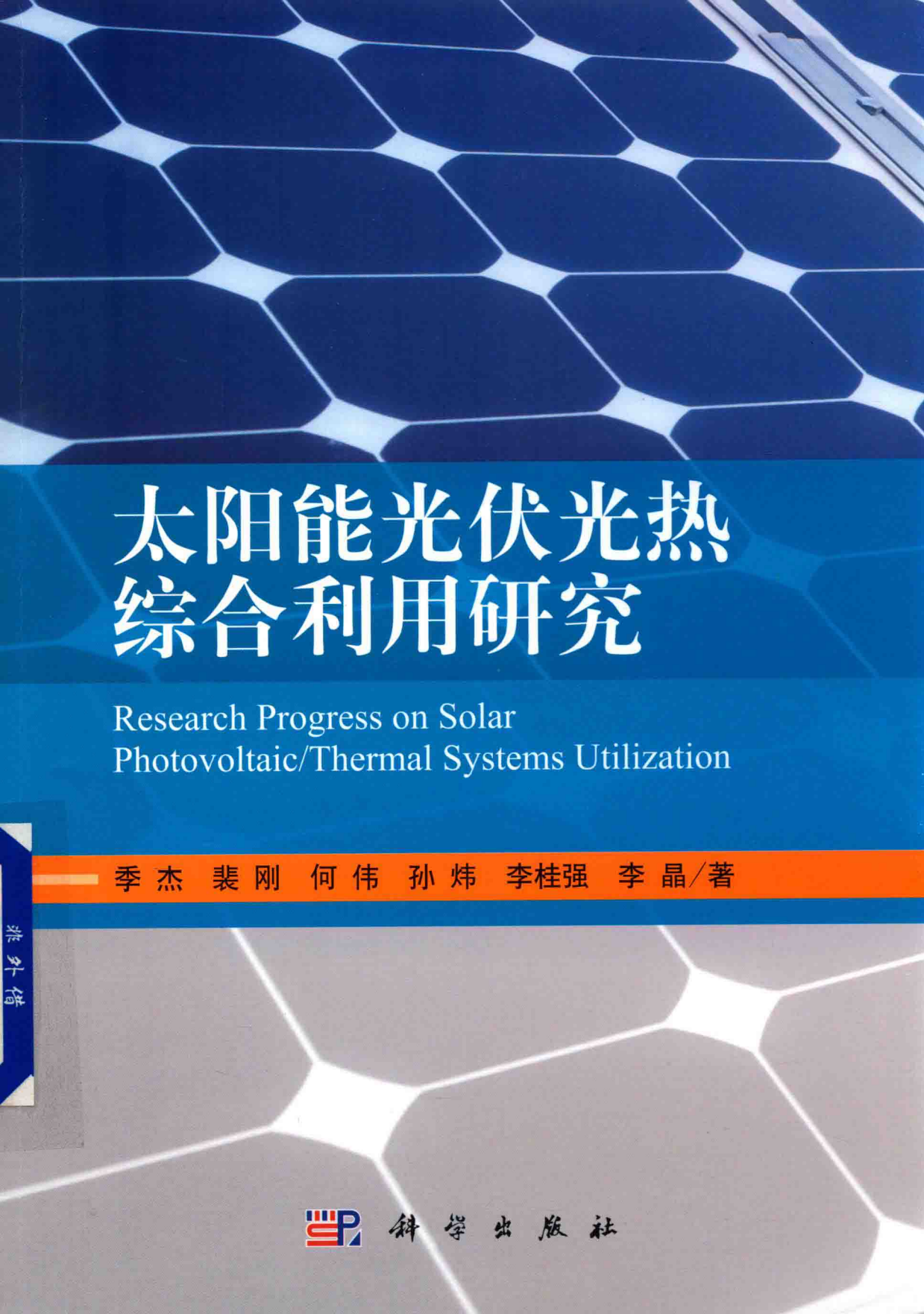




太阳能光伏光热 综合利用研究

Research Progress on Solar
Photovoltaic/Thermal Systems Utilization

季杰 裴刚 何伟 孙炜 李桂强 李晶/著

海外借



科学出版社

太阳能光伏光热综合利用研究

Research Progress on Solar Photovoltaic/
Thermal Systems Utilization

季 杰 裴 刚 何 伟 著
孙 炜 李桂强 李 晶

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了太阳能光伏光热综合利用技术(PV/T)的基本概念、优点、分类、应用途径及共性问题,详细描述和深入研究非跟踪光伏热水系统(肋管型和热管型)、光伏热空气系统(主动式和被动式)、光伏热泵系统(直膨式和热管复合式)、聚光光伏光热系统(碟式和非涅尔式)等多种太阳能光伏光热综合利用系统的基本原理、结构设计、理论分析与评价模型、研究方法和应用途径,特别是光伏光热综合利用技术在建筑一体化中的应用(BIPV/T)。

本书可供太阳能领域、建筑热工领域的科研人员、工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业本科生和研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏光热综合利用研究=Research Progress on Solar Photovoltaic/
Thermal Systems Utilization/季杰等著. —北京: 科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-053979-3

I. ①太… II. ①季… III. ①太阳能发电-太阳能利用-综合利用-研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 169104 号

责任编辑: 刘翠娜/责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩/封面设计: 无极书装

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017年8月第一次印刷 印张: 26 1/4

字数: 513 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

太阳能光伏和太阳能光热是太阳能大规模应用的主要方式,然而到目前为止,太阳能光伏发电依然存在发电效率低、成本高的瓶颈,太阳能光伏光热综合利用(PV/T)是解决问题的重要途径,其核心是在太阳能光伏发电的同时回收多余热能并加以利用,这不仅对电池有冷却作用,可以提高发电效率和寿命,更重要的是实现“一机多能”,大大提高太阳能综合利用效率,同时降低电热分别供应的成本。太阳能光伏光热综合利用不仅是近年来太阳能研究中最热门的研究领域之一,而且成为太阳能产业界备受关注的方向。

中国科学技术大学季杰教授团队是我国较早从事太阳能光伏光热综合利用研究的团队,从20世纪90年代末至今取得了一系列具有国际影响力的研究成果。多篇论文进入高被引论文行列,多项技术获得国际奖励,多个装置已接近产业化或进入应用。季杰教授连续入选2014年、2015年、2016年爱思唯尔(Elsevier)发布的中国高被引学者(Most Cited Chinese Researchers)榜单。本书总结了季杰教授团队在太阳能光伏光热综合利用研究领域的成果,旨在推动该领域更深入的学术研究、新技术开发和行业发展,为太阳能的大规模应用开辟新的途径。

本书分别介绍非跟踪光伏热水系统(肋管型和热管型)、光伏热空气系统(主动式和被动式)、光伏热泵系统(直膨式和热管复合式)、聚光光伏光热系统(碟式和菲涅耳式)等多种太阳能综合利用系统的基本原理、结构设计、理论分析与评价模型、研究方法和应用途径,特别是光伏光热综合利用技术在建筑一体化中的应用(BIPV/T)。

全书由季杰教授策划和组织,其内容均为季杰教授指导研究生所做的研究工作,共12章。第1章绪论由季杰撰写;第2章由何伟博士据其本人及研究生陆建平、张扬所做工作编写;第3章由裴刚博士据其本人及研究生符慧德、张涛等所做工作编写;第4章由孙炜博士据其本人及研究生郭超所做工作编写;第5章由孙炜博士据其本人及研究生易桦所做工作编写;第6章由裴刚博士、李晶博士据其本人及研究生何汉峰、刘可亮等所做工作编写;第7章由裴刚博士据其本人及研究生符慧德、张涛等所做工作编写;第8章由李桂强博士据其本人及研究生陈海飞、王云峰所做工作编写;第9章由孙炜博士据其本人及研究生徐宁、陈海飞等所做工作编写;第10章由李桂强据其本人所做工作编写;第11章由裴刚博士、李晶博士据其本人及研究生汪芸芸所做工作编写;第12章由何伟博士、裴刚博士

据其本人及研究生于志等所做工作编写。全书由季杰教授统稿并对各章内容进行修改和补充。

太阳能光伏光热综合利用作为太阳能利用新技术，无论从学术研究还是产业应用均处在一个发展过程中，在材料、工艺、系统方面还需要更多的突破，本书内容只是抛砖引玉，希望更多的学者和企业加入该领域的研发中，推动太阳能应用更上一个台阶。本书虽经多次修改，但疏漏之处在所难免，还请读者批评指正。

本书可供太阳能领域、建筑热工领域的科研人员、工程技术人员参考，也可作为高等学校相关专业本科生和研究生教材。

衷心感谢国家自然科学基金委、中国科学院、科技部、广东省及东莞市多个项目的支持。

作 者

2017年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 太阳能光伏光热综合利用的概念	1
1.2 太阳能光伏光热综合利用的优点	2
1.3 太阳能光伏光热综合利用技术分类	3
1.4 太阳能光伏光热综合利用技术的应用途径	4
1.5 太阳能光伏光热综合利用的共性技术	5
第 2 章 平板型光伏热水系统	7
2.1 平板型光伏热水集热模块的基本结构	7
2.2 平板型光伏热水系统	11
2.2.1 自然循环式平板型光伏热水系统的数理模型	11
2.2.2 强迫循环式平板型光伏热水系统的数理模型	16
2.2.3 自然循环式平板型光伏热水系统模型验证	17
2.3 平板型光伏热水系统评价指标	20
2.4 平板型光伏热水系统的实验系统与结果分析	22
2.4.1 实验测试系统介绍	22
2.4.2 实验结果	23
2.5 平板型扁盒式光伏热水系统的影响参数分析	28
2.5.1 水箱初始水温对平板型光伏热水系统的影响	28
2.5.2 水量对平板型光伏热水系统的影响	30
2.5.3 光伏电池覆盖率对平板型光伏热水系统的影响	31
2.5.4 盖板透过率对平板型光伏热水系统的影响	33
2.6 平板型管板式光伏热水系统对比测试	35
2.6.1 系统性能的测试平台	35
2.6.2 实验结果及效率计算	40
参考文献	44
第 3 章 热管式 PV/T 装置及其系统	45
3.1 热管简介	45
3.1.1 热管的基本结构	45

3.1.2	热管的工作原理及基本特性	46
3.1.3	热管的分类	47
3.2	热管式 PV/T 系统的基本结构	47
3.2.1	热管式 PV/T 集热板的基本结构	48
3.2.2	热管式 PV/T 系统的组成及工作过程	50
3.3	整体热管式 PV/T 系统的数值模型	50
3.3.1	太阳光入射模型	50
3.3.2	玻璃盖板的能量平衡方程	51
3.3.3	光伏电池层的能量平衡方程	53
3.3.4	电池基板的能量平衡方程	53
3.3.5	热管的能量平衡方程	55
3.3.6	流道换热器内冷却水的能量平衡方程	57
3.3.7	储水箱的数学模型	57
3.3.8	系统性能计算模型	58
3.3.9	整体热管式 PV/T 系统动态模型的求解	59
3.4	整体热管式 PV/T 系统的性能分析	60
3.4.1	实验系统介绍	61
3.4.2	理论计算与实验结果对比、分析	61
3.4.3	关键参数对系统性能影响的理论分析	65
3.4.4	系统全年性能的理论分析	77
3.5	环形热管的实验内容及实验结果分析	85
3.5.1	对比系统的实验平台介绍	86
3.5.2	系统性能分析	87
	参考文献	96
第 4 章	主动式太阳能光伏空气集热器	98
4.1	主动式太阳能光伏空气集热器的基本结构	98
4.2	主动式太阳能光伏空气集热器的数理模型	101
4.2.1	理论模型	101
4.2.2	模型的求解方法	103
4.3	主动式光伏空气集热器的性能测试分析系统	105
4.3.1	系统测试平台	105
4.3.2	性能评价	107
4.4	主动式太阳能光伏空气集热器的性能分析	108
4.4.1	性能的实验测试分析	108
4.4.2	不同工况下的性能分析	112

4.4.3 与建筑结合的应用分析	117
4.5 多功能太阳能光伏集热器	120
4.5.1 多功能太阳能光伏集热器结构	120
4.5.2 多功能太阳能集热器的性能测试	121
4.5.3 多功能集热器与建筑结合的夏季运行分析	123
参考文献	125
第 5 章 太阳能光伏 Trombe 墙	127
5.1 PV-Trombe 墙的基本结构	127
5.2 PV-Trombe 墙的实验研究方法	129
5.3 PV-Trombe 墙的理论模型及实验验证	131
5.3.1 理论模型的建立	131
5.3.2 PV-Trombe 墙系统的数理模型的实验验证	137
5.4 PV-Trombe 墙的 CFD 模拟	138
5.4.1 湍流模型的选择及其验证	138
5.4.2 PV-Trombe 墙的 CFD 模型	141
5.4.3 PV-Trombe 墙的 CFD 模拟与实验研究的结果对比	143
5.5 PV-Trombe 墙的参数及性能研究	146
5.5.1 PV-Trombe 墙在热箱中的对比测试	146
5.5.2 PV-Trombe 墙的结构及其参数的影响	149
5.5.3 PV-Trombe 墙在高寒高辐照地区应用的研究	157
参考文献	160
第 6 章 直膨式光伏太阳能热泵	162
6.1 直膨式光伏热泵的基本原理	162
6.2 系统构成	163
6.3 数理模型	165
6.3.1 光伏蒸发器模型	165
6.3.2 变频压缩机模型	169
6.3.3 电子膨胀阀模型	171
6.3.4 水冷冷凝器模型	171
6.3.5 水箱模型	172
6.3.6 PV-SAHP 系统动态模型的求解	173
6.4 实验研究	175
6.4.1 实验装置	175
6.4.2 PV-SAHP 系统在恒定冷凝水温工况下的性能	181
6.4.3 PV-SAHP 系统在变冷凝水温工况下的性能	187

参考文献	192
第 7 章 光伏太阳能热泵热管复合系统	194
7.1 光伏太阳能热泵热管复合系统 I 的基本原理	194
7.2 光伏太阳能热泵热管复合系统 I 的系统构成	196
7.2.1 光伏蒸发器	196
7.2.2 热泵子系统关键部件	198
7.2.3 光伏发电系统	199
7.3 光伏太阳能热泵热管复合系统 I 的实验研究	200
7.3.1 实验说明	200
7.3.2 光伏太阳能热泵热管复合系统 I 的性能计算	202
7.3.3 光伏太阳能热泵热管复合系统 I 的瞬时性能分析	203
7.3.4 光伏太阳能热泵热管复合系统 I 的全天性能分析	213
7.4 光伏太阳能热泵热管复合系统 II 的基本原理	215
7.5 光伏太阳能热泵热管复合系统 II 的系统构成	216
7.6 光伏太阳能热泵热管复合系统 II 的实验研究	218
7.6.1 环形热管单独运行的实验研究	219
7.6.2 热泵单独运行的实验研究	222
7.6.3 基于水温的环形热管-热泵切换模式性能的实验研究	226
参考文献	228
第 8 章 太阳能碟式聚光光电光热系统	230
8.1 碟式聚光的基本原理	230
8.2 碟式聚光光电光热系统构成	232
8.2.1 曲面碟式聚光器	232
8.2.2 平面碟式聚光器	234
8.2.3 跟踪系统	237
8.2.4 光伏光热接收器	240
8.3 数理模型	242
8.3.1 碟式聚光光电光热模块的理论模型	242
8.3.2 系统性能的计算	246
8.4 碟式聚光光电光热系统性能研究	246
8.4.1 平面碟式聚光系统与曲面碟式聚光系统温度分布的对比实验 研究	246
8.4.2 不同聚光比不同流量下的实验研究	250
8.4.3 平面碟式 HCPV/T 系统理论与实验对比分析	255

8.4.4 不同聚光比不同流量下的性能预测	258
8.5 本章小结	261
参考文献	261
第9章 太阳能菲涅耳聚光发电供热系统	263
9.1 菲涅耳高倍聚光发电供热系统的构成	263
9.1.1 菲涅耳 HCPV/T 模组	264
9.1.2 跟踪系统	270
9.2 数理模型	271
9.2.1 菲涅耳 HCPV/T 系统的光电模型	271
9.2.2 菲涅耳 HCPV/T 系统的光热模型	274
9.3 菲涅耳 HCPV/T 系统单元的性能研究	279
9.3.1 菲涅耳 HCPV/T 系统单元的性能测试平台介绍	279
9.3.2 菲涅耳 HCPV/T 系统单元的理论实验分析	281
9.4 菲涅耳 HCPV/T 示范系统的性能研究	286
9.4.1 菲涅耳 HCPV/T 示范系统的测试平台	286
9.4.2 系统性能评价	288
9.4.3 系统性能测试分析	291
参考文献	295
第10章 太阳能非跟踪低倍聚光光电光热系统	297
10.1 低倍非跟踪聚光器介绍	297
10.2 非跟踪低倍聚光光电光热系统构成	300
10.3 数理模型	307
10.3.1 结构模型	307
10.3.2 光学模型	310
10.3.3 PV/T 模型	313
10.4 非跟踪低倍聚光器的性能研究	315
10.4.1 光线跟踪分析	315
10.4.2 模块的实验研究	321
10.4.3 模块的优化	326
10.5 非跟踪低倍聚光光电光热系统研究	330
10.6 本章小结	335
参考文献	335
第11章 辐照和温度非均匀分布对 PV/T 光电性能的影响	336
11.1 PV/T 应用中的温度和辐照分布不均匀性	336
11.1.1 PV/T 应用中存在的问题	336

11.1.2	温度和辐照分布不均匀现象	337
11.2	PV/T 系统的光电性能分布参数模型	339
11.2.1	太阳能电池的传统模型	339
11.2.2	非均匀辐照下的太阳能电池处理方法	341
11.2.3	光电模块的分析方法和实验验证	343
11.3	温度因素对 PV/T 系统光电性能的影响	346
11.3.1	光电模块的构成及分析方法	346
11.3.2	平均温度对光电部分的影响	347
11.3.3	温度的空间分布差异对光电部分的影响	356
11.4	辐照分布对平板 PV/T 系统光电性能的影响	363
11.4.1	边框阴影的分布规律	364
11.4.2	边框阴影对平板 PV/T 系统光电性能的影响	366
11.5	辐照分布对 BIPV/T 系统光电性能的影响	373
11.5.1	边框阴影在 BIPV/T 系统中的分布规律	374
11.5.2	边框阴影对光电性能的影响	375
11.5.3	边框阴影对全年性能的影响	377
	参考文献	379
第 12 章	太阳能光伏光热建筑综合利用研究与示范	380
12.1	BIPV/T 基本结构	380
12.2	复合光伏热水墙系统	381
12.2.1	复合光伏热水墙系统的理论模型	382
12.2.2	复合光伏热水墙系统实验研究	387
12.2.3	模型验证	389
12.2.4	全年性能模拟	391
12.3	光伏双层窗	394
12.3.1	通风光伏双层窗的原理与结构	394
12.3.2	光伏双层窗实验平台	395
12.3.3	结果及分析	396
12.4	太阳能光伏光热建筑一体化技术示范建筑	399
12.4.1	太阳能光伏光热组件概况	399
12.4.2	太阳能光伏光热组件与建筑一体化设计	401
12.4.3	太阳能光伏光热综合利用系统设计	401
12.4.4	数据采集和监测系统	404
12.4.5	太阳能光伏光热综合利用示范建筑运行效果	404
	参考文献	406

第1章 绪 论

1.1 太阳能光伏光热综合利用的概念

随着矿石能源的日趋减少及环境问题的日益突出，各国政府都将太阳能资源利用作为国家可持续发展战略的重要内容。太阳能是一种清洁、高效和永不衰竭的可再生能源，其利用方式多种多样，太阳能光热利用和太阳能光伏发电是当前太阳能利用的主要发展方向。

太阳光伏发电技术是近几十年来国际上的研究开发热点，利用光伏效应直接获得高品质的电能是该技术的优势，但成本较高和效率偏低是其发展的最大瓶颈，如何提高光伏转换效率、降低其应用成本，国际上已经做了大量的研究。随着材料、工艺及系统技术的不断进步，太阳能光伏发电技术取得了可喜的进展，光伏电池的成本已大幅降低，但至今依然不够经济，脱离了政府的补贴依然难以被用户接受；电池效率较最初已有很大提高，但效率的绝对数值依然较低，通常光伏电池效率不到 20%，这意味着多数太阳能或被反射，或被转换成热量释放。

太阳能光热利用技术历史悠久，该技术最大的优势就是太阳能热利用效率高，技术成本低。由于其经济性较好，太阳能光热产业发展迅速，太阳能热水、太阳能空气集热等技术已得到广泛应用，但通过该技术获得的能量品质低，其应用范围受到了一定的限制。太阳能热发电近年来发展迅速，但鉴于系统的成本高，可靠性差，复杂性高，依然难以大规模推广。

理论研究表明，单晶硅太阳能电池在 0°C 时的最大理论光电转换效率只有 30%。在光照强度一定的条件下，太阳能晶硅电池输出功率将随自身温度升高而下降，每升高 1°C ，发电效率约下降 0.3%，其他因素如光照强度的大小等也会对太阳能晶硅电池的能量转换效率有所影响。在实际的应用中，标准条件下太阳能晶硅电池转换效率为 16%~20%，由此可以看出，照射到电池表面的太阳能大约有 80% 未能转换为有用能量（电能），很大一部分能量将会转化为热能，从而造成电池温度升高，电池光电转换效率下降。为了尽可能使电池光电转换效率保持在比较高的水平，可以在电池背面敷设流体通道，通过冷却介质带走热量以降低电池温度。

太阳能光伏光热综合利用技术是将光伏电池与太阳能集热技术结合起来，在太阳能转化为电能的同时，由集热组件中的冷却介质带走电池的热量加以利用，

同时产生电、热两种能量收益。国际上将太阳能光伏光热综合利用技术称为 PV/T 技术, 该技术能够提高太阳能的综合利用效率, 且能同时满足用户对高品质电力和高品质热能的需求。

太阳能光伏光热综合利用技术将太阳能光伏利用技术、太阳能光热利用技术结合起来, 综合利用能克服单一利用方式的缺点, 是提高太阳能利用效率、降低综合应用成本的有效手段, 也是太阳能大规模应用的方向之一。目前该技术研究正朝多元化方向发展, 在 Elsevier 数据库中以 photovoltaic 和 thermal 为关键词进行 2001 年以来的期刊文献检索, 可得到 1 万篇以上相关文献检索结果, 可见国际上太阳能光伏光热综合利用技术的研究热度。

1.2 太阳能光伏光热综合利用的优点

1) 全光谱利用

以硅材料为例, 由于半导体禁带宽度的存在, 当太阳辐射投射于太阳能电池表面时, 只有能量大于禁带宽度的光子才能产生电子空穴对, 能量小于禁带宽度的光子将不能对电池的电流作出贡献。晶硅的禁带宽度在 1.2eV 左右, 对应太阳辐射的波长为 1.1 μm 左右, 而太阳辐射光谱中波长大于 1.1 μm 的能量占太阳辐射总能量的约 40%, 这也意味着这部分能量将不能产生电子空穴对。太阳能光伏光热综合利用技术则可将这部分能量转换成可利用的热能, 实现太阳辐射光谱的全光谱利用, 从而提高太阳能的综合利用效率。

2) 多功能利用

对于绝大多数商用光伏电池, 电池温度升高会引起光伏转换效率的下降, 如果光伏电池吸收的热量受条件限制不能有效释放, 反而会导致光伏电池温度升高, 引起光伏转换效率的下降。理论与实验研究均表明, 在较高的环境温度下, 如果不对光伏组件采取冷却措施, 其工作温度通常会高达 60~90℃; 而在有介质冷却的系统中, 光伏电池的工作温度基本上在 30~50℃。太阳能光伏光热综合利用技术在太阳能转化为电能的同时, 由集热组件中的冷却介质带走电池的热量, 产生电、热两种能量收益, 从而提高太阳能的综合利用效率。

3) 降低成本

太阳能光伏光热综合利用技术将太阳能光伏技术和太阳能光热技术结合起来, 系统共用了玻璃盖板、框架、支撑构件等, 实现了光伏组件和太阳能集热器的一体化, 节省了材料、制作和安装成本; 太阳能光伏光热综合利用技术有效控制了光伏电池工作温度, 避免了电池高温工作, 从而提高了光伏电池的运行寿命, 也可以说是减少了硅材料的损耗, 改善了其经济性。

4) 节约安装面积

建筑是太阳能应用的最佳载体,但目前我国城市中大都是高层或小高层建筑,建筑围护结构可接收到阳光的面积是有限的。若采用太阳能光热技术和太阳能光伏技术两套系统,往往会存在安装位置、安装面积上的矛盾,从而对系统的设计、安装造成困难。采用太阳能光伏光热综合利用技术可以很好地解决这个问题。

5) 电/热输出灵活配置

太阳能光伏光热综合利用技术能够提供电力、热水和采暖等多种能量形式,具备太阳能利用的多功能性,从而能够满足用户对不同能量的需求。可综合考虑投资成本及能量需求,在太阳能光伏光热综合利用技术应用中选择合适的光伏电池覆盖率,进行电力输出优先、热力输出为辅的组件选择和系统设计。

6) 易于建筑一体化

太阳能光伏光热综合利用技术可以方便地实现建筑一体化,光伏热水-屋顶、光伏热水-墙、光伏空气多功能幕墙、光伏-Trombe 墙、光伏-热水窗、光伏-空气窗等一体化方案不仅利用围护结构发电供热,而且大大降低了建筑的空调负荷,获得了额外的收益。

1.3 太阳能光伏光热综合利用技术分类

目前国际上太阳能光伏光热综合利用技术类型非常多,我们从电池种类、聚光方式、冷却介质及应用形式等方面进行了分类。

1) 按电池种类进行分类

根据电池的效率不同、物理参数不同,太阳能光伏光热综合利用技术可分为晶硅电池太阳能光伏光热综合利用技术、非晶硅电池太阳能光伏光热综合利用技术、砷化镓电池太阳能光伏光热综合利用技术,以及其他光伏电池太阳能光伏光热综合利用技术等。此种分类中,太阳能光伏光热综合利用技术重点研究温度对不同电池性能的影响,不同电池与集热组件之间的复合加工工艺等。

2) 按聚光方式进行分类

可分为非聚光太阳能光伏光热综合利用技术、低倍聚光太阳能光伏光热综合利用技术、高倍聚光太阳能光伏光热综合利用技术。此种分类中,太阳能光伏光热综合利用技术重点研究太阳能聚光材料、聚光结构设计、太阳能跟踪技术、电池组件与集热组件的传热技术,以及冷却介质的选择、制备和输送技术等。

3) 按冷却介质进行分类

可分为太阳能光伏/热水综合利用技术,太阳能光伏/热空气综合利用技术,太阳能光伏/热泵综合利用技术,太阳能光伏/热发电综合利用技术及其他。此种分类中,太阳能光伏光热综合利用技术重点在于根据系统的应用目的,研究系统

光伏光热综合效率的提高与优化。

4) 按冷却换热结构进行分类

对于采用晶硅电池的太阳能光伏光热综合利用技术而言,参照太阳能集热器的结构,可分为管翅式、管板式、扁盒式、热管式等太阳能光伏光热综合利用结构。此种分类中,太阳能光伏光热综合利用技术重点研究不同冷却换热结构的传热性能及对电池性能的影响。

5) 按应用需求进行分类

可分为太阳能光伏光热墙、太阳能光伏光热屋顶、太阳能光伏光热窗、太阳能光伏通风幕墙、太阳能光伏光热采暖系统、太阳能光伏热水系统、太阳能光伏热泵系统、太阳能光伏干燥系统、太阳能光伏农业大棚等。此种分类中,太阳能光伏光热综合利用技术重点研究综合利用技术对应用目标自身的性能影响及系统整体性能的提高与优化。

1.4 太阳能光伏光热综合利用技术的应用途径

太阳能光伏光热综合利用技术具体应用途径有如下几个方面。

1) 电力-热水

太阳能光伏光热综合利用技术最常见的应用途径是太阳能光伏热水系统,能够同时提供电力和热水,可广泛应用于建筑、工厂、农业等,特别是电力和热水需求量都较大的场所,如医院、宾馆等,与建筑一体化设计时,有太阳能光伏光热墙、太阳能光伏光热屋顶等。此时需要关注管路防冻问题及水路与电路之间的优化设计,避免相互干扰。

2) 电力-空气采暖

太阳能光伏光热综合利用技术同时提供电力和采暖热空气也有很好的应用前景,太阳能光伏光热采暖系统针对寒冷地区或者特定用户、场地的需求,在提供电力的同时,提供热空气直接应用于建筑采暖。光伏-空气集热器、光伏多功能幕墙、光伏-Trombe 墙等可实现发电-空气采暖,相对而言,此类系统结构比较简单,可靠性最高,维护成本最低。

3) 电力-干燥

传统干燥行业能耗巨大,污染严重,太阳能光伏光热综合利用技术针对某些用户、场地的特定需求,如工业干燥、农副产品干燥、烟草、药材、食品干燥等,可应用太阳能光伏干燥技术,能够同时提供电力和热空气,相比于电力-空气采暖,热空气的温度可能要求更高,湿度控制要求更加严格。特别是地域偏僻、电力不足地区,可通过系统自身提供的电力独立运行。

4) 电力-热泵

热泵系统冬季运行时由蒸发器从低温环境的空气中吸热,导致表面温度过低而结霜,从而传热阻力增加,存在热泵系统性能下降的问题;而光伏电池发电则是多余的热能不能够被利用,导致电池温度升高,存在效率随温度下降的问题。太阳能光伏热泵系统根据太阳能光伏与热泵两个系统的特点,不仅利用太阳能发电,而且将光伏电池发电多余的热能提供给热泵系统,提高了蒸发温度,降低了电池温度,在提高光伏电力输出效率的同时,有效地提升了热泵系统的能效比。

5) 电力-通风

针对夏热冬暖地区的建筑,全年冷负荷较高,且有新风需求,在实现太阳能利用与建筑结合时,系统作为建筑围护结构的一部分,电池温度上升不仅降低了电力输出效率,而且还增加了室内冷负荷。因此,可通过太阳能光伏光热综合利用技术与通风技术相结合,如太阳能光伏光热窗、太阳能光伏通风幕墙等,主要利用热压通风原理,光伏电池背面的空气被加热后,被热浮力带走,在降低光伏电池温度、提升发电效率的同时,降低室内冷负荷,实现建筑节能。

6) 电力-农业需求

太阳能光伏光热综合利用技术与农业需求的结合,主要是指太阳能光伏光热综合利用技术在农业大棚、珍稀鱼类养殖等方面的应用,在光伏发电的同时,提高环境温度。如太阳能光伏农业大棚,全年利用太阳能产生电力,针对不同作物生长特点,调节大棚温度。夏季光伏的存在及有效通风,抑制了太阳辐射强度过大导致的温度过高;冬季有效利用光伏发电产生的多余热能改善了大棚热环境。

1.5 太阳能光伏光热综合利用的共性技术

虽然太阳能光伏光热综合利用技术有很多种类,但其中很多技术是相通的,关键技术也是类似的,具体归纳如下:

1) 光伏电池与集热板的可靠性联结,保证它们之间的高绝缘性和高导热性

太阳能光伏光热综合利用技术中光伏电池与集热板之间需紧密结合,集热板一般采用金属材料,如铝、铜等,由于电池与金属热膨胀系数不同,热应力问题是影响系统可靠性的主要因素;另外,保证电池与集热板之间的绝缘性非常重要,需要寻找绝缘性良好的黏结材料,而绝缘性良好的材料通常导热性能较差,不能及时有效地将光伏电池没有转化成电能的太阳能传导出来,因此研发同时满足绝缘性和导热性要求的黏结材料是非常关键的。

2) 电池组件温度分布均匀性对系统的光电转换效率和光热转换效率的影响

与常规太阳能光伏组件相比,由于冷却介质的流动,太阳能光伏光热组件之间不可避免地存在着温度梯度,晶体硅太阳能电池的温度超过 25°C 时,每升高 1°C

电池功率损耗约 4%，而光电转换效率的变化也将影响系统光热转换效率的变化。对太阳能光伏光热系统而言，系统越大，太阳能光伏光热组件之间的温度梯度对系统性能的影响也就越大。因此，如何选择正确的太阳能光伏光热组件连接方式和系统运行方式是需要研究的问题。

3) 太阳辐照分布均匀性对系统的光电转换效率和光热转换效率的影响

在常规太阳能光伏系统中，存在“热斑”效应，即被遮挡的太阳能电池或组件在阵列中是串联部分或者是串联组件中的一部分时，被遮挡太阳能电池的输出电流（最小电流）将成为组件的输出电流，同时，被遮挡的太阳能电池将作为耗能件以发热的方式将串联回路上的其他太阳能电池产生的大部分电能消耗掉，长时间遮挡情况下，局部温度将会很高，甚至可能烧坏太阳能电池而使太阳能电池组件永久失效。

在太阳能光伏光热系统中，“热斑”效应同样存在，特别是聚光太阳能光伏光热系统中，这个问题更为关键。有别于常规太阳能光伏系统，太阳能光伏光热组件中冷却介质的存在，可以提升组件对热斑效应的耐受力，因此太阳辐照分布均匀性对太阳能光伏光热系统的光电转换效率和光热转换效率的影响是值得研究的问题。

4) 太阳能光伏光热组件的电池组件覆盖率和覆盖位置对系统的光电、光热转换效率的影响

太阳能光伏光热系统中，光电转换量和光热转换量是相互影响的，太阳能光伏光热组件上的电池组件覆盖率的变化将直接影响系统的光电转换量和光热转换量，而太阳能光伏光热组件中一般存在着温度梯度，特别是自然循环模式下，处于较低温度场位置的组件的光电转换率和光电转换量将高于处于较高温度场位置的组件。另外，太阳能光伏光热组件的边框将产生一定的阴影覆盖面积，也将对系统的光电转换率和光电转换量产生影响。

5) 系统的优化与评价方法

太阳能光伏光热综合利用技术多种多样，其系统优化和评价方法目前很难有一个统一的标准，光热转换与光电转换的能量品质是不一样的，不同的应用条件、目的和背景，其评价方法也是不同的。针对不同的太阳能光伏光热综合利用技术应用提出不同的评价方法，特别是与建筑结合或者进行一体化设计时，需要考虑与建筑接口技术、对室内热环境及对建筑整体能耗影响。