

21世纪能源与动力工程类 **创新型** 应用人才培养规划教材



太阳能光伏发电技术及应用

赵明智 张晓明 宋士金◎编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材

太阳能光伏发电技术及应用

赵明智 张晓明 宋士金 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统地讲述了化石能源及新能源相关知识,讨论了太阳能相关计算理论,重点分析了半导体、太阳电池工作的原理及特性,制作太阳能常规电池的工艺方法,太阳电池测试的相关理论,太阳能光伏发电系统的组成及其设计、安装、维护方法,并在最后给出了几个实际的安装实例以加深对光伏系统设计安装的相关知识理解。

本书可作为高等院校相关专业学生的太阳能光伏利用课程教材,也可作为太阳能利用、能源与工程、动力机械、建筑等部门的科研工作人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电技术及应用/赵明智,张晓明,宋士金编著. —北京:北京大学出版社,2014.11
(21世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-25127-0

I. ①太… II. ①赵…②张…③宋… III. ①太阳能发电—高等学校—教材 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第272122号

书 名: 太阳能光伏发电技术及应用

著作责任者: 赵明智 张晓明 宋士金 编著

策划编辑: 童君鑫

责任编辑: 宋亚玲

标准书号: ISBN 978-7-301-25127-0/TK·0009

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电子信箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 三河市博文印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

720毫米×1020毫米 16开本 18.25印张 428千字

2014年11月第1版 2014年11月第1次印刷

定 价: 42.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

进入 21 世纪，随着全球经济增长带来的能源消耗的不断增长，常规化石能源不仅在满足人类经济发展上捉襟见肘，而且使用化石燃料过程中带来的全球变暖、环境污染等生态问题也进一步为人们所认识。因此，能源与环境的可持续发展问题越来越受到世人的关注。在寻求探索的各种可再生能源利用技术中，太阳能光伏发电具有资源丰富、清洁、可持续性等特点，成为可再生能源利用发展的一大着力点，也是一大亮点。

太阳能光伏发电自 20 世纪 90 年代后半段进入快速发展时期，最近 10 年太阳电池的年平均增长率超过 40%，成为发展最迅速的高新产业之一，其应用的规模和领域也在不断扩大。根据 Frost & Sullivan 公司公布的《2013 年度可再生能源展望》显示，2010 年太阳能光伏在全球整个安装的发电量的份额为 0.7%，预计到 2015 年将达 2.4%，到 2020 年将达 3.6%。

为促进太阳能光伏发电的发展，近年来，欧洲、美国、日本等都在大规模推广光伏并网发电的“屋顶计划”。人们也在不断地发现与研究新材料、新工艺，使太阳能电池向着高效、低价方向发展。

我国的光伏产业是在世界光伏市场的快速拉动下发展起来的。2006 年我国太阳能电池产量已占世界产量的 17%，仅次于日本、欧洲，成为太阳能电池的生产大国。2007 年，我国太阳能电池产量达到 1088MW，占世界总产量的 27.2%，成为全球最大的太阳能电池生产国。

为了推动西部大开发，改善西部的生存条件和投资环境，促进西部的发展，我国已在进行西部太阳能发电工程，并制定了一系列措施来推动西部太阳能光伏发电的发展，主要包括西藏阿里地区的专项光伏工程、GEF 项目、“光明工程”项目、西部 7 省无电乡通电工程、“金太阳”示范工程等。

“十二五”规划指出，到 2015 年，太阳能年利用量相当于替代化石燃料 50 万吨标准煤，太阳能发电装机达到 21000MW，其中光伏电站装机 10000MW。

为适应国内外光伏发电产业的蓬勃发展，编写一本较为系统全面的光伏发电方面的书籍变得十分必要。

本书编写分工为：张晓明编写第 2 章和第 3 章，宋士金编写第 4 章，其余章节均由赵明智编写，赵明智负责全书的统稿工作，李惠娟和李亚楠对全书进行了校核工作。本书是编者在长期从事光伏发电方面工作的经验积累及参考大量资料的基础上编写的，由于参考了大量的著作和文献，可能无法全部列出，在此谨向有关作者致谢。

作为一本应用技术类书籍，本书的主要特点为知识性、实用性。所谓知识性，是指本书包含了太阳能光伏技术方面的各种基本知识；实用性是指本书在基本知识



的基础上，更深入地阐述了光伏发电系统设计安装维护的相关知识，与实际有很强的联系性。

由于编者水平有限，书中难免会有疏漏之处，还望读者批评指正。

编者

2014年8月

目 录

第 1 章 能源概述	1	3.1.1 半导体性质	66
1.1 化石能源	2	3.1.2 半导体的 PN 结	72
1.1.1 化石能源储量	2	3.2 太阳能电池工作原理	76
1.1.2 化石能源消耗	6	3.2.1 半导体的内光电效应	76
1.2 可再生能源	6	3.2.2 太阳能电池的能量转换 过程	77
1.2.1 可再生能源分类	6	3.3 太阳能电池的基本特性	78
1.2.2 可再生能源储量	21	3.3.1 短路电流	78
1.3 能源与环境	26	3.3.2 开路电压	79
习题	28	3.3.3 太阳能电池的输出特性	79
第 2 章 太阳能及其资源	29	3.3.4 转换效率	80
2.1 太阳能简介	30	3.3.5 太阳能电池的光谱响应	81
2.1.1 太阳能辐射基本概念	30	3.3.6 太阳能电池的温度效应	81
2.1.2 太阳与地球的关系	36	3.3.7 太阳能电池的辐照效应	81
2.2 太阳能资源计算	38	3.4 影响太阳能电池转换效率的 因素	81
2.2.1 高度角、方位角及 日照时间等参数计算	39	习题	83
2.2.2 月日照百分率计算	41	第 4 章 太阳能光伏电池的常规 工艺	84
2.2.3 日天文总辐射量计算	42	4.1 硅材料的选取与制备	85
2.2.4 地表总辐射量计算	43	4.1.1 硅材料的选取	85
2.3 太阳能资源测试	48	4.1.2 单晶硅与多晶硅的制备	87
2.3.1 测试仪器	48	4.2 单体太阳能光伏电池的制造	97
2.3.2 数据采集	54	4.2.1 硅片表面处理	97
2.4 太阳能资源评估	55	4.2.2 扩散制结	99
2.4.1 丰富程度	55	4.2.3 去边	104
2.4.2 利用价值	55	4.2.4 去除背结	106
2.4.3 稳定程度	56	4.2.5 制作上下电极	107
2.4.4 最佳利用时段	56	4.2.6 制作减反射膜	111
2.4.5 总体评估	56	4.3 太阳能光伏电池组件及封装	118
习题	63	4.3.1 太阳能光伏电池组件的 常见结构形式	118
第 3 章 太阳能光伏电池的基本原理及 特性	64	4.3.2 太阳能光伏电池组件的 封装材料	119
3.1 半导体物理基础	65		



4.3.3 太阳能光伏电池组件的 制造工艺	126	6.2.3 并网型太阳能光伏发电 系统设计	211
习题	127	6.3 太阳能光伏发电系统安装与 维护	212
第5章 太阳能光伏电池的测试	128	6.3.1 太阳能光伏发电系统的 安装	212
5.1 太阳能光伏电池测试概述	129	6.3.2 太阳能光伏发电系统的 维护	221
5.2 太阳能光伏电池的测试仪器	131	习题	230
5.2.1 常规仪器	131	第7章 太阳能光伏发电系统案例 分析	231
5.2.2 太阳模拟器	132	7.1 离网型太阳能光伏发电系统	232
5.3 单体太阳能光伏电池的测试	134	7.1.1 独立光伏系统的设计 方法	232
5.3.1 测试内容	134	7.1.2 光伏电站系统工程设计案例 ——“内蒙古太阳村”光伏供电 系统试验示范项目	234
5.3.2 测试要求及条件	135	7.1.3 光伏电站系统工程设计案例 ——“西藏那曲地区双湖 光伏电站”	241
5.3.3 测试方法	136	7.1.4 光伏电站系统工程设计案例 ——“西藏卡玛多乡 25kW 光伏电站”	252
5.3.4 非晶硅太阳能光伏电池的 测试	139	7.2 并网型太阳能光伏发电系统	261
5.4 太阳能光伏电池组件测试及 环境试验方法	139	7.2.1 几种并网电力系统	261
习题	141	7.2.2 光伏发电并网装置	264
第6章 太阳能光伏发电系统	142	7.2.3 光伏并网发电案例	268
6.1 太阳能光伏发电系统组成	143	习题	283
6.1.1 光伏组件(阵列)	144	参考文献	284
6.1.2 逆变器	151		
6.1.3 控制器	164		
6.1.4 蓄电池	180		
6.2 太阳能光伏发电系统设计	190		
6.2.1 太阳能光伏发电系统 设计概述	191		
6.2.2 离网型太阳能光伏发电 系统设计	204		

第 1 章

能源概述



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
能源、化石能源	掌握能源的分类； 熟悉目前能源的形式	三种主要的化石能源的分布及 储量
可再生能源	掌握可再生能源的分类及其利用方式； 熟悉可再生能源的分布及储量	可再生能源的分类； 可再生能源的利用方式； 可再生能源的储量
能源与环境问题	掌握能源带来的环境问题	能源与环境的关系



导入案例

近十年中国新能源和可再生能源发展迅速

党的第十六次代表大会以来,我国坚持绿色、低碳的发展理念,大力发展非化石能源,着力调整能源结构,努力实现可持续发展。

(1) 水电装机规模居世界第一。2011年,水电投产装机达到2.3亿kW,10年间新增机组接近我国水电有史以来前95年的总和。三峡电站全部建成,装机总量达到2250万kW,是世界上装机容量最大的水电站。

(2) 风电装机快速增长。目前我国并网装机容量已经超过5500万kW,在较短时间内,成为世界第一风电大国。

(3) 太阳能产业迅速发展。光伏发电装机容量快速达到300万kW,国内光伏市场有序启动,光伏电池组件生产形成了完整的产业链,年产量占世界的60%,太阳能热水器集热面积超过2亿平方米。

截至2011年年底,我国非化石能源占一次能源消费的比重已经达到9%左右,相当于节约标准煤3.2亿t、减排二氧化碳8亿t以上。

(资料来源: <http://newenergy.in-en.com/html/newenergy-13341334621628374.html>.)

1.1 化石能源

能源也称能量资源或能源资源,是指可产生各种能量(如热量、电能、光能和机械能等)或可做功的物质的统称,包括能够直接取得或者通过加工、转换而取得有用能的各种资源,如煤炭、原油、天然气、煤层气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和电力、热力、成品油等二次能源,以及其他新能源和可再生能源。

化石能源是一种碳氢化合物或其衍生物。它由古代生物的化石沉积而来,是一次能源。化石燃料不完全燃烧后,都会散发出有毒的气体,却是人类必不可少的燃料。化石能源所包含的天然资源有煤炭、石油和天然气。

化石能源是目前全球消耗的最主要能源,根据近年来的统计显示,全球消耗的能源中化石能源占比高达87.9%,我国的比例高达93.8%。可再生能源的份额继续有所提高,但目前仅占全球能源消费量的2%。同时,化石燃料消费结构也在发生变化。尽管石油仍是主导性燃料,其所占份额已连续12年出现下降。煤炭再次成为增长最快的化石燃料,这对碳排放会产生可以预料的不利影响。但随着人类的不断开采,化石能源的枯竭是不可避免的,大部分化石能源在21世纪将被开采殆尽。从另一方面看,由于化石能源在使用过程中会新增大量温室气体CO₂,同时可能产生一些有污染的烟气,威胁全球生态。因而,开发更清洁的可再生能源是今后发展的方向。

1.1.1 化石能源储量

1. 煤

煤炭是世界上储量最多、分布最广的常规能源,也是重要的战略资源。它广泛应用于

钢铁、电力、化工等工业生产及居民生活领域。在未来 100 年内，煤炭不可避免地仍将是一种主要能源。积极寻求更有效的、环境可接受的途径，最大限度地提高煤炭的能源效率，减少污染物的排放总量，并大力推广煤炭的综合利用技术，是社会、经济、能源、环境可持续协调发展的必然要求。因此，了解和分析煤炭资源的现状及结构，对于进一步合理配置煤炭资源、提高煤炭资源使用效率、进一步落实科学发展观具有重要的意义。

世界煤炭资源分布很广，但其储量分布极不平衡，且从地区分布看，欧洲和欧亚大陆、亚洲太平洋地区、北美洲的煤炭储量较为集中，非洲、中南美洲、中东的储量很少。世界煤炭资源的地理分布，以两条巨大的聚煤带最为突出，一条横亘欧亚大陆，西起英国，向东经德国、波兰、俄罗斯，直到我国的华北地区；另一条呈东西向绵延于北美洲的中部，包括美国和加拿大的煤田。南半球的煤炭资源也主要分布在温带地区，比较丰富的有澳大利亚、南非和博茨瓦纳。

世界煤炭资源地理分布的特点，直接影响世界煤炭生产的地理分布。一般，煤炭资源比较丰富而经济又比较发达的地区，也是煤炭产量较高的地区。从各大洲来看，欧洲、亚洲和北美洲三洲的煤炭产量占世界煤炭总量的 90% 以上，其中仅欧洲就几乎占了一半。

从煤炭资源储量看，全世界的煤炭资源主要分布在北半球北纬 $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ，约占世界煤炭资源总量的 70%。2011 年年底，世界煤炭探明可采储量为 8609.38 亿 t，其中无烟煤和烟煤的可采储量为 4047.62 亿 t，占总储量的 47.01%；褐煤和次烟煤的可采储量为 4561.76 亿 t，占总储量的 52.99%。

2. 石油

石油是非常重要的能源资源和化工原料。石油作为战略物资，其在国民经济、社会生活、国家安全乃至国际关系力一面，都具有不可替代的作用。可以推测，至少在未来相当长一段时间内，石油被完全取代的可能性不大。即使其他可替代能源的开发技术与应用发展较快，但是石油的地位在未来许多年内仍然难以动摇且具有不可替代性。

据 BP 2011 年最新统计资料(表 1-1)，2011 年年底，全球已探明的石油储量为 2343 亿 t。其中，大部分集中在中东地区，探明的储量为 1080 亿 t，占总含量的 48.1%；而其他地区的石油储量占总储量的 51.9%，主要分布在北美洲地区(储量为 335 亿 t，占世界总储量的 13.2%)、中南美洲地区(储量为 505 亿 t，占世界总储量的 19.7%)、欧亚地区(储量为 190 亿 t，占世界总储量的 8.5%)、非洲地区(储量为 176 亿 t，占世界总储量的 8%)、亚太地区(储量为 55 亿 t，占世界总储量的 2.5%)。

表 1-1 已探明世界石油储量分布

	1992 年底 储量/ 10 亿桶	2002 年底 储量/ 10 亿桶	2011 年底 储量/ 10 亿桶	2012 年底			
				储量/ 10 亿 t	储量/ 10 亿桶	占总量 比例/(%)	储产比
美国	31.2	30.7	35.0	4.2	35.0	2.1	10.7
加拿大	39.6	180.4	174.6	28.0	173.9	10.4	*
墨西哥	51.2	17.2	11.4	1.6	11.4	1.6	10.7
北美洲总计	122.1	228.3	2121.0	33.8	220.2	13.2	38.7
阿根廷	2.0	2.8	2.5	0.3	2.5	0.1	10.2
巴西	5.0	9.8	15.0	2.2	15.3	0.9	19.5
哥伦比亚	3.2	1.6	2.0	0.3	2.2	0.1	6.4



(续)

	1992 年底 储量/ 10 亿桶	2002 年底 储量/ 10 亿桶	2011 年底 储量/ 10 亿桶	2012 年底			
				储量/ 10 亿 t	储量/ 10 亿桶	占总量 比例/(%)	储产比
厄瓜多尔	3.2	5.1	7.2	1.2	8.2	0.5	44.6
秘鲁	0.8	1.0	1.2	0.2	1.2	0.1	31.5
特立尼达和多巴哥	0.5	1.1	0.8	0.1	0.8	◆	18.8
委内瑞拉	63.3	77.3	297.6	46.5	297.6	17.8	*
其他中南美洲国家	0.6	1.6	0.5	0.1	0.5	◆	9.7
中南美洲总计	78.8	100.3	326.9	50.9	328.4	19.7	*
阿塞拜疆	n/a	7.0	7.0	1.0	7.0	0.4	21.9
丹麦	0.7	1.3	0.8	0.1	0.7	◆	9.7
意大利	0.6	0.8	1.4	0.2	1.4	0.1	33.7
哈萨克斯坦	n/a	5.4	30.0	3.9	30.0	1.8	47.4
挪威	937	10.4	6.9	0.9	7.5	0.4	10.7
罗马尼亚	1.2	0.5	0.6	0.1	0.6	◆	19.1
俄罗斯	n/a	76.1	87.1	11.9	87.2	5.2	22.4
土库曼斯坦	n/a	0.5	0.6	0.1	0.6	◆	7.4
英国	4.6	4.5	3.1	0.4	3.1	0.2	8.8
其他欧洲及欧亚大陆国家	61.3	2.8	2.8	0.4	2.7	0.1	14.8
欧洲及欧亚大陆总计	78.3	109.3	140.3	19.0	140.8	8.4	22.4
伊朗	92.9	130.7	154.6	21.6	157.0	9.4	*
伊拉克	100.0	115.0	143.1	20.2	150.0	9.0	*
科威特	96.5	96.5	101.5	14.0	101.5	6.1	88.7
阿曼	4.7	5.7	5.5	0.7	5.5	0.3	16.3
卡塔尔	3.1	27.6	23.9	2.5	23.9	1.4	33.2
沙特阿拉伯	261.2	262.8	265.4	38.5	265.9	15.9	63.0
叙利亚	3.0	2.3	2.5	0.3	2.5	0.1	41.7
阿联酋	98.1	98.7	97.8	13.0	97.8	5.9	79.1
也门	2.0	2.9	3.0	0.4	3.0	0.2	45.4
其他中东国家	0.1	0.1	0.7	0.1	0.6	◆	8.4
中东国家总计	661.6	741.3	797.9	109.3	807.7	48.4	78.1
阿尔及利亚	9.2	11.3	12.2	1.5	12.2	0.7	20.0
安哥拉	1.3	8.9	10.5	1.7	12.7	0.8	19.4
乍得		0.9	1.5	0.2	1.5	0.1	0.7
刚果共和国	0.7	1.5	1.6	0.2	1.6	0.1	14.8
埃及	3.4	3.5	4.3	0.6	4.3	0.3	16.1
赤道几内亚	0.3	1.1	1.7	0.2	1.7	0.1	16.5
加蓬	0.8	2.4	2.0	0.3	2.0	0.1	22.3
利比亚	22.8	36.0	48.0	6.3	48.0	2.9	86.9
尼日利亚	22.1	34.3	37.3	5.0	37.2	2.2	42.1
其他非洲国家	1.6	1.7	7.6	1.3	9.1	0.5	43.0
非洲总计	61.1	101.6	126.6	17.3	130.3	7.8	37.7

(续)

	1992 年底 储量/ 10 亿桶	2002 年底 储量/ 10 亿桶	2011 年底 储量/ 10 亿桶	2012 年底			
				储量/ 10 亿 t	储量/ 10 亿桶	占总量 比例/(%)	储产比
澳大利亚	3.2	4.6	3.9	0.4	3.9	0.2	23.4
文莱	1.1	1.1	1.1	0.1	1.1	0.1	19.0
中国	15.2	15.5	17.3	2.4	17.3	1.0	11.4
印度	5.9	5.6	5.7	0.8	5.7	0.3	17.5
印度尼西亚	5.6	4.7	3.7	0.5	3.7	0.2	11.1
马来西亚	5.1	4.5	3.7	0.5	3.7	0.2	15.6
泰国	0.2	0.7	0.4	0.1	0.4	◆	2.7
越南	0.3	2.8	4.4	0.6	4.4	0.3	34.5
其他亚太地区国家	0.9	1.1	1.1	0.1	1.1	0.1	10.5
亚太地区总计	37.5	40.6	41.4	5.5	41.5	2.5	13.6
世界总计	1039.3	1321.5	1654.1	235.8	1668.9	100	52.9
其中：经合组织	142.7	251.2	238.5	36.0	238.3	14.3	33.4
非经合组织	896.6	1070.3	1415.6	199.7	1430.7	85.7	58.6
石油输出国组织	772.7	903.3	1199.0	169.6	1211.9	72.6	88.5
非石油输出国组织 [≠]	207.1	327.9	329.4	48.8	331.0	19.8	25.8
欧盟 [#]	8.3	6.9	6.9	0.9	6.8	0.4	12.1
苏联	59.6	90.3	125.8	17.1	126.0	7.5	25.2
加拿大油砂：总计	32.4	174.4	168.6	27.3	167.8		
其中正在积极开发的储量	3.0	11.6	25.5	4.2	25.9		
委内瑞拉：奥里诺科重油带			220.0	35.3	220.0		

注：* 超过 100 年。

◆ 低于 0.05。

≠ 不包括苏联。

不包括爱沙尼亚、拉脱维亚和立陶宛 1992 年的数据。

备注：石油的探明储量——通常是指：通过地质与工程信息以合理的确定性表明，在现有的经济与作业条件下，将来可从已知储藏采出的石油储量。

储量/产量(储产比)比率——用任何一年年底所剩余的储量除以该年度的产量，所得出的计算结果即表明如果产量继续保持在该年度的水平，这些剩余储量可供开采的年限。

储量数据包括天然气凝析油、天然气液体产品(NGL)以及原油。

本表格在计算各组成部分在总量中所占比例及储产比时，使用以 10 亿桶为单位的数据。

石油的分布从总体上来看极端不平衡：从东西半球来看，约 3/4 的石油资源集中于东半球，西半球占 1/4；从南北半球看，石油资源主要集中于北半球；从纬度分布看，主要集中在北纬 20°~40°和 50°~70°两个纬度带内。波斯湾及墨西哥湾两大油区和北非油田均处于北纬 20°~40°内，该带集中了约 50%的世界石油储量；50°~70°纬度带内有著名的北海油田、俄罗斯伏尔加及西伯利亚油田和阿拉斯加湾油区。而包括中国、印度在内的亚太地区的石油探明储量却很少(约 2.5%)，显著少于其他地区；并且由于亚太地区人口相对较多，人均占有石油资源量就更少了。



3. 天然气

随着对天然气的深入研究与纯气田,特别是大气田的不断发现,天然气不再只被视为石油的伴生物,其能源地位也显著提高。

截至 2011 年年底,全球天然气探明储量为 $208 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。全球探明天然气储量主要集中在中东地区和欧亚地区。中东地区天然气探明储量为 $80 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 欧亚地区天然气探明储量为 $78.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 这两个天然气的探明储量占世界天然气探明储量的 76.2%。而其他地区的天然气探明储量只占总量的 23.8%, 依次为: 亚太地区为 $16.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占全球总量的 8.0%; 非洲地区为 $14.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占总量的 7.0%; 北美地区为 $10.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占总量的 5.2%; 中南美地区为 $7.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占总量的 3.6%。

1.1.2 化石能源消耗

目前,世界对能源的需求主要依赖化石能源。甚至在未来很长一段时间内,化石能源依然是整个能源消耗中的主要部分。然而作为非可再生能源,随着世界经济的迅速发展,化石能源储量的消耗速度逐年增加,化石能源终将在未来某一天消耗殆尽。

据 BP 2011 年最新统计资料显示,2011 年,全球一次能源消费较 2010 年增长 2.5%,与过去十年的平均水平基本持平。全球所有区域和所有燃料类型的消费量增速放缓。石油仍然是世界主导燃料,占全球能源消费量的 33.1%,煤炭的份额为 30.3%,达到 1969 年以来最高的水平。2011 年,世界石油的产出量为 40 亿 t,比 2010 年增长了 1.3%。照此计算,可以满足 54.2 年的全球生产需求;世界天然气的产出量为 29.54 亿 t 石油当量,较 2010 年增长了 3.1%。按此计算,全球天然气探明储量可以保证 63.6 年的生产需求;世界煤炭的产出量为 39.56 亿 t 石油当量,相比 2010 年增长了 6.1%。以此产出水平,世界煤炭探明储量可以满足 112 年的全球生产需求,是目前为止化石燃料储产比最高的燃料。

近 30 年来,中国能源结构以煤炭为主导,以石油为支撑,以水电、天然气和核电为补充的格局难以改变。具体而言,煤炭在中国能源生产中的份额稳步上升,从 1980 年的 69.4% 上升至 2010 年的 76.6%; 与此相对,原油产能则持续萎缩,从 1980 年的 23.3% 下降至 2010 年的 9.8%; 天然气产量虽然持续上升,截至 2010 年仍不足 5%; 水电持续增长,成为中国能源生产结构中仅次于煤、油的第三大能源资源。截至 2010 年,中国能源生产结构中煤、油、气、水电、核电的比例分别为 76.6%、9.8%、4.2%、7.8% 和 0.8%。

从化石能源基础储量上看,2010 年中国煤炭、石油、天然气基础储量分别为 2793.9 亿 t、317435.3 万 t 和 37793.2 亿 m^3 。从能源资源量及其区际分布上看,中国 72% 的煤炭资源集中分布在晋、蒙、新、陕、黔五省; 71% 的石油资源分布在黑、新、鲁、冀和陕五省; 86% 的天然气资源分布在新、蒙、川、陕和渝五省。

1.2 可再生能源

1.2.1 可再生能源分类

新能源与可再生能源是指除常规化石能源(如煤、石油和天然气)、大中型水力发电和

核裂变发电之外的生物质能、太阳能、风能、地热能、海洋能、小水电等一次性能源。这些能源资源丰富，可以再生，清洁干净。

(1) 生物质能。蕴藏在生物质中的能量，是绿色植物通过叶绿素将太阳能转化为化学能而储存在生物质内部的能量。通常包括木材及森林废弃物、农业废弃物、水生植物、油料植物、城市和工业有机废弃物及动物粪便等。

(2) 太阳能。太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。狭义的太阳能仅指太阳的辐射能及其光热、光电及光化学的直接转换。

(3) 风能。太阳辐射造成地球各部分受热不均匀、引起各地温差和气压不同、导致空气运动而产生的能量。

(4) 地热能。来自地球深处的可再生热能，起源于地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变。

(5) 海洋能。蕴藏在海洋中的可再生能源，包括潮汐能、波浪能、海流能、潮流能、海水温差能和海水盐差能等不同的能源形态。

(6) 小水电。小水电站及与其相配套的小电网的统称。1980年联合国第二次国际小水电会议上确定了三种小水电站容的范围：小型水电站(small)，1001~12000kW；小小水电站(mini)，101~1000kW；微型水电站(micro)，100kW以下。

在国际上，新能源的研究和开发经历了三个发展阶段。20世纪70年代以来，鉴于常规能源供给的有限性和1973年10月中东战争的爆发，出现了“能源危机”，世界上许多国家掀起了开发利用新能源的热潮，新能源的开发利用成为各国制定可持续发展战略的重要内容。到了80年代，自在内罗毕召开联合国新能源和可再生能源会议以来，许多国家进一步认识到，过于依赖化石能源将造成严重的环境污染、资源与生态破坏，因而又进一步转向开发可再生能源及其综合利用。可再生能源在21世纪将会以前所未有的速度发展，逐步成为人类的基础能源之一。据预测，到21世纪中叶，可再生能源在世界能源结构中占到50%以上。我国拥有丰富的可用于替代矿物燃料的可再生能源资源。经过多年的发展，我国可再生能源的开发利用已取得了很大进展，其中，小水电、太阳能热利用和沼气等开发规模和技术发展水平均处于国际领先地位。经过多方面的工作和广泛征求意见，《中华人民共和国可再生能源法》于2005年2月28日经第十届全国人民代表大会常务委员会第十四次会议正式通过，并于2006年1月1日起施行，使可再生能源的发展具有了法律保障。

1. 生物质能

生物质是指通过光合作用而形成的各种有机体，包括所有的动植物和微生物。生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，是以生物质作为载体的能量。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，是一种可再生能源。生物质能的原始能量来源于太阳，所以从广义上讲，生物质能是太阳能的一种表现形式。

生物质能具有以下特点。

① 燃烧过程对环境污染小。生物质中有害物质含量低，灰分、氮远低于矿物质能源。生物质含硫一般不高于0.2%，燃烧过程放出CO₂又被等量的生物质吸收，因而是CO₂零排放能源。



- ② 储量大，可再生。只要有阳光照射的地方，光合作用就不会停止。
- ③ 具有普遍性、易取性，不分国家和地区，价廉，易取。
- ④ 是唯一可以运输和储存的可再生能源。
- ⑤ 挥发性组分高，炭活性高。容易着火，燃烧后灰渣少且不易黏结。
- ⑥ 能量密度低，体积大，运输困难。
- ⑦ 气候条件对生物质能的性能影响较大。

⑧ 生物质燃料都含有较多水分，而水分对燃料热值有巨大的影响。表 1-2 所示为生物质燃料水分含量与低位热值之间的关系，表 1-3 是一些生物质燃料在自然风干后的低位热值，表 1-4 是一些生物质燃料的成分分析。

表 1-2 生物质燃料的低位热值和水分含量的关系

低位热值/ (kJ/kg)	生物质燃料												
水分含量/(%)	玉米秆	高粱秆	棉花秆	豆秸	麦秸	稻秸	谷秸	柳树枝	杨树枝	牛粪	马尾松	桦木	橙木
5	15422	15744	15845	15836	15439	14184	14795	16322	13996	15380	18372	16970	16652
7	15042	15360	15552	15313	15058	13832	14426	15929	13606	14958	17933	16422	16251
9	14661	14970	15167	14949	14682	13481	14062	15519	13259	14585	17489	16125	15841
11	14280	14585	14774	14568	14301	13129	13694	15129	12912	14209	17050	15715	15439
12	14092	14393	14577	14372	14155	12954	13514	14933	12736	14016	16828	15506	15238
14	13710	14008	14192	13991	13732	12602	13146	14535	12389	13640	16385	15069	14738
16	13330	13623	13803	13606	13355	12251	12782	14134	12042	13263	15937	14686	14426
18	12950	13233	13414	13221	12975	11899	12460	13740	11694	12391	15493	14276	14021
20	12569	12853	13021	12837	12598	11348	12054	13343	11347	12431	15054	13870	13621
22	12192	12464	12636	12452	12222	11194	11690	12945	10996	12134	14611	13460	13213

表 1-3 自然风干后生物质低位热值

生物质	低位热值/(kJ/kg)	生物质	低位热值/(kJ/kg)	生物质	低位热值/(kJ/kg)
人粪	18841	薪柴	16747	树叶	14654
猪粪	12560	麻秆	15491	蔗渣	15491
牛粪	13861	薯类秧	14235	青草	13816
羊粪	15491	杂糖秆	14235	水生植物	12561
兔粪	15491	油料作物秸秆	15491	绿肥	12560
鸡粪	18841	蔗叶	13816		

表 1-4 一些生物质燃料的成分分析

种类	工业分析/(%)				元素分析/(%)						低位热值/(kJ/kg)
	水分	灰分	挥发分	固定碳	H	C	S	N	P	K ₂ O	
杂草	5.43	9.40	68.27	16.40	5.24	41.00	0.22	1.59	1.68	13.60	16203
豆秸	5.10	3.13	74.65	17.12	5.81	44.79	0.11	5.85	2.86	16.33	16157
稻草	4.97	13.86	65.11	16.06	5.05	38.32	0.11	0.63	0.15	11.28	13980
玉米秸	4.87	5.93	71.45	17.75	5.45	42.17	0.12	0.74	2.60	13.80	15550
麦秸	4.39	8.90	67.36	19.35	5.31	41.28	0.18	0.65	0.33	20.40	15374
马粪	6.34	21.85	58.99	12.82	5.35	37.25	0.17	1.40	1.02	3.14	14022
牛粪	6.46	32.4	48.72	12.52	5.46	32.07	0.22	1.41	1.71	3.84	11627
杂树叶	11.82	10.12	61.73	16.83	4.68	41.14	0.14	0.74	0.52	3.84	14851
针叶木					6.20	50.50					18700
阔叶木					6.20	49.60					18400
烟煤	8.85	21.37	38.48	31.30	3.81	57.42	0.46	0.93			24300
无烟煤	8.00	19.02	7.85	65.13	2.64	65.65	0.51	0.99			24430

地球上的生物质能资源极其丰富，是仅次于煤炭、石油、天然气的第四大能源，在整个能源系统占有重要地位。

生物质能是来源于太阳能的一种可再生能源，具有含碳量低的特点，加之在其生长过程中吸收大气中的 CO₂，因而用新技术开发利用生物质能，不仅有助于减轻温室效应和实现生态良性循环，而且可替代部分石油、煤炭等化石燃料，成为解决能源与环境问题的重要途径之一。

1) 生物质资源的分类

根据来源的不同，将适合于能源利用的生物质分为以下几种。

(1) 林业资源。

林业生物质能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、在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树枝、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。

农业生物质能资源是指农作物(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、制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、服务业的各种排水组成，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、制糖、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。根据这些畜禽的品种、体重、粪便排泄量等因素,可估算出某一年我国畜禽粪便可获得的资源的实物量。

图 1.1 所示为常见的生物质燃料。

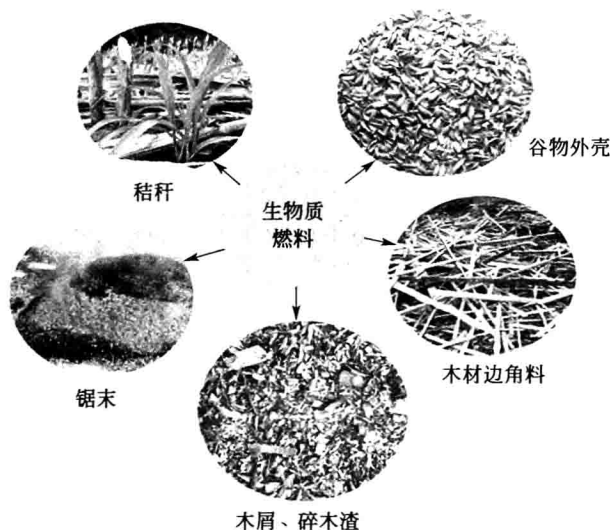


图 1.1 常见的生物质燃料

2) 生物质能转化利用技术

(1) 生物质能转化利用途径。

生物质能转化利用途径主要包括燃烧、热化学法、生化法、化学法和物理化学法等,可转化为二次能源,分别为热量或电力、固体燃料(木炭或成型燃料)、液体燃料(生物柴油、生物原油、甲醇、乙醇和植物油等)和气体燃料(氢气、生物质燃气和沼气等)。

生物质燃烧技术是传统的能源转化形式,是人类对能源的最早利用。生物质燃烧所产生的能源可应用于炊事、室内取暖、工业过程、区域供热、发电及热电联产等领域。

压缩成型是利用木质素充当黏合剂将农业和林业生产的废弃物压缩为成型燃料,提高其能源密度,是生物质预处理的一种方式。

热化学法包括热解、气化和直接液化。

气化是将固体生物质转化为气体燃料。其转化原理是含碳物质在不充分氧化(燃烧)的情况下,会产生可燃的 CO 气体,即煤气。制造煤气的设备称为气化炉,人为地不给足氧气,让含碳物质在没有足够的空气的情况下燃烧,“焖”出 CO 来。

液化是把固体状态的生物质经过一系列化学加工过程,使其转化成液体燃料(主要是指汽油、柴油、液化石油气等液体烃类产品,有时也包括甲醇、乙醇等醇类燃料)的清洁利用技术。根据化学加工过程的不同技术路线,液化可分为直接液化和间接液化。间接液化是指将生物质气化得到的合成气($\text{CO} + \text{H}_2$),经催化合成为液体燃料(甲醇或二甲醚等)。合成气是指不同比例的 CO 和 H_2 组成的气体混合物。