



“十二五”江苏省高等学校重点教材



卓越工程技术人才培养特色教材

TAIYANGNENG RELIYONG JISHU

太阳能热利用技术

主 编 邵理堂 刘学东 孟春站



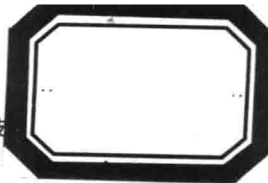
江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



“十二五”江苏省高等学校重点教材 (编号: 2013-2-041)



卓越工程技



太阳能热利用技术

主 编 邵理堂 刘学东 孟春站

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

太阳能热利用技术 / 邵理堂, 刘学东, 孟春站主编
— 镇江 : 江苏大学出版社, 2014. 6
ISBN 978-7-81130-733-7

I. ①太… II. ①邵… ②刘… ③孟… III. ①太阳能
利用—高等学校—教材 IV. ①TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 125251 号

太阳能热利用技术

主 编/邵理堂 刘学东 孟春站

责任编辑/李经晶

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/<http://press. ujs. edu. cn>

排 版/镇江新民洲印刷有限公司

印 刷/句容市排印厂

经 销/江苏省新华书店

开 本/718 mm×1 000 mm 1/16

印 张/17

字 数/324 千字

版 次/2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-733-7

定 价/38.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

江苏省卓越工程技术人才培养特色教材建设

指导委员会

主任委员：丁晓昌（江苏省教育厅副厅长）

副主任委员：史国栋（常州大学党委书记）

孙玉坤（南京工程学院院长）

田立新（南京师范大学副校长）

梅 强（江苏大学副校长）

徐子敏（江苏省教育厅高教处处长）

王 恬（南京农业大学教务处处长）

委 员 会：（按姓氏笔画为序）

丁晓昌	马 铸	王 兵	王 恬
方海林	田立新	史国栋	冯年华
朱开永	朱林生	孙玉坤	孙红军
孙秀华	芮月英	李江蛟	吴建华
吴晓琳	沐仁旺	张仲谋	张国昌
张明燕	陆雄华	陈小兵	陈仁平
邵 进	施盛威	耿焕同	徐子敏
徐百友	徐薇薇	梅 强	董梅芳
傅菊芬	舒小平	路正南	

序

深化高等工程教育改革、提高工程技术人才培养质量,是增强自主创新能力、促进经济转型升级、全面提升地区竞争力的迫切要求。近年来,江苏高等工程教育飞速发展,全省46所普通本科院校中开设工学专业的学校有45所,工学专业在校生约占全省普通本科院校在校生总数的40%,为“十一五”末江苏成功跻身全国第一工业大省做出了积极贡献。

“十二五”时期是江苏加快经济转型升级、发展创新型经济、全面建设更高水平小康社会的关键阶段。教育部“卓越工程师教育培养计划”启动实施以来,江苏认真贯彻教育部文件精神,结合地方高等教育实际,着力优化高等工程教育体系,深化高等工程教学改革,努力培养造就一大批创新能力强、适应江苏社会经济发展需要的卓越工程技术后备人才。

教材建设是人才培养的基础工作和重要抓手。培养高素质的工程技术人才,需要遵循工程技术教育规律,建设一套理念先进、针对性强、富有特色的优秀教材。随着知识社会和信息时代的到来,知识综合、学科交叉趋势增强,教学的开放性与多样性更加突出,加之图书出版行业体制机制也发生了深刻变化,迫切需要教育行政部门、高等学校、行业企业、出版部门和社会各界通力合

作,协同作战,在新一轮高等工程教育改革发展 中抢占制高点.

2010 年以来,江苏大学出版社积极开展市场分析和行业调研,先后多次组织全省相关高校专家、企业代表就应用型本科人才培养和教材建设工作进行深入研究.经各方充分协商,拟定了“江苏省卓越工程技术人才培养特色教材”开发建设的实施意见,明确了教材开发总体思路,确立了编写原则:

一是注重定位准确,科学区分.教材应符合相应高等工程教育的办学定位和人才培养目标,恰当把握与研究型工程人才、设计型工程人才及技能型工程人才的区分度,增强教材的针对性.

二是注重理念先进,贴近业界.吸收先进的学术研究与技术成果,适应经济转型升级需求,适应社会用人单位管理、技术革新的需要,具有较强的领先性.

三是注重三位一体,能力为重.紧扣人才培养的知识、能力、素质要求,着力培养学生的工程职业道德和人文科学素养、创新意识和工程实践能力、国际视野和沟通协作能力.

四是注重应用为本,强化实践.充分体现用人单位对教学内容、教学实践设计、工艺流程的要求以及对人才综合素质的要求,着力解决以往教材中应用性缺失、实践环节薄弱、与用人单位要求脱节等问题,将学生创新教育、创业实践与社会需求充分衔接起来.

五是注重紧扣主线,整体优化.把培养学生工程技术能力作为主线,系统考虑、整体构建教材体系和特色,包括合理设置课件、习题库、实践课题以及在教学、实践

环节中合理设置基础、拓展、复合应用之间的比例结构等。

该套教材组建了阵容强大的编写专家及审稿专家队伍,汇集了国家教学指导委员会委员、学科带头人、教学一线名师、人力资源专家、大型企业高级工程师等。编写和审稿队伍主要由长期从事教育教学改革实践工作的资深教师、对工程技术人才培养研究颇有建树的教育管理专家组成。在编写、审定教材时,他们紧扣指导思想 and 编写原则,深入探讨、科学创新、严谨细致、字斟句酌,倾注了大量的心血,为教材质量提供了重要保障。

该套教材在课程设置上基本涵盖了卓越工程技术人才培养所涉及的有关专业的公共基础课、专业公共课、专业课、专业特色课等;在编写出版上采取突出重点、以点带面、有序推进的策略,成熟一本出版一本。希望大家在教材的编写和使用过程中,积极提出意见和建议,集思广益,不断改进,以期经过不懈努力,形成一套参与度与认可度高、覆盖面广、特色鲜明、有强大生命力的优秀教材。

江苏省教育厅副厅长 丁晓昌

◎ 前 言 ◎

20 世纪 70 年代以来,鉴于常规能源供给的有限性和环保压力的增加,世界上许多国家掀起了开发利用太阳能等可再生能源的热潮。开发和利用新能源特别是太阳能已成为国际社会的一大主题和共同行动。随着新能源利用技术的突破和产业化发展,部分西方国家已经在战略上将新能源作为近中期的重要替代能源和中长期的主体能源。太阳能作为一种取之不尽、用之不竭的绿色能源,更具有其特殊的优势和广阔的发展空间。

太阳能是各种可再生能源中最重要的基本能源,生物质能、风能、海洋能、水力能等都来自太阳能。广义上,太阳能包含以上各种可再生能源;狭义上,则是指太阳能的直接转化和利用。按照利用途径的不同,太阳能利用技术可分为太阳能热利用、太阳能光伏发电、太阳能光化学利用等几种形式,而其中太阳能热利用技术相对发展最为成熟。

太阳能热利用技术涉及物理、材料、热工、电子等多个学科领域,将这些知识合理地融合到一起并满足本科教学的需要,是编者需要首先解决的问题。本书在内容选取上,从太阳辐射的基本理论、太阳辐射能的转换技术及工艺、太阳能的集热技术、热能的储存技术到热利用系统的性能分析方法和系统集成设计方法,基本上涵盖了目前太阳能热利用领域的主要技术和方法。内容安排兼顾基础和工程应用两个方面,既注重太阳能热利用的基本理论和基本知识,又反映出利用基本知识分析实际问题并进行系统集成设计的方法,同时力争将最新的工程技术和方法吸收到教材中来。取材上力争做到深浅适度,并能与相关课程相互衔接,避免不必要的交叉重复。

本书在结构上,基本可以分为理论、技术和应用三个模块,各模块之间既相互联系又相对独立,有利于按需施教。理论知识模块论述全面简洁,技术和应用模块重视知识的应用、融合与贯通。通过本课程的学习,能有效提高学生解决工程实际问题的能力和创新能力。

全书共分 8 章,第 1 章至第 2 章为太阳能热利用的基础理论,主要介绍太阳辐射的特点、计算方法以及太阳能热利用中各选择性涂层材料及其制备方法;第 3 章至第 5 章为太阳能集热技术,主要介绍平板集热器、真空管集热器、聚光集

热器的原理及性能分析方法;第6章为太阳能热储存,主要介绍太阳能的热储存方法;第7章至第8章为太阳能热利用工程的内容,主要介绍太阳能热水系统的分析及设计方法.

本书由淮海工学院新能源科学与工程系邵理堂、刘学东、孟春站主编.第1,6章由孟春站编写;第2章由刘学东编写;第3,4,5,7,8章由邵理堂编写,并由其完成全书的统稿工作.

本书初稿承蒙东南大学王式民教授、陈振乾教授,江苏大学王助良教授,南京理工大学张后雷教授,淮海工学院李明教授仔细审阅,提出了许多宝贵的修改意见,特此致谢.淮海工学院新能源科学与工程系的各位同事特别是李志国、宋祥磊两位老师协助进行了插图及文字校对等工作,为编者提供了不少帮助.在本书的编写过程中,编者参考了大量的文献资料,在此对这些文献资料的作者一并表示衷心感谢.

限于编者水平,书中缺点和错误之处在所难免,衷心希望读者批评指正.

编 者

2014年6月

目 录

第 1 章 太阳辐射

1.1 太阳 太阳能	001
1.1.1 太阳	001
1.1.2 太阳光谱	003
1.1.3 太阳常数	004
1.1.4 太阳能利用的特点	006
1.2 与太阳辐射有关的角度的计算	007
1.2.1 相关角度的定义	007
1.2.2 角度之间的关系和有关公式	011
1.2.3 跟踪太阳时太阳入射角的计算	013
1.2.4 太阳入射角计算式的推导	014
1.3 太阳辐射的计算	016
1.3.1 与太阳辐射有关的名词和符号	016
1.3.2 大气层外水平面上太阳辐射的计算	017
1.3.3 大气层对太阳辐射的影响	019
1.3.4 标准晴天水平面上太阳辐射量的计算	024
1.3.5 水平面与倾斜面上辐射量的比较	025
1.3.6 集热器的最佳方位	027

第 2 章 太阳能集热器涂层

2.1 概述	028
2.2 太阳光谱选择性吸收涂层	029
2.2.1 太阳光谱选择性吸收表面的工作原理	030
2.2.2 太阳光谱选择性吸收材料能带理论	030
2.2.3 光谱选择性吸收表面的分类	033
2.3 光谱选择性吸收涂层的制备方法	037
2.3.1 概述	037

2.3.2	溅射沉积技术的基本原理	039
2.3.3	溅射沉积技术	041
2.3.4	选择性吸收膜系的制备	047
2.4	太阳光谱选择性吸收表面及制品的热性能测评	049
2.4.1	选择性吸收膜系发射率测量技术	049
2.4.2	太阳吸收比测评技术	053

第3章 平板型太阳能集热器

3.1	概述	055
3.2	平板型集热器的组成	056
3.2.1	平板型集热器的结构	056
3.2.2	平板型集热器的主要部件	057
3.3	平板型集热器吸收的太阳辐射	063
3.3.1	基本能量平衡方程	063
3.3.2	集热板吸收的太阳辐射能	064
3.4	平板型集热器的热损失	071
3.4.1	顶部热损失	071
3.4.2	底部和侧面热损失	078
3.5	平板型集热器的性能分析	079
3.5.1	集热器的效率因子 F'	079
3.5.2	集热器的热迁移因子 F_R 和流动因子 F''	084
3.5.3	集热板的平均温度	087
3.5.4	平板集热器的热效率	088
3.5.5	热容量对集热器性能的影响	091
3.6	太阳能空气集热器	092
3.6.1	空气集热器的分类	092
3.6.2	空气集热器的热性能分析	095

第4章 真空管太阳能集热器

4.1	概述	100
4.2	全玻璃真空管集热器	100
4.2.1	全玻璃真空集热管的结构	100
4.2.2	全玻璃真空集热管的热性能分析	104
4.2.3	全玻璃真空集热管的性能测试	108



4.2.4 全玻璃真空集热管的改进形式	111
4.3 金属吸热体真空管集热器	113
4.3.1 热管式真空管集热器	113
4.3.2 其他形式金属吸热体真空管集热器	119
第5章 聚光太阳能集热器	
5.1 概述	123
5.2 聚光太阳能集热器的基本理论	125
5.2.1 太阳成像原理	125
5.2.2 聚光器的聚光比	127
5.2.3 聚光集热器瞬时效率及理论集热温度	130
5.3 抛物面聚光集热器	132
5.3.1 相对光孔	132
5.3.2 聚光集热器的光学性能分析	135
5.3.3 聚光集热器的热性能分析	139
5.4 复合抛物面聚光集热器	142
5.4.1 CPC 的光学性能分析	142
5.4.2 CPC 的热性能分析	146
第6章 太阳能的热储存	
6.1 概述	149
6.1.1 蓄能技术的类型	149
6.1.2 太阳能热储存的必要性和发展现状	150
6.1.3 太阳能热储存的分类	151
6.1.4 太阳能热储存的一般要求	153
6.2 显热储存	154
6.2.1 显热储存的一般原理	154
6.2.2 显热储存的常用材料	154
6.2.3 显热储存的缺点	155
6.2.4 液体显热储存	156
6.2.5 固体显热储存	157
6.3 相变储热(潜热储存)	161
6.3.1 潜热储存的一般原理	161
6.3.2 潜热储存的特点	162

6.3.3 常用相变材料	163
6.4 化学储热	170
6.4.1 概述	170
6.4.2 可供选择的化学反应及其分类	171
6.4.3 可逆化学反应储热的主要优缺点	174
6.5 太阳能热储存的经济性分析	175

第7章 太阳能热水系统

7.1 太阳能热水系统的分类	177
7.2 太阳能热水系统的性能分析	179
7.2.1 自然循环系统	179
7.2.2 强制循环系统	184
7.2.3 直流式太阳能热水系统	189
7.3 太阳能热水系统的技术要求	191
7.3.1 系统形式	192
7.3.2 系统性能	194
7.4 太阳能热水系统的节能效益分析	197
7.4.1 太阳能热水系统节能效益的预评估	197
7.4.2 太阳能热水系统节能效益的长期监测	201

第8章 太阳能热水系统设计

8.1 概述	203
8.2 热水系统负荷计算	204
8.2.1 系统日耗热量、热水量的计算	204
8.2.2 设计小时耗热量、热水量的计算	205
8.3 太阳能集热系统设计	206
8.3.1 系统选型	206
8.3.2 太阳能集热面积的确定	208
8.3.3 太阳能集热器的定位	211
8.3.4 集热器的布局与连接	214
8.3.5 集热器的流量	217
8.4 贮水箱的设计	217
8.4.1 贮水箱的分类	217
8.4.2 贮水箱容积的确定	218



8.4.3 贮水箱的开孔	218
8.4.4 间接式系统换热器选型	220
8.5 辅助热源	221
8.5.1 辅助加热量的计算	221
8.5.2 容积式和半容积式水加热器	222
8.5.3 常压燃油、燃气热水锅炉/热水器	222
8.5.4 电加热水锅炉/电加热器	222
8.5.5 热泵	223
8.6 管网设计	223
8.6.1 管网的水力计算	223
8.6.2 水泵的选型	225
8.6.3 管材和附件	226
8.6.4 集热系统管路设计要求	231
8.7 保温	231
8.7.1 保温层厚度计算	231
8.7.2 保温材料的选择	232
8.8 系统控制	233
8.8.1 运行控制	233
8.8.2 防冻控制	236
8.8.3 防过热控制	239
参考文献	240
附 录	246



第1章

太阳辐射

1.1 太阳 太阳能

1.1.1 太阳

太阳是位于太阳系中心的恒星,离地球的平均距离为 1.5×10^8 km,是太阳系唯一会发光的天体,其直径大约是 1.39×10^6 km,相当于地球直径的 109 倍,体积大约是地球的 130 万倍,质量为 1.989×10^{30} kg(约是地球的 332 000 倍),平均密度约为地球的 1/4。从化学组成来看,太阳物质构成中大约 3/4 是氢,剩下的几乎都是氦,其他包括氧、碳、氮、铁和其他的重元素在内质量少于 2%。可以说,太阳是一个主要由氢和氦组成的炽热气体火球。

太阳内部通过核聚变把氢转变为氦,在反应过程中,太阳每秒要亏损 4.0×10^9 kg 质量(每 1 g 氢转变成氦时质量亏损 0.072 g),根据质能方程($E=mc^2$),可产生 360×10^{21} kW 的能量。这股能量以电磁波形式向空间四面八方传播,到达地球大气层上界的只占上述总功率的 1/(20 亿),即 180×10^{12} kW。考虑到穿越大气层时的衰减,最后到达地球表面的功率约为 85×10^{12} kW,相当于全世界发电量的几十万倍,从这个意义上讲太阳提供的能量是无穷尽的。

太阳结构如图 1-1 所示。按照由里往外的顺序,太阳由核心、辐射层、对流层、光球层、色球层、日冕层构成。光球层之下称为太阳内部,光球层之上称为太阳大气。

1) 核反应区

太阳的半径为 R ,在 $0 \sim 0.25R$ 范围内为太阳核心,是太阳放射巨大能量的真正源头,也称为核反应区。这里温度高达 1 500 万度,压力相当于 3 000 亿个大气压,随时都在进行着 4 个氢核聚变成 1 个氦核的热核反应。根据原子核物理学和质能方程,每秒钟有质量为 6 亿吨的氢经过热核聚变反应成为 5.96 亿吨的氦,并释放出相当于 400 万吨氢的能量,正是这巨大的能源给我们带来了光和

热,而损失的质量与太阳的总质量相比,却是不值一提的.根据对太阳内部氢含量的估计,太阳至少还有 50 亿年的正常寿命.

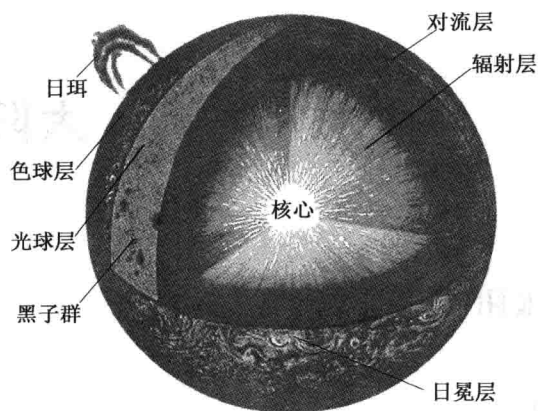


图 1-1 太阳结构

2) 辐射层

0.25 R ~0.86 R 范围内是太阳辐射层,这里包含了各种电磁辐射和粒子流.辐射从内部向外部的传递过程是多次被物质吸收而又再次发射的过程.

3) 对流层

对流层是辐射层的外侧区域,其厚度约有十几万千米,由于这里的温度、压力和密度梯度都很大,太阳气体呈对流的不稳定状态.太阳内部能量就是靠物质的这种对流,由内部向外部传输.

4) 光球层

对流层的外层也就是肉眼可见的太阳表面,称为光球.光球是一层不透明的气体薄层,它确定了太阳非常清晰的边界,其温度约为 6 000 K,密度为 10^{-3} kg/m^3 ,厚约 500 km.光球内的气体电离程度很高,因而能吸收和发射连续的辐射光谱.光球是太阳的最大辐射源,几乎所有的可见光都是从这一层发射出来的.光球表面常有黑子及光斑活动,对于太阳辐射量及电磁场有强烈的影响,其活动周期约为 11 年.

5) 色球层

色球层位于光球层之上,厚度约为 2 000 千米.太阳的温度从核心向外直到光球层逐渐下降,但到了色球层,却又反常上升,到色球层顶部时已达几万度.由于色球层发出的可见光总量不及光球层的 1%,因此人们平常看不到它.只有在发生日全食时,即食既之前几秒或者生光以后几秒,在光球所发射的明亮光线被月影完全遮掩的短暂时间内,肉眼才能在日面边缘看到太阳呈现出狭窄的玫瑰红色的



发光圈层,这就是色球层.平时,科学家们要通过单色光(波长为 656.3 nm)色球望远镜才能观测到太阳色球层.

6) 日冕层

日冕层是太阳大气的最外层,由高温、低密度的等离子体组成,亮度微弱,在白光中的总亮度比太阳圆面亮度的百分之一还低,约相当于满月的亮度,因此只有在日全食时才能展现其光彩,平时观测则使用专门的日冕仪.日冕层的温度高达百万度,其大小和形状与太阳活动有关,在太阳活动极大年时,日冕层接近圆形;在太阳宁静年时,则呈椭圆形.自古以来,观测日冕的传统方法都是等待一次罕见的日全食.在黑暗的天空背景上,月面把明亮的太阳光球面遮掩住,而在日面周围呈现出青白色的光区,这就是人们期待观测的太阳最外层大气——日冕层,如图 1-2 所示.

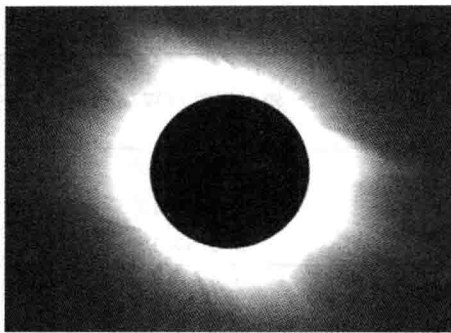


图 1-2 日冕

1.1.2 太阳光谱

如前所述,太阳并不是某一固定温度的黑体辐射体,而是各层发射和吸收各种波长的综合辐射体.太阳辐射中辐射能按波长的分布称为太阳辐射光谱.大气上界太阳光谱能量分布曲线,与用普朗克黑体辐射公式计算出的 6 000 K 的黑体光谱能量分布曲线非常相似.因此可以把太阳辐射看作黑体辐射.根据维恩位移定律可以计算出太阳辐射峰值的波长 $\lambda_{\max}$ 为 $0.475 \mu\text{m}$.在全部太阳辐射能中,波长在 $0.15 \sim 4 \mu\text{m}$ 的占 99% 以上,且主要分布在可见光区和红外区,前者约占太阳辐射总能量的 50%,后者约占 43%;紫外区的太阳辐射能很少,只占总量的约 7%.在太阳能热利用技术中,可将太阳看成温度为 6 000 K,波长为 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ 的黑体辐射.

图 1-3 为日地平均距离的标准太阳辐射光谱.为使用方便,相应的数据列在表 1-1 上.