

生物质废物资源 综合利用技术

陈冠益 马文超 颜蓓蓓 等编著

SHENGWUZHI FEIWU ZIYUAN
ZONGHE LIYONG JISHU



化学工业出版社

生物质废物资源 综合利用技术

陈冠益 马文超 颜蓓蓓 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

元

本书面向生物质废物资源的转化技术及综合利用,着重于各种技术的原理、特点、工艺和应用案例,并结合了作者的最新技术开发成果,突出技术性、实践性、系统性、全面性。主要内容包括生物质废物资源的现状及特点、生物质废物资源的利用技术(煤气化利用技术、燃油化利用技术、发电供热利用技术、燃料化利用技术、肥料化利用技术、建材化利用技术、高值化利用技术)、综合利用中主要的二次污染物控制、技术的发展趋势与应用挑战,旨在为广大读者系统介绍生物质废物资源化综合利用技术的发展现状、技术进展和推广应用等。全书引用文献及时全面,紧跟生物质废物利用技术尤其能源化利用技术前沿,引用了多个最新工程范例,可参考性强。

本书可作为环保、能源、化工、土木等领域科研人员、生产技术人员以及政策管理人员的参考书,也可作为高等学校热能工程、环境工程、环境科学、化学工程、生物化工和资源利用等专业教师、研究生和本科生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

生物质废物资源综合利用技术 / 陈冠益等编著. —北京:
化学工业出版社, 2014. 11
ISBN 978-7-122-21789-9

I. ①生… II. ①陈… III. ①生物资源-能源利用-废物综合利用-研究 IV. ①TK6②X7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 207497 号

责任编辑:刘兴春

责任校对:吴静

文字编辑:孙凤英

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)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张34½ 字数842千字 2015年9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: 198.00 元

版权所有 违者必究

前言

生物质废物资源量大面广，其综合利用已成为缓解资源短缺与减少环境污染物排放的重要途径，也是当前国家实施节能减排的重要抓手。《国民经济与社会发展的第十二个五年规划纲要》中指出将大力发展生物质废弃物资源化利用技术。科技部、国家发展改革委等7部门联合印发《废物资源化科技工程“十二五”专项规划》（简称《专项规划》）中也明确了生物质资源化利用为发展重点。同时《专项规划》中亦明确了“十二五”期间生物质废物资源化利用领域的发展方向和趋势。在工业生物质废物资源化利用技术方面，加快集中式工业生物质废物燃气利用技术开发，发展标准化、系列化和成套化装备，已成为提高工业生物质废物综合利用率、发展生物质能源的重点任务；在城市生活垃圾资源化利用技术方面，加速研究混合垃圾分选技术、生活垃圾湿式和干法厌氧消化技术、沼气提纯和高值利用技术等，研制符合我国实际情况的标准化、系列化、智能化的城市生活垃圾处理与资源化装备及安全控制系统；在污泥处置与资源化利用技术方面，突破污泥低成本干化预处理、多产业协同处理、二次污染控制等技术与设备，强化技术集成，建立完整的污泥处置与资源化技术创新链。

本书面向生物质废物资源的转化技术及综合利用，在介绍各种生物质废物的产生、特点、收集和利用技术的基础上，着重于各种技术的原理、特点、工艺和应用案例，包括国内外相关领域的最新进展，并结合作者的技术开发成果，突出技术性、实践性、系统性、全面性。全书共分四大部分（11章）：第一部分概述了生物质废物资源的现状及特点；第二部分介绍了目前生物质废物资源的利用技术（燃气化利用技术、燃油化利用技术、发电供热利用技术、燃料化利用技术、肥料化利用技术、建材化利用技术、高值化利用技术）；第三部分介绍了综合利用中主要的二次污染物控制；第四部分介绍了技术的发展趋势与应用挑战，旨在为广大读者系统介绍生物质废物资源化综合利用技术的发展现状、技术进展和推广应用等。

全书引用文献及时全面，紧跟生物质废物利用技术尤其资源化利用技术前沿，引用了多个最新工程范例，可读性和参考性强，可作为环保、能源、化工、土木等领域科研人员、生产技术人员以及政策管理人员的参考书，也可作为高等学校热能工程、环境工程、环境科学、化学工程、生物化工和资源利用等专业教师、研究生和本科生的教学用书。

本书主要由陈冠益、马文超、颜蓓蓓等编著，马德刚、吕学斌、黄仁亮、徐莹、王媛、石家福、齐云、李丽萍、刘刚等参与了图书部分内容的编著；全书由最后陈冠益统稿、定稿。

在本书编著过程中，参考了一些国内外相关资料，在此向各位作者表达诚挚谢意。由于本书内容涉及面广，限于编著者水平和编著时间，难免有不足和疏漏之处，敬请读者批评指正。

编著者

2015年1月

目 录

第 1 章 绪论 / 1

1.1 生物质废物资源的现状与特点	1
1.1.1 生物质废物的定义	1
1.1.2 生物质资源量	4
1.1.3 生物质资源的特点	5
1.1.4 国内外生物质废物资源化利用比较	9
1.1.5 存在的问题	10
1.2 利用技术概述分析	11
1.2.1 燃烧	11
1.2.2 热解	13
1.2.3 气化	15
1.2.4 液化	20
1.2.5 成型燃料	21
1.2.6 生物发酵	23
1.3 污染特征分析	25
1.3.1 大气污染	25
1.3.2 地下水污染	26
1.3.3 土壤污染	27
参考文献	30

第 2 章 燃气化利用技术 / 31

2.1 气化制备生物燃气技术	31
2.1.1 生物质气化原理	31
2.1.2 气化炉常见炉型、性能、特点及主要参数	35
2.1.3 生物燃气的净化	44
2.1.4 气化技术的应用	46
2.2 生物沼气制备与利用	48

2.2.1	厌氧消化原理及工艺	48
2.2.2	厌氧消化技术的工程应用	57
2.3	生物合成气制备与利用	61
2.3.1	国内外研究进展	61
2.3.2	生物质气化制取合成气的模拟	65
2.3.3	模拟技术举例分析	70
2.4	生物氢气制备与利用	82
2.4.1	生物制氢机制	84
2.4.2	生物制氢的微生物及其关键酶	93
2.4.3	生物制氢工艺及利用	99
2.4.4	生物制氢存在的问题	109
2.4.5	生物制氢发展方向	111
	参考文献	112

第3章 燃油化利用技术 / 117

3.1	燃料乙醇	117
3.1.1	乙醇的物理性质	118
3.1.2	燃料乙醇原料	119
3.1.3	燃料乙醇工艺	121
3.1.4	燃料乙醇示范工程与应用	134
3.1.5	燃料乙醇产业化进程	140
3.2	木质纤维素水解发酵制备丁醇	146
3.2.1	丁醇的物理、化学性质与用途	146
3.2.2	丁醇制备的基本方法	148
3.2.3	丁醇制备的基本原理	148
3.2.4	丁醇制备的示范工程及应用	153
3.3	生物质燃油制备与利用	156
3.3.1	生物质热解方法	156
3.3.2	生物质快速热裂解液化机制与工艺特点	158
3.3.3	快速热解反应器	159
3.3.4	热解的影响因素	162
3.3.5	生物油组分与特性	164
3.3.6	生物油精制	167
3.3.7	生物油示范工程与应用	174
3.4	生物柴油制备与利用	177
3.4.1	生物柴油的特点	178

3.4.2	生物柴油采用的原料	178
3.4.3	生物柴油的生产方法	179
3.4.4	生物柴油的发展现状	180
3.4.5	生物柴油的产业化现状	182
3.5	生物汽油和航空生物燃油的制备与利用	188
3.5.1	生物汽油	188
3.5.2	生物航油	190
3.5.3	生物燃料在民航应用案例	194
	参考文献	195

第4章 发电供热利用技术 / 201

4.1	发电利用	201
4.1.1	生物质发电技术概况	201
4.1.2	生物质直接燃烧发电技术	202
4.1.3	生物质气化发电	206
4.2	供热利用	217
4.2.1	生物质供热利用简介及特点	217
4.2.2	生物质供热按热源原料分类	218
4.2.3	生物质供热实例	224
4.2.4	生物质供热在农村可行性研究	227
4.3	生物质混合发电利用	231
4.3.1	生物质混合燃烧的概念和优势	231
4.3.2	生物质混合燃烧技术	233
4.3.3	生物质混合燃烧发电工程实例	244
4.3.4	混合燃烧对系统运行和排放的影响	250
4.3.5	生物质和煤混燃的经济性评价	254
	参考文献	254

第5章 燃料化利用技术 / 257

5.1	成型燃料国内外发展历程	259
5.1.1	国际生物质成型燃料的发展历程	259
5.1.2	启示	261
5.1.3	中国生物质燃料的发展历程和问题	262
5.2	生物质成型燃料制备与利用	263
5.2.1	生物质成型燃料的制备技术与工艺	263
5.2.2	生物质成型燃料的成型机制与影响因素	286

5.2.3	生物质成型燃料的利用	293
5.2.4	生物质成型燃料利用过程中存在的问题	293
5.3	垃圾衍生燃料制备与利用	309
5.3.1	我国城市垃圾的基本特征	310
5.3.2	垃圾的处理方法	310
5.3.3	垃圾衍生燃料简介	312
5.3.4	垃圾衍生燃料的特性	313
5.3.5	垃圾衍生燃料的制备技术与工艺	314
5.3.6	垃圾衍生燃料的利用	316
5.3.7	存在的问题	318
5.4	污泥衍生燃料制备与利用	325
5.4.1	污泥的特性及分类	325
5.4.2	污泥衍生燃料的制备、方法与工艺	330
5.4.3	污泥衍生燃料的制备的影响因素	336
5.4.4	污泥衍生燃料的利用	341
参考文献		345

第6章 肥料化利用技术 / 346

6.1	堆肥工艺	347
6.1.1	堆肥工艺	347
6.1.2	堆肥工艺参数条件与控制	348
6.1.3	堆肥腐熟度指标	350
6.2	堆肥设备	356
6.2.1	前处理设备	357
6.2.2	后处理设备	361
6.2.3	其他辅助设备	368
6.3	有机肥料施用及再加工	371
6.3.1	加工、施用有机肥料的重要意义	371
6.3.2	农田有机肥料的施用方法	374
6.3.3	有机肥料的科学施用	375
6.3.4	有机肥料施用的误区	378
6.3.5	有机肥料的再加工	379
参考文献		382

第7章 建材化利用技术 / 383

7.1	路基材料制备与利用	383
------------	------------------	------------

7.1.1	水泥混凝土和沥青混凝土的骨料	384
7.1.2	烧结炉渣利用技术	385
7.1.3	焚烧灰渣的土木工程应用	385
7.1.4	研究进展	385
7.2	砖体材料制备与利用	386
7.2.1	干化污泥及污泥直接制砖	386
7.2.2	污泥焚烧灰-黏土混合砖制备	387
7.2.3	污泥焚烧灰制砖	387
7.2.4	污泥与粉煤灰混合制砖	388
7.2.5	垃圾焚烧灰制砖	389
7.3	墙体材料制备与利用	389
7.3.1	焚烧灰渣制墙体材料	389
7.3.2	污泥制墙体材料	390
7.4	污泥制生态水泥	390
7.5	污泥制轻质陶粒	392
	参考文献	393

第 8 章 高值化利用技术 / 395

8.1	高附加值基础化学品	395
8.1.1	基础化学品的筛选	395
8.1.2	基础化学品的合成与转化	400
8.2	生物塑料合成与应用	412
8.2.1	纤维素基塑料	412
8.2.2	木质素基塑料	418
8.2.3	聚乳酸	421
8.2.4	聚丁二酸丁二醇酯	429
8.2.5	聚羟基脂肪酸酯	433
8.2.6	聚对苯二甲酸丙二醇酯	439
8.2.7	其他生物塑料	443
8.3	生物基碳材料	450
8.3.1	活性炭材料	450
8.3.2	新型碳材料	457
8.4	其他产品	460
8.4.1	生物基涂料	460
8.4.2	生物染料	461
8.4.3	生物基润滑油	462

8.4.4 生物油墨	464
8.4.5 生物基吸附剂	465
参考文献	466

第9章 生物质废物资源综合利用中的污染物控制 / 469

9.1 污染物监测分析	469
9.1.1 固体废物样品的采集和制备	469
9.1.2 危险特性的监测	473
9.1.3 其他监测项目	476
9.2 污染物控制方法与技术	479
9.2.1 沼渣的处理与控制技术	479
9.2.2 液体污染物处理与控制技术	479
9.2.3 气体污染物处理与控制技术	483
9.3 敏感性二次污染物控制	486
9.3.1 二噁英的控制	486
9.3.2 焦油的控制	492
9.3.3 垃圾渗滤液的控制	495
9.3.4 重金属的控制	500
参考文献	502

第10章 管理政策与公众参与 / 504

10.1 管理制度	504
10.1.1 废物管理制度	504
10.1.2 生物质能管理制度	511
10.2 政策法规	514
10.2.1 固体废物政策法规	514
10.2.2 生物质能政策法规	520
10.3 公众参与	528
10.3.1 公众参与的概念与内涵	528
10.3.2 公众参与对生物质废物利用制度建立的价值	528
参考文献	529

第11章 技术发展趋势与应用挑战 / 531

11.1 发展趋势	531
11.1.1 发展背景	531
11.1.2 国内外发展趋势	533

11.2 应用挑战	534
11.2.1 技术研发	534
11.2.2 工程设施	535
11.2.3 政策法规	536
11.3 展望与未来	537
参考文献	538

符号表 / 540

第 1 章

绪 论

1.1 生物质废物资源的现状与特点

1.1.1 生物质废物的定义

生物质是指一切直接或间接利用绿色植物光合作用形成的有机物质。包括除化石燃料外的植物、动物和微生物及其排泄与代谢物等。生物质废物是人类在利用生物质的过程中生产和消费产生的废物，它仍然属于生物质的宏观范畴，但是能量密度、可利用性等都有显著的降低。地球上每年植物通过光合作用固碳量达 $2 \times 10^{11} \text{ t}$ ，含能量达 $3 \times 10^{21} \text{ J}$ ，相当于全世界每年耗电量的 10 倍。生物质遍布世界各地，其蕴藏量极大，仅地球上的植物，每年的生产量就相当于目前人类消耗矿物能的 20 倍，或相当于世界现有人口食物能量的 160 倍。虽然不同国家单位面积生物质的产量差异很大，但地球上每个国家都有某种或某些形式的生物质。在世界能耗中，生物质能是继煤、石油和天然气之后的第四位能源，约占总能耗的 14%，在不发达地区占 60% 以上，全世界约 25 亿人生活所需能源的 90% 以上是生物质能^[1]。

(1) 农业废物定义及分类

按其成分，农业废物主要包括植物纤维性废物和畜禽粪便两大类，是农业生产和再生产链环中资源投入与产出的差额，是资源利用中产出的物质能量流失份额。

具体可分为：

- 1) 农田和果园残留物，如秸秆、残株、杂草、落叶、果实外壳、藤蔓、树枝和其他废物；
- 2) 牲畜和家禽粪便以及栏圈铺垫物等；
- 3) 农产品加工废物；
- 4) 人粪尿以及生活废物。

农作物秸秆是世界上数量最多的一种农业副产物，我国是农业大国，也是秸秆资源量最为丰富的国家之一，秸秆主要集中分布在山东、河南、四川、黑龙江、河北、江苏、吉林、

安徽等省。其中东北地区黑龙江以玉米秸秆和大豆秸秆为主，华南以稻草为主，西南地区以稻秸和玉米秸为主，西北以玉米秸、麦秸和棉花秸为主，西北以玉米秸、麦秸和棉花秸为主。作物秸秆总量华东最高，其次是华中、华北和西南。根据国家统计局、农业部的年度统计资料，对全国及各省的粮食和经济作物的产量进行汇总，并结合谷草比例，得到我国2009年各种秸秆的产量比例如表1-1^[1]所列。

表 1-1 2009 年我国农作物秸秆产量和可获得量估算

项目	稻谷	小麦	玉米	豆类	薯类	糖类	棉花	油料	麻料
作物产量/ $\times 10^8$ t	1.95	1.15	1.64	0.19	0.30	1.2	0.064	0.3	0.0038
秸秆产量/ $\times 10^8$ t	1.22	1.57	3.28	0.29	0.15	0.12	0.19	0.6	0.0075
收集系数/ $\times 10^8$ t	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
可获得量/ $\times 10^8$ t	0.85	1.26	2.62	0.23	0.14	0.11	0.19	0.6	0.0075

(2) 林业废物定义及分类

生物质原料资源的林业废物包括森林采伐剩余物、木材加工剩余物及育林剪枝剩余物，统称林业“三剩物”。我国林业木质纤维素原料来源主要有：年采伐剩余物（含年采伐造材剩余物、年木材加工剩余物）；中幼龄林抚育剩余物；薪炭林采薪；灌木林平茬复壮采薪；经济林抚育剩余物；园林绿化剩余物和废旧家具等。

根据我国“十五”及“十一五”期间年森林采伐限额，木材采伐和加工剩余物资源量为 $(7464\sim 8056)\times 10^4$ t，折算为 $(4255\sim 4592)\times 10^4$ t 标煤。第七次全国森林资源清查于2004年开始，到2008年结束。历时5年，得到全国森林资源如下：全国森林面积 19545.22×10^4 hm²，森林覆盖率20.36%；活立木总蓄积 149.13×10^8 m³，森林蓄积 137.21×10^8 m³；除港、澳、台地区外，全国林地面积 30378.19×10^4 hm²，森林面积 19333.00×10^4 hm²，活立木总蓄积 145.54×10^8 m³，森林蓄积 133.63×10^8 m³；天然林面积 11969.25×10^4 hm²，天然林蓄积 114.02×10^8 m³；人工林保存面积 6168.84×10^4 hm²，人工林蓄积 19.61×10^8 m³。根据不同地区和不同林地类型面积以及取柴系数和产柴率等参数，以全国林地面积、产柴率按750kg/hm²、取柴系数按0.5来计算，可测算出全国薪柴年产出量约为 7250×10^4 t，扣除其中薪炭林的薪柴可采量则为 6525×10^4 t，排在前十位的省区依次为云南、四川、西藏、广西、江西、湖南、广东、内蒙古、福建和黑龙江。处在前四位的西南三省和西藏的薪柴产出量合占全国薪柴总产出量的39%^[1]。

(3) 工业固体废物的定义及分类

工业固体废物是指在生产、经营活动中产生的所有固态、半固态和除废水以外的高浓度液态废物，产品的生产过程就是废物的产生过程。工业固体废物按危害状况可分为一般工业固体废物和危险废物。一般工业固体废物包括粉煤灰、冶炼废渣、炉渣、尾矿、工业水处理污泥、煤矸石及工业粉尘等；危险废物指易燃、易爆，具腐蚀性、传染性、放射性有毒有害物质，除固体废物外，半固态、液态危险废物在环境管理中通常也划入危险废物一类进行管理。工业固体废物以产生的行业划分主要包括：冶金废渣，采矿废渣，燃料废渣，化工废渣，放射性废渣，玻璃、陶瓷废渣，造纸、木材、印刷等工业废渣，建筑废材废渣，电力工业废渣，交通、机械、金属结构等工业废材，纺织服装业废料，制药工业药渣等，食品加工工业废渣，电气、仪器仪表等工业废料。

据 2012 年中国统计年鉴, 2011 年全国工业固体废物产量达到 $32.28 \times 10^8 \text{t}$; 中国工业固体废物综合利用率、储存量和处置量分别为 $19.52 \times 10^8 \text{t}$ 、 $6.04 \times 10^8 \text{t}$ 和 $7.05 \times 10^8 \text{t}$, 呈逐年提高的趋势, 工业固体废物的年储存量维持在 $2 \times 10^8 \text{t}$ 以上, 我国工业固体废物产生量呈 10% 的上升趋势, 随着我国农副产品和食品加工业的发展, 到 2020 年我国工业固体废物产生量预计将达到 $35 \times 10^8 \text{t}^{[1]}$ 。各个主要城市固体废物处理利用情况也有较大区别, 据我国 2012 年中国统计年鉴, 主要城市固体废物处理利用情况见表 1-2。

表 1-2 主要城市固体废物处理利用情况 (2011 年)

城市	一般工业固体废物产生量 / $\times 10^4 \text{t}$	一般工业固体废物综合利用率 / $\times 10^4 \text{t}$	一般工业固体废物处置量 / $\times 10^4 \text{t}$	一般工业固体废物储存量 / $\times 10^4 \text{t}$	一般工业固体废物倾倒丢弃量 / $\times 10^4 \text{t}$	危险废物产生量 / $\times 10^4 \text{t}$	危险废物综合利用率 / $\times 10^4 \text{t}$	危险废物处置量 / $\times 10^4 \text{t}$	危险废物储存量 / $\times 10^4 \text{t}$
北京	1125.59	748.70	348.61	28.34	—	11.92	5.05	6.86	—
天津	1752.22	1748.57	9.15	—	—	10.27	3.09	7.18	—
石家庄	1520.23	1516.66	9.05	123.69	—	24.67	12.45	12.25	—
太原	3153.52	1672.67	1422.58	44.36	1.34	5.23	2.09	3.14	—
呼和浩特	892.14	358.55	480.13	53.46	—	5.17	5.02	0.15	—
沈阳	704.61	660.63	137.48	29.81	—	7.40	5.07	2.33	—
长春	616.89	612.94	3.95	—	—	1.69	0.11	1.58	—
哈尔滨	564.47	518.43	35.67	104.21	—	2.36	1.07	1.30	—
上海	2442.20	358.11	74.89	11.40	0.47	56.36	30.13	26.01	0.34
南京	1759.40	1504.45	115.08	145.73	—	32.18	16.01	15.84	0.59
杭州	763.26	707.58	55.67	0.03	—	11.45	8.68	2.74	0.06
合肥	1065.96	1000.83	8.19	57.94	—	1.66	1.18	0.47	—
福州	693.68	623.02	68.87	5.33	0.27	2.16	0.96	1.10	0.10
南昌	185.25	182.16	2.47	0.00	0.61	1.53	1.09	0.44	—
济南	1126.35	1116.79	5.94	3.61	—	15.39	4.27	13.20	0.02
郑州	1249.30	918.70	302.89	27.80	—	0.89	0.21	0.67	—
武汉	1379.67	1373.83	50.13	5.60	—	5.83	2.38	3.46	—
长沙	177.59	174.82	2.76	0.01	0.02	0.11	0.07	0.01	0.03
广州	659.35	625.51	29.84	4.76	—	30.29	11.83	18.46	—
南宁	348.75	315.80	13.12	22.61	—	0.17	0.14	0.03	—
海口	4.77	4.30	0.47	—	—	0.18	0.06	0.12	—
重庆	3299.18	2584.92	518.28	198.76	24.15	46.50	5.64	43.61	0.51
成都	518.02	511.64	6.12	0.25	—	4.74	1.52	3.18	0.05
贵阳	1140.05	642.49	472.96	26.47	0.04	1.27	1.77	0.30	—
昆明	3669.92	1682.81	1862.81	356.86	14.27	58.45	54.74	3.71	—
拉萨	248.11	7.63	16.00	233.17	0.02	—	—	—	—
西安	277.97	271.30	5.15	1.50	0.02	0.92	0.07	0.86	—
兰州	604.55	561.16	43.40	0.04	—	10.10	5.06	5.04	—
西宁	501.19	492.74	10.58	5.81	—	25.71	18.92	6.09	5.22

续表

城市	一般工业 固体废物产 生量 /×10 ⁴ t	一般工业 固体废物综 合利用 量/×10 ⁴ t	一般工业 固体废物处 置量 /×10 ⁴ t	一般工业 固体废物储 存量 /×10 ⁴ t	一般工业 固体废物倾 倒丢弃 量/×10 ⁴ t	危险废 物产生 量/×10 ⁴ t	危险废 物综合 利用量 /×10 ⁴ t	危险废 物处置 量/×10 ⁴ t	危险废 物储存 量/×10 ⁴ t
银川	624.72	523.49	72.45	28.18	0.61	3.03	2.60	0.42	—
乌鲁木齐	1000.70	809.87	188.44	1.65	0.74	22.39	19.53	2.86	—

(4) 城市生活垃圾及分类

城市生活垃圾是指在日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废物。

生活垃圾一般可分为四大类：可回收垃圾、厨房垃圾、有害垃圾和其他垃圾。

1) 可回收垃圾包括纸类、金属、塑料、玻璃等，通过综合处理回收利用，可以减少污染，节省资源。如每回收 1t 废纸可造好纸 850kg，节省木材 300kg，比等量生产减少污染 74%；每回收 1t 塑料饮料瓶可获得 0.7t 二级原料；每回收 1t 废钢铁可炼好钢 0.9t，比用矿石冶炼节约成本 47%，减少空气污染 75%，减少 97% 的水污染和固体废物。

2) 厨房垃圾包括剩菜剩饭、骨头、菜根菜叶等食品类废物，经生物技术就地处理，每吨可生产 0.3t 有机肥料。

3) 有害垃圾包括废电池、废日光灯管、废水银温度计、过期药品等，这些垃圾需要特殊安全处理。

4) 其他垃圾包括除上述几类垃圾之外的砖瓦陶瓷、渣土、卫生间废纸等难以回收的废物，采取卫生填埋可有效减少对地下水、地表水、土壤及空气的污染。

2011 年，全国生活垃圾清运量为 1.64×10^8 t，无害化处理的城市垃圾量为 13089.6×10^4 t，生活垃圾无害化处理率提高至 79.7%。2008 年中国城市垃圾堆存量达 70×10^8 t。在 2006~2008 年三年期间，全国生活垃圾清运量以 1.3% 呈逐年递增趋势，到 2020 年，全国生活垃圾清运量将达到 1.78×10^8 t。目前我国城市有机垃圾的单位热值大约为 4.18MJ/kg，以 2008 年垃圾清运量计算，总计可折合约 2128×10⁴t 标煤/年；以 10% 利用率计，目前我国城市固体有机垃圾的可利用能源资源量约 213×10⁴t 标煤/年^[1]。

1.1.2 生物质资源量

(1) 农业、林业废物资源量

我国生物质能资源储量巨大，仅农作物秸秆约 7×10^8 t/a，折合标准煤约为 3×10^8 t/a；全国每年可提供 3.3×10^8 t 林木生物质，相当于 2×10^8 t 标准煤。如能将这些生物质资源通过热解气化转化为气体燃料，可以取代大量的化石能源，缓解我国对常规能源的依存度。同时，生物质能利用是自然界的碳循环的一部分，过程中实现 CO₂ 的零排放，属于可再生清洁能源^[2,3]。

(2) 城市生活垃圾和工业生物质废物量

随着城市化进程的推进和经济的迅速发展，我国城市生活垃圾和工业生物质废物数量增长迅速，2012 年生活垃圾量达到 1.97×10^8 t，工业生物质废物能量约折合 0.42×10^8 t 标准

煤。由于城市环境污染治理的压力、市容环境的整洁性和资源的稀缺性需求，生活垃圾和工业生物质废物逐步被提高到资源的角度来进行处理与利用，其高效处理、资源化安全利用已刻不容缓。但由于能量密度低、分布分散，所以难以大规模集中处理，导致大部分发展中国家垃圾、生物质废物利用水平低。

1.1.3 生物质资源的特点

1.1.3.1 理化特性

(1) 生物质的物理特性

生物质的物理特性是十分重要的。生物质的分布、自然形状、尺寸、堆积密度及灰熔点等物理特性影响生物质的收集、运输、存储、预处理和相应的燃烧技术。

① 堆积密度 堆积密度是指包括固体燃料颗粒间空间在内的密度。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 $200\sim 350\text{kg}/\text{m}^3$ 之间；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地低于煤的堆积密度，例如，已切碎的农作物秸秆的堆积密度为 $50\sim 120\text{kg}/\text{m}^3$ ，锯末的堆积密度为 $240\text{kg}/\text{m}^3$ ，木屑的堆积密度为 $320\text{kg}/\text{m}^3$ ，褐煤的堆积密度为 $560\sim 600\text{kg}/\text{m}^3$ ，烟煤的堆积密度为 $800\sim 900\text{kg}/\text{m}^3$ 。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。灰分开始熔化的温度称为灰熔点。生物质的灰分熔点用角锥法测定。灰粉末制成的角锥置于保持半还原性气氛的电路中进行加热。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熔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 元素通常可以提高灰熔点，K 元素可以降低灰熔点，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，秸秆的变形温度为 $860\sim 900^\circ\text{C}$ ，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，国际上建立了记录生物质相关特性的数据库。例如，由荷兰能源研究所建立的数据库，内容包括生物质及固体废物的相关特性。

(2) 生物质燃料的热值

生物质燃料主要有农作物秸秆、薪柴、野草、畜粪和木炭等，通常它们都含有不同比例的水分。1kg 生物质完全燃烧所放出的热量，称为它的高位热值。水分在燃烧过程中变为蒸汽（燃料中氢燃烧时也生成水蒸气），吸收一部分热量，称为汽化潜热。高位热值减去汽化潜热值得到的热量，即为 1kg 生物质的低位热值。国内在燃用生物质过程中，生物质发热量的计算常常取其低位热值（如果不特别注明）。由于水分在转变成蒸汽时吸收热量，不同的生物质因其含水量的不同导致其低位热值的不同，通常含水量越大，低位热值越小。

表 1-3 给出了一些生物质燃料在不同含水量情况下低位热值的变化情况。

表 1-3 生物质燃料低位热值与含水量之间的关系

含水量/%	棉花秆 (kJ/kg)	豆秸/ (kJ/kg)	麦秸/ (kJ/kg)	稻秸/ (kJ/kg)	谷秸/ (kJ/kg)	柳树枝/ (kJ/kg)	杨树枝/ (kJ/kg)	牛粪/ (kJ/kg)	马尾松/ (kJ/kg)	桦木/ (kJ/kg)	椴木/ (kJ/kg)
5	15945	15836	15439	14184	14795	16322	13996	15380	18372	16970	16652
7	15552	15313	15058	13832	14426	16929	13606	14958	17933	16422	16251
9	15167	14949	14682	13481	14062	15519	13259	14585	17489	16125	15841
11	14774	14568	14301	13129	13694	15129	12912	14209	17050	15715	15439
12	14577	14372	14155	12954	13514	14933	12736	14016	16828	15506	15238
14	14192	13991	13732	12602	13146	14535	12389	13640	16385	15096	14837
16	13803	13606	13355	12251	12782	14134	12042	13263	15937	14686	14426
18	13414	13221	12975	11899	12460	13740	11694	12391	15493	14276	14021
20	13021	12837	12598	11348	12054	13343	11347	12431	15054	13870	13623
22	12636	12452	12222	11194	11690	12945	10996	12134	14611	13460	13213

(3) 生物质的元素分析

生物质固体燃料是由多种可燃质、不可燃无机矿物质及水分混合而成的。其中，可燃质是多种复杂高分子有机化合物的混合物，主要由 C、H、O、N 和 S 等元素组成，其中 C、H 和 O 是生物质的主要成分。

1) 碳 (C) 是生物质中主要的可燃元素。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 C 部分与 H、O 等化合为各种可燃的有机化合物，部分以结晶状态 C 的形式存在。

2) 氢 (H) 是生物质中仅次于 C 的可燃元素，1kg 的 H 完全燃烧时，可以释放出 142256kJ 的热量。生物质中所含的 H 一部分与 C、S 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 H 称为自由氢。另有一部分 H 和 O 化合形成结晶水，这部分 H 称为化合氢，显然它不可能参与氧化反应，释放出热量。

3) 氧 (O) 和氮 (N) 均是不可燃元素，O 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，N 不会发生氧化反应，而是以自由状态排入大气；但是，在一定条件下（如高温状态），部分 N 可与 O 生成 NO_x ，污染大气环境。

4) 硫 (S) 是燃料中一种有害可燃元素，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 S 含量极低，如作为煤等化石能源的替代燃料，可减轻对环境的污染。

5) 灰分指燃料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氧化和分解形成的，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。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，可以减少其中的 Cl 和 K 的含量；且可除去部分灰分，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，可用自然干燥方法去除，与运输和存储条件有关；内在水分是指吸