

高等学校教材



New Energy Technology

新能源技术

翟秀静 刘奎仁 韩庆 编著

3 第三版
EDITION



化学工业出版社

高等学校教材

新能源技术

第三版

翟秀静 刘奎仁 韩庆 编著



化学工业出版社

·北京·

《新能源技术》系统地介绍了太阳能、氢能、核能、化学电源、生物质能以及风能、海洋能、地热能、可燃冰等新能源的开发与应用技术,包括技术原理、工艺流程、设备和发展趋势等。其中,太阳能技术主要介绍太阳能-热能交换技术、太阳能-光电转换技术、太阳能-化学能转化技术。氢能技术包括氢的制取、氢的储存与运输、氢的应用、氢的安全性等内容。核能技术包括核电技术、核供热、核废物处理与核安全等内容。化学电源主要介绍金属氢化物镍电池、锂离子二次电池、燃料电池、铝电池、储能电池。

《新能源技术》可以作为高等学校能源、冶金、化学、化工、材料、环境和生化等相关学科的本科生、研究生教材,也可供相关学科的研究人员参考。

木对熟指商

第三版

清华大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新能源技术/翟秀静,刘奎仁,韩庆编著. —3版.
北京:化学工业出版社,2017.2
高等学校教材
ISBN 978-7-122-28786-1

I. ①新… II. ①翟… ②刘… ③韩… III. ①新能
源-技术-高等学校-教材 IV. ①TK01

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第302754号

责任编辑: 窦臻 林媛
责任校对: 王静

装帧设计: 王晓宇

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 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张20 字数533千字 2017年3月北京第3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: 45.00元

版权所有 违者必究

新能源技术是高技术的支柱。新能源技术包括太阳能技术、氢能技术、核能技术、化学电源技术、生物质能技术、风能技术及地热能技术、海洋能技术等。新能源技术的开发利用,打破了以石油、煤炭为主体的传统能源观念,开创了能源的新时代。

截至2015年,全球超过130个国家实施了新能源扶持政策。新能源产业已经成为全球化产业,其多元化的发展格局正在逐步深化和发展,未来新能源在全球能源格局中将占据更加重要的地位。

我国政府高度重视发展新能源产业。2015年巴黎气候大会通过的全球气候变化新协定为控制全球气温和温室气体排放设定一系列目标。这些目标将推动世界转向使用更为清洁的新能源。全球掀起了新能源发展的高潮,我国能源结构也发生着深刻调整。截至2015年,我国风电装机容量连续4年世界第一,光伏装机容量首次超过德国跃居世界第一,风电和太阳能发电累计装机容量1.7亿千瓦,占全球的1/4以上。我国计划到2030年,新能源的比重将由目前的11.4%达到20%左右。

《新能源技术》教材自2005年出版以来,受到了广大读者的欢迎与好评。2014年,本教材被辽宁省教育厅选入“辽宁省第二批‘十二五’普通高等教育本科生省级规划教材”。

《新能源技术》(第二版)自2010年出版以来,新能源技术领域发生了许多深刻变化,在太阳能、氢能、核能、化学电池、生物质能、风能、地热能和海洋能等领域均涌现大量的新产品、新技术和新工艺。有鉴于此,作者根据能源技术的新发展,在第二版的基础上修订完成了本教材的第三版。《新能源技术》(第三版)主要就以下内容进行了更新和完善:

在太阳能技术一章,第三版增加了线性菲涅耳式太阳能发电技术,列出了塔式、槽式和碟式太阳能热发电系统分析比较,补充了太阳能海水淡化技术和太阳能汽车技术;增加了石墨烯-硅太阳能电池、钙钛矿太阳能电池和光伏并网发电系统。

在核能技术一章,第三版介绍了近几年核裂变和核聚变技术的进展,重点介绍了我国高温气冷堆和快中子反应堆的技术,介绍了钠快堆和铅快堆技术;同时对核供热、核废处理及核安全的内容做了补充和调整。

化学电源涉及航天领域的发展,也关系到城市的环保问题,近几年备受重视。镍氢电池和锂离子电池在推动电动汽车发展上取得了长足进步,燃料电池和各种储能电池技术发展快速。第三版在化学电源部分增加了橄榄石结构的 LiFePO_4 的锂离子电池正极材料和超级电容器技术;介绍了近几年快速发展的固体聚合物电解质碱性燃料电池;同时更新了微生物燃料电池和储能电池技术的内容。

生物质能是人类最早直接应用的能源,面对秸秆焚烧的困扰和垃圾围城的困局,生物质能技术亟待发展和应用。第三版在生物质能部分增加了垃圾发电技术,补充和完善了生物柴油、沼气的制取技术。

在氢能技术、风能技术及地热、海洋能等章节,第三版重点介绍了近几年的发展,补充了新的内容,例如波浪能发电装置、海洋温差能-太阳能联合热发电的方式、地热发电、地源热泵和干热岩地热资源的开发等。

作者感谢化学工业出版社的支持,感谢给予本书启示及参考的有关文献作者。由于作者水平有限,不当之处恳请读者批评指正。

编著者

2016年10月

能源、材料、信息和生物技术是现代文明的四大支柱，能源是人类生存及发展的物质基础，也是人类从事各种经济活动的原动力。新能源包括太阳能、氢能、核能、生物质能、化学能源、风能、海洋能和地热能等。

太阳能是取之不尽、用之不竭的可再生清洁能源，人类通过光热转换技术、光电转换技术和光化转化技术实现了热发电、蓄热、光伏发电和光化学发电等利用形式。目前太阳能的开发还存在转换效率、成本和使用寿命等一系列问题。

氢能以质量轻、传热高、清洁和来源广等特点展示着诱人的开发前景。氢能的制备、储存和利用目前是世界各国的研究热点，氢能的制备和贮存距离大规模利用还有一定距离。

核能是清洁能源之一，和平利用核能为全球所关注。核能包括核裂变和核聚变。人类已实现对核裂变的控制和利用，但尚未实现可控的核聚变反应。

化学电源是人们生活中应用广泛的方便能源，也是高新技术和现代移动通讯的新型能源。性能优越的金属氢化物-镍电池、锂离子电池和燃料电池是 21 世纪的绿色能源。化学电源的电化学原理、制造技术和发展趋势是新能源开发的重要组成部分。

生物质能是绿色能源，科学家们预计将成为未来可持续新能源系统的重要组成部分。生物质气化技术、生物质液化技术、生物质固化技术和生物质发电技术等的开发和应用是世界各国的研究热点。

风能是太阳热辐射引起的大气流动的动能，是可再生的清洁能源，风力发电是风能利用的主要领域；海洋能、地热能和可燃冰都是巨大的能源。积极开发科学研究，提供开发技术，是实现可持续发展的需要。

人类生活的地球面临着不可回避的压力：人口迅速增长和人类生活质量不断提高；能源需求的大幅增加与化石能源的日益减少；各种能源形式的开发应用和生态环境的门槛提升。时代呼吁新能源技术的高速发展，太阳能、氢能、核能、生物质能、化学能、风能、海洋能和地热能的能量转化、能量储存和能量传输的理论与技术是 21 世纪能源与工程的前沿性课题。

新能源技术与物理、化学、材料、生物、环境、机械、矿物和工程技术等诸多学科相互交叉，节能技术与新能源技术互相渗透。

新能源技术直接对接新能源的开发、应用和商品化进程。作者在总结国内外最新的能源技术的基础上，结合自己的科研成果与积累，编著了《新能源技术》一书。全书共 7 章，翟秀静撰写了第 1 章、第 2 章、第 5 章，刘奎仁撰写了第 4 章、第 6 章，韩庆撰写了第 3 章和第 7 章。

作者感谢化学工业出版社的支持，感谢给予本书启示及参考的有关文献作者。

由于时间仓促，加上作者水平有限，不当之处恳请读者批评指正。

作者

2005 年 6 月

2005年9月,《新能源技术》(第一版)在东北大学和化学工业出版社的支持下出版发行,4年多来新能源技术在全球迅速发展,该书也受到了广大读者的欢迎与好评。

目前,能源问题已经关系到我国经济社会可持续发展的全局。太阳能、风能、生物质能、水能、地热能和海洋能等可再生能源,具有资源分布广、利用潜力大、环境污染小和可永续利用等特点,发展新能源有利于人与自然的和谐发展。从战略高度看,开发环境友好的可再生能源,并使其在保障能源供应中扮演重要角色,已经成为我国可持续能源战略的必然选择。

近年来,我国对新能源技术非常重视,发改委在2008年制定的《“十一五”时期可再生能源发展规划》中提出,到2010年可再生能源在能源消费中的比重达到10%,其中,风电总装机容量达到1000万千瓦,生物质发电总装机容量达到550万千瓦,太阳能发电总容量达到30万千瓦,太阳能热水器总集热面积达到1.5亿平方米。

全球金融危机给可再生能源产业带来了跨越式发展的机遇,而全球气候变暖所导致的灾难性后果更为可再生能源的发展提供了动力,由危机导致的经济转型正在不断引发能源产业的深刻变革,世界各国都把支持可再生能源发展作为恢复经济实现经济可持续发展的重要手段,美欧等国纷纷出台政府投资计划,普遍加大了对可再生能源技术开发和应用的投入,相当数量的政府资金被用于支持对可再生能源技术的超前研究和技术成果的快速转化。

《新能源技术》(第二版)总结了4年来在太阳能、氢能、核能、生物质能、化学能源、风能、海洋能和地热能等领域的新进展,同时在太阳能一章中补充了多晶硅太阳能电池及多晶硅材料制备、聚合物太阳能电池、染料敏化太阳能电池、屋顶计划和并网发电技术;氢能一章更新了适合我国国情的煤气化重整制氢和焦炉气重整制氢技术;核能一章重点介绍了第四代核能技术、高温气冷堆技术和核聚变堆;生物质能一章重点介绍了我国目前加大沼气工程的建设,已形成年产沼气数十亿立方米的能力;化学能源章节中增加了钒电池、微生物燃料电池及有机聚合物锂离子电池等内容;“风能”则单列为一章,同时补充了风机大型化技术。此外,为方便读者的阅读和学习,在每章后均附有思考题。

本书第一版得到了读者给予的大力支持及充分肯定,自2005年出版以来重印多次,几位作者分别收到读者的电话、邮件和短信,讨论与《新能源技术》相关的话题,作者在此表示衷心的感谢。

作者感谢化学工业出版社的支持,感谢给予本书启示及参考的有关文献作者。

由于作者水平有限,不当之处恳请读者批评指正。

编著者

2009年11月

第 1 章 绪论 / 001

- 1.1 能源 / 001
- 1.2 新能源 / 001
- 1.3 新能源技术 / 002

第 2 章 太阳能 / 004

- 2.1 概述 / 004
 - 2.1.1 太阳和太阳辐射能 / 004
 - 2.1.2 到达地球的太阳辐射能 / 005
 - 2.1.3 太阳能的利用 / 006
- 2.2 太阳能-热能交换技术 / 007
 - 2.2.1 太阳能热发电技术 / 007
 - 2.2.2 太阳能供暖技术 / 016
 - 2.2.3 太阳能制冷技术 / 020
 - 2.2.4 太阳能热水系统 / 023
 - 2.2.5 太阳能集热器 / 025
 - 2.2.6 其他太阳能的热利用技术 / 027
- 2.3 太阳能-光电转换技术 / 031
 - 2.3.1 晶体硅太阳能电池 / 034
 - 2.3.2 非晶硅太阳能电池 / 039
 - 2.3.3 新型硅太阳能电池 / 043
 - 2.3.4 化合物半导体太阳能电池 / 043
 - 2.3.5 染料敏化纳米晶太阳能电池 / 048
 - 2.3.6 太阳能电池 (光伏发电) 的发展 / 052
 - 2.3.7 太阳能光伏并网系统 / 054
- 2.4 太阳能-化学能转化技术 / 057
 - 2.4.1 光合作用 / 057
 - 2.4.2 光化学作用——光催化水解制氢 / 058
 - 2.4.3 光电转化——电解水制氢 / 058
 - 2.4.4 太阳能-高温热化学反应 / 058

思考题 / 059

参考文献 / 059

第 3 章 氢能 / 064

- 3.1 氢的制取 / 065
 - 3.1.1 化石燃料制氢技术 / 065
 - 3.1.2 电解水制氢 / 077
 - 3.1.3 生物制氢技术 / 083
 - 3.1.4 太阳能光解水制氢 / 088
 - 3.1.5 热化学分解水制氢 / 091

- 3.1.6 其他制氢技术 / 094
- 3.1.7 氢气提纯 / 096
- 3.2 氢的储存与输运 / 097
 - 3.2.1 储氢技术 / 098
 - 3.2.2 氢的输运 / 107
- 3.3 氢的应用 / 108
 - 3.3.1 氢在燃气轮机发电系统中的应用 / 108
 - 3.3.2 氢在内燃机中的应用 / 110
 - 3.3.3 氢在发动机上的应用 / 115
- 3.4 氢的安全性 / 116
 - 3.4.1 泄漏性 / 116
 - 3.4.2 氢脆 / 117
 - 3.4.3 氢的扩散 / 117
 - 3.4.4 氢的可燃性 / 118
 - 3.4.5 氢的爆炸性 / 119
- 思考题 / 119
- 参考文献 / 120

第4章 核能 / 126

- 4.1 概述 / 126
 - 4.1.1 人类认识和利用核能的历史 / 126
 - 4.1.2 人类利用核能的现状 / 126
 - 4.1.3 核能应用的基础知识 / 128
 - 4.1.4 核能的优势及用途 / 129
- 4.2 核电技术 / 132
 - 4.2.1 核裂变反应堆 / 132
 - 4.2.2 核聚变装置 / 143
- 4.3 核供热 / 148
 - 4.3.1 常压深水池供热反应堆 / 149
 - 4.3.2 常压壳式供热堆 / 151
 - 4.3.3 核供热堆的其他用途 / 153
 - 4.3.4 核供热堆前景展望 / 153
- 4.4 核废物处理与核安全 / 154
 - 4.4.1 核废物的管理及处置 / 154
 - 4.4.2 核安全 / 159
- 思考题 / 160
- 参考文献 / 160

第5章 化学电源 / 164

- 5.1 金属氢化物镍电池 / 165
 - 5.1.1 MH/Ni 电池的工作原理 / 165
 - 5.1.2 MH/Ni 二次电池的结构与性能 / 166
 - 5.1.3 MH/Ni 电池的性能 / 166
 - 5.1.4 MH/Ni 二次电池的制造工艺 / 167

- 5.1.5 MH/Ni 电池的材料 / 170
- 5.1.6 MH/Ni 电池的发展 / 170
- 5.2 锂离子二次电池 / 171
 - 5.2.1 锂离子电池的工作原理 / 171
 - 5.2.2 锂离子电池的结构 / 171
 - 5.2.3 锂离子电池的性能 / 172
 - 5.2.4 锂离子电池的制备工艺 / 173
 - 5.2.5 锂离子电池的材料 / 174
 - 5.2.6 有机聚合物锂离子电池 / 177
 - 5.2.7 超级电容器 / 177
 - 5.2.8 锂离子电池的发展 / 178
- 5.3 燃料电池 / 178
 - 5.3.1 碱性燃料电池 (AFC) / 179
 - 5.3.2 磷酸型燃料电池 (PAFC) / 181
 - 5.3.3 质子交换膜燃料电池 (PEMFC) / 184
 - 5.3.4 熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC) / 190
 - 5.3.5 固体氧化物燃料电池 (SOFC) / 194
 - 5.3.6 微生物燃料电池 / 199
- 5.4 铝电池 / 201
 - 5.4.1 水溶液电解质铝电池 / 201
 - 5.4.2 铝-空气电池 / 203
 - 5.4.3 非水溶液电解质铝电池 / 205
- 5.5 储能电池 / 206
 - 5.5.1 全钒液流电池 / 207
 - 5.5.2 钠硫电池 / 210
- 思考题 / 212
- 参考文献 / 213

第6章 生物质能 / 218

- 6.1 生物质能概述 / 218
 - 6.1.1 生物质的特点 / 219
 - 6.1.2 生物质能分类 / 219
 - 6.1.3 生物质能利用的现状 / 220
 - 6.1.4 生物质能利用技术的发展现状 / 220
- 6.2 生物质能转化技术 / 221
 - 6.2.1 物理转换技术 / 221
 - 6.2.2 生物质化学转化技术 / 226
 - 6.2.3 生物转换技术 / 245
- 6.3 生物质利用新技术 / 261
 - 6.3.1 垃圾处理技术 / 261
 - 6.3.2 沼气发电技术 / 262
 - 6.3.3 生物柴油生产技术 / 264
 - 6.3.4 生物质制氢技术 / 268
 - 6.3.5 生物质能的前景 / 273

思考题 / 274

参考文献 / 275

第7章 风能 / 278

7.1 风能利用的发展历程 / 278

7.2 风力发电系统 / 279

7.2.1 关于风能的理论计算 / 279

7.2.2 风机的工作原理 / 280

7.2.3 风机系统 / 281

7.2.4 风机技术 / 285

7.3 风力发电场地 / 290

7.3.1 海上风力发电 / 290

7.3.2 高空风力发电 / 291

7.3.3 低风速风力发电 / 291

7.3.4 风力发电存在的问题 / 292

7.4 我国风能的发展历程 / 292

7.4.1 我国风能的发展历史 / 292

7.4.2 我国风能存在的问题 / 292

7.4.3 我国风能的发展前景 / 293

思考题 / 294

参考文献 / 294

第8章 其他新能源 / 295

8.1 海洋能 / 295

8.1.1 潮汐能发电 / 295

8.1.2 波浪能发电 / 298

8.1.3 温差能发电 / 299

8.1.4 盐差能发电 / 302

8.2 地热能 / 302

8.2.1 地热能资源 / 302

8.2.2 地热能的利用 / 303

8.2.3 地热能的开发 / 304

8.2.4 地热能的发展 / 305

8.3 可燃冰 / 305

8.3.1 可燃冰的形成 / 306

8.3.2 可燃冰的性质 / 306

8.3.3 可燃冰的开采技术 / 306

8.3.4 可燃冰的全球分布与储量 / 307

8.3.5 我国可燃冰的现状与发展 / 308

思考题 / 308

参考文献 / 308

附录 相关单位的换算关系 / 310

第 1 章

绪论

能源与新材料、生物技术、信息技术一起构成了文明社会的四大支柱。能源是推动社会发展和经济进步的主要物质基础，能源技术的每次进步都带动了人类社会的发展。随着煤炭、石油和天然气等化石燃料资源面临不可再生的消耗和生态环境保护的需要，新能源的开发将促进世界能源结构的转变，新能源技术的日臻成熟将带来产业领域的革命性变化。

1.1 能源

能源分为一次能源和二次能源。一次能源包括三大类：

- ① 来自地球以外天体的能量，主要是太阳能；
- ② 地球本身蕴藏的能量，如海洋和陆地内储存的燃料、地球的热能等；
- ③ 地球与天体相互作用产生的能量，如潮汐能。

能源有多种分类方法，按形成方式可分为一次能源（如煤、石油、天然气、太阳能等）和二次能源（电、煤气、蒸汽等）；按循环方式可分为不可再生能源（化石燃料）和可再生能源（生物质能、氢能、化学能源）；按使用性质可分为含能体能源（煤炭、石油等）和过程能源（太阳能、电能等）；按环境保护的要求，能源可分为清洁能源（又称绿色能源，如太阳能、氢能、风能、潮汐能等，也包括垃圾处理等）和非清洁能源；按现阶段的成熟程度可分为常规能源和新能源。

1.2 新能源

新能源与常规能源是一个相对的概念，随着时代的发展，新能源的内涵不断变化和更新。目前，新能源主要包括太阳能、氢能、核能、化学能、生物质能、风能、地热能和海洋能等。新能源的开发是解决能源危机和环境保护问题的金钥匙。

(1) 太阳能 太阳能是人类最主要的可再生能源。太阳每年输出的能量约为 1.73×10^{11} MW，到达地球的能量大约是总能量的 22 亿分之一，其中辐射到地球陆地上的能量大约为 8.5×10^{10} MW。这个数量远大于人类目前消耗的能量的总和，相当于 1.7×10^{18} t 标准煤。

(2) 氢能 氢是未来最理想的二次能源。氢以化合物的形式储存于地球上最广泛的物质——水中，如果把海水中的氢全部提取出来，总热量是地球现有化石燃料的 9000 倍。

(3) 核能 核能是原子核结构发生变化时放出的能量。核能释放包括核裂变和核聚变。核裂变所用原料铀 1g 就可释放相当于 30t 煤的能量，而核聚变所用的氘仅用 560t 就可以为全世界提供一年消耗的能量。海洋中氘的储量可供人类使用几十亿年，同样是“取之不尽，用之不竭”的清洁能源。

(4) 生物质能 生物质能目前占世界能源中消耗量的 14%。估计地球每年植物光合作用固定的碳达到 2000 亿吨，含能量 3×10^{21} J。地球上的植物每年生产的能量是目前人类消

耗矿物能的 20 倍。

(5) 化学能 化学能实际是直接把化学能转变为低压直流电能的装置,也叫电池。化学能已经成为国民经济中不可缺少的重要组成部分。同时化学能还将承担其他新能源的储存功能。

(6) 风能 风能是大气流动的动能,是来源于太阳能的可再生能源。估计全球风能储量为 10^{14} MW,如有千万分之一被人类利用,就有 10^7 MW 的可利用风能,这是全球目前的电能总需求量,也是水利资源可利用量的 10 倍。

(7) 地热能 地热能是来自地球深处的可再生热能。全世界地热资源总量大约 1.45×10^{26} J,相当于全球煤热能的 1.7 亿倍,是分布广、洁净、热流密度大和使用方便的新能源。

(8) 海洋能 海洋能是依附在海水中的可再生能源,包括潮汐能、潮流能、海流能、波浪能、海水温差能和海水盐差能。估计全世界海洋能的理论可再生量为 7.6×10^{13} W,相当于目前人类对电能的总需求量。

(9) 可燃冰 可燃冰是天然气的水合物。它在海底分布范围占海洋总面积的 10%,相当于 4000 万平方公里,它的储量够人类使用 1000 年。

1.3 新能源技术

新能源的分布广、储量大和清洁环保,将为人类提供发展的动力。实现新能源的利用需要新技术支撑,新能源技术是人类开发新能源的基础和保障。

(1) 太阳能利用技术 太阳能利用技术主要包括:太阳能-热能转换技术,即通过转换装置将太阳辐射能转换为热能加以利用,例如太阳能热发电、太阳能采暖技术、太阳能制冷与空调技术、太阳能热水系统、太阳能干燥系统、太阳灶和太阳房等;太阳能-光电转换技术,即太阳能电池,包括应用广泛的半导体太阳能电池和光化学电池的制备技术;太阳能-化学能转化技术,例如光化学作用、光合作用和光电转换等。

(2) 氢能利用技术 氢能利用技术包括制氢技术、氢提纯技术和氢储存与运输技术。制氢技术范围很广,包括化石燃料制氢、电解水制氢、固体聚合物电解质电解制氢、高温水蒸气电解制氢、生物制氢、生物质制氢、热化学分解水制氢及甲醇重整制氢、 H_2S 分解制氢等。氢的储存是氢能利用的重要保障,主要技术包括液化储氢、压缩氢气储存、金属氢化物储氢、配位氢化物储氢、物理吸附储氢、有机物储氢和玻璃微球储氢等。氢的应用技术主要包括:燃料电池、燃气轮机(蒸汽轮机)发电、MH/Ni 电池、内燃机和火箭发动机等。

(3) 核电技术 核电技术主要有核裂变和核聚变。自 20 世纪 50 年代第一座核电站诞生以来,全球核裂变发电迅速发展,核电技术不断完善,各种类型的反应堆相继出现,如压水堆、沸水堆、重水堆、石墨堆、气冷堆及快中子堆等。人类实现核聚变并进行控制其难度非常大,采用等离子体最有希望实现核聚变反应。将等离子体加热到点火温度,采用一定的装置和方法来控制反应物的密度和维持此密度的时间,目前人们使用得最多的是应用磁约束和惯性约束。

(4) 化学电能技术 化学电能技术即电池制备技术,目前以下几种电池研究活跃并具有发展前景:金属氢化物-镍电池、锂离子二次电池、燃料电池(包括碱性燃料电池,简称 AFC;质子交换膜燃料电池,简称 PEMFC;磷酸燃料电池,简称 PAFC;熔融碳酸盐燃料电池,简称 MCFC;固体氧化物燃料电池,简称 SOFC)、微生物燃料电池、铝电池和储能电池等。

(5) 生物质能应用技术 生物质能的开发利用在许多国家得到高度重视,生物质能有可能成为未来可持续能源系统的主要成员,扩大其利用是减排 CO_2 的最重要的途径。生物质能的开发技术有生物质气化技术、生物质固化技术、生物质热解技术、生物质液化技术、生

物柴油技术和沼气技术等。

(6) 风能应用技术 风力发电技术是涉及空气动力学、自动控制、机械传动、电机学、力学和材料学等多学科的综合性高技术系统工程。目前在风能发电领域,研究难点和热点主要集中在风电机组大型化、风力发电机组的先进控制策略和优化技术等。

(7) 海洋能与地热能应用技术 海洋能作为一种特殊的能源,它的能量主要来自潮汐、涌流和波涛的冲击力,温度差及海水中溶解的化学成分。在上述能源中,目前仅有潮汐能被大规模利用,即潮汐能发电技术。波浪能发电、温差能发电和盐差能发电技术仍处于研发阶段。

地热开发技术集中在地热发电、地热采暖、供热和供热水的技术。

第 2 章

太阳能

2.1 概述

2.1.1 太阳和太阳辐射能

太阳是离地球最近的恒星，日地间的距离大约为 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ 。从地球上望去，太阳的张角为 0.0093 弧度 (32°)，乘以日地距离，便得太阳的直径为 $1.4 \times 10^6 \text{ km}$ ，约为地球直径的 10^9 倍。就体积而论，太阳的体积是地球的 130 多万倍。根据万有引力定律，在已知地球质量的情况下，推算出太阳的质量为 $1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，即为地球质量的 33 万倍。太阳的平均密度是 $1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，是地球平均密度的四分之一。

太阳的结构分内部和大气两大部分。自里向外，内部又分为内核、中介层和对流层三个层次；大气可分为光球、色球和日冕三个层次。设太阳内部部分的半径为 R ，在 $(0 \sim 0.23)R$ 的区域内是太阳的核心。核心内的温度高达 $4 \times 10^7 \text{ K}$ ，中心处压力达 $3 \times 10^{14} \text{ kPa}$ ，密度是水的 100 倍，质量占整个太阳质量的 40% 。由于这里温度极高，压力极大，物质离子化并呈等离子态。不同的原子核在这里相互碰撞，引起一系列热核反应，释放出巨大的能量。这部分产生的能量占太阳产生总能量的 90% ，并以对流和辐射的方式向外传递。核反应中产生的射线，在通过其他几个较冷区域时，消耗能量，增加波长，变成 X 射线、紫外线和可见光。

中介层在 $0.23R \sim 0.7R$ 区域，这部分也称为辐射输能区。这里温度下降到 $1.3 \times 10^5 \text{ K}$ ，密度下降到 79 kg/m^3 。从 $0.7R \sim 1R$ 之间的区域称为对流层，对流层的温度下降到 6000 K ，密度为 1 kg/m^3 。

太阳大气的最内层是光球层，这是人们看到的太阳表面，这里的温度为 6000 K ，密度为 10^{-3} kg/m^3 ，厚约 500 km 。光球层由强烈电离的气体组成，并能吸收和发射连续的辐射光谱，太阳能的绝大部分能量都由此辐射到太空。

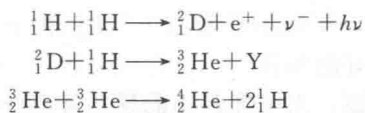
光球层外面是色球层，厚约 $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ km}$ ，大部分由氢和氦组成。这里的温度为 5000 K ，密度只有 10^{-5} kg/m^3 。色球层有时出现极猛烈喷射的日焰，此时太阳的辐射量最大。有些太阳上的电子流到太空，形成太阳风，打击到地球大气层上缘，产生磁暴和极光。

色球层外是伸入太空的银白色的日冕，那里的温度达一百多万开，高度有时可达几十个太阳半径。

由此看来，太阳并不是一个一定温度的黑体，而是许多层不同波长发射和吸收的辐射体。但在应用太阳能系统时，通常把它看成是温度为 6000 K 的黑色辐射体。

太阳物质的组成，就质量说，氢占 78.4% ，氦占 19.8% ，至于种类繁多的金属和其他元素，总计只占 1.8% 。太阳的能源主要来自两种热核反应：一是质子与质子的循环；另一个是碳与氮的循环。

质子-质子循环过程，可写成如下的核反应方程式：



式中, ${}_1^2\text{D}$ 是氘; e^+ 是正电子; ν^- 是中微子, $h\nu$ 是光子。

碳与氮的循环过程由 6 个步骤组成, 它们的核反应方程式如下:



这个核反应中, 参与反应的碳、氮总量不变。

两种热核反应都是使 4 个氢原子核合成 1 个氦原子核 (α 粒子)。在合成的过程中, 质量亏损 0.7%。根据爱因斯坦定律:

$$E = mc^2 \quad (2-1)$$

1kg 质量可转化为 $9 \times 10^{16} \text{J}$ 的能量, 在消耗 1kg 氢元素时转化的能量为:

$$9 \times 10^{16} \text{J} \times 0.7\% = 6.3 \times 10^{14} \text{J} \quad (2-2)$$

太阳的辐射功率为 $3.8 \times 10^{26} \text{W}$, 每秒钟要消耗 $6 \times 10^{11} \text{kg}$ 氢核燃料, 实际质量损失为 $4.2 \times 10^9 \text{kg}$ 。太阳上氢的储量极为丰富, 按目前的辐射水平, 太阳的寿命可达几十亿年。

太阳的能量以电磁波的形式向外辐射, 它的辐射波长范围从 0.1nm 以下的宇宙射线直至无线电波的绝大部分, 人眼所能感觉到的可见光 (波长从 400~780nm) 只占整个电磁辐射的很小部分。

2.1.2 到达地球的太阳辐射能

地球是太阳系的一颗行星, 只接受到太阳总辐射量的 22 亿分之一, 即有 $1.73 \times 10^{17} \text{W}$ 到达地球大气层上缘。由于穿越大气层时的衰减, 最后约有一半的能量, 即 $8.5 \times 10^{16} \text{W}$ 到达地球表面。这个数量相当目前全世界总发电量的几十万倍。

地球在绕太阳运行过程中, 与太阳间的距离变化不大, 到达地球大气层上界的太阳辐射强度几乎是一个常量, 用太阳常数 I_{sc} 来表示。太阳常数的数值是指在平均日地距离时, 地球大气层上界垂直太阳光线的单位面积表面、单位时间内所接受到的太阳能。近年来测得的太阳常数值 $I_{sc} = 1.35 \times 10^3 \text{W/m}^2$, 日地距离的变化造成的影响不超过 $\pm 3.4\%$ 。

太阳辐射穿过地球大气层时, 不仅受到大气层中的空气分子、水汽及灰尘所散射, 而且受到大气中氧、臭氧、水和二氧化碳的吸收。具体地讲, 太阳光谱中的 X 射线及其他波长更短的辐射, 因在电离层被氮、氧及其他大气分子强烈吸收而不能穿越大气到达地表, 大部分紫外线被臭氧吸收; 可见光能量减弱, 主要是地球大气强烈散射引起的; 红外光谱能量减弱, 主要是由于水汽对太阳辐射选择性吸收的结果; 波长超过 $2500\mu\text{m}$ 的辐射, 在大气上界本来就很低, 加上二氧化碳和水对它的强烈吸收, 能到达地面的能量就更小。因此, 到达地面的太阳能, 只考虑 290~2500 μm 的辐射就行了。这部分太阳辐射透过大气层时, 由于大气的散射和吸收, 能量同样衰减。

讨论太阳辐射到达地面的衰减情况也很困难, 其中影响最大的是云产生的散射和吸收。在整个天空被厚云层覆盖时, 到达地表的太阳辐射量还不及入射量的 1/10; 而在积云散开时, 从云侧面面向地面的反射量强, 有时局部地区得到的太阳辐射比无云时还强。可见, 云效应的表现方式非常复杂、变化量也很大。另外, 大气的压强、温度、湿度及灰尘微粒的含量, 对太阳辐射的散射和吸收的影响也不小, 变化也很复杂, 这就使计算到达地表的太阳辐射强度格外困难。目前, 人们根据实际测量和一些经验公式, 将世界部分地区的太阳辐射日总量、月总量和年总量制成表格, 以便查找。从测量结果看, 中国大部分地区的太阳辐射量

都比较大,最高地区在青藏高原,年辐射总量达 $9 \times 10^9 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。如此丰富的太阳能资源,对开发利用太阳能提供了良好的条件。

我国蕴藏着丰富的太阳能资源,太阳能利用前景非常广阔。我国地处北半球亚欧大陆的东部,主要处于温带和亚热带。在我国广阔富饶的 960 万平方公里的土地上,有着非常丰富的太阳能资源(见表 2-1)。

表 2-1 中国太阳能资源类型地区

类别	全年日照时间/h	年总量/ $(10^4 \text{ kJ}/\text{m}^2)$	地 区	地区比较
一类	3200~3300	670~837	宁夏和甘肃北部,新疆南部,山西北部青海和西藏西部,河北西北部,内蒙古	印度,巴基斯坦北部
二类	3000~3200	586~796	宁夏南部,甘肃中部青海东部,西藏东南部	雅加达
三类	2200~3000	502~670	山东,河南,河北中南部,山西南部,新疆北部,吉林,辽宁,云南,陕西北部,甘肃东南部,广东南部,福建南部,江苏北部,安徽北部,台湾西南部	华盛顿
四类	1400~2200	419~502	湖南,湖北,广西,江西,浙江,福建北部,广东北部,陕西南部,江苏南部,安徽南部,黑龙江	米兰
五类	1000~1400	335~410	四川,贵阳	巴黎,莫斯科

据估算,我国陆地每年接受的太阳能辐射量约为 $5.02 \times 10^{22} \text{ J}$,相当于 $1.7 \times 10^{12} \text{ t}$ 标准煤。全国各地年辐照总量达 $3340 \sim 8360 \text{ MJ}/\text{m}^2$,中值为 $5852 \text{ MJ}/\text{m}^2$,年日照时数超过 2200h。

2.1.3 太阳能的利用

太阳能是一种洁净的自然再生能源,取之不尽,用之不竭,而且太阳能是所有国家和个人都能够得以分享的能源。为了能够经济有效地利用这一能源,人们从科学技术上着手研究太阳能的收集、转换、储存及输送,已经取得显著进展,这无疑对人类的文明具有重大意义。

太阳能有直接太阳能和广义太阳能之分。所谓直接太阳能,就是指太阳直接辐射能量。而广义太阳能,即由太阳辐射能所产生的其他自然能,例如水力、风能、波浪能、海洋温差能和生物质能等。它们的利用方式有很大区别,这里的太阳能利用仅指直接太阳能,直接太阳能的利用又分为热利用和光利用两个主要方面。

2.1.3.1 太阳能的热利用

太阳能热利用系统根据温区不同又分为低温太阳能利用系统 (80°C 以下);中温太阳能利用系统 ($80 \sim 350^\circ\text{C}$);高温太阳利用系统 (350°C 以上)。

(1) 低温太阳能利用系统 低温太阳能利用系统的利用主要包括热水器、被动式太阳房、太阳能干燥及太阳能制冷等。近年来,低温太阳能利用系统的主要研究发展任务是降低太阳能集热器的制造成本、提高运行效率和可靠性,简化设备安装的方法。

低温太阳能利用系统中,决定成本和效率的关键部件是平板集热器。目前的平板集热器全部采用铝挤压件,这使制造工艺简化,而且为装配玻璃板和集热板提供了良好的支架。另外,密封技术取得了很大进展,吸热涂料的性能大为提高。这些成果标志着低温太阳能利用技术日趋成熟。

(2) 中温太阳能利用系统 中温太阳能利用主要给工业生产提供中温用热,例如木材的干燥、纺织品的漂白印染、塑料制品的热压成型和化工的蒸馏等。中温太阳能利用系统的集热器都要一定程度的聚光。近几年来,聚光集热器的研制有了很大的进展,开始由实验室走

向市场。但聚光集热器的成本远高于平板集热器，而且中温系统的蓄热比低温系统困难得多，这些问题的解决还有待进一步研究。

(3) 高温太阳能利用系统 高温太阳能利用系统主要用于大型热发电，它的集热系统需建造大型的旋转物面聚光集热器和定日镜场。这两者（特别是定日镜）的投资耗费太大，它的应用目前尚处在实验阶段。近几年来，集中目标在研究技术先进、成本较低的定日镜。

2.1.3.2 太阳能的光利用

太阳能的光利用有两个方面：一是太阳能电池；二是光化学利用。

(1) 太阳能电池 太阳能电池具有方便、不需燃料和无污染等优点，近几年来得到很大发展，有可能成为未来社会能源结构中的主要成员。太阳电池种类繁多，主要光电池系列有单晶硅电池、多晶硅电池、非晶硅薄膜电池、砷化镓电池和硫化镉电池等。

(2) 光化学制氢 光化学制氢有几种途径：一是光化学分解水制氢，这是利用光直接照在电解液上，通过电解质的作用，将其中的水分解为氢和氧；二是光电化学电池分解水制氢，这是通过光电化学电池将太阳能转换成电能；三是太阳光络合催化分解水制氢，这是通过络合物（催化剂）吸收光能，产生电荷分离、转移和集结，并通过一系列偶联过程，最终使水分解为氧和氢。

2.2 太阳能-热能交换技术

通过转换装置将太阳辐射能转换为热能加以利用，称为太阳能-热能转换技术，也称为太阳能光热利用技术。太阳能光热利用主要包括：太阳能热发电技术、太阳能供暖技术、太阳能制冷与空调技术、太阳能热水系统、太阳能干燥系统、太阳灶和太阳房等。

2.2.1 太阳能热发电技术

全球太阳能热发电装机容量稳步上升，截至2013年3月，国外太阳能热发电装机容量超过2.8GW，其具体分布如图2-1所示。西班牙和美国仍是主要市场。在西班牙，共有45座太阳能热发电站处于商业化运行的状态，总装机容量达到2053.8MW。

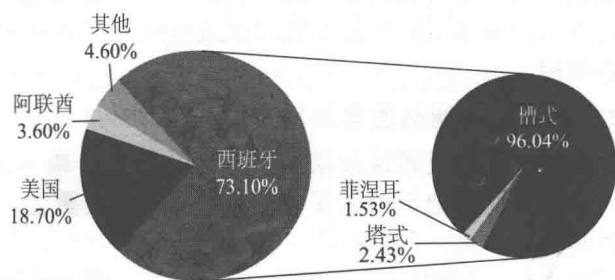


图 2-1 国外太阳能热发电装机容量情况
(数据来自 SolarPACES 执委会会议报告)

目前，国际上已经投入商业化运行的塔式太阳能热发电站共有三座，分别为 PS10 和 PS20 电站 [图 2-2 (a)] 以及 GemaSolar 电站 [图 2-2 (b)]，均位于西班牙境内。

2.2.1.1 太阳能热发电的类型和特点

太阳能发电主要有两种类型：①太阳能热动力发电，利用反射镜或集热器将阳光聚集起来，加热水或其他介质，产生蒸汽或热气流以推动涡轮发电机发电；②利用热电直接转换为电能的装置，将聚集的太阳光和热直接发电。例如温差发电、热离子发电和磁流体发电等，目前太阳能热发电技术主要为热动力发电系统。

太阳能发电的特点是太阳辐射能很容易以极高的效率转换为热能，但把热能转变为功则受到限制。热力学第二定律和卡诺定律阐述了热转换为功的条件和最大转换效率，提高热机效率的主要途径是提高热源温度。太阳能是一种能流密度很低的能源，若要提高经济效益，就必须提高热机效率和规模大型化。