

太阳能光伏/光热技术研究现状与发展趋势综述

肖瑶, 钮文泽, 魏高升*, 崔柳, 杜小泽

(电站能量传递转化与系统教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Review on Research Status and Developing Tendency of Solar Photovoltaic/Thermal Technology

XIAO Yao, NIU Wenze, WEI Gaosheng*, CUI Liu, DU Xiaozhe

(Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System of Ministry of Education (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 太阳能光伏/光热(photovoltaic/thermal, PV/T)技术是光伏组件和太阳能集热器的集成,可同时发电和提供热能,在提高系统整体效率的同时提高了空间利用率。在总结和归纳光伏/光热技术的类型及相关理论研究的基础上,重点针对平板型光伏/光热系统的热损失和光伏板超温问题的改善设计研究开展综述分析,同时系统总结了集成相变储热材料的光伏/光热系统的研究现状,并对当前研究中存在的不足和未来发展趋势进行了展望,以期对PV/T系统的进一步发展提供理论参考。

关键词: 太阳能; 光伏发电; 光热发电; 热性能; 电性能; 相变储热

ABSTRACT: Solar photovoltaic/thermal (PV/T) technology is the integration of PV modules and solar collectors, which can simultaneously generate electricity and provide thermal energy. The overall efficiency and the space utilization efficiency will be improved simultaneously by the combination of two modules. The types of PV/T technology and related theoretical researches were summarized firstly in this review. By focusing on the heat loss and overtemperature problem of flat-panel PV/T technology, the design progress has been reviewed and analyzed. The state-of-art study on integration of phase change materials with PV/T (PV/T-PCM) technology was comprehensively summarized. The deficiencies in the research and the future development tendency were also prospected in order to provide theoretical guidance for further development of PV/T systems.

KEY WORDS: solar energy; photovoltaic power generation; photothermal power generation; thermal performance;

electrical performance; phase change thermal energy storage

0 引言

随着人口的增长和人民生活水平的不断提高,人类对化石能源的需求不断增加,导致污染加剧,阻碍了经济的可持续健康发展。研究人员一直致力于开发可再生能源来改变能源结构并缓解能源快速消耗的压力,太阳能是最常见的可再生能源之一,因其资源丰富和环境友好,在过去几十年间备受关注。目前,对太阳能的利用主要包括以产热为目的的光热技术,以发电为目的的光伏发电、光热发电以及光化学转化等。光伏发电是太阳能利用的主要方式之一^[1-2],但是当前落在光伏电池上的太阳辐射通常仅有20%左右可以转化为电能,而更多的太阳辐射则转化为热能,致使电池组件温度升高,光电转化效率下降^[3],甚至导致光伏面板的过热损坏,同时为保证更高的热效率,太阳能集热器需要消耗电能,因此太阳能光伏/光热(photovoltaic/thermal, PV/T)技术应运而生。光伏模块和太阳能热组件的结合不仅提高了整体性能,还使制造成本下降、空间利用率增加。荷兰能源研究中心的计算结果表明,PV/T系统可以在减少40%集热器面积的基础上,产生与独立光伏和光热联合系统相同数量的能量^[4]。

在这一领域, Joshi等^[5]回顾了过去十年间不同类型PV/T集热器的实验研究,并深入总结了聚光型光伏光热(concentrated photovoltaic/thermal,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52176069)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52176069).

CPV/T)系统中液体光谱过滤器的最新技术; Jia等^[9]综述了不同环境条件下使用不同工作流体的平板型和聚光型PV/T系统的研究, 并对PV/T集热器的应用进行了归纳总结; Kumar等^[7]对印度PV/T技术的研究发展进行了综述; Daghigh等^[8]对21世纪初基于液体式PV/T集热器的研究进行了综述, 并指出水冷和制冷剂冷却的混合光伏光热系统是未来发展趋势。

如上所述, 近些年已经报道了很多针对PV/T系统及其应用的研究, 但光伏/光热一体化技术发展迅速, 并且目前的PV/T技术研究仍存在很多不足, 因此近年来不断有研究人员对PV/T系统进行改进。本文归纳总结了近年来出现的新型PV/T系统设计以及研究中存在的不足, 以期对PV/T技术的进一步发展提供指导。

1 PV/T系统的种类与特点

一个典型的PV/T模块^[9]如图1所示, 主要组件包括玻璃盖板、光伏电池组件、吸热板、隔热层以及冷却通道。工作时太阳辐射经PV电池板产生电能和热能, 吸热板吸收热能后通过冷却介质将热能带走, 并将这部分热能提供给空间供暖或热水等应用。

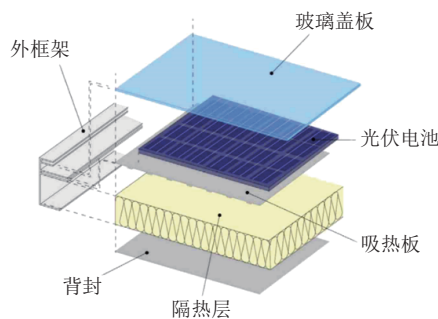


图1 PV/T模块的典型配置

Fig. 1 Typical configuration of PV/T module

PV/T集热器通常根据是否聚光和系统采用的冷却工质进行分类。根据系统是否聚光, PV/T集热器可分为平板型和聚光型两大类; PV/T模块按冷却工质可分为空气式、液体式和双流体式集热器。

平板型集热器能够有效利用散射辐射和直接辐射, 并且不需要聚光和追踪系统, 具有成本低、

结构简单、安装便利等优点, 几乎不需要维护, 因此广泛出现在PV/T集热器的研究和实际应用中^[10-11]。Das^[12]总结了平板型PV/T集热器的历史发展, 并强调了通过使用纳米流体和相变材料(phase change material, PCM)对PV/T系统进行热管理的重要性。但是传统的平板型PV/T系统接收的太阳辐照强度较低, 使系统性能和经济性都相对较差。CPV/T系统利用聚光器进行聚光, 从而提高光伏电池接收的太阳辐照强度, 在提高光电转换效率和输出功率的同时减少了光伏组件的数量和面积, 降低了系统成本并减少了热损耗^[13]。图2为典型聚光型PV/T系统示意图^[7]。聚光型系统比平板型系统更加注重系统冷却技术。Gharzi等^[14]总结了目前对于CPV模块的常见冷却技术, 包括利用模块背面的自然对流、蒸发等被动冷却, 利用外部能源进行强制循环的主动冷却, 以及集被动和主动于一体的组合冷却方式, 强调了使用纳米技术强化CPV模块的冷却性能和热利用的重要性。

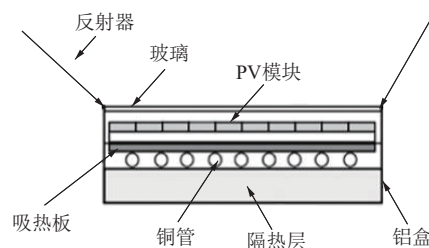


图2 典型聚光型PV/T集热器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a typical concentrating PV/T collector

基于空气或液体冷却的典型PV/T模块^[15]如图3所示, 在空气冷却式PV/T模块中, 气流通道介于吸热板和PV面板之间, 夹层中的空气通过自然对流或风扇等产生强制流动来冷却光伏板; 在基于液体冷却的PV/T模块中, 吸热板通常被粘在PV面板背面, 同时在吸热板的背面焊接管道以吸收和传输热量。

Abd El-Hamid等^[16]对4种具有不同冷却通道和玻璃配置下的空冷式PV/T集热器进行了数值研究, 根据研究结果显示, 双通道单玻璃配置下的集热器具有最高的热效率和电效率。在液体冷却式集热器中, 水因其热容量大且成本低, 是最常

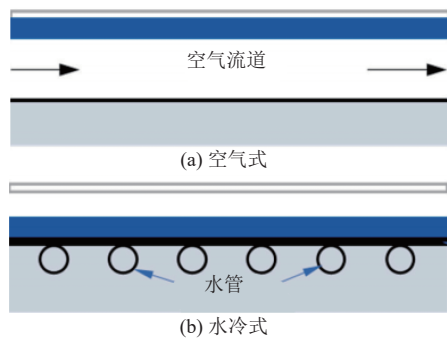


图3 空气式和水冷式PV/T的典型示意图

Fig. 3 Typical schematic diagram of air type PV/T and water-cooled PV/T

见的冷却工质，Abdul-Ganiyu等^[17]设计了一种基于单晶硅的水冷式PV/T集热器，系统相较于传统PV模块表现出更好的性能。纳米流体因其高导热性和高热容量近年来在冷却PV/T面板方面备受关注，如Venkatesh等^[18]将水基石墨烯纳米流体作为PV/T传热介质，研究光伏面板温度和系统性能的变化，结果表明石墨烯纳米流体显著降低了PV面板温度并提高了光电效率和整体效率。目前，研究人员仍在进行大量理论、实验研究，对纳米流体技术进行开发^[19]。基于制冷剂冷却的PV/T集热器通常与热泵蒸发器以直接膨胀的方式集成在一起，通过制冷剂在蒸发过程中的相变冷却光伏组件，但因其生产成本和设计的复杂性难以大规模使用。Chowdhury等^[20]总结了基于空气、水、纳米流体冷却的PV/T系统的研究进展，指出基于空气、水、纳米流体的PV/T系统将在未来的可再生能源技术中作出巨大贡献。

2 PV/T系统的理论研究

为进一步分析系统运行特性，大量研究人员对PV/T组件进行了数值研究，主要是通过建立数学模型并进行模拟研究，分析运行参数、操作参数等不同因素对系统的影响，以期对PV/T系统的实验研究提供理论指导^[21-22]。

Mahdi等^[23]对水冷式复合抛物面聚光型光伏光热(compound parabolic concentrated photovoltaic/thermal, CPC-PV/T)系统建立了详细的热模型和电模型，为了更准确地分析系统性能，研究采用含有5个参数的电模型，包括短路电流、开路电

压、最大功率点电压和最大功率点电流；另外还研究了不同影响因素对系统效率的影响，结果显示，进水温度的增加使系统热效率、电效率和整体效率均下降，因此需要在入口处持续检查进水温度。闫素英等^[24]分析研究了太阳直射辐照度、冷却水流速和入射角对菲涅尔聚光PV/T系统热、电性能的影响，结果显示，系统的热效率和电效率随冷却水流速先增大后减小，其中热效率的最大值随太阳直射辐照度的增大而增大，电效率的最大值则基本不受太阳直射辐照度的影响，入射角的增大不利于系统热效率和整体效率下降，为保证系统高效率运行，应使太阳能入射角在 0.3° 以内。

Xie等^[25]设计了一种消除多反射(eliminating multiple reflections, EMR)的CPC型聚光器(EMR-CPC)，该新型聚光器具有良好的均匀性和光学效率，模拟结果表明，当太阳直射辐照度与总辐照度之比 ≥ 0.8 时，EMR的光学效率超过80%，其组装而成的低聚光PV/T系统的整体效率超过71%。在此基础上，该课题组通过分析能量传输方式，根据系统能量守恒和热平衡方程，对不同的太阳能跟踪方式下CPV/T系统建立热、电模型，分析系统全年的热、电性能^[26]，结果表明，采用双轴跟踪方式的CPV/T系统年热效率和电效率分别为40%和11.34%，高于单轴南北向和单轴东西向跟踪系统。此外，该课题组对单轴南北向跟踪太阳能CPV/T系统建立了稳态热模型和非稳态热模型^[27]，结果显示，非稳态热模型的日热效率为55.3%，更接近于实验测量值55.8%，稳态热模型相对而言不能精确预测系统日热效率的变化，这是因为单轴跟踪系统具有余弦效应。

3 PV/T系统的优化设计

尽管目前PV/T技术发展迅速，但系统仍存在诸多问题，如不必要的热损失、光伏电池板过热等，这些问题会导致系统热、电效率下降，因此近年来研究人员不断从开发新型系统结构和采用新型材料等多方面对系统进行改进设计。

3.1 减少系统不必要热损失的优化设计

热损失会造成PV/T系统效率下降，而对于水

基PV/T, 热量散失还意味着寒冷天气下水管冻裂的风险增加。PV/T系统的热损失主要包括玻璃盖板对环境的对流、辐射热损失和PV/T组件的反射热损失, 针对CPV/T系统还应考虑到聚光器反射和散射导致的热损失^[28]。高阳等^[29]建立了CPV/T系统热损失模型, 并计算分析了其稳态热性能, 结果表明, 玻璃盖板的热损失是导致系统热效率下降的主要原因, 占总能量的17.63%。

为了减少顶部热损失, 通常会采用添加特殊材质的玻璃盖板^[30]以及覆盖选择性吸收涂层^[31-32], 但前者对热损失的减小程度有限, 后者可通过降低长波发射率减少辐射损失, 但系统往往存在设计和制造上的困难, 因此研究人员提出了多种替代方案。如: Hu等^[33]提出了一种真空平板型PV/T集热器, 即将玻璃罩与吸收板之间的空气间隙以及吸收板与背部隔热层之间的空气夹层抽真空, 通过抑制导热和对流造成的热损失, 提高系统热性能, 结果显示在高温条件下(>80 °C), 系统整体效率可提高10%左右。Wu等^[34]提出了由二氧化硅气凝胶层涂覆光伏电池的新型PV/T系统, 将气凝胶填充至光伏组件和玻璃外壳之间的空隙中。气凝胶材料对太阳光高度透射, 但对红外辐射的透射率低, 因此可以降低光伏电池的辐射损耗, 此外, 二氧化硅气凝胶热导率相对较低, 进一步抑制了系统与外界的热传递, 系统性能明显提高。Li等^[35]采用真空双层玻璃替代单层玻璃, 以提高PV/T系统的耐热性和保温性, 实验结果显示, 新型系统的热效率提高了15.7%, 其完全冷却时间延迟了3.5 h, 但在温度升高和低透光率玻璃的负面作用影响下, 其电效率明显下降, 这是系统的主要缺点。因此, 该课题组将对温度不敏感的碲化镉(CdTe)薄膜太阳能电池用于PV/T集热器, 将CdTe电池板密封在2片玻璃之间, 防止被潮湿空气氧化腐蚀, 系统结构^[36]如图4所示。由于CdTe光伏组件具有较低的功率温度系数、较高的光电



图4 CdTe-PV/T集热器系统截面图

Fig. 4 Cross section of CdTe-PV/T collector system

转化系数, 以及结构简单、成本低等优势, 同时在弱光下也能保持良好性能, 因此它在工作温度条件下提高电效率方面具有巨大潜力。

3.2 光伏电池冷却的优化设计

光伏电池温度增加会造成光电效率下降, 甚至会导致系统整体性能和可靠性下降, 因此需要寻找合适的冷却技术来快速、均匀地降低光伏电池组件温度。如前文所述, 研究人员常常从改变冷却工质入手, 但目前这些技术仍存在缺陷与不足, 如使用纳米流体作为冷却工质, 常常存在团聚和不稳定等问题, 因此需要继续深入研究。另外还有优化管道设计、利用辐射冷却技术等冷却方式, 与相变材料(phase change material, PCM)集成形成混合系统, 是对PV面板进行热调节的另一种常见手段。此外, 基于光谱分束(spectrum splitting, SS)技术的CPV/T系统(SS-CPV/T), 可以将一部分太阳辐射直接用于光热组件生产热能, 从而避免对光伏电池进行不必要的加热, 因此对SS-CPV/T系统进行优化, 同样可以提高系统效率。

3.2.1 特殊冷却通道的设计

通过改进管道设计, 以增大传热面积或减小传热热阻为目标, 可以降低光伏组件温度并提高系统电效率。研究人员常通过改变管道形状来优化系统效率, 如Shen等^[37]基于速度和温度之间的场协同理论设计了鲨鱼背鳍型表面的管道, 其结构如图5所示, 当冷却工质通过管道时, 会产生与温度梯度达成一定角度的特殊速度场, 从而获得更好的传热性能。Kianifard等^[38]设计了一种带有蛇形半管道的水冷式PV/T集热器, 其结构如图6所示, 该系统中水和吸热板直接接触, 并使用特殊黏合剂将半管与吸热板黏合, 即去除了绝缘层、金属界面和管壁的热阻, 以更好地达到冷却的目的。另外, 在冷却管道中引入金属插件可以阻断管道中热边界层的发展, 并通过增强扰动来强化传热, 其优势在于安装简单、易于拆卸、成本低, 缺点在于插件的添加会使管道内压降增大、泵功增加。尽管如此, 使用插件仍被视为提高PV/T系统效率的可行方式。Maadi等^[39]将8叶锥形叶片插件用于PV/T组件中, 系统结构如图7所

示, 与普通PV/T组件相比, 光伏电池温度平均下降了4.6 K, 整体热损失降低了30.3%, 并且锥形叶插件对泵功率的影响可以忽略不计, 证明了在冷却管道中添加金属插件的可行性。

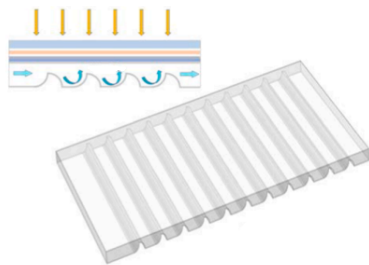


图5 鲨鱼背鳍型管道

Fig. 5 Shark dorsal fin pipeline

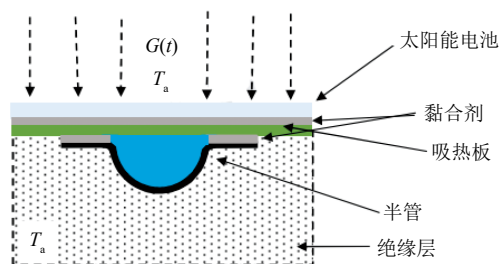


图6 PV/T系统的管道截面示意图

Fig. 6 Pipeline section diagram of PV/T system

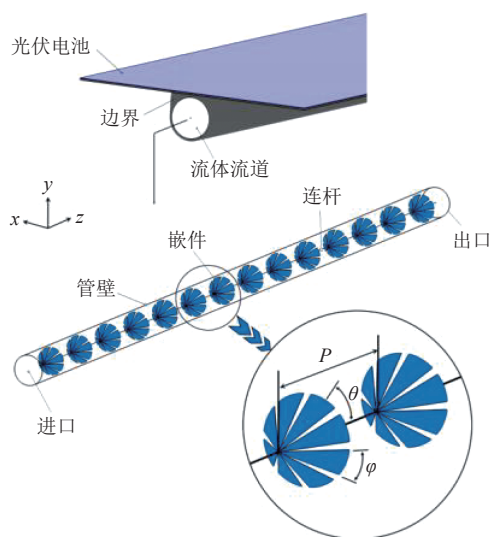


图7 基于锥形叶插件的管道示意图

Fig. 7 Schematic diagram of pipeline based on conical lobe insert

3.2.2 辐射冷却技术

辐射冷却技术是一种不消耗任何能量的被动冷却技术, 利用电磁波通过大气透过率高的大气窗口将地球上物体与低温太空进行辐射换热, 从

而降低物体表面的温度。PV/T辐射冷却系统是一种新型的冷热电联产装置, 可以在白天提供热能和电能, 夜晚提供冷却能量。通常, 由于玻璃盖板的存在会阻碍集热器与太空进行辐射换热, 因此研究人员往往会将PV/T集热器的玻璃盖板去除, 从而进行夜间冷却辐射, 如Zaite等^[40]选用了无釉水冷式PV/T系统, 将夜间辐射冷却技术与水冷技术相结合, 该系统设计可使光伏组件温度降低3~5℃。但是, 去除玻璃盖板的设计会造成PV/T集热器白天产生热损失, 从而降低整体效率, 因此有研究人员选用基于PE薄膜等红外透明罩的改良型PV/T集热器, 但系统热效率仍然较低, 并且这类红外透明罩存在不耐用性等问题。对此, Hu等^[41]对比研究了有盖和无盖平板型PV/T集热器的夜间辐射冷却性能, 结果表明: 若将PV/T系统的夜间辐射冷却看作是附加功能, 在不改变系统结构的前提下, 有盖PV/T集热器仍表现出一定的冷却性能, 其吸热板可以冷却至低于环境温度11℃, 同时在白天保持较高的热效率和电效率。

3.2.3 光谱分束技术的优化

对于SS-CPV/T系统, 可以通过选用合适的材料实现光谱分束, 防止CPV组件过热, 目前所采用的光谱过滤器主要包括半透明纳米流体^[42]、光学纳米薄膜^[43]或半透明光伏电池^[44]。使用纳米流体的SS-PV/T系统热输出效率通常高于使用纳米薄膜和半透明光伏电池作为光谱分束器的系统^[45], 对于这类系统的优化往往会从调整纳米流体的光学和热物理性质入手, 如Zhang等^[46]通过分别调整纳米流体(实验采用Ag/水纳米流体)的光学厚度和质量分数来达到优化效果。Huang等^[47]则制备了核壳结构的Ag@SiO₂纳米流体作为光谱分束器, 结果表明该系统的整体效率最高可以达到63.3%。此外, 还可以通过设计组合光谱过滤器达到优化系统的目的, 如Han等^[48]提出了将选择性吸收液体(丙二醇)和固体吸收滤光片(HB650)相结合, 作为组合光谱过滤器应用于基于线性菲涅尔反射器的CPV/T系统, 结果表明, 聚光器焦区PV组件宽度内的集中照明分布非常均匀, 并且系统热、电效率相对较高。

4 PV/T-PCM 系统

4.1 PV/T-PCM 的优势

太阳辐照具有时间和空间上的不匹配性，而上述 PV/T 系统的优化改进仅仅是从光伏面板中提取热能的角度考虑，没有考虑存储热能，因此一定程度上仍会导致系统整体效率下降。目前主要有 3 种储热技术：显热储热、潜热储热和热化学储热。Kandilli 等^[49]选用经石墨粉增强的多孔天然沸石板与 PV/T 集热器集成，通过显热形式存储热能，结果表明，随着石墨比例增加，天然沸石板的导热率上升，并且天然沸石的成本较低，因此它在 PV/T 系统中具有巨大的发展潜力。但在过去的研究中，研究人员往往会选择用相变材料对 PV 面板进行热控制。因为相变材料具有能量密度高、熔化潜热大等优点，在相变过程温度几乎不发生变化，相较于显热储热材料，相变材料的单位体积储热量高出了 5~14 倍。

将 PCM 与 PV/T 系统相结合是热能存储和回收策略相结合的技术产物，在控制 PV 板温度以提高其总体性能的同时，能将多余的热量以潜热的形式进行储存，当在夜间等其他太阳能不可用时段，可将存储的热能释放并加以利用，大大提升了系统效率。在 PV/T-PCM 系统中，理想的相变材料需具有合适的熔化温度、高热性能(潜热、热导率、比热)以及良好的化学和热稳定性，通常与 PV/T 集成的有机 PCM 的熔化温度在 14~60 °C，并且熔化温度应低于光伏温度，以便吸收更多的热量，相变潜热一般为 140~280 kJ/kg，导热系数为 0.19~0.24 W/(m·K)，比热为 1.7~2.9 kJ/(kg·K)。

4.2 PV/T-PCM 系统的典型配置

图 8 为 PCM 在空气式 PV/T 集热器中的典型配置^[7]，根据 PCM 层在空气流道的上方和下方可分成 2 种类型。而 PCM 与液体式 PV/T 模块的集成主要有 4 种混合设计模式^[50]，如图 9 所示。其中：模式 1 是 PCM 层位于冷却管道上方；模式 2 是 PCM 嵌入到冷却管道中；模式 3 是 PCM 嵌入到冷却管道中，并且冷却管道直接和吸热板接触；模式 4 加入了从容器壁突出到 PCM 的翅片，这样，吸热板的表面被扩展，从而改善了向相变材料的传热。

但这种设计的缺陷是系统重量因金属翅片的加入而增加，并且光伏板背面无翅片部分会出现温度不均匀分布。尽管如此，在 PCM 中插入金属翅片仍是对 PV/T-PCM 系统进行热管理的常见方式。

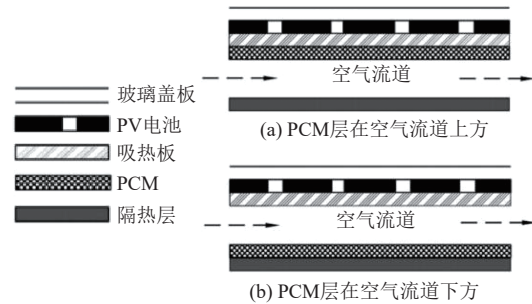


图 8 空气式 PV/T 模块中 PCM 的 2 种集成方法

Fig. 8 Two methods of PCM integration in air-based PV/T modules

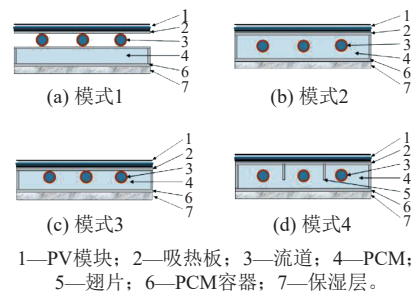


图 9 液体式 PV/T 模块中 PCM 的混合设计

Fig. 9 Hybrid design of PCM in liquid-based PV/T modules

4.3 PV/T-PCM 系统的优化设计

相较于无机相变材料，石蜡、脂肪酸等有机相变材料具有化学和热稳定性好、无过冷、无腐蚀性等优势，在 PV/T-PCM 系统中更有应用潜能，但有机相变材料导热系数低，当系统运行时热量无法被及时带走，可能会出现过热和相变材料温度分层问题，导致系统效率降低，目前主要通过优化系统结构、改变 PCM 层或封装 PCM 来增强 PV/T-PCM 系统的热传递。

4.3.1 改变系统结构

除在 PCM 层中加入金属翅片外，还可以通过改变管道布局增强热量传递，如 Hossain 等^[51]提出了一种基于两侧蛇形流道的 PV/T-PCM 系统，如图 10 所示，以使 PV 面板可以受到更均匀的冷却。Navakrishnan 等^[52]选用双流体式(水和空气冷却) PV/T 集热器，将水管以锯齿状排列，以最大限度

地从容器中传递热量，系统结构如图 11 所示。

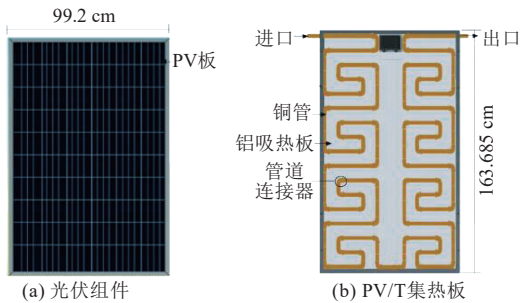


图 10 光伏组件及 PV/T 集热板布局

Fig. 10 Layout of PV module and PV/T thermal collector

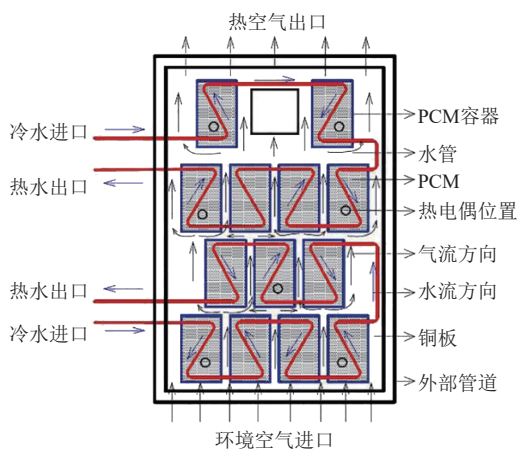


图 11 PCM 容器和水流路径的设计

Fig. 11 Design of PCM container and water flow path

4.3.2 集成复合相变材料的 PV/T 系统

在改变相变材料层方面，可以通过制备复合相变材料改进低热传导率的固有缺点。通过在相变材料中添加纳米颗粒提高其热导率和蓄热能力，是目前最常见的制备复合 PCM 的方式，常用的纳米颗粒包括金属及其氧化物、碳纳米管、石墨和石墨烯^[53-55]等。Sopian 等^[56]测试了 4 种不同形式 PV/T 集热器的性能，结果表明，相较于传统 PV 模块、水冷式 PV/T 和带 PCM 槽的水冷式 PV/T，基于纳米增强型 PCM 和纳米流体的 PV/T 集热器的热效率及产生的热能、电能最高，分别为 72%、14 kW 和 76.152 kW 左右。虽然纳米增强型 PCM 可以显著提高 PCM 的热导率及混合系统的整体效率，但掺入纳米颗粒通常会导致 PCM 熔化和凝固能力变差，因此必须控制 PCM 中纳米颗粒的负载量。此外，由于纳米颗粒的稳定性较差，导致系统在特定时期后的成本更高且效率下降，这是纳

米增强型相变材料的主要限制。

将相变材料与多孔载体复合形成形状稳定的相变材料，同样可以增强传热效果，并改善光伏组件的温度分布。目前在 PV/T 系统中常采用具有高导热性的金属泡沫材料，如 Asefi 等^[57]等利用泡沫铜、泡沫铝和膨胀石墨分别制备了多孔相变材料，并与纳米流体冷却结合，结果显示，当采用 90% 孔隙率的泡沫铜和质量分数 4% 的 Ag/水纳米流体的组合时，系统达到了最高的能量效率。

此外，使用导热填料的复合相变材料可以明显增强其导热系数，从而提高光伏组件的热效率和电效率。如 Azimi 等^[58]将蜂蜡、椰子油及其与石蜡的混合物 (PBWCO) 作为新型复合相变材料，同时对苯二甲酸粉 (TPA) 作为导热填料被添加到 PBWCO 中，以此提高相变材料的潜热值和热导率，用于光伏组件的热调节，结果显示，PBWCO 中加入 TPA 后，在降低 PV 板温度的同时增加了电效率和热效率。

4.3.3 集成封装 PCM 的 PV/T 系统

当 PCM 和 PV/T 模块集成时，考虑到相变材料相变过程中的体积变化，通常会采用柔性容器进行宏观封装^[59]，或将相变材料胶囊化并均匀分散到载体流体中，形成相变微胶囊悬浮液^[60]，通过抑制相变材料与外界接触以增强传热效率的同时，防止固液相变过程中发生泄漏问题。

5 PV/T 系统的应用

由于 PV/T 系统可以同时生产热能和电能，因此其应用广泛，在供暖、生活/工业热水等多个领域都具有巨大的发展潜力。通过将 PV/T 系统与其他技术耦合 (如热泵、海水淡化系统、干燥系统、制冷系统等)，可以明显提高系统性能、效率，减少能源消耗。

5.1 光伏光热建筑一体化

光伏光热建筑一体化 (building-integrated photovoltaic/thermal, BIPV/T) 是目前 PV/T 技术最常见的应用之一，即将 PV/T 集热器与建筑围护集成。随着生活水平的不断上升，住宅和商业建筑中对于热、电的需求以及相应的能源消耗也随之迅速增加，自 21 世纪以来，BIPV/T 因其在提高太

太阳能利用率和减少能源消耗方面的潜力而备受关注。BIPV/T 系统可以承担建筑围护的基础功能并充分利用建筑表面的太阳辐射,达到降低室内空调运行负荷并减少碳排放的目的。系统主要由 PV/T 组件、储热单元和建筑负载 3 部分组成,水和空气是 PV/T 组件中常用的传热流体,系统模型^[7]如图 12 所示。

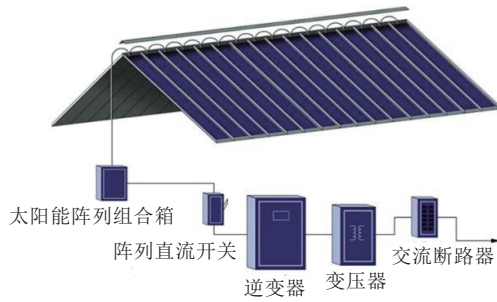


图 12 光伏光热建筑一体化系统模型
Fig. 12 BIPV/T system model

Shahsavari 等^[61]分析了伊朗气候条件下观测点的 BIPV/T 系统性能和环境效益,研究结果表明,BIPV/T 系统每年可以节省 3 038.83 kW·h 的热能、2 259.64 kW·h 的电能和 19.97 kW·h 的有用能,并且可以减少 CO₂ 排放 5.94 t。Rajoria 等^[62]总结了平板型 BIPV/T 系统的发展,涉及系统包括基于空气、液体和混合冷却的 BIPV/T 系统,通过研究发现:BIPV/T 系统的性能更多取决于系统设计参数和当地的天气条件;将纳米颗粒、相变材料与 BIPV/T 系统集成具有巨大的发展潜力,可以充分发挥 PCM 储热的优势。

5.2 海水淡化

太阳能海水淡化对缓解海岛地区淡水资源和电力、石油等传统能源紧张具有现实意义,由 PV/T 驱动海水淡化系统可以有效提高淡水生产效率、将太阳能资源利用最大化。袁合涛等^[63]对比研究了不同模式驱动下的海水淡化系统,测试结果表明,由 PV/T 驱动海水淡化系统的平均产水速率比光热模式提高了 47.6%。

系统中 PV/T 模块用于预热盐水并兼具发电功能,经预热的盐水经过海水淡化装置形成淡水被收集,常用 CPV/T 组件以提供热脱盐所需高温^[64-65]。Anand 等^[66]总结了光伏/热集热器耦合海水

淡化系统的研究进展,涉及的除盐技术包括加湿除湿、多效蒸馏、太阳能蒸馏器、反渗透和膜蒸馏,此外,还分析了光伏/热集热器与其他脱盐技术(电渗析、正渗透、蒸气压缩、吸附脱盐等)耦合的可能性,为改进光伏/热驱动的海水淡化系统提供了新方法。通过比较分析得出结论:尽管光伏/热耦合海水淡化系统的初始成本增加,但其整体性能明显优于与单独的光伏板和太阳能集热器耦合的海水淡化系统,系统产生的额外电力为偏远地区的独立海水淡化铺平了道路。

5.3 干燥

太阳能干燥技术相对于常规干燥技术具有节能环保的优点,可以用于工业、农业以及其他物料的干燥。为提高干燥过程中的太阳能利用率,可将 PV/T 技术用于太阳能干燥装置中代替传统太阳能干燥。空气式 PV/T 集热器驱动干燥装置或 PV/T 模块与热泵耦合而成的干燥系统,可以有效提高干燥效率和产品质量,具有良好的能源、成本效益和环境友好性。

图 13 为基于空气式 PV/T 的太阳能热风干燥系统结构示意图^[67],主要由空气式 PV/T 集热器、干燥箱和风机 3 部分组成,经 PV/T 集热器产生的热风通过风机驱动进入干燥箱中干燥物料,整个过程中电能均由 PV/T 模块提供。Kong 等^[68]通过实验测试得出,由非晶硅 PV/T 集热器驱动的太阳能干燥系统干燥速率(定义为单位质量干燥物料每小时蒸发的含水量)最大可以达到 3.6,干燥室内最高温度为 65.78 °C,其非晶硅 PV/T 集热器的平均热效率、电效率和整体效率分别达到了 46.8%、

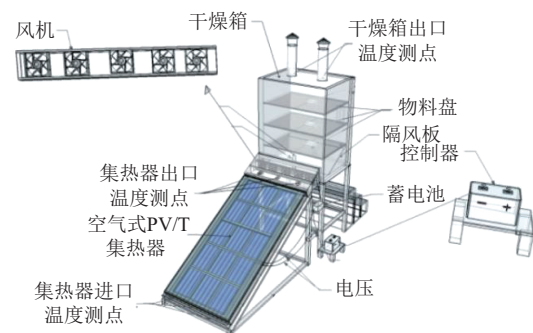


图 13 空气式 PV/T 干燥系统原理图
Fig. 13 Schematic diagram of air based PV/T collector drying system

5.7%和54.4%。Barisik等^[69]对PV模块、PV/T集热器分别集成农产品干燥系统,以及PV/T辅助热泵干燥系统的理论和实验研究进行了全面的归纳总结,研究指出,利用可再生能源开发生产无添加剂、高质量农副产品并适合工业推广的系统仍然面临着重大挑战。

5.4 制冷

传统制冷技术(如电制冷)会带来能源和环境问题,由于丰富的太阳能资源和用户日益增长的制冷需求,太阳能制冷技术近年来备受关注^[70]。当PV/T与热泵或吸收式制冷系统结合代替蒸汽压缩制冷时,可以同时满足用户的供暖、制冷和发电需求,提高系统性能并有效减少CO₂的排放。Ramos等^[71]将PV/T集热器与热泵系统相结合,在不同地区研究系统的技术可行性和经济性,结果显示,PV/T制冷系统可以涵盖城市住宅60%的空间与热水加热需求,以及几乎100%的制冷需求,并且其系统成本比纯PV驱动的制冷系统低30%~40%。Alobaid等^[72]总结归纳了PV/T耦合吸收式制冷系统制冷的发展现状与研究进展,与蒸汽压缩制冷系统相比,太阳能吸收式制冷可以节约大约50%的一次能源,并且其PV/T集热器的最大电效率可以达到10%~35%;另外,研究指出,如何在保证PV/T集热器高热效率和电效率的同时产生足够高的热能驱动制冷系统,是将PV/T技术应用于吸收式制冷系统的主要挑战。

6 结论

PV/T技术将各单元的优点整合,能够同时提供热力和电力,并提高光伏电池的发电效率,因此具有巨大的发展潜力。除了目前最常用的基于水冷的平板型PV/T系统外,纳米流体、聚光器等技术的加入使PV/T系统的效率明显增加。PV/T集热器中不必要的热损失和光伏面板的高温问题是影响系统效率和使用寿命的重要因素,目前的技术无法完全避免因导热、对流和辐射引起的不必要热损失,因此需要进一步探索。而对于冷却PV板,常从强化光伏组件与冷却流体之间的热传递或优化光谱过滤器入手进行研究。将相变材料与PV/T系统集成是一种很好的PV/T热管理方式,

为了克服相变材料固有的低导热性问题,通常会采取优化系统结构或制备复合相变材料等方式。此外,通过将PV/T与其他技术相耦合,可以显著提高系统整体效率,并减少能源消耗。

总体而言,PV/T系统发展目前仍不成熟,存在着技术和经济上的壁垒,未来可从以下方面持续改进:

1) 建立精确的数学模型,关注系统的经济、环境效益以及生命周期分析,并在实际测量中对系统进行长时间的研究观察。

2) 对于光伏电池组件,高热效率和电效率存在矛盾,因此应根据PV/T系统所处环境条件和具体的应用要求进行优化设计,尽可能使系统电效率和热效率达到平衡。

3) 开发新型材料和设计新型系统结构。例如,对于聚光型PV/T系统,除了目前常用的GaAs和单晶硅太阳能电池外,其他电池材料还有很大的应用空间。在基于液体过滤的SS-CPV/T系统中,长期暴露在阳光下的问题仍没有得到充分解决,因此需要继续研究新型光谱过滤器等。

4) 对于PV/T-PCM系统,需要继续开发具有合适相变温度和高潜热、高热导率的新型PCM,或者开发复合相变材料。由于系统所处环境温度会不断变化,可以考虑开发具有不同熔点的混合相变材料以获得更好的系统性能。

5) 在PV/T-PCM系统中,多次储存/释放热量的行为必然会使相变材料的热性能下降,需对材料进行长时间的实验观察以确定其适用性。此外,未来还需针对PV/T-PCM模块的不同配置之间的性能比较以及相应的最佳设计进行深入研究。

6) 纳米颗粒可应用于PV/T集热器的传热流体、光谱过滤器以及相变材料集成系统中,对于优化PV/T系统具有重要作用。但目前纳米颗粒仍存在稳定性较差、易团聚沉积等问题,并且会对环境和人体健康产生危害,因此需要继续深入研究纳米颗粒技术,并探讨纳米颗粒不同参数对PV/T系统的影响。

参考文献

[1] 吴攀.光伏发电系统发电功率预测[J].发电技术,

- 2020, 41(3): 231-236.
- WU P. Power forecasting of photovoltaic power generation system[J]. *Power Generation Technology*, 2020, 41(3): 231-236.
- [2] 张哲昞, 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.
- [3] 王润泽. 太阳能光伏光热综合利用系统的优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- WANG R Z. Research on optimization of comprehensive solar photovoltaic and heat[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [4] HASAN M A, SUMATHY K. Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(7): 1845-1859.
- [5] JOSHI S S, DHOBLE A S. Photovoltaic-thermal systems (PV-T): technology review and future trends [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 92: 848-882.
- [6] JIA Y, ALVA G, FANG G. Development and applications of photovoltaic-thermal systems: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 102: 249-265.
- [7] KUMAR A, BARENDAR P, QURESHI U. Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT) technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 1428-1436.
- [8] DAGHIGH R, RUSLAN M H, SOPIAN K. Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(8): 4156-4170.
- [9] ASTE N, LEONFORTE F, DEL PERO C. Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PV-T) water collector[J]. *Solar Energy*, 2015, 112: 85-99.
- [10] HE Y T, LIU R M, LIU J H. Experimental research of photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 401/403: 146-150.
- [11] YU Q, HU M, LI J, et al. Development of a 2D temperature-irradiance coupling model for performance characterizations of the flat-plate photovoltaic/thermal (PV/T) collector[J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 404-419.
- [12] DAS D, KALITA P, ROY O. Flat plate hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) system: a review on design and development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 84: 111-130.
- [13] 佟锴, 杨立军, 宋记锋, 等. 聚光太阳能集热场先进技术综述[J]. *发电技术*, 2019, 40(5): 413-425.
- TONG K, YANG L J, SONG J F, et al. Review on advanced technology of concentrated solar power concentrators[J]. *Power Generation Technology*, 2019, 40(5): 413-425.
- [14] GHARZI M, ARABHOSSEINI A, GHOLAMI Z, et al. Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: a review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance[J]. *Solar Energy*, 2020, 211: 117-146.
- [15] YU Q, CHEN X, YANG H. Research progress on utilization of phase change materials in photovoltaic/thermal systems: a critical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 149: 111313.
- [16] ABD EL-HAMID M, WEI G S, SHERIN M, et al. Comparative study of different photovoltaic/thermal hybrid configurations from energetic and exergetic points of view: a numerical analysis[J]. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 2021, 143: 061006-1.
- [17] ABDUL-GANIYU S, QUANSAH D A, RAMDE E W, et al. Techno-economic analysis of solar photovoltaic (PV) and solar photovoltaic thermal (PVT) systems using exergy analysis[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101520.
- [18] VENKATESH T, MANIKANDAN S, SELVAM C, et al. Performance enhancement of hybrid solar PV/T system with graphene based nanofluids[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 130: 105794.
- [19] 刘尧东, 张燕平, 万亮, 等. 基于 Al_2O_3 纳米流体的槽式太阳能热发电集热器传热建模及性能分析[J]. *发电技术*, 2021, 42(2): 230-237.
- LIU Y D, ZANG Y P, WAN L, et al. Heat transfer modelling and performance analysis of trough solar thermal power collector based on Al_2O_3 nanofluid[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(2): 230-237.
- [20] CHOWDHURY S, CHOWDHURY M R. Advancements of air, water and nanofluid based photovoltaic thermal (PV/T) technologies[C]//2nd International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), Dec 27-29, 2017, RUET, Rajshahi, Bangladesh: IEEE, 2017: 1-5.
- [21] 孙健, 黄章锋, 谢敏倩. 基于分形换热器的聚光太阳能 PV/T 一体化系统数值研究[J]. *太阳能学报*, 2017,

- 38(11): 3036-3042.
- SUN J, HUANG Z F, XIE M Q. Numerical investigation of solar concentrating PV/T system based on fractal heat sink[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(11): 3036-3042.
- [22] 刘亚雷, 张红, 许辉, 等. CPC型聚光光伏光热系统的性能分析[J]. *可再生能源*, 2011, 29(1): 1-5.
- LIU Y L, ZHANG H, XU H, et al. Performance analysis on CPC-PV/T system[J]. *Renewable Energy Resources*, 2011, 29(1): 1-5.
- [23] MAHDI H, YAHYA A, FARAMARZ S, et al. Thermal and electrical assessment of an integrated solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector equipped with a compound parabolic concentrator (CPC) [J]. *International Journal of Green Energy*, 2013, 10(1/5): 494-522.
- [24] 闫素英, 李彦洁, 田瑞, 等. 菲涅尔聚光PV/T系统热电输出特性分析[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(6): 1552-1558.
- YAN S Y, LI Y J, TIAN R, et al. Analysis of thermoelectric output characteristic of Fresnel concentrating PV/T system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(6): 1552-1558.
- [25] XIE H, WEI J, WANG Z, et al. Design and performance research on eliminating multiple reflections of solar radiation within compound parabolic concentrator (CPC) in hybrid CPV/T system[J]. *Solar Energy*, 2016, 129: 126-146.
- [26] 黄晔, 张高明, 高峰, 等. 基于TRNSYS仿真的不同跟踪方式下CPV/T系统的热电性能及经济性分析[J]. *太阳能*, 2020(10): 26-34.
- HUANG Y, ZHANG G M, GAO F, et al. Study on annual electrical/thermal performance and economic analysis of CPV/T systems based on TRNSYS simulation [J]. *Solar Energy*, 2020(10): 26-34.
- [27] WANG Z, WEI J, ZHANG G, et al. Design and performance study on a large-scale hybrid CPV/T systems based on unsteady-state thermal model[J]. *Solar Energy*, 2019, 177: 427-439.
- [28] 黄晔, 张高明, 高峰, 等. 双轴跟踪和单轴南北向跟踪CPV/T系统的热电性能研究[J]. *太阳能*, 2021(2): 66-73.
- HUANG Y, ZHANG G M, GAO F, et al. Study on CPV/T system with dual-axis tracking and south-north single-axis tracking[J]. *Solar Energy*, 2021(2): 66-73.
- [29] 高阳, 魏进家, 谢胡凌, 等. 低倍聚光光伏光热系统热性能分析[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(3): 624-628.
- GAO Y, WEI J J, XIE H L, et al. Thermal performance analysis for low-concentration on photovoltaic thermal system[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(3): 624-628.
- [30] DU M, TANG G H, WANG T M. Exergy analysis of a hybrid PV/T system based on plasmonic nanofluids and silica aerogel glazing[J]. *Solar Energy*, 2019, 183: 501-511.
- [31] EHRMANN N, REINEKE-KOCH R. Selectively coated high efficiency glazing for solar-thermal flat-plate collectors[J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(12): 4214-4218.
- [32] MELLOR A, GUARRACINO I, LLIN L F, et al. Specially designed solar cells for hybrid photovoltaic-thermal generators[C]//43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Jun 5-10, 2016, Portland, OR, USA: IEEE, 2016: 16484128.
- [33] HU M, GUO C, ZHAO B, et al. A parametric study on the performance characteristics of an evacuated flat-plate photovoltaic/thermal (PV/T) collector[J]. *Renewable Energy*, 2021, 167: 884-898.
- [34] WU L, ZHAO B, AO X, et al. Performance analysis of the aerogel-based PV/T collector: a numerical study [J]. *Solar Energy*, 2021, 228: 339-348.
- [35] LI Z, JI J, ZHANG F, et al. Investigation on the all-day electrical/thermal and antifreeze performance of a new vacuum double-glazing PV/T collector in typical climates: compared with single-glazing PV/T[J]. *Energy*, 2021, 235: 121230.
- [36] LI Z, JI J, YUAN W, et al. Experimental & numerical investigation and optimization on a novel flat-plate PV/T system using CdTe thin-film solar modules of sandwich structure[J]. *Solar Energy*, 2021, 223: 261-277.
- [37] SHEN C, ZHANG Y, ZHANG C, et al. A numerical investigation on optimization of PV/T systems with the field synergy theory[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 185: 116381.
- [38] KIANIFARD S, ZAMEN M, NEJAD A A. Modeling, designing and fabrication of a novel PV/T cooling system using half pipe[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 119972.
- [39] MAADI S R, SABZALI H, KOLAHAN A, et al. Improving the performance of PV/T systems by using conical-leaf inserts in the coolant tubes[J]. *Solar Energy*, 2020, 212: 84-100.
- [40] ZAITE A, BELOUAGGADIA N, ABID C, et al. Performance improvement of photovoltaic cells using night radiative cooling technology in a PV/T collector [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 42:

- 102843.
- [41] HU M, ZHAO B, AO X, et al. An analytical study of the nocturnal radiative cooling potential of typical photovoltaic/thermal module[J]. *Applied Energy*, 2020, 277: 115625.
- [42] HAN X, CHEN X, SUN Y, et al. Performance improvement of a PV/T system utilizing Ag/CoSO₄-propylene glycol nanofluid optical filter[J]. *Energy*, 2020, 192: 116611.
- [43] CRISOSTOMO F, TAYLOR R A, ZHANG T, et al. Experimental testing of SiN_x/SiO₂ thin film filters for a concentrating solar hybrid PV/T collector[J]. *Renewable Energy*, 2014, 72: 79-87.
- [44] HUANG G, MARKIDES C N. Spectral-splitting hybrid PV-thermal (PV-T) solar collectors employing semi-transparent solar cells as optical filters[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 248: 114776.
- [45] LIANG H, WANG F, YANG L, et al. Progress in full spectrum solar energy utilization by spectral beam splitting hybrid PV/T system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 141: 110785.
- [46] ZHANG C, SHEN C, WEI S, et al. Flexible management of heat/electricity of novel PV/T systems with spectrum regulation by Ag nanofluids[J]. *Energy*, 2021, 221: 119903.
- [47] HUANG J, HAN X, ZHAO X, et al. Facile preparation of core-shell Ag@SiO₂ nanoparticles and their application in spectrally splitting PV/T systems[J]. *Energy*, 2021, 215: 119111.
- [48] HAN X, TU L, SUN Y. A spectrally splitting concentrating PV/T system using combined absorption optical filter and linear Fresnel reflector concentrator [J]. *Solar Energy*, 2021, 223: 168-181.
- [49] KANDILLI C, ACIKBAS Y, UZEL M. Investigation of thermophysical properties of natural zeolite plates enhanced with graphite powder for thermal management of PV thermal systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318: 128558.
- [50] CARMONA M, PALACIO BASTOS A, GARCÍA JD. Experimental evaluation of a hybrid photovoltaic and thermal solar energy collector with integrated phase change material (PVT-PCM) in comparison with a traditional photovoltaic (PV) module[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 680-696.
- [51] HOSSAIN M S, PANDEY A K, SELVARAJ J, et al. Two side serpentine flow based photovoltaic-thermal-phase change materials (PVT-PCM) system: energy, exergy and economic analysis[J]. *Renewable Energy*, 2018, 136: 1320-1336.
- [52] NAVAKRISHNAN S, VENGADESAN E, SENTHIL R, et al. An experimental study on simultaneous electricity and heat production from solar PV with thermal energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114614.
- [53] SELIMEFENDIGIL F, ŞIRIN C. Energy and exergy analysis of a hybrid photovoltaic/thermal-air collector modified with nano-enhanced latent heat thermal energy storage unit[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 45: 103467.
- [54] ABDELRAZIK A S, SAIDUR R, AL-SULAIMAN F A. Thermal regulation and performance assessment of a hybrid photovoltaic/thermal system using different combinations of nano-enhanced phase change materials [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 215: 110645.
- [55] ABDELRAZIK A S, AL-SULAIMAN F A, SAIDUR R. Numerical investigation of the effects of the nano-enhanced phase change materials on the thermal and electrical performance of hybrid PV/thermal systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112449.
- [56] SOPIAN K, AL-WAELI A H A, KAZEM H A. Energy, exergy and efficiency of four photovoltaic thermal collectors with different energy storage material [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 29: 101245.
- [57] ASEFI G, MA T, WANG R. Parametric investigation of photovoltaic-thermal systems integrated with porous phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 201: 117727.
- [58] AZIMI N, DAVOODBEYGI Y, RAHIMI M, et al. Optimization of thermal and electrical efficiencies of a photovoltaic module using combined PCMs with a thermo-conductive filler[J]. *Solar Energy*, 2022, 231: 283-296.
- [59] MODJINOUM, JI J, YUAN W, et al. Performance comparison of encapsulated PCM PV/T, microchannel heat pipe PV/T and conventional PV/T systems[J]. *Energy*, 2019, 166: 1249-1266.
- [60] QIU Z, ZHAO X, LI P, et al. Theoretical investigation of the energy performance of a novel MPCM (microencapsulated phase change material) slurry based PV/T module[J]. *Energy*, 2015, 87: 686-698.
- [61] SHAHSAVAR A, RAJABI Y. Exergoeconomic and enviroeconomic study of an air based building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system[J]. *Energy*, 2018, 144: 877-886.
- [62] RAJORIA C S, KUMAR R, SHARMA A, et al.

- Development of flat-plate building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system: a review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 5342-5352.
- [63] 袁合涛, 彭昌盛. 光热光电驱动的海岛型太阳能海水淡化装置研制与性能分析[J/OL]. *环境工程*: 1-8 [2022-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20220111.1045.008.html>.
- YUAN H T, PENG C S. Research development and performance analysis of island type solar desalination device by photothermal photoelectricity[J/OL]. *Environmental Engineering*: 1-8[2022-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20220111.1045.008.html>.
- [64] 闫晓彤, 袁合涛, 杨可, 等. 一种光热/光伏耦合式小型太阳能海水淡化装置的研制[J]. *水处理技术*, 2016, 42(10): 76-79.
- YAN X T, YUAN H T, YANG K, et al. Experimental study on a photothermal and photovoltaic coupling of small solar desalination device[J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(10): 76-79.
- [65] 张学镭, 卜跃刚, 张衡, 等. 基于C-PV/T技术水电联产系统的实验研究[J]. *电力科学与工程*, 2018, 34(2): 63-68.
- ZHANG X L, BU Y G, ZHANG H, et al. Experimental study of hydropower cogeneration system based on C-PV/T technology[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2018, 34(2): 63-68.
- [66] ANAND B, SHANKAR R, MURUGAVELH S, et al. A review on solar photovoltaic thermal integrated desalination technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 141: 110787.
- [67] KEOVISAR Vanhkeo, 王云峰, 黄梦萧, 等. 太阳能PV/T空气集热器干燥性能实验研究[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(4): 5-10.
- KEOVISAR V, WANG Y F, HUANG M X, et al. Experimental study on drying performance of solar PV/T air collector[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 39(4): 5-10.
- [68] KONG D, WANG Y, LI M, et al. Experimental study of solar photovoltaic/thermal (PV/T) air collector drying performance[J]. *Solar Energy*, 2020, 208: 978-989.
- [69] DAMLA B M, NESLIHAN C G, SEBNEM T. A comprehensive review of solar photovoltaic hybrid food drying systems[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 62(15): 4152-4168.
- [70] 施能博. 基于PVT太阳能吸收式制冷系统的性能分析[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- SHI N B. Performance analysis of solar absorption refrigeration system based on PVT[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [71] RAMOS A, CHATZOPOULOU M A, GUARRACINO I, et al. Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 838-850.
- [72] ALOBAID M, HUGHES B, CALAUTIT J K, et al. A review of solar driven absorption cooling with photovoltaic thermal systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 728-742.

收稿日期: 2022-01-14.

作者简介:



肖瑶

肖瑶(1999), 女, 硕士研究生, 主要从事太阳能光伏/光热发电等方面的研究工作, xaouo228@163.com;



魏高升

魏高升(1975), 男, 教授, 从事火电机组节能、热物性测试技术、太阳能热发电及储热技术等领域的研究工作, 本文通信作者, gaoshengw@126.com。

(责任编辑 尚彩娟)