

太阳能光伏系统冷却技术的发展进程

张永一川, 章学来*, 徐笑锋

(上海海事大学蓄冷技术研究所 上海 201306)

摘要: 化石燃料的形式日趋紧张, 太阳能作为新型可持续能源受到了广泛的关注, 目前太阳能光伏技术趋于成熟, 但是光伏系统在运行时, 如何冷却太阳能光伏电池板使其达到更高的效率是一个关键因素。适当的冷却可以提高电力效率, 并随着时间的推移降低电池退化的速度, 从而使光伏组件的寿命最大化。综述了传统冷却技术中自然循环对流冷却、强制对流循环冷却和液冷技术, 新型冷却技术浮动跟踪集中冷却系统(FTCC)、混合 PV/T 系统冷却、混合 PV/TE 系统采用散热器冷却以及通过使用相变材料来提高太阳能光伏电池板的性能。根据研究的重点、贡献和实际应用分析各技术的优缺点、适合应用的领域及各自技术的经济特点。未来的技术发展方向应是无论选择何种技术来冷却光伏板, 都应该保持工作表面温度较低且稳定、简单可靠、能够利用提取的热能来提高整体的转换效率。以期光伏系统的设计和应用提供一定的参考价值。

关键词: 太阳能光伏系统; 冷却散热技术; 光伏电池板; 发电效率;

中图分类号: TB69

文献标志码: A

文章编号: 2019-0038

Development process of solar photovoltaic system cooling technology

Zhang Yongyichuan, Zhang Xuelai *, Xu Xiaofeng

(Institute of Cold Storage Technology, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306)

Abstract: As a new type of sustainable energy, solar energy has attracted extensive attention. At present, solar photovoltaic technology tends to be mature. However, during the operation of photovoltaic system, how to cool the solar photovoltaic panel to achieve higher efficiency is a key factor to be considered. Proper cooling can increase power efficiency and reduce the rate of battery degradation over time, thus maximizing the lifetime of photovoltaic modules. The natural circulation convection cooling, forced convection circulating cooling and liquid cooling technology in the traditional cooling technology are reviewed. The new cooling technology floating tracking centralized cooling system (FTCC), hybrid PV/T system, hybrid PV/TE system using radiator cooling and through use Phase change materials improve solar panel performance. According to the research focus, contribution and practical application, the advantages and disadvantages of each technology, the fields suitable for application and the economic characteristics of each technology are analyzed. The future direction of technology development should be that no matter which technology is chosen to cool the photovoltaic panels, the working surface temperature should be kept low and stable, simple and reliable, and the extracted thermal energy can be utilized to improve the overall conversion efficiency. In order to provide some reference value for the design and application of photovoltaic system.

Key words: Solar photovoltaic system; cooling and cooling technology; photovoltaic panel; power generation efficiency

在化石能源短缺和环境日益污染的经济背景下, 开发可持续发展的新能源逐渐成为缓解上述问题的有效手段[1-4]。基于普遍、无害、巨大、长久的优点, 太阳能成为了最具有

收稿日期: 2019-3-21 提交修改稿日期: 2019.4-7 二次提交修改稿日期: 2019.4-18

第一作者: 张永一川 (1993.3—), 男, 研究生在读。研究方向: 太阳能光伏和相变材料。联系地址: 上海市浦东新区临港大道 1550 号, 邮编: 201306。联系电话: 18621852716。E-mail: 743343295@qq.com

通讯作者 (导师): 章学来 (1964.11—), 男, 教授, 博士。研究方向: 蓄能材料。联系地址: 上海市浦东新区临港大道 1550 号, 邮编: 201306。联系电话: 021-38282925。E-mail: xlzhang@shmtu.edu.cn

没有基金项目

发展前景的新能源[5-7]。1983 年贝克雷尔发现光照能够使得半导体材料的不同部位之间产生电位差，1954 年，恰宾和皮尔松首次制成了实用的单晶硅太阳电池[8-9]。太阳能电池的发现与成功制备极大推动了光伏产业的发展。光伏技术在运行过程中具有无污染、低运行成本、最小的设备维护和最高功率密度的优点，突出了太阳能光伏能源的优势[10-11]。

在光伏技术具有的诸多优点外，光伏系统还存在由于散热不及时导致光伏电池板表面工作温度过高的一般问题，会对系统的转化效率产生负面影响[12]。风速、环境温度、相对湿度、积尘、太阳辐射等是影响光伏组件表面温度最常见的自然因素[13]。光伏系统的核心是太阳能光伏电池板，目前 80%都是采用单晶硅、多晶硅的形式，转换效率只有 11%~15%[14-15]。基于斯特林循环的理论极限效率可以达到 38%，但实际效率远远达不到这个指标[16]。旨在降低成本的第二代薄膜太阳能电池的效率仅为 6%~8%[17]。过低的发电转化效率造成了严重的经济损失和设备损害，未转换的太阳能转变为热量，造成光伏电池板表面温度升高进而影响发电效率。太阳能光伏电池板每升高 1℃，输出功率减小 0.4%，当温度超过极限温度时，还会加快硅晶电池的老化速率[18-22]。

因此光伏电池板的冷却研究具有重要意义，结合国内外的科学研究成果，梳理现有的光伏电池板的冷却方式，包括传统方式中的自然对流循环、强制对流循环、换热器冷却、浸液式冷却和表面式冷却，新型技术中的浮动跟踪集中冷却系统(FTCC)、混合 PV/T 系统冷却、混合 PV/TE 系统采用散热器冷却和相变材料冷却，基于这些技术的降温效果、可行性、能源消耗、经济性以及结构等多重因素进行对比，并分析现有技术的优缺点。提出未来光伏冷却技术的发展方向并做出未来展望，实现节约燃料、保护环境的发展目标，更好的将太阳能这一新型能源推广到实际应用中。

1 传统光伏电池板冷却技术

1.1 自然对流循环冷却

自然对流循环冷却是利用空气自然对流对光伏电池板进行降温，最大的优点是结构简单并且技术目前已经成熟，其降温主要措施是在太阳能光伏电池板后加装肋片或者通道来提高表面对流传热系数和增大换热面积。赵春江等[23]利用角钢将倾角为 30°的太阳能光伏电池板固定支撑，在铺设防雨保温层时，利用枕木和工字型材在太阳能光伏电池板与防雨保温层之间留出了一定的间隙，通过风冷这一自然对流形式来解决光伏板温度过高的问题，装置如图 1 所示。结果表明：留有空隙通道的安装方式中，辐射强度每增加 20W/m²，温度平均仅升高 0.18℃，升温幅度降低了 0.72℃。杨洪兴[24]在 PV 建筑模块中设计空气流道，光伏电池板温度降低了 15℃，效率提高了 8.3%，装置如图 2 所示。黄护林，韩东等[25]通过理论模拟研究了最佳的自然流通通道，并通过实验进行分析，结果表明：当设计通风流道时，太阳能光伏电池板表面温度可以降低约 20℃，最佳优化间隙为 24mm，最佳进出口间隙选用 10mm×25mm 可以达到最好的冷却效果。

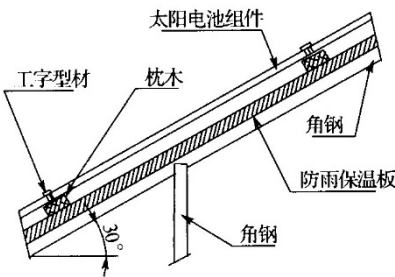


图 1.光伏屋顶一体化结构

Figure 1. Photovoltaic roof integration structure

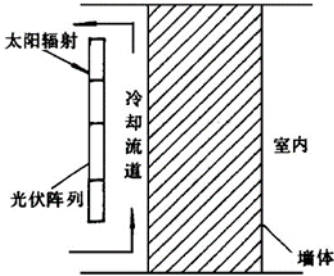


图 2.PV 建筑模块设计

Figure 2. PV building module design

加装肋片来增大换热面积是提高自然对流传热的另一种方式，Filip[26]在光伏电池板背面安装环氧导电胶的铝翅片，峰值功率平均提高 2%，可以间接减少 CO₂ 的排放并增加光伏板的预期寿命。Cuce[27]等人以带/不带翅片的光伏电池为研究对象，对同一太阳的不同环境温度和不同光照强度进行了实验研究。结果表明：带翅片的能量效率提高了 9%，功率转换效率提高了 13%，焓效率提高了 20%。Chen[28]等人基于光伏板倾角、环境温度、风速和太阳辐射，对比了带翅片和不带翅片的光伏电池板冷却效果，结果表明，光伏板倾角越大，带有翅片的光伏板平均效率和功率输出分别提高 1.3% 和 3.1%；随着环境温度的升高，翅片的冷却效率平均提高 0.3%，功率平均提高 1.85%；风速越大，翅片冷却效率和功率输出平均提高 1.8% 和 11.8%；随着太阳辐射的增加，翅片冷却效率和功率输出平均提高 0.7% 和 2.4%。

加强自然对流循环的最直接的两种有效途径就是设计自然流道以及加装肋片两种方式，目的是提升表面对流传热系数和增大换热面积。传统冷却技术日趋成熟，并且操作极为简单，没有过多复杂的系统，但显而易见的是这种方式存在一定的极限性，虽然光伏电池板的转化效率和功率皆有提升，但提升幅度不够明显，传热热阻依旧较大，同时在高温地区中，电池温度大幅度超出最佳工作温度。作为一种较为有效的方式，未来自然对流循环冷却技术的发展方向是更多的契合当地气候条件，这项传统技术更适合在夏季温度较低，冬季温度较高的地区，例如温带季风气候的地区。同时可以将加装肋片和空气流道两种方式结合起来，在提升表面对流传热系数的同时增大换热面积。

1.2 强制对流循环冷却

强制对流循环冷却是以空气或水为工质，由外界提供循环动力的冷却方式，系统的构造如图 3 所示。Tiwari[29]通过开发一个光伏组件与风道集成的模型来确定整体效率，结果表明，该方法与所建立的模型具有良好的兼容性，提高了系统的整体效率。Mojumder[30]建立一种 ELM 的 PV/T 模型，并引入测量温度、太阳辐射、质量流量等程序，精准的预测了在强制对流条件下光伏电池板的温度变化，能够实现最小的实验误差和权值范数的目标。Kasaeian[31]研究了强迫对流对 PV/T 系统热效率和电性能的影响，实验装置如图 4 所示，结果表明，减小空气通道的深度可以提高热效率，但对电效率影响不大。随着空气质量流量的增加，热效率提高，当通道深度为 0.05m，空气质量流量为 0.018kg/s ~ 0.06 kg/s 时，系统热效率约在 15% ~ 31% 之间，而电气效率仅在 12% ~ 12.4% 之间变化。



1-光伏组件 2-强制循环风机 3-风道

图 3. 采用强制空气循环冷却的混合太阳能光伏/热力系统

Figure 3. Hybrid solar PV/thermal system with forced air circulation cooling Experimental Unit



图 4. 混合光伏/T 集热器实验装置

Figure 4. Hybrid Photovoltaic / T Collector

采用强制对流循环可以有效降低太阳能光伏电池板的温度，减小传热热阻，当引入合适的冷源时，由于温差的增大，从传热传质的角度来说，电池温度甚至可以降低到环境温度以下，进而提高发电效率，同时热空气还能用于建筑物采暖。但从经济性考虑，采用强制动力必然会造成额外的能耗，从系统综合发电效率来讲并不是风量流量的增加经济效率一定高，另外在提供外部冷源时，容易出现光伏电池板表面温度分布不均匀的现象，光伏电池板长时间处于温度不均匀的条件下工作会缩减寿命。未来这一技术可以应用在较为寒冷的气候条件下，建立系统模型，实时监控光伏电池板温度，太阳辐射强度和照射角度，建立完整的自动测控体系，随时调整外部冷源的工作功率，以求转化效率和经济效益的最大化。

1.3 表面式冷却

表面式冷却是指通过喷淋等设备将冷却介质喷洒在光伏板表面，或直接将光伏板表面与冷却介质相接触，并利用冷却介质与光伏板之间形成的对流传热带走光伏板表面热量的散热方式[32]。Usman[33]提出了一种以水为冷却剂的热虹吸循环 PV/T 集热器的无源控制方法，并与现有的无源控制方法进行了比较，结果表明：使用散热器和单通道 PV/T 集热器后，面板温度变化为 25°C 和 36.5°C。Chinamhora[34]分析了光伏板处于不同深度水中的性能，结果表明：表面温度能够有效降低，极大地提高了电力效率。Zhu[35]设计了双轴碟形浓缩器跟踪系统，采用去离子水作为浸没液冷却光伏电池，系统布置如图 5 所示，结果表明，在 920 W/m² 辐射强度、17°C 环境温度和 30°C 进水温度的条件下，CPV 模块冷却至 45°C。WANG[36]使用光伏-光催化混合水处理系统的废水冷却光伏电池板，系统如图 6 所示，实现了光催化处理污水和冷却光伏组件的二合一。

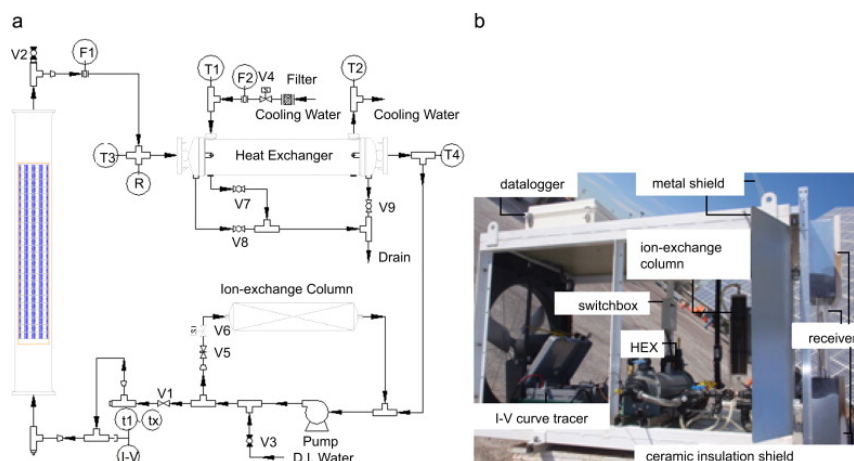


图 5. 液浸冷却系统布置图

Figure 5. Liquid immersion cooling system layout

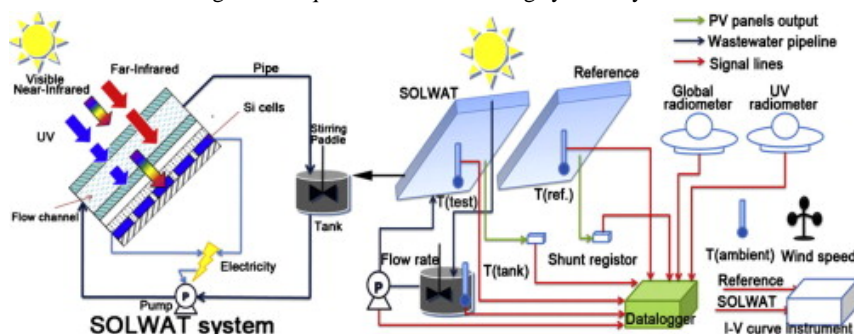


图 6. SOLWAT 系统

Figure 6. SOLWAT system

1.4 液浸式冷却

液浸式冷却是指电池与冷却液直接接触并进行高效换热的方式。Yu[37]将太阳能电池(SCS)浸在同性液体介质中来提高太阳能电池效率，介质薄膜的存在使 SCS 的效率提高了 40% ~ 60%。Wang[38]区分了液体光学性质和电学性质对太阳能电池的影响，研究发现：液体的光学性质对太阳能电池的效率影响很小，而液体的电学性质、分子极化率和离子的电学性质对电池效率的影响最大。裸太阳能电池浸泡在非极性硅油中性能最佳，硅油具有良好的稳定性，为聚光光伏系统的冷却提供支持。M. Rosa-Clot[39]研究了光伏板在不同淹没深度下的性能，结果表明，浅水区的电力输出有了很大的增长，在较深的水中浸泡时，电效率反而较低，在浸没 4cm 水深时效率增加从 13% 到 15.5%。

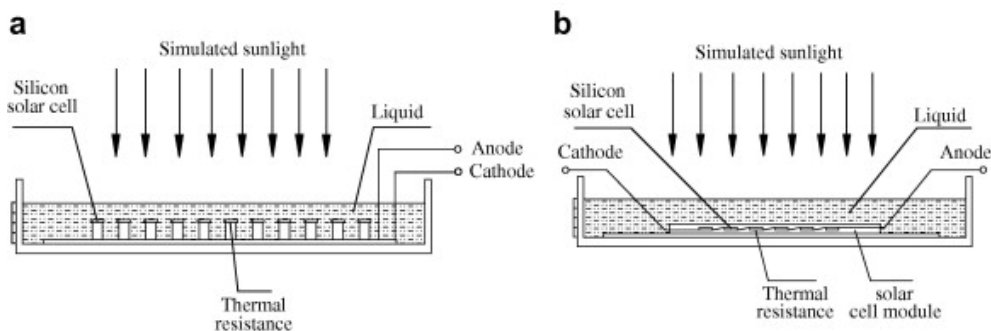


图 7. 太阳能电池和浸入液体系统的太阳能组件示意图

Figure 7. Schematic diagram of solar cells and solar modules immersed in a liquid system

1.5 利用换热器冷却

WILSON[40]应用重力供冷技术，采用上游水源作为动力，使水流过光伏组件，使其

温度保持恒定，结果表明：温度降低了 32℃，转换效率提高 12.8%。设计简单有效，避免采用循环水泵增加额外功耗，而是利用自身水头下的水流。Siddiqui[41]建立了计算流体动力学模型，依次分析了不同设计参数对换热器性能的影响，为新型 V 型换热器的设计提供了依据。Yang[42]将喷雾冷却系统与浅层地热能热交换器相结合，系统如图 8 所示，当冷却水通过 U 型井眼换热器后，出口的水温可以维持在 27 - 29℃，直到实验结束，该系统的冷却水温度仅为 29℃。但是，没有 U 型井眼换热器的冷却系统，其冷却水温度上升到 40.4℃；因此，U 型井眼换热器的系统可以有效地冷却光伏板；减少泵的运行时间和能耗，根据理论结果，在 800、900、1000 W/m² 的太阳强度下，采用 U 型井眼换热器的冷却系统的制冷量要优于不采用 U 型井眼换热器的冷却系统，随着温度的升高和面板数量的增加，所取得的效益更加明显。

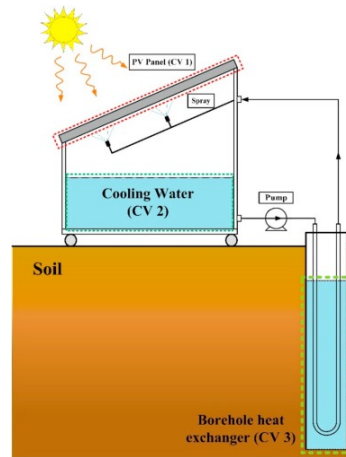


图 8. 喷雾冷却与浅层地热能系统

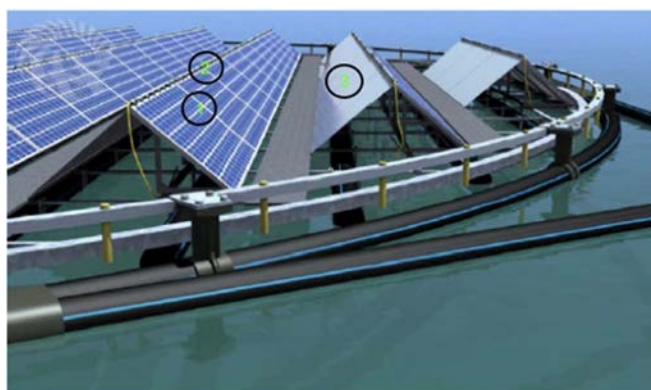
Figure 8. Spray cooling and shallow geothermal energy systems

第二种传统冷却方式就是通过液冷来降低光伏电池板温度，常见的工质就是水。表面式冷却增加能源产量；比空气冷却更有效。缺点是容易造成光伏板表面局部冷却；存在大量的热损耗；在提高了效率的同时造成水的浪费。液浸式冷却方式具有高效、环保的优点；在晴天时电力效率提高的非常明显。缺点也较为明显，阴天效率低；淹没深度影响效率；随着时间的推移，离子水会影响电效率。换热器冷却适用于易堵塞的工况；无需考虑温差；适合温差较大的环境下使用。缺点是设备造价高，结构复杂，不易长时间保持密封，易泄露。在液冷的发展方向上，有一个非常重要的制约因素，就是在干旱少雨的地区不适合运用液冷技术来冷却光伏电池板。液冷技术本身就会造成一部分水资源的浪费，这对干旱地区来说是致命的缺点，因此必须考虑自然环境因素，在液冷的发展方向上更需要因地制宜、贴合实际，水资源丰富、日照充足、年均降雨量充足的地区更适合利用液冷技术，另一个需要解决的是水冷过后蒸发水的问题，这一部分热量被完全浪费，热量可以用来收集更多的太阳辐射，完全可以用来提高电力效率，另外解决系统的稳定性也是重点。无论是 WILSON 利用高度差提供驱动力，还是 YANG 利用的浅层地热能热交换器技术都需要特定的地理环境，虽然 WILSON 节省了循环泵，解决了初期投资的经济效益问题，但具有很大的地理限制性。YANG 的系统造价昂贵，在初期投资上不具有先天优势并且受制于地热资源丰富的地区。未来的发展趋势将液冷和太阳能集热结合起来，有效利用蒸发水的热量，降低运行成本，提高综合效率，需要在光伏板冷却技术的选择上进行造价、效率、经济性的系列分析，同时要利用地理环境资源，更好的将液冷技术利用到光伏电池的冷却上。

2. 新型技术用于太阳能光伏电池板冷却

2.1 浮动跟踪集中冷却

一种实现 PV 模块的最佳输出功率的方法，通过安装 PV 浮动设备，利用喷水器实现 PV 模块的冷却，类似于表面式冷却的形式，但不同的是系统利用反射器来集中太阳辐射以增加能量的收集。独特的太阳能跟踪系统定位反射器，最大幅度的增加光伏组件上的太阳辐射。这项冷却技术简称为 FTCC，意为漂浮、跟踪、浓缩和冷却。图 9 显示了一个 FTCC 系统及其主要组件。Carlotti[43]发现了一种掺杂高发射荧光团的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)薄膜的发光太阳能聚光器(LSCs)，可以提高最大 14% 的光学效率。Parel[44]建立了从发光太阳聚光器边缘逃逸的角分布光模型，应用于光伏组件，提高了效率。Sandra F.H[45]将柔性波导管应用于太阳能聚光器，提高了光伏转换效率并有减少二氧化碳的排放、导管超薄、机械可弯曲并且高效灵活。



1-光伏模块 2-洒水器 3-太阳能反射器

图 9. 浮动跟踪集中冷却系统 (FTCC)

1- Photovoltaic Module 2-Water Sprinkler 3-Solar Reflector

Figure 9. Floating Tracking Centralized Cooling System (FTCC)

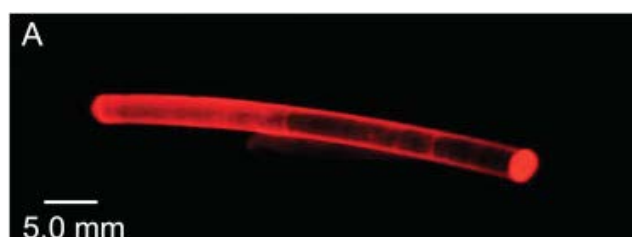


图 10.紫外线照射下的柔性波导管

Figure 10. Flexible waveguide under UV irradiation

2.2 混合太阳能光伏/热(PV/T)系统通过喷水冷却

PV/T 一体化可以有效缓解废热引起光电转化效率下降的问题，提高太阳能的综合利用率，由于用水做流体，因此可以利用这些热量制备热水，这就是太阳能光伏光热一体化系统[46-49]。如图 11 所示，PV/T 一体化系统可以产生热水和电力两种有用收益，由于水流吸收了造成硅电池转换效率下降的余热，成为可以利用的热水，系统的整体效率将比单一的光伏或热水系统高。Bergene 和 Løvvik[50]在理论上指出 PV/T 系统的太阳能综合利用效率可达到 60%~80%。

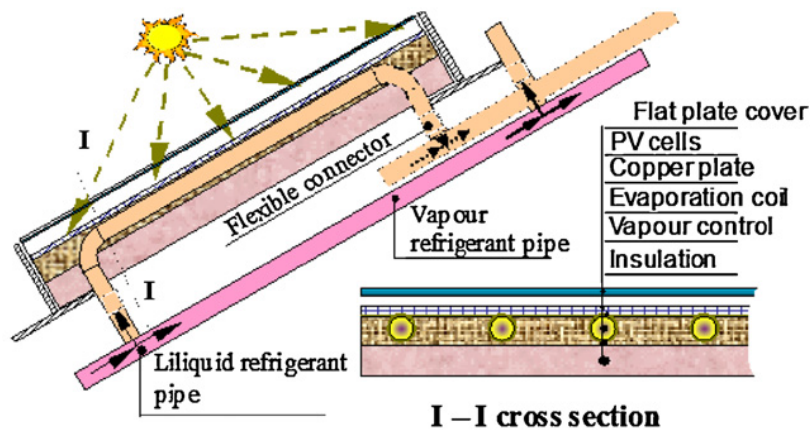


图 11.太阳能 PV/T 一体化

Figure 11. Solar PV/T integration

表 1.PV/T 光伏冷却技术研究成果

Table 1. Research results of PV/T photovoltaic cooling technology

作者	创新点/贡献	相关图表
S.A Kalogirou[51]	<ul style="list-style-type: none"> ●建立家庭热水和电力生产的 PV/T 太阳能系统，并进行了测试和评估 ●采用多晶硅太阳能电池产生电能提高 38%，混合动力机组成功的机会更大 	
王文仪[52]	<ul style="list-style-type: none"> ●将透明光伏组件与铝合金平板集热器结合为一体的新型 PV/T 系统 ●工艺上容易实现，价格低廉，性能上可使得光电光热效率有所提高 	
王霜[53]	<ul style="list-style-type: none"> ●构建了一种基于 Ω 形微槽道热管风冷冷却的 PV/T 组件 ●组件平均光电效率提高 11%，平均光热效率为 30%，平均焓效率为 13% 	图 12
H. Jouhara[54]	<ul style="list-style-type: none"> ●在混合光伏/T 系统上进行实验，分析了热水对消费者的影响 ●低太阳辐射日可满足住宅 60% 左右的热需求，高太阳辐射日可满足家庭 100% 的热需求 	图 13
Tang[55]	<ul style="list-style-type: none"> ●将微型热管阵列用于光伏板的冷却，通过利用蒸发器和冷凝器进行传热 ●空冷提高了 2.6% 的电气效率，水冷提高了 3%，水冷效果较好 	

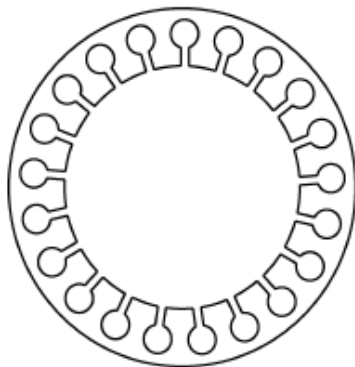


图 12. 形微槽道热管截面

Figure 12. Heat pipe cross section of a microchannel



图 13. 太阳能混合 PV/T 测试安装视图

Figure 13. Solar hybrid PV/T test setup view

2.3 混合太阳能光伏/热电(PV/TE)系统由散热器冷却

PV/TE 是通过将光伏转换系统与热电模块(TE)和散热器相结合,如图 14 所示,TE 模块用于吸收光伏组件表面的热量,当 PV/TE 系统暴露在太阳辐射下时,随着时间的变化,温度逐渐升高。当顶部和底部表面有温度变化时,热电偶内部载流子扩散,从光伏组件收集的电能被耗散到电阻中并储存在电池中,散热器用于光伏组件散热,使光伏组件表面降温。[56]

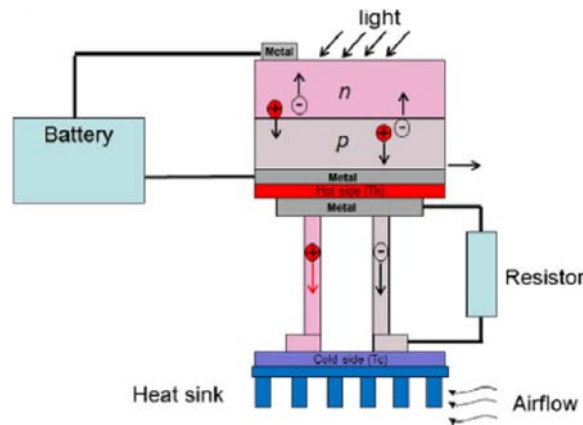


图 14. 带有散热器的混合光伏/TE 系统

Figure 14. Hybrid PV/TE system with heat sink

表 2.PV/TE 光伏冷却技术研究成果

Table 2. Research results of PV/TE photovoltaic cooling technology

作者	创新点/贡献	相关图表
H. Hashim[57]	<ul style="list-style-type: none">●推导了热电模块几何优化模型●提高整体功率输出和转换效率,在完全消除对流热损失的理想情况下,输出功率可提高近一倍	
Zhou[58]	<ul style="list-style-type: none">●研究了纳米结构的全光谱特性对 PV-TE 系统性能的影响●平均反射波长在 1.1-2.5μm 的纳米结构对混合系统中的 TE 组件是有利的,输出功率密度提高了 9.1%	图 15
Soprani[59]	<ul style="list-style-type: none">●为 PV/TE 模块开发的模型,集成了散热器特定的设计约束●仿真和实验结果表明,两者具有良好的兼容性	
Ali[60]	<ul style="list-style-type: none">●将分段式热电发生器设计成引脚形状●当有效利用气流时,分段式热电发生器提高了效率和输出功率,引脚变细显著提高了设备效率同时增加负载比会对设备效率及其输出功率产生不利影响	

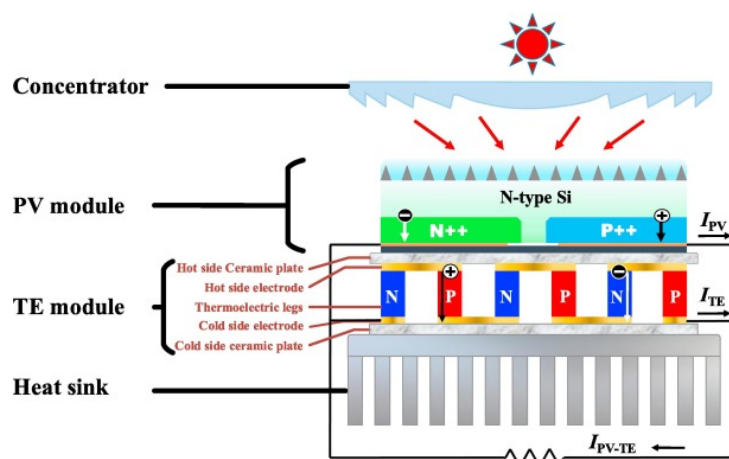
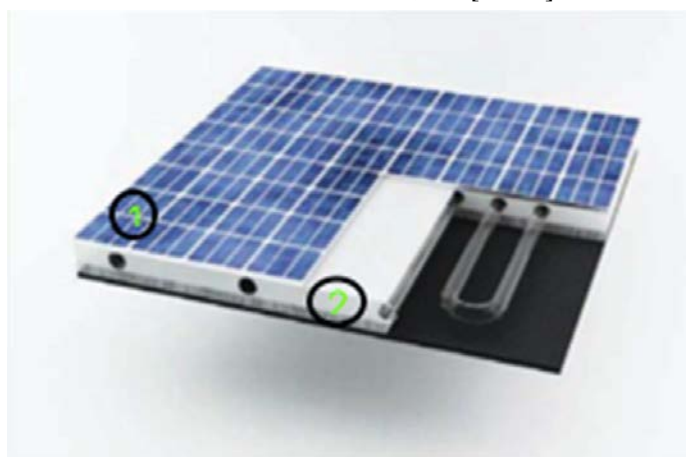


图 15. 浓缩 PV-TE 混合系统原理图

Figure 15. Schematic of a concentrated PV-TE hybrid system

2.4 相变材料冷却（PV-PCMs）提高光伏电池板性能

为了达到更好的电能效率，利用相变材料(PCM)的相变吸热特性，将其放置于光伏板的背面来达到降低光伏板温度的目的，如图 16 所示。当温度升高时，PCM 内的化学键随着固液相变而分离，由于相变是吸热过程，PCM 吸收热量，当热量达到相变温度时，材料开始熔化，然后逐渐温度稳定下来，直到熔炼过程完成[61-72]。



1-光伏模块 2-PCM 模块

图 16.采用相变材料的光伏电池板

1-PV Module 2-PCM Module

Figure 16. Photovoltaic panels with phase change materials

Wang[73]合成了双芯碳酸钙壳微胶囊，制备方法如图 17 所示，实验结果表明：由于碳酸钙壳层的存在，微胶囊的导热性能得到了提高，具有导电属性的碳酸钙外壳提高了光伏效率，二元核心的范围在 55.7% ~ 59.4%之间，当加热到 400°C时，微胶囊的质量损失在 5%到 28%之间。Hachem[74]用三种不同的装置测试了单一 PCM 和复合 PCM 对光伏电池板的性能影响，实验装置如图 18 所示，实验结果表明单一 PCM 的使用可以使光伏板的温度平均降低 2.7°C，平均提高电效率 3.0%，采用复合 PCM 可使光伏板温度平均降低 5.6 °C，平均提高电能效率 5.8%。Chandel[75]得出有机 PCM 虽然导热系数较低，但却能将光伏板的电性能提高 5%，熔融温度大于 30°C的 PCM 在保持光伏板温度恒定方面有很大的潜力，可以有效避免局部热点的形成，也保证了在炎热的夏夜进行适当的凝固。

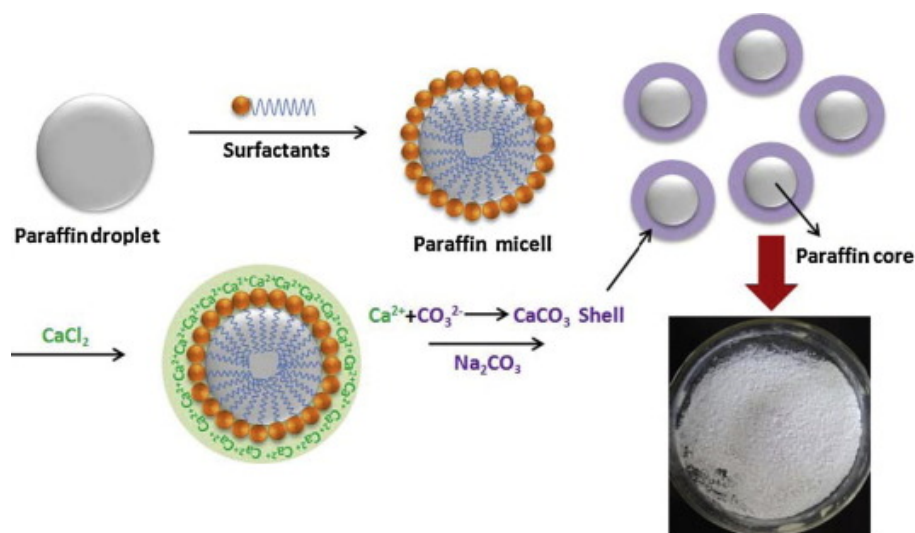


图 17. 碳酸钙壳微胶囊的制备流程

Figure 17. Preparation process of calcium carbonate shell microcapsules

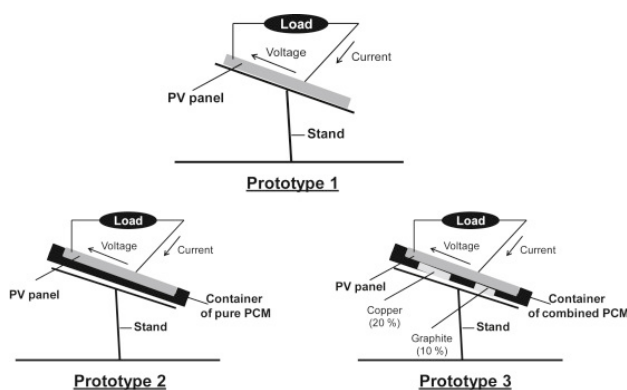


图 18. 三种不同原型构造装置

Figure 18. Three different prototype construction devices

近几年的新型光伏冷却技术不断发展，这些技术都有自身的优缺点。浮动跟踪集中冷却技术有效避免了能量分散；使用抽运系统时可以避免电网压力。然而和传统液冷的缺点类似，蒸发造成水的浪费；洒水器不能喷洒整个光伏组件表面；投资成本高；并且当水喷射时只能达到区域冷却。PV/T 系统使电效率增加，可以为家庭应用提供热水，组合起来比系统分散时更有效。但由于流量恒定，无法时刻达到最优效率，高初始成本会导致应用这些系统通常需要补贴。PV/TE 系统中的散热器使平均温度下降 8.29%，电效率提高。但在通过半导体的传导过程中，热和冷部件之间造成大量传热损失，湍流气流使散热器高度不稳定，引入了热电模块和换热器等装置必然会增加初期的投资成本，系统设备越复杂，成本和维护费用必然会升高，过于复杂的系统容易因为一个设备的损坏导致整体系统的崩溃，目前 PV/TE 技术除了需要解决冷热部件的传热损失，增强换热器的稳定性，还需要从初期成本，使用寿命以及提高的经济效益进行充分对比。PV-PCMs 能在温度变化很小的情况下储存大量的热量，相变发生在恒定的温度下，吸收的热量可以用来给建筑物供暖。但有些相变材料在固态时导热系数很低，无机相变材料潜热高，导热系数小，长时间循环会造成装置的腐蚀和结垢；而有机相变材料导热好，无腐蚀但是潜热较低，降低了可用于蓄热的有效容积，另外在寒冷地区效率较差并有冻结的可能；材料的吸收能力会随着时间的推移而退化。新技术的发展不能仅从提高效率这一方面来进行，应该充分考虑推广到实际应用的可能性，要满足经济性的先行条件，努力提高系统的循环稳定性。PV/T 技术可以通

过调节流量的方式,避免无法时刻处在最优效率,另外在 PCM 的应用上可以与热管技术相结合,形成热管耦合 PCM 的 PV/T 一体化系统。

3. 结 论

对近年来国内外光伏电池板冷却的领域研究进行了综述和详细讨论,传统的冷却技术包括自然对流循环冷却、强制对流循环冷却以及液冷。新型的冷却方式包括 FTTC、PV/T、PV/TE 以及 PV-PCMs 四种。得出几点结论并提出未来的发展方向:

(1) 通过风冷的自然/强制循环对流冷却技术逐渐成熟,操作方便、系统简单,但应该因地制宜,根据地理环境选择合适的方式;在提升表面对流传热系数的同时增大换热面积。建立完整的监控和自动控制系统,避免光伏电池板表面温度分布不均匀的现象发生,并可以根据外部条件的变化随时调整外部冷源的工作功率,在保证转化效率的同时力求经济效益更好。在液冷的发展方向上,需要解决的是水冷过后蒸发水的问题,将这部分热量用来收集更多的太阳辐射,并且解决系统的运行稳定性。将液冷和太阳能集热结合起来,降低运行成本,提高综合效率。

(2) 新技术的发展要更需贴合经济性的指标,充分考虑推广到实际应用的可能性;努力提高系统的循环稳定性;着重解决现有新技术仍然存在的问题,将 PCM、热管技术以及储能技术相结合,形成一个完整的热量循环使用;同时研发复合相变材料,通过添加成核剂、增稠剂,利用超声波技术等提高 PCM 的循环稳定性,合理设计相变式储热装置的内胆及盘管组件的结构,避免换热元件换热不均匀,相变材料无法充分利用等问题。

(3) 未来的研究必须集中在从光伏组件表面能够有效地收集热量,并以更可控和稳定的方式来进行冷却。可以从减小热阻、降低温度以及提升光伏电池板性能 3 个方面来更好的发展光伏系统冷却技术,同时基于材料的使用、资本成本和性能等几个方面综合考虑,更好的向实际应用所推广。

参 考 文 献

- [1] Dolf Gielen, Francisco Boshell, Deger Saygin, et al. The role of renewable energy in the global energy transformation[J]. Energy Strategy Reviews, 2019, 24: 38-50.
- [2] Lei Zhang, Zhiqiao Chen, Jing Su, Jingfa Li. Data mining new energy materials from structure databases[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 107: 554-567.
- [3] Ella Zhou, Wesley Cole, Bethany Frew. Valuing variable renewable energy for peak demand requirements[J]. Energy, 2018, 165: 499-511.
- [4] Xiaolu Wang, Nana Li, Wei Sun, et al. Quantitative analysis of distributed and centralized development of renewable energy [J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(05): 576-584.
- [5] Alibakhsh Kasaeian, Fatemeh Rajaee, Wei-Mon Yan. Osmotic desalination by solar energy: A critical review[J]. Renewable Energy, 2019, 134: 1473-1490.
- [6] Jian Jin, Mingkai Liu, Pengzhu Lin, et al. Ultra-high Temperature Processing by Concentrated Solar Energy with Accurate Temperature Measurement[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150: 1337-1344.
- [7] Zeyu Liu, Yuying Yan, Rong Fu, et al. Enhancement of solar energy collection with magnetic nanofluids[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 12(8): 130-135.
- [8] 于玮. 光伏效应的产生原理及其应用研究[J]. 电子世界, 2016(21): 11-13.
Yu Wei. The principle of photovoltaic effect generation and its application research [J]. Electronic World, 2016 (21): 11-13.
- [9] 李娅菲. 太阳能电池, 未来战场的主要能源[N]. 中国国防报, 2019-01-22(004).
Li Yafei. Solar cells, the main energy source in the future battlefield [N]. China National Defense News, 2019-01-22 (004).
- [10] Yu Wang, Sheng Zhou, Hong Huo. Cost and CO₂ reductions of solar photovoltaic power generation in China: Perspectives for 2020[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 370-380.

- [11] Bhubaneswari Parida, S. Iniyan, Ranko Goic. A review of solar photovoltaic technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2011,15(3):1625-1636.
- [12] R.M. da Silva, J.L.M. Fernandes. Hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems simulation with Simulink/Matlab[J].Solar Energy,2010,84(12):1985-1996.
- [13] A.M. Elbreki,M.A. Alghoul,A.N. Al-Shamani,et al. The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: A critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,57:602-647.
- [14] A. Syafiq,A.K. Pandey,N.N. Adzman,et al. Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels[J]. Solar Energy,2018,162:597-619.
- [15] J Praveen,V VijayaRamaraju. Materials for Optimizing Efficiencies of Solar Photovoltaic Panels[J]. Materials Today: Proceedings,2017,4(4):5233-5238.
- [16] 冯鲁文.基于斯特林循环的太阳能发电效率分析[J].技术与市场,2018,25(12):146-148.
Feng Luwen. Analysis of Solar Power Generation Efficiency Based on Stirling Cycle[J]. Technology and Market, 2018, 25(12): 146-148.
- [17] 蔡威,吴海燕,谢昊成.光伏太阳能电池进展[J].广东化工,2019,46(01):84-85.
Cai Wei, Wu Haiyan, Xie Wucheng. Progress in Photovoltaic Solar Cells[J].Guangdong Chemical Industry, 2019,46(01):84-85.
- [18] K. Ezzaeri,H. Fatnassi,R. Bouharroud,et al. The effect of photovoltaic panels on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses[J]. Solar Energy,2018,173:1126-1134.
- [19] E. Skoplaki,J.A. Palyvos. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations[J]. Solar Energy,2009,83(5):614-624.
- [20] 刘成,沈璐颖,徐郑羽,等.钙钛矿太阳能电池的研究进展[J].化工进展,2014,33(12):3246-3252.
Liu Cheng, Shen Yuying, Xu Zhengyu, et al.Research progress of perovskite solar cells[J].Chemical Industry and Engineering Progress,2014,33(12):3246- 3252.
- [21] Zeyad A. Haidar,Jamel Orfi,Zakariya Kaneesamkandi. Experimental Investigation of Evaporative Cooling for Enhancing Photovoltaic Panels Efficiency[J]. Results in Physics,2018,11:690-697.
- [22] Ashij K. Suresh,Sahil Khurana,Gopal Nandan,et al. Role on nanofluids in cooling solar photovoltaic cell to enhance overall efficiency[J]. Materials Today: Proceedings,2018,5(9): 20614-20620
- [23] 赵春江,崔容强.太阳能建材技术的研究与开发(I)——光伏屋顶热性能的调查[J].太阳能学报,2003(03):352-356.
Zhao Chunjiang, Cui Rongqiang. Research and Development of Solar Building Materials Technology (I)——Investigation on Thermal Performance of Photovoltaic Roof[J]. Journal of Solar Energy,2003(03):352-356.
- [24] 杨洪兴,季杰.BIPV 对建筑墙体得热影响的研究[J].太阳能学报,1999(03):270-273.
Yang Hongxing, Ji Jie. Research on the Influence of BIPV on the Heat of Building Walls[J]. Journal of Solar Energy,1999(03):270-273.
- [25] 黄护林,韩东,孔令宾.光伏建材型太阳能电池板自然通风冷却的研究[J].太阳能学报,2006(03):309-313.
Huang Hulin, Han Dong, Kong Lingbin. Research on Natural Ventilation and Cooling of Photovoltaic Building Materials Solar Panels[J]. Journal of Solar Energy, 2006(03): 309-313.
- [26] Filip Grubišić-Čabo,Sandro Nižetić,Duje Čoko,et al. Experimental investigation of the passive cooled free-standing photovoltaic panel with fixed aluminum fins on the backside surface[J]. Journal of Cleaner Production,2018,176:119-129.
- [27] Erdem Cuce, Tulin Bali, Suphi Anil Sekucoglu.Effects of passive cooling on performance of silicon photovoltaic cells[J].Low-Carbon Technol, 2011,6:299-308
- [28] Hongbing Chen, Xilin Chen, Sizhuo Li, et al.Comparative study on the performance improvement of photovoltaic panel with passive cooling under natural ventilation[J].Smart Grid Clean Energy, 2014,3(4):374-379.
- [29] Arvind Tiwari,M.S. Sodha,Avinash Chandra,et al. Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2005,90(2):175-189.
- [30] Juwel Chandra Mojumder,Hwai Chyuan Ong,Wen Tong Chong,et al. The intelligent forecasting of the performances in PV/T

- collectors based on soft computing method[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2017,72:1366-1378.
- [31] Alibakhsh Kasaeian, Yasamin Khanjari, Soudabeh Golzari, et al. Effects of forced convection on the performance of a photovoltaic thermal system: An experimental study[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*,2017,85:13-21.
- [32] 朱丽,陈萨如拉,杨洋,等.太阳能光伏电池冷却散热技术研究进展[J].*化工进展*,2017,36(01):10-19.
Zhu Li, Chen Sarula, Yang Yang, et al. Research progress in cooling and cooling technology of solar photovoltaic cells[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(01): 10-19.
- [33] Usman Jamil Rajput, Jun Yang. Comparison of heat sink and water type PV/T collector for polycrystalline photovoltaic panel cooling[J]. *Renewable Energy*,2018,116: 479-491.
- [34] Chinamhora T, Cheng G, Tham Y, et al. PV panel cooling system for Malaysian climate conditions. In: *Proceedings of the international conference on energy and sustainability*. Karachi, Pakistan. April 27; 2013.
- [35] Li Zhu, Robert F Boehm, Yiping Wang, et al. Water immersion cooling of PV cells in a high concentration system[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,2010,95(2):538-545.
- [36] Zhen Wang, Yiping Wang, Marta Vivar, et al. Photovoltaic and photocatalytic performance study of SOLWAT system for the degradation of Methylene Blue, Acid Red 26 and 4-Chlorophenol[J]. *Applied Energy*,2014,120:1-10.
- [37] Yu. A. Abrahamyan, V. I. Serago, V. M. Aroutiounian, et al. The efficiency of solar cells immersed in liquid dielectrics[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,2002,73(4):367-375.
- [38] Yiping Wang, Zhenlei Fang, Li Zhu, et al. The performance of silicon solar cells operated in liquids[J]. *Applied Energy*, 2008,86(7):1037-1042.
- [39] M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, et al. Submerged photovoltaic solar panel: SP2[J]. *Renewable Energy*,2009,35(8): 1862-1865.
- [40] Earle Wilson. Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions[J]. *Renewable Energy*,2008,34(6): 1655-1660.
- [41] M. U. Siddiqui, Osman K. Siddiqui, A. Al-Sarkhi, et al. A novel heat exchanger design procedure for photovoltaic panel cooling application: An analytical and experimental evaluation[J]. *Applied Energy*,2019,239:41-56.
- [42] Li-Hao Yang, Jyun-De Liang. Enhanced efficiency of photovoltaic panels by integrating a spray cooling system with shallow geothermal energy heat exchanger[J]. *Renewable Energy*,2019,134:970-981.
- [43] Marco Carlotti, Giacomo Ruggeri, Fabio Bellina, et al. Enhancing optical efficiency of thin-film luminescent solar concentrators by combining energy transfer and stacked design[J]. *Journal of Luminescence*,2016,171:215-220.
- [44] Thomas S. Parel, Christos Pistolas, Lefteris Danos, et al. Modelling and experimental analysis of the angular distribution of the emitted light from the edge of luminescent solar concentrators[J]. *Optical Materials*,2015,42:532-537.
- [45] Sandra F.H. Correia, Patrícia P. Lima, Paulo S. André, et al. High-efficiency luminescent solar concentrators for flexible waveguiding photovoltaics[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,2015,138:51-57.
- [46] 季杰, 程洪波, 何伟, 等. 太阳能光伏光热一体化系统的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2005(2):170-173.
Ji Jie, Cheng Hongbo, He Wei, et al. Experimental study on solar photovoltaic photothermal integration system[J]. *Journal of Solar Energy*, 2005,(2):170-173.
- [47] 魏藏, 骆仲决, 赵佳飞, 等. 太阳能光电-光热综合利用系统[J]. *上海节能*, 2010(5):12-16.
Wei Wei, Luo Zhongyu, Zhao Jiafei, et al. Solar Photovoltaic-Photothermal Comprehensive Utilization System[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2010(5):12-16.
- [48] S. Kahwaji, M. B. Johnson, A. C. Kheirabadi, et al. Fatty acids and related phase change materials for reliable thermal energy storage at moderate temperatures[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2017,167:109-120.
- [49] 常泽辉, 田瑞, 侯静. 太阳能电池光伏光热一体化系统的性能研究[J]. *电源技术*, 2012, 36:682-683.
Chang Zehui, Tian Rui, Hou Jing. Performance Study of Solar Cell Photovoltaic Thermal Integration System[J]. *Power Technology*, 2012, 36:682-683.
- [50] T. Bergene, O. M. Løvvik. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells[J]. *Solar Energy*,

1995,55:453-462.

- [51] S.A. Kalogirou, Y. Tripanagnostopoulos. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(18): 3368-3382.
- [52] 王文仪, 朱勋梦, 罗玉玲. 一种新型 PV/T 复合系统设计讨论[J]. *桂林师范高等专科学校学报*, 2019, 33(01): 102-104.
Wang Wenyi, Zhu Xunmeng, Luo Yuling. Discussion on Design of a New PV/T Composite System[J]. *Journal of Guilin Teachers College*, 2019, 33(01): 102-104.
- [53] 王霜, 罗会龙, 王浩. 主、被动冷却的微槽道热管 PV/T 组件光电/光热性能对比分析[J]. *化工学报*, 2018, 69(06): 2432-2438.
Wang Shuang, Luo Huilong, Wang Hao. Comparative analysis of photoelectric/photothermal performance of micro/channel heat pipe PV/T modules with active and passive cooling[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)*, 2018, 69(06): 2432-2438.
- [54] H. Jouhara, M. Szulgowska-Zgrzywa, M.A. Sayegh, et al. The performance of a heat pipe based solar PV/T roof collector and its potential contribution in district heating applications[J]. *Energy*, 2016, 136: 117-125.
- [55] Xiao Tang, Zhenhua Quan, Yaohua Zhao. Experimental Investigation of Solar Panel Cooling by a Novel Micro Heat Pipe Array[J]. *Energy and Power Engineering*, 2010, 2: 171-174.
- [56] Wei Pang, Yu Liu, Shiquan Shao, et al. Empirical study on thermal performance through separating impacts from a hybrid PV/TE system design integrating heat sink[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 60: 9-12.
- [57] H. Hashim, J.J. Bomphey, G. Min. Model for geometry optimisation of thermoelectric devices in a hybrid PV/TE system[J]. *Renewable Energy*, 2016, 87: 458-463.
- [58] Yi-Peng Zhou, Ming-Jia Li, Wei-Wei Yang, et al. The effect of the full-spectrum characteristics of nanostructure on the PV-TE hybrid system performances within multi-physics coupling process[J]. *Applied Energy*, 2018, 213: 169-178.
- [59] S. Sopranì, J.H.K. Haertel, B.S. Lazarov, et al. A design approach for integrating thermoelectric devices using topology optimization[J]. *Applied Energy*, 2016, 176: 49-64.
- [60] Haider Ali, Bekir Sami Yilbas, Fahad A. Al-Sulaiman. Segmented thermoelectric generator: Influence of pin shape configuration on the device performance[J]. *Energy*, 2016, 111: 439-452.
- [61] M. Mastani Joybari, F. Haghighat, J. Moffat, et al. Heat and cold storage using phase change materials in domestic refrigeration systems[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 106: 111-124.
- [62] T. Bouhal, T. El Rhafiki, T. Kousksou, et al. PCM addition inside solar water heaters: Numerical comparative approach[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 19: 232-246.
- [63] Mohamed S. Yousef, Hamdy Hassan. Energetic and exergetic performance assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in a solar distillation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 179: 349-361.
- [64] Ping Ping, Rongqi Peng, Depeng Kong, et al. Investigation on thermal management performance of PCM-fin structure for Li-ion battery module in high-temperature environment[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 176: 131-146.
- [65] Deqiu Zou, Xiaoshi Liu, Ruijun He. Preparation of a novel composite phase change material (PCM) and its locally enhanced heat transfer for power battery module[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 1196-1202.
- [66] Xiaofeng Xu, Xuelai Zhang, Sheng Liu. Experimental study on cold storage box with nanocomposite phase change material and vacuum insulation panel[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(14): 4429-4438.
- [67] Jose Pereira da Cunha, Philip Eames. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review [J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 227-238.
- [68] Li Y C M, Chen Y H A. Assessing the thermal performance of three cold energy storage materials with low eutectic temperature for food cold chain[J]. *Energy*, 2016, 115: 238-256.
- [69] Yoram Kozak, Mohammed Farid, Gennady Ziskind. Experimental and comprehensive theoretical study of cold storage packages containing PCM[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 899-912.
- [70] K. Pielichowska, K. Pielichowski. Phase change materials for thermal energy storage[J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2014, 64: 67-123.
- [71] D. Chandra, R. Chellappa, W.-M. Chien. Thermodynamic assessment of binary solid-state thermal storage materials[J]. *Phys. Chem.*

Solids ,2005,66: 235–240.

- [72] X.Du, H.Wang, Y. Wu, et al.Solid-solid phase-change materials based on hyperbranched polyurethane for thermal energy storage[J]. Appl. Polym. Sci. 2017,134:1–8.
- [73] Tingyu Wang,Shuangfeng Wang,Ruilian Luo,et al. Microencapsulation of phase change materials with binary cores and calcium carbonate shell for thermal energy storage[J]. Applied Energy,2016,171:113-119.
- [74] Farouk Hachem,Bakri Abdulhay,Mohamad Ramadan,et al. Improving the performance of photovoltaic cells using pure and combined phase change materials – Experiments and transient energy balance[J]. Renewable Energy,2017,107:567-575.
- [75] S.S. Chandel,Tanya Agarwal. Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,73:1342-1351.