

四川省 2011 年度重点图书项目

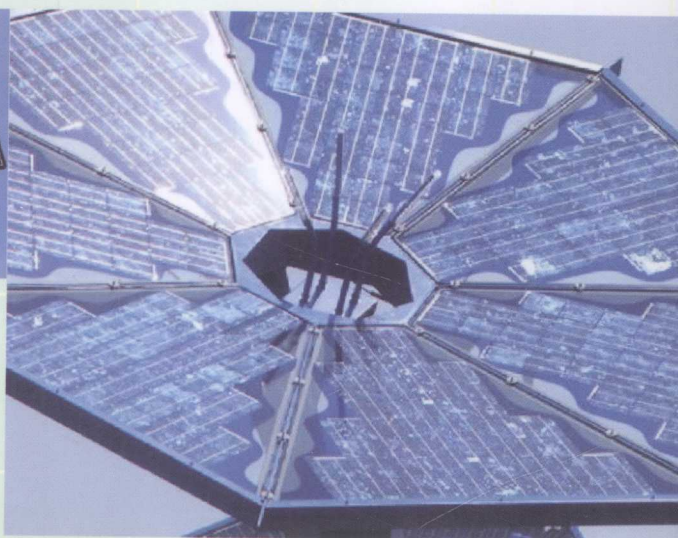
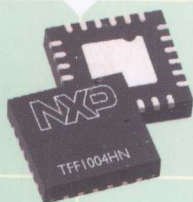
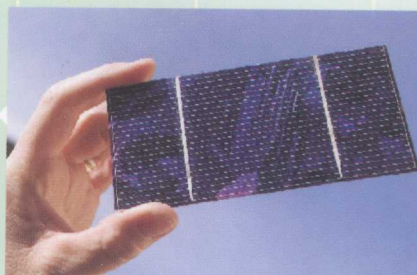
太阳能光伏与照明应用技术系列教材

太阳能电池材料 及其应用

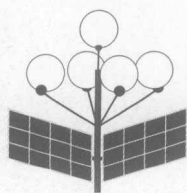
taiyangneng dianchi cailiao jiqi yingyong

李 伟 主 编

顾得恩 龙剑平 副主编



电子科技大学出版社



014032376

四川省 2011 年度重点图书项目

太阳能光伏与照明应用技术系列教材

TM914.4

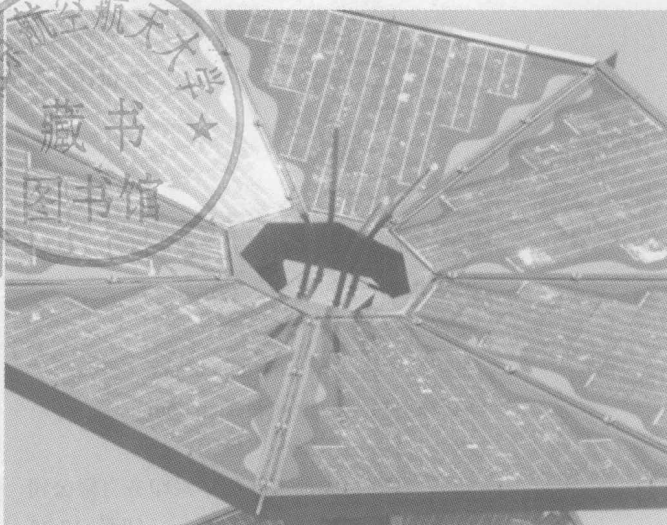
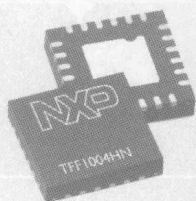
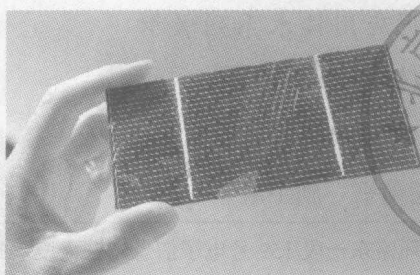
33

太阳能电池材料 及其应用

taiyangneng dianchi cailiao jiqi ying

李 伟 主 编

顾得恩 龙剑平 副主编



北航

C1720731



电子科技大学出版社

TM914.4

33

014035378



图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能电池材料及其应用 / 李伟主编. —成都:
电子科技大学出版社, 2012.11
太阳能光伏与照明应用技术系列教材
ISBN 978-7-5647-1339-3

I. ①太… II. ①李… III. ①太阳能电池—教材
IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 281636 号

四川省 2011 年度重点图书项目
太阳能光伏与照明应用技术系列教材
太阳能电池材料及其应用

李 伟 主编

顾得恩 龙剑平 副主编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 郭蜀燕 辜守义
责任编辑: 辜守义
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮件: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 成都市新都华兴印务有限公司
成品尺寸: 185mm×260mm 印张 17.25 字数 410 千字
版 次: 2014 年 1 月第一版
印 次: 2014 年 1 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-1339-3
定 价: 36.80 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。

四川省 2011 年度重点图书项目
太阳能光伏与照明应用技术系列教材

丛书编委会人员名单

主 审：吴援明 刘 爽

主 编：于军胜 饶海波 李 伟 李绍荣 祁康成 严高师

参编人员（按姓名笔画排序）：

丁 坤 于军胜 万远涛 万贤龙 王文丽

王 军 王 玮 龙剑平 祁康成 杨昕梅

李 伟 李绍荣 宋继荣 林 慧 周琳淞

钟 建 胡 玥 饶海波 顾得恩 唐普英

高 原 高寒松 黄宇红 曹贵川 曾红娟

谢立坤 廖骏源

序

人类社会发展到现阶段，自然资源与生存环境面临着非常严峻的挑战。当前世界各国致力于资源节约型与环境友好型社会的建设，因此，作为“开源节流”型的太阳能光伏技术和高效固态照明技术，符合社会发展的历史潮流和国家节能减排的大政方针。但是，当前我国在太阳能光伏和新型照明领域的人才非常缺乏，相关的教材和图书配套很不完善，本系列教材所涉及的八本系列性的图书正是在这个背景下规划、出版的，可以满足理工科院校的新专业的需求、高校院所人才培养和科学研究的要求。编委会由多名教授、博导以及博士青年教师组成，在材料的制备、表征、性能优化、器件工艺及应用技术等方面，具备丰富的教学与科研经验。我们相信，该系列教材可以为国家“卓越工程师计划”在相关光电材料与器件领域提供参考与帮助。

吴援明

2011年8月

前言

能源是实现一个国家或地区国民经济持续发展和社会进步所必须的保障。在未来数十年内,全世界对能源的需求将快速增长。传统的石油、煤炭以及天然气等非再生能源储量有限,这使各国将包括太阳能、风能等在内的可再生能源开发作为未来发展的重要战略方向之一。由于具有广泛性、清洁性和永久性等优点,太阳能在可再生能源中占有非常重要的地位。太阳能光伏发电以太阳能电池为载体,是近年来最主要、最具有发展潜力的太阳能利用途径之一,具有易于规模化、运行无污染、易于自动化等优点。太阳能电池材料既是决定光伏电池光电转换效率、经济成本和环境成本的关键因素,也是新型、高效太阳能电池的研发基础。本书从太阳能电池的物理基础出发,围绕几种典型太阳能电池材料的性质、制备工艺及其与器件性能的关系进行详细阐述,以期帮助读者建立与太阳能电池相关的材料科学和材料工程基础。

全书共分6章。第1章介绍与太阳能及利用方式相关的基础知识,包括太阳能特点、太阳光谱以及太阳辐射能计算、太阳能的主要利用方式等内容。第2章讲述太阳能电池的物理基础,并对太阳能电池性能参数的定义及其测试进行介绍,最后对决定太阳能电池性能参数的关键因素——太阳能电池材料进行概述。第3章重点介绍太阳能电池用硅材料(单晶硅、多晶硅及薄膜、非晶硅薄膜)的基本性质和制备技术,尤其对非晶硅薄膜材料中的制备技术、缺陷控制、光致衰变、合金化以及晶化等内容进行详细阐述,最后对太阳能电池用硅基薄膜面临的挑战和发展方向进行简要介绍。第4章讲述化合物半导体太阳能电池材料,重点介绍常用GaAs、CdTe等III-V化合物半导体以及CIS系和CIGS系多元化合物太阳能电池材料的特点、基本性质和制备技术等内容。第5章对易于实现柔性器件的有机太阳能电池相关材料进行介绍,并对有机太阳能电池结构与制备工艺流程进行阐述。第6章在阐述染料敏化太阳能电池(DSCs)结构与工作原理的基础上,结合国内外最新研究成果,重点对这一新型、低成本太阳能电池用光阳极材料和染料的特点与性质进行介绍。

本书由李伟教授担任主编、顾德恩副教授和龙剑平教授担任副主编,适合从事太阳能电池及其技术学科方向的师生和科研人员参考选用。

博士研究生何剑、徐睿和硕士研究生黄璐、王垠、吕小龙参与了本书的编写,在此向他们在资料搜集、文稿整理和数据查证等过程中付出的辛勤劳动,致以衷心的感谢。

新能源科学与技术发展日新月异,由于编者学识有限,书中谬误在所难免,恳请同行专家和广大读者批评指正。

编者

2014年1月于成都

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 能源危机	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 能源危机	1
1.2 可再生能源与太阳能	5
1.2.1 可再生能源	5
1.2.2 太阳能	7
1.3 太阳光谱	10
1.4 太阳能利用	15
1.4.1 光-热转换	15
1.4.2 光-化学转换	18
1.4.3 光-电转换	18
思考简答题	19
第 2 章 太阳能电池物理基础	20
2.1 半导体物理基础	20
2.1.1 能带结构	20
2.1.2 杂质与缺陷	24
2.1.3 平衡态载流子	26
2.1.4 非平衡载流子	31
2.1.5 载流子输运	33
2.1.6 p-n 结基础	38
2.1.7 金属-半导体接触和 MIS 结构	42
2.2 太阳能电池基础	45
2.2.1 半导体光吸收	45
2.2.2 光生伏特效应	52
2.2.3 太阳能电池的电流-电压特性	53
2.3 太阳能电池性能参数	54
2.3.1 测试条件与测试系统	55
2.3.2 太阳能电池 $I-V$ 曲线的基本特征	56
2.3.3 入射光子-电流转换效率 IPCE	59
2.4 太阳能电池材料的分类	59
思考简答题	62

第 3 章 硅基太阳能电池材料及制备技术	63
3.1 单晶硅太阳能电池材料与制备技术	63
3.1.1 硅的基本性质及其应用	63
3.1.2 太阳能电池用单晶硅材料及其制备	67
3.1.3 单晶硅材料中的杂质与缺陷	83
3.1.4 光伏产业采用单晶硅材料的困惑	90
3.2 多晶硅太阳能电池材料与制备技术	91
3.2.1 铸造多晶硅及其制备	91
3.2.2 带硅材料及其制备	95
3.2.3 多晶硅薄膜材料及其制备	99
3.2.4 多晶硅材料中的杂质与缺陷	106
3.3 非晶硅薄膜太阳能电池材料与制备技术	108
3.3.1 非晶硅薄膜的基本性质	109
3.3.2 非晶硅薄膜的制备	113
3.3.3 非晶硅薄膜中的氢及光致衰退	117
3.3.4 非晶硅薄膜的合金化	133
3.3.5 非晶硅薄膜的晶化	135
3.4 硅基材料的光伏应用——太阳能电池	136
3.4.1 晶体硅太阳能电池	136
3.4.2 薄膜太阳能电池	139
3.4.3 硅基薄膜太阳能电池研究进展	145
思考简答题	146
第 4 章 化合物半导体太阳能电池材料及制备技术	147
4.1 概述	147
4.2 GaAs 太阳能电池材料及其制备	149
4.2.1 GaAs 材料的基本性质	149
4.2.2 GaAs 材料的制备	155
4.2.3 GaAs 材料中的杂质	163
4.2.4 GaAs 材料中的缺陷	168
4.2.5 GaAs 太阳能电池	173
4.3 CdTe 太阳能电池材料及其制备	179
4.3.1 CdTe 材料的基本性质	179
4.3.2 CdTe 材料的制备	181
4.3.3 CdTe 太阳能电池	190
4.4 CIS 及 CIGS 系太阳能电池材料及其制备	196
4.4.1 概述	196
4.4.2 CIS (CIGS) 材料的基本性质	197
4.4.3 CIS 及 CIGS 系太阳能电池	202

思考简答题	208
第 5 章 有机太阳能电池材料及其应用	209
5.1 概述	209
5.1.1 有机太阳能电池材料及器件的研究背景	209
5.1.2 有机太阳能电池的研究进展	209
5.2 有机半导体材料物理基础及太阳能电池原理	212
5.2.1 有机半导体材料物理基础	212
5.2.2 有机太阳能电池工作原理	215
5.2.3 有机太阳能电池内部的电荷转移过程	217
5.3 有机太阳能电池材料与器件	221
5.3.1 常用的有机太阳能电池材料	221
5.3.2 有机太阳能电池结构	225
5.4 有机太阳能电池制备工艺	228
5.4.1 制备工艺流程	228
5.4.2 电池的制备系统	232
5.4.3 主要符号	233
思考简答题	233
第 6 章 染料敏化太阳能电池材料及其应用	234
6.1 染料敏化太阳能电池	234
6.1.1 概述	234
6.1.2 结构与工作原理	236
6.2 光阳极材料	238
6.2.1 概述	238
6.2.2 TiO_2 半导体材料	240
6.2.3 其他氧化物半导体材料	247
6.3 染料	251
6.3.1 概述	251
6.3.2 金属络合物	251
6.3.3 卟啉和酞菁染料	255
6.3.4 有机染料	256
6.3.5 染料分子在半导体表面的吸附	259
6.4 其他材料	260
6.4.1 对电极	260
6.4.2 电解质	261
思考简答题	265
参考文献	266

第1章 绪 论

1.1 能源危机

1.1.1 概述

人类社会的一切活动都离不开能源。随着科学技术的不断发展和工业化程度的提高，对能源的消耗和依赖程度也逐渐增强。人类文明的进步与能源的形态和变迁有很大的关系，图 1-1 描述了自 18 世纪中叶工业革命以来，能源形态变迁以及相应的工业制品。自 1769 年詹姆斯·瓦特改良蒸汽机后，煤炭逐渐被用做蒸汽机的燃料而广泛使用，这大大促进了工业文明的早期发展。此后，石油、天然气、电力等新能源形态的发现和逐渐普及，一定程度上奠定了现代文明的基础。

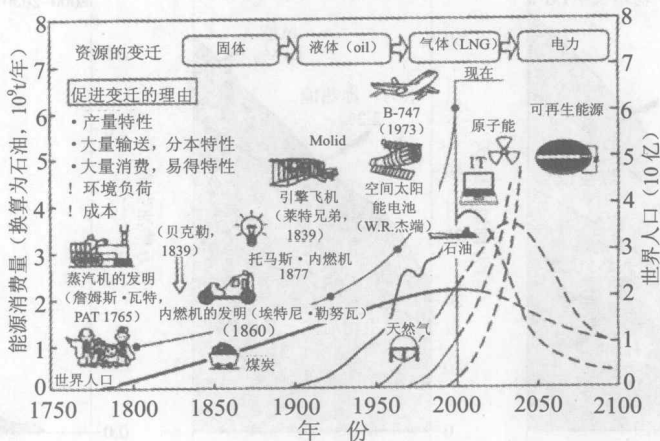


图 1-1 能源形态及其相应的工业文明

能源是一个国家经济增长和社会发展的物质基础，而能源安全则是实现一个国家或地区国民经济持续发展和社会进步所必须的保障。近年来，能源安全也逐渐发展成为国家安全战略的重要部分。

1.1.2 能源危机

根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）在 2009 年 6 月的预测，世界人口将从 2009 年的 60 多亿增加到 2050 年的约 90 亿。同时，人均能源消耗也逐渐增加。这意味着在未来的数十年内，全世界对能源的需求将快速增长。根据埃克森美孚公司（Exxon Mobil Corporation）“2030 年能源展望”报告（Energy Outlook 2030），由于受人口增长和经济增长的驱动，预计全世界能源需求在 2000~2030 年间将增长近 60%。

能源的种类非常多,根据其是否可再生性,可以分为非再生能源和可再生能源。大自然中经过长期的物理化学过程形成的、而短期内又无法恢复的能源,为非再生能源,包括煤炭、石油以及天然气等化石能源和核燃料等。可再生能源是指在自然界中可不断再生、可持续利用的资源,它对环境友好或危害极小且资源分布广泛,主要包括太阳能、水力、风能、生物质能、潮汐能等非石化能源。按照能源的发展和普及历史来分,可以分为常规能源和新能源。常规能源即人类长期利用且在当前应用广泛的主要能源,包括煤炭、石油、天然气、水力等。新能源一般是指近半个世纪以来,人们开始开发并有良好前途但目前因相关技术和成本限制而没有获得广泛应用的能源,如太阳能、地热能、潮汐能、风能等。

在众多种类的能源中,化石能源仍然是人类目前和未来相当长时间内所使用最广泛的能源。图 1-2 为埃克森美孚公司对全球能源需求的预测。到 2030 年,化石能源(石油、天然气和煤炭)预计仍是主要的能源,将占能源总需求的 80%。生物质能、风能和太阳能将快速增长,到 2030 年将约占总能量供应量的 2%。但要使新能源在总能源供应结构中占据更大的份额,则必须解决相应的技术和成本难题。

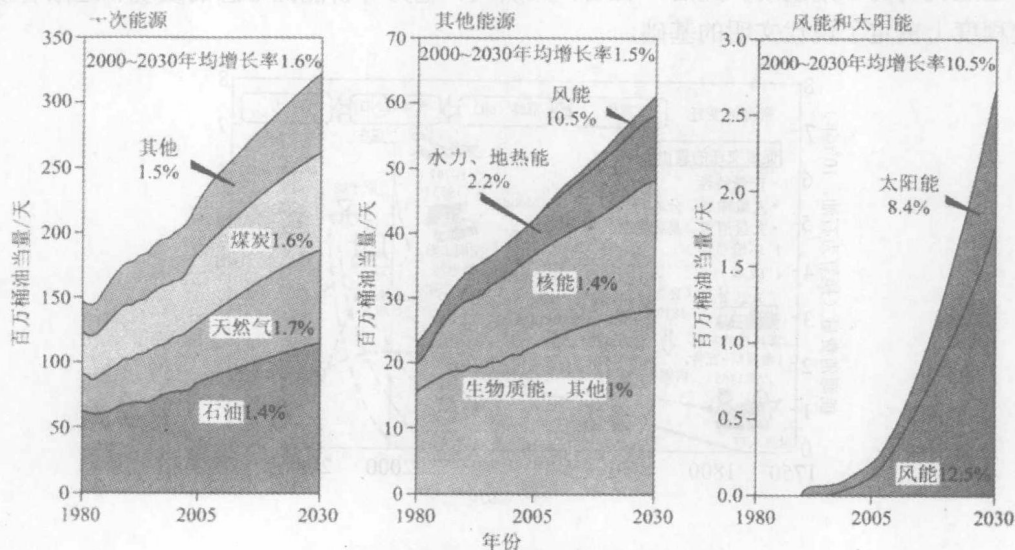


图 1-2 全球能源需求预测

作为主要能源的化石能源,由于其在自然界中的储备有限以及人类对化石能源的快速开发和利用,导致全球化石能源日益枯竭,由此引起了严重的能源危机。图 1-3 所示为几种主要的化石能源的储量和可开采年限。从中可以看出,除了煤炭以外,其余化石能源将在本世纪中叶枯竭。

此外,在能源利用过程中,一个不得不考虑的因素是对环境的可能影响。化石能源的大量使用,带来了二氧化碳的大量排放。将全球消耗能源全部折算成煤,则每年将消耗约 10^{10} 吨标准煤,相应所产生的 CO_2 排放量约为 2.2×10^{10} 吨。这些 CO_2 中的约一半溶解于海洋,另一半则排放到大气中。目前,大气中含有 0.03% 的 CO_2 。即使每年的能源消耗不再继续上升,200 年后大气中的 CO_2 含量将是现在的 2 倍。如果全球能源消耗持续以每年 1% 的速率增长,则 100 年后大气中的 CO_2 浓度就将达到现在的 2 倍。考虑到未来人口的

增长, 大气中 CO_2 浓度的增长速率远大于这一估计值。

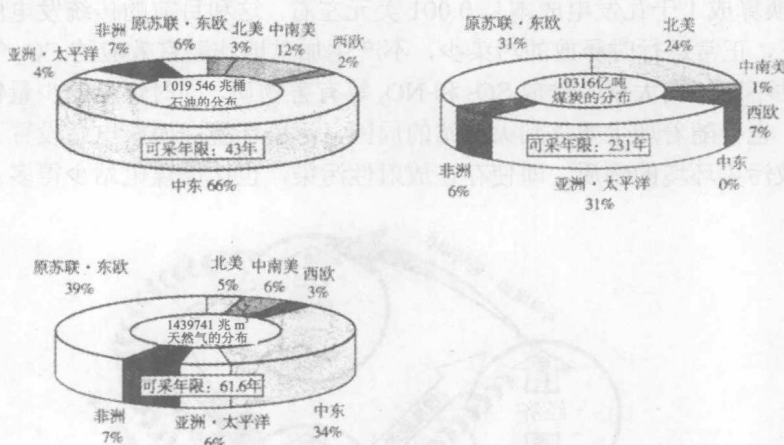


图 1-3 石油、煤炭、天然气的可采储量和可开采年限

大气中 CO_2 浓度不断增加将对气候造成严重的影响, 其中最大的影响就是因温室效应带来地球表面温度的逐渐升高。在同一时间段内, 如果地球所吸收的太阳光谱能量流与从地球向太空辐射的能量流达到平衡, 则地球表面的温度不变。 CO_2 所产生的温室效应导致地球表面温度的升高。

大气中增加的红外辐射吸收的一半是由于人类活动所导致的大气中 CO_2 浓度的增加, 另一半则是由于大气中甲烷、氟化烃和氮氧化物浓度的增加。虽然大气中 CO_2 浓度的上升导致的地球表面温度不可能升高到金星表面的温度, 但地球表面温度升高带来的很多反馈效应却不可忽视。随着海洋温度升高, 溶解在海洋中的甲烷将被大量释放, 而甲烷是一种比 CO_2 更有效的温室气体。

化石能源的广泛开发和利用长期以来支撑着人类物质文明的不断发展, 而人类文明的发展也加速了化石能源的枯竭和对自然环境的破坏。为此, 要实现 21 世纪人类文明的可持续发展, 如何解决图 1-4 所示的“3E”三重矛盾问题, 则成为人类共同面对的一个重要课题。也就是说, 在经济 (economy) 发展的过程中, 能源 (energy) 消耗带来的化石能源日益枯竭, 使经济发展的可持续性受到威胁; 随着能源的消耗, 以化石能源为主体的资源消耗将对地球环境 (environment) 造成破坏, 这也使经济发展付出了极大的成本。解决“3E”矛盾的方法如图 1-4 中虚线所示, 这就是积极开发并推广可再生清洁能源, 以实现经济、能源与环境之间的良性循环。

非再生能源中, 核燃料是另一类重要的能源。核能可以分为三类: (a) 裂变能, 重元素 (如铀等) 的原子核发生分裂时释放出来的能量; (b) 聚变能, 由轻元素 (氘和氚) 原子核发生聚合反应时释放出来的能量; (c) 原子核衰变时发出的放射能。其中, 利用核反应堆中核裂变所释放的热能进行发电, 是核能的主要利用形式。

地球上比较丰富的核资源, 核燃料有铀、钍、氘等, 其中铀的储量约为 417 万吨。地球上可供开发的核燃料资源及其可提供的能量, 是矿石燃料的 10 多万倍。核能应用作为缓和世界能源危机的一种经济而有效的措施有许多优点: 第一, 核燃料能量密度比化石能源高上几百万倍, 1000 克铀释放的能量相当于 2400 吨标准煤释放的能量, 故核电厂

所使用的燃料体积小、运输与储存都很方便；第二，发电成本低，每一磅铀的成本，约为 20 美元，换算成 1 千瓦发电成本是 0.001 美元左右，这和目前的传统发电成本比较，便宜许多；第三，正常运行时释放的污染少，不产生加重地球温室效应的 CO_2 气体。以煤为原料的火电站不断地向大气中排放 SO_2 和 NO_x 等有害物质，同时煤里的少量铀、钍和镭等放射性物质，也会随着烟尘飘落到火电站的周围，污染环境。而核电站设置了层层屏障，基本上不排放污染环境的物质，即使存在放射性污染，也比烧煤电站少得多。

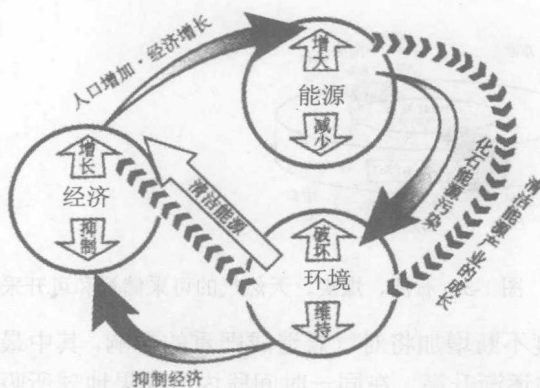


图 1-4 21 世纪人类文明可持续发展面临的“3E”矛盾

由于核能的上述优点，近年来受到了多个国家的高度重视。截至 2008 年 3 月，全世界总计有 439 座核反应堆，另有 35 座正在建造。全世界约有 16% 的电由核反应堆提供，其中，韩国、日本、法国等 9 个国家 40% 的能源都来自于核能。

虽然核能发电在正常运行下对环境污染很低，且核反应堆的事故发生率也很小，但一旦发生泄漏事故，所带来的损失却难以估量。1986 年 4 月 26 日当地时间 1 点 24 分，苏联的切尔诺贝利核能发电厂发生严重核泄漏及爆炸事故。事故导致 31 人当场死亡，上万人由于放射性物质的远期影响而致命或身患重病，至今仍有受放射线影响而导致畸形胎儿出生的事件发生。这是有史以来最严重的核事故。此次事故产生的放射性尘降物数量是在广岛投掷的原子弹所释放的 400 倍。外泄的辐射尘随着大气飘散到苏联的西部地区、东欧地区、北欧的斯堪的纳维亚半岛。乌克兰、白俄罗斯、俄罗斯受污染最为严重。由于风向的关系，据估计约有 60% 的放射性物质落在白俄罗斯的土地。因事故直接或间接死亡的人数难以估算，且事故后的长期影响到目前为止仍是个未知数。切尔诺贝利核泄漏事故被称之为历史上最严重的核电站灾难，此后人类对核能利用的步伐开始放缓。

日本的福岛核电站是目前世界上最大的核电站，由福岛一站、福岛二站组成，共 10 台机组（一站 6 台，二站 4 台），均为沸水堆。日本经济产业省原子能安全保安院于 2011 年 3 月 12 日宣布，日本受 9 级特大地震影响，福岛第一核电站的放射性物质发生泄漏。2011 年 4 月 11 日 16 点 16 分福岛再次发生 7.1 级地震，日本再次发布海啸预警和核泄漏警报。2011 年 4 月 12 日，日本原子能安全保安院根据国际核事件分级表将福岛核事故定为最高级 7 级。虽然该次事故对环境造成的影响以及带来的经济损失还需要进一步评估，但这种不可控自然因素对核能利用的安全性，再次成为世界各国关注的焦点。这使核能在

缓和世界能源危机上的前景蒙上了阴影。

1.2 可再生能源与太阳能

1.2.1 可再生能源

世界能源消耗量的持续增加,使全球范围内的能源危机越来越严重。传统化石能源日趋枯竭也导致其价格持续飙升,严重影响了各国经济发展的可持续性。因此,减少对传统化石能源的依赖,开发可再生能源,实现能源的可持续发展,已经成为世界各国发展的重大战略方向之一。欧盟规定,可再生能源在一次能源消耗中的比例在2020年将是2010年的2倍,到2050年,可再生能源比例将高达50%。美国提出2025年可再生能源的生产将达到2000年的2倍。印度、东南亚、拉美等国家和地区,都相继提出了各自的可再生能源发展规划。

可再生能源主要包括水力、风能、生物能、潮汐能、太阳能等非石化能源。表1-1给出了全世界可再生能源资源潜力。由于受相应的技术和成本因素等的影响,可再生能源目前的普及率仍然很低。

表 1-1 世界可再生能源资源潜力 (10^{15} J/年)

种类	当前用量	技术潜力	理论潜力
氢能	9	50	147
生物能	50	>276	2900
太阳能	0.1	>1575	3900000
风能	0.12	640	6000

空气流动所形成的动能称为风能。与化石能源不同,风能是一种可再生、清洁、储量很大的能源。风能发电是一种没有环境污染的优质绿色能源。风能储量也非常巨大。据有关气象组织估算,地球上风能资源约为水电资源的10倍,高达每年53千亿瓦时,理论上仅仅1%的风能就可以满足人类现代能源的需要。风力发电的原理是,利用风力带动风车叶片旋转,再通过增速机将旋转的速度提升,以达到快速推动发电机转子运转进而发电的目的。由于风速和风向的随机性、风能分布的分散性、能量密度低等特点,风能发电看似原理简单但工程应用必须解决一系列的关键技术。风能发电技术是一种涉及气象学、空气动力学、结构动力学、控制技术、材料科学、机电和电气工程等多个学科领域的高新技术,其中的关键技术仅有丹麦、德国、美国等几个国家掌握。风能发电技术的高度复杂性,也使目前风能发电仅仅在德国、美国、丹麦等少数国家具有较高的普及率。能源危机和日益突出的环境问题,也促使越来越多的国家加入到风能开发的行列,风电装机容量也越来越大。表1-2所示为2006年末几个主要国家的风电装机容量。我国在风能发电技术中处于相对落后的水平,缺乏自主知识产权的核心技术,在很大程度上依赖于国外引进技术,这在一定程度上限制了我国风能发电的普及率。

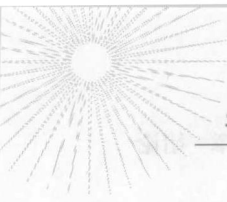


表 1-2 2006 年末各国风电装机容量

国家	装机容量 (MW)	国家	装机容量 (MW)
德国	20622	意大利	2123
西班牙	11625	英国	1963
美国	11603	加拿大	1459
印度	6270	荷兰	1560
丹麦	3136		

生物质能 (biomass energy) 是指存储在以光合作用生成的有机物中的能量,即以生物为载体能量。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,同时也是唯一一种可再生的碳源。目前世界上生物质总量高达 6.9×10^{17} 千卡/年,但利用率仅为 3%。在美国,生物质能利用占一次能源消耗总量的 4%。在巴西,生物质能利用量约占 25%。

生物质能的利用方式主要包括直接燃烧和发电、燃料乙醇、生物柴油、沼气等。美国在生物质能发电方面处于领先地位,是美国仅次于水力发电的第二大可再生能源产业,相关发电装置装机容量达 750 千瓦。其中,加利福尼亚州 40% 的电力供应来自于生物质发电。此外,瑞典和芬兰等北欧国家利用废木材发电的产业也很发达。瑞典的生物质能发电在 2000 年已达到其总发电量的 19%。

采用含糖和淀粉的农作物(如甘蔗、玉米、小麦等)通过发酵生产乙醇然后用作汽车燃料,也是生物质能的一种重要利用方式,其所涉及的技术已经成熟并逐渐得到大规模应用。

生物柴油 (biodiesel fuel) 是指以油料作物、野生油料植物和工程微藻等水生植物油脂以及动物油脂、餐饮垃圾油等为原料,在 $230 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 下进行酯化反应,制成以脂肪酸甲酯或乙酯为主要成分、可代替石化柴油的再生性柴油燃料。生物柴油具有良好的环保性(含硫量低)、较好的发动机低温启动性(无添加剂使凝固点达 -20°C)、较好的安全性(闪点高于化石柴油)、良好的燃料性能(生物柴油的十六烷值高于化石柴油,燃烧性能优于普通柴油)。基于上述优点,生物柴油具有广阔的发展前景。目前,生物柴油使用最多的是欧洲,已占其成品油市场的 5%。

虽然生物质能作为一种可再生能源具有诸多优点,但以目前的技术水平而言,仍然存在几个明显的缺点。首先,以高糖高淀粉农作物、植物油脂为主要原料的燃料乙醇和生物柴油的成本,仍然高于传统的化石能源。表 1-3 给出了燃料乙醇和生物柴油几种典型原料及生产成本,总体而言,燃料乙醇和生物柴油的总成本相比于化石能源没有明显的优势。

其次,燃料乙醇和生物柴油的大量普及,可能危害全球粮食安全。目前,世界主要国家投入商业化生产的生物燃料原料主要是玉米、棕榈、柳枝稷等这样的“高投入低生物多样性 (high-input and low-diversity, HILD)”系统,需要大面积种植能源作物,而可用于能源作物种植的土地面积是有限的,因此势必会造成农用土地竞争加剧,产生与粮食生产和

牲畜饲料争夺空间和资源的现象，即与粮争地、与人争地，影响到许多国家的粮食安全，尤其是对于中国、印度这些人多地少的国家，更是一种较大的威胁。美国近年来生物燃料发展迅猛，但由此也造成 2007 年玉米的市场价格达到历史最高纪录，比 2006 年的价格翻了一番。可见，生物燃料发展给粮食安全系统带来了重大冲击。

表 1-3 不同原料的燃料乙醇和生物柴油成本比较

原料	产品种类	总成本 (美元/升)	原料成本 (美元/升)	生产成本 (美元/升)
玉米(美国)	燃料乙醇	0.56	0.23	0.33
小麦(欧洲)	燃料乙醇	0.75~1.27	0.22~0.34	0.53~0.93
甜菜(欧洲)	燃料乙醇	0.83~1.22	0.20~0.32	0.63~0.90
甘蔗(巴西)	燃料乙醇	0.467	0.127	0.34
柳枝稷(美国)	燃料乙醇	0.517~0.627	0.087~0.097	0.43~0.53
大豆油(美国)	生物柴油	0.86~1.28	0.38~0.55	0.48~0.73
菜籽油(欧洲)	生物柴油	0.65~1.40	0.30~0.60	0.35~0.80
麻风树(印度)	生物柴油	~0.94	~0.39	~0.55

最后，生物质能的发展可能危及生物多样性和生态安全问题。以高投入低生物多样性的作物作为生物质能原料，为了获得高产量，往往需要耕地、灌溉、施肥、灭虫、除草等，而这些精耕细作措施可能会导致土地退化，大面积的灌溉也会加剧水资源的短缺，缩短河流生命，并进一步引发一系列的水土流失、生态系统退化等其他环境问题。此外，这种单作制的方式还会直接降低区域的生物多样性，而盲目大量种植生产生物燃料所需的生物质能源作物，还可能会导致一系列生物入侵问题。

水，作为一种丰富的自然资源，既可以为人直接使用（如灌溉），也是重要的能量资源（即水能）。广义的水能资源包括潮汐能、河流水能等。水能作为可再生能源，主要用于水力发电，具有价廉、清洁的优点，是目前可再生能源中应用历史最长、技术最成熟、应用最广泛的能源。虽然水电工程具有很好的防洪、航运、发电和环境效益，但是水电建设尤其是大型水电工程也会带来一些负面影响，如土地淹没、搬迁移民、影响生物多样性等。随着环境保护意识的增强，环境制约是当前水电发展的主要障碍。

1.2.2 太阳能

太阳作为距离地球最近的恒星，是一个由炽热气体构成的巨大球体，中心温度约 10^7 K，表面温度也接近 5800K。太阳内部处于高温高压状态，不停地进行着热核反应：由氢聚变为氦。据估算，每秒钟约有 6×10^{11} kg 的氢转变为氦，由此释放出的巨大能量不断从太阳向宇宙辐射，辐射功率高达 3.6×10^{20} MW/s，其中约 22 亿分之一辐射到地球上。尽管太阳能中只有很少一部分辐射到地球表面，但其数量仍然巨大，每年辐射到地球表面的太阳能

能量约为 $1.8 \times 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，这是地球人类年消耗能量的几万倍。

地球上绝大部分能源都源于太阳辐射。风能是由于受到太阳辐射强弱程度不同使大气形成温差和压差，从而造成气流的流动所致。水能的来源也与太阳辐射有关，太阳辐射将地球表面（包括海洋等水域）的水分加热蒸发，形成雨云然后降雨形成水资源。化石能源和生物质能都与地球上植物所吸收的太阳辐射有关。图 1-5 为地球接受的太阳辐射能量及其分配示意图。

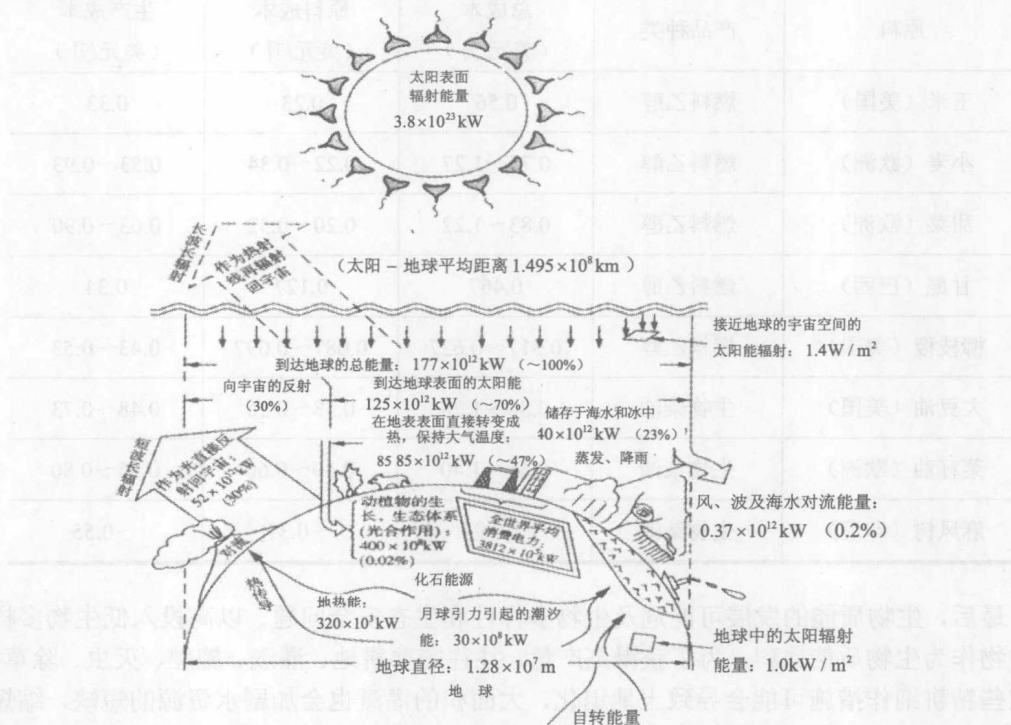


图 1-5 地球表面接受的太阳辐射能量及其分配示意图

与常规能源和核能相比，太阳能具有以下优点：

- (1) 广泛性。到达地球表面的太阳辐射分布极为广泛，无需运输或输送，就地可用。
- (2) 清洁性。太阳辐射作为能量资源，既不会释放任何有害气体，也没有任何污染环境或人类健康的废料，是真正的清洁能源。
- (3) 永久性。太阳辐射至今已经持续了几十亿年，按照目前太阳质量的损耗速率，太阳的热核反应可进行 6×10^{10} 年，对人类的历史而言，太阳能显然是“取之不尽、用之不竭”的可再生清洁能源。

由于具有上述优点，使太阳能在可再生能源中占有非常重要的地位，图 1-6 为 1990～2008 年，全球一次能源供应量 (TPES) 以及几种主要的可再生能源的年均增长率。图 1-6 表明：全球 TPES 和可再生能源的增长速率相同，而其中太阳能（光伏和光热）的增长速率最快。太阳能在未来能源结构中也具有非常重要的地位。世界自然基金会在 2010 年底提出了“到 2050 年全部使用可再生能源”的设想，并预计到 2050 年，光伏发电将提供 29% 的电力能源，是所有可再生能源中比例最大的组成部分。

到达地球的太阳辐射能量巨大，每个国家都可以接受其中的一部分，但各个国家接受