



纳米科学与技术

薄膜太阳能电池

肖旭东 杨春雷 著

 科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

纳米科学与技术

薄膜太阳能电池

肖旭东 杨春雷 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了目前主要的几种薄膜太阳能电池技术。分别选取非晶硅和微晶硅、碲化镉、铜铟镓硒、染料敏化以及有机等五类薄膜太阳能电池体系,详细阐述了它们各自的发展历程和现状、材料的基本性质、器件结构及制备工艺,同时介绍了每种薄膜电池的器件特性、产业化情况和技术发展趋势等。本书还分析了中国的能源困境、新能源机遇以及薄膜光伏发电的优势,同时也利用生命周期评估(LCA)体系定量地比较了几类光伏太阳能发电系统对环境的影响。

本书可以作为有关研究机构 and 高等院校师生的参考书,也可供太阳能光伏企业的管理和工程技术人员、太阳能行业的投资人、政府的管理和决策机构以及广大科技爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米科学与技术 / 白春礼总主编. —北京: 科学出版社, 2014

国家出版基金项目

ISBN 978-7-03-042826-4

I. ①纳… II. ①白… III. ①纳米技术 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 299072 号

丛书策划: 杨 震 / 责任编辑: 张淑晓 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 16

字数: 360 000

定价: 12 000.00 元 (全 80 册)

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明 封松林 傅小锋 顾 宁 汲培文 李述汤

李亚栋 梁 伟 梁文平 刘 明 卢秉恒 强伯勤

任咏华 万立骏 王 琛 王中林 薛其坤 薛增泉

姚建年 张先恩 张幼怡 赵宇亮 郑厚植 郑兰荪

周兆英 朱 星

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析,使之形成体系并付诸实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国,都将发展纳米科技作为国家战略。

兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去,为我国

纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养作出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

前 言

由于传统化石能源接近枯竭以及它们的使用给环境带来的巨大污染,人类有了寻求可再生新能源的强大动力。光伏太阳能是新能源中最重要的一类,在过去的 20 年中,其发展迅猛并取得了巨大的成功。目前的光伏太阳能电池产品利用的主要是以单晶硅和多晶硅为代表的第一代光伏技术,具有效率高、性能稳定以及工艺成熟的特点。

薄膜太阳能电池是继单晶硅和多晶硅电池之后兴起的新一代光伏技术,被认为是光伏产业的未来,近年来吸引了越来越多学术界和产业界的目光。从研究时间上来讲,薄膜太阳能电池并不是一个新的学科,但近年来,巨大的研发投入和产业界的强烈需求催生了大量新材料和新概念,新的器件模型也不断涌现,使得薄膜太阳能电池成为材料领域的研究热点。过去的两年里,薄膜太阳能电池的研究进入了一个崭新的阶段,器件效率的提升可以说是突飞猛进。截至 2014 年,铜铟镓硒(CIGS)薄膜电池的实验室效率达到 21%,电池组件的实验室效率达到 18.4%;碲化镉(CdTe)薄膜电池的实验室效率也达到 21%,首次超过多晶硅电池的效率纪录,大面积 CdTe 电池组件的效率也达到 17%以上。2013 年光伏领域最大的亮点是钙钛矿薄膜太阳能电池的进展,其效率突破 15%,跨过了产业化的效率门槛。这些巨大的进步彻底改变了过去人们认为薄膜太阳能电池效率偏低观点,使得薄膜太阳能电池在低成本和低生产能耗的优势之外,在器件转化效率上达到与晶体硅同等水平。目前看来,薄膜太阳能电池的产业化前景已经变得越来越清晰。我国的 CdTe、CIGS、染料敏化以及有机太阳能电池的研究,在国际上都具有重要影响力,基本与国际同步。

目前国外已出版了一些关于薄膜太阳能电池的书籍,但在国内这样的书还较少。在多年的薄膜太阳能电池科学研究和推进产业化的工作中,我们强烈体会到,一本详细介绍各类薄膜太阳能电池的综合性书籍对于刚进入该领域的研究生以及企业界科技工作者来说是多么迫切的需求。即使是在薄膜太阳能电池领域从业多年的科技工作者,也非常渴望了解自己研究的薄膜材料以外的其他薄膜太阳能电池,从而互相借鉴成功的经验。另外,政府各级主管部门、社会大众以及企业界和投资界对薄膜太阳能电池的了解还不够全面,甚至在一些认识上还存在误区。这些因素让我们萌生了撰写这样一部书的念头,我们也非常乐意与同行和社会各界人士分享近年来从事光伏研究和产业化过程中积累的对薄膜太阳能电池的认识和体会,希望能够为促进我国薄膜太阳能电池的研究和产业化贡献自己的绵薄之力。

我们分别选取非晶硅和微晶硅、碲化镉、铜铟镓硒、染料敏化,以及有机这五类薄膜太阳能电池体系,详细阐述了它们各自的发展历程和现状、材料的基本性质、器件结构及制备工艺,同时介绍了每种薄膜电池的器件特性、产业化情况和技术发展趋势等。我们始终牢记薄膜光伏太阳能电池研究的最终目的,那就是提高效率和降低成本,为社会带来洁净的、价廉的电力。所以,在对所有电池体系的介绍和分析中,我们都详细介绍了器件效率提升的历程,介绍了关键的技术突破点,并关注它们所面临的挑战。结合当前科研前沿动向,揭示可能的发展趋势,以便于年轻的研究人员可以迅速地把握该领域的现状和未来。

本书专辟一章,从传统能源的现状、其资源的不可再生性以及使用时带来的各种环境问题入手,详细阐述了人类文明发展到现阶段面临的能源危机和环境污染的挑战。其中,对中国的能源困境和环境污染挑战作了详尽分析,并与其他国家诸如美国的国情做了比较。在翔实的数据前,我们向读者传递一个强烈的信息:新能源机遇对我国的发展尤为重要。我们还对新能源的种类及其可利用量作了详细的描述和分析,并就光伏太阳能相对于其他新能源的优势,以及薄膜光伏技术本身的优势作了阐述。

本书还特别分析了几种主流光伏电池在生产环节可能面临的环境问题,试图回答人们对清洁能源的环境污染方面的疑问,希望能使公众和学术界对光伏行业的环境污染问题有一个清晰和科学的认识。尽管太阳能光伏电力本身是清洁能源,但是,光伏组件的生产过程所产生的污染常常是大众关心的问题,科学地研究和看待太阳能电池生产过程中的污染问题是十分必要的,具有重大的现实意义,这不仅有利于光伏产业的发展,也有利于消除公众关于光伏生产会带来环境污染的疑虑。本书的第7章就这一主题,从污染的产生、污染的种类、污染的程度来探讨光伏太阳能发电的污染问题,利用生命周期评估(LCA)体系定量地比较了几类光伏太阳能发电系统对环境的影响,希望能使公众、研究人员和产业界对这一问题有一个清晰的、科学的认识。

我们非常感谢科学出版社张淑晓编辑的约稿以及修改意见,没有她的持续关注和努力,就不会有本书的问世。本书的第1、4、7章由肖旭东主笔,第2、3、5、6章由杨春雷主笔。第7章的主要内容是基于笔者及同事在《中国科学:化学》发表的一篇综述,在此,我们向该论文的其他作者卢兰兰、毕冬勤和刘壮致谢。在本书的写作过程中,感谢中国科学院电工研究所刘向鑫研究员分享他在CdTe方面的宝贵资料,感谢华中科技大学刘铭博士对染料敏化电池章节给予的帮助,感谢中国科学技术大学王德亮教授、香港中文大学陈涛博士以及华东师范大学陈晓红副教授对本书部分章节的审阅以及宝贵的修改意见。在资料收集和制图方面,中国科学院深圳先进技术研究院光伏太阳能研究中心的同事张擷秋博士、钟国华博士、冯叶博士、李能博士、李晓光博士和尹苓、鲍浪、崔骏等研究生付出了辛勤的劳动,香

港科技大学的李百奎博士、宋建军博士也给予了巨大的帮助,我们深表谢意。

由于写作时间有限,掌握的资料可能不够全面,加之研究经历和知识面的限制,错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

肖旭东 杨春雷

2014年6月于深圳

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

前言

第 1 章 能源危机与新能源机遇	1
1.1 世界能源概况	1
1.2 中国能源概况	4
1.3 传统化石能源的环境污染	6
1.4 新能源的机遇及各种新能源比较	10
1.4.1 太阳能	10
1.4.2 风能	12
1.4.3 生物质能	13
1.5 薄膜光伏发电的优势	14
参考文献	18
第 2 章 非晶硅和微晶硅薄膜太阳能电池	20
2.1 非晶硅和微晶硅薄膜太阳能电池的发展历史	20
2.2 非晶硅薄膜的基本性质	23
2.2.1 原子结构	23
2.2.2 能带结构和光电性质	24
2.2.3 非晶硅薄膜的光致亚稳特性	28
2.2.4 非晶硅的合金薄膜	30
2.3 非晶硅和微晶硅薄膜的制备方法	31
2.3.1 射频等离子增强化学气相沉积	32
2.3.2 其他频率的 PECVD 沉积方法	36
2.3.3 热丝化学气相沉积	38
2.3.4 其他沉积方法	39
2.3.5 氢稀释对薄膜生长的影响	40
2.3.6 微晶硅的高速率沉积	41
2.3.7 非晶硅合金以及非晶硅的掺杂方法	42
2.4 非晶硅太阳能电池的结构及特性	43
2.4.1 非晶硅单结电池	45
2.4.2 非晶硅双结电池	47

2.4.3 非晶硅三结电池	50
2.4.4 多结非晶硅电池中的电流密度匹配问题	53
2.4.5 多结非晶硅电池中的隧穿结问题	53
2.5 非晶硅太阳能电池组件的结构和制作工艺	53
2.6 非晶硅太阳能电池的产业化现状和技术发展趋势	56
参考文献	58
第3章 碲化镉薄膜太阳能电池	61
3.1 碲化镉薄膜太阳能电池的发展历史	61
3.2 碲化镉材料的基本性质	65
3.3 碲化镉薄膜太阳能电池的结构和制备	68
3.3.1 透明导电层和高阻层	69
3.3.2 n型 CdS 层	72
3.3.3 CdTe 吸收层	74
3.3.4 CdCl ₂ 热处理工艺	77
3.3.5 背接触层及电极制作工艺	81
3.4 碲化镉薄膜太阳能电池的特性	82
3.5 碲化镉薄膜太阳能电池的老化	87
3.6 大面积电池组件的制备工艺	91
3.7 碲化镉薄膜太阳能电池的产业化现状和技术发展趋势	92
参考文献	98
第4章 铜铟镓硒薄膜太阳能电池	100
4.1 铜铟镓硒电池的发展与现状	100
4.2 铜铟镓硒多元化合物	102
4.2.1 晶体结构和能带特征	102
4.2.2 相图	105
4.2.3 缺陷	106
4.3 具有光伏性能的铜铟镓硒吸光层的制备	109
4.3.1 共蒸发法	109
4.3.2 溅射/硒化法	111
4.3.3 电镀/硒化法	111
4.3.4 纳晶印刷/硒化法	112
4.4 铜铟镓硒电池器件结构、制备及特性	113
4.4.1 衬底	113
4.4.2 Mo 背电极	114
4.4.3 CIGS 吸收层	114

4.4.4 CdS 缓冲层	116
4.4.5 本征 ZnO 层	116
4.4.6 Al : ZnO 透明电极	116
4.4.7 器件特性	117
4.4.8 组件结构	118
4.5 铜铟镓硒电池的器件物理	119
4.5.1 异质 p-n 结	119
4.5.2 量子效率	120
4.5.3 载流子复合	121
4.6 铜铟镓硒电池的产业化现状及技术发展趋势	128
参考文献	129
第 5 章 染料敏化薄膜太阳能电池	131
5.1 DSSC 的发展历史	131
5.2 DSSC 的器件结构和工作原理	133
5.3 DSSC 各功能层的材料选项及其性能	135
5.3.1 导电衬底	135
5.3.2 光阳极	137
5.3.3 光敏剂	143
5.3.4 电解液体系	147
5.3.5 氧化还原电对	150
5.3.6 对电极	150
5.4 DSSC 组件的制作工艺	151
5.4.1 丝网印刷	152
5.4.2 电极层压密封	153
5.4.3 电池结构设计	153
5.5 DSSC 的老化	154
5.6 DSSC 的产业化现状和技术发展趋势	157
参考文献	161
第 6 章 有机薄膜太阳能电池	167
6.1 有机薄膜太阳能电池的发展历史和研究进展	167
6.2 有机薄膜太阳能电池的器件结构和器件工作原理	170
6.2.1 器件结构	170
6.2.2 器件工作原理	171
6.3 有机薄膜太阳能电池常用的给体材料	174
6.3.1 有机小分子给体材料	174
6.3.2 宽带隙聚合物给体材料	176

6.3.3 窄带隙聚合物给体材料	178
6.4 有机薄膜太阳能电池常用的受体材料	182
6.5 有机薄膜太阳能电池的界面层材料	188
6.5.1 利用界面层调节吸收层和电极间的能级关系	189
6.5.2 利用界面层提高电极对电荷的选择性和抑制界面复合	190
6.5.3 利用界面层控制和改善吸收层的表面形貌	191
6.5.4 利用界面层引入光学增强效应和等离子激元效应促进光吸收	192
6.5.5 利用界面层提高稳定性	193
6.6 叠层有机太阳能电池简介	193
6.6.1 有机叠层太阳能电池的基本结构和工作原理	194
6.6.2 几种典型的有机叠层太阳能电池	196
6.7 有机薄膜的稳定性问题	200
6.7.1 化学结构稳定性	200
6.7.2 物理稳定性	203
6.8 有机薄膜的常用涂布方法	203
6.8.1 适用于单个样品的印刷涂布技术	203
6.8.2 “卷对卷”工艺	207
6.8.3 其他成膜技术	208
6.8.4 不同成膜技术的对比	209
6.9 展望	210
参考文献	211
第7章 光伏太阳能电池生产过程中的污染问题	215
7.1 引言	215
7.2 各种电池生产过程中的污染问题	215
7.2.1 晶体硅电池	215
7.2.2 非晶硅电池	218
7.2.3 GaAs 电池	219
7.2.4 CdTe 电池	221
7.2.5 CIGS 电池	223
7.2.6 DSSC	225
7.3 不同太阳能电池之间的比较	226
7.4 结论	233
参考文献	234
索引	238

第 1 章 能源危机与新能源机遇

1.1 世界能源概况

能源是人类文明发展的最根本的物质基础。从远古时代人类就学会使用的火,到今天使用的电,都是能源作为物质基础的演化形式。在现代社会里,能源的使用渗透到了我们生活、工作、生产中的方方面面。在日常生活中,我们靠燃煤、燃气、燃电加热食物以及冬天供暖,靠电力提供照明以及夏天降温,靠汽油、柴油提供交通运输动力。在经济活动中,能源具有特别重要的战略地位。机器的运行、电子器件的使用、自动化管理系统的操作等都离不开电力。事实上,人类生活品质的提高、人类文明的发展都有赖于能源使用量的增加及其应用形式的拓广。

人类使用的能源最早来自动植物。它们或是作为食物被消耗,或是用于点火取暖、煮食及照明。维持现代社会运行的能源主要为化石能源,包括石油、煤炭和天然气。化石能源是由几百万乃至几亿年前,地球变迁过程中埋藏在地下的动植物的有机残骸,在极高的温度和压强条件下形成的,是不可再生的。由于化石能源会被消耗殆尽,人类必须面对化石能源耗尽后的状况。

世界能源理事会 (World Energy Council, WEC) 持续地收集世界各国能源储备及其利用的数据资料,每三年发表一次完整的报告。表 1-1 是根据最近已公布的、也即 2010 年的能源报告整理出来的数据^[1], 包括全球、中国、美国截至 2008 年探明的各种能源的可开采储量、2008 年的开采生产规模以及以 2008 年的开采速度计算剩余能源可开采的年限。以当时能源消耗的速度,三种主要的化石能源中,石油会在 40 年左右、天然气会在 54 年左右、煤炭会在 150 年左右枯竭。这表明了能源在世界范围内存在的危机。如果考虑到全球能源消耗每年会有所增长,假设以过去的 1.6% 的年平均速度递增,所有化石能源会耗尽得更快。

当然,我们还在不断地勘探,发现新的化石能源资源,甚至新的化石能源种类,如表 1-1 中所示的油页岩和页岩气。不过,现在已经非常清楚,每年新探明的化石能源已经开始比每年生产消耗的少了,总体的可开采储量会不断减少。如图 1-1 所示^[3], 在全球范围内,新探明的石油储量在 1980 年就已低于当时的开采量了。尽管有涨落,现在每年新探明的石油储量已不到年开采量的一半。如图 1-2 所示^[4], 由于没有更多的新储量被发现,预计全球化石能源的生产将于 2020~2030 年之间达到所谓的哈伯特顶点。此后,化石能源的产量会持续下降。

表 1-1 各种能源已探明储量、年生产量及按现在速度剩余的开采年限

项目	世界	中国	美国
石油	已探明储量/Mt	163 038	2 466
	年生产量/(Mt/a)	3 948	189.8
	开采余期/a	41.2	13
煤炭	已探明储量/Mt	860 938	114 500
	年生产量/(Mt/a)	5 500	2 716
	开采余期/a	156.5	42
天然气	已探明储量/亿 m ³	1 855 440	30 900
	年生产量/(亿 m ³ /a)	38 407	761
	开采余期/a	54.4	40.6
核燃料:铀	已探明储量/kt	4 004.5	115.9
	年生产量/(kt/a)	43.880	0.770
	累计生产/kt	2 406.638	31.399
	开采余期/a	91.2	150.5
油页岩	已探明储量/Mt	698 277	47 600
	年生产量/(Mt/a)	0.930	0.375
页岩气 ^[2]	已探明储量/亿 m ³	1 810 000	315 700
水电	已探明储量/(万亿 W·h/a)	39 842	6 083
	年生产量/(亿 W·h/a)	31 938 020	5 800 000

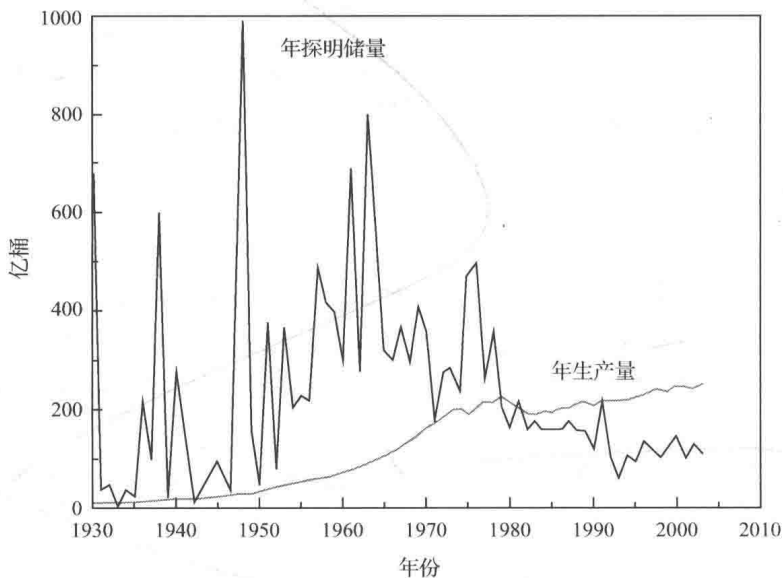


图 1-1 全球石油年探明储量和年生产量的历史统计曲线^[3]。
自 1980 年起,年生产量就超过了年探明储量

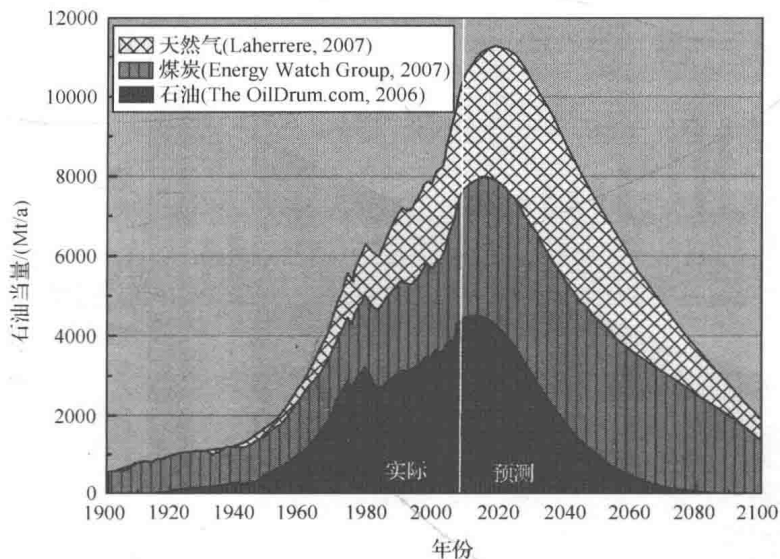


图 1-2 全球化石能源的年开采量的历史及预测曲线^[4]

哈伯特顶点(Hubbert's peak)是以美国地质学家哈伯特(King Hubbert)命名的。早在 1953 年,哈伯特就大胆预言,美国石油产量将于 60 年代末至 70 年代初达到顶峰,达到顶峰之后会一直下降。虽然当时许多专家对他的预测提出质疑,但是在 1970 年,他所预见的情况真的发生了。从此以后,石油专家把这种情形叫做哈伯特顶点或石油顶峰(peak oil)。其他产油国家,如加拿大、英国、中国等,亦陆续出现相同情况。全球作为一个整体,在不久的将来,各类化石能源的哈伯特顶点都会来临。

随着生产、经济活动的增加,生活品质的提高,能源的消耗越来越大。传统化石能源的逐渐耗尽要求有新的能源来替代。我们已经到了一个迫切需要改变以往能源结构方式的时代了。如果不从现在起开始寻求其他能源,尤其是可再生能源,我们终有一天会陷入危险的状态:能源的匮乏使人类文明走向终结。科学家在过去的十几年里,已经开始积极地寻找新能源。如图 1-3 所示,德国全球变化咨询委员会预测^[5],传统化石能源的缺口将会由可再生能源来填补。可再生能源包括水能、生物质能、风能、光热能、地热能等。虽然除传统的水电外,可再生能源在今天的能源结构中只占了很小的比例,在本世纪内,我们将见证它们越来越重要的地位。它们不仅要取代化石能源的缺口,更要担负人类对能源需求持续增加的重任。

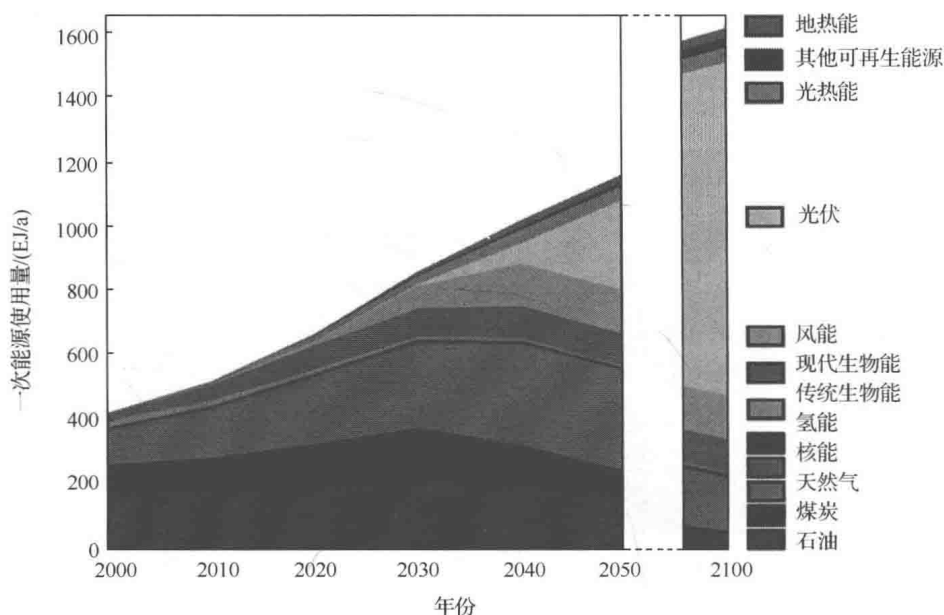


图 1-3 各种一次能源对全球能源贡献图^[5]。石化能源的贡献在 2030 年左右到达顶峰后会逐年降低，而可再生能源的贡献会逐年增加

1.2 中国能源概况

我国是人口大国，是世界生产大国，也是能源消耗大国。从表 1-1 可以看出，我国能源资源极不丰富。我国已探明的石油、煤炭和天然气储量仅占世界已探明相关资源的 1.5%、13.3% 和 1.7%，与我国的人口、我国的生产总量极不相称。我国对能源的需求在过去的几十年里是不断增加的。由图 1-4^[6] 可以看到，由于过去三十余年来经济的高速发展，我国石油、煤炭、天然气的消耗各增加了 5.0、5.6、9.1 倍。这些能源也从有所出口转变为净进口了。这表明，我国的能源状况极不乐观，危机大过世界能源危机，这是我国全方位发展战略安全需要重点考虑的因素。

若以热值（见表 1-2^[7]）来计算各种能源的贡献，全球于 2008 年消耗的煤炭：石油：天然气为 31.2：37.4：31.4，基本上是三分天下、贡献相当。而我国 2008 年这些能源消耗的比例则为 78.4：18.3：3.3，非常不平衡；在 2011 年，这一比例稍有变化，为 79：16.7：4.3，天然气对能量贡献的比重有所上升。由此可见，我国一次能源来源是极端倾斜的，极大程度地依赖煤炭。尽管我国煤炭资源丰富，一直以来，都是煤炭生产大国，还曾是出口大国，但更重要的是消费大国。我国每年煤炭产量与消费量均占全世界的 40% 以上，并于 2009 年首次从煤炭出口国变为煤炭净进口国。据 BP（英国石油公司）发布的《2013 年世界能源统计年鉴》^[8]，2012