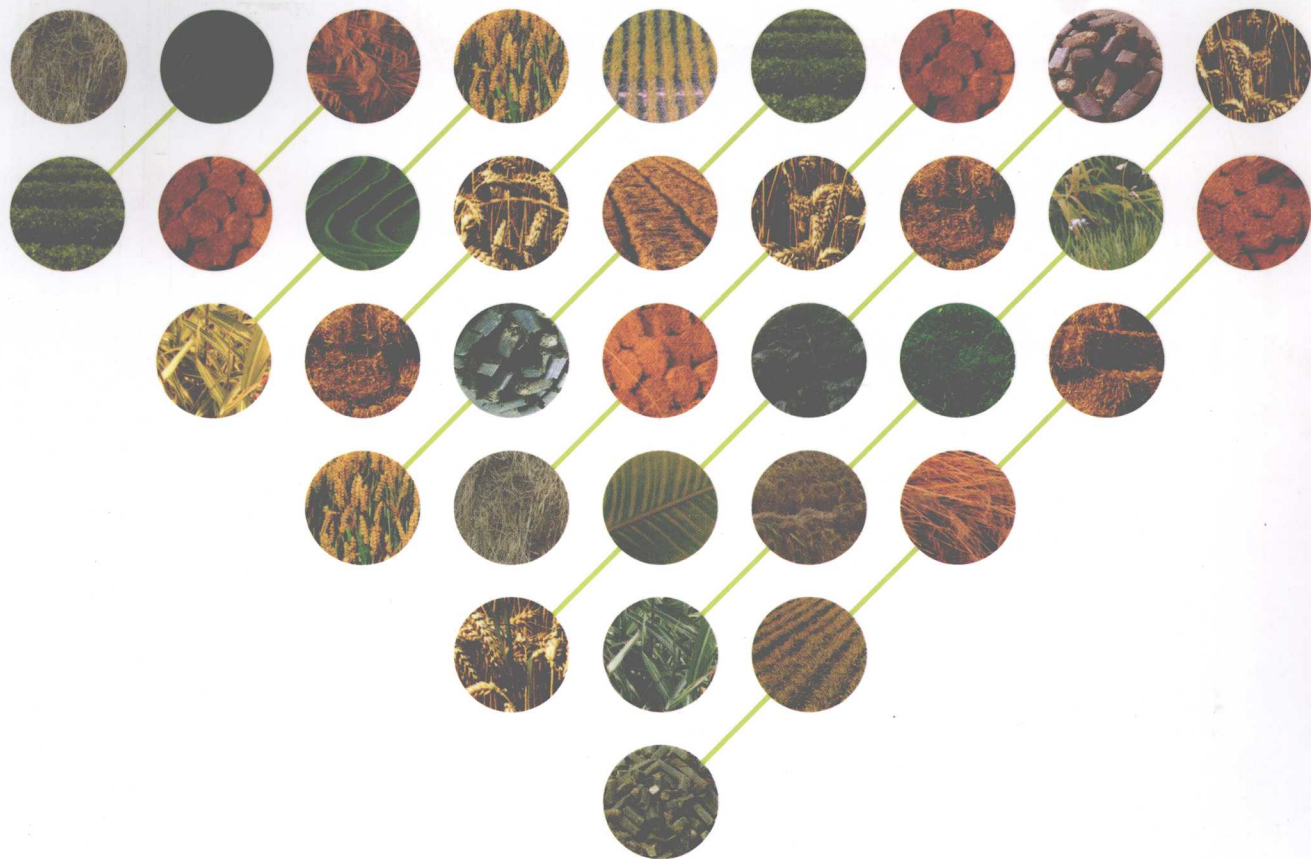


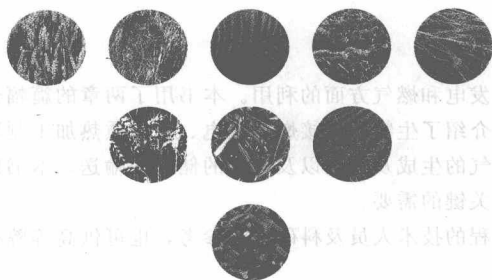


生物质能 利用技术

吴占松 马润田 赵满成 编著



化学工业出版社



生物质能 利用技术

吴占松 马润田 赵满成 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

元 00.80 : 份 宝

本书主要介绍生物质能在发电和燃气方面的利用。本书用了两章的篇幅分别介绍了热工学知识和流态化技术的基础知识,其余章节介绍了生物质直接燃烧发电、生物质热加工制取燃气、生物质厌氧发酵制取沼气的工艺及设备、垃圾填埋气的生成及收集以及燃气的储存和输送。本书所介绍的内容可满足对相关工程技术的了解和掌握工程技术关键的需要。

本书适于从事生物质能工程的技术人员及科研人员参考,也可供高等院校相关专业本科生、研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

生物质能利用技术/吴占松,马润田,赵满成编著.
北京:化学工业出版社,2009.10
ISBN 978-7-122-06652-7

I. 生… II. ①吴…②马…③赵… III. 生物能源-综合利用 IV. TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 161688 号

责任编辑:刘兴春
责任校对:吴 静

文字编辑:刘莉珺
装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:北京市白帆印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 17½ 字数 446 千字 2010 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00 元

版权所有 违者必究

前言



目前,世界能源消费构成是以煤、石油、天然气等不可再生能源为主。不可再生能源的过度开发和利用,不仅带来了能源危机,更带来了日益严重的环境污染问题。燃煤电厂、工业锅炉及民用锅炉向大气中排放大量 SO_2 和 NO_x ,使得中国的酸雨污染问题日趋扩大;燃煤还产生大量的温室气体 CO_2 ;同时,粉尘的大量排放,造成空气质量下降。据估计,我国大气中 90% 的二氧化硫、70% 的烟尘和 85% 以上的二氧化碳,均来自煤炭的燃烧。

中国作为一个迅速崛起的发展中国家,要在保护环境的前提下,实现国民经济的持续增长,必须改变传统的能源生产和消费方式,开发低污染、可再生的新能源。生物质能的利用不仅可节约非再生能源,而且有利于环境的改善,因此,受到越来越多人们的关注,其中也包括各级政府有关部门的重视。与煤相比,生物质含灰少,含 N、S 也少,排放的 SO_2 和 NO_x 远小于化石燃料。因此,生物质能的利用已经成为新能源的一个重要方向。

随着《可再生能源法》和《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》等法律、法规的颁布,生物质能的利用已越来越受到人们的重视,不少地方政府还制定了专门的优惠政策。目前秸秆发电、生活垃圾发电以及农村的中小型生物质制取燃气和沼气工程都呈快速增长趋势。

生物质能的利用是指借助于燃烧生产蒸汽进而产生电能或借助于热化学、生物化学等手段,通过一系列的转换技术,生产出固、液、气等高品位能源来代替化石燃料,为生产、生活提供电力、燃料、热能、燃气等能源产品。国家《可再生能源中长期发展规划》中提出,到 2020 年,生物质发电总装机容量要达到 3000MW,可见生物质能源产业发展的潜力之大。不过,生物质能的利用是一门多学科的技术,它涉及化学、热学、微生物学、环境科学及经济学等;又加之它是一门新兴的生产技术,所以,目前所采用的一些生产技术尚不尽人意,有待于进一步开发。本书主要介绍生物质能在发电和燃气方面的利用,在介绍现有可用技术的同时提出一些进一步的研究方向,期望能起到一个承上启下的作用,使从事生物质能宏观控制发展的人员以及从事生物质能产业的技术人员可从中得到一些收益,对生物质能的利用和发展有一定的促进。能否实现这一初衷,尚有待于读者的评价。

由于生物质能的利用涉及较多的是热工学知识和流态化技术,所以本书用了两章的篇幅分别介绍了它们的基础知识;其余分章介绍了生物质直接燃烧发电、生物质热加工制取燃气、生物质厌氧发酵制取沼气的工艺及设备、垃圾填埋气的生成及收集以及燃气的储存和输送。各章节虽有各自的独立性,但也有其关联性,比如各章节都或多或少地涉及热工学知识和流态化技术。至于个别章节,如生物质厌氧发酵,还涉及生物化学的知识,有兴趣的读者可参阅有关的专门书籍。本书所介绍的内容可满足读者对相关工程技术的了解和掌握工程技

术关键的需要。

本书适于从事生物质发展和利用的科研人员、从事生物质能工程的技术人员以及高等院校相关专业的本科生和研究生参考阅读。

本书编著过程中，在收集资料、绘图以及校对等方面得到了袁进涛工程师、张有贵工程师、左禹工程师、郭亮工程师、陈长栋和庄家人高级工程师以及博士研究生顾燕萍的大力帮助，在此表示衷心感谢。

本书所涉及的内容广泛，限于作者水平及编写时间，书中不足之处在所难免，望广大读者批评指正。

编著者
2009 年 10 月

目 录



1 生物质资源

1.1 生物质和生物质资源	1	1.2 生物质能的利用	3
1.1.1 生物质	1	参考文献	3
1.1.2 生物质资源	1		

2 生物质能的特点

2.1 生物质原料的特点	4	2.2.2 秸秆热解和气化	9
2.1.1 生物质原料的特点简介	4	2.3 生物质能利用的评价	9
2.1.2 生物质的组成	5	2.3.1 经济评价	10
2.2 生物质能转化的规模	8	2.3.2 社会效益	12
2.2.1 直接燃烧发电	8	参考文献	13

3 流态化基础知识

3.1 流态化现象	14	3.3.3 临界流化速度和带出速度	20
3.1.1 流态化现象	14	3.3.4 膨胀比、起伏比和夹带分离高度	25
3.1.2 流化质量	15	3.3.5 流化床的重要部件	28
3.2 流态化技术的优缺点	16	3.3.6 颗粒流动控制机构	32
3.2.1 流化床技术的优点	16	3.4 高速流态化	33
3.2.2 流态化技术的缺点	17	3.4.1 快速流化床的特点	33
3.3 气-固流化床的重要参数及部件	17	3.4.2 压降、流化速度及循环量	34
3.3.1 颗粒物料的性质	18	参考文献	35
3.3.2 流化床床层的压降	20		

4 热工基础知识

4.1 热力学基础知识	36	4.1.8 火电厂的热力循环	47
4.1.1 热力系统	36	4.2 传热学基础知识	50
4.1.2 工质	37	4.2.1 导热	50
4.1.3 热力过程	37	4.2.2 对流换热	52
4.1.4 功和热量	37	4.2.3 辐射换热	55
4.1.5 比热容	38	4.2.4 传热	58
4.1.6 工质的热力状态	39	参考文献	59
4.1.7 蒸汽	44		

5 生物质燃烧发电厂

5.1 生物质发电厂选址和厂区规划	60	5.3.8 水处理系统	84
5.1.1 厂址选择	60	5.4 生物质锅炉设备	85
5.1.2 厂区规划	61	5.4.1 生物质的燃烧	85
5.2 燃料供应及给料系统	65	5.4.2 锅炉的构成	90
5.2.1 秸秆的供应	65	5.4.3 锅炉的规范、产品型号和分类	92
5.2.2 生活垃圾的供应	65	5.4.4 锅炉的工艺系统	93
5.2.3 锅炉给料系统	66	5.4.5 空气量和烟气量	94
5.3 生物质发电厂热力系统及辅助系统	70	5.4.6 锅炉效率	97
5.3.1 发电厂热力系统	70	5.4.7 锅炉的通用部件	97
5.3.2 回热加热系统	71	5.4.8 生物质锅炉的炉排	100
5.3.3 热供应系统	73	5.4.9 循环流化床垃圾焚烧锅炉	102
5.3.4 给水系统	74	5.5 汽轮机设备	103
5.3.5 供水系统	77	5.5.1 汽轮机设备的形式	103
5.3.6 锅炉通风系统	78	5.5.2 汽轮机的构造	108
5.3.7 烟气净化系统	79	5.5.3 汽轮机组的辅助设备	112
		参考文献	114

6 生物质热化学加工工艺及设备

6.1 生物质的热解和气化过程	116	6.3.1 循环流化床热解系统	139
6.1.1 生物质的热解	116	6.3.2 循环流化床工艺试验	141
6.1.2 生物质气化过程	118	6.3.3 循环流化床装置	143
6.1.3 几个重要指标	119	6.3.4 辅助设备	146
6.2 生物质气化	123	6.3.5 燃气管道阻力	154
6.2.1 固定床工艺	124	6.4 燃气净化系统	155
6.2.2 秸秆气化	124	6.4.1 水洗塔	156
6.2.3 固定床秸秆气化炉	129	6.4.2 氧化铁法脱硫	157
6.2.4 固定床生活垃圾气化	133	6.4.3 电捕焦油器	160
6.2.5 流化床气化炉	133	参考文献	162
6.2.6 生活垃圾流化床气化试验	139		
6.3 循环流化床生物质热解	139		

7 生物厌氧发酵工艺及设备

7.1 厌氧发酵工艺系统	164	7.4.1 原料预处理系统	177
7.1.1 连续进料工艺	165	7.4.2 原料预处理设备	178
7.1.2 不连续进料工艺	166	7.4.3 厌氧消化器的重要参数及附属设备	183
7.2 制气原料	166	7.4.4 厌氧消化器的工艺设计	187
7.2.1 制气原料	166	7.4.5 常用的厌氧消化器	190
7.2.2 原料特性指标	168	7.5 厌氧消化器的罐体结构	201
7.3 沼气发酵原理及影响因素	170	7.5.1 搪瓷钢板拼装制罐技术	201
7.3.1 厌氧消化过程的三个阶段	170	7.5.2 双折边咬口制罐技术	201
7.3.2 沼气发酵中微生物之间的关系	171	7.5.3 混凝土建造技术	203
7.3.3 沼气发酵的影响因素	172	7.5.4 钢板焊接技术	204
7.4 厌氧消化装置	177		

7.5.5 不同罐体经济技术比较	205	7.7.1 沼气池的类型	206
7.6 沼气净化系统	205	7.7.2 沼气池的主要设计参数	206
7.6.1 气水分离器	206	7.7.3 池容积及其结构	207
7.6.2 脱硫器	206	7.7.4 运行和管理	209
7.7 厌氧沼气池	206	参考文献	211

8 生活垃圾填埋气

8.1 填埋气的生成及其组成	212	8.4 填埋气的收集	216
8.1.1 填埋气的生成	212	8.4.1 水平收集方式	216
8.1.2 填埋气的组成	213	8.4.2 竖井收集方式	217
8.2 填埋气产量的估算	213	8.4.3 抽气机(真空源)	218
8.2.1 按质量平衡估算	214	8.4.4 冷凝液收集	218
8.2.2 按 COD 估算	214	8.4.5 填埋气净化	219
8.2.3 按经验估算	214	8.5 填埋气的利用	219
8.3 影响填埋气生成的因素	214	8.5.1 民用	219
8.3.1 垃圾的性质	214	8.5.2 工业用	219
8.3.2 垃圾的含水率	214	8.5.3 内燃机发电	219
8.3.3 垃圾的碳/氮比	215	8.5.4 燃气轮机发电	220
8.3.4 填埋层中的菌群	215	8.5.5 不同利用方式的比较	220
8.3.5 填埋层的环境	215	参考文献	220
8.3.6 加快填埋气产生速率的方法	215		

9 燃气的储存与输送

9.1 燃气的储存	221	9.2.2 管道计算	235
9.1.1 低压储气罐	222	9.2.3 燃气管道的材料和铺设	236
9.1.2 高压储气罐	230	9.2.4 燃气的压送	237
9.1.3 小型干式储气柜	233	9.2.5 常用设备	241
9.2 燃气输配系统	234	参考文献	249
9.2.1 输配系统的分级	234		

附 录

表 1 焊缝系数	250	表 13 燃气中水蒸气含量与温度的 关系	253
表 2 钢板厚度的负偏差值 C_2	250	表 14 D_1 型旋风分离器结构尺寸 及应用实例	254
表 3 钢板力学性能和许用应力	250	表 15 埃索公司 B 型旋风分离器结构 尺寸示例	256
表 4 钢管力学性能和许用应力	250	表 16 SK 系列水环真空泵及压缩机	257
表 5 气罐防腐涂料参考表	251	表 17 空气的热物理性能	257
表 6 常用闸阀规格尺寸	252	表 18 保温、建筑及其他材料的密度 和热导率	258
表 7 蝶阀规格尺寸 (型号 RD/GD71 系列)	252	表 19 城镇燃气管道强度设计系数	258
表 8 阀门类型代号	252	表 20 穿越铁路、公路和人员聚 集场所的管道以及门站、	
表 9 阀门驱动方式代号	253		
表 10 阀门连接方式代号	253		
表 11 闸阀结构形式代号	253		
表 12 密封圈或衬里代号	253		

	储配站、调压站内管道的	
	强度系数	258
表 21	缩写字表	258
表 22	全国部分垃圾焚烧发电厂基本	
	状况	259
表 23	全国部分秸秆发电厂基本	
	状况	260
表 24	焚烧炉大气污染物排放限值	261
表 25	垃圾焚烧炉排放物检测结果	261

附录图 1	20.4t/h (4.1MPa, 415℃)	
	链篦式垃圾焚烧炉	264
附录图 2	75t/h (3.82MPa, 415℃)	
	循环流化床垃圾焚烧锅炉	
	系统剖面图	266
附录图 3	异型水冷旋风分离器	
	示意图	269
附录图 4	回转窑垃圾焚烧工艺系统 ...	269



生物质资源

1.1 生物质和生物质资源

1.1.1 生物质

关于生物质的定义有着各种说法，其一，从广义来说，生物质是地球上存在最广泛的物质，包括动物、植物和微生物，以及这些生命体排泄和代谢的所有有机物质；其二，《美国国家能源安全条例》中则认为，生物质是指可再生物质，包括农产品及农业废料、木材及其废料、动物废料、城镇垃圾及水生植物等；其三，在我国则通常认为生物质是指由“光合作用”而产生的有机物，既有植物类，如树木及其加工的剩余物、农作物及其剩余物（秸秆类物质），也有非植物类，如畜牧场的污物（牲畜粪便及污水）、废水中的有机成分以及垃圾中的有机成分等。所谓“光合作用”是植物利用空气中的二氧化碳和土壤中的水，将吸收的太阳能转换为碳水化合物和氧气的过程。本书中所采用的生物质一词是指第三种说法中的各种物质，但不包括树木（木材）和农作物。

能源可分为“可再生能源”和“不可再生能源”。如原煤、石油等一旦被利用后，不可能在数百年乃至数万年内再生，因而属于“不可再生能源”；而生物质则不然，是属于“可再生能源”，在短期内它是可以再生的。

1.1.2 生物质资源

本书所界定的“生物质”主要来源有三个方面的，即农作物的剩余物、畜牧场粪便污水和城市生活垃圾。

(1) 农作物的剩余物

“农作物的剩余物”包括麦秸、棉花秸、稻草、玉米秸、玉米芯和其他一些谷物的秸秆等。所谓“农作物的剩余物”除了本书所界定的可以作为产生能源的原料外，它还有一些其他的用途，例如，玉米芯可以作为生产木糖醇、糠醛等化工产品的主要原料；玉米秸、麦秸、棉花秆等

各种秸秆经过处理与树脂混合可制作纤维板材；秸秆还可以直接还田作为肥料等。按历年统计的农作物产量与剩余物之比例，根据 2006 年农作物的产量，估算的“剩余物”产量见表 1-1。

表 1-1 2006 年主要农作物的产量和估算的“剩余物”产量（自然风干）

作物种类、名称	作物产量/10 ⁴ t	谷草比	“剩余物”产量/10 ⁴ t	作物种类、名称	作物产量/10 ⁴ t	谷草比	“剩余物”产量/10 ⁴ t
粮食类				油料类			
稻谷	18257.2	1.0	18257.2	花生	1466.6	2.0	2933.2
小麦	10446.7	1.0	10446.7	油菜籽	1264.9	2.0	2529.8
玉米	14548.2	2.0	29096.4	芝麻	66.5	2.0	133.0
豆类	2104.5	1.5	3156.8	小计	2798.0		5596.0
薯类	3406.1	1.0	3406.1	棉花类	674.6	3.0	2022.9
小计	48762.7		64363.2	麻类	89.1	1.0	89.1
总计			52324.4	“剩余物”产量/10 ⁴ t			72071.2

我国粮食、油料和棉花作物的产量从 2001 年至 2006 年基本处于稳定状态并略有提高。“农作物的剩余物”可作为生活能源的约占 50%；作为畜牧饲料的约占 28%；作为废料的约占 15%；其余作为工业用途。

(2) 畜牧场粪便污水

畜牧场粪便污水含有大量的有机物，便于收集，可以用来生产沼气（将在第 7 章介绍）。禽畜排泄物可采取人工或机械清扫收集，其产量可参阅第 7 章表 7-3。2006 年我国禽畜养殖情况见表 1-2。

表 1-2 2006 年我国禽畜养殖情况

大牲畜年底头数/万头					猪/万头		羊年底头数/万头		禽蛋产量/万吨
牛	马	驴	骡	骆驼	出栏	年底	山羊	绵羊	
13944.2	719.5	730.6	345.1	26.9	68050.4	49440.7	19700.5	17196.0	2945.6

我国大牲畜养殖量 2000~2006 年基本处于平稳状态，逐年略有增长。我国禽畜粪便多用于肥料，也有一些大型养殖场建有厌氧发酵装置，可用来生产沼气。产生沼气后，所排放的渣液还可用于肥料。

(3) 城市生活垃圾

城市垃圾所指的是人类日常生活和生产所排放的含有的有机物。目前，我国人均年产垃圾约在 450kg 以上，并以每年约 9% 的速度递增。我国城市垃圾主要由厨余物、废纸、废织物、塑料、陶瓷、瓦片等组成。城市垃圾的成分受消费水平和地区的经济发展影响，有较大的差异。

目前，我国的垃圾以填埋为主，在“减量化、资源化和无害化”和一些优惠政策的支持下，以焚烧生产电能的垃圾焚烧厂也正在迅速发展。垃圾填埋需要占用土地资源，但也可以副产沼气。对于垃圾，不论采用哪种清洁处理方式，处理总是十分必要的，否则会给环境带来极大的危害，这是显而易见的。2003~2005 年我国城镇垃圾的处理情况见表 1-3。

表 1-3 近年我国城镇垃圾的处理情况

项目	2003 年	2004 年	2005 年	项目	2003 年	2004 年	2005 年
垃圾清运量/万吨	14857	15508	15601	焚烧处理			
集中处理厂/个	574	559	479	焚烧厂/个	47	54	66
集中处理量/万吨	7545	8089	8108	处理量/万吨	370	449	780
集中处理率/%	50.78	52.16	51.97	焚烧率/%	2.49	2.89	5.0
填埋处理				堆肥处理			
填埋厂/个	457	444	365	堆肥厂/个	70	61	46
处理量/万吨	6404	6889	6924	处理量/万吨	717	730	345
填埋率/%	43.10	44.42	44.38	堆肥率/%	4.83	4.70	2.21

1.2 生物质能的利用

生物质可利用的方法很多，如可以将其转化为热能（燃烧），转化为气体燃料和化工原料（一氧化碳、氢还可以作为“碳-化工”的原料）、肥料、材料（制作板材等）和饲料等。采取何种方法加以利用，主要是看要达到的目的。本书所要介绍的是以获得能源为目的，所以根据生物质的不同类型，分章节主要介绍燃烧处理技术、热化学处理技术和生物化学处理技术，如表 1-4 所列。在上述的三种处理方法中主要介绍其工艺和设备以及燃气的输送系统和设备。

表 1-4 生物质能源转化利用的途径

项目	燃烧处理技术	热化学处理技术	生物化学处理技术
内容	燃烧:作为锅炉燃料,生产蒸汽,通过蒸汽轮机发电机组发电或热电联产	热解:将生物质热解,生产中热值燃气,作为工业和民用燃料或化工原料 气化:将生物质气化,生产低热值燃气,作为工业民用燃料(无论热解还是气化所产生的燃气均可供内燃发电机组发电)	厌氧发酵:将生物质厌氧发酵,生产中热值燃气,作为民用燃料或供内燃发电机组发电(包括垃圾填埋副产沼气)

参 考 文 献

[1] 陈洪章编著. 生物质科学与工程. 北京: 化学工业出版社, 2008.
[2] 彭献永. 我国城市生活垃圾处理的现状和对策. 工业锅炉, 2006, (3).
[3] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1995.



生物质能的特点

2.1 生物质原料的特点

2.1.1 生物质原料的特点简介

2.1.1.1 具有区域性和分散性

生物质储量分布广阔但极为分散，如农作物的谷草比（粮食和秸秆之比，见表 1-1）约为 1: (1~2)，每亩耕地的谷草也不过是 0.5~1t（粮食产量平均 500kg/亩），但这样的生物质还不能全部作为能源的原料。不仅如此，且种类繁多分布广阔。因此，在收集和作为原料的稳定性都带来一定的困难。对于城市垃圾来说也是如此。农作物的剩余物能量密度较低，运输也有一定困难，同时增加了运输成本。

以农作物的剩余物为燃料的电厂，由于原料来源的季节性和种类的多变性，就需要设置较大的储料场和混料场，以保证电厂运行的稳定性。同时，考虑到秸秆的易燃性，防火措施也应相应加强。

焚烧垃圾的电厂，垃圾在收集之前可进行分类投放，或在电厂进行预处理，这些措施都将增加原料的成本。

2.1.1.2 能量密度低

几种燃料的能量密度比较见表 2-1。由表可见，按同等质量计，如果原煤的热值为 1，渣油约为 1.4、秸秆为 0.5，而垃圾只有 0.09~0.17；若按同等体积计，如果原煤的热值为 1，渣油约为 0.97、秸秆约为 0.04，而垃圾只有 0.016。

由上述数据可见，如果以原煤为标准，秸秆和生活垃圾只能叫做“劣质燃料”。由于生物质的能量密度低，所以，远距离运送是不合理的，根据以秸秆为原料电厂的可行性研究和运行实践证明，通常运送距离不超过 30km 为宜（预制成高密度块除外）。总的原则是，按单位能量计，生物质的价格应低于原煤的价格，否则生物质电厂在经济上难以维持。

表 2-1 不同燃料的能量密度比较

种类	渣油	原煤	秸秆	生活垃圾
热值/(kJ/kg)	40000~42000	29300	14650	2500~5000
/(MJ/m ³)	38600~40500	41000	1460	500~800
密度/(kg/m ³)	约 965	约 1400	约 100	约 200

注：1. 表中只是近似数据，只作相互比较。
2. 秸秆和垃圾为堆密度或稍压实的密度。

2.1.2 生物质的组成

通过生物质的分析可以了解其组成，同时，在设计生物质利用和能量转换的设备时也要用到这些数据。迄今尚无生物质的分析标准，通常借鉴煤炭的分析方法进行，虽然分析结果有些偏差，但在工业设计的应用中也可满足需要。通常分析的方法有两种：元素分析和工业分析。

2.1.2.1 生物质的元素分析

各种不同种类的生物质都是由有机物和无机物两部分组成的。无机物包括水和矿物质，它们在生物质的利用和能量转化中是无用的。有机物是生物质的主要组成部分，生物质的利用和能量转换是由它们的性质来决定的。但是，由于有机物在分析时会发生分解，所以不能直接测定，一般只能对其进行元素分析。所谓元素分析就是测定生物质中的元素组成，即碳、氢、氧、氮、硫等元素质量的百分含量。生物质的元素组成并不能表明生物质中含有哪些化合物，因此也就不能充分确定生物质的性质。一些生物质的元素分析举例见表 2-2。由表 2-2 可以看出畜禽粪便的元素分析结果和秸秆类物质基本接近，但它们却是截然不同的生物质。

表 2-2 一些生物质的元素分析举例 单位：%质量

项目	猪粪	牛粪	羊粪	鸡粪	玉米秸	稻草
C _{daf}	43.03	42.07	37.85	31.54	43.83	42.37
H _{daf}	6.08	5.60	5.69	4.48	5.75	6.92
O _{daf}	47.09	50.58	54.26	59.70	49.00	48.84
N _{daf}	3.08	1.75	2.20	4.28	0.97	0.81
S _{daf}					0.12	0.18
低位发热量/(MJ/kg)	17.12	15.64	13.89	11.02	17.75	17.64
高位发热量/(MJ/kg)	18.80	17.01	15.27	12.15	19.07	18.80

注：下角标 daf 为干燥无灰基。

对于生活垃圾同样是分析其有机成分的元素组成，除此以外，还要分析某些其他元素，如氯和一些重金属元素，以防止在生物质利用和能量转换过程中造成二次污染。某些地区生活垃圾的元素分析见表 2-3。由于各地区的生活垃圾的组成不同，所以其元素分析也有较大的差别。

表 2-3 某些地区生活垃圾的元素分析 单位：%质量，收到基

地区	C	H	O	N	S	A	W	Cl
1	17.5	0.75	0.31	0.34	0.44	32	48	0.66
2	15.59	2.78	11.3	0.44	0.22	17.3	52.26	0.12
3	16.64	3.04	13.06	0.41	0.21	17.28	49.18	0.17

(1) 碳和氢

生物质中的碳和氢元素都是可燃成分，1kg 碳完全燃烧可以释放出 33858kJ 的热量；1kg 氢完全燃烧可以释放出 125400kJ 的热量。

(2) 氮

生物质中的氮元素也是可燃成分，与氧化合可以生成二氧化氮或氧化氮，统称为 NO_x ， NO_x 排入大气，在光的作用下可以产生对人体的有害物质。因此，在燃烧工程中应采取各种措施加以控制。通常认为，操作温度不超过 800°C 时，生成 NO_x 的能力会显著下降，或采取一些设备，如低 NO_x 燃烧器，抑制其生成。

(3) 硫

生物质中的硫元素也是可燃成分，与氧化合可以生成二氧化硫。1kg 硫完全燃烧可以释放出 9033kJ 的热量。二氧化硫排放于大气中可以形成酸雨，酸雨对于生物及各种构筑物均有害，故在燃烧过程中，应抑制其生成或生成后加以脱除。在生物质进行热加工制气过程中，硫元素可以生成硫化氢。硫化氢也是有害物质，也应设置净化系统进行脱除。

生物质作为能源转化时，其元素分析可以作为工艺设计的依据。

2.1.2.2 生物质的工业分析

对生物质进行工业分析，可以大致了解生物质的经济价值和某些基本性质。对于生物质的利用和能量转换，单有元素分析是不够的，如生物质中挥发分的多少，不仅在燃烧时对着火的快慢、火焰的性质有较大的影响；而且在生产燃气时对其产气量的多少也有决定性的影响。另外，生物质水分的高低，不仅影响其利用和能量转换的过程；也间接反应了其经济价值。反映生物质上述特性的分析方法，通常被称为工业分析。

生物质的工业分析也称为实用分析。其分析项目包括：水分 (W)、灰分 (A)、挥发分 (V)、固定碳 (FC) 和热值 (HV)。对上述五项作全部分析的，称为全工业分析，只分析前四项的，称为半工业分析。某些生物质的工业分析见表 2-4。

表 2-4 某些生物质的工业分析

单位：%质量，干燥基

项目	挥发分(V)	固定碳(FC)	灰分(A)	水分(W)	低热值/(MJ/kg)
禽畜粪便	65~72	10~20	15~22	—	11~17
玉米秸秆	78	15	7	—	17.75
稻草	70	18	12	—	17.64

根据工业分析可以初步判断生物质的组成和性质，从而确定其工业用途。工业分析不仅在工业生产上有用，在理论研究上也有重要意义。

(1) 水分

根据水分在生物质中存在的状态，可分为三种形式。

① 外在水分 外在水分也称为物理水分，它是附着在生物质表面及大毛细孔中的水分。将生物质放置于空气中，外在水分会自然蒸发，直至与空气中的相对湿度达到平衡为止。失去外在水分的生物质，称为风干生物质。生物质中外在水分的多少与环境有关，与生物质的品质无关。

② 内在水分 内在水分也称为吸附水分。将风干的生物质在 $102\sim 105^\circ\text{C}$ 下加热，此时所失去的水分称为内在水分。它存在于生物质的内部表面或小毛细管中。内在水分的多少与生物质的品质有关。生物质中的水分越高，在热加工时耗能也越大，导致有效能越低。内在水分高对燃烧和热加工制气都不利。

③ 结晶水 结晶水是生物质中矿物质所含的水分，这部分水分非常少。工业分析所得

到水分不包括结晶水，只包括外在水分和内在水分，两者综合称为生物质的全水分。

(2) 灰分

灰分是指生物质中所有可燃物质完全燃烧后所剩下的固体（实际上还包含有生物质中一些矿物质的化合物）。生物质灰的熔融特性是燃烧和热加工制气化的重要指标。

由于生物质灰分中有一些矿物质的化合物，它们可能对热加工制气过程起到催化作用。灰熔点，对热加工过程的操作温度有决定性的影响，操作温度超过灰熔点，可能造成结渣，导致不能正常运行。一般生物质的灰熔点在 900~1050℃之间，有的还可能更低。

(3) 挥发分和固定碳

在隔绝空气的条件下，将生物质样在 900℃下加热一定时间，将所得到的气体中的水分除去，所剩下的部分即为挥发分。挥发分是生物质中有机物受热解析出的部分气态物质，它以占生物质样品质量的百分比表示。加热后所留下来的固体称为焦炭，焦炭中含有生物质的全部灰分，除去灰分后，所剩下的就是固定碳。水分、灰分、挥发分和固定碳质量的总和即生物质试样的质量。

挥发分的主要组分是碳氢化合物、碳氧化物、氢气和焦油蒸气。挥发分反映了生物质的许多特性，如生物质的热值的高低、焦油产率等。

(4) 热值

生物质的热值也称为生物质的发热量，即单位质量的生物质完全燃烧所产生的热量，它的工程单位是 kJ/kg 或 MJ/kg。生物质发热量的大小，取决于生物质中可燃成分的多少。由于生物质中的各组分不是以混合物的形式存在，它们之间存在着极为复杂的化合关系。因此，生物质的发热量并不等于其各可燃组分发热量的算术总和，所以发热量不能用理论方法准确计算，只能用仪器进行测定，或借助一些经验公式来推算其近似值。生物质的发热量不仅是生物质品质的重要指标，也是热力设备计算的基础。

生物质的发热量有高位发热量（High Heat Value，简称为 HHV）和低位发热量（Low Heat Value，简称为 LHV）之分。高位发热量是指每公斤生物质完全燃烧后所产生的热量，它包括了生物质燃烧时，生物质中水分所生成的水蒸气全部凝结成水所放出的热量，即水蒸气的凝结潜热。实际上，在燃烧设备中，生物质燃烧后的排烟还具有一定的温度，生物质中水分所生成的水蒸气并不能凝结下来，此部分汽化潜热并不能包括在生物质的发热量中，它已被烟气带走。因此，从生物质的低位发热量中扣除了这部分水蒸气的汽化潜热之后，所得到的生物质的发热量称为生物质的低位发热量。表 2-5 给出了一些生物质在自然风干情况下的发热量，表 2-6 给出了一些生物质的低位发热量与其含水量的关系。

表 2-5 一些生物质在自然风干情况下的发热量

生物质	玉米秸	高粱秸	棉花秸	豆秸	麦秸	稻草	稻壳	谷草	杂草	树叶	牛粪
HHV/(MJ/kg)	16.90	16.37	17.37	17.59	16.67	15.24	15.67	16.31	16.26	16.28	12.84
LHV/(MJ/kg)	15.54	15.07	16.00	16.15	15.36	13.97	14.36	15.01	14.94	14.84	11.62

表 2-6 一些生物质的低位发热量与其含水量的关系

含水率/%	5	7	9	11	12	14	16	18	20	22
玉米秸/(MJ/kg)	15.42	15.04	14.66	14.28	14.09	13.71	13.33	12.95	12.57	12.19
高粱秸/(MJ/kg)	15.74	15.36	14.97	14.59	14.39	14.01	13.62	13.24	12.85	12.46
棉花秸/(MJ/kg)	15.95	15.55	15.17	14.77	14.58	14.19	13.80	13.41	13.02	12.64
豆秸/(MJ/kg)	15.84	15.31	14.95	14.57	14.37	13.99	13.61	13.22	12.84	12.45

续表

含水率/%	5	7	9	11	12	14	16	18	20	22
麦秸/(MJ/kg)	15.44	15.06	14.68	14.30	14.15	13.73	13.36	12.97	12.60	12.22
稻草/(MJ/kg)	14.18	13.83	13.48	13.13	12.95	12.60	12.25	11.90	11.55	11.19
谷草/(MJ/kg)	14.79	14.43	14.06	13.69	13.51	13.15	12.78	12.46	12.05	11.69
柳树枝/(MJ/kg)	16.32	15.93	15.52	15.13	14.93	14.54	14.13	13.74	13.34	12.95
杨树枝/(MJ/kg)	4.00	13.61	13.26	12.91	12.74	12.39	12.04	11.69	11.35	11.00
牛粪/(MJ/kg)	15.38	14.96	14.59	14.21	14.02	13.64	13.26	12.89	12.43	12.13
马尾松/(MJ/kg)	18.37	17.93	17.49	17.05	16.83	16.38	15.94	15.49	15.05	14.61

当生物质的发热量没有测定数据时,若有生物质的元素分析资料,收到基的低位发热量可以用下列经验公式计算:

$$Q=[81C+246H-26(O-S)-6W]\times 4.186 \quad (2-1)$$

式中, Q 为收到基的低位发热量, kJ/kg ; C, H, O, S, W 分别为生物质元素分析的碳, 氢, 氧, 硫和水分的质量分数, %。

2.2 生物质能转化的规模

鉴于生物质能量密度低、来源分散的特点,生物质能转化的规模主要受到生物质的产量和收集能力的制约。

农作物剩余物具有分散和能量密度低的特点,从运输的经济性考虑,其收集半径通常不宜超过 30km。在此收集区域内,可用于能量转化的农村剩余物一般每年约 30 万吨。

对于城市生活垃圾焚烧电厂,垃圾的收集,受运输和中转能力的制约,例如,北京的高安屯生活垃圾焚烧厂日处理量为 1600t/d,在目前是规模较大的垃圾焚烧发电厂。同时生活垃圾的运输还要考虑到运输过程中的二次污染问题。

2.2.1 直接燃烧发电

(1) 秸秆直接燃烧发电

秸秆发电厂直接以秸秆作为锅炉燃料,不需要掺混辅助燃料,通常用于生产中温中压参数的蒸汽,通过汽轮机发电机组发电。由于来源的制约,按上述收集的范围考虑,每年可用秸秆约为 30 万吨,按发电效率 30% 估算,大约只能供 30MW 发电机组使用,所以秸秆直接燃烧发电厂的规模都较小。

(2) 垃圾直接燃烧发电

由于垃圾的热值只有 5kJ/kg 左右,热值太低,难于稳定燃烧,所以需加入部分煤炭作为辅助燃料。至于加入煤炭的数量,通常是 80% 的垃圾和 20% (以质量计) 的煤炭混合使用;也有的是加入适量的煤炭,使混合后的热值达到 6.5MJ/kg 以上。按垃圾热值为 5MJ/kg 计算,每吨垃圾可以获得电能为 420kW·h (以发电效率 30% 计)。目前较大的垃圾焚烧发电厂处理的垃圾量为 1600t/d,加入适量的煤炭,使混合燃料的热值达到 6.3kJ/kg 以上,可以配套 30MW 的凝汽式汽轮发电机组,年发电量可达到 2.2 亿千瓦时。垃圾焚烧发电厂的规模是否还可以扩大,应视垃圾收集、中转的费用进行经济技术比较确定。