

太阳能光伏光热高效综合利用技术

李英峰¹, 张涛², 张衡¹, 崔鹏¹, 付在国², 高中亮¹, 耿奇¹, 柳志晗¹,
朱群志², 李和兴², 李美成^{1*}

- (1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 上海电力大学能源与机械工程学院, 上海市 杨浦区 200090)

Efficient and Comprehensive Photovoltaic/Photothermal Utilization Technologies for Solar Energy

LI Yingfeng¹, ZHANG Tao², ZHANG Heng¹, CUI Peng¹, FU Zaiguo², GAO Zhongliang¹,
GENG Qi¹, LIU Zhihan¹, ZHU Qunzhi², LI Hexing², LI Meicheng^{1*}

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

摘要: 太阳能的高效综合利用对于能源可持续发展和碳达峰、碳中和战略目标的实现具有重要意义。首先, 针对光伏和光热2种最主要的太阳能利用方式, 系统介绍光伏发电技术的主要类型、研究现状和发展趋势, 以及光热利用中热发电、建筑采暖与制冷、海水淡化和工业供热的现状和发展趋势; 然后, 探讨了光伏光热一体化技术的基本原理、主要类型和研究进展, 特别讨论了与相变传热方式相结合的集成技术; 最后, 对灵活多变的多种“光伏+”太阳能利用技术进行了简单介绍。光伏、光热、光伏光热一体化和“光伏+”技术仍处于高速发展时期, 存在大量的技术增长点和巨大的应用潜力, 对解决能源和环境危机, 保持人类社会的可持续发展意义重大。

关键词: 太阳能综合利用; 光伏; 光热; 光伏光热一体化; 光伏+

ABSTRACT: The efficient and comprehensive utilization of solar energy is of great significance for the sustainable development of energy and the realization of the strategic objectives of peak carbon dioxide emissions and carbon neutralization. Firstly, focus on the two main solar energy utilization modes, photovoltaic and photothermal, we

systematically introduced the main types, research status and development trend of photovoltaic technologies, as well as the current situation and development trend of thermal power generation, building heating and refrigeration, seawater desalination and industrial heating in photothermal utilization. Then, we discussed the basic principles, main types and research progress of photovoltaic/thermal integration technology, especially the integration technology combined with the phase change heat transfer mode, was systematically introduced. Finally, several flexible "photovoltaic +" solar energy utilization technologies were introduced briefly. Photovoltaic, photothermal, photovoltaic/thermal integration and "photovoltaic +" technologies are still in a period of rapid development, have huge application potential and breed a large number of new technological growth points. These technologies are of great significance to solve the energy and environmental crisis and maintain the sustainable development of human society.

KEY WORDS: comprehensive utilization of solar energy; photovoltaic; photothermal; photovoltaic/thermal; photovoltaic +

0 引言

地球表面接收到的太阳辐射能大约为 8.5×10^{16} W, 而全球能源消耗大约为 1.5×10^{13} W^[1]。人类所利用的太阳能尚不足地球表面接收到的太阳能的1/5 000。与传统化石能源相比, 太阳能还具有清洁性和全球分布均匀的优势^[2-3]。开发太阳能

基金项目: 国家自然科学基金(51972110, 52102245, 52072121); 北京市自然科学基金(2222076, 2222077); 华能集团总部科技项目(HNKJ20-H88)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51972110, 52102245, 52072121); Beijing Natural Science Foundation (2222076, 2222077); Huaneng Group Headquarters Science and Technology Project (HNKJ20-H88).

高效综合利用技术对解决能源危机、保护生态环境和消除地域发展不平衡，以及对保持人类社会工业和科技的高速发展都具有重要意义。

太阳能的利用主要包括光电转换和光热转换2方面，光电转换是将太阳光能直接转变成电能，而光热转换是将太阳辐射能转换为热能。光电转换具有无噪音、安装方便、寿命长、维护要求少、重量轻、成本低等优点，是太阳能利用最主要的一种形式。近10年来，全球光伏市场保持快速增长的态势，截至2020年年底，全球太阳能光伏装机容量达到了760 GW。一些研究机构预测，2050年光伏发电将占总发电量的40%以上^[4-5]。随着光伏发电技术的发展、电网基础设施的完善和各国政策的驱动，光伏发电将有望成为主要电力来源。

太阳能光热利用指通过集热器将太阳辐射能转换成热能加以利用，其通常采用聚光装置提高工质温度、提升能量品位、拓宽应用范围。根据工作温度不同，太阳能光热利用可分为低温利用(<100 °C)、中温利用(100~250 °C)和高温利用(>250 °C)。其中，太阳能低温热应用主要用于民用供暖、建筑采暖、生活热水等领域，中温利用主要应用于海水淡化和工业用热领域，高温利用主要是太阳能光热发电^[6]。

光伏转换和光热转换技术各具有不同的特征。光伏发电技术价格较低，但受限于太阳辐照的不稳定性和间歇性，光伏发电大规模并网将会给电网带来很大冲击^[7]。光热转换技术可采用大规模储热，常规设备与传统火电相同，并且可以直接输出高电能质量的交流电，与电网匹配性较好，但成本较高。光伏发电和光热发电在技术层面却具有很强的互补性。另外，光伏和光热技术相结合有助于降低发电成本，系统高效地利用太阳能资源。因此，太阳能光伏光热一体化(photovoltaic/thermal, PV/T)技术日益受到重视。

太阳能光伏光热一体化技术是将太阳能光伏发电技术与太阳能集热技术有机结合。Kern等^[8]最早提出了PV/T的思想，即在光伏组件的背面铺设流道，通过流体带走耗散热能，并对这部分热能加以收集利用。一方面，提高了单位辐照接收面积上的太阳能利用效率；另一方面，通过流体

冷却，降低光伏电池温度，提高其光-电效率。PV/T可同时获得电能和热能，具有较高的综合利用效率，是近几年太阳能利用的研究热点之一。目前对PV/T的研究集中于光伏模块与光热模块的集成或层压工艺、冷却介质、流道结构、集热器结构等方面的设计及优化。

此外，将太阳能发电与现代农业、渔业等领域相结合就构成的“光伏+”模式，为太阳能的综合利用提供了一条新的发展道路，不仅可以解决太阳能能量密度低的局限性，还可以有效利用土地和水面资源。

本文对太阳能的光伏、光热、光伏光热一体化综合利用技术现状和优缺点进行了较为详细的分析、总结，同时，简要介绍了“光伏+”模式的发展现状，以期为太阳能高效综合利用技术的发展和推广提供参考。

1 光伏发电技术

光伏发电技术指利用太阳电池将太阳辐射直接转化为电能的技术。太阳电池是光伏发电技术的重要载体。目前，市场占有率最高的是晶硅太阳电池，市场占比超过90%；最具生命力的是钙钛矿太阳电池，2022年2月15日全球首个钙钛矿集中式光伏电站在衢州市开工。此外，由于硅材料出色的稳定性，以及柔性硅的发现，新型硅基太阳电池近年来也备受关注。

1.1 晶硅太阳电池技术

单晶硅太阳电池发展最早，技术也最成熟。由于晶硅制造成本的下降和高效晶硅组件的成熟，自2017年单晶硅太阳电池的市场占有率超过多晶硅太阳电池，占到49%；目前，单晶硅太阳电池的市场占有率已经超过70%。单晶硅太阳电池技术的主要发展趋势是从P型晶硅电池向N型晶硅电池过渡。

1.1.1 P型晶硅太阳电池技术

目前，市场上最主流的太阳电池仍然是P型的发射极及背面钝化电池(passivated emitter and rear cells, PERC)。PERC电池于2016年开始量产；目前，商业化尺寸PERC电池的最高效率可达24.06%。

然而, PERC 电池的平均量产效率为 22%~22.4%, 明显低于 N 型晶硅电池; PERC 电池的双面率仅有 75% 左右, 而 N 型电池的效率可以达到 85% 以上; P 型晶硅电池的温度系数高于 N 型晶硅太阳电池; P 型晶硅电池的弱光性能比 N 型电池差; 并且 P 型晶硅电池还存在较为明显的光致衰减效应。

1.1.2 N 型晶硅太阳电池技术

N 型晶硅太阳电池技术主要包括背接触电池 (interdigitated back contact, IBC)、异质结电池 (heterojunction with intrinsic thin-layer, HIT) 和隧穿氧化层钝化接触电池 (tunnel oxide passivated contact solar cell, TOPCon) 3 种。

IBC 电池是 Sunbackower 公司于 2015 年提出的一种电池技术, 由于正面没有焊带遮挡, IBC 电池能实现最大化的短路电流。2020 年, 德国能源研究所制备出了效率为 26.6% 的 IBC 电池, 短路电流密度达到了 $42 \text{ mA/cm}^{2[9]}$ 。

HIT 电池是 Panasonic 公司于 2015 年开发的电池技术, 可以大幅提升电池的填充因子。2021 年 10 月隆基在 M6 全尺寸单晶硅片上创造了 26.3% 的 HIT 电池转换效率, 填充因子达到了 86.59%^[10]。HIT 电池的平均量产效率可以达到 23%~23.6%。

TOPCon 电池的概念由弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (Fraunhofer-ISE) 在 2013 年提出^[11], TOPCon 电池是一种基于选择性载流子原理的隧穿氧化层钝化接触太阳电池技术。2021 年, Fraunhofer-ISE 的 TOPCon 太阳电池效率达到了 26.0%^[12]。TOPCon 电池的量产效率可以达到 22.4%~23.1%。

目前, 复杂的制备工艺和成本是制约 IBC、HIT 和 TOPCon 电池发展的关键因素。根据中国光伏行业协会预测, PERC 电池在未来 5 年将仍保有最高的市场占有率; 而 TOPCon、HIT 和 IBC 电池的市场份额将逐年增加。长期来看, HIT 电池代表了未来晶硅太阳电池技术的发展方向。

1.2 钙钛矿太阳电池

2009 年 Kojima 等^[13]制备出第一块钙钛矿太阳电池。近 15 年来, 钙钛矿太阳电池的光电转换效率从 3.8% 飙升至 25.7%^[13-19], 增速远超其他太阳

电池, 为实现低本高效的光伏发电提供了极具前景的新路径。为推动钙钛矿太阳电池的实用化, 研究人员一直朝着进一步提升电池效率和运行稳定性的方向努力。

1.2.1 钙钛矿太阳电池性能提升

界面工程、维度工程、组分调控、结构设计、缺陷钝化和传输层优化等策略^[20-29]已被证明能够有效提升电池性能。

文献[28]在电子传输层与钙钛矿层之间构建相干界面抑制缺陷, 实现了 25.5% 的效率; 文献[29]利用 2D 种子诱导 3D 钙钛矿晶体定向生长, 显著提升钙钛矿薄膜晶体质量, 增强器件性能; 华北电力大学李美成教授团队首次提出并构建了钙钛矿 p-n 同质结结构(图 1), 通过自掺杂方法实现了钙钛矿材料载流子浓度和分布的精确调控, 有效提升了电池性能^[25]。

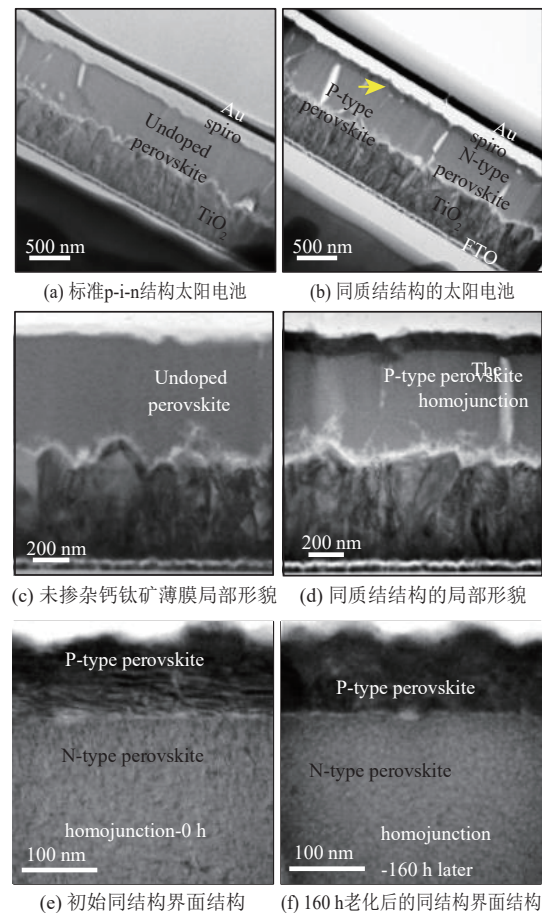


图 1 钙钛矿同质结结构的截面透射电镜表征

Fig. 1 Transmission electron microscope characterization of the cross-sections of perovskite homojunction

1.2.2 钙钛矿太阳电池稳定性提升

随着钙钛矿电池效率的迅速提升，稳定性提升成为其商业化的关键。由于钙钛矿材料对水、氧、热、紫外光相对敏感^[30-33]，电池内部存在离子迁移、相转变和材料分解等问题^[34-36]，严重影响电池长期高效运行。

添加剂、界面修饰、插入层和封装等方法均可以提高电池稳定性^[37-41]。例如，李美成教授团队通过在钙钛矿材料中引入红荧烯分子，使钙钛矿中的有机阳离子产生超分子相互作用，有效抑制了离子迁移，提升了电池的稳定性^[42]；利用聚乙烯基乙烯亚胺的改性层实现了电池紫外稳定性提升^[43]。

未来，高效稳定的钙钛矿太阳电池迈向大规模生产应用还将向着大面积组件制备、绿色生产、防止铅泄漏等方向发展。

1.3 新型硅基太阳电池

当硅片厚度小于 20 μm 时具有非常好的机械柔性。新型硅基柔性太阳电池引起了人们广泛的研究兴趣。其中，以 PEDOT:PSS(聚 3,4-乙烯二噻吩/聚苯乙烯磺酸盐)为空穴传输层的 PEDOT:

PSS/Si 杂化电池的研究最为广泛。然而，硅的光吸收系数较低，超薄硅片难以实现对太阳光的充分吸收。通过光管理技术解耦太阳电池的光电性能与厚度的关联，实现充分的光吸收，对提升超薄硅基杂化太阳电池的效率具有决定性作用。

1.3.1 光管理

硅纳米线结构可以大幅增强太阳电池的光吸收^[44-46]。通过对硅纳米线的光管理特性的系统研究发现，其响应波长取决于直径，光捕获能力则与其长度成正比^[47]；并拟合出了可描述硅纳米线长度、直径与响应光谱之间关系的解析方程^[48]。通过探究环境对硅纳米线光学性能的影响，发现硅纳米线在 PEDOT:PSS 中(折射率 1.284)的本征吸收变小，有利于陷光增强^[49]；硅纳米线的表面氧化硅层将使光更容易传递至硅衬底中^[50]。圆柱形硅纳米线往往只有一个响应峰，因而仅能实现某波段的光吸收增强。为此，研究人员探讨了锥形硅纳米线的光谱响应特性，发现锥形硅纳米线具有多个光谱响应峰，可以实现宽光谱的陷光增强^[51]；设计了三叶形硅纳米线，如图 2 所示，可以在拓宽响应光谱的同时保证响应光谱的强度^[52]。

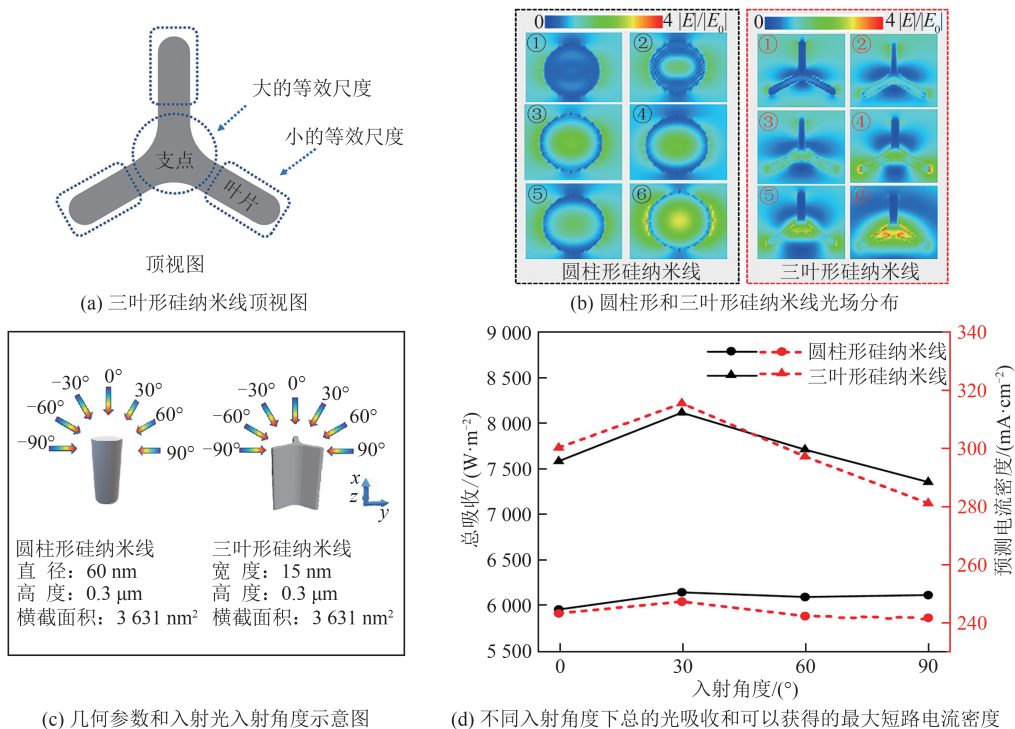


图2 三叶形硅纳米线结构示意图及光学性能

Fig. 2 Structural diagram and optical properties of trilobal silicon nanowires

此外，还可以设计硅-银复合结构，以实现金属和半导体纳米结构的协同陷光增强^[53-55]。

无基底的硅纳米线阵列具有柔性和透光的优势^[56-57]，可以制备成半透明太阳电池^[58]。研究人员发现圆柱形、三叶形、四叶形、三边形、四边形、螺旋形等硅纳米线阵列均表现出良好的透光性和光吸收性能^[59]，其中螺旋形硅纳米线的散射光谱的宽度几乎覆盖了硅材料的光学带隙^[60]。进一步的器件仿真结果^[59-60]表明，基于三叶形和螺旋形硅纳米线阵列的太阳电池具有超高的短路电流密度和转换效率，这证明了光管理可以有效提升光伏器件的性能。

1.3.2 PEDOT:PSS/Si 杂化太阳电池

PEDOT:PSS/Si 杂化太阳电池的最高转换效率已经达到 17%^[61-62]。限制其效率提升的关键因素之一是纯 PEDOT:PSS 薄膜的导电性和功函数均较低，且 PEDOT:PSS 中存在过多的聚苯乙烯磺酸盐 (PSS)。提高 PEDOT:PSS 成膜后的电导率和功函数，去除过多的 PSS 成为提升 PEDOT:PSS/Si 电池

性能的主要方式之一。

使用将加入乙二醇的 PEDOT:PSS 溶液加热后再加入表面活性剂的方式，结果发现 PEDOT:PSS 会出现相的分离与胶联^[63]。PEDOT 相重新胶联成高效的导电网络，且使得该溶液旋涂成膜后 PEDOT:PSS 的功函数从 4.5 eV 提升至 4.8 eV。采用该方法对 PEDOT:PSS 进行溶液改性，使 PEDOT:PSS/Si 杂化太阳电池的转换效率从 11.03% 提高至 12.38%。

硅表面悬挂键也是影响 PEDOT:PSS/Si 杂化太阳电池性能的主要因素之一。为此，采用红荧烯修饰硅表面悬挂键，使得含红荧烯的 PEDOT:PSS/Si 太阳电池的转换效率达到了 12.59%(图 3)^[64]。通过在硅基底背表面与电极之间插入氧化锡层，可以有效钝化硅背表面悬挂键，同时氧化锡层取代了肖特基势垒，降低了背面的势垒高度，使 PEDOT:PSS/Si 太阳电池的效率达到了 14.1%^[65]。

窗口层对 PEDOT:PSS/Si 杂化太阳电池的光吸收的影响非常重要。通过调控 PEDOT:PSS 薄膜的

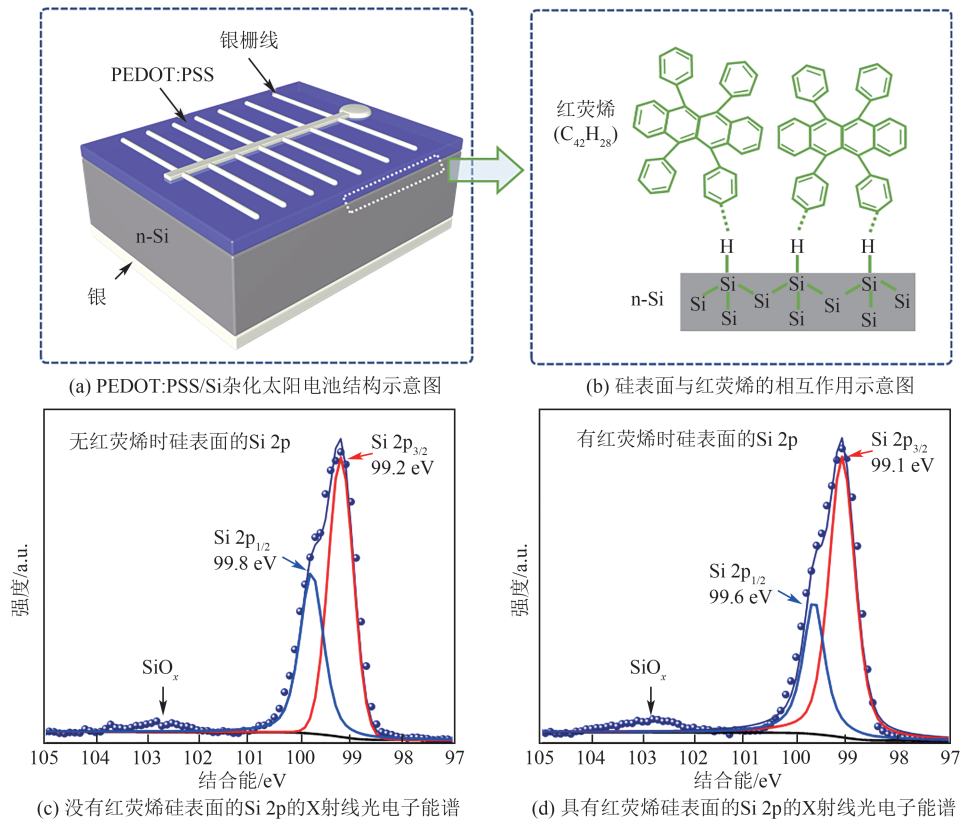


图 3 PEDOT:PSS/Si 杂化太阳电池中硅表面与红荧烯的相互作用机制

Fig. 3 Interaction mechanism between silicon surface and rubrene in PEDOT:PSS/Si solar cells

厚度发现，PEDOT:PSS层的最佳厚度为90 nm左右，按此制备的太阳电池器件效率达到了12.35%^[66]。

超薄硅表面的应力会因为表面微纳结构而集中，难以实现高效率 and 柔韧性兼容。为此，对超薄硅太阳电池的力学、光学和电学性进行了耦合仿真研究^[67]。结果表明柔性PDMS薄膜陷光结构可以同时提升器件的光吸收和柔韧性：表面应力降低33.4%，光吸收提升42.3%，器件转换效率从6.86%提升到9.76%。

除了转换效率，机械柔性、稳定性和大面积制备也将是决定PEDOT:PSS/Si杂化太阳电池是否具有实用价值的关键。因此，亟需开展PEDOT:PSS/Si杂化太阳电池的力学性能、稳定性和制备技术方面的研究工作。

2 光热技术

太阳能光热技术应用领域较为广泛，在高、中、低温相关领域都有不同程度的发展。其中太阳能热发电、太阳能建筑采暖与制冷、太阳能热法海水淡化，以及太阳能工业热利用等技术具有良好应用前景。

2.1 太阳能热发电

光热发电在调峰调频方面存在优势，且具有连续稳定、灵活可调等特点，在未来可再生能源发电系统中具有广阔的应用前景^[68-69]。如图4所示，根据太阳能聚光形式的不同主要分为4种类型：槽式^[70]、塔式、碟式和线性菲涅尔式^[71]。表1

对4种太阳能热发电系统的运行参数、系统效率、应用场景等进行了梳理。

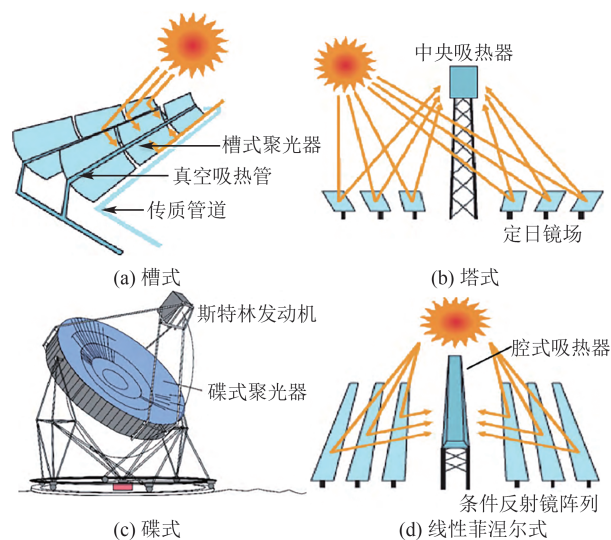


图4 光热发电技术类型

Fig. 4 Types of solar thermal power generation technology

槽式和塔式是当前较为主流的2种光热发电技术，其中槽式热发电技术已经趋于成熟，塔式热发电技术发展迅速，均已在商业上获得成功应用。美国加利福尼亚早在1991年建设了全球首座商业化SEGS槽式光热电站，总装机容量达到354 MW^[72]。西班牙在2007年建设了欧洲第一座商业化塔式热电站PS10，设计功率为11 MW，随后在2012年建成了世界最大的线性菲涅尔式电站PuertoErrado，装机容量为30 MW，运行温度达到270 °C^[73]。近年来，我国的热发电技术也取得了巨大进展。2012年我国在八达岭建成了国内首

表1 4种光热发电技术比较

Tab. 1 Comparison of four photothermal power generation technologies

参数	槽式	塔式	碟式	线性菲涅尔式
规模/MW	10~350	10~150	0.01~1	10~320
成熟度	商业化	商业化	示范	示范
聚光方式	线聚焦	点聚焦	点聚焦	线聚焦
跟踪方式	单轴跟踪	双轴跟踪	双轴跟踪	单轴跟踪
聚光比	10~100	300~1 500	1 000~3 000	35~170
传热介质	水/蒸汽、熔盐、导热油、空气	水/蒸汽、熔盐	氢、熔盐	水/蒸汽、熔盐
运行温度/°C	150~550	300~1 200	300~1 500	150~400
峰值效率/%	21	23	29.4	20
热发电效率/%	10~16	10~22	16~29	8~12
单位造价/(美元/W)	2.7~4.0	2.5~4.4	1.3~12.6	5.4
发电成本/[美元/(kW·h)]	0.13~0.26	0.08~0.16	0.25	0.28

个、亚洲最大的塔式热发电示范电站，此后，德令哈 50 MW 导热油槽式、敦煌 100 MW 熔盐塔式、敦煌 50 MW 熔盐线性菲涅尔式等光热示范电站相继投产。截至 2021 年年底，我国太阳能热发电累计装机容量为 538 MW(含兆瓦级以上规模的发电系统)，其中，塔式、槽式和线性菲涅尔式技术路线占比分别为 60%、28% 和 12%^[74]。

基于蒸汽朗肯循环的光热发电技术成熟，是当前商业应用的主流方向。但这类系统存在聚光集热面积大、循环温度较低、效率较低等问题，阻碍了自身快速发展^[75]。超临界 CO₂ 布雷顿循环所需的温度范围与塔式集热装置的集热温度相契合，具有进一步提升太阳能热发电效率的潜力。

美国可再生能源实验室针对简单超临界 CO₂ 循环、再压缩超临界 CO₂ 循环、部分冷却循环、中间冷却循环进行比较，分析了 4 种超临界 CO₂ 循环在不同条件下的热力性能^[76]。Padilla 等^[77]对 4 种典型的太阳热能驱动的超临界 CO₂ 循环进行能量分析和焓分析。结果表明，与塔式太阳能集热装置耦合的超临界 CO₂ 循环相比于蒸汽朗肯循环有更好的热力性能，通过增加再热过程，超临界 CO₂ 再压缩循环太阳能热发电系统的热效率和焓效率得到进一步提升。

太阳辐射具有间歇性和波动性，为了确保太阳能热发电系统稳定运行与最大化利用太阳能资源，通常配置储能系统，或利用天然气、油等化石燃料作为补充燃料。澳大利亚 Eric Hu 课题组最早提出太阳能与燃煤火电机组耦合方法，研究表明，采用太阳热系统收集的辅助热源替代汽轮机抽汽进入常规电厂回热系统后，理论上可提高火力发电厂发电功率约 30%^[78-79]。光-煤互补发电系统在降低太阳能利用成本、提高太阳能发电效率的同时，还能降低燃煤消耗、减少碳排放，具有广阔发展前景。

华北电力大学杨勇平团队针对光-煤互补发电技术开展了系列研究^[80-82]，利用遗传算法对太阳能辅助燃煤系统的集热场进行了优化；基于热力学第二定律提出了太阳能贡献度法，并利用该方法对太阳能辅助燃煤发电系统进行了优化。此外，该团队提出了塔式太阳能辅助燃煤发电系统的不同

集成方案，开展了燃煤发电系统的能量和焓分析^[83]，探讨了蓄热系统容量对太阳能发电功率和发电效率的影响^[84]，提出了槽塔相结合收集太阳能的模式^[85]。陈海平团队^[86-87]提出扩容蒸发式太阳能蒸汽发生系统，并与燃煤机组耦合形成光-煤互补复合发电系统，以提高系统换热效率。

2.2 太阳能建筑采暖与制冷

建筑能耗在总能耗中占据较大比例，而建筑能耗结构中 2/3 的能源用于建筑采暖、制冷和热水供应。因此，充分利用太阳能进行采暖、降温和热水供应是实现建筑节能的一个有效途径^[88]。太阳能光热技术在建筑采暖应用领域可分为“被动式”利用技术和“主动式”利用技术。

2.2.1 太阳能建筑被动采暖系统

太阳能“被动式”采暖技术主要是通过建筑朝向、方位和构造布局等的设计达到提高建筑冬季吸收热量、控制夏季室内过热、加强自然通风等效果。由法国科学家 Trombe 发明的 Trombe 墙系统是研究最广泛的太阳能被动采暖系统，如图 5 所示。太阳能集热面与幕墙进行一体化设计，对系统运行性能进行研究，结果表明，集热器的出口温度可以达到 91.3 °C，墙体内侧温度最高可达 23.4 °C，内外侧温差达到 41.7 °C，具有较好的保温性能^[89]。

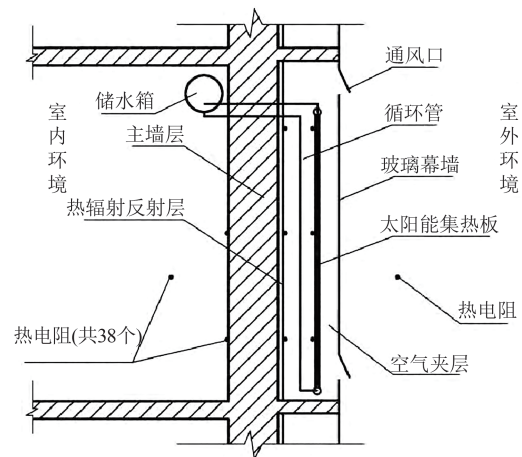


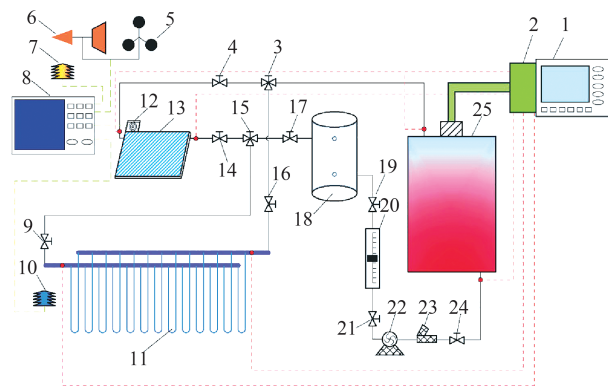
图5 Trombe墙原理图

Fig. 5 Schematic diagram of Trombe wall

2.2.2 太阳能建筑主动采暖系统

太阳能“主动式”采暖技术则是利用各种太阳能集热设备对太阳能经过吸收、转化、存储后，

由泵或风机将热量传输到采暖房间，通常与电磁炉、热泵等辅助供能设备耦合以增加系统适用性与稳定性。基于低温辐射散热的相变储热型平板集热器太阳能供暖系统如图6所示，在平均集热器温度 $56.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，用于供暖的毛细管网上方 1.5 m 处的温度在 $19.6\sim 21.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内，能够满足供暖需求^[90]。太阳能热泵系统采用太阳辐照作为蒸发热源的热泵系统，空气源热泵辅助太阳能供暖系统的设计研究表明，整个机组的出水温度可以达到 $42.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均室内温度能够达到 $19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[91]。



1—TP700数据采集器；2—K型点状测温传感器；3—三通阀-1；4—球阀-1；5—风速仪；6—风向标；7—环境温度传感器(室外)；8—CR3000数据采集器；9—球阀-2；10—环境温度传感器(室内)；11—毛细管网；12—倾斜面太阳总辐射表；13—平板热管型太阳能集热器；14—球阀-3；15—三通阀-2；16—球阀-4；17—球阀-5；18—缓冲水箱；19—球阀-6；20—玻璃浮子流量计；21—球阀-7；22—循环泵；23—Y型过滤器；24—球阀-8；25—相变储热单元。

图6 储热型太阳能供暖系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of solar heating system with heat storage

太阳能制冷目前主要以太阳能吸收式制冷技术为主，通过集热器产出热源驱动溴化锂吸收式制冷机，其热源温度要求范围通常在 $72.5\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。人们构建了平板集热器驱动的小型太阳能吸收式制冷系统，对系统进行分析与优化，如图7所示。结果表明，平板集热器的工作温度可达 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，能够较好与吸收式制冷机热源温度相匹配，且制冷性能优于电压缩制冷系统^[92]。王树成等人^[93]对太阳能吸收式制冷系统的动态特性进行分析，对集热器效率随运行温度变化以及集热器面积需求量随时间的变化等因素进行了讨论。

2.3 太阳能热法海水淡化

太阳能海水淡化技术分为热法与膜法两大类。

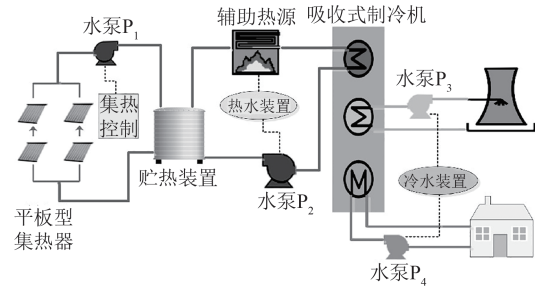


图7 小型太阳能吸收式制冷系统结构图

Fig. 7 Schematic diagram of small solar absorption refrigeration system

利用太阳能产热加热海水，经浓缩蒸发冷凝后产出淡水的过程称之为热法；利用太阳能发电驱使海水无相变地通过半透膜实现淡化过程，称之为膜法。太阳能热法海水淡化技术又可分为直接法和间接法两大类：直接法即直接利用太阳能在集热器中对海水进行蒸馏；间接法中太阳能集热器和海水蒸馏装置是分开的，其中一个用来收集太阳能，另一个用来对海水进行脱盐^[93]。典型的热法太阳能海水淡化方法包括太阳能多级闪蒸、太阳能多效蒸馏、太阳能增湿除湿、太阳能膜蒸馏等。我国首个太阳能海水淡化示范项目采用菲涅尔式聚光集热系统加热产出 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热蒸汽作为热源，每年可产出 $2\ 000\text{ t}$ 淡水。

叶鸿烈等人^[94]提出一种聚光直热式加湿除湿太阳能海水淡化装置并进行了试验测试，如图8所示。结果表明，在平均太阳直射辐照度为 692 W/m^2 时，最大产水速率达到 0.52 kg/h ，装置的平均性能系数达到 0.84 。薛喜东等人^[95]基于—

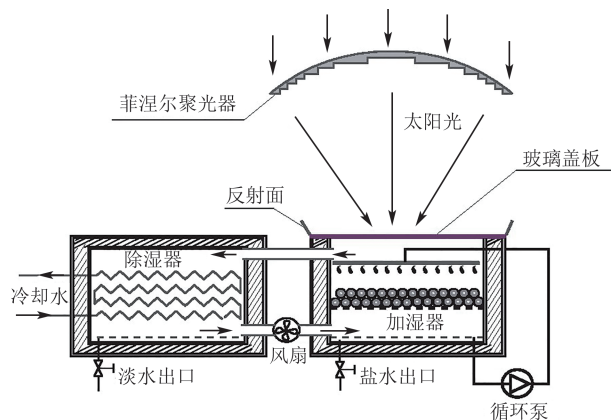


图8 太阳能增湿除湿海水淡化系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of humidified-dehumidified solar water desalination system

种空气隙膜蒸馏组件，对太阳能空气隙膜蒸馏海水淡化系统进行了研究，在进料温度为50~80℃时，该系统最大日造水比为3.2，最大日产水量为21.7 L/d，产水电导率稳定在20.0 μS/cm以下。

2.4 太阳能工业热利用

中温太阳能集热器的运行温度一般在90℃以上，最高可达350℃，产生的高温热水或者低温低压蒸汽可用于多种工业应用场景。太阳能工业热利用主要有2种型式，适用于许多工业部门。因此该系统通常含有2种型式：一是采用集热器直接将工质加热至所需温度；二是将太阳能系统与锅炉系统实现热力集成，冷水经太阳能预热(加热至95℃)后，送至锅炉系统加热至特定温度的蒸汽，进而使用。工业热利用领域为获得温度较高的热水或蒸汽，通常利用聚光技术来提高热能品质，常用聚光技术有复合抛物面集热器(compound parabolic collector, CPC)与槽式面聚光集热器，一般不采用高温点聚光集热器和平板集热器。研究人员设计了一种低截取比的CPC空气集热器，发现集热器最大出口温度可达200℃，低截取比的CPC聚光器可有效减少材料消耗^[96]。在实际工程应用中，力诺瑞特研发的U形管式CPC中温集热器产品，与锅炉进行热力集成后，可以将冷水经太阳能集热器预热后由锅炉加热成150℃的蒸汽供工业应用。

3 光伏光热一体化技术

3.1 典型PV/T集热器结构

PV/T的研究前期集中于以水和空气作为冷却介质。文献[97-98]通过理论研究指出，PV/T系统的光电/光热综合效率可以达到60%~80%，明显高于单独的光-电系统或光-热系统。文献[99]对光伏/热水、光伏/热空气以及有无玻璃盖板、有无聚光板的PV/T系统性能进行了对比研究，并对不同的PV/T系统的全年运行性能及经济性进行计算和分析，结果表明，PV/T可以提高系统的经济可行性，具有更好的成本/效益比。另外，关于常规PV/T更多的研究进展及研究结论可参考文献[100-101]。其中，有研究^[102]发现，以水为冷却介质可获得比以空气为冷却介质更好的电池冷却效果及

更高的综合利用效率，其典型结构如图9所示。

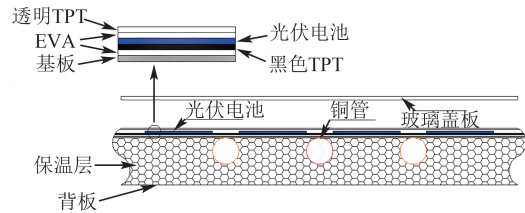


图9 典型PV/T集热器结构图

Fig. 9 Structure diagram of typical PV/T collector

传统的水冷型PV/T系统在高纬度或是冬季结冰的地区使用时，铜管内的水易冻结，从而对管道造成损害，管道的变形会进一步引起电池板芯形变，从而造成光伏电池的损坏。此外，由于水冷型PV/T系统中冷却水直接与管道(铜管或是不锈钢管等)接触，会造成管道的腐蚀，降低其使用寿命。引入重力或环路热管与热泵技术、利用相变蓄热等措施可有效提升传统PV/T系统性能，克服水冷型PV/T的缺点。

3.2 重力热管式PV/T集热器

重力热管作为传热元件与PV/T技术的集成方式是，将重力热管的蒸发段焊接在吸热板的背面，将冷凝段插入到定制的集管中。重力热管式PV/T集热器的结构示意图如图10、11所示。

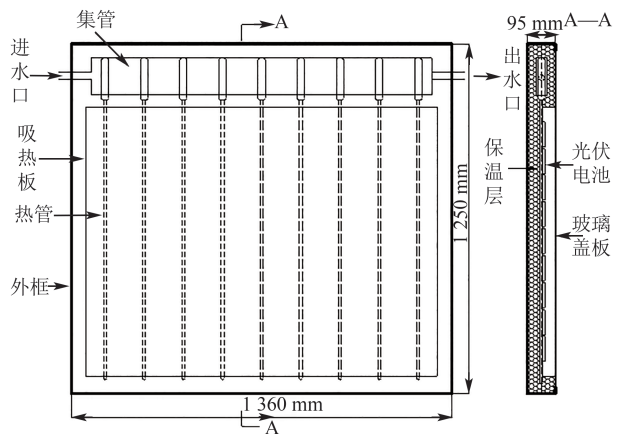


图10 重力热管式PV/T集热器(集管式冷却)

Fig. 10 Gravity heat pipe type PV/T collector (header type cooling)

3.2.1 重力热管式PV/T实验研究

Pei等^[103]对玻璃盖板对重力热管式PV/T集热器性能的影响进行了实验研究，结果表明，玻璃盖板可提高系统的光热性能，但会降低系统的光电性能；且无盖板时系统对环境变化更加敏感。

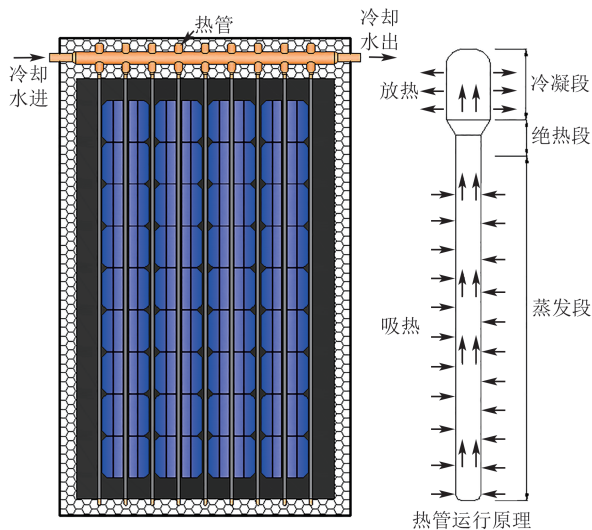


图11 重力热管式PV/T集热器(套管式冷却)

Fig. 11 Gravity heat pipe type PV/T collector (driveway type cooling)

Fu等^[104]实验研究结果表明,降低热管的管间距可以适当提高系统的综合性能。

3.2.2 重力热管式PV/T理论研究

文献[105-107]基于分布参数法建立了重力热管式PV/T系统的数学模型,对结构及运行参数对系统综合性能的影响进行了敏感性分析,结果表明:光热和光电效率随质量流量、热管冷凝端截面直径和热管数量的增加而增加,随集管宽度的增加而降低;系统电增益和PV/T效率随光伏电池覆盖率的增加而增加,提高光伏覆盖率有利于提高太阳辐射利用率,从而提高能量输出品质。针对热管工质,温暖气候区建议采用水,而寒冷气候区建议采用R134a。Pei等^[108]基于典型气象数据对热管式PV/T的年运行收益进行了评估,结果表明:系统获得的有效热能和电能主要依赖该地区的可用太阳辐射;对于北京地区,系统全年获得总热量和总光电输出分别为8 165.62~9 101.21 MJ和1 248.75~1 269.28 MJ,全年平均太阳能-热能贡献率为46.6%~64.7%。Zhang等^[109]通过进一步研究表明:热管式PV/T系统由于热二极管特性,其夜间损失较小,有效供热天数更多,光热性能较好,但光电性能差别不大;同时,相对设定终温和光伏覆盖率,水箱容积对综合收益的影响更大。

重力热管工作的最佳倾角与PV/T的最佳倾角

不匹配,研究人员^[110]进一步建立了倾斜热管的三维数学模型,探究了倾角对热管式PV/T系统综合性能的影响。结果表明:倾斜状态下液膜厚度在大部分长度上都是稳定的;冷凝端相对薄膜热阻随倾角的增大先减小后增大,而蒸发端与冷凝端的薄膜热阻呈现相反的变化趋势;热管的总热阻主要由蒸发端决定,而蒸发端的热阻主要由液池的有效高度决定。实验和模拟结果均表明,倾角为40°时系统性能最好。

3.3 环路热管式PV/T集热器

重力热管的蒸发端和冷凝端位置相对固定,与PV/T技术结合时存在诸多限制。环路热管的蒸发端和冷凝端分离的特性使其更易与PV/T利用相结合。Pei等^[111-112]设计搭建了环路热管式PV/T系统与传统水冷型PV/T系统的对比实验测试平台,如图12所示。实验结果表明:环路热管式PV/T系统具有更好的温度均匀性,进而导致较高的光电效率,但由于二次换热,其光热性能略差;虽然实验期间二者光-电、光-热效率不同,但它们的焓效率几乎一致。二者典型光热光电综合效率的拟合曲线也从侧面证实了上述结论,且长期运行性能拟合结果表明,环路热管式PV/T系统具有更高的典型热效率和典型光热综合效率,同时具有较大的热损系数。

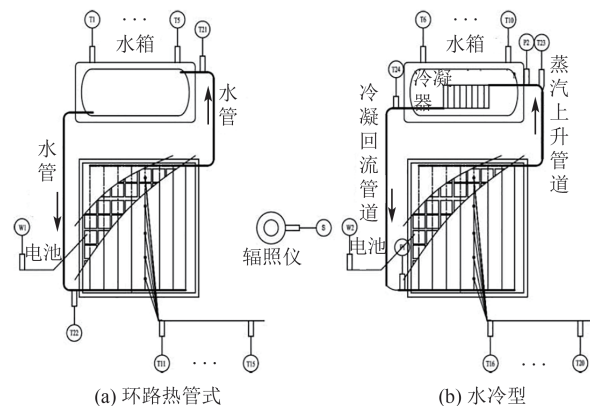


图12 环路热管式及水冷型PV/T对比测试平台

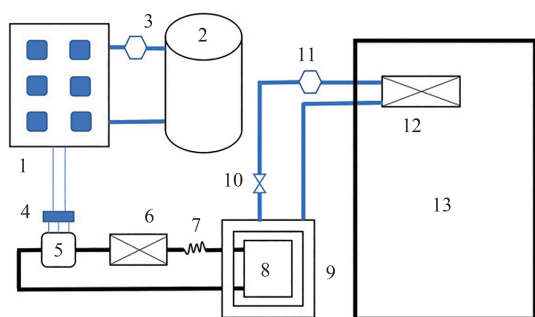
Fig. 12 Comparison setup of loop thermosiphon type and water cooled PV/T collectors

环路热管式PV/T中,体积充注量对系统性能的影响最为明显。张涛等人^[113-114]基于长期的室外实测,对不同体积充注量下对太阳能光热利用及光电光热综合利用性能的影响进行了实验研究,

结果表明：环路热管式太阳能热水系统的日平均光热性能随体积填充比的增大呈现先增大后减小趋势，最佳体积充注量在30%~50%，而环路热管式PV/T系统的最佳体积充注量为32%~40%；充注量不足会导致集热器温度急剧增大，严重影响光-电性能。

3.4 光伏-太阳能热泵系统

热泵的低温蒸发吸热与PV/T利用相结合，可同时实现光伏电池的低温冷却及热能的高温输出；与空气源热泵结合时还可克服太阳能的间歇性。基于PV/T的热泵供暖制冷系统如图13所示。



1—PV/T集热器；2—水箱；3—水泵；4—控制器；5—压缩机；
6—冷凝器；7—毛细管；8—蒸发器；9—蓄冰槽；10—阀门；
11—泵；12—风机盘管；13—室内。

图13 基于PV/T的热泵供暖制冷系统

Fig. 13 Schematic diagram of the PV/T refrigeration/heating system

将光伏电池直接层压在直膨式太阳能热泵系统蒸发器的上表面构建了PV/T蒸发器^[115]，结果表明：一方面，蒸发器能够有效降低光伏电池温度，从而提高其光电转换效率；另一方面，太阳辐照能够提升热泵系统的蒸发温度，进而提高能效比。在此基础上，利用PV/T发电直接驱动变频压缩机运行，以提高热泵系统的运行性能和太阳能利用率，实践证明，PV/T直驱式制冷/供热系统可以实现较高的太阳能制冷效率^[116-117]。

Cai等^[118]将PV/T集热器与空气换热器并联同时作为热泵系统的蒸发器，提出了空气源-太阳能复合热源热泵系统，对工质在蒸发侧的迁移分布规律进行了理论研究。结果表明，复合热源能够弥补单一热源在低蒸发温度和高冷凝温度等不利工况下运行时的缺陷，有效提高系统的运行性能和稳定性。为满足建筑的多种能量需求，Cai

等^[119-121]进一步将复合热源热泵技术与多功能热泵技术有机结合，提出太阳能-空气源复合热源多功能热泵系统，研究了电子膨胀阀开度、环境温度以及太阳辐照强度等关键因素对系统性能的影响规律，并对系统在秋季和冬季气象条件下的动态运行性能进行了户外实测，初步探讨了系统的夜间制冷性能，结果表明，PV/T双源热泵系统在各种工况下都能稳定运行，且在节能和性能改善方面更为有效。

3.5 含相变材料蓄热的PV/T系统

针对在电池背部设置换热通道的平板型PV/T，采用含相变材料(phase change material, PCM)的多层结构PV/T系统来提升性能^[122]。多层结构PV/T系统是将PCM层置于PV背板与换热通道之间，通过蓄热作用调节光伏电池的温度，夜间还能释放热量，用于管路系统冬季防冻，明显提高传统PV/T系统^[123]的发电、产热效率及工作可靠性。研究发现，在上海地区秋季典型测试条件下，利用多层结构PV/T系统的平均电效率可提高近1%，综合效率可提高25.2%。采用类似PCM多层结构的PV/T系统亦获得了较高的电热效率。这些研究为相变材料在传统PV/T系统中的应用提供了一个值得深入拓展的方向，可围绕相变材料的选择、应用位置、布置方式、导热强化等方面展开。

另外，研究人员开发出了一种有效的以微胶囊相变材料(microcapsule phase change material, MPCM)浆液为冷却介质的PV/T系统^[124-125]。MPCM作为换热工质，可充分发挥其相变潜热优势，相同流量条件下能提高换热量，从而较好地控制电池温度，但系统的阻力损失并没有明显增加。研究发现，使用MPCM浆液的PV/T系统的性能优于使用单纯的水或带有PCM层的结构，该系统的平均电效率和最大热效率能得到显著提高。即使是低浓度的MPCM浆液，亦可以明显提高其综合性能。以上结果表明该系统在太阳能光伏光热综合开发利用中可行，而且利用相变材料蓄热可以有多种形式。

4 “光伏+”太阳能综合利用

随着太阳电池组件技术日渐成熟，其应用场

景从大型光伏电站延伸到更多方面，衍生了包括“光伏+”建筑、基建、农业和交通等多种分布式太阳能综合利用的方式。

4.1 “光伏+”建筑

光伏与建筑结合主要有在建筑上安装的光伏系统(building attached photovoltaic, BAPV)和建筑光伏一体化(building integrated photovoltaic, BIPV)^[126-128] 2种模式，BAPV是在不破坏建筑物的前提下，将光伏组件附着安装在建筑物上。而BIPV光伏组件不仅要为建筑物提供电力，同时光伏组件也作为建筑物的一部分，具有建筑物自身的结构和使用功能，即光伏建筑一体化。“光伏+”建筑减少了光伏组件的占地面积，增加了建筑物的设计感和美观度。

BIPV虽然在多方面更具优势，但需要承担被替代的传统建筑材料的功能，更换现有建筑的玻璃、屋顶会造成很大影响，所以，现阶段依旧以BAPV为主，后期随着新建建筑的出现，BIPV的占比会逐渐提高，其发展潜力巨大。

4.2 “光伏+”基建

“光伏+”基建指的是光伏组件与基础设施的结合。例如，将光伏组件作为路灯、道路警示牌的电源，光伏智能公路等。光伏智能公路中组件产生的电能可以为公路旁的路灯和指示灯提供能源补给，剩余的电能可以传输到电网。

新能源汽车的蓬勃发展为光伏提供了新的“光伏+基建”应用场景^[129]。在充电桩附近的停车区域设置光伏遮阳棚，将光伏电池配上充放电控制装置及蓄电池，就能在为汽车遮蔽风雨的同时实现新能源汽车的零碳排放。

随着5G通信技术的发展，“站点式光伏+5G”的“光伏+基建”具有灵活、方便、高效、节能等优势，应用潜力巨大。5G信号的发送及传输需要消耗巨大的电能，站点式光伏电站能够在很大程度上为5G基站补充电能消耗。同时，5G智能也可以用于站点式光伏，满足光伏电站的实时数据采集和传输、远程调度与协调控制、多系统高速互联等功能，实现电站的实时监测和智能运维。“光伏+5G”模式既符合当下数字化经济的提议，又十分契合中国“双碳”目标重大决议，未来定会有很好的发展。

4.3 “光伏+”农业

“光伏+”农业指光伏与大棚、畜牧业和渔业等的结合。光伏大棚是在普通大棚的顶部安装薄膜太阳能电池板，将太阳辐射分为植物需要的光能和光伏发电的光能，既满足了植物生长的需要，又实现了光电转换。光伏畜牧则主要利用光伏电池和蓄电池为无电区牧民提供基本生活供电。

光伏渔业是在水面上安装漂浮式光伏形成“上发电下养殖”的新型节能农业模式。这一模式存在一些问题：1) 水面遮光导致鱼塘水生植物产氧量下降；2) 光伏组件安装和绝缘要求更高；3) 组件腐蚀更加严重。这一模式的未来发展应着力于寻求最佳安装面积，解决绝缘、腐蚀问题，使渔业和光伏结合，为渔民带来最大创收。

5 结论

针对光伏发电技术、光热技术、光热一体化和“光伏+”4种太阳能利用技术进行了综述。介绍了各种太阳能利用技术的优缺点、原理、技术分类和现存问题，并对它们的发展前景和技术发展趋势进行了展望。

1) 光伏发电技术是解决未来能源需求问题最有前途的技术之一。晶硅太阳能电池正在从P型向更高效率的N型电池转变，其中，HIT电池代表了未来晶硅太阳能电池技术的发展方向。稳定性是制约钙钛矿太阳能电池开启商业化进程的主要瓶颈；除此之外，还亟需开发钙钛矿组件的大面积制备工艺。新型硅基杂化太阳能电池的研究目前仍集中在获得高转换效率上；针对其力学性能、稳定性和制备工艺开展研究，有望成为未来一段时间的热点。

2) 光热发电具备灵活性调节优势，能够为高比例可再生能源并网情境下电网快速调峰调频奠定安全稳定的基础；高效率、大容量、高聚光比的光热发电技术是未来主要研究方向。太阳能建筑采暖与制冷技术是降低建筑中传统能源消耗、提高工业加热清洁化的有效途径与方法，能为区域能源供给提供新的思路。太阳能热法海水淡化技术可以独立运行且具有不消耗常规能源、环保等优势，大幅提高清洁能源使用比例，同样具备

较好的发展前景。

3) PV/T技术具备更好的综合性能及建筑节能潜力,特别是与空气源热泵结合可实现全天候工作。目前的研究集中在引入重力或环路热管、热泵技术、相变蓄热措施等提升PV/T系统的性能;PV/T技术未来需着力于集热器集成工艺与综合效率及使用寿命的提升及改进。

4)“光伏+”模式的探索更使得新型的太阳能利用技术与传统的农业、建筑和基建等领域灵活紧密地结合起来,进一步提高了太阳能综合利用的效率和灵活性。其中,BIPV、“光伏+充电桩”“光伏+5G”、光伏大棚等技术均具有巨大的发展潜力。

参考文献

- [1] 杨金焕. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2017: 304.
YANG J H. Solar photovoltaic power generation application technology[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 304.
- [2] LI M Q, VIRGUEZ E, SHAN R, et al. High-resolution data shows China's wind and solar energy resources are enough to support a 2050 decarbonized electricity system [J]. *Applied Energy*, 2022, 306: 117996.
- [3] ZHANG Y H, REN J, PU Y R, et al. Solar energy potential assessment: a framework to integrate geographic, technological, and economic indices for a potential analysis[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 577-586.
- [4] DNV GL. 能源转型展望 2018[EB/OL]. (2018-09-10) [2022-02-25]. <https://www.dnv.com/cn/news/page-128751>.
DNV GL. Energy transition outlook 2018[EB/OL]. (2018-09-10)[2022-02-25]. <https://www.dnv.com/cn/news/page-128751>.
- [5] International Energy Agency. World energy outlook 2018[R]. Paris: IEA, 2018.
- [6] 黄华瑞, 赵霄. 太阳能光热利用浅析[J]. *太阳能*, 2015(12): 13-17.
HUANG H, ZHAO X. A brief analysis of solar thermal utilization[J]. *Solar Energy*, 2015(12): 13-17.
- [7] 郑彪. 关于降低大规模光伏发电对电力系统影响的研究[J]. *电子元器件与信息技术*, 2021, 5(7): 2-5.
ZHENG B. Research on reducing the impact of large-scale photovoltaic power generation on the power system[J]. *Electronic Components and Information Technology*, 2021, 5(7): 2-5.
- [8] KERN E C J, RUSSELL M C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems[C]/IEEE photovoltaic specialists conference. Washington DC, USA: IEEE, 1978: 152-159.
- [9] POMASKA M, KHLER M, MOYA P P, et al. Transparent silicon carbide/tunnel SiO₂ passivation for c-Si solar cell front side: enabling $J_{sc} > 42 \text{ mA/cm}^2$ and iV_{oc} of 742 mV[J]. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2020, 28(4): 321-327.
- [10] 隆基绿能. 26.30%! 隆基一周两破HJT电池效率世界纪录 [EB/OL]. (2021-10-28) [2022-02-25]. <https://www.longi.com/cn/news/hjt-record-2021/>.
Longji Green Energy. 26.30%! Longji broke HJT battery efficiency world record twice a week[EB/OL]. (2021-10-28) [2022-02-25]. <https://www.longi.com/cn/news/hjt-record-2021/>.
- [11] FELDMANN F, BIVOUR M, REICHEI C, et al. A passivated rear contact for high-efficiency n-type silicon solar cells enabling high Vocs and FF > 82%[C]/28th European PV Solar Energy Conference and Exhibition. Paris, France: WIP-Renewable Energies, 2013: 988-992.
- [12] RICHTER A, R MÜLLER, BENICK J, et al. Design rules for high-efficiency both-sides-contacted silicon solar cells with balanced charge carrier transport and recombination losses[J]. *Nature Energy*, 2021, 6(4): 1-10.
- [13] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(17): 6050-6051.
- [14] JEONG J, KIM M J, SEO J D, et al. Pseudo-halide anion engineering for alpha-FAPbI₃ perovskite solar cells[J]. *Nature*, 2021, 592(7854): 381-385.
- [15] YOO J J, SEO G, CHUA M R, et al. Efficient perovskite solar cells via improved carrier management [J]. *Nature*, 2021, 590(7847): 587-593.
- [16] NREL. Best research-cell efficiency chart[EB/OL]. (2020-10-12) [2022-02-25]. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [17] PARK N. Research direction toward scalable, stable, and high efficiency perovskite solar cells[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 10(13): 1903106.
- [18] JIN B, LIANG Z, MING Y, et al. Silk fibroin induced homeotropic alignment of perovskite crystals toward high efficiency and stability[J]. *Nano Energy*, 2022, 94: 3966925.
- [19] SHAO M, BIE T, YANG Y P, et al. Over 21% efficiency stable 2D perovskite solar cells[J]. *Advanced*

- Material, 2022, 34(1): 2107211.
- [20] JI J, LI Y Y, WEI D, et al. Photo-induced degradation of lead halide perovskite solar cells caused by the hole transport layer/metal electrode interface[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(5): 1991-1998.
- [21] LI H, JIANG H, WEI Q, et al. Low-dimensional inorganic tin perovskite solar cells prepared by templated growth[J]. Angewandte Chemie, 2021, 60(30): 16330-16336.
- [22] JIA E, WEI D, CUI P, et al. Efficiency enhancement with the ferroelectric coupling effect using P(VDF-TrFE) in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ solar cells[J]. Advanced Science, 2019, 6(16): 1900252.
- [23] WEI D, SONG D D, JI J, et al. A TiO_2 embedded structure for perovskite solar cells with anomalous grain growth and effective electron extraction[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(4): 1406-1414.
- [24] CUI P, WEI D, JI J, et al. Highly efficient electron-selective layer free perovskite solar cells by constructing effective p-n heterojunction[J]. Solar RRL, 2017, 1(2): 1600027.
- [25] CUI P, WEI D, JI J, et al. Planar p-n homojunction perovskite solar cells with efficiency exceeding 21.3% [J]. Nature Energy, 2019, 4(2): 150-159.
- [26] SONG D, CUI P, WANG T, et al. Managing carrier lifetime and doping property of lead halide perovskite by postannealing processes for highly efficient perovskite solar cells[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2015, 119(40): 22812-22819.
- [27] HUANG H, YAN H, DUAN M, et al. TiO_2 surface oxygen vacancy passivation towards mitigated interfacial lattice distortion and efficient perovskite solar cell[J]. Applied Surface Science, 2021, 544: 148583.
- [28] MIN H, LEE D Y, KIM J, et al. Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO_2 electrodes[J]. Nature, 2021, 598(7881): 444-450.
- [29] LUO C, ZHENG G, GAO F, et al. Facet orientation tailoring via 2D-seed-induced growth enables highly efficient and stable perovskite solar cells[J]. Joule, 2022, 6(1): 240-257.
- [30] LI J L, QI W J, LI Y M, et al. UV light absorbers executing synergistic effects of passivating defects and improving photostability for efficient perovskite photovoltaics[J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 67: 138-146.
- [31] MA S, YUAN G Z, ZHANG Y, et al. Development of encapsulation strategies towards the commercialization of perovskite solar cells[J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(1): 13-55.
- [32] SONG D D, JI J, LI Y Y, et al. Degradation of organometallic perovskite solar cells induced by trap states[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(9): 093901.1-093901.5.
- [33] JANG Y W, LEE S M, YEOM K M, et al. Intact 2D/3D halide junction perovskite solar cells via solid-phase in-plane growth[J]. Nature Energy, 2021, 6(1): 63-71.
- [34] WU H, XU C, ZHANG Z, et al. Omnibearing interpretation of external ions passivated ion migration in mixed halide perovskites[J]. Nano Lett, 2022, 22(4): 1467-1474.
- [35] DOHERTY T A S, NAGANE S, KUBICKI D J, et al. Stabilized tilted-octahedra halide perovskites inhibit local formation of performance-limiting phases[J]. Science, 2021, 374(6575): 1598-1605.
- [36] CHEN S, ZHANG Y, ZHANG X, et al. General decomposition pathway of organic-inorganic hybrid perovskites through an intermediate superstructure and its suppression mechanism[J]. Advanced Materials, 2020, 32(29): 2001107.
- [37] WEI D D, HUANG H, CUI P, et al. Moisture-tolerant supermolecule for the stability enhancement of organic-inorganic perovskite solar cells in ambient air [J]. Nanoscale, 2019, 11(3): 1228-1235.
- [38] ZHANG F, PARK S Y, YAO C, et al. Metastable dion-jacobson 2D structure enables efficient and stable perovskite solar cells[J]. Science, 2022, 375(6576): 71-76.
- [39] MENG W, ZHANG K, OSVET A, et al. Revealing the strain-associated physical mechanisms impacting the performance and stability of perovskite solar cells[J]. Joule, 2022, 6(2): 458-475.
- [40] CHEN W, ZHU Y, XIU J, et al. Monolithic perovskite/organic tandem solar cells with 23.6% efficiency enabled by reduced voltage losses and optimized interconnecting layer[J]. Nature Energy, 2022, 6(2): 458-475.
- [41] MA S, BAI Y, LI Y J, et al. 1 000 h operational lifetime perovskite solar cells by ambient melting encapsulation[J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(9): 1902472.1-1902472.8.
- [42] WEI D, MA F S, WANG R, et al. Ion-migration inhibition by the cation- π interaction in perovskite materials for efficient and stable perovskite solar cells [J]. Advanced Materials, 2018, 30(31): 1707583.
- [43] JI J, LIU X, JIANG H, et al. Two-stage ultraviolet degradation of perovskite solar cells induced by the Oxygen

- vacancy-Ti(4+) states[J]. *iScience*, 2020, 23(4): 101013.
- [44] KROGSTROP P, JØRGENSEN H I, HEISS M, et al. Single-nanowire solar cells beyond the Shockley-Queisser limit[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 306-310.
- [45] GUTSCHE C, LYSOC A, BRAAM D, et al. n-GaAs/InGaP/p-GaAs core-multishell nanowire diodes for efficient light-to-current conversion[J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(5): 929-936.
- [46] TIAN B, ZHENG C, KEMPA T J, et al. Coaxial silicon nanowires as solar cells and nanoelectronic power sources [J]. *Nature*, 2007, 449(7164): 885-889.
- [47] LI Y F, LI M C, LI R K, et al. Linear length-dependent light-harvesting ability of silicon nanowire[J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 6-9.
- [48] LI Y F, LI M C, LI R K, et al. Exact comprehensive equations for the photon management properties of silicon nanowire[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24847.
- [49] TONG J, ZHANG M H, ZHANG S H, et al. Effects of the ambient medium and structure parameter on the optical properties of tapered silicon nanowire[J]. *Optics Communications*, 2020, 454: 124515.
- [50] LI Y F, LIU W Q, LUO Y N, et al. Oxidation of silicon nanowire can transport much more light into silicon substrate[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): A19-A29.
- [51] LI Y F, LI M C, FU P F, et al. A comparison of light-harvesting performance of silicon nanocones and nanowires for radial-junction solar cells[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11532.
- [52] GAO Z, LIN Z, SANG N A, et al. Excellent light-capture capability of trilobal SiNW for ultra-high JSC in single-nanowire solar cells[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 995-1001.
- [53] LI Y F, LUO Y N, LIU W J, et al. Specific distribution of the light captured by silver nanowire[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9225-9231.
- [54] LI Y F, LUO Y, LUO Y N, et al. Light harvesting of silicon nanostructure for solar cells application[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): A1075-A1082.
- [55] LI Y F, LI M C, SONG D D, et al. Broadband light-concentration with near-surface distribution by silver capped silicon nanowire for high-performance solar cells [J]. *Nano Energy*, 2015, 11: 756-764.
- [56] SPUIGEON J M, BOETTCHER S W, KELZENBERG M D, et al. Flexible, polymer-supported, Si wire array photoelectrodes[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(30): 3277-3281.
- [57] KIM J H, KANG S B, YU H H, et al. Augmentation of absorption channels induced by wave-chaos effects in free-standing nanowire arrays[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23569-23583.
- [58] KANG S B, KIM J H, JEONG M H, et al. Stretchable and colorless freestanding microwire arrays for transparent solar cells with flexibility[J]. *Light Science & Applications*, 2019, 8(1): 121-135.
- [59] GAO Z L, GAO T, CHEN Y C, et al. Silicon nanowire design for ultrahigh extinction by dipole near-field interaction in transparent solar cells[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(7): 3781-3792.
- [60] GAO Z L, GENG Q, WANG Z, et al. Helical SiNW design with a dual-peak response for broadband scattering in translucent solar cells[J]. *Materials Advances*, 2022, 3(2): 953-961.
- [61] YOON S S, KHANG D Y. High efficiency (>17%) Si-organic hybrid solar cells by simultaneous structural, electrical, and interfacial engineering via low-temperature processes[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(9): 1702655.1-1702655.8.
- [62] JIAN H, GAO P Q, YANG Z H, et al. Silicon/organic hybrid solar cells with 16.2% efficiency and improved stability by formation of conformal heterojunction coating and moisture-resistant capping layer[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(15): 1606321.
- [63] GENG Q, WANG Z, GAO Z L, et al. Phase separation to improve the conductivity and work function of the PEDOT: PSS solution for silicon hybrid solar cells[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(48): 26379-26388.
- [64] GAO T, GENG Q, GAO Z L, et al. Improving junction quality via modifying the Si surface to enhance the performance of PEDOT: PSS/Si hybrid solar cells[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2021, 4(11): 12543-12551.
- [65] CHEN L, GAO Z L, ZHENG Y P, et al. 14.1% efficiency hybrid planar-Si/organic heterojunction solar cells with SnO₂ insertion layer[J]. *Solar Energy*, 2018, 174: 549-555.
- [66] GAO Z L, GAO T, GENG Q, et al. Improving light absorption of active layer by adjusting PEDOT: PSS film for high efficiency Si-based hybrid solar cells[J]. *Solar Energy*, 2021, 228: 299-307.
- [67] GAO Z L, LIN G L, CHEN Y C, et al. Moth-eye nanostructure PDMS films for reducing reflection and retaining flexibility in ultra-thin c-Si solar cells[J]. *Solar Energy*, 2020, 205: 275-281.
- [68] DING W J, BAUER T. Progress in research and

- development of molten chloride salt technology for next generation concentrated solar power plants[J]. *Engineering*, 2021, 7(3): 334-347.
- [69] 孙峰, 毕文剑, 周楷, 等. 太阳能热利用技术分析 with 前景展望[J]. *太阳能*, 2021(7): 23-36.
SUN F, BI W J, ZHOU K, et al. Technology analysis and prospects of solar thermal utilization[J]. *Solar Energy*, 2021(7): 23-36.
- [70] 徐立, 孙飞虎, 李钧, 等. 流量对抛物面槽式太阳能集热器传热特性影响的实验分析[J]. *发电技术*, 2021, 42(6): 665-672.
XU L, SUN F H, LI J, et al. Experimental analysis of the influence of flow rate on heat transfer characteristics of parabolic trough solar collector[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(6): 665-672.
- [71] XU X, VIGNAROUBAN K, XU B, et al. Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1106-1131.
- [72] 罗智慧, 龙新峰. 槽式太阳能热发电技术研究现状与发展[J]. *电力设备*, 2006, 7(11): 29-32.
LUO Z H, LONG X F. State and trend of solar parabolic trough power generation technology[J]. *Electrical Equipment*, 2006, 7(11): 29-32.
- [73] PAVLOVIĆ T M, RADONJIĆ I S, MILOSAVLJEVIĆ D D, et al. A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3891-3902.
- [74] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟. 2021 中国太阳能热发电行业蓝皮书[R]. 北京: 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟, 2022.
China Solar Thermal Alliance. 2021 China solar thermal power industry blue book[R]. Beijing: China Solar Thermal Alliance, 2022.
- [75] 胡永生. 太阳能与燃煤机组互补电站热力特性与集成机理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
HU Y S. Study on thermal performance and integrated mechanism of solar-aided coal fired power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [76] TURCHI C, MA Z, NEISES T, et al. Thermodynamic study of advanced supercritical carbon dioxide power cycles for concentrating solar power systems[J]. *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of the Asme*, 2013, 135: 041007.
- [77] PADILLA R V, SOO T Y C, BENITO R, et al. Exergetic analysis of supercritical CO₂ Brayton cycles integrated with solar central receivers[J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 348-65.
- [78] YING Y, HU E. Thermodynamic advantage of using solar energy in the conventional power station[J]. *Applied Thermal Engineering*, 1999, 19(11): 1173-1177.
- [79] HU E. Solar thermal aided power generation[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(9): 2881-2885.
- [80] ZHAI R R, PENG P, YANG Y P, et al. Optimization study of integration strategies in solar aided coal-fired power generation system[J]. *Renewable Energy*, 2014, 68: 80-86.
- [81] ZHU Y, ZHAI R R, ZHAO M M, et al. Evaluation methods of solar contribution in solar aided coal-fired power generation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 102: 209-216.
- [82] ZHAI R R, LIU H T, LI C, et al. Analysis of a solar-aided coal-fired power generation system based on thermo-economic structural theory[J]. *Energy*, 2016, 102: 375-387.
- [83] LI C, ZHAI R R, YANG Y P, et al. Thermal performance of different integration schemes for a solar tower aided coal-fired power system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 1237-1245.
- [84] LI C, ZHAI R R, YANG Y P, et al. Annual performance analysis and optimization of a solar tower aided coal-fired power plant[J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 440-456.
- [85] LIU H T, ZHAI R R, PATCHIGOLLA K, et al. Performance analysis of a novel combined solar trough and tower aided coal-fired power generation system[J]. *Energy*, 2020, 201: 117597.
- [86] ZHANG H, WANG N, LIANG K, et al. Research on the performance of solar aided power generation system based on annular fresnel solar concentrator[J]. *Energies*, 2021, 6(14): 1579.
- [87] 冯蕾. 光-煤互补复合发电系统优化设计及其热力学性能分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
FENG L. Analysis on optimization design and thermodynamic performance of solar aided power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [88] 党怡天. 我国被动式太阳能采暖技术的应用现状及发展前景[J]. *河南科技*, 2021, 40(7): 119-121.
DANG Y T. Application status and development prospect of passive solar heating technology in China[J]. *Journal of Henan Science and Technology*, 2021, 40(7): 119-121.
- [89] 龙激波, 阿勇嘎, 王泉, 等. 光热建筑一体化 Trombe 墙体系统传热性能[J]. *土木建筑与环境工程*,

- 2018, 40(1): 141-148.
- LONG J B, A Y G, WANG Q, et al. Heat transfer performance of a photo-thermal trombe wall system integrated with building[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(1): 141-148.
- [90] 郭泉, 邱云峰, 史志国, 等. 储热型太阳能供暖系统热输送全过程特性研究[J]. *化工学报*, 2021, 72(10): 5384-5395.
- GUO X, QIU Y F, SHI Z G, et al. Study on whole process characteristic of heat transfer in solar heating system with heat storage[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(10): 5384-5395.
- [91] 李楠, 田昕, 王皆腾, 等. 北京某农村住宅空气源热泵辅助太阳能供暖系统的运行性能[J]. *暖通空调*, 2017, 47(4): 136-140.
- LI N, TIAN X, WANG J T, et al. Operation performance of air-source heat pump assisted solar heating system in Beijing rural residence[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(4): 136-140.
- [92] 程友良, 刘萌, 刘志东, 等. 平板型集热器驱动的小型太阳能吸收式制冷系统运行分析与优化研究[J]. *可再生能源*, 2021, 39(8): 1023-1029.
- CHENG Y L, LIU M, LIU Z D, et al. Operation analysis and optimization study of a small absorption refrigeration system driven by flat plate collector[J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(8): 1023-1029.
- [93] 王树成, 付忠广, 张天清, 等. 太阳能吸收式制冷系统动态特性分析[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(1): 66-71.
- WANG S C, FU Z G, ZHANG T Q, et al. Dynamic analysis of solar powered absorption refrigeration system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(1): 66-71.
- [94] 叶鸿烈, 杨军伟, 王飞, 等. 聚光直热式加湿除湿型太阳能海水淡化装置性能测试与经济性分析[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(2): 505-512.
- YE H L, YANG J W, WANG F, et al. Performance study of a humidified-dehumidified solar water desalination device with light concentration and direct heating[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(2): 505-512.
- [95] 薛喜东, 张丹, 李露, 等. 太阳能空气隙膜蒸馏海水淡化的试验[J]. *净水技术*, 2018, 37(9): 113-119.
- XUE X D, ZHANG D, LI L, et al. Experiment of air gap membrane distillation (AGMD) by solar energy for seawater desalination[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(9): 113-119.
- [96] 马明瑞, 李明, 李国良, 等. 低截取比CPC空气集热器及其性能试验研究[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(1): 5-9.
- MA M R, LI M, LI G L, et al. Low intercept ratio CPC air collector and its experimental research[J]. *Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2021, 41(1): 5-9.
- [97] BERGENE T, LOVVIK O M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells [J]. *Solar Energy*, 1995, 55: 453-462.
- [98] 张哲昉, 巨星, 潘信宇, 等. 太阳能光伏-光热复合发电技术及其商业化应用[J]. *发电技术*, 2020, 41(3): 220-230.
- ZHANG Z Y, JU X, PAN X Y, et al. Photovoltaic/concentrated solar power hybrid technology and its commercial application[J]. *Power Generation Technology*, 2020, 41(3): 220-230.
- [99] KALOGIROU S A, TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47: 3368-3382.
- [100] CHOW T T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology[J]. *Applied Energy*, 2010, 87: 365-379.
- [101] JIA Y T, GURUPRASAD A, FANG G Y. Development and applications of photovoltaic-thermal systems: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 102: 249-265.
- [102] PRAKASH J. Transient analysis of a photovoltaic/thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water[J]. *Energy Conversion and Management*, 1994, 35: 967-972.
- [103] PEI G, ZHANG T, FU H D, et al. An experimental study on a novel heat pipe-type photovoltaic/thermal system with and without glass cover[J]. *International Journal of Green Energy*, 2012, 10(1): 72-89.
- [104] FU H D, PEI G, ZHANG T, et al. Experimental study on a heat pipe PV/T system[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2012, 6(3): 129-136.
- [105] PEI G, FU H D, ZHU H J, et al. Performance study and parametric analysis of a novel heat pipe PV/T system[J]. *Energy*, 2012, 37: 384-395.
- [106] PEI G, FU H D, ZHANG T, et al. A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system[J]. *Solar Energy*, 2011, 85: 911-921.
- [107] ZHANG T, YAN Z W, XIAO L, et al. Experimental study and design sensitivity analysis of a heat pipe photovoltaic/thermal system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114318.
- [108] PEI G, FU H D, JI J, et al. Annual analysis of heat pipe PV/T systems for domestic hot water and electricity production[J]. *Energy Conversion and*

- Management, 2012, 56: 8-21.
- [109] ZHANG T, CAI J Y, ZHENG W J, et al. Comparative and sensitive analysis of the annual performance between the conventional and the heat pipe PV/T systems[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 28: 101380.
- [110] ZHANG T, ZHENG W J, WANG L Y, et al. Experimental study and numerical validation on the effect of inclination angle to the thermal performance of solar heat pipe photovoltaic/thermal system[J]. *Energy*, 2021, 223: 120020.
- [111] PEI G, ZHANG T, YU Z, et al. Comparative study of a novel heat pipe photovoltaic/thermal collector and a water thermosiphon photovoltaic/thermal collector[J]. *PIME-Part A: Journal of Power and Energy*, 2011, 225(3): 271-278.
- [112] 张涛, 朱群志, 张苏阳, 等. 环形重力热管式PV/T系统与常规PV/T系统的对比实验研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(12): 3251-3258.
- ZHANG T, ZHU Q Z, ZHANG S Y, et al. Comparative experimental study of loop thermosiphon pv/t system and common PV/T system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(12): 3251-3258.
- [113] ZHANG T, PEI G, ZHU Q Z, et al. Investigation on the optimum volume-filling ratio of a loop thermosiphon solar water-heating system[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2016, 138(4): 041006.
- [114] ZHANG T, YAN Z W, PEI G, et al. Experimental optimization on the volume-filling ratio of a loop thermosiphon photovoltaic/thermal system[J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 233-242.
- [115] JI J, PEI G, CHOW T T, et al. Performance of multi-functional domestic heat-pump system[J]. *Applied Energy*, 2005, 80: 307-326.
- [116] GAO Y, JI J, HAN K, et al. Experimental and numerical study of a PV/T direct-driven refrigeration/heating system[J]. *Energy*, 2021, 230: 120793.
- [117] GAO Y, JI J, HAN K, et al. Comparative analysis on performance of PV direct-driven refrigeration system under two control methods[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 127: 21-33.
- [118] CAI J, JI J, WANG Y, et al. A novel PV/T-air dual source heat pump water heater system: dynamic simulation and performance characterization[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148: 635-645.
- [119] ZHANG F, CAI J, JI J, et al. Experimental investigation on the heating and cooling performance of a solar air composite heat source heat pump[J]. *Renewable Energy*, 2020, 161: 221-229.
- [120] CAI J, ZHOU H, XU L, et al. Experimental and numerical investigation on the heating performance of a novel multi-functional heat pump system with solar-air composite heat source[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 73: 103118.
- [121] CAI J, ZHOU H, XU L, et al. Energy and exergy analysis of a novel solar-air composite source multi-functional heat pump[J]. *Renewable Energy*, 2022, 185: 32-46.
- [122] FU Z, LIANG X, LI Y, et al. Performance improvement of a PVT system using a multilayer structural heat exchanger with PCMs[J]. *Renewable Energy*, 2021, 169: 308-317.
- [123] SHAN F, TANG F, CAO L, et al. Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors with different configurations[J]. *Energy Conversion & Management*, 2014, 87: 778-786.
- [124] FU Z, LI Y, LIANG X, et al. Experimental investigation on the enhanced performance of a solar PVT system using micro-encapsulated PCMs[J]. *Energy*, 2021, 228: 120509.
- [125] QIU Z Z, MA X L, ZHAO X D, et al. Experimental investigation of the energy performance of a novel micro-encapsulated phase change material (MPCM) slurry based PV/T system[J]. *Applied Energy* 2016, 165: 260-271.
- [126] 毕凯, 宋明中, 林玉杰, 等. 光伏建筑一体化技术及应用[J]. *中国科技信息*, 2021(11): 41-42.
- BI K, SONG M Z, LIN Y J, et al. Photovoltaic building integration technology and application[J]. *China Science and Technology Information*, 2021(11): 41-42.
- [127] VENKATARAMAN D, YURT S, VENKATRAMAN B H, et al. Role of molecular architecture in organic photovoltaic cells[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2010, 1(6): 947-958.
- [128] KIM J Y, KIM S H, LEE H H, et al. New architecture for high-efficiency polymer photovoltaic cells using solution-based titanium oxide as an optical spacer[J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(5): 572-576.
- [129] 胡福年, 徐伟成, 陈军. 计及电动汽车充电负荷的风电-光伏-光热联合系统协调调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(13): 10-20.
- HU F N, XU W C, CHEN J. Coordinated scheduling of wind power photovoltaic solar thermal combined system considering electric vehicle charging load[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(13): 10-20.

收稿日期: 2022-03-07。

作者简介:



李英峰

李英峰(1982), 男, 博士, 副教授, 主要从事太阳能电池器件设计与制备, 太阳能电池光管理、电管理和热管理, 太阳能电池增效, 太阳能电池界面工程的研究, liyingfeng@ncepu.edu.cn;



张涛

张涛(1986), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为太阳能光电光热综合利用、传热传质、余热利用及建筑节能, taozhang@shiep.edu.cn;



张衡

张衡(1991), 男, 博士, 副教授, 主要从事太阳能光热以及太阳能光伏光热综合利用方面的研究, zhangchongheng@ncepu.edu.cn;



崔鹏

崔鹏(1991), 男, 博士, 讲师, 主要从事新型太阳能电池设计与制备、高效钙钛矿同质结太阳能电池的研究, cuipeng@ncepu.edu.cn;



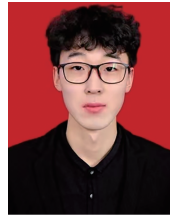
付在国

付在国(1983), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程热物理领域复杂流体传热传质等方面的基础理论及应用研究, fuzhaiguo@shiep.edu.cn;



高中亮

高中亮(1993), 男, 博士研究生, 主要从事新能源材料与器件, 新型硅基太阳能电池发电技术的研究, zhlgao@ncepu.edu.cn;



耿奇

耿奇(1998), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源材料与器件的研究, Gengqi@ncepu.edu.cn;



柳志晗

柳志晗(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏组件多物理场耦合模拟计算, Lzh202298@163.com;



朱群志

朱群志(1972), 男, 博士, 教授, 研究方向为太阳能热利用、分布式能源系统、工业节能技术等, zhuqunzhi@shiep.edu.cn;



李和兴

李和兴(1963), 男, 博士, 教授, 研究方向为光催化环境污染治理和清洁能源生产, hexing-li@shnu.edu.cn;



李美成

李美成(1973), 男, 博士, 教授, 主要从事太阳能与储能技术方面的研究, 本文通信作者, mcli@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)