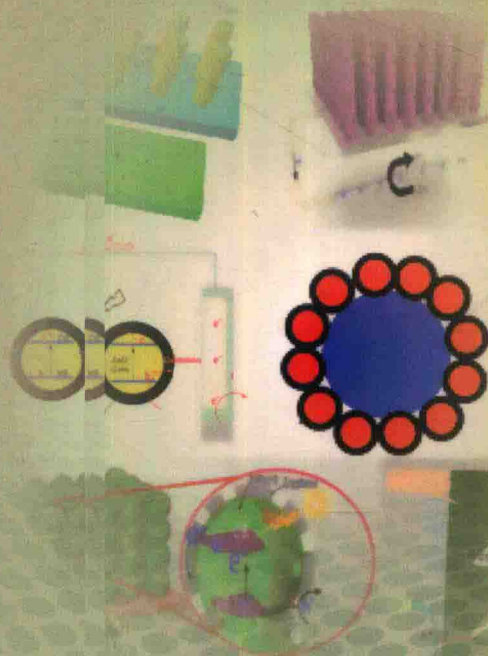


中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版  
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 异质结体系光催化材料

陈卓元 补钰煜 著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

# 异质结体系光催化材料

陈卓元 补钰煜 著

科学出版社

## 内 容 简 介

本书主要围绕半导体光催化材料中的一个分支体系——异质结体系展开论述。构筑异质结体系是提高光催化材料产生的光生电子和空穴分离的有效途径。本书以作者近年来所在研究组在异质结光催化材料设计领域的研究结果为基础,结合光催化理论、半导体理论、电化学/光电化学原理等对异质结光催化剂的工作机理作出阐述,为异质结光催化剂的选材和结构设计等提供一定的思路。主要内容包括半导体光催化的概念、光催化的机理、半导体-半导体光催化体系、半导体-金属光催化体系、半导体-石墨烯体系、半导体-半导体壳核结构体系以及半导体-金属-半导体 Z 型结构体系。同时,作者还结合国内外同行在相关方面的研究工作,对光催化材料的设计以及理论研究作了较为详细的阐述。

本书主要为腐蚀科技工作者服务,还可供光催化材料研究设计领域的科研工作者和工程技术人员阅读,也可以作为材料、化工专业研究生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书:典藏版/侯保荣主编. —北京:科学出版社, 2018.1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-056255-5

I. ①中… II. ①侯… III. ①腐蚀-调查研究-中国 IV. ①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 002936 号

责任编辑:李明楠 赵 慧/责任校对:韩 杨

责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 11 5/8

字数: 231 000

定价: 3200.00 元(全 32 册)

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书  
顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委 员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张 偲
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	郝吉明
胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪	翁宇庆
高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基	魏复盛

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书  
总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

## 丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业和部门,如基础设施工程、传统及新兴能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐蚀技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“中国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够各领域的防腐蚀工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐匡迪

2015年9月

## 丛书前言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”战略的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的一个重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解和认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月



## 序

化石能源的不断消耗使人类面临着能源短缺和环境污染两大问题。而光催化可将低密度太阳能通过光化学反应转换为化学能，具有低成本、环境友好等优点，是一种清洁的、可持续发展的，又能同时解决能源与环境问题的方式，在环境净化、光解水制氢、染料敏化太阳能电池及光电化学阴极保护等领域有广泛的应用前景。

光催化技术发展至今仍存在诸多问题，如量子效率低、可见光光电转换率低、不易回收等。但是，通过开发新型、高效、可见光响应的光催化材料将进一步解决太阳能利用率低的问题。而异质结复合材料因其能在界面处建立一个电场，此电场会提高光生电荷的分离效率，并促进载流子的输运，因此成为解决光催化瓶颈问题的热点方法之一。目前在我国，异质结体系光催化材料的研究尚不系统，基础理论仍待深入研究。

《异质结体系光催化材料》是作者在多年从事光催化研究工作的研究经验上，整理分析国际国内大量文献资料，结合作者所在单位课题组近年来科研成果的基础上撰写的。全书共分为8章，重点介绍了光催化理论基础、半导体-半导体负载型异质结光催化体系、氮化碳包覆二氧化钛半导体壳核结构异质结体系、石墨烯-半导体复合异质结体系、金属-半导体异质结体系、半导体-金属-半导体Z型异质结体系。该书不仅涵盖了复合光催化材料及其改性研究方面的新发展，还详细介绍了光催化材料物理性质表征的各种手段以及光催化机理和光催化性能的表征技术和方法。书中章节结构设计合理、内容翔实，读后有开拓思维和视野之感。

该书是作者在紧跟国际前沿热点材料和结构基础上，对择优构筑的多种不同类型异质结体系进行了广泛而深入的研究后，对研究成果进行归纳、整合及提炼而成。该书的出版将有助于读者掌握异质结光催化体系的合理构筑及应用的基本知识，对设计异质结高效光催化材料提供理论和实践上的依据，对调控及提升光催化效能具有重要学术价值。相信该书的出版将对进一步解决光催化技术的瓶颈问题起到很好的引导作用，对推动光催化材料在各个领域的应用具有重要意义。

侯保荣

2016年1月

# 前 言

进入 21 世纪后,能源危机和环境污染这两个问题给人类的生存和发展带来了巨大的威胁。开发可持续的清洁新能源是解决以上两个问题的关键。太阳能是一种可持续的清洁能源,目前人类所利用的能源几乎都来自于太阳能的转变。因此,如何利用好太阳能、提高其能量转换效率是解决人类即将面临的能源危机和环境污染问题的关键。

自从 1972 年 Fujishima 等报道二氧化钛薄膜具有光电化学催化裂解水产氢性能以来,光催化技术引起了科研工作者的广泛关注,光催化的应用范围也逐渐扩展到光催化裂解水产氢、光催化有机污染物降解、光催化自清洁薄膜、光催化抗菌涂料以及光电化学阴极保护等多个领域,体现出了较高的应用价值。

本书主要介绍了光催化材料体系中的异质结体系材料。大量的研究表明,构建异质结体系是提高光催化剂光催化性能的有效手段之一。当两种材料之间形成异质结电场后,该电场可以驱动光生载流子快速分离形成自由的光生电子和空穴,从而提高光催化剂的量子产率。本书是作者在多年从事光催化研究工作的基础上,结合作者的研究成果以及在该领域多年的研究经验,经过不断总结、修改和创新撰写而成的。全书共分为 8 章,主要包括光催化理论基础、半导体-半导体负载型异质结光催化体系、氮化碳包覆二氧化钛半导体壳核结构异质结体系、石墨烯-半导体复合异质结体系、金属-半导体异质结体系、半导体-金属-半导体 Z 型异质结体系等。本书首先简单介绍了光催化原理以及异质结光催化原理,之后结合多年的研究结果,系统地介绍了几个异质结体系的热点材料和结构。

撰写本书的初衷是为腐蚀科学工作者服务的。近年来,光电化学阴极保护领域的研究比较热。由于光电化学阴极保护法是利用太阳能激发半导体材料产生光生电子,光生电子再转移到金属材料上,给偶联的金属提供类似外加电流的阴极保护。由于该技术是利用太阳能产生电子,半导体材料本身只是作为一个转换中心而不会遭受破坏,同时在光电化学阴极保护过程中无有毒有害物质的产生,因此这项技术是绿色环保的防腐蚀技术。该技术的关键是要选择具有很好的光电化学与光催化性能和高稳定性的半导体材料。然而,在选择半导体材料的过程中就要求腐蚀科学工作者要充分了解光电化学的基础知识以及相应的研究方法等。希望通过对本书的阅读可以给金属腐蚀防护领域的工作者提供相关信息,使他们能快速掌握这方面的知识,并把这些知识应用到绿色防腐蚀方法的研究与开发中去,从而促进这个方向的快速发展。同时,希望本书对希望进入光催化领域学习的研究生有帮助,使他们可以在短时间内,从本书中学习到光催化的基础知识和如何

应用各种测试手段来开展该方面的研究工作。

本书根据作者在青岛市创业创新领军人才项目[项目编号: 15-10-3-15-(39)-zch]、国家自然科学基金面上项目(项目批准号: 41376126)和青岛市科技成果转化引导计划(应用基础研究)项目(项目编号: 14-2-4-4-jch)中进行的研究工作写成的。作者谨向这些项目提供经费支持表示感谢!同时,本书作者的学生张小影博士、孙萌萌博士和荆江平硕士参与了本书涉及的一部分研究工作,并参与了该书撰写过程的文字整理与修改工作,在此对他们的贡献表示诚挚的谢意!青岛科技大学李卫兵教授对参与本书研究工作的博士后和研究生进行了指导和帮助,一并致以感谢!

感谢中国工程院重大咨询项目对本书出版的资助。

由于作者水平有限,书中缺点与疏漏在所难免,如蒙指正,不胜感激。

陈卓元

2016年1月

# 目 录

丛书序	
丛书前言	
序	
前言	
第 1 章 绪论	1
参考文献	7
第 2 章 光催化理论基础概述	8
2.1 光催化基础知识	8
2.1.1 光催化基本概念	8
2.1.2 光催化基本原理	9
2.2 光催化性能的提高手段	10
2.2.1 光子的吸收和激子的产生及其提升手段	10
2.2.2 光生电子-空穴的分离和迁移过程及其优化手段	11
2.2.3 光生电子和空穴在材料表面的催化氧化还原反应	12
2.3 光催化异质结体系基本原理	13
2.3.1 p-n 型异质结结构	13
2.3.2 n-n 型异质结结构	14
2.3.3 p-p 型异质结结构	15
2.3.4 贵金属-半导体型异质结结构	16
参考文献	16
第 3 章 半导体-半导体负载型异质结光催化体系	17
3.1 硫化镉敏化 ZnO 纳米棒阵列异质结体系	17
3.1.1 引言	17
3.1.2 硫化镉敏化 ZnO 纳米棒阵列材料的物理表征	19
3.1.3 硫化镉敏化 ZnO 纳米棒阵列的光电化学还原水制氢性能	22
3.1.4 小结	29
3.2 氢处理 ZnO 纳米棒阵列量子点敏化光阳极	30
3.2.1 引言	30
3.2.2 ZnO 纳米棒和氢处理 ZnO 纳米棒的物理表征	32

3.2.3 ZnO 纳米棒和氢处理 ZnO 纳米棒的光电化学性能	35
3.2.4 硫化镉量子点敏化氢处理后的 ZnO 纳米棒阵列的光电化学性能	40
3.2.5 硫化镉量子点敏化氢处理后的 ZnO 纳米棒阵列材料的光电化学性能提升机理	43
3.2.6 小结	44
参考文献	45
<b>第 4 章 氮化碳包覆二氧化钛半导体壳核结构异质结体系</b>	<b>48</b>
4.1 引言	48
4.2 O-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @TiO <sub>2</sub> 壳核纳米结构复合材料的物理表征	51
4.3 O-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @TiO <sub>2</sub> 壳核纳米结构复合材料的光电化学性能	54
4.4 O-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @TiO <sub>2</sub> 壳核纳米结构复合材料的光催化降解性能	57
4.5 O-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> @TiO <sub>2</sub> 壳核纳米结构复合材料光电化学性能提升机理	59
4.6 小结	62
参考文献	63
<b>第 5 章 石墨烯-半导体复合异质结体系</b>	<b>65</b>
5.1 石墨烯包覆 ZnO 异质结体系	65
5.1.1 引言	65
5.1.2 石墨烯@ZnO 壳核结构复合材料的物理表征	67
5.1.3 石墨烯@ZnO 壳核结构复合材料的光催化降解性能	72
5.1.4 石墨烯@ZnO 壳核结构复合材料的光电化学性能	74
5.1.5 石墨烯@ZnO 壳核结构复合材料的光电化学以及光催化降解性能提升机理	77
5.1.6 小结	80
5.2 Ag 修饰的石墨烯包覆 ZnO 异质结体系	80
5.2.1 引言	80
5.2.2 Ag 修饰的石墨烯@ZnO 复合材料的物理表征	82
5.2.3 Ag 修饰的石墨烯@ZnO 壳核结构复合材料的光催化降解性能	86
5.2.4 Ag 修饰的石墨烯@ZnO 壳核结构复合材料的光电化学性质	88
5.2.5 Ag 修饰的石墨烯@ZnO 壳核结构复合材料的光催化机理	89
5.2.6 小结	90
5.3 氢化 TiO <sub>2</sub> 复合还原氧化石墨烯异质结体系	90
5.3.1 引言	90
5.3.2 氢化 TiO <sub>2</sub> 复合还原氧化石墨烯异质结体系的物理表征	92
5.3.3 氢化 TiO <sub>2</sub> 复合还原氧化石墨烯异质结体系的光催化性能	95
5.3.4 氢化 TiO <sub>2</sub> 复合还原氧化石墨烯异质结体系光催化活性增强机理	96
5.3.5 小结	101

5.4 石墨烯修饰 BiMoVO 异质结体系	102
5.4.1 引言	102
5.4.2 石墨烯修饰 BiMoVO 异质结体系的物理表征	104
5.4.3 石墨烯修饰 BiMoVO 异质结体系的光电化学性能	109
5.4.4 石墨烯修饰 BiMoVO 异质结体系的光电化学性能提升机理	112
5.4.5 小结	114
参考文献	115
<b>第 6 章 金属-半导体异质结体系</b>	<b>117</b>
6.1 Ag 修饰介孔氮化碳异质结体系	117
6.1.1 引言	117
6.1.2 Ag 修饰的介孔氮化碳异质结体系材料的物理表征	119
6.1.3 Ag 修饰的介孔氮化碳异质结体系材料的光催化降解性能	123
6.1.4 Ag 修饰的介孔氮化碳异质结体系材料的光催化性能提升机理	125
6.1.5 小结	132
6.2 Ag 修饰聚苯胺-磷酸银复合异质结体系	132
6.2.1 引言	132
6.2.2 聚苯胺/Ag/磷酸银复合材料的物理表征	134
6.2.3 聚苯胺/Ag/磷酸银复合材料的光催化降解性能	140
6.2.4 聚苯胺/Ag/磷酸银复合材料的光催化降解性能提升机理	143
6.2.5 小结	148
参考文献	149
<b>第 7 章 半导体-金属-半导体 Z 型异质结体系</b>	<b>151</b>
7.1 引言	151
7.2 磷酸银/Ag/WO <sub>3-x</sub> Z 型异质结体系材料的晶形结构	153
7.3 磷酸银/Ag/WO <sub>3-x</sub> Z 型异质结体系材料的成分分析	154
7.4 磷酸银/Ag/WO <sub>3-x</sub> Z 型异质结体系材料的微观形貌	156
7.5 磷酸银/Ag/WO <sub>3-x</sub> Z 型异质结体系材料的比表面积分析	158
7.6 磷酸银/Ag/WO <sub>3-x</sub> Z 型异质结体系材料的光吸收性能	160
7.7 磷酸银/Ag/WO <sub>3-x</sub> Z 型异质结体系材料的光降解性能	161
7.8 磷酸银/Ag/WO <sub>3-x</sub> Z 型异质结体系材料的光致发光光谱分析	164
7.9 磷酸银/Ag/WO <sub>3-x</sub> Z 型异质结体系材料的光催化机理分析	165
7.10 小结	166
参考文献	166
<b>第 8 章 结语</b>	<b>168</b>

# 第 1 章 绪 论

随着人类社会的发展和进步，人们对于能源的消耗日益增加。能源的大量消耗使人们直接面临化石能源短缺和环境污染两大问题。20 世纪 70 年代全球爆发的能源危机更是引起了各国政府的极大关注。进入 21 世纪以来，能源危机和环境污染问题更是日趋严重。2012 年，全球的能量消费量为  $532.8 \times 10^{18}$  J；随着人类生产的进一步发展，预计到 2035 年全球的能量消费量将达到  $770 \times 10^{18}$  J，这些消耗的能量中，又以化石燃料为主。据报道，美国每年能量消费量的 80% 以上来源于化石燃料，包括石油、煤和天然气，而核能和可再生能源所占比例不足 20%，如图 1-1 所示<sup>[1]</sup>。

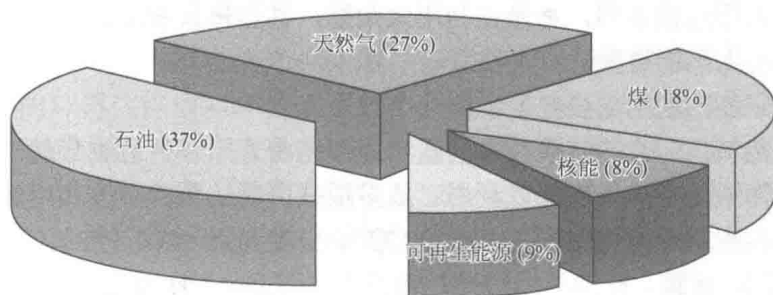


图 1-1 2012 年美国能源消费中各种不同能源来源所占的百分比<sup>[1]</sup>

众所周知，资源的蕴藏量不是无限的。大多数地质学家认为，煤、天然气和石油等化石资源是古代有机物通过漫长的压缩和加热后逐渐形成的，其储量是有限的。以使用量最大的石油为例，至今为止人类已经开采了约 9 百万桶石油，而地球剩下多少石油储量目前还没有定论，但是作为消耗性能源，迟早是要被用尽的。这些剩余的石油还可以开采多久？据大多数科学家的估计，现在的世界石油储藏量仅够使用 50 年。即使是拥有最大石油储藏量的沙特，其石油大约也仅够再开采 70 年。除容易开采和利用的石油储量已经不多外，剩余石油的开采难度也会越来越大，到一定程度后就会失去继续开采的价值。

化石能源不仅储量有限、开采费用昂贵，而且会对生态环境造成污染和破坏。化石能源燃烧时会向大气层释放二氧化碳，导致全球变暖；以煤炭为代表的能源，燃烧时还会释放出大量的二氧化硫、氮氧化物和可吸入的颗粒物等物质，造成严重的环境污染。最近几年，中国北方一到冬季便雾霾肆虐，这是大量汽车燃烧汽

油和柴油所释放出的尾气和供暖燃烧煤炭所释放出的废气等综合作用的结果。因此,考虑到石油等化石资源的日渐枯竭以及日益严重的环境污染问题,寻求清洁的可再生能源和绿色能源已经刻不容缓。

在诸多的可再生能源中,太阳能资源以其储量巨大、使用安全、绿色环保且基本不受地理条件限制等优势,备受青睐。太阳是一个炽热的气团,平均密度为地球的四分之一,其主要组成为气体氢和氦。太阳以电磁波的形式向外传递能量。太阳辐射的能量来源于氢核聚变产生的能量。在高温和高压状态下,四个氢原子核经过一系列的聚变反应变成一个氦原子核,并释放出大量的热量。这样的不断聚变持续地为太阳提供能量。太阳辐射能是地球大气运动的主要能量源泉,也是地球光热能的主要来源。地球所接收到的太阳辐射能量仅为太阳向宇宙空间放射的总辐射能量的二十二亿分之一,但仍高达  $1.7 \times 10^{13}$  kW,约为全球能量总消耗量 ( $\sim 1.28 \times 10^9$  kW) 的 10 000 多倍。因此,如果能够开发合理的太阳能利用技术,便可以有效地解决即将来临的能源危机。

人类对太阳能的利用由来已久。远到卫星上使用的太阳能电池板,近到人们每天使用的太阳能热水器,都是在利用太阳能,甚至每天食用的食物、燃烧的化石燃料,都与太阳能有关。

当前太阳能的利用主要包括以下几个方面:

(1) 光热转换。光热转换技术的基本原理是将太阳辐射能收集起来,通过与物质的相互作用转换成热能加以利用。通常根据所能达到的温度和用途的不同,将太阳能光热利用分为低温利用 ( $< 200$  °C)、中温利用 ( $200 \sim 800$  °C) 和高温利用 ( $> 800$  °C)。目前,低温利用的光热转换主要有太阳能热水器、太阳能干燥器、太阳能蒸馏器、太阳能采暖(太阳房)、太阳能温室、太阳能空调制冷系统等。中温利用的光热转换主要有太阳灶、太阳能热发电聚光集热装置等。高温利用的光热转换主要有高温太阳炉等。

(2) 光电转换。光电转换技术的基本原理是光子将能量传递给电子使其运动从而形成电流。最常见的一种是使用以硅为主要材料的固体装置来捕获光能,另一种则是使用光敏染料分子来捕获光子的能量。而利用太阳能发电的方式也有多种,已实用化的主要有以下两种:光-热-电转换,即利用太阳辐射所产生的热能发电;另一种为直接光-电转换,其基本原理是利用光生伏特效应将太阳辐射能直接转换为电能,它的基本装置是太阳能电池。

(3) 光化学转换。光化学转换技术的基本原理是吸收光辐射能导致化学反应,从而将光能转换为化学能的过程。光化学转换主要包括光合作用、光电化学作用、光敏化学作用及光分解反应等,其基本形式有植物的光合作用和利用物质化学变化储存太阳能的光化学作用。光合作用是最常见的光化学转换形式,光合作用是绿色植物利用叶绿素等光合色素和某些细菌利用其细胞本身,在可见光的照射下,



将二氧化碳和水转化为储存着能量的有机物，并释放出氧气的生化过程。植物通过Z型的电子传递体系，可以高效地通过光合作用将太阳能转化为有机物，以化学能的形式将太阳能加以储存。

中国蕴藏着丰富的太阳能资源，太阳能利用前景广阔。目前，中国太阳能产业规模已位居世界第一，是全球太阳能热水器生产量和使用量最大的国家和重要的太阳能光伏电池生产国。中国比较成熟的太阳能产品有两项：太阳能光伏发电系统和太阳能热水系统。继续研究对太阳能的开发利用是未来工作的重点。高效利用太阳能主要面临着三个方面的挑战，分别是太阳能的捕获、转换和存储。太阳能电池是直接将太阳能转换成电能的装置，是目前利用太阳能最广泛的方式。它有效地解决了太阳能的捕获及转换问题，但不能解决能量储存的问题。光催化太阳能燃料电池则是利用太阳能的另外一种方式，它是利用太阳光将丰富的原材料（如水和二氧化碳等）直接转换为成氢气、氧气或其他高能有机物，从而直接将太阳能转换成化学能，这可以同时解决前文提到的关于太阳能利用的三个问题（捕获、转换和存储），而且可以避免常规光伏电池能量存储难的问题<sup>[2-4]</sup>。

光催化技术可以模拟自然光合作用，直接将太阳能转换成化学能，因此它是实现清洁的可再生能源和环境整治的一个有效策略。光催化是指在紫外光、可见光或红外光照射下，光催化剂吸收光后改变化学反应或初始反应的速率，引起反应成分的化学改变。而在光催化反应中起到关键作用的是光催化剂，它在吸收光后能够使反应物质发生化学变化，激发态的光催化剂能循环多次地与反应物作用生成中间物质，同时保证自身在反应前后不变。光催化技术是利用光催化反应中形成的光生电子和空穴对以及产生的一系列具有高氧化还原电位的活性氧物质，通过氧化还原反应将环境体系中各种有机或无机污染物的价键破坏从而彻底降解。光催化反应改变了反应的活化能，它促进降解反应以高效低能耗的途径发生。

光催化技术具有的优势为：

(1) 成本低。选用廉价稳定的光催化材料，如二氧化钛和氧化锌等，无需外加其他反应试剂，通过活化绿色廉价的氧化剂分子氧进行氧化还原处理，因此技术成本较低。

(2) 安全性高。所使用的光催化剂无毒，光催化反应可将有机化合物彻底降解为二氧化碳和水，中间产物较少。

(3) 效率高。光催化剂通常为纳米级材料，比表面积高，光学吸收系数大，而光催化反应中生成的活性物质·OH具有仅次于氟的高氧化还原电位，具有无选择性氧化降解有机污染物的能力，因此光催化降解反应具有可以实用的高效率。