



全国高等院校新能源专业规划教材

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

生物质能转化原理与技术

Principles and Technology for Biomass Energy Conversion

主 编 陈汉平 杨世关

副主编 杨海平 王忠江 王 谦 林 鹿



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



全国高等院校新能源专业规划教材

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

生物质能转化原理与技术

Principles and Technology for Biomass Energy Conversion

主 编 陈汉平 杨世关

副主编 杨海平 王忠江 王 谦 林 鹿



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是为新能源类专业本科生编写的教材。本教材对生物质能转化过程中的基本原理、工艺流程和应用实践等进行了详细阐述,兼具基础性与通识性,可供新能源科学与工程专业学生学习了解生物质能源利用的概貌。全书共分为6章,主要内容包括绪论、生物质压缩成型、生物质热化学转化、生物质生化转化、生物质化学转化以及生物质其他转化技术。全书集成了现今生物质能转化领域的最新理论、工艺及应用实例,具有较强的综合性和科学性。

本书可以作为高等学校新能源科学与工程、热能工程等专业的主干课教材,也可供能源工程、环境工程、化学工程等领域科研人员、工程技术人员和管理人员等参考。

图书在版编目(CIP)数据

生物质能转化原理与技术 / 陈汉平, 杨世关主编
— 北京: 中国水利水电出版社, 2018.6
全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教
育新能源类“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-6545-6

I. ①生… II. ①陈… ②杨… III. ①生物能源—高
等学校—教材 IV. ①TK6

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第130133号

书 名	全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材 生物质能转化原理与技术 SHENGWUZHINENG ZHUANHUA YUANLI YU JISHU
作 者	主 编 陈汉平 杨世关 副主编 杨海平 王忠江 王 谦 林 鹿
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.25印张 338千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	49.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛书编委会

顾问 褚君浩 (中国科学院上海技术物理研究所)

徐建中 (中国科学院工程热物理研究所)

贺德馨 (中国风能协会)

刘吉臻 (华北电力大学)

杨德仁 (浙江大学)

张百良 (河南农业大学)

主任 杨勇平 (华北电力大学)

副主任 戴松元 (华北电力大学)

陈汉平 (华中科技大学)

黄志高 (福建师范大学)

汪建文 (内蒙古工业大学)

委员 (按姓氏笔画排序)

王 谦 (江苏大学)

王少清 (济南大学)

王景甫 (北京工业大学)

田 德 (华北电力大学)

邢作霞 (沈阳工业大学)

许 昌 (河海大学)

孙后环 (南京工业大学)

李 岩 (东北农业大学)

李 涛 (青海师范大学)

杨 晨 (重庆大学)

杨世关 (华北电力大学)

陈 荐 (长沙理工大学)

林 鹿 (厦门大学)

周建斌 (南京林业大学)

周继承 (中南大学)

钱 斌 (常熟理工学院)

丛 书 前 言

总算不负大家几年来的辛苦付出，终于到了该为这套教材写篇短序的时候了。

这套全国高等院校新能源专业规划教材、全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材建设的缘起，要追溯到2009年我国启动的国家战略性新兴产业发展计划，当时国家提出了要大力发展包括新能源在内的七大战略性新兴产业。经过不到十年的发展，我国新能源产业实现了重大跨越，成为全球新能源产业的领跑者。2017年国务院印发的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，提出要把战略性新兴产业摆在经济社会发展更加突出的位置，强调要大幅提升新能源的应用比例，推动新能源成为支柱产业。

产业的飞速发展导致人才需求量的急剧增加。根据联合国环境规划署2008年发布的《绿色工作：在低碳、可持续发展的世界实现体面劳动》，2006年全球新能源产业提供的工作岗位超过230万个，而根据国际可再生能源署发布的报告，2017年仅我国可再生能源产业提供的就业岗位就达到了388万个。

为配合国家战略，2010年教育部首次在高校设置国家战略性新兴产业相关专业，并批准华北电力大学、华中科技大学和中南大学等11所高校开设“新能源科学与工程”专业，截至2017年，全国开设该专业的高校已超过100所。

上述背景决定了新能源专业的建设无法复制传统的专业建设模式，在专业建设初期，面临着既缺乏参照又缺少支撑的局面。面对这种挑战，2013年华北电力大学力邀多所开设该专业的高校，召开了一次专业建设研讨会，共商如何推进专业建设。以此次会议为契机，40余所高校联合成立了“全国新能源科学与工程专业联盟”（简称联盟），联盟成立后发展迅速，目前已有近百所高校加入。

联盟成立后将教材建设列为头等大事，2015年联盟在华北电力大学召开了首次教材建设研讨会。会议确定了教材建设总的指导思想：全面贯彻党的教育方针和科教兴国战略，广泛吸收新能源科学研究和教学改革的最新成果，认真对标中国工程教育专业认证标准，使人才培养更好地适应国家战略性新兴产业的发展需要。同时，提出了“专业共性课+方向特色课”的新能源专业课程体系建设思路，并由此确定了教材建设两步走的计划：第一步以建设新能源各个专业方向通用的共性课程教材为核心；第二步以建设专业方向特色课程教材为重点。此次会议还确定了第一批拟建设的教材及主编。同时，通过专家投票的方式，选定中国水利水电出版社作为教材建设的合作出版机构。在这次会议的基础上，联盟又于2016年在北京工业大学召开了教材建设推进会，讨论和审定了各部教材的编写大纲，确定了编写任务分工，由此教材正式进入编写阶段。

按照上述指导思想和建设思路，首批组织出版9部教材：面向大一学生编写了《新能源科学与工程专业导论》，以帮助学生建立对专业的整体认知，并激发他们的专业学习兴趣

趣；围绕太阳能、风能和生物质能3大新能源产业，以能量转换为核心，分别编写了《太阳能转换原理与技术》《风能转换原理与技术》《生物质能转化原理与技术》；鉴于储能技术在新能源发展过程中的重要作用，编写了《储能原理与技术》；按照工程专业认证标准对本科毕业生提出的“理解并掌握工程管理原理与经济决策方法”以及“能够理解和评价针对复杂工程问题的工程实践对环境、社会可持续发展的影响”两项要求，分别编写了《新能源技术经济学》《能源与环境》；根据实践能力培养需要，编写了《光伏发电实验实训教程》《智能微电网技术与实验系统》。

首批9部教材的出版，只是这套系列教材建设迈出的第一步。在教育信息化和“新工科”建设背景下，教材建设必须突破单纯依赖纸媒教材的局面，所以，联盟将在这套纸媒教材建设的基础上，充分利用互联网，继续实施数字化教学资源建设，并为此搭建了两个数字教学资源平台：新能源教学资源网（<http://www.creeu.org>）和新能源发电内容服务平台（<http://www.yn931.com>）。

在我国高等教育进入新时代的大背景下，联盟将紧跟国家能源战略需求，坚持立德树人的根本使命，继续探索多学科交叉融合支撑教材建设的途径，力争打造出精品教材，为创造有利于新能源卓越人才成长的环境、更好地培养高素质的新能源专业人才奠定更加坚实的基础。有鉴于此，新能源专业教材建设永远在路上！

丛书编委会

2018年1月

本书前言

在传统化石能源日趋短缺及其利用带来严重环境污染问题的背景下,生物质能作为人类能源利用史上最为悠久的资源越来越受到人们的重视,其作为理想的替代能源,被誉为继煤炭、石油、天然气之后的“第四大”能源;它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用,可转化为常规的固态、液态和气态燃料,取之不尽、用之不竭,是一种低污染、分布广泛、总量丰富、应用广泛的可再生能源,同时也是唯一一种可再生的碳源。

生物质能源可以以固体成型燃料、热解生产气液固燃料、气化制备合成气、气化发电、发酵制备燃料乙醇和沼气等形式存在,应用于国民经济的各个领域。国际自然基金会 2011 年 2 月发布的《能源报告》认为,到 2050 年,将有 60% 的工业燃料和工业供热将来源于生物质能源。目前,对生物质能的利用手段主要包括燃烧、热解、气化、发酵等方式,并根据生物质种类的不同,对于其利用手段也不尽相同,所涉及的学科背景也不同,囊括了燃烧学、热化学、工程热物理、生物化学、物理化学等众多学科,呈现了多学科交叉特点。因此,笔者在考虑到其应用广泛和多学科交叉等特点的同时,兼顾新能源专业本科学专业各发展方向,编写了这本以通识性、基础性为特色的专业必修课教材——《生物质能转化原理与技术》。

本教材是全国新能源科学与工程专业的统编规划教材,其编写、出版向整个学科的各专业方向学生系统介绍了生物质能源利用的整体概况。本教材在对生物质能源利用方式的相关理论与目前生物质能产业化方面的发展方向概述性地阐述的基础上,还重点介绍了生物质成型燃料、热化学转化、生化转化及化学转化等方式的主要原理、技术、工艺及装备;并结合工程案例介绍其主要应用,使学生对实际应用中对各种转化方式有更加直观的感受。此外,本教材还对一些新兴的利用概念原理及技术,如生物质热解多联产的新概念及新兴技术、微生物燃料电池等进行了简要的介绍;并重点对生物质能利用的工程项目、存在问题以及发展趋势进行了介绍与探讨。本教材共分 6 章,分别为绪论、生物质压缩成型、生物质热化学转化、生物质生化转化、生物质化学转化及生物质其他转化技术。

本教材由华中科技大学陈汉平统筹规划,并由陈汉平和华北电力大学杨世关任主编,华中科技大学杨海平、东北农业大学王忠江、江苏大学王谦和厦门大学林鹿任副主编。本教材的编者也全部是来自于国内高校从事生物质能的一线科研教学人员,有着多年的理论知识和丰富的实践经验。本书第 1 章绪论由华中科技大学杨海平、陈汉平撰写;第 2 章生物质压缩成型由华北电力大学杨世关、李继红和华中科技大学杨晴撰写;第 3 章生物质热化学转化由华中科技大学陈汉平、杨海平、王贤华、邵敬爱、陈应泉和华北电力大学陆强撰写;第 4 章生物质生化转化由东北农业大学王忠江、华中科技大学邵敬爱、华北电力大学赵莉撰写;第 5 章生物质化学转化由江苏大学王谦、王爽,华中科技大学王贤华,厦门大学刘健撰写;

第6章生物质其他转化技术由厦门大学林鹿、曾宪海，华中科技大学张世红和张雄撰写。全书由陈汉平、邵敬爱统稿，华中科技大学能源与动力工程学院研究生符世龙、夏明巍、车庆丰、成伟、王金泽、周晓鸣等协助文字、图表处理等工作。

笔者努力使本书能够作为生物质能利用的入门书籍，为相关专业学生及关心生物质能转化发展的人们提供一个粗略的图景来初窥生物质能利用现状的门径，但本领域的发展如火如荼，对整个领域发展进行勾画非一本书所能完成，书中难免存在疏漏或不当之处，敬请读者批评指正，以便在后续版本中继续加以改进和完善。

作者

2018年3月

目 录

丛书前言

本书前言

第1章 绪论	1
1.1 生物质能源与资源	1
1.2 生物质的组成与特性	4
1.3 生物质能转化利用技术	8
1.4 发展生物质能的重要性	10
1.5 生物质能源发展现状与趋势	12
思考题	16
参考文献	16
第2章 生物质压缩成型	17
2.1 生物质压缩成型机理	17
2.2 生物质成型工艺与设备	20
2.3 生物质成型燃料燃烧特性及设备	30
2.4 生物质成型燃料应用	33
2.5 生物质成型燃料发展前景	35
思考题	36
参考文献	36
第3章 生物质热化学转化	38
3.1 生物质热化学转化途径	38
3.2 生物质燃烧技术与设备	39
3.3 生物质燃烧技术的应用	51
3.4 生物质气化技术与装置	56
3.5 生物质气化工程实例及先进技术	64
3.6 生物质热解技术与装置	79
3.7 热解技术的应用	87
3.8 生物质热解多联产技术与应用	92
思考题	98
参考文献	98

第 4 章 生物质生化转化 100

4.1 生物质生化转化原理 100

4.2 生物质厌氧发酵工艺技术及设备 114

4.3 生物质厌氧发酵工程案例及模式 126

4.4 生物质水解发酵技术及应用 128

思考题 146

参考文献 146

第 5 章 生物质化学转化 148

5.1 概述 148

5.2 生物柴油制备原理与技术 155

5.3 生物质水热转化原理与技术 161

5.4 生物质催化转化 170

5.5 生物质间接液化技术 178

思考题 188

参考文献 188

第 6 章 生物质其他转化技术 190

6.1 生物炼制 190

6.2 生物质制氢 198

6.3 微生物燃料电池 202

6.4 绿色化学 206

思考题 214

参考文献 214

第1章 绪论

1.1 生物质能源与资源

能源亦称能量资源或能源资源，是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。纵观人类社会发展的历史，人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替。能源的开发和有效利用程度以及人均能源消费量，是生产技术、生活水平和社会发展的重要标志之一。

凡是自然界存在的，通过科学技术手段能够转换成各种形式能量（热能、电能、光能、化学能和机械能等）或可做功的资源都被统称为能源。其中凡自然界原来就存在，没有经过加工或转换的能源统称为一次能源，如煤、石油、天然气、煤层气、水能、太阳能、风能、生物质能、核能、地热能等；由一次能源经过加工或转换而得到的能源称为二次能源，如电力、焦炭、煤气、汽油、柴油、热力等。

能源根据其使用的普及情况分为常规能源和新能源两类。常规能源是指在现有的科学技术的水平下已被广泛使用的能源，如煤炭、石油、天然气、水能等。那些虽然早已被利用或已引起人们重视，但尚未广泛利用或利用技术尚待完善或正在研究中的能源，都称为新能源。随着科学技术的发展，新能源的技术日益完善而被逐渐广泛采用，新能源也就成为常规能源。在我国现阶段，太阳能、风能、地热能、生物质能、海洋能等都被列为新能源。

目前我国已经成为世界上第一大能源生产国和能源消费国。表 1.1 列出了 2015 年中国和世界主要能源的储量和储采比（按当年的生产水平尚可开采的剩余能源储量的年数）的对比。从中可以看出，随着国民经济的快速增长，我国正面临着日益严峻的能源危机。

表 1.1 2015 年中国与世界主要能源情况的对比

项 目	石油	天然气	煤炭 ^a
世界总可采储量	2394 亿 t	186.9 万亿 m ³	8915.31 亿 t
中国可采储量	25 亿 t	3.8 万亿 m ³	1145 亿 t
中国所占比例/%	1.1	2.1	12.8
世界储采比	50.7	52.8	114
中国储采比	11.7	27.8	31
中国产量名次	4	6	1

我国目前仍处于工业化、城镇化加速发展阶段,能源需求会继续增长,能源供应保障任务更加艰巨。我国能源形势严峻,仍然面临着能源资源结构单一,能源效率低,农村能源严重短缺,能源过度依赖进口,人均能源不足以及能源分布不均等问题,图 1.1 所示为 2015 年世界与中国一次能源消费比例。从图 1.1 中可知,目前人类的能源消费主要以煤、石油、天然气等化石能源为主。由于大量使用化石能源、砍伐森林以及化学排放等,人类正面临着严峻的生态与环境危机。如何在开发和利用能源的同时保护好我们赖以生存的地球环境与生态,已经成为全球性的重大课题,而大力开发和利用风能、太阳能、生物质能等新能源才是人类走出困境的唯一出路。与太阳能、风能、水能和潮汐能相比,生物质是唯一以物质形式存在的能源,也是唯一可存储和运输的可再生能源。生物质的组成与常规的化石燃料相似,它的利用方式也与利用化石燃料的常规能源类似。但生物质种类繁多,具有不同特点和属性,利用技术远比化石燃料复杂多样。

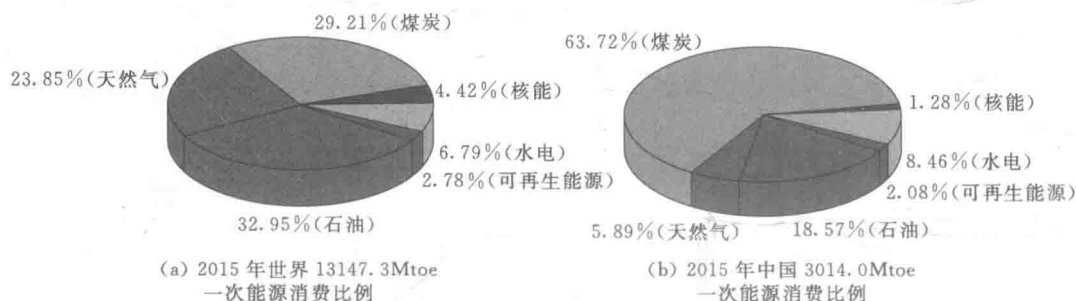


图 1.1 世界与中国一次能源消费比例

1.1.1 生物质的定义和形成

生物质是指来源于植物或动物的一切有机物质。《联合国气候变化框架公约》所定义的生物质的概念为:“来源于植物、动物和微生物的非化石物质且可生物降解的有机物质”。它也包括农林业和相关工业产生的产品、副产品、残渣和废弃物,以及工业和城市垃圾中非化石物质和可生物降解的有机组分。

生物质是一种可持续、可再生的能源,它可通过 CO_2 、空气、 H_2O 、土壤、阳光、植物及动物的相互作用源源不断的形成。有机体死后,微生物将生物质分解成基本组成部分,如 H_2O 、 CO_2 和潜在能源。生物质在微生物降解和燃烧过程中释放的 CO_2 ,全部来自于生物质近期生长过程中吸收大气中的 CO_2 ,即生物质燃烧过程中产生的 CO_2 不会增加地球上 CO_2 总量。因此,生物质通常被称为温室气体零排放的可再生能源。

植物类生物质是通过叶绿素将太阳能转化为化学能而储存在生物质内部而形成的能源,同时吸收大气中的 CO_2 和土壤中的水分,而储存在植物中的化学能通过食物转移到动物和人类体内,动物和人类的排泄物也会促进植物生长。

1.1.2 生物质的分类

对于生物质如何进行分类,有不同的标准。例如,依据是否能大规模代替常规化石能



源,而将其分为传统生物质能和现代生物质能。广义地讲,传统生物质能指在发展中国家小规模应用的生物质能,主要包括农村生活用能(薪柴、秸秆、稻草)及其他农业生产的废弃物和畜禽粪便等;现代生物质能是指可以大规模应用的生物质能,包括现代林业生产的废弃物、甘蔗渣和城市固体废弃物等。

以下将依据来源的不同,将适合于能源利用的生物质分为林业资源、农业资源、生活污水和工业有机废水、城市固体废物及畜禽粪便等五大类,我国的生物质资源量分布情况见表 1.2。

表 1.2 我国的生物质资源量分布情况

指 标	资源量 /亿 t	可获得量 /亿 t	能源可利用量	
			/亿 t	/亿 t 标准煤
林业资源	1.25	1.25	1.25	0.63
农业资源	6.81	5.46	1.38	0.69
有机废水/亿 m ³ 沼气	500	500	500	0.39
城市固体废物	1.5	1.5	0.15	0.02
畜禽粪便	2.39	2.39	2.39	1.07
合计				2.8

1. 林业资源

林业生物质资源是指森林生长和林业生产过程提供的生物质能源,包括薪炭林、大森林抚育和间伐作业中的零散木材、残留的树枝、树叶和木屑等;木材采运和加工过程中的枝丫、锯末、木屑、梢头、板皮和截头等;林业副产品的废弃物,如果壳和果核等。

2. 农业资源

农业生物质能源是指农业作物(包括能源植物);农业生产过程中的废弃物,如农作物收获时残留在农田内的农作物秸秆(玉米秸、高粱秸、麦秸、稻草、豆秸和棉秆等);农业加工业的废弃物,如农业生产过程中剩余的稻壳等。能源植物泛指各种用以提供能源的植物,通常包括草本能源作物、油料作物、抽取碳氢化合物植物和水生植物等几类。

3. 生活污水和工业有机废水

生活污水主要由城镇居民生活、商业和服务业的和各种排水组成,如冷却水、洗浴排水、洗衣排水、厨房排水、粪便污水等。工业有机废水主要是酒精、酿酒、食品、制药、造纸及屠宰等行业生产过程中排出的废水等,其中都富含有机物。

4. 城市固体废物

城市固体废物主要是由城镇居民生活垃圾,商业、服务业垃圾和少量建筑业垃圾等固体废物构成。其组成成分比较复杂,受当地居民的平均生活水平、能源消费结构、城镇建设、自然条件、传统习惯以及季节变化等因素影响。

5. 畜禽粪便

畜禽粪便是畜禽排泄物的总称,它是其他形态生物质(主要是粮食、农作物秸秆和牧



草等)的转化形式,包括畜禽排出的粪便、尿及其与垫草的混合物。我国主要的畜禽包括鸡、猪和牛等,其资源量与畜牧业生产有关。

1.1.3 生物质的特征

1. 储量巨大

地球上从森林到海洋存在着数量巨大的生物质,陆地地面以上总的生物质量约为1.8Mt,海洋中约40亿t,土壤中存在的生物质量基本上与陆地地面以上的相当。陆地地面以上总的生物质量换算成能量约为33000EJ,是世界能源年消耗量的80倍以上。此外,在光合作用下新的生物质还在不断产生。生物质的年净生产量,陆地地面以上约为1150亿t,其总量换算成能量接近世界能源年消耗量的10倍。其中森林树木的年生长量十分巨大,相当于全世界一次性能源的7~8倍,实际可以利用的量按该数据的10%推算,可以满足能量供给的要求。

2. 环境友好

生物质在使用的过程中,对环境污染小。如生物质的灰分含量低于煤,含氮量通常比煤少,特别是含硫量生物质比煤少得多,一般少于0.2%,减少了 SO_2 的排放。燃用生物质产生的 CO_2 又可被等量生长的植物光合作用所吸收, CO_2 净排放量近似为零,从而减轻了“温室效应”的负面影响。

3. 可再生性

生物质能蕴藏量巨大,而且是唯一可再生、可替代化石能源转化成气态、液态和固态燃料以及其他化工原料或产品的碳资源。只要有阳光照射,绿色植物的光合作用就不会停止,生物质能也就永远不会枯竭。特别是在大力提倡植树、种草、合理采樵、保护自然环境的情况下,植物将会源源不断地供给生物质能资源。

4. 兼容性强

生物质的化学组成与化石能源相似,其利用技术和利用方式与传统的化石燃料具有很好的兼容性,且其可以转化为气、液、固体资源,对化石燃料进行良好的替代。可再生能源中,生物质是唯一可以储存运输的能源,加工转换与连续使用更加方便。在用科学的方法利用生物质的能量后,剩余部分还可以还田,改良土壤,提高土地肥力。

1.2 生物质的组成与特性

1.2.1 化学组成

生物质是多种复杂的高分子有机化合物组成的复合体,其组成成分多种多样,主要有纤维素、半纤维素、木质素以及少量的淀粉、蛋白质、脂质等。其中纤维素、半纤维素和木质素的存在形态如图1.2所示。不同种类的生物质,其成分差异很大。从能源利用的角度来看,利用潜力较大的是由纤维素、半纤维素组成的全纤维素类生物质。上述组成成分由于化学结构的不同,其反应特性也不同,因此根据生物质的组成特性选择相应的能量转



化方式十分重要。典型生物质材料的组成成分见表 1.3。

表 1.3 典型生物质材料的主要组成成分（空干基）

种类	半纤维素	纤维素	木质素	灰分
玉米秸秆	32.5	32.9	4.6	7.0
稻秆	41.1	29.5	5.1	2.5
稻壳	37.2	23.9	12.8	7.6
麦秸	22.4	43.2	9.5	6.4
高粱秸	31.6	42.2	7.6	6.0
甘蔗渣	38.5	38.1	20.2	1.6
毛竹	17.3	35.8	19.6	1.1
烟叶	5.1	39.0	6.5	5.7

1. 纤维素

纤维素是由 D-葡萄糖通过 β -葡萄糖苷键连接而成的多糖。其分子以 $(C_6H_{12}O_5)_n$ 表示， n 为聚合度，为几千至几万，结构式如图 1.3 所示。纤维素完全水解后生成 D-葡萄糖（单体），部分水解则生成纤维二糖、纤维三糖等 $n=4\sim10$ 的多糖。纤维素具有晶体结构，不溶于水，无还原性，水解一般需要浓酸或稀酸在加压下进行。棉花几乎 100% 由纤维素组成；而木材中还含有一定量的半纤维素和木质素，纤维素平均含量为 40%~50%。

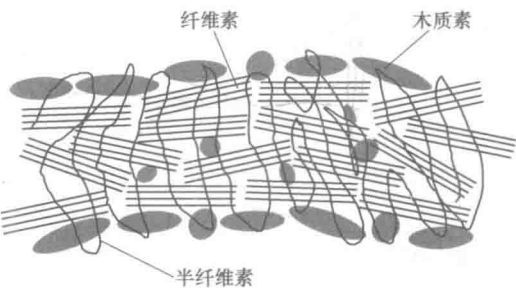


图 1.2 生物质的主要成分结构图

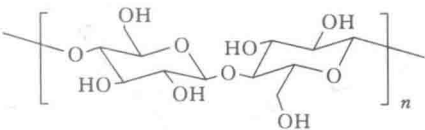


图 1.3 纤维素结构式

2. 半纤维素

纤维素是仅由 D-葡萄糖结构单元组成的多糖，而半纤维素则是由 D-木糖、D-阿拉伯糖（以上均为戊糖，五碳单糖）、D-甘露糖、D-半乳糖、D-葡萄糖（以上均为己糖，六碳单糖）等结构单元构成的多糖。其中戊糖多于己糖，平均分子式可表示为 $(C_5H_8O_4)_n$ 。与纤维素有规律的链状结构不同，半纤维素含有支链结构，聚合度为 50~200，低于纤维素的聚合度，结构式如图 1.4 所示。因此，半纤维素与纤维素相比，易于分解，大多可溶

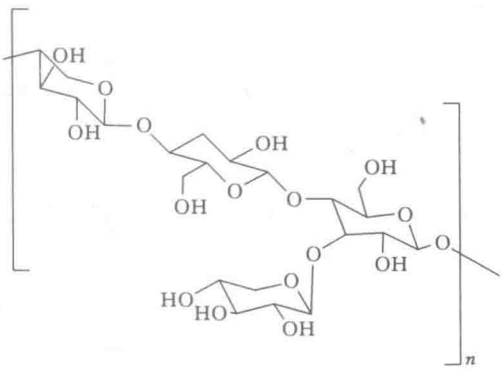


图 1.4 半纤维素结构式

于碱溶液。半纤维素中含量较多的是木聚糖，它是 D-木糖经 1,4-糖苷键缩合形成的产物。半纤维素大量存在于植物的木质化部分，如秸秆、种皮、坚果壳和玉米穗等，其含量依植物种类、部位和老幼程度而有所不同，半纤维素前驱体是核糖苷酸。

3. 木质素

木质素是植物界中仅次于纤维素的最丰富的有机高聚物。广泛分布在具有维管束的羊齿植物以上的高等植物中，是裸子植物和被子植物所特有的化学成分。木质素是一类由苯丙烷单元，通过醚键和碳碳键连接的复杂的无定型高聚物，它和半纤维素一起作为细胞间质填充在细胞壁的微细纤维之间，加固木化组织的细胞壁，也存在于细胞间层，把相邻的细胞黏结在一起。木质素具有立体结构，而且难以被微生物及化学试剂分解，所以具有构成植物骨骼和保护植物的功能，结构式如图 1.5 所示。

4. 淀粉

淀粉与纤维素一样，是由 D-葡萄糖（和一部分麦芽糖）结构单元构成的多糖，纤维素是以 β -葡萄糖苷键结合而成的，而淀粉是以 α -葡萄糖苷键结合而成的。此外，纤维素不溶于水，而淀粉则分为在热水中可溶和不可溶两部分，可溶部分称为直链淀粉，占淀粉的 10%~20%，相对分子量 1 万~6 万；而不溶部分称为支链淀粉，占淀粉的 80%~90%，相对分子量 5 万~10 万，支链淀粉具有分枝状结构。淀粉在种子、块状（根）茎及其他部位以微粒状态存在于玉米、大豆、山芋、米、麦等农产品中，作为食物具有极高的价值。

5. 蛋白质

蛋白质是构成细胞的重要物质，约占细胞总干重的 60%以上，蛋白质是由多种氨基酸组成，相对分子量很大，由五千到百万以上，氨基酸主要由碳（C）、氢（H）、氧（O）三种元素组成，另外还有氮（N）和硫（S）。构成蛋白质的氨基酸有 20 多种，细胞中的储存蛋白质以多种形式存在与细胞壁中成固体状态，生理活性较稳定，可以分为结晶和无定形。粗蛋白含量约相当于该物质中氮元素含量乘以 6.25。

6. 其他有机成分

纤维素、半纤维素、木质素几乎是所有生物质的组成成分。与这些多糖类碳水化合物相比，生物质中含量较少（在不同物种中含量不同）的物质是甘油酯，它是甘油的脂肪酸酯，根据所结合的脂肪酸基团的数目，可分为甘油单脂、甘油二酯和甘油三酯，特别是甘油三酯，作为脂肪（油脂）在生物质中含量较多。

生物质中还含有少量的生物碱、色素、树脂、甾醇、萜烯、类萜、石蜡。他们虽然含量较低，但大多数具有生物学特性，作为化学品和药品的价值较高，这方面的有效利用正

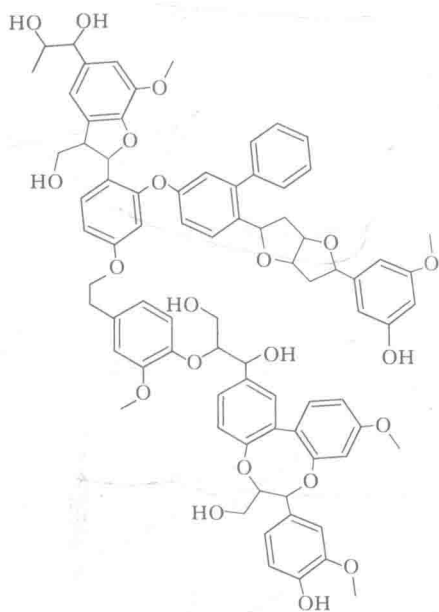


图 1.5 木质素结构式



在开展之中。

7. 无机成分（灰分）

虽然生物质是天然高分子有机物，但也含有微量的无机成分（灰分）。灰分中含有钙（Ca）、钾（K）、磷（P）、镁（Mg）、硅（Si）、铝（Al）、钡（Ba）、铁（Fe）、钛（Ti）、钠（Na）、锰（Mn）、锶（Sr）等金属，而金属含量则与生物质的种类有关。树木和草本植物燃烧后的残余灰分可以作为肥料播撒在土地上，有利于生物质生产的循环。

1.2.2 元素组成

生物质燃料中除含有少量的无机物和一定的水分外，大部分是可以燃烧的有机物。生物质燃料的元素的基本组成是碳（C）、氢（H）、氧（O）、氮（N）、硫（S）、磷（P）、钾（K）等元素。表 1.4 为典型生物质主要元素组成。

表 1.4 典型生物质主要元素组成（单位：% ，空干基）

生物质种类	碳（C）	氢（H）	氮（N）	硫（S）
稻草	38.32	5.06	0.63	0.11
玉米秸秆	42.17	5.45	0.74	0.12
麦秸	42.28	5.31	0.65	0.18
马粪	37.25	5.35	1.40	0.17
牛粪	32.07	5.46	1.41	0.22
杂树叶	41.14	4.68	0.74	0.14
褐煤	66.87	4.11	1.16	0.48
烟煤	83.83	4.33	1.12	2.59
无烟煤	86.20	2.60	0.79	0.29

（1）碳（C）是燃料中的主要元素，其含量多少决定着燃料发热量的大小，含碳量越高发热量越高。碳燃烧后生成 CO_2 或 CO ，并放出大量的热量。1kg 纯碳完全燃烧释放约 33913kJ 的热量。碳的存在形式有两种：①碳与氢、氮等元素组成不稳定的碳氢化合物，为化合碳，燃烧时以挥发物析出燃烧；②固定碳，挥发物析出后在更高的温度下才能燃烧。柴草中固定碳的含量少于煤炭，而挥发物含量多于煤炭，所以容易着火燃烬。

（2）氢（H）常以碳氢化合物的形式存在，燃烧时以挥发气体析出。1kg 氢燃料可放出 142256kJ 的热量。但氢的燃烧产物是水蒸气，汽化潜热要带走一部分热量，实际放热值为 11970kJ。氢含量越高越容易燃烧。

（3）氧（O）助燃但本身不释放出热量，而且会降低燃料的发热量。

（4）氮（N）不能燃烧，一般情况下以自由态排入大气，但在高温状态下可与氧反应生成 NO_x 污染大气环境。

（5）硫（S）是可燃物质，1kg 硫燃烧放热 9210kJ，燃烧产物 SO_2 和 SO_3 与水蒸气反应生成有害物质，腐蚀金属，污染大气，危害人体，影响动植物生长。生物质中硫含量并不大，占 0.1%~0.2%。