



聚光型太阳能光伏光热系统研究进展

尹 勇,杨洪海,苏亚欣,徐 悦
(东华大学 环境科学与工程学院,上海 201620)

摘 要:聚光型太阳能光伏光热系统(CPV/T)在传统光伏发电系统的基础上增加了聚光系统和光热系统,在通过聚光系统提高光伏效率的同时将系统中多余的热量加以利用,以达到太阳能最大化利用的目的。本文介绍了CPV/T系统的工作原理及其能效影响因素,以直接影响系统太阳能综合利用效率的聚光器技术、光伏电池技术和光伏冷却技术作为分析对象,结合近几年国内外最新研究成果比较了不同类型聚光器、光伏电池以及冷却方式的优劣,列举了常见的光伏余热利用方式。分析认为:CPV/T系统虽然具有更高的太阳能利用率,但应加大对系统尤其是聚光器经济性的分析;考虑在系统中应用叠层光伏电池缓解聚光器带来的系统体积过大问题;新电池开发过程中应更注意光伏电池的温度系数以减少冷却系统的压力,冷却技术在强化散热的同时也应注意热量的收集方法及其与利用途径的有效结合。

关 键 词:再生能源;太阳能;光伏光热系统;聚光器;太阳能电池;光伏电池冷却;光伏余热利用

中图分类号:TK519 **文献标识码:**A **DOI:**10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.001

[引用本文格式]尹 勇,杨洪海,苏亚欣,等.聚光型太阳能光伏光热系统研究进展[J].热能动力工程,2022,37(1):1-13. YIN Yong, YANG Hong-hai, SU Ya-xin, et al. Research progress of solar concentrating photovoltaic-thermal system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 1-13.

Research Progress of Solar Concentrating Photovoltaic-thermal System

YIN Yong, YANG Hong-hai, SU Ya-xin, XU Yue
(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, Post Code: 201620)

Abstract: The solar concentrating photovoltaic-thermal (CPV/T) system adds a concentrating system and a photothermal system on the basis of the traditional photovoltaic power generation system, aiming to use the excess heat in the system while improving the photovoltaic efficiency through the concentrating system, so as to achieve the purpose of maximizing the utilization of solar energy. This study introduces the working principle of CPV/T system and its influence factors of energy efficiency, selects the concentrator technology, photovoltaic cell technology and photovoltaic cooling technology which directly affect the comprehensive utilization efficiency of system solar energy as the analysis objects, compares the advantages and disadvantages of different types of concentrators, photovoltaic cells and cooling methods combined with the latest research results at home and abroad in recent years, and lists the common utilization methods of photovoltaic waste heat. It is considered that although the CPV/T system has a higher solar energy utilization rate, the economic analysis of the system, especially the concentrator, should be increased; More consideration should be given to the application of laminated photovoltaic cells in the system to alleviate the problem of excessive system volume caused by the concentrator. In the process of developing new cells, more attention should be paid to the temperature coefficients of photovoltaic cells to reduce the pressure of cooling system. In the cooling technology, attention should be paid to the heat collection method

and the effective combination of it and utilization approach while strengthening the heat dissipation.

Key words: renewable energy, solar energy, photovoltaic-thermal (PV/T) system, concentrator, solar cells, photovoltaic cell cooling, photovoltaic waste heat utilization

引 言

太阳能光伏光热(PV/T)综合利用技术最早于1978年由Kern和Russell提出^[1],后续研究者为提高光伏板表面的辐照强度,将太阳能聚光技术应用在光伏光热系统中,由此形成了聚光式光伏光热系统(CPV/T)。CPV/T由聚光系统、光伏系统和光热系统组成,其运行原理为:太阳光在聚光器上被聚集后投射到PV/T板表面,接着穿过透明玻璃盖板被光伏电池吸收并发生光伏效应,为防止因光伏电池温度升高而降低光伏性能,在光伏板内放置热量传输结构层,将多余的热量转移并加以利用,进而提高太阳能的综合利用效率。

虽然国内外的许多学者已经对CPV/T系统进行了大量研究,但往往局限于系统中某一组分对整体性能的影响,而缺乏对系统各部分的综合理解。在CPV/T系统运行过程中,聚光器和光伏电池的种类,以及光伏冷却的方式对其性能起决定性的作用。本文从CPV/T系统的3项关键技术入手对国内外学者的研究进行综述,列举了热能利用的常见方式,为CPV/T系统的综合研究提供参考。

1 聚光器技术

使用聚光器可使系统在达到相同经济效益的同时,减少光伏电池数量可以提高PV/T系统的性价比。聚光器的种类总的来说可以分为折射型和反射型^[2]。

1.1 折射型聚光器

菲涅尔透镜由于具有成本低、易生产的特点成为折射型聚光器的代表。Xu等人^[3]将透镜与光学棱镜相结合,达到先聚光后匀光的目的(如图1所示),由于透镜成本较低,可使透镜面积远大于光伏板面积获得较高聚光比。Leutz等人^[4]提出圆弧型菲涅尔透镜聚光器,在圆弧各处设置不同的齿斜率,使与法线方向夹角为 $\pm 23.5^\circ$ 的阳光在无追踪器条

件下可持续精准聚光。Sharma等人^[5]在此基础上提出圆柱型菲涅尔透镜(如图2所示),该装置只需在太阳位置发生变化时相应地移动吸收面便可实现全天聚光,大大减少了传统跟踪器运行所带来的功耗,模拟结果表明,吸收体的年平均辐照强度可以提高50%以上。但菲涅尔透镜的缺点是在折射过程当中因产生色差引起光学损失,使光的综合利用效率下降。

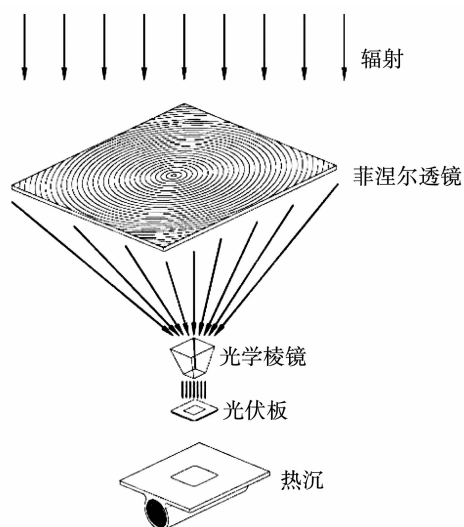


图1 菲涅尔聚光原理图

Fig. 1 Fresnel concentrating principle diagram

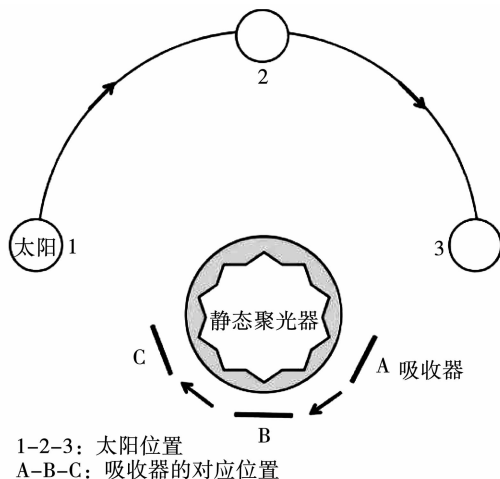


图2 静态聚光原理图

Fig. 2 Static concentrating principle diagram

1.2 反射型聚光器

反射型聚光器由于在聚光过程中不会产生光学色差被认为具有更高的光学效率^[6],最常见的有抛物线式和碟式聚光器。碟式聚光器最大的优点就是可获得较大的聚光比,在 20 世纪 80 年代初首次被 Coventry 和 Andraka 提出后得到了发展^[7]。澳大利亚国立大学于 1994 年和 2010 年对聚光面积分别为 400 和 500 m² 的碟式聚光器进行了实验测试,指出其最高聚光比可达 2 000^[8]。Yan 等人^[9] 针对碟式聚光器存在的聚光均匀性不足问题,提出了如图 3 所示的分离式碟式聚光系统,该聚光器由半径和倾斜角度不同的分离圆环构成类碟式聚光器,模拟结果表明,腔内接受面的光通量非均匀性因子由 0.55 ~0.63 降到0.10 ~0.22。

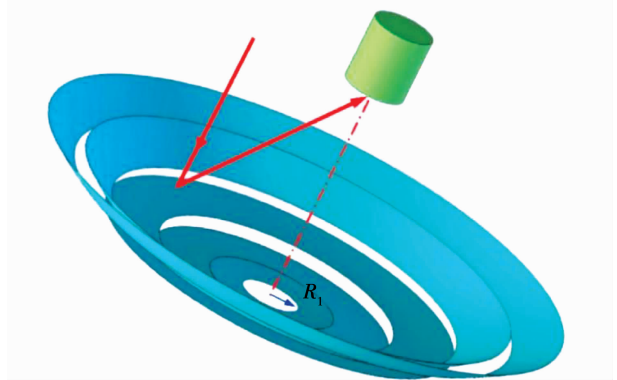


图 3 分离式碟式聚光系统

Fig. 3 Separate disc type condenser system

Meng 等人^[10]在抛物线聚光器上部增加了与入射光线平行、不能起到聚光作用的吸收面,如图 4 所示。吸收面用于吸收聚光时反射出聚光器的太阳能,并将在光伏电池中预热后的冷却水通向吸收面内置水管中再次加热,使得在聚光的同时获得更多可以利用的热量。Wang 等人^[11]与文献[9]做法类似,将传统抛物线式聚光器改进为横截面由不同斜率连续小线段组成的类抛物面聚光器,使用常规的太阳追踪器便可使系统的综合光学效率达到 80%。Ustaoglu 等人^[12]同样对于抛物面本身进行设计,提出了复合双曲线喇叭状聚光器,就单位面积输出的电功率与常规抛物面聚光器进行比较,功率提高了 42.9%,认为复合双曲线喇叭状聚光器可以有效替

代传统抛物线型聚光器。

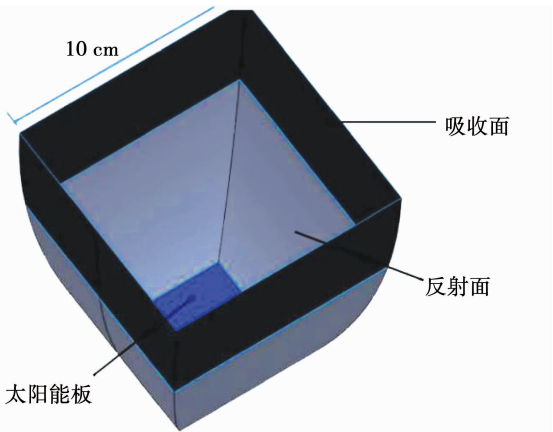


图 4 抛物线式聚光器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of parabolic structure

由于传统碟式和抛物线式聚光器存在面积较大、抛物曲面不易加工成型、系统的稳定性低和聚光均匀性难把控等问题,因此,提出将单一曲面分解为多个曲面的思路,从而简化加工工艺,提高系统的抗风性能。陈海飞^[13]分别搭建了平面镜阵列式系统和九碟式多碟聚光系统,在平面镜阵列式系统中可添加或减少平面镜的数量,从而实现聚光比可调;对两个系统聚光均匀性的比较结果表明平面镜阵列式系统更优。Huang 等人^[14]设计了由 3 种不同焦距长度的共计 16 片小碟式聚光器组成的多层多焦点聚光系统,计算了焦平面的通量分布,并为该系统设计了最佳聚焦距离;同时提到,由于单片碟式聚光器的制造以及安装存在误差,组装系统误差的重叠可能导致聚光系统光通量不均匀。

学者们针对聚光系统面积过大以及光通量不均匀问题,提出了多级聚光器的理念。多级聚光器采用分步聚光,在达到相同聚光比的同时大大减少了单级聚光器的面积。Wang 等人^[15]设计了如图 5 所示的一种由 2 个反射面构成的二级聚光系统。Shanks 等人^[16]设计了由图 6 所示的一种由 3 个反射面构成的二级聚光系统,该系统与 Wang 所提出的系统最大的区别是在光伏板前放置了光学匀质器,太阳光经过多级聚光器后不仅具有高聚光比,且有均匀的光通量。

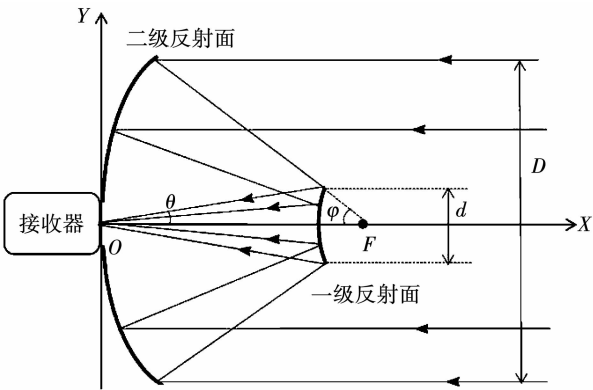


图 5 双反射面结构示意图

Fig.5 Structural diagram of the double reflecting surfaces

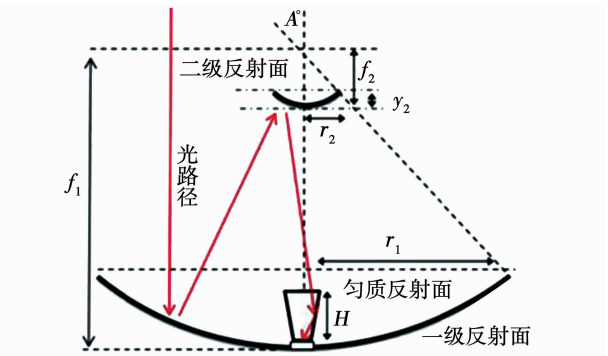


图 6 三反射面结构示意图

Fig.6 Structural diagram of three reflecting surfaces

然而在一级聚光器上部安装二级聚光器,不仅会使二级聚光器挡住一级聚光器的光通量,且会产生因多次反射而造成的光损耗。Lokeswaran^[17]在 Shank 等人的基础上,提出直接把底部一级聚光器聚集的太阳能导入上部匀质器的新型二级聚光系统,并将该聚光系统与传统一级聚光系统进行实验对比,在同等条件下其电性能比传统一级聚光系统高 33.54%。Chong^[18]设计的二级聚光系统与文献[17]中光学匀质器不同,每个光伏单元均安装匀质器使面聚焦转化成点聚焦,现场测试了搭配该聚光系统的多结太阳能电池的平均效率为 35.0% ~ 36.1%。

太阳能聚光是近年来热门研究领域,表 1 给出了不同类型聚光器的优缺点。可以看出,研究的核心主要仍放在提高聚光器的聚光比以及均匀光通量的理论性研究,而对于系统的可行性以及聚光器与不同类型太阳能电池适配性的分析较少。后续应加强系统运行的产能与耗能量对比研究,增加系统静态回收期、聚光器与光伏电池适配性分析等,使聚光系统得到进一步的推广应用。

表 1 不同形式聚光器优缺点对比

Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages of different types of concentrators

类型	形式	优势	不足
反射型	碟式 ^[8-9]	聚光比大,聚光效率高	必须采用双轴跟踪,需要较为稳定的支撑结构,聚光均匀性不高
	抛物线式 ^[10-12]	可以仅采用单轴跟踪系统,聚光效率较高	聚光比一般较低
	阵列式 ^[13-14]	系统风阻小、稳定性高,聚光面易加工,方便安装维修	对追踪系统要求高,容易因聚光面的制造及安装误差造成聚光均匀性不佳
	多级聚光式 ^[15-18]	单级聚光器的面积较小,有均匀的光通量	二级聚光器会挡住一级聚光器的光通量,多次反射会产生光损失
折射型	菲涅尔透镜 ^[3-5]	造价便宜,在无追踪系统上有较强拓展性	光折射过程中会产生光学色差,影响综合光学效率

2 光伏电池技术

2.1 三代光伏电池技术

光伏电池历经了三代技术的更迭。一代光伏电池技术主要依赖于晶体硅(c-Si)材料,其主要有单晶硅(M-Si)和多晶硅(Pc-Si)。一代技术已占据

全球光伏市场份额的 90%^[19],光电转化效率也已显著提高至 25% 左右^[20],而硅材料转化率的经典理论极限是 29%,尽管随着纳米技术的引入其转化效率有望提高至 30% 以上^[21],但目前难以进一步提高。

第二代光伏电池技术则是主要基于各种薄膜材料

而衍生的电池技术,主要的薄膜类型有碲化镉(CdTe)、铜铟镓硒(CIGS)、非晶硅(a-Si)、砷化镓(GaAs)等。虽然 GaAs 薄膜电池的效率已经达到 30% 以上,但其造价高昂使得目前仅限应用于航空航天、无人驾驶汽车等高端领域。第二代光伏电池在质量上总的来说要轻于第一代光伏电池,与柔性衬底结合后还具有易折叠携带的特点。然而其光电转换效率却大多低于第一代。且薄膜光伏电池在制备过程中往往用到毒性材料,限制了其规模化的生产应用。

基于第一代和第二代光伏技术的优缺点,研究人员又继续提出了有机光伏电池(OPV)、染料敏化太阳能电池(DSSC)、钙钛矿型敏化光伏电池(PVK)和叠层光伏电池(TSC)等一系列新型电池。但无论是以晶硅材料为主的第一代光伏电池,还是以薄膜材料为主的第二、三代光伏电池,都是基于某一类半

导体材料并在此基础上进行各种改进。这种做法虽然在电池的生产工艺上相对容易,却受制于材料中单一活性层较窄的光谱响应范围,进而限制了光电转化效率的进一步提升。其原因主要有两点^[22-23]: (1) 当太阳能辐射至电池表面时,当某波段的辐射能低于半导体材料的禁带宽度时,该波段能量将无法被电池利用;(2) 当某波段的辐射能远大于半导体材料的禁带宽度时,自由电子虽然可以被激发但并不稳定,将迅速弛豫至导带顶附近,多余的能量以热能的形式耗散。

针对以上问题,TSC 采用了与其它电池不同的优化方案,使用能量梯级利用法将具有不同禁带宽度的半导体材料通过隧穿结进行上下叠层连接,从而使其不受单一材料禁带宽度的限制,提高了电池的太阳能利用效率^[24]。不同类型光伏电池的优缺点列于表 2。

表 2 不同种类光伏电池比较

Tab.2 Comparison of different types of photovoltaic cells

电池类型	最大效率/%	聚光后最大效率/%	优势	不足
单晶硅	26.1	27.6	稳定性好,转化效率高,工艺完善	硅的纯度要求高,工艺复杂,价格较高
多晶硅	23.3	-	价格相对较低,转化效率较高	使用寿命较短
薄膜晶硅	21.2	-	制作工艺简单,成本低,重量轻,弱光情形下也能发电	光电转化效率随着温度升高下降明显
GaAs 薄膜	29.1	30.5	转化效率高,热稳定性强	价格昂贵
CIGS	23.4	23.3	转化效率较高,不存在光致衰退问题,成本低	铜、硒等为稀有元素,限制其大幅推广使用
DSSC	12.3	-	工艺简单,成本低,可以使用天然染料,对光线入射角不明显	转化效率低
PVK	25.5	-	禁带宽度可调,工艺简单,转化效率高	材料往往含铅,有毒,电池寿命不长
双结	32.9	35.5	效率很高,能减少太阳能电池发热问题	叠层后材料之间存在电流、晶格匹配问题
三结	37.9	44.4	效率极高	工艺复杂,价格昂贵,难以寻找光吸收范围相互高效吻合的材料

注:数据来源:<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>(查表时间 2020 年 12 月)。

2.2 叠层光伏电池

TSC 将具有较大禁带宽度的半导体材料放置在上层,较低禁带宽度的半导体材料放置在下层。由于钙钛矿(PVK)材料具有禁带宽度范围内可调(1.18~2.3 eV)、制造成本相对较低等优点^[25],被

广泛认为是 TSC 中顶部电池的优选材料。Werner 等人^[26]将 PVK 作为顶部电池堆叠在 Si 异质结电池上,如图 7(a)所示,得出该 TSC 在 4T 结构下稳态的光电效率可达 25.2%。Lehr 等人^[27]从数值模型角度出发,比较了图 7(b)所示的 3 种结构电池的优缺点

点,模拟结果表明,在平均反照率为 35% 的条件下 2T 型结构的 PVK/c-Si 比单结 c-Si 的能量产出相对提高了约 24%~38%。Iqbal 等人^[28] 用光电模拟的方法同样对 PVK/c-Si 和 c-Si 进行了计算分析,如图 7(c) 所示。结果表明,PVK 型 TSC 的优化设计高度依赖于 PVK 的厚度和反照率,且在平均地球反照率为 30% 的情况下,PVK/Si 叠层电池的光电转化效率约为 32.5%。Cherif 等人^[29] 则是将 PVK/c-Si 叠层电池结合聚光系统共同分析,通过模拟得出在各种条件下都能获得较高的聚光效率,其中在一倍太阳常数下,光电转化效率可达到 30.52%,而聚光后在 70 倍太阳常数下峰值效率可达到 34.62%。

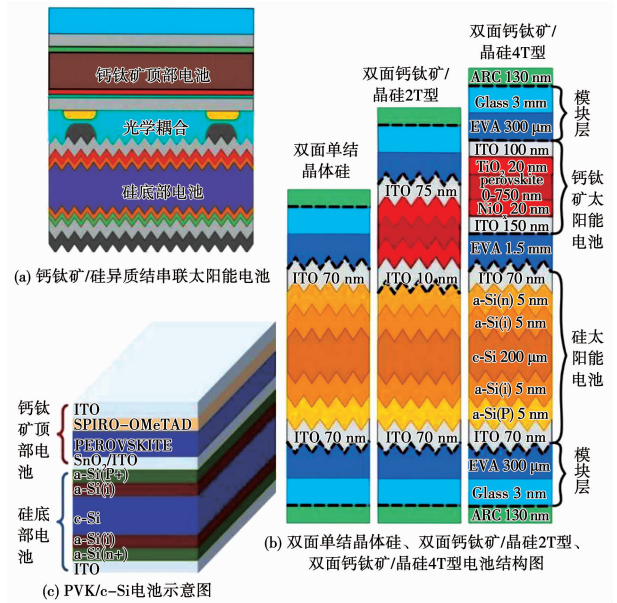


图 7 PVK/c-Si 结构图

Fig. 7 Structural diagram of PVK/c-Si

由于 PVK 材料易于制造且禁带宽度可调,将其作为顶部电池后,学者们又尝试着同时将 PVK 材料使用在底电池中。Hossain 等人^[30] 将宽禁带(约 1.72 eV)的碘化铅(Pb-I-BR)和窄禁带(约 1.16 eV)的锡碘铅(Sn-Pb-I)分别作为叠层电池的上下两部分,并通过光学模拟法对其进行研究,得到其能量转换效率约为 31%。Wang 等人^[31] 在综述中指出,目前在双 PVK 材料的 TSC 中,顶层宽禁带 PVK 材料的研究已经较为成功,这也促进了 PVK-无机材料型 TSC 的发展,但高效底层窄禁带 PVK 材

料的缺乏制约了高效双 PVK 型 TSC 的发展。Lin 等人^[32] 针对此问题,将底层窄禁带 PVK 材料 Pb-Sn 中的混合物进行优化,使得其中 Sn 的空穴数减少,在将窄带隙 PVK 中的电荷载流子扩散长度增加到 3 μm 后测量得出该电池的光电转化效率达到 24.8%。CIGS 带隙约为 1.1 eV,在 TSC 中属于较为理想的底部电池材料。Josšt 等人^[33] 针对 PVK-CIGS 型 TSC 中 CIGS 材料的粗糙形态致使顶部电池分流问题,通过原子层沉积法在 CIGS 上表面沉积 10 nm 厚的 NiO_x,使得 PVK 直接沉积在粗糙 CIGS 的顶部,从而在忽略 CIGS 粗糙形态的同时减轻顶部电池分流,实验结果表明,该电池能稳定获得 21.6% 的光电转化效率。Shen 等人^[34] 从材料改性角度出发,通过在四元阳离子(铯/铷/甲酰胺/甲铵)中引入掺铟氧化锌(IZO)透明导电氧化物作为前接触层,研制出响应快、滞后低的高效 n-i-p 半透明 PVK 太阳电池,并将该电池与单片效率为 16.5% 的 CIGS 电池机械重叠,模拟得出 TSC 的效率为 23.9%。

Jacobsson 等人^[35] 则从 TSC 的结构入手,针对 2T 型 PVK-CIGS 叠层电池中各材料的堆叠顺序对其效率的影响进行研究。将效率约为 14% 的 CIGS 和效率约为 12% 的 PVK 结合,其优化后的结构得到了效率约为 16% 的 2T 型 TSC,并指出如果能改善 PVK-CIGS 二者的光学匹配,2T 型 TSC 将更有竞争力。虽然 PVK-CIGS 型 TSC 在上述报道中效率仍然可观,但该类型 TSC 的制备仍然非常具有挑战性,所以到目前为止相关报道不多。

当然,TSC 除了上述 2 层叠层电池外,3 层叠层太阳能电池近年来随着工艺的逐渐进步也得到大量的发展。理论上,TSC 中子电池的层数越多光电转化效率就越高,但工艺上 TSC 中上层电池制备过程中将不可避免地损害下层电池,因此子电池节数越多,对中间层制备工艺的要求越高,制备过程越困难,同时也会影响到电池串联后电流、晶格的匹配。因此,三结或更多结 TSC 近几年的报道数量远少于双结 TSC。但在同等效率条件下,TSC 能减少光伏电池的实际面积,相当于同时减少了聚光器和冷却器的体积。

3 光伏冷却及热能利用技术

光伏板的工作温度在光伏转换过程中起着核心作用,其光电效率、输出功率以及电池使用寿命都与工作温度呈线性降低的关系^[36]。研究表明,晶硅电池在 25 ℃ 左右时温度每上升 1 ℃,其效率将降低 0.4% ~0.45%^[37]。尤其在 CPV/T 系统中,经过聚光后的高密集太阳能投射在光伏电池表面形成高温,这不仅要求光热系统具有更为有效的冷却方式,也要求系统中电池具有更低的温度系数。需要说明的是,不同于常规 PV 或 CPV 系统中冷却技术的散热要求,CPV/T 系统中光伏板冷却技术不仅要求高效带走光伏板内的热量,更强调热能收集后的二次再利用。一些传热能力小或热能难以利用的冷却技术,例如风冷和脉冲喷水液冷等,下文不进行展开。

3.1 冷却技术

3.1.1 水冷技术

水因具有比热高、来源广的特点,被学者们广泛应用于光伏冷却领域。Du 等人^[38]在光伏板背面添加内含 8 条水通道铝板,在聚光比为 8.5 的实验条件下测试该光伏板的性能,并用无聚光、无冷却的同类型光伏板作为实验对照组。结果表明,设有冷却的光伏电池全天平均表面温度高于后者不超过 3 ℃,输出电量却是后者的 4.7 ~5.2 倍。Fakouriy-an 等人^[39]则是在光伏板背面安装开有均匀细孔的铝板,让水更加均匀且密集的流过光伏板背面,通过实验得出使用冷却系统的单晶硅电池光电转化效率较不使用冷却系统提高了 12.8%,太阳能综合利用效率达到 61.7%。

Rosa Clot 等人^[40]从光伏板顶部入手提出集成热电光伏板的概念,如图 8 所示。太阳能电池上流过厚约 2.5 cm 的水层吸收红外辐射,而对可见光以及短波红外线几乎不产生影响。模拟结果表明,与相同尺寸的标准光伏面板相比,电效率的最大增幅约为 2.0%,年均光伏转换效率约为 13%,且能产生平均温度约为 40 ℃ 的热水。Nahar 等人^[41]的研究与 Rosa Clot 等人相反,将流动水层直接贴于光伏板底部并取消用作传热的金属板,如图 9 所示。通过实验和模拟对底部平行板流动性能进行了分析,分

析结果表明,总效率提高了 20%,最大光电转换效率为 10%。Ramdani 等人^[42]在将光伏电池上部通水与底部通水两种冷却方式进行比较,模拟结果显示,采用顶部通水冷却使得光伏电池温度在 68 ℃ 以下,远低于下部冷却方式,并指出上部通道高度中水层厚度约为 3.6 cm 时最利于光伏板的冷却。

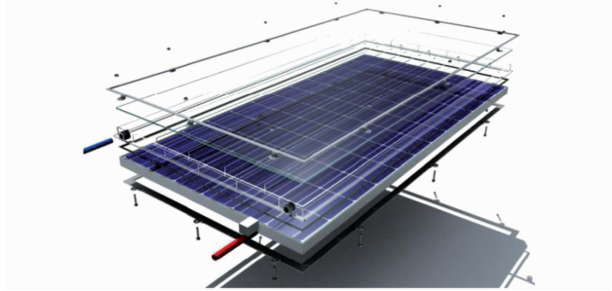


图 8 上置水流通道示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the upper water flow channel

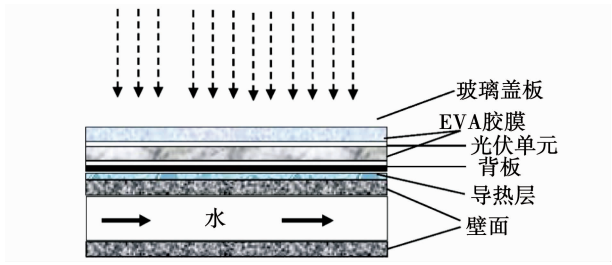


图 9 下置水流通道示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the lower water flow channel

3.1.2 纳米流体冷却技术

一些学者在介质中添加纳米粒子以改进介质的性能,从而达到强化冷却的效果。Moh 等人^[43]使用石墨烯纳米水溶液作为冷却介质通入光伏板底部 12 个微通道中。实验结果表明,在溶液流速为 1.11 L/min 时,该介质的最高效率与水相比提升了 42%,工作温度低于 45 ℃ 时的最高效率较不冷却条件相比提高了 54%。Jia 等人^[44]在光伏板底部安装了管板式散热结构,比较了 Al₂O₃ 水纳米流体和 TiO₂ 水纳米流体在光伏板冷却中的性能。实验结果表明,两者性能相差不大且前者的冷却性能优于后者,使用两种不同介质的光伏板表面最大温差不超过 0.5 ℃,综合转换效率之差不得超过 0.5%。Hissouf 等人^[45]研究了太阳辐射强度为 800 W/m² 时 Cu 和 Al₂O₃ 纳米水溶液对光伏板散热效果的影响,模拟结

果表明 Cu 纳米流体的冷却效果要优于 Al₂O₃ 纳米流体,Cu 纳米流体的冷却温度比纯水低 3.6 ℃,且 Cu 纳米流体较纯水而言其热效率和电效率分别提高了 4.1% 和 1.9%。

Han 等人^[46]将 Ag - CoSO₄ 纳米流体置于光伏板顶部充当光谱分束器,模拟结果表明,Ag - CoSO₄ 纳米流体较 Ag - 水纳米流体能产生更小的短路电流,但也提到纳米流体的长期稳定性需要重点探究。Xiao 等人^[47]将光伏板顶部纳米流体的分光作用与底部安装吸收板的冷却作用相结合,设计了上下双通道冷却系统,模拟得出使用双通道系统冷却的总能效提高了 3.17%。

纳米流体虽然能提升冷却效果,但不能直接用作生活热水,若需要则必须要额外安装换热器,这限制了纳米流体作为冷却介质在光伏光热建筑一体化中的推广应用,且使用纳米流体提高的热效率很可能被换热器损失掉。

3.1.3 热管冷却技术

在日常使用中,无论是水还是纳米流体,在外界环境温度较低时都容易发生冻结,在热应力作用下可能会破坏光伏板芯结构。针对此问题,Zhang 等人^[48]建立了热管式冷却光伏板的数值模型,根据实验结果,建议在温和气候地区热管的工质采用 H₂O,寒冷气候地区采用 R134a。

表 3 光伏电池液冷相关成果总结

Tab. 3 Summary of achievements related to liquid cooling of photovoltaic cells

电池类型	冷却方法	测试条件	能效提升/%	电池温度
M - Si ^[39]	底置铝板(0.9 × 0.45 × 0.01),均匀微孔通道	倾斜 31 ℃,室外实测(伊朗 德黑兰)环境温度 32 ℃	0.95(E)	≤60 ℃
Pc - Si ^[40]	上置聚碳酸酯盒子,内含高 2.5 cm 的水流层	倾斜 25 ℃,辐射强度 500 ~ 700 W/m ² ,室外实测(意大利 比萨)	30(T)	≤70 ℃(最不利环境)
Pc - Si ^[41]	无吸收板直接底置铝通道水流层	辐射强度 1 000 W/m ² ,环境温度、入口水温 34 ℃,进水流速 0.000 7 m/s	22.1(E + T)	温度分布较不均衡
Pc - Si ^[42]	上置高为 3 cm 的水流通道	辐射强度 1 000 W/m ² ,环境温度、入口水温 34 ℃,进水流速 0.000 7 m/s	较文献[52]提升约 10(E + T)	≤68 ℃

注:E 为电能;T 为热能

虹吸热管虽然传热能力强,但其性能受重力影响较大,不利于光伏板在水平方向以及较小倾斜角时安装。由于脉动热管的推动力主要来源于冷热端的压差,能够相对较好地克服这一因素,且脉动热管没有吸液芯,在体积上更小、结构上更简单。Alizadeh 等人^[49]对单回路脉动热管在光伏冷却中的性能进行了数值模拟,并与同等尺寸的铜翅片进行散热性能比较,结果表明,较于铜翅片热管能使光伏板表面温度降幅增加 11.2 ℃。随后 Alizadeh 等人^[50]又在光伏板底置平板式脉动热管并研究其冷却效果,比较了冷凝段置于恒温水中主动散热与置于空气中被动散热两种方案,主动冷却效率较被动冷却效率高 12%。Kavoosi Balotaki 等人^[51]将脉动热管贴在倾斜光伏板底部,在光伏板底部上侧用镀锌板

制作小水箱用于脉动热管冷凝段的散热,如图 10 所示。这不仅使得光伏板在水箱部分的散热增强,也避免了脉动热管在空气中的热损失。实验表明,在填充率为 45%、水流量为 0.05 kg/s、光伏板倾角 30°的条件下,12:30 ~ 14:30 时可使光伏板温度降低 20 ℃。

无论是常规热管还是脉动热管的使用均在一定程度上减少了水泵的耗功,且能够有效避免冬季结冰和吸收板腐蚀等问题。但 CPV/T 系统中光伏板往往要随着聚光器系统旋转,不同的倾角将会影响到热管的冷却性能,难以持续稳定冷却。此外,现行研究中,往往聚焦于 PV 系统,而对于高热流密度的 CPV 系统,目前对其对应的冷却技术的研究仍然较少^[52]。

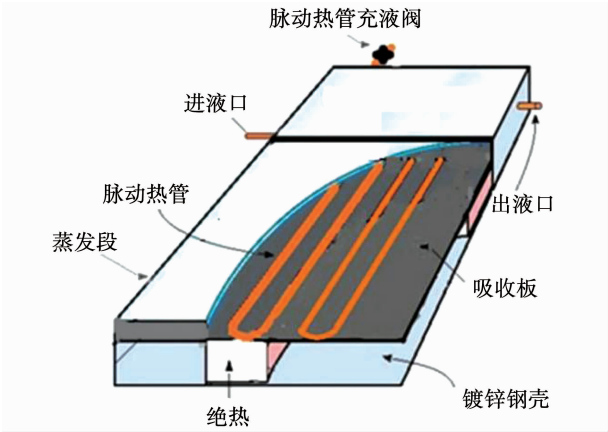


图 10 脉动热管冷却光伏板示意图

Fig. 10 Schematic diagram of pulsating heat pipe cooling photovoltaic panel

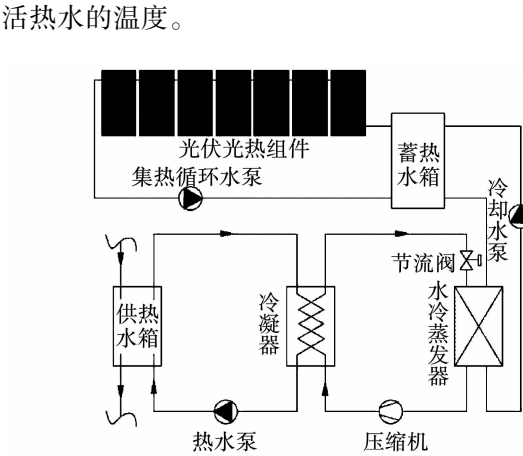


图 11 蓄热型 PV/T 与热泵一体化原理图

Fig. 11 Schematic diagram of integration of thermal storage PV/T and heat pump

3.2 热能利用技术

热能利用方式可以分为热能式利用、制冷利用以及发电利用三个方面。

3.2.1 热能式利用

曲明璐等人^[53]利用循环泵将流经光伏板后的水储存于集热水箱中作为热泵的热源,通过热泵将热能收集于供热水箱中并用于生活热水供应,其结构如图 11 所示。Ruoping 等人^[54]不仅将光伏余热用于生活热水,还将一部分热量储存在土壤中,以缓解华北地区地源热泵在冬季吸热多、夏季放热少而导致的土壤热量不平衡问题。模拟结果表明,光伏组件的综合性能系数达到 66%,但这将大幅降低生

光伏余热近年来也逐步应用于工业领域,Pounraj 等人^[55]让海水流经光伏板使海水预热以减少化石燃料使用,如图 12 所示。预热后的海水由帕尔帖装置先加热蒸发再冷却凝结以实现海水蒸馏,其中系统用电主要由光伏板提供。实验结果表明,系统的产率约为传统蒸馏器的 6.5 倍。Kosan 等人^[56]将余热用于薄荷叶的干燥,实验发现,所提出的光伏-辅助热泵干燥系统的 COP 为 4.18,薄荷叶的含水率能在 230 min 内从 1 迅速降至 0.02。总的来说,目前研究较多的系统仍为 PV/T,由于其产生的余热温度低、热量少,在工业上的应用并不广泛。

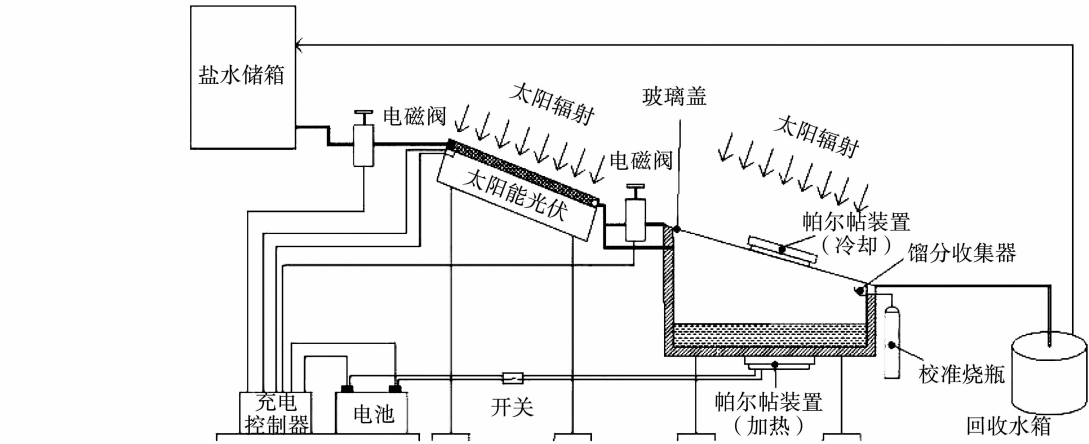


图 12 混合 (PV/T) 太阳能蒸馏器示意图

Fig. 12 Schematic diagram of hybrid (PV/T) solar distiller

多考虑 TSC 在 CPV/T 系统中的应用。

(3) 在现行研究的光伏冷却以及余热利用技术中,研究中心仍为 PV 系统,而对于高热量密度的 CPV 系统,目前研究仍然较少。此外,冷却技术不应仅仅局限于散热,也应注意热量的收集方法以及利用途径的综合研究。

CPV/T 系统由于需要给光伏电池单独匹配聚光系统,在经济性上,相对于 PV 系统以及 PV/T 系统更适合于单户家庭而不是集中发电,故系统的小型化和高性价比将成为其推广应用的关键。

参考文献:

- [1] KERN JR E C, RUSSELL M C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems[R]. Lexington, USA: Lincoln Lab., Massachusetts Inst. of Tech., 1978.
- [2] COVENTRY J, ANDRAKA C. Dish systems for CSP[J]. *Solar Energy*, 2017, 152: 140 – 170.
- [3] XU N, JI J, SUN W, et al. Numerical simulation and experimental validation of a high concentration photovoltaic/thermal module based on point-focus Fresnel lens[J]. *Applied Energy*, 2016, 168: 269 – 281.
- [4] LEUTZ R, SUZUKI A, AKISAWA A, et al. Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators [J]. *Solar Energy*, 1999, 65 (6): 379 – 387.
- [5] SHARMA M K, BHATTACHARYA J. A novel stationary concentrator to enhance solar intensity with absorber-only single axis tracking[J]. *Renewable Energy*, 2020, 154: 976 – 985.
- [6] ANCONA M A, BIANCHI M, DIOLAITI E, et al. A novel solar concentrator system for combined heat and power application in residential sector[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1199 – 1209.
- [7] COVENTRY J, ANDRAKA C. Dish systems for CSP[J]. *Solar Energy*, 2017, 152: 140 – 170.
- [8] LOVEGROVE K, BURGESS G, PYE J. A new 500 m² paraboloidal dish solar concentrator[J]. *Solar Energy*, 2011, 85 (4): 620 – 626.
- [9] YAN J, PENG Y, CHENG Z. Optimization of a discrete dish concentrator for uniform flux distribution on the cavity receiver of solar concentrator system[J]. *Renewable Energy*, 2018, 129: 431 – 445.
- [10] MENG X, SELAMI N, KNOX A R, et al. A novel absorptive/reflective solar concentrator for heat and electricity generation: an optical and thermal analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 114: 142 – 153.
- [11] WANG G, WANG F, CHEN Z, et al. Experimental study and optical analyses of a multi-segment plate (MSP) concentrator for solar concentration photovoltaic (CPV) system[J]. *Renewable Energy*, 2019, 134: 284 – 291.
- [12] USTAOGU A, OZBEY U, TORLAKLI H. Numerical investigation of concentrating photovoltaic/thermal (CPV/T) system using compound hyperbolic-trumpet, V-trough and compound parabolic concentrators[J]. *Renewable Energy*, 2020, 152: 1192 – 1208.
- [13] 陈海飞. 高倍聚光光伏光热综合利用系统的理论和实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [14] CHEN Hai-fei. Theoretical and experimental research on the comprehensive utilization system of high concentration photovoltaics [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [15] HUANG X, YUAN Y, SHUAI Y, et al. Development of a multi-layer and multi-dish model for the multi-dish solar energy concentrator system[J]. *Solar Energy*, 2014, 107: 617 – 627.
- [16] WANG J, YANG S, JIANG C, et al. A novel 2-stage dish concentrator with improved optical performance for concentrating solar power plants[J]. *Renewable Energy*, 2017, 108: 92 – 97.
- [17] SHANKS K, SARMAH N, FERRER – RODRIGUEZ J P, et al. Theoretical investigation considering manufacturing errors of a high concentrating photovoltaic of Cassegrain design and its experimental validation[J]. *Solar Energy*, 2016, 131: 235 – 245.
- [18] LOKESWARAN S, MALLICK T K, REDDY K S. Design and analysis of dense array CPV receiver for square parabolic dish system with CPC array as secondary concentrator[J]. *Solar Energy*, 2020, 199: 782 – 795.
- [19] CHONG K K, YEW T K, WONG C W, et al. Dense-array concentrator photovoltaic prototype using non-imaging dish concentrator and an array of cross compound parabolic concentrators[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 898 – 911.
- [20] 贺春禄, 褚君浩. 全球已掀起高效低成本太阳能电池研发浪潮[J]. *高科技与产业化*, 2019 (7): 16 – 17.
- [21] HE Chun-lu, CHU Jun-hao. The world has set off a wave of research and development of high-efficiency and low-cost solar cells [J]. *High-tech and Industrialization*, 2019 (7): 16 – 17.
- [22] OMAR A, ALI M S, ABD RAHIM N. Electron transport properties analysis of titanium dioxide dye-sensitized solar cells (TiO₂-DSSCs) based natural dyes using electrochemical impedance spectroscopy concept: a review [J]. *Solar Energy*, 2020, 207: 1088 – 1121.
- [23] POLMAN A, KNIGHT M, GARNETT E C, et al. Photovoltaic materials: present efficiencies and future challenges [J]. *Science*, 2016, 352 (6283): eaad4424.
- [24] 王文璇, 王建邱, 郑 众, 等. 叠层结构的有机太阳能电池研究进展[J]. *化学学报*, 2020, 78 (5): 382 – 396.
- [25] WANG Wen-xuan, WANG Jian-qiu, ZHENG Zhong, et al. Research progress of organic solar cells with laminated structure [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2020, 78 (5): 382 – 396.

- [23] WANG Z, SONG Z, YAN Y, et al. Perovskite-a perfect top cell for tandem devices to break the S-Q limit[J]. *Advanced Science*, 2019, 6(7): 1801704.
- [24] FANG Z, ZENG Q, ZUO C, et al. Perovskite-based tandem solar cells[J]. *Science Bulletin*, 2020.
- [25] UNGER E L, KEGELMANN L, SUCHAN K, et al. Roadmap and roadblocks for the band gap tunability of metal halide perovskites [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5 (23): 11401 – 11409.
- [26] WERNER J, BARRAUD L, WALTER A, et al. Efficient near-infrared-transparent perovskite solar cells enabling direct comparison of 4-terminal and monolithic perovskite/silicon tandem cells [J]. *ACS Energy Letters*, 2016, 1(2): 474 – 480.
- [27] LEHR J, LANGENHORST M, SCHMAGER R, et al. Energy yield of bifacial textured perovskite/silicon tandem photovoltaic modules [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 208: 110367.
- [28] IQBAL S, RIAZ K, IMRAN H, et al. Computational modelling of monolithically stacked perovskite/silicon tandem solar cells using monofacial and bifacial designs[J]. *Optik*, 2020, 206: 163427.
- [29] CHERIF F E, SAMMOUDA H. Strategies for high performance perovskite/c-Si tandem solar cells: effects of bandgap engineering, solar concentration and device temperature[J]. *Optical Materials*, 2020, 106: 109935.
- [30] HOSSAIN M I, SALEQUE A M, AHMED S, et al. Perovskite/perovskite planar tandem solar cells: a comprehensive guideline for reaching energy conversion efficiency beyond 30% [J]. *Nano Energy*, 2021, 79: 105400.
- [31] WANG C, SONG Z, LI C, et al. Low-bandgap mixed tin-lead perovskites and their applications in all-perovskite tandem solar cells [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(47): 1808801.
- [32] LIN R, XIAO K, QIN Z, et al. Monolithic all-perovskite tandem solar cells with 24.8% efficiency exploiting comproportionation to suppress Sn (II) oxidation in precursor ink[J]. *Nature Energy*, 2019, 4(10): 864 – 873.
- [33] JOSŠT M, BERTRAM T, KOUSHIK D, et al. 21.6%-Efficient monolithic perovskite/Cu (In, Ga) Se₂ tandem solar cells with thin conformal hole transport layers for integration on rough bottom cell surfaces [J]. *ACS Energy Letters*, 2019, 4 (2): 583 – 590.
- [34] SHEN H, PENG J, JACOBS D, et al. Mechanically-stacked perovskite/CIGS tandem solar cells with efficiency of 23.9% and reduced oxygen sensitivity [J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(2): 394 – 406.
- [35] JACOBSSON T J, HULTQVIST A, SVANSTRÖM S, et al. 2-Terminal CIGS-perovskite tandem cells: a layer by layer exploration [J]. *Solar Energy*, 2020, 207: 270 – 288.
- [36] SKOPLAKI E, PALYVOS J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(5): 614 – 624.
- [37] DUCK B C, FELL C J, ANDERSON K F, et al. Determining the value of cooling in photovoltaics for enhanced energy yield[J]. *Solar Energy*, 2018, 159: 337 – 345.
- [38] DU B, HU E, KOLHE M. Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(9): 6732 – 6736.
- [39] FAKOURIYAN S, SABOOHI Y, FATHI A. Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production [J]. *Renewable Energy*, 2019, 134: 1362 – 1368.
- [40] ROSA-CLOT M, ROSA-CLOT P, TINA G M. TESPI: thermal electric solar panel integration[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(10): 2433 – 2442.
- [41] NAHAR A, HASANUZZAMAN M, RAHIM N A. Numerical and experimental investigation on the performance of a photovoltaic thermal collector with parallel plate flow channel under different operating conditions in Malaysia [J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 517 – 528.
- [42] RAMDANI H, OULD-LAHOUCINE C. Study on the overall energy and exergy performances of a novel water-based hybrid photovoltaic-thermal solar collector [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 222: 113238.
- [43] MOH T S Y, TING T W, LAU A H Y. Graphene nanoparticles (GNP) nanofluids as key cooling media on a flat solar panel through micro-sized channels[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 282 – 286.
- [44] JIA Y, RAN F, ZHU C, et al. Numerical analysis of photovoltaic-thermal collector using nanofluid as a coolant [J]. *Solar Energy*, 2020, 196: 625 – 636.
- [45] HISSOUF M, NAJIM M, CHAREF A. Numerical study of a covered photovoltaic-thermal collector (PVT) enhancement using nanofluids[J]. *Solar Energy*, 2020, 199: 115 – 127.
- [46] HAN X, CHEN X, WANG Q, et al. Investigation of CoSO₄-based Ag nanofluids as spectral beam splitters for hybrid PV/T applications[J]. *Solar Energy*, 2019, 177: 387 – 394.
- [47] XIAO L, GAN L N, WU S Y, et al. Temperature uniformity and performance of PV/T system featured by a nanofluid-based spectrum-splitting top channel and an S-shaped bottom channel[J]. *Renewable Energy*, 2021, 167: 929 – 941.
- [48] 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.

[49] ALIZADEH H ,CHASEMPOUR R ,SHAFII M B ,et al. Numerical simulation of PV cooling by using single turn pulsating heat pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018, 127:203 – 208.

[50] ALIZADEH H,NAZARI M A,GHASEMPOUR R,et al. Numerical analysis of photovoltaic solar panel cooling by a flat plate closed-loop pulsating heat pipe [J]. Solar Energy, 2020, 206: 455 – 463.

[51] KAVOOSI B H,SAIDI M H. Design and performance of a novel hybrid photovoltaic-thermal collector with pulsating heat pipe (PVTPHP) [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2019, 43 (S1): 371 – 381.

[52] NIŽETIĆ S,GIAMA E,PAPADOPOULOS A M. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, part II: active cooling techniques [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 155: 301 – 323.

[53] 曲明璐,卢明琦,宋小军,等. 蓄热型太阳能光伏光热组件与热泵一体化系统模拟研究 [J]. 流体机械,2020,48 (8): 82 – 88.

QU Ming-lu, LU Ming-qi, SONG Xiao-jun, et al. Simulation research on integrated system of thermal storage solar photovoltaic module and heat pump [J]. Fluid Machinery, 2020, 48 (8): 82 – 88.

[54] RUOPING Y, XIANGRU Y, XIAOHUI Y, et al. Performance study of split type ground source heat pump systems combining with solar photovoltaic-thermal modules for rural households in north China [J]. Energy and Buildings,2021,249:111190.

[55] POUNRAJ P,PRINCE WINSTON D,KABEEL A E,et al. Experimental investigation on Peltier based hybrid PV/T active solar still for enhancing the overall performance [J]. Energy Conversion and Management,2018,168:371 – 381.

[56] KOŞAN M,DEMIRTAŞ M,AKTAŞ M,et al. Performance analyses of sustainable PV/T assisted heat pump drying system [J]. Solar Energy,2020,199:657 – 672.

[57] GUO J,BILBAO J I,SPROUL A B. A novel solar cooling cycle-a ground coupled PV/T desiccant cooling (GPVTDC) system with low heat source temperatures [J]. Renewable Energy,2020,162: 1273 – 1284.

[58] ZHAO Q,ZHANG H,HU Z,et al. Performance evaluation of a new hybrid system consisting of a photovoltaic module and an absorption heat transformer for electricity production and heat upgrading [J]. Energy,2021,216:119270.

[59] ZHAO Q,ZHANG H,HU Z,et al. Achieving a broad-spectrum photovoltaic system by hybridizing a two-stage thermoelectric generator [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 211:112778.

[60] SONG Z,JI J,CAI J,et al. The performance comparison of the direct-expansion solar assisted heat pumps with three different PV evaporators [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213:112781.

[61] YUAN W,LI H,HAO H,et al. Performance optimization of a photovoltaic solar cell-based hybrid system [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy,2018,10(4):44702.

(丛 敏 编辑)