文章编号:1674-2974(2024)01-0201-16 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024019

基于热管的光伏冷却技术研究进展

曹静宇[1,2],郑玲[1],彭晋卿[1,2†],宋佳明[1],李念平[1,2],裴刚[3]
[1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
3. 中国科学技术大学 工程科学学院,安徽 合肥 230026]

摘 要:光伏发电技术的发展和推广是实现碳中和的关键途径之一,但传统光伏电池效率会随自身温度升高而下降,故采取冷却措施降低其温度成为光伏领域的热点问题,其中具有结构简单、传热效率高、可塑性强、被动运行等优点的热管近年来受到了重点关注,而相关研究现状尚待分析汇总.本文从不同热管类型的视角对该领域进行了深入探讨,涵盖热管及其与天空辐射制冷、相变储能、热电制冷和纳米技术耦合下的多种冷却方式,并结合基于热管的光伏冷却技术的发展现状讨论其系统性能、经济和环境效益,对该研究方向进行了展望.综合既有研究发现,热管冷却是一种环保、经济且可行的光伏冷却方式,能有效降低光伏温度并提升其均匀性,且在技术耦合下可实现太阳能与其他清洁能源的科学协同利用,提升其发电性能或实现制冷、储能等附加功能,其发展应用对推动节能减排事业有着积极意义.

关键词:热管;光伏;散热;聚光光伏
中图分类号:TM615 **文献标志码**:A

Research Progress of Heat Pipe-based Photovoltaic Cooling Technology

CAO Jingyu[1,2],ZHENG Ling[1],PENG Jinqing[1,2†],SONG Jiaming[1],LI Nianping[1,2],PEI Gang[3]
[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education(Hunan University), Changsha 410082, China;
3. College of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China]

Abstract: The development and promotion of photovoltaic power generation technology is one of the key solutions to achieve carbon neutrality, but the efficiency of conventional photovoltaic cells decreases with rising temperature. Thus, taking measures to reduce its temperature becomes a hot issue in the photovoltaic field, among which heat pipe with a simple structure, high heat transfer efficiency, strong plasticity, and passive operation has received attention in recent years. However, the research status of heat pipes in photovoltaic cooling has yet to be

* **收稿日期**:2023-03-13
基金项目:国家自然科学基金项目(52208105,52278104),National Natural Science Foundation of China(52208105,52278104);湖南省科技人才托举工程之"小荷"科技人才专项(2023TJ-X79),Xiaohe Sci-Tech Talents Special Funding under Hunan Provincial Sci-Tech Talents Sponsorship Program (2023TJ-X79);湖南省自然科学基金项目(2022JJ40057),National Natural Science Foundation of Hunan Province (2022JJ40057);重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX1215),Chongqing Municipal National Natural Science Foundation (CSTB2022NSCQ-MSX1215);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(531118010653),Fundamental Research Funds for the Central Universities(531118010653)
作者简介:曹静宇(1993—),男,安徽池州人,湖南大学副教授
† 通信联系人,E-mail:jqpeng@hnu.edu.cn

analyzed and summarized. Therefore, the field is discussed in depth from the perspective of different heat pipe types, covering heat pipes and various cooling modes coupled with sky radiant cooling, phase change energy storage, thermoelectric cooling, and nanotechnology in this review paper. Combined with the development status of photovoltaic cooling technology based on heat pipes, the system performance, economic, and environmental benefits are discussed to prospect the research direction in this field. Based on the existing research, it is found that heat pipe cooling is an environmentally friendly and economically feasible method of photovoltaic cooling, which can effectively reduce the temperature of photovoltaic, improve its temperature uniformity, and realize the scientific collaborative utilization of solar energy and other clean energy under the technical coupling to improve its power generation performance or realize refrigeration, storage, and other additional functions. Its development and application will contribute to the cause of energy saving and emission reduction.

Key words: heat pipes; photovoltaic; heat dissipation; concentrating photovoltaic

可再生能源利用对推动社会可持续发展的意义重大,而太阳能因其分布广泛、蕴含能量丰富、安全清洁等优点正成为最受关注的可再生能源之一. 目前,太阳能利用技术主要有太阳能光电技术(PV)、太阳能光热技术(PT)和太阳能光电光热综合利用技术(PV/T),其中最常用的是太阳能光电技术.

近年,太阳能光电技术取得长足进展[1],但传统光伏单位输出功率成本高,发电效率低[2-3],一般仅可达到10%~20%[4],因此如何提升光伏电池发电效率是光电技术亟待解决的问题. 在诸多影响因素中,光伏电池的工作温度对其光电效率的影响显著,具体体现在其温度升高会使得短路电流增加量小于开路电压的减少量,导致发电功率降低[5];已有研究表明,大部分电池效率会随着温度的升高呈现出近似线性下降的趋势[6-7]. 因此,光伏电池冷却对于提高光电效率有着重要意义. 值得注意的是,聚光光伏(CPV)通过透镜或反射镜聚光以提升光伏电池可获得的太阳辐射强度[8-9],减小电池面积、提升发电效率的同时,也带来局部高热流[10]和显著的温度不均匀性[11],严重影响光伏电池的性能和寿命,因而冷却和均温需求更为迫切[12].

目前常用的光伏冷却方式可分为主动、被动两种[13]:前者指消耗外部或自身电能来驱动泵或风机等动力设备,通过冷却介质的强制流动来带走光伏板的热量,如水和空气的强制对流、射流冲击冷却、液体浸没冷却等;后者通常不消耗电能,通过一些冷却介质的自然流动散热,除自然对流冷却外还有相变材料冷却、热管冷却等. 其中热管冷却光伏通常指工质吸收光伏电池所产生的热量蒸发并将其转移至热管冷凝段,基于热管的光伏冷却技术也因其结构简单、无能耗、高效散热等优点引起众多学者的关注[7]. 早在1979年,Russell等[14]就提出利用热管来转移光伏所产生的废热的设想. 近年来,随着热管结构形式以及制冷技术的多元化发展,热管及热管与其他冷却技术耦合用于光伏冷却的方式愈发多样. 已有较多相关综述对光伏冷却或光电光热综合利用技术进行总结探讨:Gharzi等[15]对PV和CPV的主动、被动和组合冷却方式进行分类总结,并根据不同的环境条件和性能要求为光伏推荐最佳的冷却方式. Zhang等[5]总结了PV冷却技术的最新进展及冷却方法的影响因素. Kandeal等[16]根据三种基本传热模式对PV的冷却方式进行总结分类. Salameh等[17]探讨了通过不同冷却技术实现PV温度控制的方法并对PV和PV/T系统的环境和经济生命周期进行分析评价. Ghadikolaei[13]对PV的不同冷却方式的研究进行分类并比较不同冷却技术的优缺点,对未来PV冷却提出实用建议. Kandeal等[18]回顾使用纳米冷却系统改善PV性能的研究成果,并分析该领域的研究趋势. 邱昊等[19]根据聚光光伏电池组合方式以及聚光倍数的分类对国内外聚光光伏的冷却方式进行讨论分析,介绍各种技术的优越性和不足. Fikri等[20]总结相变材料和引入纳米技术后的相变材料在CPV/T中作为冷却和蓄热介质来提高光伏电池效率的最新工作和技术挑战. Pathak等[21]分类总结一些冷却光伏电池的实验和数值模拟研究以及探讨人工智能在其中发挥的作用,并对PV/T进行技术经济性分析. Panda等[22]总结PV的一些新型冷却方法并且进行对比分析,提出相关建议. 白浩良等[23]从间壁式冷却和

直接接触式冷却两个角度回顾近年来国内外在CPV冷却技术方面的研究现状及最新进展,并通过对比分析各冷却方式的优缺点和未来的研究重点.但总体上,大多数相关综述都仅将热管作为被动冷却的一部分进行简单论述,缺乏基于热管的光伏冷却技术这一专门领域的综述,更少有对热管与光伏结合方式及其优缺点的具体分析;另外,目前相关综述重点关注光电光热综合利用技术,而光伏组件往往工作在较高的温度区间[24],一定程度上忽视了侧重光伏冷却的热管研究进展.

针对上述问题及研究现状,为便于相关领域专家学者深入了解热管冷却光伏领域的发展现状,本文基于不同热管类型和热管与其他制冷技术的耦合方式对热管光伏冷却技术研究进展进行系统介绍,主要涵盖:1)热管传热原理及其分类;2)利用以热管为主的冷却技术和热管与其他制冷技术耦合的冷却技术冷却普通光伏和聚光光伏的相关研究;3)基于热管的光伏冷却技术目前的发展、所面临的挑战和未来展望.本文有助于相关领域学者快速全面地了解热管冷却光伏的方式以及与其他冷却技术耦合利用的优势和不足,为该技术的进一步发展和应用奠定基础.

1　热管传热原理

热管是一种利用介质在全封闭真空管内的相变来进行传热的高效被动传热元件[25],主要包括三大部分:蒸发段、绝热段和冷凝段.在蒸发段部分通常会设置有热源,热管内部工质吸热蒸发,到达冷凝段释放潜热冷凝,随之依靠重力作用或毛细芯结构重新回流至蒸发段[26].热管内部主要靠工质的气液相变传热,不需要在热源和散热器之间有很大的温度梯度[27],无须耗能即可具备较高的温度均匀性、导热性能和可变的热通量,且成本低廉、可靠性高、使用寿命长、结构简单多样,并可根据不同光伏组件的结构特点及散热需求自由设计.其已成为冷却光伏的一种重要且高效的方式,目前运用比较广泛的热管类型有有芯单管热管、环路热管、两相闭式重力热管、分离式热管、脉动热管和微通道热管.如图1(a)(b)所示,有芯单管热管和环路热管通常设置有吸液芯结构,而前者通常设置在管壁面,后者则一般设置在蒸发段,两者均可依靠毛细力反重力运行.如图1(c)(d)所示,两相闭式重力热管和分离式热管无芯结构,冷凝液在回流过程中所受阻力减小,可有效增加热管的径向流量,传热效率高,且临界热流密度比有芯热管更大,但在运行时受重力影响较大,须慎重考虑安装位置.另外,环路热管和分离式热管相比其余两者具有独特的环路结构,进一步将蒸汽管线和液体管线分开,使得蒸汽和液体的流向相同,即可最小化蒸汽和液体流动之间的夹带[28],消除夹带极限.

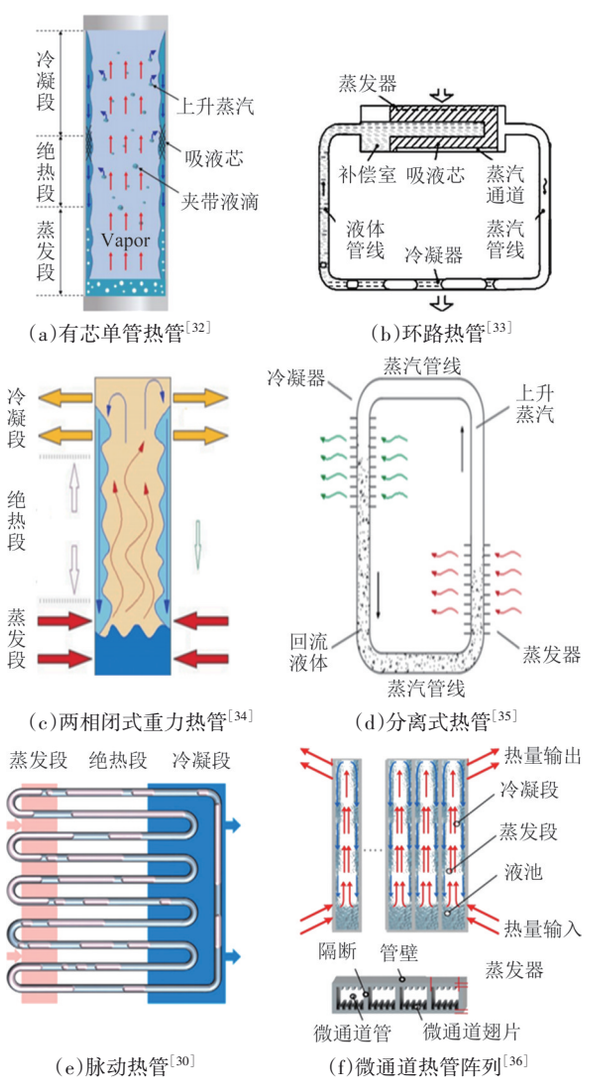


图 1　六种典型热管的结构图

Fig.1　Structure diagram of six typical heat pipe types

如图1(e)所示,脉动热管通常由一根长而弯曲的毛细管构成[29].除潜热传递机制,还可依靠内部气泡和液塞自发来回移动的对流换热来传递热量,故脉动热管的传热效率比其他类型热管高[30].如图1(f)所示,微通道热管是将微通道结构应用到热管当中达到强化热管传热的目的,其表面形状扁平,可与换热面有良好的接触,同时内部尺寸小,使通道内

蒸汽流速更高,对壁上液膜产生更高的剪切应力,加大蒸发率,提高热管效率[31]. 六种类型热管详细的比较分析见表 1.

表 1 六种典型热管的特征对比[35]

Tab.1 Features comparison of six typical heat pipe types[35]

分类	是否为环路	蒸发器有无吸液芯	驱动力	传热方向
有芯单管热管	否	有	毛细力	不定
环路热管	是	有	毛细力	不定
两相闭式重力热管	否	无	重力	竖直向上
分离式热管	是	无	重力	竖直向上
脉动热管	不定	无	主要为温差	不定
微通道热管	否	不定	微芯或微通道	不定

随着热管形式结构的不断创新,不同类型的热管划分往往并不明确,例如可在分离式热管的蒸发段增加芯结构来改善热管启动性能[37],在蒸发段引入微通道结构强化传热[38],在脉动热管中引入芯结构改善热管传热性能以及温度均匀性[39]等. 若无特殊说明,本文依旧按照前文所述的热管传热原理对其类型进行分类.

2 热管在光伏冷却中的应用

本文依据光伏热管散热技术的应用特性差异,将热管冷却光伏的研究分为两大类:1)以热管为主的冷却技术,即未使用其他冷却技术或热管处于主导地位;2)以热管为辅的耦合冷却技术,即热管冷却耦合其他冷却技术用来冷却光伏,着重于两种或者多种技术间的科学配合以达到理想的冷却效果.

2.1 以热管为主的冷却技术

在以热管为主的冷却技术中,现有研究多采用不同类型的热管与光伏结合,一般主要涉及有芯单管热管、两相闭式重力热管、环路热管、分离式热管、脉动热管和微通道热管(见图 2). 对于有芯单管热管和环路热管,毛细力作为热管驱动力,热管的放置方式较为自由,蒸发端的位置可高于冷凝器,对于普通光伏,无须考虑遮挡问题,适应性更强;但须考虑热管反重力运行的启动极限值以及回流冷凝液形成的阻力. 对于两相闭式重力热管以及分离式热管,在冷却过程中为保证热管在重力驱动下正常运行,需保持冷凝器的位置始终高于蒸发器,因此结构特殊,这两种热管形式在反射式聚光光伏的冷却中应用广泛. 脉动热管驱动力主要来自冷热源两端的温差,受重力的影响较小,故更适合用于水平放置或者倾斜角度较小的光伏板. 微通道热管的扁平结构可与光伏板有良好的接触并提升其温度均匀性,在冷却光伏组件领域应用较为广泛.

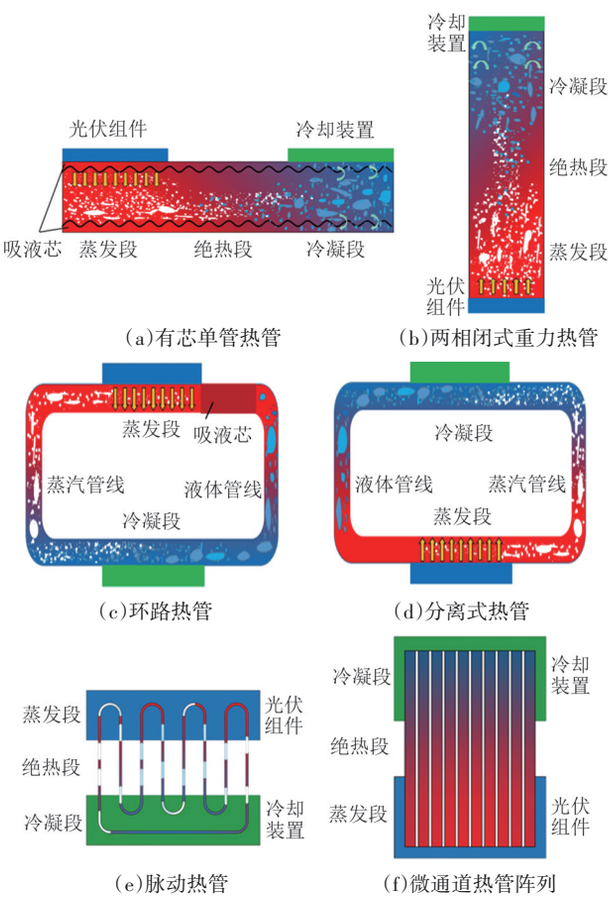


图 2 不同类型热管冷却光伏的示意图

Fig.2 Schematic diagram of different types of heat pipe cooling photovoltaics

对于蒸发段,通常采用机械连接如鞍座或直接连杆固定,或者采用热膏或导热双面胶将两者之间的缝隙填满,确保光伏板面和热管蒸发段接触良好,增加其导热系数. 此外,蒸发段还常采用电加热装置模拟光伏电池产生废热,采用一定厚度的保温棉将两者包裹完整,提高系统绝热性能. 对于冷凝段,通常有风冷和水冷两种冷却方式. 其中风冷使用空气作为冷却介质,空气简单易得且无毒无害,但其比热容较小,故冷却效果有限,最常见的一种结构形式为翅片散热[40-41],利用翅片结构增加冷凝段与空气接

触面积,强化换热能力.水冷即利用水的自然流动或强制对流带走光伏板废热,相较于风冷方式,其冷却效果可得到有效改善,但须考虑电绝缘性、冷却介质泄露以及冬季结冻的问题.

2.1.1　有芯热管

有芯热管一般涵盖有芯单管热管和环路热管,芯结构中使用最为广泛的是铜粉烧结吸液芯,其可使热管传热不受重力方向的影响,从而适用性更强,但同时由于其较为复杂的毛细芯结构会提升成本和加工难度,还会一定程度上限制回流冷凝液的流动速度,故关于其单独运用于光伏冷却的研究相对较少.Praveenkumar 等[42]使用四个翅片式有芯热管冷却光伏,并对其进行能量、㶲和经济性分析,通过实验发现,热管冷却最高可有效降低 9.93 ℃的光伏电池温度[图 3(a)].针对聚光光伏,Russell 等[14]和 Ye 等[43]设计了一种有芯单管热管冷却菲涅尔透镜聚光光伏的装置,冷却剂从热管中心流入流出,带走电池废热[图 3(b)].Anderson 等[44-45]提出一种铜芯两端带铝翅片的铜质热管冷却折射聚光光伏的方法[图 3(c)],可将光伏电池与环境的温差缩至 43 ℃.朱会元等[46]针对高倍聚光光伏均温散热的问题,提出一种利用不均匀铜粉作为烧结芯的平板式环路热管冷却光伏的方式[图 3(d)],研究了热管的负荷、倾角、冷凝器参数对其启动性能的影响.Huang 等[47]设计一种新型平板式有芯热管冷却单电池聚光光伏,管壁烧结芯结构不仅为液体回流提供动力,亦可改善蒸发段沸腾特性,另外设置的支撑结构增大蒸汽的扩散空间且缩短液体回流路径,可有效降低热管热阻,实验证明,冷却系统可将光伏电池效率提高 3.1%[图 3(e)].

2.1.2　两相闭式重力热管

两相闭式重力热管无吸液芯结构,冷凝液在回流过程中所受阻力减小,可有效增加热管的径向流量,传热效率高,且临界热流密度比有芯热管更大[48],因此广泛应用于聚光光伏的散热,近年来的相关研究汇总见表 2.

如图 4(a)所示,早在 1996 年,Akbarzadeh 等[49]就设计了一种聚光比为 20 的独特槽状反射面,并提出一种基于重力热管的光伏冷却方法,将电池输出功率提高近一倍.后续相关研究多基于此被动式光伏冷却理念进行热管结构改进及换热性能强化,如王子龙等[9, 50]设计一种用于碟式聚光光伏散热的重力热管,其蒸发段为长方体盒状,冷凝段外部设置翅片,内部为螺纹管结构,可避免因蒸汽速度过快而产生夹带极限,进而有效提升冷凝段换热效果[图 4(b)].李烨等[48]就此类似结构通过实验分析了充注量、聚光比、太阳辐射强度等因素对热管传热性能的影响,并指出热管充注率为 30% 时电池温度最低约

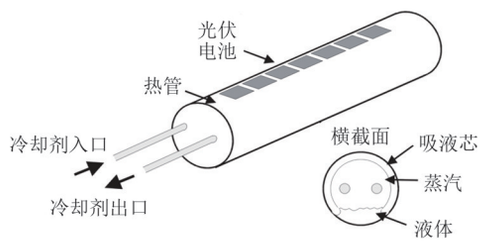
表 2　两相闭式重力热管冷却光伏的相关研究汇总

Tab.2　Summary of related research on two-phase closed thermosyphon cooling concentrating photovoltaic

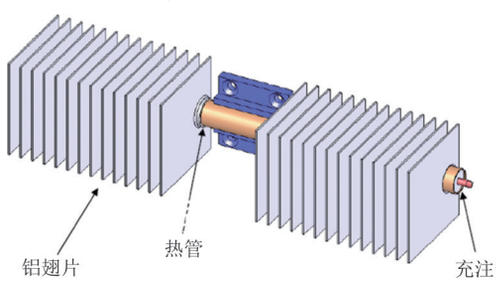
作者	热管结构	光伏类型(X 表示聚光度)	主要结论
Akbarzadeh 等[49]	冷凝段为翅片结构	20X,反射型聚光光伏	电池温度可降低到 46 ℃,系统的输出功率提高近一倍
Cheknane 等[54]	冷凝段带翅片	100~500X,反射型聚光光伏	丙酮的冷却效果优于水,200X 时的开路电压大概在 0.91 V
王子龙等[55]	蒸发段为盒状结构,冷凝段外部为翅片结构,内部为螺纹管结构	75~200X,高热流密度碟式聚光光伏	对蒸发段翅片结构进行优化,最优翅片结构单位长度散热量可达 857.2 W/m;光伏电池的温差在 5~9 K 之间
李烨等[48]	蒸发段为盒状结构,冷凝段外部为翅片结构,内部为螺纹管结构	50~275X,碟式聚光光伏	热管倾斜角为 30°时传热效果较好,蒸发段内的工质沸腾对光伏电池有一定的均温作用
陈海飞等[51]	双排管式	319~1 274X,聚光光伏	当光伏电池的表面温度相同时,热管式聚光光伏系统能够承受的聚光倍数远大于传统空风式和水冷式聚光光伏.
夏侯国伟等[52]	平板热管	78.57X,聚光光伏	在自然对流情况下,模拟电池温度不超过 100 ℃时,热管散热器可用于最大聚光比为 78.57 的系统
李琦芬等[53]	翅片热管	聚光光伏	加入热管散热器后,电池的温度可降至 305 K,温差只有 3 K



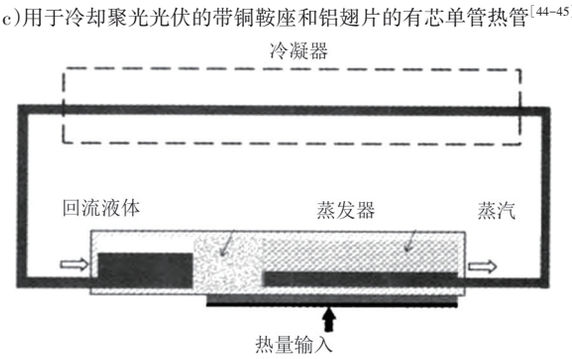
(a)多个带翅片有芯热管散热器冷却光伏[42]



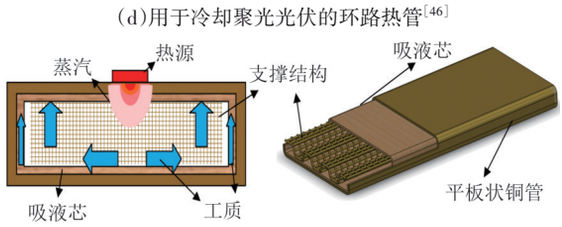
(b)用于冷却聚光光伏的有芯单管热管[14, 43]



(c)用于冷却聚光光伏的带铜鞍座和铝翅片的有芯单管热管[44-45]



(d)用于冷却聚光光伏的环路热管[46]



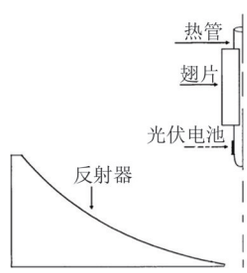
(e)平板式有芯热管冷却聚光光伏[47]

图3 有芯热管冷却光伏举例

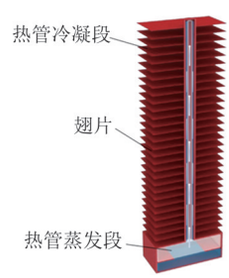
Fig.3 Examples of wicked heat pipes cooling photovoltaic module

67 ℃,而热管与电池之间的接触热阻是解决高倍聚光光伏散热的关键. 如图4(c)所示,陈海飞等[51]设计了一种双排热管冷却聚光光伏的装置,可提高热管换热效率,据分析,热管聚光光伏最高可承受的聚光倍数是水冷式光伏的2.5倍,风冷式光伏的12倍,且其在同一光伏温度下的发电量远高于后两者.

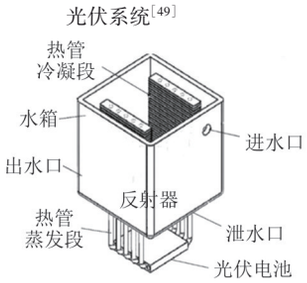
此外,平板型重力热管在解决聚光光伏的温度分布不均匀的问题上展现出独特优势,其扁平形状能减小扩散热阻,增大与光伏板的接触面积,内部工质流动可有效降低板面温差. 如图4(d)所示,夏侯国伟等[52]设计一种新型的平板热管,可将电池温差缩至6 ℃. 李琦芬等[53]针对高倍聚光光伏,分别设置小翅片散热系统和热管散热系统进行对比,通过数值模拟证明热管可将电池温差缩至3 ℃左右,而基板截面的温差最大也只有1 ℃左右.



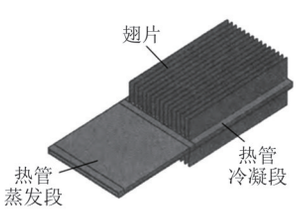
(a)重力热管冷却槽式聚光光伏系统[49]



(b)盒状蒸发器重力热管冷却聚光光伏[9]



(c)双排重力热管冷却聚光光伏[51]



(d)平板带翅片重力热管冷却聚光光伏[52]

图4 两相闭式热虹吸管冷却光伏举例

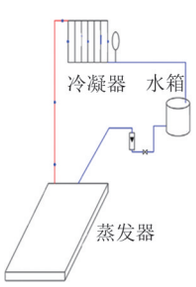
Fig.4 Examples of two-phase closed thermosyphons cooling photovoltaic module

由于两相闭式重力热管不存在复杂的吸液芯结构,初投资较低,另外,其原理结构较为简单,目前研究侧重于结构上的创新,例如改变热管通道数量、优化热管管壁结构以及改善换热端换热方式等,而对热管的充注率、工质、倾斜角度等自身因素的优化研究较少. 另外,热管自身存在的夹带极限在一定程度上也限制了其对光伏组件的冷却效果的提升.

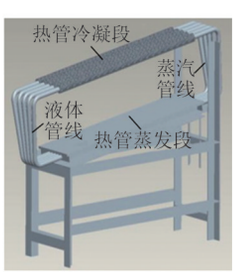
2.1.3 分离式热管

传统分离式热管兼具无芯、无夹带极限的优点,同时在光伏光热综合利用情况下具有不结冰及无水垢沉积的优势;由于在非聚光光伏冷却中需考虑冷凝器遮阳问题,故分离式热管更多用于聚光光伏冷却. Wang 等[56]提出了一种常压下新型的平板分离式

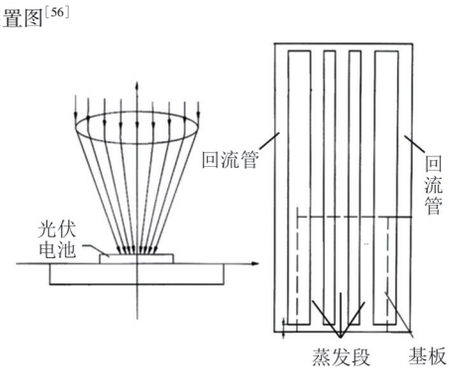
热管冷却系统,可用于常规或者低倍聚光光伏电池的散热.当热流密度为850 W/m²时,光伏的平均温度仅为78.46 ℃[图5(a)],同时可使电池板面纵向和横向温差保持在5 ℃以内. Chen等[57]提出了一种新型的聚光光伏分离式热管散热器,并选取丙酮、水和乙醇三种工质进行对比研究,丙酮的传热效果为三者中最优,单根热管功率为水的6倍、乙醇的2倍[图5(b)]. 李琦芬等[58]设计一种新型平板重力热管冷却聚光光伏以改善聚光光伏高辐射能流密度以及相应的热沉温度分布不均匀[图5(c)],考虑到聚光光伏中心温度较高,将中间蒸发段的三根通道连通,增大中间管道的热流密度,保证工质的及时补充和热管的稳定运行.



(a)常压下带平板型蒸发器的分离式热管冷却光伏实验装置图[56]



(b)用于冷却聚光光伏的分离式热管结构图[57]



(c)平板热管冷却聚光光伏[58]

图5　分离式热管冷却光伏举例

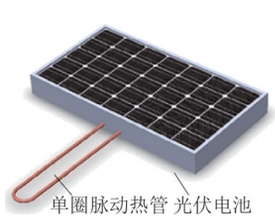
Fig.5　Examples of separated heat pipe cooling photovoltaic module

目前分离式热管单独运用到光伏冷却的研究较少,而相关研究更侧重于将分离式热管与PV/T系统耦合实现光电光热综合利用,重力驱动的被动循环可节省一部分初投资和系统运行成本,同时制冷剂的使用解决了传统PV/T系统存在的冬季结冻问题,又可利用分离式热管的热二极管特性防止热量流回蒸发器,避免间接加热循环系统出现结垢问题,但其系统效率仍有较大提升空间.

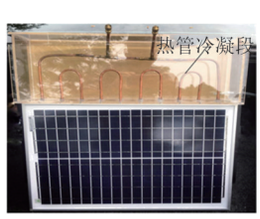
2.1.4　脉动热管

脉动热管驱动力不依赖于重力和毛细力,无复杂芯结构,尺寸小,易于加工,换热能力强,受重力影响小,适用于水平放置或者倾斜角度较小的光伏板. Alizadeh等[59]采用单圈脉动热管冷却光伏并进行数值研究[图6(a)],发现使用脉动热管的冷却效果为铜管翅片冷却系统的3成以上,发电量提高约18%. 另外,Alizadeh[60]还采用模拟的方式将闭环脉动热管主、被动冷却光伏两种情况与空气自然冷却和平板强制对流冷却进行对比,在太阳辐射为1 235 W/m²时,采用基于脉动热管的被动冷却可将光电效率提高23%,达到主动冷却效果的6成以上. Roslan等[61]在光伏板背面使用脉动热管,可将光伏电池的温度最多降低10.5 ℃,并增加近19.45%的电输出[图6(b)]. Geng等[12]采用数值模拟和实验相结合的方法对脉动热管冷却高倍聚光光伏电池系统进行研究,当热管数量达到100时,聚光光伏聚光度为100,电池仍可保持35 ℃的温度,即使聚光度达到500聚光光伏仍可正常工作,证实脉动热管冷却光伏电池的可行性[图6(c)]. 除去应用广泛的平板脉动热管,Wang等[62]制作了一种带平板型蒸发器的三维脉动热管冷却聚光光伏[图6(d)],可保证在5.88 W/cm²的热流水平下光伏电池温度低于57 ℃,另外热管内壁设置有烧结铜颗粒吸液芯结构,保证热管在水平方向正常运行.

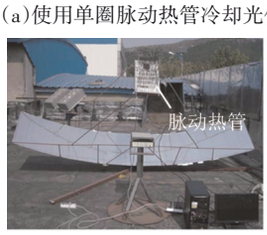
脉动热管较强的换热能力能够提高光伏组件的冷却效果,同时,结构尺寸小,与光伏组件耦合时,对



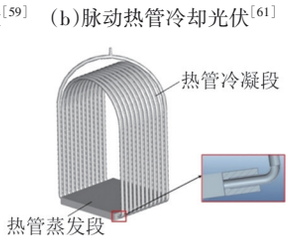
(a)使用单圈脉动热管冷却光伏[59]



(b)脉动热管冷却光伏[61]



(c)脉动热管冷却聚光光伏[12]



(d)带有平板型蒸发器的三维脉动热管[62]

图6　脉动热管冷却光伏举例

Fig.6　Examples of pulsating heat pipes cooling photovoltaic module

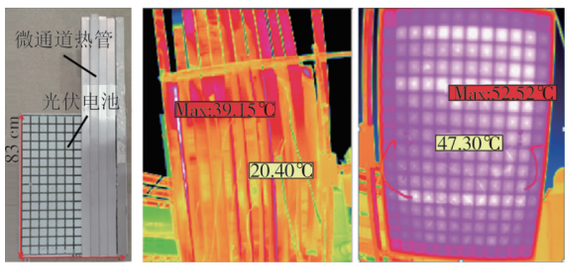
系统自重影响较小故具有极佳的与高倍聚光光伏结合的潜力.但脉动热管内部复杂的潜热传热以及对流换热机理尚未明确有待进一步探索,在一定程度上影响了其在光伏领域的应用.

2.1.5 微通道热管

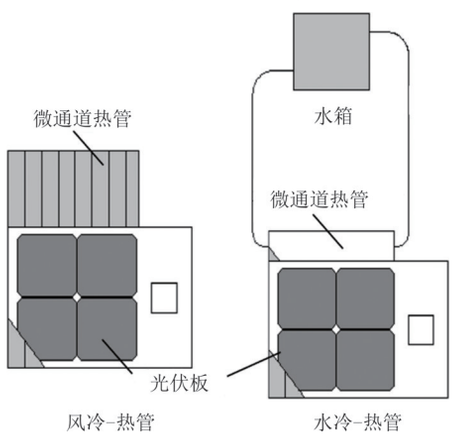
传统柱状热管与平板光伏电池之间存在较大的热接触阻力,影响蒸发段换热效果,而微通道热管形状扁平,可与光伏板有良好的接触并提升其温度均匀性,同时,微通道热管内部小尺寸带来较强的换热能力,适用于散热需求较大的聚光光伏.汪婧等[63]设置有无微通道热管冷却和不同冷凝段长度的两组对比实验,使用热管冷却后不仅使电池温度有效降低25 ℃,同时提高光伏背板温度均匀性,将光伏效率提升为无冷却情况下的1.2倍[图7(a)].Tang等[64]将微通道热管冷却光伏的水冷和风冷两种方式进行对比研究,实验证明水冷方式的冷却效果更佳[图7(b)],可使电池温度最多降低8 ℃,输出功率增加13.9%,超过风冷方式的4倍以上.Wang等[65]将微通道热管与风冷式PV/T系统结合,可将光伏电池温度降至22.8 ℃,发电效率增加30.9%[图7(c)].对于聚光光伏,Ji等[66]对采用直接风冷、水冷冷却和热管冷却的聚光光伏系统进行实验研究[图7(d)],证实热管冷却效果最佳,可使模块平均温度降低至22 ℃.

据现有研究,相较于其他类型热管,微通道热管对光伏组件的冷却效果最好,尤其在提升光伏组件温度均匀性方面具有极大潜力,后续可针对热管结构、微通道尺寸形状、充注率以及不同类型光伏组件的冷却效果等进一步研究探讨.

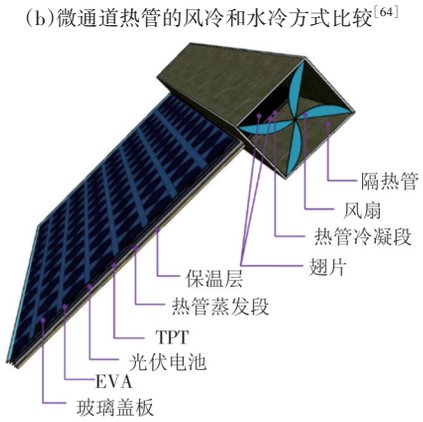
众多以热管为主的光伏冷却技术研究表明,热管是一种较为环保且经济可行的光伏冷却方案.光伏组件废热可通过热管传输,热管冷凝段常采用空气等被动冷却或水循环等主动冷却,系统整个运行过程基本无污染物排放,而且系统运动部件较少,结构较简单,初投资相对较低且后期维修容易,维护成本不高.此外,系统冷却效率较高,一般以热管冷却为主的冷却技术可将光伏电池温度降低5~25 ℃,并将光伏板面温差缩减至1~10 ℃,将光伏电池发电效率有效提高10%~30%.热管与光伏电池之间的接触热阻大小对系统的冷却效果有着极大影响,因此相较于柱状热管,板式热管的冷却效果通常更佳.另外,热管气候适应性较强,应用更广泛,其中受到结构、成本等条件的制约,有芯热管单独实现光伏冷却的研究较为有限;考虑到聚光度较大时必须采用跟踪系统保证光伏系统拥有足够的阳光照射面积,而分离式热管换热端位置相对固定且需一定的高度差保证系统运行,故分离式热管更多运用于低倍数非跟踪型聚光光伏系统;脉动热管与微通道热管不仅拥有较好的换热效果,同时尺寸较小,可用于高倍数跟踪型聚光光伏系统的散热.



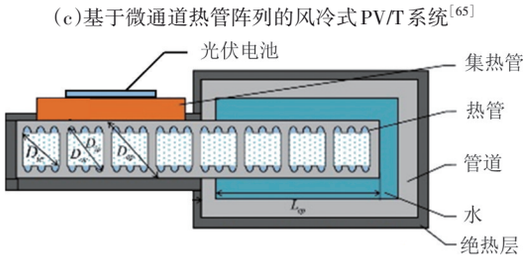
(a)微通道热管冷却光伏[63]



(b)微通道热管的风冷和水冷方式比较[64]



(c)基于微通道热管阵列的风冷式PV/T系统[65]



(d)热管冷却聚光光伏[66]

图7 微通道热管冷却光伏举例

Fig.7 Examples of micro-channel heat pipe cooling photovoltaic module

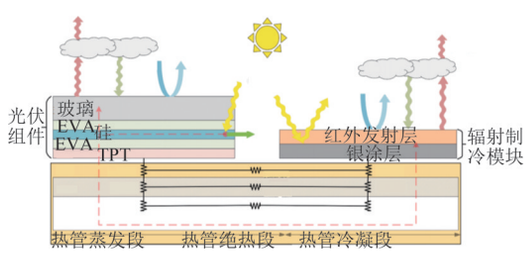
2.2　热管耦合其他技术冷却光伏

除单独应用以冷却光伏组件外,热管还能够与其他技术耦合提升发电效率.目前主要包括天空辐射制冷技术、相变储能技术、热电制冷技术和纳米技术.本节结合上述研究方向,对热管耦合其他技术进行冷却光伏组件的研究进行分析.

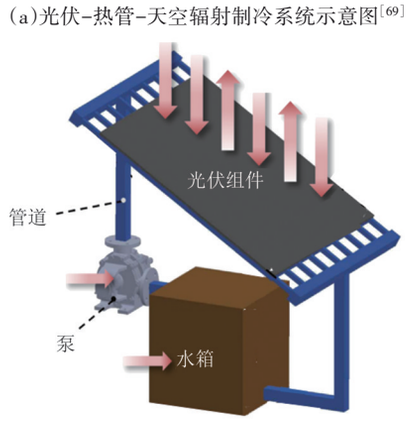
2.2.1　热管耦合天空辐射制冷技术

天空辐射制冷即地表物体将自身热量利用大气层在“大气窗口”波段(8~13 μm)的高透过性发射到低温外太空,从而降低自身温度并实现可持续被动制冷[67, 68],其装置简单高效、清洁环保,且对地球环境零损害,是光伏电池的一种新型冷却手段,而通过热管可解决光伏产热和辐射制冷两者间的冷热平衡问题并使光伏电池达到理想冷却效果.

Ahmed 等[69]设计了一种新型光伏-热管-天空辐射制冷耦合系统[图 8(a)],热管高效且快速的传热机制使得来自光伏电池的废热可从光伏和天空辐射制冷模块顶部释放.模拟结果表明,与传统玻璃涂层组件相比,系统电池温度最大降低 12.86 ℃,发电效率提高 7.25%.此外,Yoon 等[24]使用常规光伏模块,利用其具备在夜间天空辐射制冷能力,借助分离式热管传热循环被动制冷水,待白天启动水泵实现光伏主动冷却[图 8(b)],模拟结果表明,耦合系统可使光伏温度最高降低 27 ℃,输出电量最高提升 6.7%.



(a)光伏-热管-天空辐射制冷系统示意图[69]



(b)辐射制冷辅助的光伏系统[24]

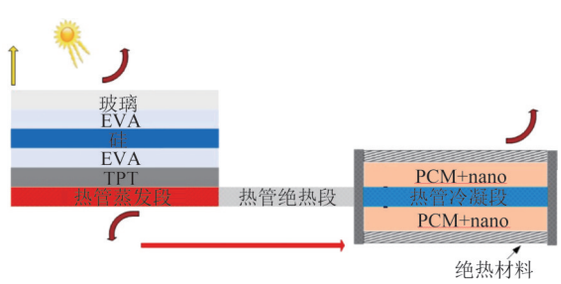
图 8　热管耦合天空辐射制冷技术冷却光伏组件举例

Fig.8　Examples of cooling photovoltaic modules by heat pipe coupled sky radiant cooling technology

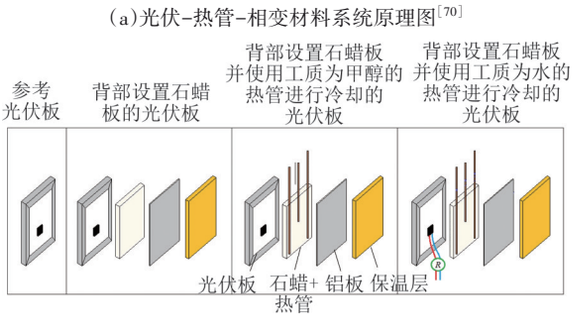
目前热管耦合天空辐射制冷技术冷却光伏展现良好的应用前景,但是天空辐射实时制冷功率较低,如何将收集的冷能最大化用于光伏冷却,满足散热需求并提高系统的一体化程度,仍是一大难题,缺乏对系统性能进行准确评估的相关实验研究,有待进一步探索可行方案.

2.2.2　热管耦合相变储能技术

相变储能技术可利用固体液化和液体凝固过程中释放和吸收的潜热储存热量,并用于冷却,能够一定程度上改善热量传递过程的时空分布.目前已有研究证明相变材料能有效辅助光伏电池的热管理,在日间吸热过程中降低面板温度[16],而在与热管结合的基础上,相变储能技术可在不影响光伏电池日间散热的前提下,通过将日间光伏电池所需散失的热量部分转移至夜间,进一步提升光伏电池冷却性能.



(a)光伏-热管-相变材料系统原理图[70]



(b)运用相变材料和热管冷却光伏组件的四组对比实验[71]

图 9　热管耦合相变储能技术冷却光伏组件举例

Fig.9　Examples of cooling photovoltaic modules by heat pipe coupled phase change energy storage technology

如图 9(a)所示,Gad 等[70]采用平板热管与相变材料相结合的冷却系统对光伏板的热调控功能开展能源、㶲和经济性评估的理论研究.与传统光伏系统相比,该系统可使光伏温度最大降低 20.6 ℃,效率提高 11.5%.如图 9(b)所示,Özbaş 等[71]将工质分别为水和甲醇的热管浸入石蜡板中对光伏组件进行冷却,并设置无冷却光伏组件和仅使用石蜡板的光伏组件进行对照,实验证明以水为工作流体的热管冷

却效果更佳,可将光伏组件前表面玻璃温度降低5.4 ℃,效率提高是以甲醇作为工作流体的热管冷却系统的1.5倍,是仅使用石蜡板冷却系统的2倍. 相变材料与热管技术耦合用于光伏冷却已经展现良好的前景,但传统相变材料一方面导热性能较差,某种程度上不利于光伏散热;另一方面相变材料与光伏组件耦合时会增加系统的总体质量,尤其对于需要加装跟踪装置的高倍数聚光光伏而言,考虑到成本以及安全因素,需设计合适的结构进行改进.

2.2.3 热管耦合热电制冷技术

热电模块(TEG)利用塞贝克效应实现温差发电,无需运动部件,结构简单且运行可靠[72],在通过热管与光伏组件结合以提高发电效率方面具有良好的潜力:光伏电池光电效率一般低于20%,吸收的其余太阳能绝大部分转化为热能[73],基于该部分的热能发电即可实现紫外、可见光和红外波段太阳能的有效利用,进而提升发电效率[74](关于光伏-热管-热电混合系统的相关研究汇总于表3).

表3 光伏-热管-热电混合系统相关研究汇总

Tab.3 Summary of related study on PV-HP-TEG system

作者	时间	研究方法	创新点	重要结论
Makki等[75]	2016	模拟	提出一种由热电发电模块、有芯单管热管和光伏组成的混合系统,其中热管可吸收光伏中多余废热,并将其传递到热电模块热端实现温差发电	太阳辐照的增加可提高光伏电池和热电模块的发电量,而风速、环境温度则对两者有相反的效果;另外需设置相关设备保证热电冷侧持续低温
Li等[77]	2016	模拟	将平板微通道热管与光伏、热电模块结合,热管可使热流分布均匀化,降低接触热阻,提高系统输出功率,并对新系统与传统光伏系统的性能以及经济性进行比较	微通道热管相较于普通热管可以增强系统的传热性能,较低的温度梯度可以保证光伏和热电模块的高输出,新系统比同等面积的传统光伏系统多获得约6.44 kW·h的年发电量
Li等[76]	2016	实验+模拟	将平板微通道热管与采用条形聚焦菲涅尔透镜的聚光光伏结合,使用热管改变热流密度,利用更少的热电模块和更低的成本获得更高的输出	在相同的选择性吸收涂层面积下,新系统的输出功率高于串联的热电模块
Abdo等[81]	2019	模拟	开发一种新型聚光光伏和太阳能热电发电机的混合系统,在两者之间放置微通道散热器形成“三明治”式结构,以吸收整个系统热量,并建立了综合的三维热流体热电模型	与传统系统相比,新系统可以在更高的聚光度下安全工作,当光伏模块和热电模块都为20倍聚光时,光伏电池平均温度可保持在77 ℃
Shittu等[79]	2019	模拟	首次对有无平板热管的混合光伏-热电系统进行三维数值研究,并在不同环境条件下与传统纯光伏系统进行比较	热管的使用可减少冷却光伏所需的热电模块的数量,与聚光比为6的光伏-热电系统和纯光伏系统相比,新系统的效率分别高3.31%和58.01%
Shittu等[78]	2020	实验	首次对光伏发电-平板微通道热管-水冷式热电发电混合系统进行实验研究,并与传统光伏系统进行比较分析	有绝缘和无绝缘混合系统的光伏温度(62.2 ℃和61.9 ℃)均低于纯光伏系统的光伏温度(67.9 ℃)
Gao等[82]	2021	模拟	设计了一种新型双面光伏-平板热管-热电混合系统,建立三维数值模型,并将其性能与传统串联系统进行比较	光伏所需的较低工作温度和热电单元所需的较高温差,在串联系统中难以实现,但在新型双面系统中可同时满足,系统总发电量和能量转换效率较前者可分别提高20.98%和14.05%

Makki等[75]使用有芯单管热管将光伏电池废热传递给热电模块实现进一步发电,模拟结果表明,耦合系统适应太阳辐照强度、环境温度和风速等环境因素变化的能力要优于传统光伏系统,在环境温度较高时系统效率高出传统光伏系统近46%. 如图10(a)所示,Li等[76-77]提出一种基于平板微通道热管的新型光伏-热电耦合系统,结构原理与前者类似,其中热电冷侧采用翅片进行散热,并用实验和模拟手段证明了新系统每年可获得高于传统光伏系统6.44 kW·h的发电量,而回报期大约为六年,其具有较传统光伏系统而言更高的输出性能和经济价值. 如图10(b)所示,Shittu等[78]结合运用微通道热管、光伏发电和热电发电技术设计了一套结构类似的发电供热水的综合系统,其中热电模块冷侧采用水泵驱动水循环的方式进行冷却,同时作者对[79]纯光伏、光伏热电和光伏热电热管综合系统的性能进行了详细的对比分析,结果表明,新型系统效率比光伏-热电系统高1.47%,是纯光伏系统的1.61倍. 为促进热电与太阳能的结合,有学者提出将热电模块与光谱选择性基板相结合来利用太阳能,即太阳能热电发电机[80].

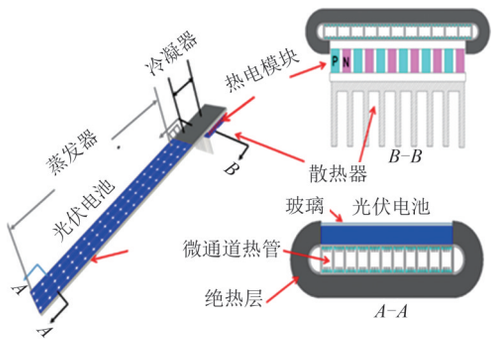
Abdo 等[81]在聚光光伏与热电模块之间设置微通道换热器,形成一种类似“三明治”的结构,依靠微通道内工质流动吸收整个系统热能[图 10(c)],研究表明系统可将电输出功率提升至 3.2 kW/m^2,并使光伏电池平均温度保持在 77 ℃. 而 Gao 等[82]在此基础上提出了一种结合平板热管的双面光伏-热电系统[图 10(d)],结果表明双面系统的总发电量和能量转换效率约为传统串联系统的 1.21 倍和 1.14 倍.

目前关于热管、热电和光伏的耦合系统通常专注于电效率和发电量,对系统成本控制的考虑仍有待深入,而热电模块相对于光伏模块成本更高,输出功率和能量转换效率却较低,缺乏真正能得到实验和数值方式有效认证的高效率低成本组合方式,新型组合方式仍有待探索.

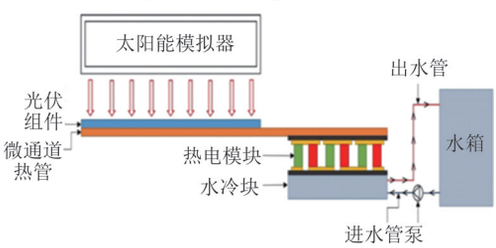
2.2.4　热管耦合纳米技术

纳米技术在冷却光伏方面的应用包括纳米涂层和纳米流体两个方面. Zhang 等[83]通过将微槽与纳米涂层的压缩泡沫金属作为内部结构,发明了一种新型热管板,与传统无芯热管相比传热能力提升了 10 倍以上,与等离子光伏电池结合可使电池温升降低 46%(图 11). Du 等[84]通过模拟研究证明集成纳米涂层热管板可在不同太阳辐照下为电池提供充足的冷却,并通过室内实验证明其可使电池内部温度更均匀,将温度变化量降低到 1.0~2.5 ℃,延长光伏电池寿命. 除此之外,已有研究表明[85],在两相换热流体中加入纳米颗粒可以提高蒸发和冷凝换热效率,获得更高的热管冷却性能,但考虑到成本原因以及纳米颗粒存在的沉积等问题,目前对以纳米流体为工质的热管冷却光伏技术仍在探索中.

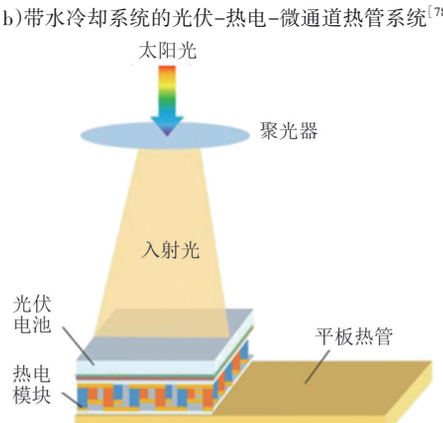
以热管为辅的耦合冷却技术研究表明,热管与天空辐射制冷技术、相变储能技术、热电技术和纳米技术的耦合利用都能有效地提升光伏组件或系统的发电效率. 其中天空辐射制冷技术和相变储能技术主要针对热管冷凝段换热进行改善,前者为热管冷凝段提供一种新型清洁能源,后者延长系统散热时间,提高整体的冷却性能;而热电制冷技术则为系统额外增加了一种发电方式,可直接增加系统发电量;纳米技术从热管自身结构出发,通过改善热管传热来提高系统对光伏的冷却效率. 相较于以热管为主的冷却方式,耦合技术的系统结构通常更复杂,由于泵、管道、材料、运输安装等费用增加,系统的初投资略高,但目前已有的经济性相关分析研究表明,系统的投资回收期相对较短,成本收益仍较可观. 同时,耦合系统大部分无污染物排放,可实现太阳能与清洁可再生能源的科学配合以提高系统的稳定性与可靠性. 总之,热管耦合其他技术的冷却技术是一种可持续、环境友好且经济可行的冷却方式. 但需要指出的是,现阶段除热电技术之外,其他技术与热管的耦合都仍以探索性研究为主,缺乏对其性能进行验证



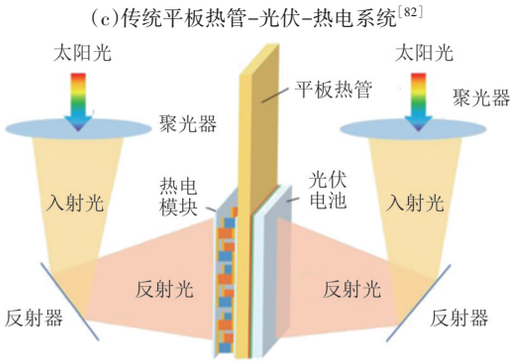
(a)光伏-热管-热电集成系统[77]



(b)带水冷却系统的光伏-热电-微通道热管系统[78]



(c)传统平板热管-光伏-热电系统[82]



(d)新型双面平板热管-光伏-热电系统[82]

图 10　热管耦合热电制冷技术冷却光伏举例

Fig.10　Examples of cooling photovoltaic modules by heat pipe coupled thermoelectric technology

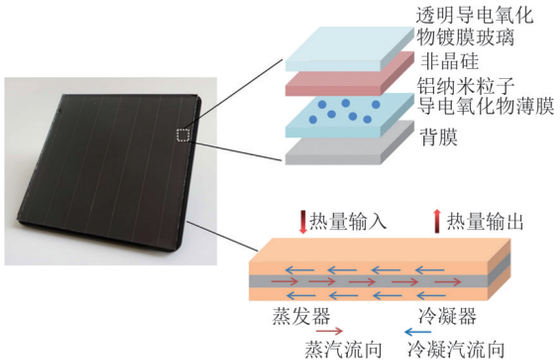


图 11 集成热管板的等离子体光伏电池热管理系统[83]

Fig.11 Heat-pipe plate managed plasmonic solar cells[83]

的相关实验研究,同时,大部分研究都缺少从整个生命周期的角度综合分析系统的性能、经济效益和环境效益,耦合系统如何在实际中得以应用仍是一大难点.

3 挑战与未来展望

目前面向光伏应用的热管冷却技术已取得长足进展,但受限于研究视角和场景,在实际应用中仍面临诸多挑战,这也表明这一领域具有较大的研究探索空间和发展潜力.本文结合该领域的研究现状和应用趋势,对面临的挑战进行总结,并对与未来做了展望,具体如下:

1)目前关于光伏电池性能受温度影响的研究着重于最高温度或者平均温度,极少考虑温度分布均匀性对光伏电池的影响,而温度分布均匀性是电池寿命与性能的重要影响因素之一,故热管在这方面发挥的作用有待重视.

2)大部分有关冷却光伏电池的实验和数值模拟研究是基于理想设定条件和实验室场景的,极少关注光伏电池在长期高温工作下的性能退化问题,这使得许多研究结果偏理想化,缺乏对实际条件下长期运行的热管冷却光伏系统的效率研究和成本效益分析.

3)目前关于热管冷却光伏方面的应用类研究大部分侧重分析光电效率和热管换热性能,缺少结合经济和环境效益的综合性评估.

4)热管耦合天空辐射制冷技术进行光伏冷却是一种有效且较为创新的方式,天空辐射能的科学利用不仅清洁环保,还可有效提高系统冷却效率,但制冷量较低,在匹配光伏冷却需求方面存在困难,此外,在实际系统中占地面积和成本方面的权衡有待探讨,需进一步改进其结构和材料.

5)热管耦合相变储能技术可延长散热过程,提升制冷效果,但在实际应用中需考虑相变材料的导热性、稳定性、寿命、重量以及成本等因素,需对其与光伏系统的耦合方式进行新的探索.

6)热管耦合热电制冷技术一方面可将电池废热进行再利用,另一方面提供了一种新的发电方式,有效提高系统综合利用效率,但热电模块的成本高而效率较低,在应用过程中如何将光伏模块和热电模块的数量和面积以及耦合方式进行调整以取得最优效率仍是一大难题.

7)纳米技术可改善光伏冷却性能,但在较高工作温度和长期接触流体的环境下,纳米材料的成本、寿命、稳定性因素影响热管冷却光伏技术领域应用的实际效果和产业化前景,还需有针对性地进行纳米材料研发和长期实验测试.

4 结 论

本文将基于热管的光伏冷却技术研究分为两大类:以热管冷却为主的冷却技术和热管耦合其他技术冷却光伏.对于前者,根据使用的热管类型不同(有芯单管热管、环路热管、两相闭式重力热管、分离式热管、微通道热管、脉动热管)进行分类阐述,而后者根据耦合技术(天空辐射制冷技术、相变储能技术、热电制冷技术和纳米技术)的不同特点进行介绍,主要包括耦合系统整体性能、研究现状以及可行的改进方向.基于该领域发展现状,探讨研究面临的挑战,并对其发展做出了展望.本文得出以下具体结论:

1)热管冷却是一种环境友好且经济可行的光伏冷却方案,冷却效率较高,可将光伏电池温度降低5~25 ℃,最高可将其表面温差缩至1 ℃,最高可有效提升30%左右的发电量.

2)热管对光伏的冷却效果会受到热管工质、直径、数量、充注率等因素的影响.对于热管工质,目前使用最为广泛的依旧是水、R134a、乙醇和丙酮;热管的数量增加会使系统效率有所提升;大部分研究揭示的热管最佳充注率为中等充注率(20%~35%).另外可以通过在热管冷凝段采用翅片结构增加换热面积、在蒸发段采用扁平结构的管道等手段来提高热管效率.

3)不同的热管结构类型适用于不同的光伏类型,需根据光伏所在的地区气候、光伏场景、组件规模以及成本选择适合的热管类型,还需根据光伏跟

踪系统存在与否仔细考虑热管安装位置,而且部分类型热管的载流极限和传热距离限制也是重要的影响因素.

4)热管与天空辐射制冷技术、相变储能技术、热电技术和纳米技术的耦合都能有效地提升冷却系统的性能,但目前系统结构形式都还比较单一,且缺乏相关实验对系统性能进行验证分析.同时,大部分研究都未曾考虑系统实际应用中全生命周期内的经济和环境效益,有待提出更经济可行的新型冷却方案.

5)目前以热管为主的冷却方式主要研究侧重热管,以冷却光伏电池为主要目的,通过对热管的结构进行创新以获得更优冷却效果,投资相对较低,更加适用于小型光伏系统;热管与其他技术的耦合利用则侧重于耦合对象以及方式,除提高冷却效率外还可带来的附加功能,提高成本效益和缩短投资回收期,更适用于中大型系统.热管与其他技术的耦合也为太阳能与其他可再生能源的耦合利用提供一种新思路,在"双碳"背景下极具发展潜力.

参考文献

[1] JAVED M S, MA T, JURASZ J, et al. Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: review and future perspectives[J]. Renewable Energy, 2020, 148: 176-192.

[2] ALI ABDELKAREEM M, MAGHRABIE H M, SAYED E T, et al. Heat pipe-based waste heat recovery systems: background and applications [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 29: 101221.

[3] MAGHRABIE H, MOHAMED A, FAHMY A, et al. Performance augmentation of PV panels using phase change material cooling technique: a review[J]. SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications, 2021, 2(2): 1-13.

[4] MICHAEL J J, INIYAN S, GOIC R. Flat plate solar photovoltaic-thermal (PV/T) systems: a reference guide[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 62-88.

[5] ZHANG C X, SHEN C, WEI S, et al. A review on recent development of cooling technologies for photovoltaic modules[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29(6): 1410-1430.

[6] FOUAD M M, SHIHATA L A, MORGAN E I. An integrated review of factors influencing the perfomance of photovoltaic panels [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2017, 80: 1499-1511.

[7] HASANUZZAMAN M, MALEK A B M A, ISLAM M M, et al. Global advancement of cooling technologies for PV systems: a review[J]. Solar Energy, 2016, 137: 25-45.

[8] HASAN A, SARWAR J, SHAH A H. Concentrated photovoltaic: a review of thermal aspects, challenges and opportunities [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 835-852.

[9] 王子龙. 聚光光伏系统中太阳能电池的冷却问题研究[D]. 上海:上海理工大学, 2011: 63-64.
WANG Z L. Study on the cooling of solar cells in concentrating photovoltaic[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2011: 63-64.(in Chinese)

[10] CHAABANE M, CHARFI W, MHIRI H, et al. Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal systems[J]. Solar Energy, 2013, 98: 315-321.

[11] LI G Q, XUAN Q D, PEI G, et al. Effect of non-uniform illumination and temperature distribution on concentrating solar cell - A review[J]. Energy, 2018, 144: 1119-1136.

[12] GENG W G, GAO L, SHAO M, et al. Numerical and experimental study on cooling high-concentration photovoltaic cells with oscillating heat pipe[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2012, 7(3): 168-173.

[13] GHADIKOLAEI L, CHEHREH S S. Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling technology: an overall review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(18): 10939-10972.

[14] RUSSELL G F. Uniform surface temperature heat pipe and method of using the same: United States. 4320246[P]. [1979-07-19].

[15] 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.

[16] KANDEAL A W, THAKUR A K, ELKADEEM M R, et al. Photovoltaics performance improvement using different cooling methodologies: a state-of-art review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 122772.

[17] SALAMEH T, ZHANG D, JUAIDI A, et al. Review of solar photovoltaic cooling systems technologies with environmental and economical assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 326: 129421.

[18] KANDEAL A W, ALGAZZAR A M, ELKADEEM M R, et al. Nano-enhanced cooling techniques for photovoltaic panels: a systematic review and prospect recommendations [J]. Solar Energy, 2021, 227: 259-272.

[19] 邱昊,袁芬,芮明奇,等. 聚光光伏系统散热研究进展[J]. 广州化学, 2021, 46(1): 25-31.
QIU H, YUAN F, RUI M Q, et al. Progress of heat dissipation of concentrating photovoltaic systems [J]. Guangzhou Chemistry, 2021, 46(1): 25-31.(in Chinese)

[20] FIKRI M A, SAMYKANO M, PANDEY A K, et al. Recent progresses and challenges in cooling techniques of concentrated photovoltaic thermal system: a review with special treatment on phase change materials (PCMs) based cooling[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 241: 111739.

[21] PATHAK S K, SHARMA P O, GOEL V, et al. A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 51: 101844.

[22] PANDA S, GUPTA M, PANDA B, et al. A review on advanced cooling techniques for photovoltaic panel [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 6799-6803.

[23] 白浩良,王晨,卢静,等. 聚光光伏系统太阳能电池散热技术及发展现状[J]. 化工进展,2023,42(1):159-177.
BAI H L, WANG C, LU J, et al. Solar cell heat dissipation technology and development status of concentrating photovoltaic system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(1): 159-177. (in Chinese)

[24] YOON S, SEO J, CHOI M, et al. Enhanced photovoltaic efficiency through radiative cooling augmented by a thermosyphon effect [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 268: 116046.

[25] ZHANG H, ZHUANG J. Research, development and industrial application of heat pipe technology in China [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(9): 1067-1083.

[26] JOUHARA H, CHAUHAN A, NANNOU T, et al. Heat pipe based systems - advances and applications [J]. Energy, 2017, 128: 729-754.

[27] YANG X, YAN Y Y, MULLEN D. Recent developments of lightweight, high performance heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 33/34: 1-14.

[28] ZHANG X X, ZHAO X D, SHEN J C, et al. Design, fabrication and experimental study of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe based heat pump system [J]. Solar Energy, 2013, 97: 551-568.

[29] BASTAKOTI D, ZHANG H N, LI D, et al. An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 305-332.

[30] NIKOLAYEV V S. Physical principles and state-of-the-art of modeling of the pulsating heat pipe: a review [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 117111.

[31] ZHOU J Z, ZHAO X D, MA X L, et al. Experimental investigation of a solar driven direct-expansion heat pump system employing the novel PV/micro-channels-evaporator modules [J]. Applied Energy, 2016, 178: 484-495.

[32] SHI S B, LIU Y, YILGOR I, et al. A two-phase three-field modeling framework for heat pipe application in nuclear reactors [J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 165: 108770.

[33] WANG Z Y, YANG W S. A review on loop heat pipe for use in solar water heating [J]. Energy and Buildings, 2014, 79: 143-154.

[34] OZBAS E, SELIMLI S, OZKAYMAK M, et al. Evaluation of internal structure modifications effect of two-phase closed thermosyphon on performance: an experimental study [J]. Solar Energy, 2021, 224: 1326-1332.

[35] CAO J Y, ZHENG Z Y, ASIM M, et al. A review on independent and integrated/coupled two-phase loop thermosyphons [J]. Applied Energy, 2020, 280: 115885.

[36] WANG Z Y, DIAO Y H, ZHAO Y H, et al. Performance investigation of an integrated collector-storage solar water heater based on lap-joint-type micro-heat pipe arrays [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 808-827.

[37] HUANG C E, LIN W K, WANG S R. Two-phase closed-loop thermosyphon solar water heater with porous wick structure: performance and start-up time [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42(11): 4885-4894.

[38] YU M, CHEN F C, ZHENG S M, et al. Experimental investigation of a novel solar micro-channel loop-heat-pipe photovoltaic/thermal (MC-LHP-PV/T) system for heat and power generation [J]. Applied Energy, 2019, 256: 113929.

[39] QU J, SUN Q, WANG H, et al. Performance characteristics of flat-plate oscillating heat pipe with porous metal-foam wicks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 20-30.

[40] KOUNDINYA S, VIGNESHKUMAR N, KRISHNAN A S. Experimental study and comparison with the computational study on cooling of PV solar panel using finned heat pipe technology [J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 2693-2700.

[41] WANG S, SHI J X, CHEN H H, et al. Cooling design and evaluation for photovoltaic cells within constrained space in a CPV/CSP hybrid solar system [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 369-381.

[42] PRAVEENKUMAR S, GULAKHMADOV A, AGYEKUM E B, et al. Experimental study on performance enhancement of a photovoltaic module incorporated with CPU heat pipe-a 5E analysis [J]. Sensors, 2022, 22(17): 6367.

[43] YE Z B, LI Q F, ZHU Q Z, et al. The cooling technology of solar cells under concentrated system [C]//2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. May 17-20, 2009, Wuhan, China. IEEE, 2009: 2193-2197.

[44] ANDERSON W G, DUSSINGER P M, SARRAF D B, et al. Heat pipe cooling of concentrating photovoltaic cells [C]//2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. May 11-16, 2008, San Diego, CA, USA. IEEE, 2009: 1-6.

[45] ANDERSON W G, TAMANNA S, SARRAF D B, et al. Heat pipe cooling of concentrating photovoltaic (CPV) systems [C]// Proceedings of the 6th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). Cleveland, Ohio. Reston, Virigina. AIAA, 2008: 5672.

[46] 朱会元,张先锋,刘泉,等. HCPV用平板式环路热管实验研究[J]. 中国科学技术大学学报,2013,43(5):393-401.
ZHU H Y, ZHANG X F, LIU Q, et al. Experimental study on flat loop heat pipes used in HCPV systems [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(5): 393-401. (in Chinese)

[47] HUANG H J, SHEN S C, SHAW H J. Design and fabrication of a

novel hybrid-structure heat pipe for a concentrator photovoltaic [J]. Energies,2012,5(11):4340-4349.

[48] 李烨,张华,王子龙. 一种高倍聚光光伏系统中太阳电池冷却的实验研究[J]. 太阳能学报,2014,35(8):1461-1466.
LI Y,ZHANG H,WANG Z L. Experimental study of cooling of solar cell under high concentration pv system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2014,35(8):1461-1466.(in Chinese)

[49] AKBARZADEH A, WADOWSKI T. Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation [J]. Applied Thermal Engineering,1996,16(1):81-87.

[50] WANG Z L,ZHANG H,WEN D S,et al. Characterization of the *InGaP/InGaAs/Ge* triple-junction solar cell with a two-stage dish-style concentration system [J]. Energy Conversion and Management,2013,76:177-184.

[51] 陈海飞,金懿豪,戴远哲,等. 热管式聚光光伏冷却集热装置的应用研究[J]. 可再生能源,2017,35(1):20-25.
CHEN H F,JIN Y H,DAI Y Z,et al. A study of concentrating photovoltaic cooling device with heat pipe[J]. Renewable Energy Resources,2017,35(1):20-25.(in Chinese)

[52] 夏侯国伟,龙葵,谢明付,等. 聚光光伏系统热管散热器的实验研究[J]. 太阳能学报,2017,38(4):1063-1070.
XIAHOU G W, LONG K, XIE M F, et al. Experimental investigation of heat pipe radiator used for cpv system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2017,38(4):1063-1070.(in Chinese)

[53] 李琦芬,李涛,宋丽斐,等. 消融聚光光伏不均匀传热散热系统的设计与计算[J]. 上海电力学院学报,2013,29(2):111-114.
LI Q F,LI T,SONG L F,et al. Design and calculation of heat pipe radiator to lower nonuniform heat transfer used in concentration PV system[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power,2013,29(2):111-114.(in Chinese)

[54] CHEKNANE A, BENYOUCEF B, CHAKER A. Performance of concentrator solar cells with passive cooling[J]. Semiconductor Science and Technology,2006,21(2):144-147.

[55] 王子龙,张华,张海涛. 聚光型光伏电池冷却热管蒸发端的数值模拟[J]. 低温与超导,2011,39(2):37-41.
WANG Z L,ZHANG H,ZHANG H T. The simulation of heat pipe evaporator in concentrating solar cell[J]. Cryogenics and Superconductivity,2011,39(2):37-41.(in Chinese)

[56] WANG Y P, HU G H, CUI Y, et al. Experimental study on cooling performance of solar cells with atmospheric plate thermosyphon[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 178:226-234.

[57] CHEN S J, YANG J. Loop thermosyphon performance study for solar cells cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2016,121:297-304.

[58] 李琦芬,李涛,周致田,等. 聚光光伏高能流密度不均匀传热的热管散热器设计与计算[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2012,39(6):94-99.
LI Q F,LI T,ZHOU Z T,et al. Design and calculation of heat pipe radiator with high heat flux and nonuniform heat transfer used in concentration PV system[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2012,39(6):94-99.(in Chinese)

[59] ALIZADEH H, GHASEMPOUR 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.

[60] ALIZADEH H, ALHUYI NAZARI M, 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.

[61] ROSLAN E, HASSIM I. Solar pv system with pulsating heat pipe cooling[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science,2019,14(1):311.

[62] WANG H, QU J, SUN Q, et al. Thermal characteristic comparison of three-dimensional oscillating heat pipes with/without sintered copper particles inside flat-plate evaporator for concentrating photovoltaic cooling [J]. Applied Thermal Engineering,2020,167:114815.

[63] 汪婧,舒碧芬,郭银,等. 基于微热管的高倍聚光光伏模组新型散热实验研究[J]. 科学技术与工程,2018,18(15):105-111.
WANG J, SHU B F, GUO Y, et al. A new heat dissipation experimental research of high concentrated photovoltaic based on micro-heat pipe[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(15):105-111.(in Chinese)

[64] TANG X,QUAN Z H,ZHAO Y H. Experimental investigation of solar panel cooling by a novel micro heat pipe array[J]. Energy and Power Engineering,2010,02:171-174.

[65] WANG G, YANG Y Q, YU W, et al. Performance of an air-cooled photovoltaic/thermal system using micro heat pipe array [J]. Applied Thermal Engineering,2022,217:119184.

[66] JI Y S, LV S, QIAN Z Q, et al. Comparative study on cooling method for concentrating photovoltaic system[J]. Energy, 2022, 253:124126.

[67] 葛新石,孙孝兰. 辐射致冷及辐射体的光谱选择性对致冷效果的影响[J]. 太阳能学报,1982,3(2):128-136.
GE X S, SUN X L. Radiation cooling and the effect of spectral selective characteristics of the radiator on cooling power[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,1982,3(2):128-136.(in Chinese)

[68] FAROOQ A S, ZHANG P, GAO Y F, et al. Emerging radiative materials and prospective applications of radiative sky cooling - A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144:110910.

[69] AHMED S, LI S J, LI Z P, et al. Enhanced radiative cooling of solar cells by integration with heat pipe[J]. Applied Energy, 2022,308:118363.

[70] GAD R, MAHMOUD H, OOKAWARA S, et al. Energy, exergy, and economic assessment of thermal regulation of PV panel using hybrid heat pipe-phase change material cooling system [J]. Journal of Cleaner Production,2022,364:132489.

[71] ÖZBAŞ E. A novel design of passive cooler for PV with PCM and two-phase closed thermosyphons[J]. Solar Energy, 2022, 245: 19-24.

[72] IRSHAD K, HABIB K, SAIDUR R, et al. Study of thermoelectric and photovoltaic facade system for energy efficient building development: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 1376-1395.

[73] LU K G, ZHAO B, XU C F, et al. A full-spectrum synergetic management strategy for passive cooling of solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 245: 111860.

[74] HUEN P, DAOUD W A. Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 1295-1302.

[75] MAKKI A, OMER S, SU Y H, et al. Numerical investigation of heat pipe-based photovoltaic-thermoelectric generator (HP-PV/TEG) hybrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 112: 274-287.

[76] LI G Q, ZHANG G, HE W, et al. Performance analysis on a solar concentrating thermoelectric generator using the micro-channel heat pipe array[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 112: 191-198.

[77] LI G Q, ZHAO X D, JI J. Conceptual development of a novel photovoltaic-thermoelectric system and preliminary economic analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 126: 935-943.

[78] SHITTU S, LI G Q, ZHAO X D, et al. Experimental study and exergy analysis of photovoltaic-thermoelectric with flat plate micro-channel heat pipe [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 207: 112515.

[79] SHITTU S, LI G Q, ZHAO X D, et al. Comparative study of a concentrated photovoltaic-thermoelectric system with and without flat plate heat pipe[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 193: 1-14.

[80] SUDHARSHAN K Y, KUMAR V P, BARSHILIA H C. Performance evaluation of a thermally concentrated solar thermoelectric generator without optical concentration[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016, 157: 93-100.

[81] ABDO A, OOKAWARA S, AHMED M. Performance evaluation of a new design of concentrator photovoltaic and solar thermoelectric generator hybrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 1382-1401.

[82] GAO Y Z, WU D X, DAI Z F, et al. Performance analysis of a hybrid photovoltaic-thermoelectric generator system using heat pipe as heat sink for synergistic production of electricity[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 249: 114830.

[83] ZHANG Y N, DU Y P, SHUM C, et al. Efficiently-cooled plasmonic amorphous silicon solar cells integrated with a nano-coated heat-pipe plate[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24972.

[84] DU Y P. Advanced thermal management of a solar cell by a nano-coated heat pipe plate: a thermal assessment [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 134: 70-76.

[85] GHORABAEE H, EMAMI M R S, MOOSAKAZEMI F, et al. The use of nanofluids in thermosyphon heat pipe: a comprehensive review[J]. Powder Technology, 2021, 394: 250-269.