



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

太阳能光热光电的高效 吸收与传递

董双岭 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

太阳能光热光电的高效 吸收与传递

董双岭 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对太阳能光热光电利用中的高效吸收与传递进行了重点论述,内容包括:对比了四种典型的太阳能热发电系统,提出了一种复合式的光路系统;太阳能复合相变储热介质的性能优化;光谱选择性柔性涂层的提出和制备;多孔介质太阳能集热器的传热特性分析;空实混合纳米颗粒流体的吸放热实验研究;基于纳米流体吸收部分光谱与光伏余热的综合性能的对比优化实验;光伏-热电耦合的分光利用与光伏-光谱转换的优化方案;光伏表面的微结构的吸光性模拟。

本书适用于工程热物理和热能工程等相关专业研究生和高年级本科生阅读,也可供从事太阳能发电研究的科技人员与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光热光电的高效吸收与传递/董双岭著. —北京:科学出版社, 2019.3
(博士后文库)

ISBN 978-7-03-059911-7

I. ①太… II. ①董… III. ①太阳能热发电-研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 271489 号

责任编辑:赵敬伟 郭学雯/责任校对:彭珍珍

责任印制:肖 兴/封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:213 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

傅伯杰	付小兵	郭坤宇	胡 滨	贾国柱	刘 伟
卢秉恒	毛大立	权良柱	任南琪	万国华	王光谦
吴硕贤	杨宝峰	印遇龙	喻树迅	张文栋	赵 路
赵晓哲	钟登华	周宪梁			

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



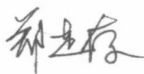
中国博士后科学基金会理事长

序

太阳能分布广泛、储量丰富、清洁无污染,其开发和应用对于缓解能源危机和环境污染有重要作用。太阳能光伏和光热,可用于大规模发电。近四十年来,国内外建立了许多光伏和光热示范电站,我国也于 2016 年发布了首批 20 个光热发电示范项目。我国的光热发电产业,建设和规划的装机容量居于世界前列,技术需要突破性的升级,大规模设计操作的经验也需要去累积。为了更好地发挥太阳能电站的作用,非常需要对光热与光伏系统的吸光以及传热过程有深入的理解和认识,以提高它们的发电效率。

该书从太阳能的应用背景和研究成果出发,对比分析了典型的太阳能热发电系统,并介绍了作者对光伏光热系统效率提高的改进实验、理论设计和部分模拟工作。主要内容包括提出了一种复合式的光路系统,分析了新的陶瓷熔盐复合储能材料,制作了太阳能吸收柔性涂层。对于多孔介质和纳米流体两种体吸收的性能进行了分析,对比了多种纳米流体基光伏光热耦合系统,研究了光伏-热电的分光利用过程,给出了分光与光谱转换结合的优化结构,改进了光伏吸收表面的微结构。该书对于推动太阳能光热光伏技术的发展,以及太阳能电站的开发利用,具有一定的启发和指导意义。

该书作者本科就读于天津大学工程力学系,本科毕业后保送到北京航空航天大学流体力学研究所国家计算流体力学实验室(直博)攻读博士学位,博士毕业后在北京科技大学和清华大学做了两站博士后,对科学研究有着浓厚的兴趣和执着的追求。作者第一站博士后期间,在我的课题组工作非常勤奋、努力,在纳米流体复杂流动与传热的研究方面做出了很多有意义的研究工作。该书整理并归纳了作者近些年的相关研究成果。相信该书的出版将有助于推进太阳能光伏光热的技术进步和工程应用。



2018 年 7 月于北京

前 言

太阳能的利用从古至今、方式多样,如取暖、取火、晒盐、验伤等。随着化石能源的短缺和环境污染的加剧,新型能源的开发和应用日益重要。太阳能作为一种分布广泛、储量丰富、无污染的清洁能源,成为人类解决能源问题的主要途径之一。太阳能转换主要有生物、物理和化学方法,太阳能大规模应用的主要方式是光伏和光热发电。其中,太阳能光热利用可以吸收绝大部分光谱的太阳能,可以和传统火电的发电部分对接;太阳能光伏利用则更方便就近供电、运行稳定。

实际上,根据太阳光的聚焦特点不同,太阳能光热发电主要分为点聚焦方式的塔式、碟式系统,线聚焦方式的槽式、线性菲涅耳式发电系统。四类发电系统都有各自的技术性能及优缺点,有待综合利用加以改进。事实上,无论哪种发电方式,都需要相应的储能系统,以克服太阳辐射的间歇性问题。昼夜的变化也导致集热管长期交替经受几百摄氏度的温差,容易产生较大的热应力,引起膜层脱落,从而对表面涂层提出了较高的要求。表面吸收热损失较多,体吸收则可在一定程度上解决这个问题,比如采用多孔介质和纳米颗粒流体。纳米流体由于具有优异的光谱吸收和热输运性能,也可用于与光伏的耦合。另一种光伏光热耦合的典型方式就是光伏组件与热电材料的结合。另外,光伏板表面的微纳米复合结构的优化有助于光吸收效率的提高。

针对上述太阳能利用研究中的有关问题,作者近几年逐步开展了相应的理论模拟和实验工作,取得了部分富有特色的研究成果。本书归纳整理了作者近些年的研究内容,当然,书中同时简要介绍了其他研究者的相关学术成果。希望本书能推动太阳能光热光伏技术的理论和应用研究的进一步发展,对同领域的研究者有启发和开拓思路的意义。

本书有 9 章内容。第 1 章介绍了太阳能的应用背景和前人的研究成果,并对相关的太阳能热利用和光伏光热耦合进行了概述。第 2 章首先阐述了四种典型的太阳能热发电系统,然后对其优缺点进行了对比,提出了一种复合式的光路系统。第 3 章对新的(陶瓷熔盐复合)储能材料进行了介绍,它结合了固体显热和相变潜热材料的优点,分析了放热性能。第 4 章针对吸热管涂层的热应力问题,提出了新的柔性涂层,并对比分析了吸热性能的研究。第 5 章对几种典型的多孔结构进行了吸热实验研究,包括有无炭黑涂层的对比和分析。第 6 章给出了优化的纳米颗粒结构,制作了混合的纳米颗粒流体,并进行了吸放热研究。第 7 章结合了纳米流体和光伏组件的各自优势,对光伏发电和纳米流体吸收部分光谱与光伏的余热的

综合性能进行了对比实验,给出了优化方案。第 8 章首先对光伏-热电的分光利用进行了研究,然后提出了分光与光谱转换的方式,并进行了实验分析。第 9 章介绍了光伏表面的微纳米复合结构的吸光性模拟。

作者衷心感谢中国博士后科学基金特别资助和面上资助以及国家自然科学基金青年基金项目(编号为 51406098)的资助。作者在太阳能相关领域的研究工作得到课题组的大力支持,还有整个研究团队里优秀的老师和学生们的帮助,在此一并致谢。

由于时间和水平有限,书中难免有不足之处,欢迎读者批评指正。

董双岭

2018 年 5 月

目 录

《博士后文库》序言

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究概述	1
1.2 太阳能热发电	2
1.2.1 光热电站	2
1.2.2 储热材料	3
1.2.3 表面涂层	4
1.2.4 体吸收	5
1.3 光伏光热耦合	7
1.3.1 吸热流体与光伏的结合	7
1.3.2 光伏-热电耦合	8
参考文献	9
第 2 章 太阳能热发电系统中的复合式结构	15
2.1 太阳能热发电技术概述	15
2.1.1 槽式太阳能热发电系统	16
2.1.2 塔式太阳能热发电系统	16
2.1.3 碟式太阳能热发电系统	17
2.1.4 线性菲涅耳式太阳能热发电系统	17
2.1.5 四种系统的比较	17
2.2 太阳几何学基础简介	18
2.2.1 太阳运动规律	19
2.2.2 光的反射和空间向量运算	21
2.3 太阳能热发电系统结构优化	21
2.3.1 聚光系统结构优化	21
2.3.2 光路计算	22
2.4 本章小结	25
参考文献	25

第 3 章 太阳能储热介质的性能优化	27
3.1 复合储热介质	27
3.1.1 相变储热材料	27
3.1.2 矿物基材料	29
3.2 储热材料的设计和配置	30
3.2.1 相变材料和包裹材料的选取	30
3.2.2 工艺设计	33
3.2.3 制作复合材料	33
3.3 实验和结果分析	35
3.3.1 实验测量	35
3.3.2 结果与分析	36
3.4 本章小结	41
参考文献	42
第 4 章 太阳能吸热器表面涂层	45
4.1 太阳能光谱选择性吸收涂层	45
4.1.1 光谱选择性吸收涂层	45
4.1.2 涂层分类	46
4.1.3 涂层制备方法	46
4.2 太阳能柔性复合涂层	47
4.2.1 固相法制备 CuAlO_2 粉末	47
4.2.2 制备 $\text{CuO-CuAl}_2\text{O}_4$ 涂层	50
4.3 性能和实验分析	55
4.3.1 不同配比的涂层	55
4.3.2 吸收率和发射率	56
4.3.3 吸热实验分析	57
4.4 本章小结	64
参考文献	64
第 5 章 多孔介质太阳能集热器的传热特性	66
5.1 多孔介质简介	66
5.2 实验测量	68
5.2.1 材料和仪器	68
5.2.2 实验过程	70
5.3 结果和分析	71
5.3.1 不同多孔介质的对比	71
5.3.2 升降温的变化特点	73

5.3.3 影响因素分析	75
5.4 本章小结	75
参考文献	76
第 6 章 优化的纳米流体直接吸收太阳能	78
6.1 胶体碳球的制备	79
6.1.1 主要原料及设备	80
6.1.2 实验过程	80
6.2 制备纳米空心球颗粒	83
6.2.1 主要原料及设备	83
6.2.2 实验过程	84
6.3 制备纳米流体	88
6.3.1 主要原料及设备	89
6.3.2 实验过程	89
6.4 实验和分析	90
6.4.1 空心与实心的对比	91
6.4.2 混合与单相的对比	94
6.4.3 综合对比	98
参考文献	101
第 7 章 基于纳米流体的光伏光热耦合分析	103
7.1 常用的光伏光热系统	103
7.1.1 传统的光伏光热系统	103
7.1.2 基于纳米流体对的分频式光伏光热系统	104
7.2 物理模型和实验准备	105
7.2.1 物理模型	105
7.2.2 实验仪器和材料	106
7.3 结果和数据分析	107
7.3.1 物理参数和计算公式	107
7.3.2 实验结果和分析	108
7.4 本章小结	114
参考文献	114
第 8 章 太阳能光伏-热电耦合优化	116
8.1 光伏-热电耦合	116
8.2 模块简介	117
8.2.1 光伏模块	118
8.2.2 热电模块	119

8.2.3 频率转换模块	121
8.3 模型设计及原理	122
8.3.1 太阳能光伏-热电模块结构	122
8.3.2 太阳能光伏-频率转换模块结构	123
8.3.3 功率计算	124
8.4 实验器材简介	125
8.5 实验及数据分析	128
8.5.1 纯光伏板实验	128
8.5.2 光伏-热电模块实验	131
8.5.3 光伏-频率转换模块实验	137
8.6 本章小结	145
参考文献	145
第 9 章 微纳米光伏表面结构吸收性能分析	147
9.1 微纳米表面结构	147
9.2 建立器件模型	150
9.2.1 FDTD Solutions 简介	150
9.2.2 模拟结构的建立	150
9.3 硅纳米柱凹槽阵列的光吸收率	153
9.3.1 深度的影响	153
9.3.2 底圆半径的影响	154
9.3.3 添加螺纹结构的影响	156
9.4 硅纳米圆锥凹槽阵列的光吸收率	158
9.4.1 深度的影响	159
9.4.2 圆锥顶角的影响	160
9.4.3 添加螺纹结构的影响	162
9.5 本章小结	164
参考文献	165
编后记	167

第1章 绪 论

1.1 研究概述

由于化石和其他不可再生能源日益稀缺,世界能源结构发生了重大变化。太阳能作为一种可再生且清洁无污染的绿色能源,将成为代替常规化石能源的有力竞争者。太阳能之所以可以取代常规化石能源,成为不可或缺的重要能源之一,是因为其具有以下众多优势:①绿色清洁无污染;②储量极其丰富;③普遍性,可就地利用;④经济性,利用成本较低。

太阳能发电主要包括光伏和光热两种方式,目前世界常用的太阳能热发电技术有槽式、塔式、碟式、线性菲涅耳式四种。槽式太阳能热发电技术发展最为成熟,其结构简单,已经实现大规模商业化运作,但它的发电效率相对较低;塔式太阳能热发电技术具有较高聚光比,发展潜力极大,但其对太阳追踪要求较高,成本较高,其商业化运作目前仅在试验阶段,降低其成本和更进一步提高效率是它要克服的难关;碟式太阳能热发电技术虽然聚光比和发电效率高,但其核心设备斯特林机制造技术难度高,且投资成本相比塔式更高,不适合大规模商业化运作;线性菲涅耳式太阳能热发电是基于槽式太阳能热发电进行的衍变,仍然没有克服槽式的局限。四种太阳能热发电方式有其各自的优缺点,但由于太阳能的来源具有间歇性,所以它们都离不开储热系统。储热材料的性能会直接影响储热系统的效率。对绝大多数太阳能热利用系统而言,其核心部件之一是太阳能集热器。太阳能集热器吸热效率的高低决定着整个热利用系统的效率。因此,对太阳能热利用效率的研究,可以集中在设法提高太阳能集热器的效率上。太阳能集热器作为一种可以实现将太阳能转化为热能的装置,可以接收来自太阳的辐射,转化产生热能,并将热能传递到传热介质。集热器一般由吸热体和透明盖板两个主要部分组成,而光谱选择性吸收涂层就应用在吸热体上,使其吸收表面不仅能最大限度地吸收太阳的辐射,还尽可能地减小其发射率,也就是降低其辐射热损。因此,对光谱选择性吸收涂层的研究有重要意义,是当前太阳能材料研究领域的又一研究热点。

另外,不同于表面吸热的内部多孔材料已被认作是用来提高太阳能系统中热传递和能量传递效率的最有效和最经济的技术之一。这些材料由具有相互连接的空隙的固体基质组成。过去的研究表明,与基材相比,多孔材料表现出更强的热性能,例如更高的对流传热系数或导热性。一般而言,多孔材料可用于包含吸附材料、热能储存材料、绝缘材料、蒸发材料和传热增强材料的太阳能系统中的不同目标。

在太阳能系统中,所有具有高导热率的多孔材料(如金属泡沫)都被认为是传热增强材料。多孔材料也开拓了一个帮助改善太阳能系统效率的新领域。在众多太阳能热利用技术中,内部可以直接吸收太阳能的纳米颗粒流体,表现出不同于基液的辐射吸收特性和传热特性,能提高工质的光热转换效率,从而有效地提高太阳能热利用的效率。现有纳米颗粒的结构有很多种,主要有一般的球形结构、复合多相的核壳结构、空心球结构和双面球结构,依据这些纳米颗粒,也可以设计出结构和性能优异的复合多相纳米颗粒。在之前的研究中,研究人员大多集中在对纳米流体的物理性质的测量和计算,或者是开发新型的纳米流体。纳米流体也可以用于光伏光热系统,虽然其在光伏光热系统中的使用处于起步阶段,但取得了一些显著的效果,包括有利于太阳能光伏电池效率的提高。目前为提高太阳能电池发电效率运用较多的是,在光伏板背面增加一个热电模块来利用其热能或使用能转换频率的光子晶体等方法来提高光伏板的发电效率。随着太阳能光伏利用技术逐步取得一系列的显著成果,太阳能的使用越来越普及,对光伏发电等方面的研究愈发成为热点,由此更加引发了一系列对其光吸收效率的相关研究,同时也使人们对光伏板的表面结构更为关注,并提出了许多能够提高光吸收效率的微纳米复合结构。

1.2 太阳能热发电

1.2.1 光热电站

不管是保护环境还是保证能源不至枯竭,找到相对意义上取之不尽、用之不竭的新能源已是势不可挡。以太阳能为核心的新能源体系将主导未来能源发展。如果说 20 世纪是石油世纪,21 世纪将进入太阳能新能源世纪^[1]。我国太阳能热发电技术研究起步于 20 世纪 70 年代,虽然起步晚于技术发达国家,但有行业人员的坚定信念,国家也一如既往地重视,所以能在这条路上走得更远,在技术领域内不断取得突破。

2005 年,国内首座 70kW 塔式太阳能热发电实验电站成功实现并网发电,该电站由南京市江宁开发区与以色列合作研发建成^[2]。2012 年,我国首座兆瓦级塔式太阳能热发电站——延庆八达岭太阳能热发电实验电站竣工,该项目装机容量为 1.5MW^[3,4]。同年 8 月 9 日,该电站首次全系统运行成功,此次实验的成功正式宣布中国成为第四个具有建立大型太阳能热发电站能力的国家^[5]。2013 年 10 月,浙江中控太阳能技术有限公司作为业主,在青海德令哈建设了 10MW 塔式电站,该电站采用天然气补热^[6]。

作为可持续发展的战略性新能源产业^[7,8],太阳能热发电成为我国国民经济的有力组成部分之一。我国电力发展和清洁能源的“十三五”规划中,均要求主

动支持太阳能热发电,并提出到 2020 年年底,太阳能热发电总装机容量可以达到 $500 \times 10^4 \text{ kW}$,年产能 $200 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。2016 年,我国确定了首批太阳能热发电示范工程,项目总装机规模 $134.9 \times 10^4 \text{ kW}^{[9]}$ 。近三十多年,国际上也建成了很多模块化示范电站^[10]。

1.2.2 储热材料

太阳能热发电是利用太阳能的主要途径之一。但是,由于太阳能来源的间歇性,太阳能热发电离不开储热系统,而储热材料是储热系统的核心。储热介质一般可以分为显热、相变潜热和热化学反应储能材料。由于相变储热材料单独运用时,难以达到较为理想合理的相变温度和储热效果,一般采用将载体和相变材料结合的方式,从而形成一种可保持固体外形、具有不流动性的复合相变储热材料,这也是目前太阳能热发电领域的研究热点之一。复合相变储热材料,如熔融盐-石墨基材料、熔融盐-金属基储热材料以及熔融盐-陶瓷基复合材料等,均可实现相变温度可调,进而具有更优的储热导热性和更强的热稳定性。

1983 年,Abhat^[11] 使用热分析和差示扫描量热技术研究多种储热材料的熔化和冷冻行为,主要包括石蜡、脂肪酸、无机盐水合物和低共熔混合物等相变温度在 $0 \sim 120^\circ \text{C}$ 范围内的低温热熔储存材料。实际上,一些金属也具有作为储热材料的潜力,Farkas 和 Birchenall^[12] 于 1985 年研究了一些新型二元和多元合金的热物性,发展了一个试差法,结合热差分析、金相图谱和显微图片分析,可用不超过 3 个步骤确定合金的组成。还有部分研究者^[13,14] 测试了不同组成的二元和三元铝合金相变储热材料的相变温度、储热密度与相变潜热,并且 Sun 等^[15] 指出,随着热循环次数的增加,材料相变温度的降低可能是由于其化学结构的退化。

除了多元金属作为储热材料的研究外,对于金属/陶瓷、陶瓷/熔融盐等不同种材料形成的复合相变储热材料的研究也在同步推进。Shin 等^[16] 将二元 GeSn 型纳米颗粒嵌入 SiO_2 基材料中,研究了这种金属/陶瓷基复合相变材料在 500°C 以内不同温度下的潜热,并发现 GeSn 二元纳米粒子的晶形可以调节和转化。Araki 等^[17] 测量了 $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-KCO}_3$ 的比热和热扩散率。Yang 和 Garimella^[18] 系统探索了使用熔融盐作为传热流体的热能储存系统的热特性,包括储罐温度分布和排放效率。熔融盐的熔点高出室温较多,在使用过程中容易凝固而堵塞管道导致危险,所以需要更低熔点的储能传热材料,进而可以降低系统的工作温度。目前熔融盐研究主要集中在降低熔点、提高温度使用范围上。比如,目前商业化较好的混合硝酸盐的名称及质量配方为:太阳盐 ($60\% \text{ NaNO}_3 + 40\% \text{ KNO}_3$)、希特斯盐 ($7\% \text{ NaNO}_3 + 53\% \text{ KNO}_3 + 40\% \text{ NaNO}_2$)、低熔点的希特斯盐 ($7\% \text{ NaNO}_3 + 45\% \text{ KNO}_3 + 48\% \text{ Ca}(\text{NO}_3)_2$) 等熔融盐体系,配制的不同,使得它们的熔点逐渐降低(分别为 200°C , 142°C , 120°C),使得工作温度范围也降低(分别为 $220 \sim 600^\circ \text{C}$, $142 \sim 535^\circ \text{C}$,

120~500°C)^[19,20]。

Bradshaw 和 Siegel^[21] 开发了熔点降到 100°C 以下的混合硝酸盐。Raade 和 Padowitz^[22] 制作出熔点为 65°C 的新型五元硝酸盐, 但是对应的热解温度逐渐升高, 使热发电成本增加, 限制了它们的广泛应用。Liu 和 Yang^[23] 通过将熔融的 Na_2SO_4 渗入莫来石-刚玉多孔陶瓷预制件 (M-PCP) 中开发新的形状稳定的复合相变材料 (PCM), 结果表明, M-PCP/ Na_2SO_4 在 882.17°C 的熔融温度下的潜热为 54.33J/g。浸渍实验和数值模拟证明了熔融 Na_2SO_4 和 M-PCP 之间的高温化学兼容性和润湿性。Porisini^[24] 和 Cabeza 等^[25] 利用浸泡腐蚀实验研究了与熔融盐水合物接触的五种常见金属的耐腐蚀性。陶瓷基复合储热材料的发展, 在一定程度上减少了熔融盐对管道的腐蚀。Jiang 等^[26] 设计和评估了三种类型的共晶 Na_2SO_4 - NaCl -陶瓷复合材料, 以解决封闭材料的盐腐蚀问题。研究表明, 共晶 Na_2SO_4 - NaCl 无论是 α -氧化铝还是莫来石复合材料, 其盐与陶瓷的质量比为 1:1, 均具有良好的热稳定性, 无裂纹, 质量损失分别为 0.50% 和 0.74%, 在 20 次热循环后分别发生 1% 和 2% 的潜热降低, 其中没有发生相分离和化学反应。

复合相变储热材料一方面要追求较低的相变温度, 另一方面还应该增强储热材料的导热性, 来增强热能的排空, 以提高热电转化速率。比如, 以石墨为基体的复合 $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ 共熔融盐具有较好的导热性能^[27], 但多次热循环后, 其热物性常数会发生变化。Acem 等^[28] 将膨胀石墨与 KNO_3 - NaNO_3 的混合盐复合, 研究表明, 冷压制备的石墨与混合盐复合材料的导热率提高了 15%~20%, 且该复合材料热物性常数变化不大。不过, 它的腐蚀性强, 且熔点一般为 130~230°C。同样, 也可以将碳纳米管作为基体来提高储热材料的热导率^[29-31]。

1.2.3 表面涂层

众所周知, 太阳能是一种宽光谱、低强度和间歇性的能源。要实现太阳辐射能的高效热利用, 必须借助聚焦系统和集热器将光能高效转化为热能, 其作用是靠集热器中特殊的物质结构与材料体系实现其光谱选择性吸收功能。因此, 在太阳能光热转换与应用领域, 太阳光谱选择性吸收涂层是太阳能光热转换关键器件——集热器 (集热管或集热平板) 的关键材料技术, 是太阳能材料研究领域的又一研究热点。

光谱选择性吸收涂层的概念最早由以色列科学家 Tabor^[32] 在 20 世纪 50 年代提出。90 年代初, 澳大利亚悉尼大学 Zhang 等^[33] 根据等效媒质理论在理论模拟和实验的基础上, 提出了双层干涉加吸收的大三层结构的金属陶瓷多层膜设计思想, 目标在于吸收所有的太阳辐射能, 而抑制主要的红外热辐射。

根据涂层结构和吸收机理的不同, 可以大致将太阳光谱选择性吸收涂层分为以下几类: 本征吸收型、半导体-金属串联型、多层膜干涉型、金属-电介质复合型

等^[34]。金属-电介质复合型或其中的金属陶瓷复合型涂层是在电介质基体中嵌入微小的金属粒子形成的复合材料。金属陶瓷的带间吸收和小颗粒共振使得涂层对可见光和近红外光有更强烈的吸收作用^[35]，其中研究最多、应用最广泛的是多层渐变金属陶瓷膜和双干涉吸收膜系。近年来多层渐变金属陶瓷涂层被广泛报道，比如，使用 Mo、Cu 和 Ni 等作为金属层和使用 Al_2O_3 和 ZnS 等作为电介质层的多层膜结构吸收涂层已经被证实适合高温环境下使用。Zhang 和 Mills^[36] 提出的双层干涉加吸收的吸收涂层从基底到表面由四部分组成，分别为：红外反射金属层、高的金属体积分数吸收层 (HMFV)、低的金属体积分数吸收层 (LMVF) 和减反射层。这种双层吸收结构的涂层比同类渐变的金属陶瓷吸收层具有更加优良的光谱选择吸收性。借助计算机辅助光学软件，可以很快计算出备选材料的光学性质，对涂层材料进行模拟和优化，从而模拟获得最佳的涂层结构、光学参数和理想光学性能的多层膜结构涂层^[37,38]。涂层的光谱选择性还可以通过调节涂层成分、涂层厚度、金属颗粒浓度、颗粒尺寸、颗粒形状和颗粒取向等来优化^[39]，还可以选择适合的减反射层和基底来提高涂层的光谱选择性和热稳定性。

1.2.4 体吸收

为了提高太阳能吸热器的集热效率，除了对表面涂层进行改进之外，另一个主要措施是内部体吸收。体吸收包括选用固体的多孔材料和多相传热的纳米流体。

多孔材料可以简单有效地改善太阳系统的传热特性^[40]，研究表明，由于多孔材料由具有相互连接的空隙的固体基质组成，因此与基材相比能够表现出增强的热性能（更高的对流传热系数或导热性），并且自然对流可以在多孔介质中减少^[41]。一般而言，多孔材料可用于包含吸附材料、热能储存材料、绝缘材料、蒸发材料和传热增强材料的太阳能系统中的不同目标。在太阳能系统中，所有具有高导热率的多孔材料（如金属泡沫）都被认为是传热增强材料。多孔材料开拓了一个帮助改善太阳能系统效率的新领域。

多孔介质被广泛应用于集中的太阳能热应用^[42]，不过由于传热面积变大同时也会引起压降的增加。太阳能系统中需要使用高导热率的多孔介质接收器，因为多孔蓄热介质热导率有着对温度的依赖性^[43]。Zhao 和 Tang^[44] 通过研究确定了无规球形孔组成的碳化硅多孔介质的消光系数，并且说明了多孔介质的光学性质是根据菲涅耳定律和基于折射率的贝尔定律得到的，基本上多孔介质的消光系数强烈依赖于孔隙率和孔径，消光系数随孔径和孔隙率的减小而增大。由于消光系数是估算多孔介质中辐射特性的关键参数，并且可以估算辐射热导率，因此对消光系数的研究也相当重要。Tomić等^[45] 研究发现，穿孔板上的热对流交换强烈依赖于板的孔隙率和穿孔直径。Dissa 等^[46] 研究了一种“多孔”和“无孔”复合材料的太阳能集热器，并指出多孔吸收体收集器通常具有最高的转换效率，而这些收集器