



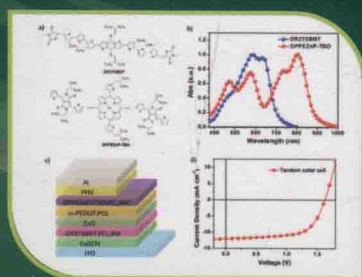
新能源系列 —— 光伏发电技术与应用专业规划教材

太阳能光伏理化基础

第二版

黄建华 向 钠 齐锴亮 主 编

TAIYANGNENG
GUANGFU
LIHUA JICHU



化学工业出版社



新能源系列 —— 光伏发电技术与应用专业规划教材

太阳能光伏理化基础

第二版

黄建华 向 钠 齐锴亮 主 编



TAIYANGNENG
GUANGFU
LIHUA JICHU



化学工业出版社

北京

《太阳能光伏理化基础》在第一版的基础上进行修订,根据光伏产业发展的实际需求和教学实践,优化已有的知识点,添加了光资源、光伏电池的化学反应等内容,并在章节编排上进行了调整。

《太阳能光伏理化基础》从光资源介绍与分析入手,系统阐述了原子及分子结构、价键理论、晶体及材料缺陷、PN 结特性、光伏电池的化学反应以及其他新型光伏电池的理论知识。

《太阳能光伏理化基础》可作为高等院校及职业院校光伏发电技术及应用等相关专业学生的教材,同时可作为光伏生产企业对员工的岗位培训教材,也可以作为相关专业的工程技术人员参考书。

太阳能光伏理化基础

第二版

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏理化基础/黄建华,向钠,齐锴亮主编.—2版.
北京:化学工业出版社,2017.9
新能源系列——光伏发电技术与应用专业规划教材
ISBN 978-7-122-30794-1

I. ①太… II. ①黄… ②向… ③齐… III. ①太阳能发电-
物理化学-教材 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 253215 号

责任编辑:刘 哲
责任校对:边 涛

装帧设计:韩 飞

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:高教社(天津)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 281 千字 2017 年 9 月北京第 2 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:29.00 元

版权所有 违者必究

前言

太阳能光伏理化基础
TAIYANGNENG GUANGFU LIHUA JICHU

近年来，我国对能源的需求量日益增加，环保压力增大。优化能源结构，实现清洁低碳发展，是我国经济社会转型发展的迫切需要，因此国家在节约能源的同时也在积极开发新能源。太阳能是取之不尽、用之不竭的能源，而且能量巨大、安全无污染，是人类的理想能源。中国太阳能资源非常丰富，理论储量达每年 17000 亿吨标准煤，太阳能资源开发利用的潜力非常广阔。2000 年以来，中国光伏产业发展迅速，产业结构也发生了很大的变化，光伏市场已经从专注于电池及组件产品出口逐步转向国内光伏发电市场的开发。目前，光伏产业已经实现了规模化发展，领跑者计划的实施，有利于通过市场化竞争引导光伏技术进步和产业升级，从而使光伏企业在保持产量的基础上更加注重产品的质量提升。当前，光伏材料领域，太阳能电池材料的应用可以分为以硅材料为主体的太阳能电池和薄膜太阳能电池两类。在晶体硅太阳能电池技术开发方面，“金刚线切片+黑硅技术”的多晶硅生产线和“PERC 技术”的单晶硅生产线齐头并进。在薄膜电池领域，碲化镉和钙钛矿薄膜电池发展迅速；在光电转化效率方面，碲化镉、钙钛矿薄膜太阳能电池分别达到 17% 和 21%，与晶硅电池的差距在逐步缩小。总体而言，光伏产业在历经了多年的高速发展后，已经成为中国能源系统不可或缺的重要组成部分。

促进光伏产业的可持续发展，人才培养是关键。当前光伏产业的快速发展与人才培养相对落后的矛盾日益凸显，越来越多的光伏企业人力资源紧张。光伏产业相关技术更新较快，教材也需要根据光伏材料的新技术和新工艺进行实时更新，才能培养出满足产业发展需要的专业人才。

《太阳能光伏理化基础》第一版已出版六年，几年时间让我们对行业产生了新的理解，也收集了一些新的技术和案例，因此我们对本书进行了再版增修。我

们优化了已有的知识点, 添加了光资源、光伏电池的化学反应等内容, 并对章节编排进行了调整。在此感谢浙江瑞亚能源科技有限公司董事长易潮、衢州职业技术学院廖东进等对本书提出宝贵的建议, 感谢杭州瑞亚教育科技有限公司对本书再版提供的设备支持和技术支持, 希望捧卷的各位读者能够在书中收获新的知识!

本教材基于光伏电池工艺中所涉及的固体物理、半导体物理、无机化学等理论知识, 首先系统阐述了中国太阳能光资源的主要分布情况; 然后从原子结构、化学键和分子结构讲述了波尔理论、离子键、共价键、金属键等跟硅材料相关的物理知识, 从晶体特性和晶体缺陷方面详细讲解晶体的相关知识, 从半导体 PN 结特性阐述了光伏电池的关键结构; 接着讲述了光伏产业链各个环节发生的化学反应以及光伏电池发电的基本原理; 最后对其他新型太阳电池的结构及工作原理进行了系统性的介绍。本教材在编写中, 理论知识方面涉及较多, 读者可选择性地学习。

本书可以作为高职高专光伏类专业学生的教材, 同时可作为企业员工的岗位培训教材, 也可以作为相关专业的工程技术人员参考书。

本书由黄建华、向钠、齐锺亮任主编。全书由黄建华拟定提纲、黄建华与齐锺亮统稿。第 1 章由陕西工业职业技术学院齐锺亮编写, 第 2 章、第 3 章由南昌大学材料科学与工程学院陈楠编写, 第 4 章由济南工程职业技术学院张培明编写, 第 5 章由湖南理工职业技术学院曾礼丽编写, 第 6 章由江西科技学院肖友鹏编写, 第 7 章由湖南理工职业技术学院黄建华编写, 第 8 章、第 9 章由湖南理工职业技术学院向钠编写。全书由杭州瑞亚教育科技有限公司教学研究院院长桑宁如主审。

教材的开发是一个循序渐进的过程, 限于编者水平有限, 经验不足, 在编写过程中难免会有疏漏之处, 竭诚欢迎广大师生和读者提出宝贵意见, 使本书不断改进、不断完善。

编者

2017 年 8 月

目 录

太阳能光伏理化基础
TAIYANGNENG GUANGFU LIHUA JICHU

第 1 章	光资源	1
1.1	光与光谱	1
1.1.1	光的本质	1
1.1.2	光波	1
1.1.3	光谱	2
1.2	太阳光谱能量分布	3
1.2.1	大气层外的太阳光谱	4
1.2.2	到达地面的太阳辐射	4
1.3	太阳辐射	4
1.3.1	太阳基本知识	4
1.3.2	太阳辐射基本概念	5
1.3.3	地面太阳辐射	6
1.4	全国光资源分布情况	8
	本章小结	9
	思考题	9
第 2 章	原子结构	10
2.1	氢原子光谱与玻尔理论	10
2.1.1	氢原子光谱	10
2.1.2	玻尔理论	12
2.2	微观粒子运动的规律	14
2.2.1	波粒二象性	14
2.2.2	测不准原理	15
2.2.3	波函数与原子轨道	16
2.2.4	四个量子数	17
2.3	原子核外电子排布	19
2.3.1	屏蔽效应	19
2.3.2	穿透效应	20
2.3.3	能级交错及近似能级图	20
2.3.4	核外电子排布	23

本章小结	24
思考题	24

第 3 章 化学键与分子结构 25

3.1 离子键	25
3.1.1 离子键的形成	25
3.1.2 离子键的形成条件	26
3.1.3 离子键的特点	26
3.1.4 离子晶体	27
3.1.5 离子晶体的结构	27
3.2 共价键	30
3.2.1 价键理论	30
3.2.2 共价键的类型	31
3.2.3 杂化轨道理论	32
3.2.4 分子晶体和原子晶体	35
3.3 金属键	36
3.3.1 金属键的改性共价理论	37
3.3.2 金属键的能带理论	37
3.3.3 金属键的本质	38
3.3.4 金属晶体	38
本章小结	40
思考题	40

第 4 章 晶体的基本知识 41

4.1 晶体与非晶体	41
4.2 晶体的特性	42
4.2.1 晶体的自限性	42
4.2.2 晶体的对称性	43
4.2.3 晶体固定的熔点	44
4.2.4 晶体的均匀性	44
4.2.5 晶体的各向异性	45
4.2.6 晶体的解理性	45
4.2.7 最小内能和稳定性	46
4.2.8 X 射线衍射特性	46
4.3 常见晶体的类型	46
4.3.1 晶体的分类	46
4.3.2 常见半导体材料	47
4.3.3 半导体的掺杂	47

4.4 空间点阵和晶胞	48
4.4.1 晶体的微观描述	48
4.4.2 晶格的周期性	50
4.4.3 晶列 晶向 晶面	51
4.4.4 晶体结构的分类	54
4.4.5 常见的晶体结构	57
4.4.6 晶体中原子排列的配位数和致密度	62
本章小结	63
思考题	63
第5章 晶体缺陷	64
5.1 概述	64
5.2 晶体缺陷	65
5.2.1 点缺陷	66
5.2.2 线缺陷	68
5.2.3 面缺陷	74
5.2.4 体缺陷	76
5.3 晶硅中的缺陷及其影响	77
5.3.1 氧杂质及其影响	77
5.3.2 碳杂质及其影响	79
5.3.3 氢杂质及其影响	79
5.3.4 金属杂质及其影响	80
5.3.5 位错及其影响	81
5.3.6 晶界及其影响	81
本章小结	82
思考题	82
第6章 半导体材料性能	84
6.1 半导体的特性	84
6.1.1 正格子和倒格子	84
6.1.2 波函数	85
6.1.3 半导体中的电子状态和能带	86
6.1.4 半导体中的杂质和缺陷能级	91
6.2 热平衡载流子	94
6.2.1 状态密度	94
6.2.2 统计规律	95
6.2.3 费米分布函数和费米能级	95
6.2.4 导带中的电子浓度和价带中的空穴浓度	97

6.2.5	非简并半导体	98
6.2.6	本征载流子浓度	99
6.2.7	杂质半导体的载流子浓度	100
6.2.8	简并半导体	103
6.3	非平衡载流子	104
6.3.1	准费米能级	104
6.3.2	半导体的光吸收	105
6.3.3	非平衡载流子的寿命	109
6.3.4	复合过程	110
6.4	载流子的输运	113
6.4.1	漂移运动	114
6.4.2	迁移率	115
6.4.3	扩散运动	115
6.4.4	电流密度方程, 爱因斯坦关系式	117
6.4.5	泊松方程	118
6.4.6	连续性方程	119
6.5	PN 结及其特性图	120
6.5.1	空间电荷区与接触电势差	120
6.5.2	PN 结的电场强度	122
6.5.3	PN 结的电势分布	123
6.5.4	空间电荷区宽度	123
6.5.5	PN 结内电荷流动的定性描述	124
6.5.6	理想的电流-电压关系	124
6.5.7	电流电压关系的非理想因素	127
6.6	PIN 结	128
6.7	金属-半导体接触	129
6.7.1	金属-半导体接触	130
6.7.2	欧姆接触	131
6.8	半导体-半导体异质结	132
	本章小结	134
	思考题	134

第 7 章 光伏电池性能 135

7.1	光伏发电原理	135
7.1.1	光伏行为来源	135
7.1.2	光生伏特效应	137
7.1.3	光伏电池的 $I-V$ 特性	138
7.2	光伏电池性能表征	139

7.3 光伏电池的效率	140
7.4 光伏电池效率分析	142
7.4.1 禁带宽度的影响	142
7.4.2 温度的影响	142
7.4.3 寿命和扩散长度的影响	143
7.4.4 寄生电阻的影响	143
7.5 晶硅光伏产业链概述	145
7.5.1 硅材料的冶炼	145
7.5.2 高纯度多晶硅的提纯	146
7.5.3 直拉单晶硅棒	146
7.5.4 铸造多晶硅锭	147
7.5.5 硅片加工	148
7.5.6 晶硅电池及组件制备	148
7.5.7 光伏发电系统	149
本章小结	150
思考题	150

第 8 章 光伏电池的化学反应 151

8.1 酸反应	151
8.1.1 硅锭(棒)材料清洗过程中的酸腐蚀反应	151
8.1.2 硅片清洗过程的酸反应	151
8.1.3 光伏电池制备工艺中的酸反应	152
8.2 碱反应	153
8.2.1 硅锭(棒)材料清洗过程中的碱腐蚀反应	153
8.2.2 硅片清洗过程的碱反应	153
8.2.3 光伏电池制备工艺中的碱反应	153
8.3 其他化学反应	153
8.3.1 多晶硅原料制备中的化学反应	153
8.3.2 晶硅电池扩散工序中的化学反应	155
8.3.3 晶硅电池 PECVD 工序中的化学反应	156
本章小结	156
思考题	156

第 9 章 其他新型太阳电池的理论知识 157

9.1 GaAs 电池	157
9.1.1 GaAs 的晶体结构	157
9.1.2 GaAs 的能带结构	158
9.1.3 GaAs 的迁移率和饱和漂移速度	159

9.1.4	GaAs 晶体的缺陷和位错	159
9.1.5	GaAs 晶体的杂质	160
9.1.6	砷化镓太阳电池的结构和制备方法	161
9.2	CdTe 电池	162
9.2.1	CdTe 材料的基本性质	162
9.2.2	CdTe 太阳电池的结构和工作原理	163
9.2.3	CdTe 太阳电池制备工艺	165
9.3	CIGS 电池	166
9.3.1	CIGS 材料的基本性质	166
9.3.2	CIGS 太阳电池的结构和工作原理	167
9.3.3	CIGS 太阳电池制备工艺	168
9.4	有机太阳电池	169
9.4.1	有机高分子太阳电池	169
9.4.2	染料敏化太阳电池	171
9.4.3	钙钛矿太阳电池	173
本章小结		175
思考题		175

参考文献	176
------------	-----

第 1 章

光资源

【学习目标】

- ① 了解光与光谱的本质。
- ② 熟悉常见光谱的波长及频率范围。
- ③ 掌握太阳能光谱分布特点。
- ④ 掌握描述太阳辐射的常用概念。
- ⑤ 掌握我国太阳能资源分布的特点。

1.1 光与光谱

光是一种电磁辐射形式的能源。这种能源是由不同物质的原子结构作用而辐射出来，并且这种能源在广泛的范围内起着作用。尽管不同形式的电磁辐射在与物质作用时表现出很大的不同性，但它们在传播过程中都拥有相同的特性。

1.1.1 光的本质

很久以来，人们对光进行了各种各样的研究。牛顿提出著名的光微粒说，即光是由极小的运动微粒组成。微粒说能够很好地解释光在均匀介质中的直线传播以及在两种介质分界面上的反射定律，但在解释折射现象时，会得出与实际情况相反的结果，并且微粒说也不能解释光的干涉、衍射和偏振等现象。1863 年，麦克斯韦预言出电磁波的存在，并推算出电磁波在真空中的传播速度与测量得到的光速值极为接近，进一步预言光是一种电磁波动，诞生了光的电磁理论。但是这一理论无法解释光电效应实验。爱因斯坦于 1905 年提出光子说来解释该实验。光一方面具有波动的性质，如干涉、偏振等；另一方面又具有粒子的性质，如光电效应等。这两方面的综合说明光不是单纯的波，也不是单纯的粒子，而是具有波粒二象性的物质。所以我们既可以认为光是一种电磁波，也可以将其看做一种能量。通常所说的“光”，指可见光，有时也包括红外线和紫外线。

1.1.2 光波

通常所说的光学区域（或光学频谱）包括红外线、可见光和紫外线。光波的基本参数如

表 1-1 所示,其中能为人所感受到的是 380~780nm 的窄小范围,对应的频率范围是 $\nu = (7.5 \sim 4.0) \times 10^8 \text{ MHz}$ 。

表 1-1 光波基本参数

波谱区名称	波长范围	波数/ cm^{-1}	频率/MHz
远紫外光	10~200nm	$106 \sim 5 \times 10^4$	$3 \times 10^{10} \sim 1.5 \times 10^9$
近紫外光	200~380nm	$5 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4$	$1.5 \times 10^9 \sim 7.5 \times 10^8$
可见光	380~780nm	$2.5 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4$	$7.5 \times 10^8 \sim 4.0 \times 10^8$
近红外光	0.75~2.5 μm	$1.3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^3$	$4.0 \times 10^8 \sim 1.2 \times 10^8$
中红外光	2.5~50 μm	4000~200	$1.2 \times 10^8 \sim 6.0 \times 10^6$
远红外光	50~1000 μm	200~10	$6.0 \times 10^6 \sim 1 \times 10^5$

能作用于人的眼睛并引起视觉的称为可见光,如红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫各色光,波长在 380~780nm 之间。

相比于可见光,波长较长,不能引起视觉的叫红外线,它的波长范围是 750~ 10^6 nm 。所有的物体都辐射红外线,主要作用是热作用。物体温度越高,辐射的红外线越强,辐射的红外线波长越短。

紫外线也是不可见光,其波长在 10~380nm 之间,紫外线具有较高能量,能够杀灭多种细菌,可以用紫外线进行消毒。

光在发射、传播和接收方面具有独特的性质。虽然光波在整个电磁波谱中仅占有很窄的波段,它却对人类的生存、生活进程和发展有着巨大的作用和影响。

1.1.3 光谱

(1) 光谱的定义

复合光借助于分光元件色散成单色光,按照波长顺序排列成一个谱带,称之为光谱。在电磁波谱中,红外线、可见光和紫外线常称为光学光谱,简称光谱。它是物质中外层电子的跃迁所发射的电磁波。

(2) 光谱的分类

① 按光谱的产生机理分类 按光谱的产生机理分为发射光谱、吸收光谱、散射光谱。发射光谱是指在外能(热能、电能、光能、化学能)作用下,物质的粒子吸收能量被激发至高能态后,瞬间返回基态或低能态所得到的光谱。吸收光谱则是物质吸收辐射能,由低能级(一般为基态)过渡到高能级(激发态),是入射辐射能减小所得到的光谱。散射光谱是物质对辐射能选择地散射得到的,不仅改变辐射传播方向,而且还能使辐射波长发生变化。

② 按光谱的形状分类 按光谱的形状分为线光谱、带状光谱(光谱带)、连续光谱。在高温下,物质蒸发出来,形成蒸汽云,物质中的原子核离子以气态的形式存在,这时原子间的相互作用力很小,它们接收能量以后,发射谱线完全由单个原子或离子的外层电子轨道能级所决定,它辐射出不连续的明亮线条叫线光谱。由分子受激发振动而产生的明亮光带和暗区组成的光谱叫带状光谱,由许多极细、极密的明亮线组合而成。由灼烧的固体热辐射而产生的从短波到长波的连续光谱背景,叫连续光谱。

③ 按电磁辐射的本质分类 按照电磁辐射的本质划分为原子光谱、分子光谱、X射线能谱和 γ 射线能谱等。

物质是由各种元素的原子组成的,原子有结构紧密的原子核,核外围绕着不断运动的电子,电子处在一定的能级上,具有一定的能量。一般情况下大多数原子处在最低的能级状态,即基态。基态原子在激发光源的作用下,获得足够的能量,外层电子跃迁到较高能级状态的激发态,这个过程叫激发。当外界供给能量给原子时,原子中处于基态的电子吸收了一定的能量而被激发到离核较远的轨道上去,这时受激发的电子处于不稳定状态,为了达到新的稳定状态,则要在极短的时间内跃迁到离核较近的轨道上去,这时原子内能减少,减少的内能以辐射电磁波的形式释放能量。由于电子的轨道是不连续的,电子跃迁时的能级也是不连续的,因而原子光谱是线状光谱。

分子中电子在不同的状态中运动,同时分子本身由原子核组成的框架也在不停地振动和转动,分子在不同能级之间的跃迁以光吸收或光辐射的形式表现出来,就形成了分子光谱。

1.2 太阳光谱能量分布

太阳光谱是指太阳辐射按波长(频率)分布的特征。

太阳辐射是电磁辐射的一种,它是物质的一种形式,既具有波动性,也具有粒子性,在本质上与无线电波没有什么差异,只是波长和频率不同而已。太阳辐射光谱的主要波长范围为 $0.15\sim 4\mu\text{m}$,而地面和大气辐射的主要波长范围则为 $3\sim 20\mu\text{m}$ 。在气象学中,根据波长的不同,常把太阳辐射叫做短波辐射,而把地面和大气辐射叫做长波辐射。

用辐射能量作为纵坐标,辐射波长作为横坐标,所绘制的曲线称为太阳光谱的能量分布曲线。

从图1-1可以看出,尽管太阳辐射的波长范围很宽,但绝大部分的能量却集中在 $0.15\sim 4\mu\text{m}$ 之间,占总能量的99%以上。其中可见光部分($0.4\sim 0.76\mu\text{m}$)占太阳辐射总能量约50%,红外线($>0.76\mu\text{m}$)占约43%,紫外线($<0.4\mu\text{m}$)占太阳辐射总能量很少,只占约7%。而能量分布最大值所对应的波长则是 $0.475\mu\text{m}$,属于蓝色光。

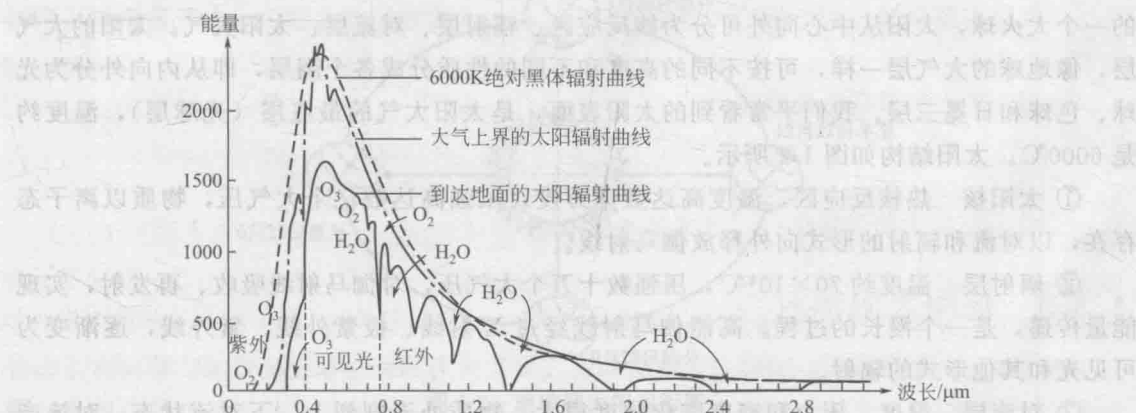


图1-1 大气上界的太阳辐射能量曲线和到达地球表面的典型能量曲线



1.2.1 大气层外的太阳光谱

地球大气以外的太阳辐射光谱,早期都是由地面,主要是高山光谱测量的数据外推得到的。但是一方面大气中空气分子、水蒸气分子、二氧化碳分子以及臭氧分子等对各种不同波长的辐射吸收、散射和反射的情况不同,另一方面大气低层气流、云层变化十分复杂,因此地面测量的数据很难精确。后来,逐渐采用气球、飞机、火箭以及宇宙飞船和人造卫星等先进的手段和更加精密的光谱分析仪器,获得了比较令人满意的结果。

1.2.2 到达地面的太阳辐射

以光谱形式发射出的太阳辐射能,通过厚厚的大气层,光谱分布发生了不少变化。太阳光谱中的X射线及其他一些超短波辐射线,通过电离层时,会被氧、氮及其他大气成分强烈地吸收;大部分紫外线(波长为 $0.01\sim 0.38\mu\text{m}$)被臭氧所吸收;至于波长超过 $2.5\mu\text{m}$ 的射线,在大气层外的辐射强度本来就很低,再加上大气层中的二氧化碳和水蒸气对它们有强烈的吸收作用,所以到达地面上的能量微乎其微。这样,只有波长为 $0.38\sim 0.78\mu\text{m}$ 之间的可见光部分,才可能比较完整地达到地面。因此认为,地面上所接收的太阳辐射属于中短波辐射。从地面上利用太阳能的观点来说,只考虑波长为 $0.28\sim 2.5\mu\text{m}$ 的射线就可以了。

1.3 太阳辐射

太阳辐射能来源于高温高压下进行的热核聚变反应:“碳-氮循环”、“质子-质子循环”。整个过程中, ^{12}C 和重氢 2D (氘,氢的同位素)并未消耗,只起触媒作用,最终结果是4个氢核聚变,变成1个氦核。

1.3.1 太阳基本知识

太阳是距地球最近的一颗恒星,是直径为 $1.39\times 10^6\text{km}$ 、质量为 $2.2\times 10^{30}\text{kg}$ 的炽热的等离子气体球,离地球的平均距离为 $1.496\times 10^8\text{km}$ 。组成太阳的物质大多是些普通的气体,其中氢约占71.3%,氦约占27%,其他元素占2%。一般认为太阳是处于高温高压下的一个大火球,太阳从中心向外可分为核反应区、辐射层、对流层、太阳大气。太阳的大气层,像地球的大气层一样,可按不同的高度和不同的性质分成各个圈层,即从内向外分为光球、色球和日冕三层。我们平常看到的太阳表面,是太阳大气的最底层(光球层),温度约是 6000°C 。太阳结构如图1-2所示。

① 太阳核 热核反应区,温度高达数千万度,压强高达数亿个大气压,物质以离子态存在,以对流和辐射的形式向外释放伽马射线。

② 辐射层 温度约 $70\times 10^4^\circ\text{C}$,压强数十万个大气压,对伽马射线吸收、再发射,实现能量传递,是一个漫长的过程。高能伽马射线经过X射线、极紫外线、紫外线,逐渐变为可见光和其他形式的辐射。

③ 对流层 温度、压力和密度变化梯度很大,物质处于剧烈上、下对流状态,对流产生的低频声波,可通过光球层传输到太阳的外层大气。

④ 光球层 厚度约为 500km ,表面温度接近 6000°C ,这是太阳的平均有效温度,光球

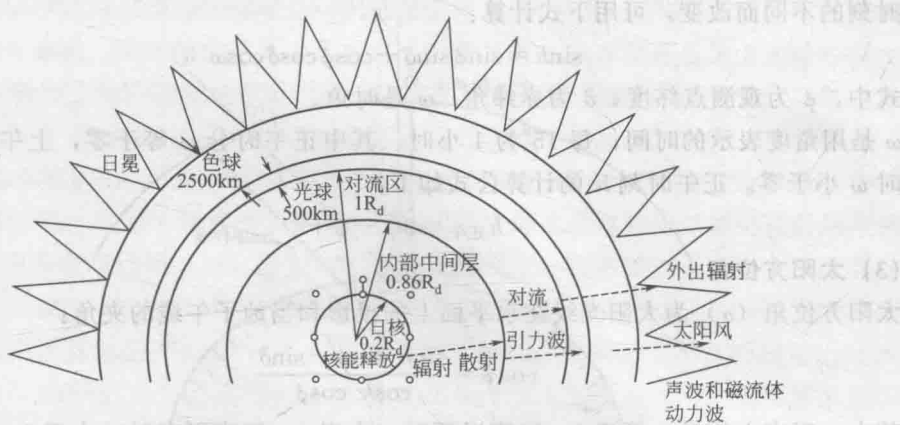


图 1-2 太阳结构示意图

内温度梯度较大，几乎全部可见光从光球层发射出去，对地球气候和生态影响较大。

⑤ 色球层 光球层以外，厚度 2000km，温度从底层的数千度上升到顶部的数万度。玫瑰红色舌状气体叫日珥，可高于光球几十万公里。

⑥ 日冕 位于色球层外，是伸入太空的银白色日冕，由各种微粒构成：太阳尘埃质点、电离粒子和电子，温度高达 100 多万摄氏度。

1.3.2 太阳辐射基本概念

太阳辐射可用以下 6 类参数来表示。

(1) 赤纬角

赤纬角为太阳中心和地心连线与赤道平面的夹角，用符号 δ 表示，以年为周期变化，并规定以北纬为正值。地球公转一周形成四季。地球绕太阳运行形成四季，如图 1-3 所示。四季的重要特征有两点：一是气温高低不同，二是昼夜长短互异。四季的形成主要是由赤纬角的变化引起的。由于地球的倾斜角永远保持不变，致使赤纬角随时都在变化。太阳的赤纬角随季节在南纬 $23^{\circ}27'$ 与北纬 $23^{\circ}27'$ 之间来回变动，在地理纬度上将南北纬 $23^{\circ}27'$ 的两条纬线称为南北回归线。

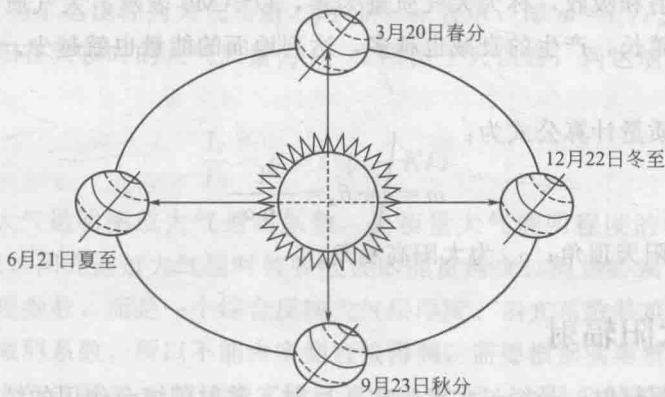


图 1-3 地球绕太阳运行图

(2) 太阳高度角

太阳高度角 (h , $0^{\circ} \leq h \leq 90^{\circ}$) 为太阳光线与地表水平面之间的夹角，随地区、季节和

每日时刻的不同而改变,可用下式计算:

$$\sinh = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega \quad (1-1)$$

式中, ϕ 为观测点纬度; δ 为赤纬角; ω 是时角。

ω 是用角度表示的时间, 每 15° 为 1 小时, 其中正午时分 ω 等于零, 上午时 ω 大于零, 下午时 ω 小于零。正午时刻 h 的计算公式如下:

$$h_{\text{正午}} = 90^\circ - \phi + \delta \quad (1-2)$$

(3) 太阳方位角

太阳方位角 (α) 为太阳光线在水平面上的投影和当地子午线的夹角:

$$\cos\alpha = \frac{\sinh \sin\phi - \sin\delta}{\cosh \cos\phi} \quad (1-3)$$

其中, 正南方位时 α 等于 0, 正南以西时 α 大于 0, 正南以东时 α 小于 0。

高度角与方位角如图 1-4 所示。

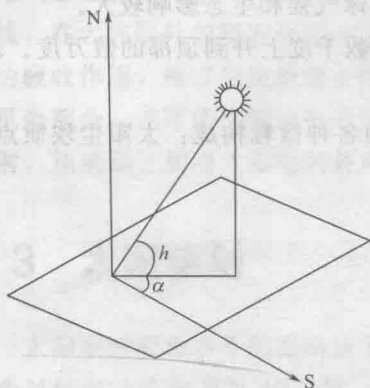


图 1-4 高度角和方位角

(4) 辐照度

辐照度定义为照射到物体表面单位面积上的辐射功率, 通常用符号 E 表示, 单位为 W/m^2 。

(5) 太阳常数

由于太阳和地球距离的变化, 在地球大气层上垂直于太阳辐射方向的单位面积上接收到的功率在 $132.8 \sim 141.8 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 之间。这种辐射的波长约从 $0.1 \mu\text{m}$ 至几百微米。

为了统一标准, 定义在平均日地距离处, 垂直于太阳辐射方向的单位面积上接收到的太阳总辐照度为太阳常数, 其数值为 $(1367 \pm 7) \text{ W}/\text{m}^2$ 。

(6) 大气质量 m

这里所说的大气质量是指大气光学质量, 定义为来自天体的光线穿过大气层到达海平面的路径长度与整层大气的垂直距离之比。假定在一个标准大气压和温度 0°C 时, 海平面上太阳光线垂直入射时大气质量 $m=1$, 记为 AM1.0。在地球大气层外接收到的太阳辐射, 未受到地球大气层的发射和吸收, 称为大气质量为零, 以 AM0 表示。大气质量越大, 说明光线经过大气层的路程越长, 产生的衰减也越多, 达到地面的能量也就越少。大气质量的示意图如图 1-5 所示。

地面上的大气质量计算公式为:

$$m = \sec\theta_z = \frac{1}{\sin\alpha_s} \quad (1-4)$$

式中, θ_z 为太阳天顶角; α_s 为太阳高度角。

1.3.3 地面太阳辐射

到达地面的太阳辐射, 是经过大气吸收、反射、散射等综合作用的结果, 包括直接辐射和漫射辐射两部分。直接太阳辐射是指被地球表面接收到、方向不变的太阳辐射; 而漫射辐射是指经大气吸收、散射或经地面反射已改变方向的辐射。漫射辐射包括由太阳辐射经大气吸收、散射后间接到达的天空辐射, 以及由地面物体吸收或反射的地面辐射。到达地球水平