

丛 书 序

材料是人类社会发展的里程碑和现代化的先导，见证了从石器时代到信息时代的跨越。进入新时代以来，新材料领域的发展可谓日新月异、波澜壮阔，低维、高熵、量子、拓扑、异构、超结构等新概念层出不穷，飞秒、增材、三维原子探针、双球差等加工与表征手段迅速普及，超轻、超强、高韧、轻质耐热、高温超导等高新性能不断涌现，为相关领域的科技创新注入了源源不断的活力。

在此背景下，为满足新材料领域对于立德树人的“新”要求，我们精心编撰了这套“新材料领域普通高等教育系列教材”，内容涵盖了“纳米材料”“功能材料”“新能源材料”以及“材料设计与评价”等板块，旨在为高端装备关键核心材料、信息能源功能材料领域的广大学子和材料工作者提供一套体现时代精神、融汇产学共识、凸显数字赋能的专业教材。

我们邀请了来自南京理工大学、北京理工大学、北京科技大学、中南大学、东南大学等多所高校的知名学者组成了优势教研团队，依托虚拟教研室平台，共同参与编写。他们不仅具有深厚的学术造诣、先进的教育理念，还对新材料产业的发展保持着敏锐的洞察力，在解决新材料领域“卡脖子”难题方面有着成功的经验。不同学科学者的参与，使得本系列教材融合了材料学、物理学、化学、工程学、计算科学等多个学科的理论与实践，能够为读者提供更加深厚的学科底蕴和更加宽广的学术视野。

我们希望，本系列教材能助力广大学子探索新材料领域的广阔天地，为推动我国新材料领域的研究与新材料产业的发展贡献一份力量。

陈 光

中国科学院院士
2024年8月于南京

前 言

能源作为人类社会进步不可或缺的基石，其可持续利用尤其是可再生能源(特别是储量庞大且环保的太阳能资源)的深度挖掘，已成为构筑生态文明、推动可持续发展的必由之路。全球范围内对太阳能等可再生能源发展的重视与日俱增，倡导低碳、绿色能源的浪潮正席卷而来。

鉴于太阳能转换技术在清洁能源生产、国防安全、医疗健康、建筑材料革新、汽车工业转型、家电智能化、纺织工业绿色化等众多领域的广泛应用潜力及其带来的巨大社会和经济效益，该领域已吸引了科学界、政府部门及企业界的广泛关注与投入。大量资金与科研力量的汇聚，推动了基础理论研究的深化、应用技术的开发与工程化实践的探索，使得太阳能转换与存储成为当前国内外科研界最为活跃的热点之一。太阳能转换技术这一融合了催化科学、半导体物理学、材料科学及环境科学等多学科精华的新兴领域，正展现出无限生机与活力。

进入 21 世纪以来，为推进创新型和复合型人才培养，围绕“双一流”建设工作及一流本科人才培养目标，高等教育普遍采用通识教育、分流培养的“通才教育”改革方向，在专业人才培养模式向“宽口径、重交叉、厚基础”转变过程中，强调立德树人和课程思政，专业课程的教学目标、教学理念、教学方法等均在持续进行调整和更新。掌握必要的专业基本理论知识、了解本专业的前沿科学技术和发展趋势、形成专业知识体系和培养专业素养成为专业课程教学的主要目标。《光伏材料学》《太阳能电池新技术》《光催化——环境净化与绿色能源应用探索》等多部著作已详细介绍了光伏领域的相关知识，但鉴于新能源领域与光催化的跨学科特性及快速发展的态势，新成果、新应用层出不穷，为了给读者提供最新研究近况，同时满足时代对新能源类专业教学、专业课教改和实践的需要，本书对光伏太阳能电池和光电转换领域的基本原理、最新技术突破以及器件的设计理念进行了相关总结。

本书全面阐述了太阳能电池的基本原理、光电转换领域的最新技术突破、半导体材料的创新制备方法、光催化技术的多元应用场景、目标产物与中间产物的精细分析技术，以及高效光催化反应装置的设计理念。第 1~4 章由程远航编写，第 5、8 章由陈勇编写，第 6、7 章由王文超编写。全书的统稿工作由张静负责，确保了内容的连贯性与准确性。本书将国内外太阳能转换与存储领域的最新动态及编者团队多年的科研精华呈现给读者，希望能促进学术交流，帮助初学者构建对该领域的宏观认知，进而推动我国太阳能转换技术的科研与产业双轮并进。

本书编写过程中参考了一些国内外文献和国际上一些著名高校的公开课内容，编者对相关著作者表示感谢，同时对教材试用过程中学生提出的意见和建议表示感谢。

由于编者知识水平有限，书中难免存在不妥之处，欢迎广大读者批评指正！

编 者

2025 年 10 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 可再生能源及太阳能概论	1
1.1 可再生能源的概述	1
1.1.1 能源的定义及分类	1
1.1.2 可再生能源的定义	3
1.1.3 可再生能源的主要类型	3
1.2 太阳能的来源及利用	5
1.2.1 太阳的结构和核聚变过程	5
1.2.2 太阳辐射到达地球的机制	6
1.2.3 太阳能利用的基本原理	8
1.3 我国太阳能资源分布	9
1.3.1 太阳能资源数据的获取	9
1.3.2 我国不同地区太阳能资源潜力	10
参考文献	11
第 2 章 太阳能光电转换原理及技术	13
2.1 半导体材料简介及光伏效应	13
2.1.1 半导体材料基础	13
2.1.2 光伏效应	16
2.1.3 太阳能电池的分类	17
2.2 第一代太阳能电池原理与技术	18
2.2.1 第一代太阳能电池的发展历史	18
2.2.2 晶硅太阳能电池的结构与设计	20
2.3 第二代太阳能电池原理与技术	22
2.3.1 非晶硅太阳能电池	22
2.3.2 碲化镉太阳能电池	23
2.3.3 砷化镓太阳能电池	23
2.3.4 铜铟镓硒太阳能电池	25
2.4 第三代太阳能电池原理与技术	25
2.4.1 染料敏化太阳能电池	26
2.4.2 有机太阳能电池	26
2.4.3 钙钛矿太阳能电池	27
2.4.4 量子点太阳能电池	28



参考文献	29
第3章 太阳能电池特性	31
3.1 太阳能电池发电原理	31
3.1.1 光电转换过程及原理	31
3.1.2 太阳能电池等效电路	31
3.2 太阳能电池伏安特性曲线	33
3.2.1 I - V 测试曲线	33
3.2.2 短路电流	34
3.2.3 开路电压	35
3.2.4 串联电阻	36
3.2.5 并联电阻	36
3.2.6 最大功率点	37
3.2.7 填充因子	38
3.2.8 光电转换效率	40
3.3 太阳能电池的光谱响应原理及表征	42
3.3.1 光谱响应	42
3.3.2 量子效率	44
3.3.3 外量子效率积分短路电流密度	47
3.3.4 量子效率光谱测试	47
参考文献	49
第4章 太阳能光电转换新技术	50
4.1 太阳能电池材料	50
4.1.1 太阳能电池材料简介	50
4.1.2 钙钛矿材料	51
4.1.3 量子点材料	55
4.2 太阳能电池的新结构	57
4.2.1 隧穿氧化层钝化接触太阳能电池	57
4.2.2 异质结电池	61
4.2.3 背接触电池	64
4.2.4 叠层电池	66
4.3 太阳能电池新理论	68
4.3.1 热载流子太阳能电池	68
4.3.2 聚光太阳能电池	69
4.3.3 热光伏太阳能电池	71
参考文献	71
第5章 太阳能光催化转化原理及技术	73
5.1 太阳能光催化基础	73
5.1.1 植物的光合作用	73
5.1.2 光催化发现历史	74

5.1.3	光催化的基本原理	74
5.2	光催化技术面临的主要问题与解决方案	75
5.2.1	拓宽光谱吸收范围	76
5.2.2	促进光生电荷的分离和迁移	79
5.2.3	促进表面氧化还原反应	84
5.3	光催化反应动力学表征技术	85
5.3.1	瞬态吸收光谱	86
5.3.2	时间分辨荧光光谱	86
5.3.3	空间分辨表面光电势光谱和开尔文探针力显微镜	87
5.3.4	单粒子荧光光谱	88
5.4	光催化反应器	89
5.4.1	悬浮式光催化反应器	90
5.4.2	填充床式光催化反应器	90
5.4.3	膜式光催化反应器	91
	参考文献	92
第 6 章	太阳能光催化转化材料及表征	94
6.1	无机光催化材料	94
6.1.1	氧化物光催化材料	94
6.1.2	硫化物光催化材料	98
6.2	有机光催化材料	104
6.2.1	石墨相氮化碳	104
6.2.2	石墨相氮化碳制备方法	105
6.2.3	金属有机骨架材料	106
6.2.4	有机超分子材料	108
	参考文献	109
第 7 章	太阳能催化转化应用	111
7.1	太阳能制氢技术与原理	111
7.1.1	制氢过程与原理	111
7.1.2	光催化分解水制氢核心步骤	112
7.2	太阳能光催化 CO ₂ 还原制备低碳化学品	113
7.2.1	产率和选择性	115
7.2.2	CO ₂ 转化率、转化数和转化频率	116
7.2.3	表观效率和太阳能到化学能转换效率	116
7.3	太阳能光催化含氮化合物转化制备高附加值产品	118
7.3.1	光催化氮气还原	118
7.3.2	光催化氮气氧化	120
7.3.3	光催化固氮技术评价指标	123
7.3.4	含氮产物测定方法	124
7.4	光催化技术在其他方面的应用	125



7.4.1 污染物降解	125
7.4.2 微生物杀菌净化	126
7.4.3 有机合成	126
参考文献	127
第 8 章 太阳能催化转化新技术	129
8.1 光电催化技术	129
8.1.1 光电催化技术概述	129
8.1.2 光电催化体系的基本结构和分类	129
8.1.3 光电催化体系的工作原理	130
8.1.4 电极-电解液界面	132
8.1.5 光电催化体系的主要性能参数	134
8.1.6 半导体光阳极材料的选择标准	135
8.1.7 提升光电极转换效率的方法	137
8.2 光热催化技术	140
8.2.1 光热催化技术概述	140
8.2.2 光热转换机制	141
8.2.3 光热催化反应分类	143
8.2.4 光热催化材料的设计策略	144
8.3 其他外场增强的光(电)催化新技术	145
8.3.1 磁场增强的光(电)催化技术	145
8.3.2 压电效应增强的光(电)催化技术	145
8.3.3 热释电效应增强的光(电)催化技术	146
8.3.4 铁电效应增强的光(电)催化技术	146
参考文献	148



1.1 可再生能源的概述

1.1.1 能源的定义及分类

能源，即自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。能量是度量物体做功能力或物质运动的物理量。根据物质运动的不同形式，能量可分为机械能、热能、电能、辐射能、化学能和核能等。能量有六种基本属性，即状态性、可加性、转换性、传递性、做功性和贬值性。其中，转换性与传递性是能量利用中最重要的属性，这两个属性使得人类在不同的地点得到所需形式的能量成为可能。

作为能量的来源，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会带来人类社会的发展。在远古时代，人们学会了利用火和保存火种，后来又发明了摩擦生火。2004年，考古学家在以色列发现了人类在79万年前使用火来加工食物和制造工具的证据，这是迄今为止考古发现人类最早使用火的记录。而在周口店遗址中，发现了成层的灰烬和伴生的大量烧骨、烧石，说明北京人在50万~60万年前已经有控制地使用火。火的使用使人类可以食用熟食，扩大了食物来源，增强了体质。火可照明、取暖、驱兽，使人类进一步征服了漫长的黑夜和严寒，减少被猛兽攻击，扩大了生活领域，使人类的种群不断壮大。作为一种生产力，火是从事生产、改进工具、提高生产效率的有效手段，制陶、冶炼金属、酿酒等工艺随着火的使用而出现。火的使用，是人类第一次认识和利用自然规律，自主支配自然力，为人类进入文明时代创造了条件，从而最终将人与动物区分开。这是人类对抗自然界的一个伟大胜利，是社会发展史上的伟大革命，是人类从必然王国向自由王国迈进的一大步。

在此后的漫长岁月中，人类的能源消费一直是以薪柴为主，辅以畜力，以及逐渐使用的简单的水力和风力机械。直到18世纪60年代，英国的产业革命兴起，特别是蒸汽机的发明和使用，使劳动生产力有了很大的提高，同时促进了煤炭勘探、开采和运输业的大力发展。人类的能源消费结构完成了从以薪柴为主到以煤炭为主的转变，称为能源消费结构的第一次大转变。1920年煤炭占世界能源构成的87%，跃居第一位。这一转变使人类的生活和文化水平得到了极大提高，甚至从根本上改变了人类社会的面貌。

石油、天然气资源的开发和利用，开启了人类能源利用的又一新时代。1876年，德国人奥托设计制造了第一台四冲程汽油内燃机，取得了内燃机技术的第一次突破。与蒸汽机相比，内燃机具有体积小、质量轻、效率高等许多突出的优点，更适合在移动式机械上使用。进入20世纪，随着第一次世界大战的爆发，对汽车、坦克、轮船及飞机的需求量大增，这类技术得到了迅猛的发展。从20世纪20年代开始，石油、天然气的消费量逐渐上升。



到 20 世纪 50 年代,随着石油勘探和开采技术的提高,中东、美国和北非相继发现了巨大的油气田,加上石油炼制技术的提高,各种成品油的价格低廉,供应充足。这些因素促使人类的能源消费结构发生了第二次大转变,即从以煤炭为主到以石油、天然气为主的转变。1959 年,石油和天然气在世界能源构成中的比例由 1920 年的 11% 上升到 50%,首次超过煤炭而占第一位,煤炭的比例则由 87% 下降到 48%。1986 年,世界一次能源总消费量中石油占 38%,天然气占 20%,煤炭占 30%,水电占 7%,核电占 5%。这次转变极大地促进了世界经济的繁荣,创造了历史上空前的物质文明,人类进入高速发展的快车道。

能源一般有多种分类方法,具体如下。

(1) 按来源是否与地外天体有关,可将能源分为地球外天体能源、地球本身蕴藏的能源和由地球与其他天体相互作用而产生的能源。来自地球外天体的能源,如太阳能及宇宙射线。这里所指的太阳能,也称为广义太阳能,泛指所有来自太阳的能源。除了太阳的直接辐射外,还包括经各种方式转换而形成的能源,如经生物质转换而形成的各种生物质能和化石能源,如煤炭、石油、天然气、油页岩等;经空气或水转换形成的风能、水能、海洋能等。这类能源是目前人类利用的主要能源。地球本身蕴藏的能源有地热能和核能等。地热能的形式有地热水、岩浆以及地震、火山等。月球对地球的引力产生的潮汐能是地球和其他天体相互作用而产生能源的代表。

(2) 按是否转换,可将能源分为一次能源和二次能源。一次能源是指自然界中现实存在,或由自然条件变化而产生的,并没有经过人为加工转换的能源,又称天然能源。例如,原煤、原油、天然气、天然铀矿、木柴、水能、风能、太阳能、海洋能、地热能等均属这类能源。在生产和生活中,由于工作需要、便于输送或使用等原因,将一次能源经过一定的加工或转换,使其转换成符合使用条件的能源,习惯上将其称为二次能源,又称人工能源。例如,汽油、柴油、重油等各类石油制品,电力,焦炭煤气,水蒸气,燃料乙醇,人工沼气等都属于二次能源。

(3) 按是否为化石,可将能源分为化石能源和非化石能源。化石能源(有时也称为化石燃料、矿物能源、矿物燃料等)指天然矿物源中含有能量的物质,它们所含的能量可通过化学或物理过程得到释放。化石能源可以是固态、液态或气态的物质,如煤炭、石油、天然气和各种核燃料等。非化石能源指除化石能源以外的其他能源。化石能源是目前支撑人类能源体系的主要能源,由于其具有不可再生性,将逐渐枯竭,最终将由非化石能源中的可再生能源替代。

(4) 按利用技术的成熟程度,可将能源分为常规能源和新能源。常规能源是指已经大规模生产和广泛利用的、技术比较成熟的能源,如煤炭、石油、天然气、水能等一次能源,以及煤气、焦炭、汽油、乙醇、电力、蒸汽等二次能源。而那些正在研究和开发,尚未大规模应用的能源则称为新能源,如太阳能、风能、生物质能、海洋能、地热能、氢能等都属于新能源。新能源是在不同历史时期和科学技术水平条件下,相对常规能源而言的。随着煤炭、石油、天然气等常规能源储量的不断减少,新能源将成为世界新技术革命的重要内容,成为未来世界持久能源系统的基础。

(5) 按是否再生,可将能源分为可再生能源和非可再生能源。可再生能源是指在一个相当长的时间范围内,自然界可连续再生并有规律地得到补充的一次能源。常见的可再生能源有:太阳能、生物质能、水能、风能、海洋能、地热能等。非可再生能源指不能连续



再生、短期内无法恢复、可耗尽的一次能源，如煤炭、石油、天然气、核燃料铀等都是经过自然界亿万年演变形成的有限量能源，它们不可重复再生，最终可被用尽。

(6) 按能源在生产和使用过程中对环境的影响，可将能源分为清洁能源和非清洁能源。清洁能源不对环境造成损害或损害程度较小，如太阳能、水能、风能等。而煤炭、石油等对环境损害程度较大的能源，称为非清洁能源。

1.1.2 可再生能源的定义

与非可再生能源相对，可再生能源指的是在自然界中不会随本身的变化或人类的利用而日益减少并有规律地得到补充的能源，如太阳能、风能、水能、生物质能等。用可再生能源取代非可再生能源被认为是人类社会的第三次能源转型，这是因为非可再生能源，如化石能源的大量使用造成的能源枯竭和环境恶化问题日益凸显，人们迫切地想要寻求一种可持续的发展方式。因此，可再生能源越来越受到人们的青睐，在世界各地获得了持续的推广。根据国际可再生能源机构(IRENA)的统计，全球可再生能源总的装机容量从 2010 年的约 1223 GW 增长到 2023 年的约 3372 GW。

1.1.3 可再生能源的主要类型

随着时代的发展，可再生能源的内涵不断变化和更新。目前可再生能源主要包括太阳能、风能、水能、生物质能、氢能、核能、地热能和海洋能等。

(1) 太阳能。太阳能即来自太阳的辐射能量。人类所需能量的绝大部分都直接或间接地来自太阳。太阳的总辐射能量大约为 3.8×10^{23} kW，约二十二亿分之一到达地球大气外层，即 1.7×10^{14} kW，在穿越大气时约有一半被吸收，到达地球表面的太阳能约合标准煤当量 91 万亿 t/a，约为 2023 年世界能耗的 5000 倍，其中陆地上可利用的太阳能约合标准煤当量 8.7 万亿 t/a。

(2) 风能。风能是太阳能的一种新的转换形式，是太阳辐射造成地球表面温度不均匀，引起各地温差和气压不同，导致大气运动而产生的能量。根据《全球风能报告》的统计，2023 年全球风能行业新增装机容量达到创纪录的 117 GW。风能属于一种自然资源，具有总储量大、可以再生、分布广泛、不需运输、对环境没有污染、不破坏生态平衡等诸多特点，但在利用上也存在能量密度低、随机变化大、难以存储等诸多问题，风能的大小取决于风速和空气的密度。在我国西北地区和东南沿海地区的一些岛屿，风能资源非常丰富。利用风力机可将风能用于发电、制热以及风帆助航等。

(3) 水能。水能是天然水流蕴藏的势能和动能等能源的统称，蕴藏量取决于水流的流量与落差。水力发电是水能的主要应用场景，即将水的势能和动能转换成电能。水力发电成本低、可连续再生、无污染，但分布受水文、气候、地貌等自然条件的限制大。

(4) 生物质能。生物质能是新能源和可再生能源的重要组成部分，主要包括自然界可用于能源用途的各种植物、人畜排泄物以及城乡有机废物转换成的能源，如薪柴沼气、生物柴油、燃料乙醇、林业加工废弃物、农作物秸秆、城市有机垃圾、工农业有机废水、其他野生植物和动物粪便等。据计算，地球每年经光合作用产生的物质有 1730 亿 t，其中蕴含的能量相当于全世界能源消耗总量的 10~20 倍，但其利用率不到 3%。从其来源分析，生物质能是绿色植物通过叶绿素将太阳能转换为化学能存储在生物质内部的能量。



生物质能的利用方式主要有直接燃烧、热-化学转换以及生物-化学转换三种不同途径。生物质的直接燃烧在今后相当长的时间内仍将是我国农村生物质能利用的主要方式；生物质的热-化学转换是指在一定温度和条件下使生物质气化、碳化、热解和催化液化，以生产气态燃料、液态燃料和化学物质的技术；生物质的生物-化学转换包括生物质-沼气转换和生物质-乙醇转换等，生物质-沼气转换是有机物质在厌氧环境中，通过微生物发酵产生一种以甲烷为主要成分的可燃性混合气体即沼气，生物质-乙醇转换是利用糖、淀粉和纤维素等不同原料经发酵制成乙醇。

(5) 氢能。氢能是世界新能源和可再生能源领域产业中正在积极开发的一种二次能源。2个氢原子与1个氧原子相结合构成1个水分子。氢气在氧气中易燃烧释放热量，然后氢分子便和氧分子发生化学反应并生成水。由于氢分子和氧分子结合不会产生二氧化碳、二氧化硫、烟尘等大气污染物，所以氢能被看作是未来最理想的清洁能源，有“未来石油”最佳替代能源之称。

国际上的氢能制备原料主要来源于矿物和化石燃料、生物质和水，氢的制取工艺主要有电解制氢、热解制氢、光化学制氢、放射能水解制氢、等离子电化学方法制氢和生物方法制氢等。氢能不但清洁干净、利用效率高，而且其转换形式多样，也可以制成以其为燃料的燃料电池。在21世纪，氢能将会成为一种重要的二次能源，燃料电池也必将成为一种最具有产业竞争力的全新的发电方式。但由于各种主客观原因，氢能的开发利用目前还只是处于一个逐步探索的技术未成熟阶段，其产业化开发也许还有很长的路要走。

(6) 核能。核能是从核反应中释放的能量。核反应可以通过裂变或聚变实现。裂变是当前主要利用的方式，通过分裂重核生成能量。核能具有能量密度高和供能稳定的特点，但也伴随着核废料处理、核安全等问题。聚变是一种更为洁净的核能形式，模仿太阳的方式将轻核融合生成能量，但迄今为止，实现可控聚变仍然是科学技术上的挑战。

(7) 地热能。地热能是来自地球深处且可再生的热能资源。它起源于地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变。地热能储量可能比目前人们所利用的总量多很多倍，而且集中分布在构造板块边缘一带，该区域也是火山和地震多发区。如果地下热量提取的速度不超过补充的速度，那么地热能便是可再生的。目前，地热能在世界很多地区的开发和应用相当广泛。据估计，每年从地球内部传到地面的热能相当于 $10^{14} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，不过地热能的分布相对来说比较分散，开发难度较大。

存储在地下岩石和流体中的地热能资源可以用来发电，也可以为建筑物供热和制冷。地热能资源按赋存形式可分为水热型(又分为干蒸汽型、湿蒸汽型和聚冰型)、地压型、干热岩型和岩浆型四大类；按温度高低可分为高温型(大于 150°C)、中温型($90 \sim 149^{\circ}\text{C}$)和低温型(小于 89°C)三大类。地热能的利用方式主要有地热能发电和地热能直接利用两大类。

不同品质的地热能，作用也是不同的。液体温度为 $200 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 的地热能主要用于发电和综合利用； $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 的地热能主要用于发电、工业热加工、工业干燥和制冷； $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 的地热能主要用于采暖、工业干燥、脱水加工、回收盐类和双循环发电； $50 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 的地热能主要用于温室、采暖、家用热水、工业干燥和制冷； $20 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 的地热能主要用于洗浴、养殖、种植和医疗等。

(8) 海洋能。海洋能是指蕴藏在蓝色大海中的可再生能源，它包括潮汐能、波浪能、潮

流能、海流能、海水温度差能和海水盐度差能等不同的能源形态。海洋通过各种物理过程接收、存储和散发能量,这些能量以潮汐、波浪、温度差、海流等多种形式存在于海洋中。

海洋能按存储能量的形式可分为机械能、热能和化学能。潮汐能、波浪能、海流能、潮流能为机械能,海水温度差能为热能,海水盐度差能为化学能。所有这些形式的海洋能都可以用来发电。

1.2 太阳能的来源及利用

1.2.1 太阳的结构和核聚变过程

太阳是位于太阳系中心的恒星,主要以可见光、紫外线和红外线的形式辐射能量,是地球上生命最重要的能量来源。太阳的半径大约是 695000 km,约是地球半径的 109 倍。它的质量大约是地球的 330000 倍,约占太阳系总质量的 99.86%。太阳的质量大约 3/4 由氢(约 73%)组成,其余的主要是氦(约 25%),也包括氧、碳、氮和铁等元素,但其数量要少得多。日地之间的平均距离约为 1.496×10^8 km,即从太阳发出的光经过 8 min 19 s 后会到达地球。

如图 1-1 所示,太阳的结构分为太阳内部和太阳大气两部分。太阳内部可分为太阳核心、辐射层、差旋层和对流层;太阳大气可分为光球层、色球层、日冕。

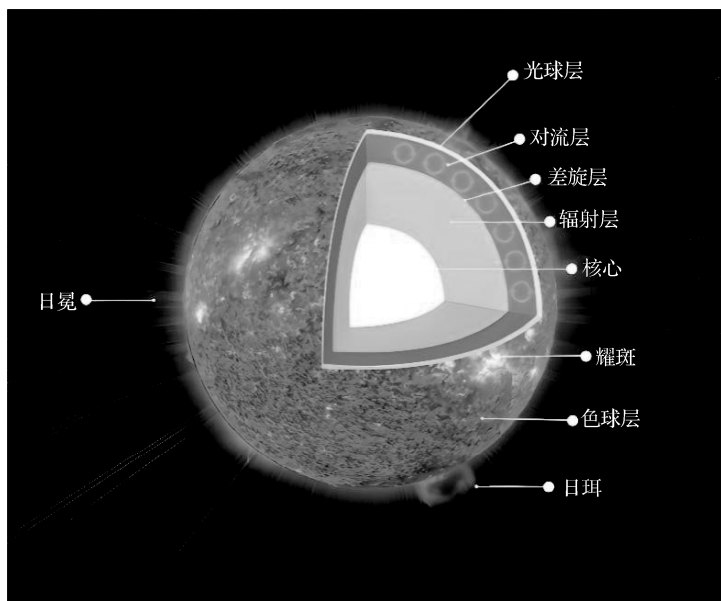


图 1-1 太阳的结构

太阳核心从中心延伸到太阳半径的 20%~25%,这一区域密度最高为 150 g/cm^3 (水密度的 150 倍),温度最高为 150 万 K,是太阳中唯一通过核聚变产生大量热能的区域。约 99%的能量产生于太阳半径的 24%以内,到了半径的 30%后核聚变就几乎完全停止。这种能量通过许多连续的层向外转移加热太阳的其余部分,最终到达太阳光球层后通过辐射(光



子)或平流(大质量粒子)逃逸到太空。辐射层是太阳最厚的一层,从核心外围到大约 70% 的太阳半径,辐射层约占太阳半径的 45%,密度大约从 20 g/cm^3 下降到了 0.2 g/cm^3 ,温度从大约 700 万 K 下降到 200 万 K。因为辐射层的温度梯度不足以驱动对流,在辐射层热量主要通过热辐射传递,辐射层也因此得名。差旋层是辐射层和对流层之间的一个过渡层,是一个在均匀旋转的辐射层和对流层之间的差异旋转层,两层在这种情况下存在大的剪应力会导致连续的水平层相互滑动的效应。太阳的对流层从 70% 太阳半径一直到太阳表面附近。因为这一层中太阳的密度小和温度不够高,热量无法通过热辐射向外传递,所以热对流是对流层最主要的热传递方式。在差旋层加热的物质会吸收热量并膨胀,从而降低其密度并使其上升。因此,将大部分热量因为质量的传递向外输送到上方的太阳光球层。一旦物质在光球层下表面扩散和辐射冷却,其密度就会增加并下沉到对流层的底部,在那里它将会再次从辐射区的顶部吸收热量,对流循环就会继续。在光球层下表面,温度已降至 5700 K,密度仅为 0.2 g/m^3 。

太阳大气,即太阳的可见表面,是人们平时看到的太阳表面。光球层是太阳可见光的发源层,厚度约 500 km。这一层产生的光子通过其上方透明的太阳大气层逃离太阳,成为太阳辐射,即阳光。色球层位于光球层之上,厚度约 2000 km。太阳的温度分布从核心向外直到光球层都是逐渐下降的,但到了色球层,却又反常上升,到色球层顶部时已达 2 万 K。色球层发出的可见光总量不及光球层的 1%,人们只有在发生日全食时食既之前几秒或者生光以后几秒,当光球层所发射的明亮光线被月影完全遮掩的短暂时间内才能观测到色球层。过渡区是在色球层上方的一个薄的(200 km)过渡区,温度从色球层上部附近的 2 万 K 迅速上升到接近 100 万 K 的日冕温度。日冕是太阳的延伸大气层,其体积远大于太阳光球所包围的体积。日冕中存在太阳风,即从太阳向外进入太空的等离子体流。太阳圈则指的是从 20 个太阳半径到太阳系的边缘的稀薄大气层,充满了太阳风等离子体。

太阳核心发生的核聚变反应分为质子-质子链反应和碳氮氧循环。其中,质子-质子链反应是产生能量的主要过程,只有约 1% 的能量来自碳氮氧循环的聚变反应。质子-质子链反应和碳氮氧循环的核反应方程式虽有所不同,但其本质都是 4 个氢原子核合成一个氦原子核(α 粒子)。斯坦福大学通过质能方程计算得到太阳每秒要损耗 470 万 t 质量,然而太阳上的氢储量极为丰富,太阳的寿命仍然可达几十亿年。

1.2.2 太阳辐射到达地球的机制

太阳辐射的波长范围覆盖了从 γ 射线到无线电波的整个电磁波谱。这些不同波长范围的辐射组成了太阳光,每个波长的光都具有不同的特性和应用领域。如图 1-2 所示,太阳辐射的光学频谱接近温度 6000 K 的黑体辐射。可见光中的绿色光通常是太阳光中的最强部分。太阳电磁辐射中 99.9% 的能量集中在红外区、可见光区和紫外区。可见光区约占太阳辐射总能量的 50%,红外区约占 43%,紫外区的太阳辐射能很少,只约占总量的 7%。

在地球大气层外距太阳一个天文单位处(约等于绕太阳旋转轨道的半长轴, 14959 万 km),与阳光垂直的单位面积、单位时间内所得到的太阳总辐射能量称为太阳常数。1981 年,在墨西哥召开的世界气象组织观测仪器和方法委员会第八届会议上通过了太阳常数(称为 S_0)的标准值为 1367 W/m^2 。

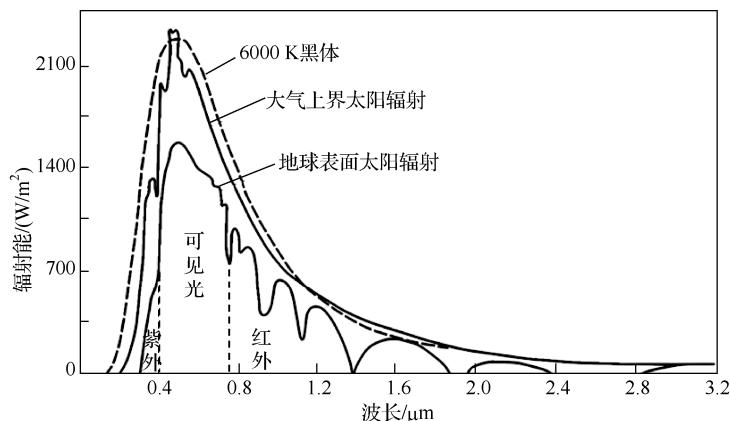


图 1-2 太阳辐射光谱

大气吸收不但影响到达地面的太阳辐射总量，而且影响太阳光谱的能量分布情况。在无大气吸收的情况下，单位时间入射到单位面积的阳光辐射总量为 S_0 。图 1-3 为无大气吸收(AM0)和有大气吸收(AM1.5G)情况下的太阳光谱辐照度分布曲线，在波长 $0.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 波段内的太阳辐射能量约占总辐射能量的 90%，在无大气吸收情况下，光谱峰值约在 $0.5 \mu\text{m}$ 附近。

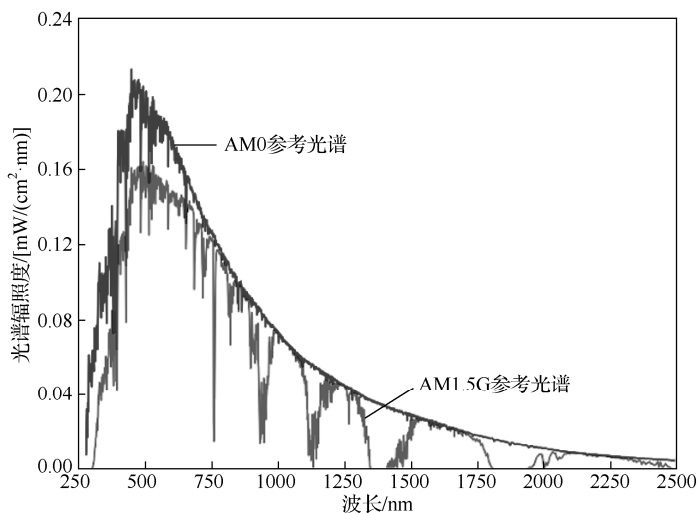


图 1-3 无大气吸收和有大气吸收情况下的太阳光谱辐照度分布

值得注意的是，在地面上的任何地方都不可能排除大气吸收对太阳辐射的影响，而且实际测量的太阳能既和测试的时间、地点有关，也和当地的气象条件有关。因此，大气质量(AM)的概念被引入用来描述大气吸收对太阳辐射总量及其光谱能量分布的影响。当太阳当顶时，垂直于海平面的太阳辐射穿过大气的高度为一个大气质量，太阳在任意位置时的大气质量则定义为从海平面看太阳通过大气的距离与太阳当顶时通过大气的距离之比，即大气质量指的是相当于“一个大气质量”的若干倍，是一个量纲一的量。如图 1-4 所示，根据定义可得大气质量：



$$AM = \frac{Y}{X} = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1-1)$$

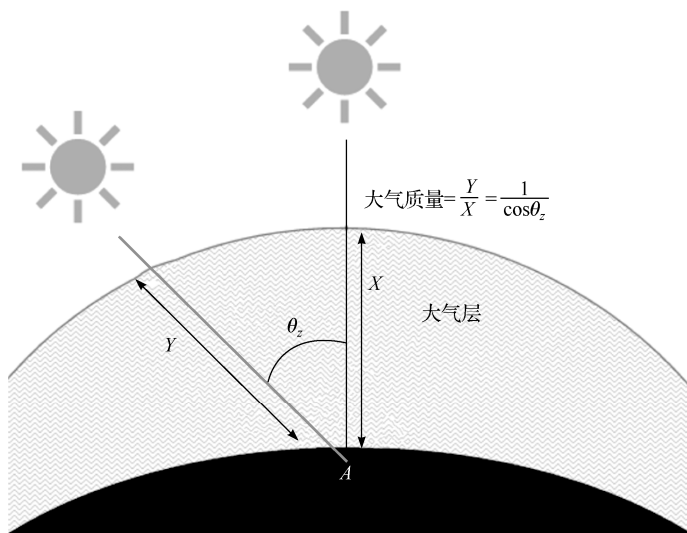


图 1-4 大气质量示意图

太阳当顶时海平面处的大气质量为 1,称为 AM1 条件,AM1 的辐照度约为 1000 W/m^2 。在外层空间不通过大气的情况称为 AM0 条件,表示大气质量为 0。太阳常数 S_0 为 AM0 条件下的太阳辐射总量。随着太阳高度的降低,通过大气的光路径也会相应变长,即大气质量大于 1。通常选择与人类生活现实更贴近的 AM1.5G 条件作为评估地面用太阳能电池及组件的标准。此时 θ_z 约为 48.2° ,为使用方便,国际标准化组织将 AM1.5G 的辐照度定为 1000 W/m^2 。

考虑不同地区大气压力的差异,即反映单位面积上大气柱中所含空气质量不同,如果 A 点不是处于海平面,则大气质量需要做如下修正,即

$$AM = \frac{p}{p_0} \times \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1-2)$$

式中, p 为当地大气压力; p_0 为标准大气压力 101.3 kPa 。

1.2.3 太阳能利用的基本原理

太阳能的定义有广义和狭义之分。广义上,人类使用的绝大多数能源都源于太阳;狭义上,太阳能是指地球表面直接接受的太阳辐射能。本书中提及的太阳能均指的是狭义上的太阳能。太阳能的利用大致可分为热利用和光利用两类。

太阳能的热利用可分为低温(80°C 以下)太阳能利用系统、中温($80\sim 350^\circ\text{C}$)太阳能利用系统以及高温(350°C 以上)太阳能利用系统三类。低温太阳能利用系统的主要部件是平板集热器且系统无需聚光,如太阳能热水器、被动式太阳房、太阳能制冷以及太阳能干燥等。中温太阳能利用系统都需要一定程度的聚光,主要应用是给工业生产提供中温用热,如纺织品的漂白印染、木材的干燥、塑料制品的热压成型和化工的蒸馏等。高温太阳能利用系

统则需要大型的聚光集热器与定日镜场，主要用于大型的光热电站。

太阳能的光利用可分为太阳能光伏发电和太阳能光化学制氢两类。太阳能光伏发电是指利用半导体材料的光生伏打效应，将光能直接转换为电能。用于太阳能光伏发电的器件种类繁多，主要有非晶硅太阳能电池、单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、碲化镉薄膜太阳能电池、铜钢镓硒薄膜太阳能电池、有机太阳能电池、染料敏化太阳能电池、钙钛矿太阳能电池、量子点太阳能电池等。太阳能光化学制氢可分为光催化(photocatalysis, PC)分解水制氢、光电化学(photoelectrochemistry, PEC)分解水制氢和光伏-电催化(photovoltaic-electrocatalytic, PV-EC)分解水制氢三类。其中，PC 系统是利用系统中小颗粒的催化剂直接将光能转换为氢气；PEC 系统是利用光电极将光能先转换为载流子，继而通过载流子的定向运动实现分解水的氧化还原反应；PV-EC 系统是利用太阳能电池先将太阳能转换为电能，然后通过产生的电能将水分解为氢气和氧气。三类系统及其工作原理示意图如图 1-5 所示。

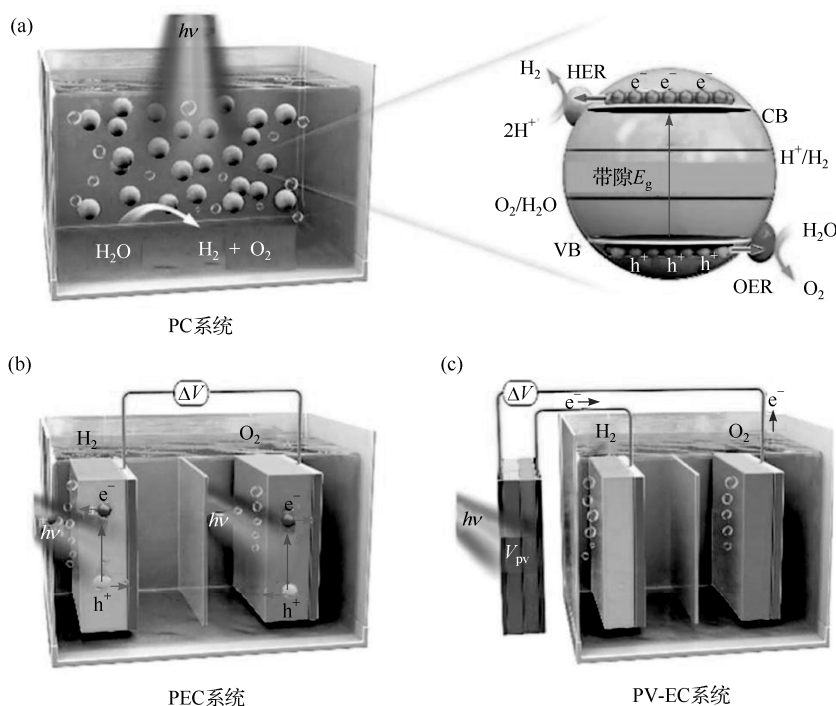


图 1-5 三种类型的太阳能水分解系统及其相应工作原理的示意图
 $h\nu$ 代表光子能量； E_g 代表带隙；OER 代表析氧反应；HER 代表析氢反应

1.3 我国太阳能资源分布

1.3.1 太阳能资源数据的获取

太阳能资源数据的获取、收集和分析是高效利用太阳能的前提。太阳能资源数据库是存储和提供全球太阳能资源数据的重要平台，为太阳能项目的规划、设计和评估提供了可靠的数据支持。全球或某地区的太阳能资源可通过一些太阳能资源数据库获得，如 NASA



Surface Meteorology and Solar Energy、Meteonorm、SolarGIS、WRDC、Baseline Surface Radiation Network、Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (DLR)、Solar and Wind Energy Resource Assessment、NSRDB、3TIER Solar Time Series 等。

NASA Surface Meteorology and Solar Energy(NASA-SSE)是由美国国家航空航天局(NASA)提供的太阳能资源数据库。它包含了全球范围内的太阳辐射和气象参数数据,提供了高分辨率、高质量的太阳能资源信息。其中,太阳辐射数据包括直接太阳辐射、散射太阳辐射和总辐射等多种辐射参数,以不同时间间隔(如小时、日、月、年)提供。气象参数包括温度、湿度、风速、大气压等,覆盖不同高度和时间尺度。NASA-SSE 数据库为科学家和研究人员提供了丰富的太阳能资源数据,用于太阳能资源的分析、模拟和研究。太阳能系统的设计和优化需要准确的太阳能资源数据,NASA-SSE 提供的数据可用于太阳能电站和太阳能系统的规划和评估。用户可以通过 NASA-SSE 的网站免费获取数据,该网站提供了方便的数据下载和查询接口。此外,NASA-SSE 还提供了一些工具和软件,如 Solar and Meteorological Surface Observations(SAMSON)工具,帮助用户处理和分析数据。NASA-SSE 数据库的数据质量经过严格的质量控制和验证,确保数据的准确性和可靠性。数据的验证包括与地面观测站数据的比较、与其他卫星遥感数据的对比等,以验证数据的真实性和可信度。

Meteonorm 是一个提供全球范围内气象数据和太阳辐射数据的数据库。它集成了来自地面观测站、卫星遥感等多种数据源,为用户提供了高质量的气象数据和太阳辐射数据。与 NASA-SSE 相似。Meteonorm 数据库提供的太阳辐射数据可用于太阳能项目的资源评估、系统设计和性能预测。用户可以利用这些数据进行太阳能电站的布局优化、光伏组件的倾斜角和方位角选择等。研究人员可以利用 Meteonorm 提供的气象数据进行气候研究和气象模拟,探讨气候变化对太阳能资源的影响以及预测未来气候趋势。建筑行业可以利用 Meteonorm 提供的气象数据进行建筑能耗模拟和建筑能效评估,优化建筑设计,提高建筑能源利用效率。用户可以通过购买 Meteonorm 的许可证或订阅服务来获取数据,并通过 Meteonorm 软件进行数据处理和分析。Meteonorm 提供了用户友好的界面和多种数据导出格式,方便用户在不同平台和软件中使用数据。

SolarGIS 是一个提供全球范围内太阳能资源和太阳辐射数据的数据库。它整合了来自地面观测站、卫星遥感等多种数据源,为用户提供了高分辨率、高精度的太阳能资源信息。SolarGIS 提供太阳辐射数据与气象数据两类。用户可以通过 SolarGIS 的网站(<https://solargis.com>)免费获取数据,提供了方便的数据下载和查询接口。SolarGIS 还提供了一些工具和软件,如 GIS 应用程序和数据可视化工具,帮助用户处理和分析数据。除了前述的 NASA-SSE、Meteonorm 和 SolarGIS 等知名太阳能资源数据库之外,还有一些其他的数据库也提供了全球范围内的太阳能资源数据,每个数据库都有其独有的特点和应用范围。

1.3.2 我国不同地区太阳能资源潜力

我国幅员辽阔,有十分丰富的太阳能资源。据估算,全国各地太阳年辐射总量为 3340~8400 MJ/m²,相当于 24×10⁴ 亿 t 标准煤的储量。我国太阳能资源分布的主要特点如下:
①太阳能的高值中心和低值中心都处在北纬 22°~35°这一带。青藏高原是高值中心,那里平均海拔高度在 4000 m 以上,大气层薄而清洁,日照时间长,透明度好,纬度低。四川盆地