4.3 胶带输送设备.....61
2.2.2 分布.....21	3.4.4 刮板输送设备.....61
2.2.3 评价.....22	第 4 章 气化技术与工程.....64
2.3 林业“三剩物”.....22	4.1 气化基本原理.....64
2.3.1 总量.....22	4.2 气化工艺与技术分类.....66
2.3.2 分布.....23	4.2.1 气化工艺.....66
2.3.3 评价.....24	4.2.2 技术分类.....66
2.4 能源作物.....25	4.3 秸秆气化设备.....70
2.4.1 柳枝稷.....25	4.3.1 固定床气化器.....70
2.4.2 芒属植物.....29	4.3.2 流化床气化器.....71
2.4.3 柳属植物.....30	4.4 秸秆燃气.....72
	4.4.1 生物质燃气的特性.....72
	4.4.2 生物质燃气的净化.....76

4.4.3 生物质燃气的主要用途	78	开发现状	145
4.5 秸秆气化集中供气系统	79	6.1.4 秸秆热裂解液化反应器的类型	147
4.5.1 气化供气系统的组成	79	6.1.5 典型秸秆热裂解液化装置	148
4.5.2 气化器的设计	80	6.2 秸秆降解制取燃料乙醇技术	153
4.5.3 净化系统的设计	84	6.2.1 纤维素秸秆预处理技术	153
4.6 秸秆村级气化供气系统工程设计	88	6.2.2 纤维素酶的生产和纤维素水解技术研究	155
4.6.1 气化站设计	88	6.2.3 乙醇发酵菌株选育和戊糖代谢工程菌构建	156
4.6.2 燃气输配系统设计	98	6.2.4 纤维素糖化发酵工艺	158
4.6.3 室内用气系统设计	101	6.2.5 玉米秸秆制取乙醇案例分析	159
4.7 案例分析及技术经济评价	103	6.3 秸秆间接液化技术	161
第5章 固体成型技术与工程	105	6.3.1 发展现状	162
5.1 概述	105	6.3.2 影响因素	162
5.2 固体成型原理	106	6.3.3 典型工艺过程	163
5.3 固体成型工艺	107	第7章 秸秆燃烧和发电技术	165
5.3.1 广义上的固体成型工艺	107	7.1 省柴灶	165
5.3.2 成型原理分类	108	7.1.1 省柴灶的基本结构	166
5.4 固体成型设备	114	7.1.2 省柴灶的节能原理	167
5.4.1 螺旋挤压成型机	114	7.1.3 省柴灶施工	167
5.4.2 活塞冲压成型机	115	7.1.4 省柴灶的热性能试验方法	172
5.4.3 模棍挤压成型机	116	7.1.5 省柴灶的常见问题及解决方法	176
5.5 生物质固体成型燃料标准	120	7.2 节能炕	179
5.5.1 国外相关产业标准	120	7.2.1 节能炕的结构	180
5.5.2 我国相关产业标准	123	7.2.2 节能炕的节能原理	181
5.6 生物质固体成型燃料的应用	125	7.2.3 节能炕的设计	183
5.6.1 农村居民生活用能	125	7.2.4 节能炕施工	186
5.6.2 农村区域供热	126	7.2.5 节能炕的常见问题及解决方法	191
5.6.3 工业用途	127	7.3 秸秆燃烧及发电技术	192
5.7 案例分析及技术经济评价	129	7.3.1 工业燃烧技术	193
5.7.1 工艺与生产线流程图	130	7.3.2 生物质燃烧发电	200
5.7.2 生产线操作规程	133	7.3.3 热电联产	204
5.7.3 效益评价	136	7.3.4 生物质与煤的混合燃烧技术	205
第6章 液化技术与工程	138	7.3.5 秸秆灰的利用	207
6.1 秸秆热裂解	138	参考文献	210
6.1.1 秸秆热裂解机理及工艺	138		
6.1.2 秸秆热裂解工艺类型及影响因素	141		
6.1.3 秸秆热裂解液化技术研究及			

1.1 秸秆的定义

秸秆即农作物的茎秆，在农业生产过程中，收获了小麦、玉米、稻谷等农作物以后，残留下来的不能食用的根、茎、叶等废弃物统称为秸秆。秸秆是一种具有多用途的可再生生物资源，农作物光合作用的产物有一半以上存在于秸秆中。

广义上讲，农作物秸秆不仅包括农业生产过程中的废弃物，还包括农产品加工过程中的副产品：①禾本科作物秸秆，包括大麦秸秆、燕麦秸秆、小麦秸秆、黑麦秸秆、稻草、高粱秸秆、玉米秸秆以及薯类藤蔓等；②豆类茎秆，包括黄豆秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、豇豆秸秆、羽扇豆秸秆和花生藤蔓等；③亚热带植物副产品，包括甘蔗渣、西沙尔麻渣、香蕉秆和叶等；④农作物加工过程中的副产品，包括玉米芯、各种麦类的糠麸、各种水稻的谷壳和米糠等。

1.1.1 禾本科作物植株的结构

水稻、小麦、玉米、高粱等禾本科作物的植株由根、茎、叶、花和籽实等器官组成。

1. 茎

禾本科作物的茎呈圆筒状，茎中有髓或有空腔。茎可分为若干节，节与节之间的部分叫节段，每节间的坚硬圆实部分，称之（叶）节。节段的数目随不同种或品种作物而不同，水稻和小麦的茎秆比较细软，地上部分有5~6节，节间中空，曲折度大，有弹性。玉米、高粱和甘蔗的茎为实心，茎高大，地上部分的节数有17~18节，节间粗、坚硬、不易折断。玉米植株顶端有雄穗，植株中间有雌穗，穗外有苞叶，苞叶包着生在轴蕊上的籽粒。

禾本科作物茎的节间横切面上有3种系统：表皮系统、基本系统和维管系统。禾本科作物表皮只有初生结构，一般为层细胞，通常角质化或硅质化，以防止水分过度蒸发和病菌侵入，并对内部其他组织起保护作用。各种器官中数量最多的组织是薄壁组织，也叫基本组织，它是进行光合作用、呼吸作用，以及养分贮藏、分化等主要生命活动的场所，是作物组成的基础。维管束都埋藏贯穿在薄壁组织内。在韧皮部、木质部等复合组织中，薄壁组织起着联系作用。

在维管系统中，除薄壁组织外，主要有木质部和韧皮部，二者相互结合。禾本科作物维管束中木质部、韧皮部的排列多属于外韧维管束。小麦、大麦、水稻、黑麦、燕麦茎中维管束排

成 2 圈，较小的一圈靠近外围，较大的一圈插入茎中。玉米、高粱、甘蔗茎中的维管束则分散于整个横切面中。木质部的功能是把茎部吸收的水和无机盐，经茎输送到叶和植株的其他部分。韧皮部则把叶中合成的有机物质（如碳水化合物和氮化物）输送到植株的其他部分。

玉米茎表皮下有机械组织，由厚壁组织与厚角组织组成。这些组织能支持植株本身的重量并能防止风雨侵袭。厚壁组织含有石细胞和纤维一类的细胞。

2. 叶

禾本科作物的叶分为叶鞘和叶片两部分。叶鞘包在茎的四周，有支持茎和保护茎的作用。叶鞘基部膨大的部分叫叶节。禾本科作物的叶上有的有叶耳、叶舌，有的则没有。例如，高粱有叶舌而无叶耳，小麦的叶耳小且有茸耳，大麦的叶耳大，黑麦的叶耳不明显，燕麦无叶耳，水稻有叶舌、叶耳，稗草则无叶舌、叶耳。

叶是进行光合作用的主要器官。叶的组织与茎的组织相同，分为表皮系统、基本系统和维管系统。表皮在叶的最外层，维管组织则分布在基本组织之中。

叶的表皮结构比较复杂，有泡状细胞（即运动细胞）、附属毛、似纤维的细胞。表皮细胞有长细胞、短细胞。短细胞又分为硅质细胞、栓质细胞，前者充满硅质体，后者细胞壁木栓化。表皮上下面还有气孔。表皮可以保护叶肉组织，防止水分蒸散，对叶起机械支持的作用。表皮细胞质有硅质，细胞外壁有角质层，这是禾本科作物的特点。

叶肉是由表皮下团块状薄壁组织细胞所组成的。叶肉组织中含有大量叶绿体，因此这些起同化作用的器官呈现绿色。进行光合作用时，叶绿体内可起到聚集淀粉的作用。

叶脉是维管束。禾本科作物也没有平行脉，叶上纵行的平行脉之间还有横行的小维管束将平行脉连接起来。禾本科作物的叶脉有维管束鞘。维管束鞘分为两种：一种为薄壁型，含有叶绿体；另一种壁较厚，无叶绿体。小麦有内外两层维管束鞘。玉米、高粱维管束鞘中的叶绿体特别大，在进行光合作用时，叶内可形成较多的淀粉。

1.1.2 秸秆的组成成分

秸秆主要由纤维素、半纤维素和木质素三部分组成。纤维素的化学组成十分简单，是由 β -D-葡萄糖通过 β -1, 4-苷键连接而成的线型结晶高聚物，聚合度很大（通常由 4000~8000 个葡萄糖分子串联起来，分子量达 200~2000）。葡萄糖的 β -1, 4-苷键连接方式使纤维素几乎所有的羟基及其他含氧基团，都同其分子内或相邻分子上的含氧基团之间形成分子内和分子链之间的氢键。这些氢键使很多纤维素分子共同组成结晶结构，并进而组成复杂的基元纤维、微纤维、结晶区和无定型区等纤维素聚合物的超分子结构。纤维素的特殊结构使纤维素酶分子很难靠近纤维素分子内部的糖苷键进行有效的反应。

半纤维素在结构和组成上变化很大，一般由较短（聚合度小于 200）、高度分枝的杂多糖链组成。常见的有木聚糖、阿拉伯-木聚糖、葡萄糖-甘露聚糖、半乳-葡萄糖-甘露聚糖等，多通过 β -1, 4-糖苷键连接，含有五碳糖（通常是 D-木糖和 L-阿拉伯糖）、六碳糖（D-半乳糖、D-葡萄糖和 D-甘露糖）和糖醛酸。各种植物纤维原料的半纤维素链上连接着数量不等的甲酰基和乙酰基，其分枝结构使半纤维素无定形化，比较容易被水解为糖类。

木质素是以苯丙基为基本结构单元连接而成的高分枝多分散性高聚物，非常难于降解。

纤维素是细胞壁的主要成分。在纤维素的周围充填着半纤维素和木质素，阻碍了纤维素酶同纤维素分子的直接接触。

主要农作物秸秆的原料组成见表 1-1。

表 1-1 主要秸秆中纤维素、半纤维素、木质素含量

秸 秆 种 类	纤维素 (%)	半纤维素 (%)	木质素 (%)
稻谷	32.0	24.0	12.5
小麦	30.5	23.5	18.0
玉米	34.0	37.5	22.0
大豆	33.0	18.5	—

1.1.3 秸秆与木材的比较

农作物秸秆与木材同属于通过光合作用积累的可再生木质纤维素资源，但是，木材作为资源被大量利用，而秸秆却被大量废弃或焚烧。这是因为以下原因。

① 秸秆生物结构的不均一性，即茎秆、叶、穗、鞘等各占一定比例。而且各部分的化学成分及纤维形态差异很大，某些部位的纤维特征还要优于某些阔叶纤维素，如麦草的节间和叶鞘、稻草的茎，这些部位中的纤维其长度和杨树纤维长度类似甚至长于杨树纤维，而且纤维比较窄，具有很高的长宽比（见表 1-2、表 1-3），这说明秸秆的这些部位具有高值利用的潜力。收获秸秆一般不进行不同器官的分离，因此整株秸秆中含有多种器官和组织。而木材在采伐后，一般要进行剥皮处理，实际使用的是整个树干的木质部。

表 1-2 麦草不同部位的纤维长宽比较表

项 目		长度（mm）				宽度（mm）				长宽比
		平均	最大	最小	一般	平均	最大	最小	一般	
全部位		1.32	2.94	0.61	1.03~1.60	12.9	24.5	7.4	9.3~15.7	102
不同部位	茎	1.52	2.63	0.66	1.07~1.88	14.0	27.9	8.3	12.7~18.6	109
	节间	1.21	2.39	0.39	0.85~1.56	11.5	24.5	7.4	8.8~15.7	105
	叶鞘	1.26	3.31	0.44	0.70~1.80	14.7	34.3	8.8	9.8~18.6	86
	叶	0.86	1.47	0.24	0.59~1.16	12.1	19.6	6.4	8.8~18.6	71
	节	0.47	1.29	0.18	0.24~0.77	17.8	43.1	8.3	9.8~27.0	26

表 1-3 若干种杨木纤维的形态特征

材 种	胡杨	山杨	毛白杨	大青杨	箭杆杨	214 杨	72 杨	63 杨	69 杨	大观杨
均长 (mm)	0.83	1.38	0.82	1.32	0.90	1.13	1.11	1.04	1.04	1.19
均宽 (μm)	21.5	18.5	20.8	24.0	21.6	24.0	24.0	22.0	23.0	25.0
长宽比	38.7	74.0	34.4	55.0	42.0	47.0	46.3	47.3	45.2	47.6

② 化学成分的差异。秸秆中含有大量半纤维素，灰分含量高，大于 1%，有些稻草则可高达 10% 以上。

③ 纤维形态的特征差异。秸秆中细小纤维组分及杂细胞组分含量高，多达 40%~50%，纤维细胞含量低至 40%~70%。而木材杂细胞含量低，纤维细胞含量高，阔叶材含量为 60%~80%，针叶材含量达 90%~95%。从表 1-4 中可以看出，麦草与木材相比，无论在化学组成，还是在木质素、半纤维素的结构上都存在着较大的差异。

表 1-4 麦草与木材的化学结构的比较

项 目		麦 草	木 材
木 质 素	木质素的酚羟基 (C_9 苯丙烷单元)	$(0.4\sim0.45)/C_9$	$(0.1\sim0.3)/C_9$
	木质素的酚羟基	44/100 单元	(9~13)/100 单元桦木
	木质素的羟基	13.8/100 单元	—
	木质素的羧基	$0.1\sim0.2/C_9$	—
	木质素中对香豆酸、酯键比例	2.1%~2.8%	—
	木质素中阿魏酸	α -醚键	—
	磨木木质素相对分子质量 (M_w)	7500	18200 (桦木)
	木质素中单元比例 (愈创木酚基: 紫丁香基型木质素: 紫丁香基丙烷, V:S:H)	1:0.77:0.31	1:1.2:0.05 (阔叶木) 1:0.02:0.009 (针叶木)
其 他	木质素—碳水化合物复合物 (LCC)	占易溶木质素的 60% 为 LCC	LCC
	半纤维素聚合度	84	>120
	半纤维素结构组成	90% 木聚糖	80%~90% 木聚糖 (阔叶木) 60%~70% 甘露糖 (针叶木)
	纤维素结晶度	40%~60%	60%~80%
	有机抽提物	1% 以下	4% 针叶木 1% 以下, 阔叶木
	灰分	8% (60% 为 SiO_2)	1% 以下 (CaO , K_2O , Na_2O)
	纤维特征	长 1.0~1.5mm	长 5mm
	细小纤维和杂细胞	39%	5% (针叶木) 25% (针叶木)

1.2 秸秆的燃料特性

燃料一般是指可以与氧发生激烈的氧化反应，释放出大量热量，而且具有经济合理性的一种物质。按照形态可分为气体燃料、液体燃料和固体燃料；按照取得的方法可分为天然燃料和人造燃料。

1.2.1 秸秆的工业分析和化学分析

1. 元素分析成分

秸秆是由多种可燃质、不可燃的无机矿物质及水分混合而成的。其中，可燃质是由多种

复杂的高分子有机化合物的混合物，主要由 C、H、O、N 和 S 等元素所组成，其中 C、H 和 O 是主要成分。

(1) 碳：碳是秸秆中主要可燃元素。在燃烧期间与氧发生氧化反应，1kg 的 C 完全燃烧时，可以释放出 34045kJ 的热量，基本上决定了生物质的热值。生物质中的碳一部分与氢、氧等化合为各种可燃的有机化合物，一部分以结晶状态碳的形式存在。

(2) 氢：氢是秸秆中仅次于碳的可燃元素，1kg 的氢完全燃烧时，可以释放出 142256kJ 的热量。生物质中所含的氢一部分与碳、硫等化合为各种可燃的有机化合物，受热时可热解析出，且易点火燃烧，这部分氢称为自由氢。另有一部分氢与氧化合形成结晶水，这部分氢称为化合氢，显然它不可能参与氧化反应并释放出热量。

(3) 氧和氮：氧和氮均是不可燃元素。氧在热解期间被释放出来以部分满足燃烧过程中对氧的需求。在一般情况下，氮不会发生氧化反应，而是以自由状态排入大气中；但是，在满足一定条件的情况（如高温状态）下，部分氮可与氧生成 NO_x ，污染大气环境。

(4) 硫：硫是燃料中的一种有害可燃元素，它在燃烧过程中可生成 SO_2 和 SO_3 气体，既有可能腐蚀燃烧设备的金属表面，又有可能污染环境。生物质中硫含量极低，如果替代煤等化石能源，可以减轻对环境的污染。

(5) 灰分：灰分是燃料在燃烧后所形成的固体残渣，是原有的不可燃矿物杂质经高温分解和氧化形成的，对生物质燃烧过程有着一定的影响。如果生物质的灰分含量高，将减少燃料的热值，降低燃烧温度。例如，稻草的灰分含量可达 14%，导致其燃烧比较困难。

在农作物收获后，将秸秆在农田中放置一段时间，利用雨水进行清洗，可以减少其中氯和钾的含量，并且除去部分灰分，减少运输量，减轻对锅炉的磨损，减少灰渣处置量。

(6) 水分：水分是燃料中的不可燃成分，一般分为外在水分和内在水分。外在水分是指吸附在燃料表面的水分，可用自然干燥的方法去除，与运输和存储条件有关；内在水分是指吸附在燃料内部的水分，比较稳定。生物质水分的变化较大，将会影响燃烧的状况，含水率较高生物质的热值有所下降，导致起燃困难，燃烧温度偏低，阻碍燃烧反应的顺利进行。

燃料的组成成分可用各组成元素的重量百分比来表示，称为燃料的元素分析成分，几种生物质的元素分析见表 1-5。

表 1-5 几种生物质的元素分析（干燥无灰基¹）

燃料类型	C	H	O	N	S
杉木	52.8%	6.3%	40.5%	0.1%	—
杉树皮	56.2%	5.9%	36.7%	—	—
麦秸	49.04%	6.16%	43.41%	1.05%	0.34%
玉米芯	48.4%	5.5%	44.3%	0.30%	—
高粱秸	48.63%	6.08%	44.92%	0.36%	0.01%

¹ 干燥无灰基：除去固体燃料中所含全部水分和灰分后计算的燃料部分。当外界因素造成的水分和灰分变动时，干燥无灰基成分不受影响，因此它可以比较合理地反映固体燃料的特性。

续表

燃料类型	C	H	O	N	S
稻草	48.87%	5.84%	44.38%	0.74%	0.17%
稻壳	46.20%	6.10%	45.00%	2.58%	0.14%

2. 工业分析成分

在隔绝空气的条件下对燃料进行加热，首先是水分蒸发逸出，然后燃料中的有机物开始热分解并逐渐析出各种气态产物，称为挥发分（V），主要含有 H_2 、 CH_4 等可燃气体和少量的 O_2 、 N_2 、 CO_2 等不可燃气体。生物质挥发分含量一般在 76%~86%，远远高于煤，因此挥发分的热解与燃烧是生物质燃烧的主要过程。余下的固体残余物为木炭，主要由非挥发性碳（固定碳）与灰分组成。所谓固定碳，并非纯碳，其中残留少量的 H、O、N 和 S 等成分。

用挥发分、固定碳、灰分和水分表示燃料的成分被称为燃料的工业分析成分，几种生物质工业分析见表 1-6。

表 1-6 几种生物质的工业分析

燃料类型	水分	挥发分	固定碳	灰分	低位热值 (kJ/kg)
杂草	5.43%	68.77%	16.40%	9.46%	16192
豆秸	5.10%	74.65%	17.12%	3.13%	16146
稻草	4.97%	65.11%	16.06%	13.86%	13970
麦秸	4.39%	67.36%	19.35%	8.90%	15363
玉米秸	4.87%	71.45%	17.75%	5.93%	15539
玉米芯	15.0%	76.60%	7.00%	1.40%	14395
棉秸	6.78%	68.54%	20.71%	3.97%	15991

3. 热值

热值（又称发热量）是指在一定温度下，单位质量（气体燃料为单位容积）的燃料完全燃烧后，在冷却至原有温度时所释放的热量，它是衡量燃料品质的重要指标。生物质的热值一般在 18~21MJ/kg，固体燃料的热值通常采用氧弹测热器直接测定。

考虑到在实际燃烧状况下，燃烧产物具有相当高的温度（一般都超过 100℃），而水蒸气在燃烧产物中的分压力远低于大气压，不能凝结为水，以燃料中水蒸气是否释放汽化潜热，将热值分为高位热值和低位热值，在实际应用中一般采用低位热值，见表 1-6。两者之间的差别在于水蒸气（水分蒸发和氢燃烧生成）的汽化潜热是否释放出来，换算关系为：

$$Q_{dw} = Q_{gw} - 25(9H + W)$$

式中： Q_{gw} ——燃料的高位热值，kJ/kg；

Q_{dw} ——燃料的低位热值，kJ/kg；

H、W——氢、水的元素分析，%。

4. 物理特性

秸秆的物理特性也是十分重要的,其分布、自然形状、尺寸、堆积密度及灰熔点等物理特性影响了收集、运输、存储、预处理和相应的燃烧技术。

(1) 堆积密度:包括固体燃料颗粒空间在内的密度。一般在自然堆积的情况下进行测量,它反映了单位容积中物料的质量。根据生物质的堆积密度可将生物质分为两类,一类为硬木、软木、玉米芯及棉秸等木质燃料,它们的堆积密度在 $200\sim 350\text{kg/m}^3$;另一类为玉米秸秆、稻草和麦秸等农作物秸秆,它们的堆积密度低于木质燃料。另外,生物质的堆积密度远远低于煤的堆积密度,例如,已切碎的农作物秸秆的堆积密度为 $50\sim 120\text{kg/m}^3$,锯末的堆积密度为 240kg/m^3 ,木屑的堆积密度为 320kg/m^3 ,褐煤的堆积密度为 $560\sim 600\text{kg/m}^3$,烟煤的堆积密度为 $800\sim 900\text{kg/m}^3$ 。较低的堆积密度,不利于农作物秸秆的收集和运输,而且需要占用大量的堆放场地。

(2) 灰分熔点:在高温状态下,灰分将变成熔融状态,形成含有多种组分的灰(具有气体、液体或固体形态),在冷表面或炉墙会形成沉积物,即积灰或结渣。灰分开始融化的温度称为灰熔点。

秸秆的灰分熔点可用角锥法测定。将灰粉末制成的角锥在保持半还原性气氛的电路中加热。角锥尖端开始变圆或弯曲时的温度称为变形温度 t_1 ,角锥尖端弯曲到和底盘接触或呈半球形时的温度称为软化温度 t_2 ,角锥熔融到底盘上开始溶溢或平铺在底盘上显著熔融时的温度称为流动温度 t_3 。

生物质中的 Ca 和 Mg 元素通常提高灰熔点, K 元素降低灰熔点, Si 元素在燃烧过程中与 K 元素形成低熔点的化合物。农作物秸秆中 Ca 元素含量较低, K 元素含量较高,导致灰分的软化温度较低。例如,麦秸的变形温度为 $860\sim 900^\circ\text{C}$,对设备运行的经济性和安全性有着一定的影响。

由于生物质的种类繁多,且受产地及气候等因素影响较大,为了准确地分析生物质特性,国际上建立了有关生物质特性的数据库。例如,由荷兰能源研究所建立的数据库,其内容包括有关生物质及固体废物的特性。

1.2.2 秸秆燃烧的基本过程

燃烧是指燃料中所含的 C、H 等可燃元素与氧气发生激烈的氧化反应,同时释放热量的过程。固体燃料的燃烧按燃烧特征,通常分为以下几类。

(1) 表面燃烧:燃烧反应在燃料表面进行,通常发生在几乎不含挥发分的燃料中,如木炭表面的燃烧。

(2) 分解燃烧:当燃料的热解温度较低时,热解产生的挥发分析出后,与 O_2 进行气相燃烧反应。当温度较低,挥发分未能点火燃烧时,将会冒出大量浓烟,浪费大量的能源。生物质的燃烧过程属于分解燃烧。

(3) 蒸发燃烧:主要发生于熔点较低的固体燃料。燃料在燃烧前首先熔融为液态,然后再进行蒸发和燃烧(相当于液体燃料)。

秸秆类生物质的燃烧过程可以分为四个阶段(如图 1-1 所示),分析如下。

(1) 预热和干燥阶段:在生物质的燃烧过程中,当温度达到 100°C 时,生物质进入干燥

阶段，水分开始蒸发。水分蒸发时需要吸收燃烧过程中释放的热量，会降低燃烧室的温度，减缓燃烧进程。

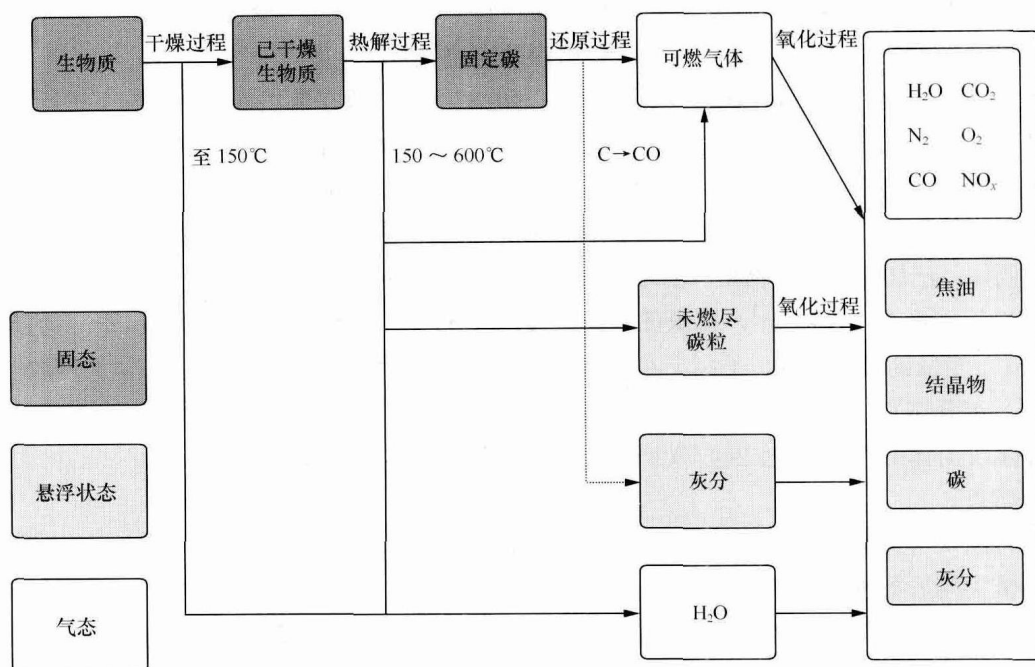


图 1-1 生物质燃料燃烧的主要过程

（2）挥发分析出及木炭形成阶段：这个阶段又称干馏，当已经干燥的燃料持续加热时，挥发分开始析出。试验表明，木屑和咖啡果壳在 160~200℃时挥发分开始析出，约 200℃时析出的速度迅速变快，超过 500℃后重量基本保持不变，表明干馏阶段已经结束。类似的结论由包括稻壳、棕榈壳及淤泥等生物质的热重量分析试验获得，说明生物质的挥发分在较低温度就开始析出。当挥发分析出完毕后，最后剩下的即是木炭。

在以上两个阶段，燃料处于吸热状态，为后面的燃烧做好前期准备工作，称为燃烧前准备阶段。

（3）挥发分燃烧阶段：生物质高温热解析出的挥发分在高温下开始燃烧，为分解燃烧。同时，释放了大量热量，一般可提供占总热量 70%份额的热量。

（4）固定碳燃烧阶段：在挥发分燃烧阶段，消耗了大量的 O_2 ，减少了扩散到炭表面的氧含量，抑制了固定碳的燃烧；但是，挥发分的燃烧在炭粒周围形成火焰，提供碳燃烧所需的热量，随着挥发分的燃尽，固定碳开始发生氧化反应，且逐渐燃尽，形成灰分。生物质固定碳含量较低，在燃烧中不起主要作用。

应该指出的是，以上各个阶段虽然是依次串联，但也有一部分是重叠进行的，各个阶段所经历的时间与燃料种类、成分和燃烧方式等因素有关。

从上述燃烧过程可知，要使燃料充分地燃烧，必须具备三个条件：一定的温度、合适的空气量及与燃料良好的混合、足够的反应时间和空间，即燃烧“三要素”。

（1）一定的温度：这是良好燃烧的首要条件。温度的高低对生物质的干燥、挥发分析出和

点火燃烧有着直接影响。温度高，干燥和挥发分析出顺利，达到点火燃烧的时间也较短，点火容易。例如，农作物秸秆的燃点约为 250℃，当温度升高至 400℃时，秸秆进入了良好的燃烧状态。

(2) 合适的空气量及与燃料良好的混合：当一定数量的生物质完全燃烧时，需要一定的空气量（理论空气量）；考虑到混合不完全等因素，实际供给空气量（实际空气量）一般都大于理论空气量，实际空气量与理论空气量的比值称为过量空气系数。在合适空气量的情况下，影响燃烧的主要因素取决于空气与燃料的良好混合，它一般由空气流速所决定。气流扩散大时，空气与燃料混合得好，燃烧的速度快。但是，如果过量空气系数过大，进入燃烧室的冷空气多，就会降低燃烧室温度，影响燃烧进程，而且排烟量增多，导致排烟损失增加。

各种元素完全燃烧时，所需的理论空气量与烟气量见表 1-7。

表 1-7 1kg 元素完全燃烧所需的理论空气量与烟气量

1kg 可燃元素	氧气量 (m ³)	理论空气量 (m ³)	理论烟气量 (m ³)
C	1.87	8.89	1.87
H	5.55	26.43	11.1
S	0.70	3.33	0.70

(3) 足够的反应时间和空间：燃烧反应一般都发生在一定的时间和空间内。如果燃烧空间较小，燃料的滞留时间就较短，燃料还没有充分燃烧时，就有可能进入低温区，从而使气体和固体不完全燃烧热损失增加。因此，为了保证充分的燃烧时间，就需要有足够的燃烧空间。此外，还存在燃烧空间是否充分利用的问题。如果燃烧空间有死角，即使空间再大，燃烧时间仍有可能不够，需要适当地设置挡墙或炉拱，改变气流方向，使之更好地充满燃烧空间，延长停留时间，并加强气流扰动。

1.2.3 影响秸秆燃烧速度的因素

燃烧过程是一个复杂的物理化学过程，燃烧速度由化学反应和气流扩散所决定。影响化学反应的因素为温度、浓度和压力等。影响气流扩散的因素为空气与燃料的相对速度、气流扩散速度及传热速度等。在以上因素中，起主要作用的是温度和气流扩散速度。

(1) 温度对燃烧速度的影响：温度是通过化学反应速度而起作用的。温度越高，反应速度越快。试验表明，温度每增加 100℃，化学反应速度可增加 1~2 倍，两者之间的关系符合以下规律：

$$K = K_0 e^{\frac{E}{RT}}$$

式中：K——表征化学反应速度的常量；

K_0 ——与反应物有关的系数；

E——化学反应活化能，J/mol；

R——通用气体常数，为 8.314kJ/(kmol·K)；

T——绝对温度，K。

(2) 气流扩散速度对燃烧速度的影响：气流扩散速度由氧氮浓度所决定，遵循如下关系式。

$$M = c_k (C_{gl} - C_{jt})$$

式中: M ——表征气流扩散速度的量;

c_k ——扩散速度常数, 主要取决于气流速度, 与温度基本无关;

C_{gl} , C_{jt} ——气流和木炭表面的氧气浓度。

根据温度和气流扩散速度对燃烧影响程度的不同, 可将燃烧划分为三种不同的区域。

(1) 动力燃烧区: 当燃烧温度较低时, 化学反应速度缓慢, 气流扩散速度不起关键作用, 燃烧速度主要由温度决定。在这一区域中, 提高温度是强化燃烧唯一的方式。

(2) 扩散燃烧区: 当燃烧温度较高时, 化学反应迅速, 扩散到燃烧表面的 O_2 的浓度接近于零, 气流的扩散远远低于燃烧反应的需求。因此, 燃烧速度取决于扩散速度。通过增加气流扩散速度, 可达到强化燃烧的目的。

(3) 过渡燃烧区: 动力燃烧区与扩散燃烧区之间的区域, 燃烧速度既与温度有关, 又与气流扩散速度有关。提高温度和增加气流扩散速度都可以强化燃烧。

1.3 我国秸秆能源化利用的产业政策

近年来, 国家高度重视生物质能的开发和利用, 颁布了《可再生能源法》, 配套发布了《可再生能源产业发展指导目录》、《可再生能源发电有关管理规定》、《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》、《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》、《关于发展生物能源和生物化工财税扶持政策的实施意见》、《秸秆能源化利用补助资金管理暂行办法》等实施细则, 出台了《可再生能源中长期发展规划》、《农业生物质能产业发展规划》、《林业发展“十一五”及中长期规划》, 提出了今后一段时间内我国生物质能发展的主要任务和发展目标。

1. 可再生能源法

《中华人民共和国可再生能源法》于 2005 年 2 月 28 日在第十届全国人民代表大会常务委员会第十四次会议上通过, 自 2006 年 1 月 1 日起施行。2005 年 2 月 28 日, 全国人大常委会批准了《可再生能源法》, 整个法律包括“总则”、“资源调查与发展规划”、“产业指导与技术支持”、“推广与应用”、“价格管理与费用分摊”、“经济激励与监督措施”、“法律责任”和“负责”等八章共三十二款, 明确了可再生能源在国家能源发展中的地位, 将发展可再生能源提高到促进经济和社会可持续发展的战略高度, 同时确立了总量目标制度、强制上网制度、分类电价制度、费用分摊制度和专项资金制度。《可再生能源法》于 2006 年 1 月起生效, 《可再生能源产业发展指导目录》、《可再生能源发电有关管理规定》和《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》等实施细则, 进一步规定了可再生能源发电上网、固定电价和费用分摊等。其中, 明确指出电网企业的责任, 确保可再生能源发电全额上网; 生物质发电项目上