

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.10.017

光伏辐射板型 PV/T 系统的电热冷性能

尹宝泉^a, 王一平^{a,b}, 朱丽^a, 崔勇^c, 黄群武^b

(天津大学 a. 建筑学院; b. 化工学院; c. 建筑设计院, 天津 300072)

摘要:提出了一种基于单晶硅太阳能电池的电热冷联产光伏辐射板, 将起集散热作用的辐射板与单晶硅光伏组件耦合, 通过辐射板管路内流体循环, 降低电池工作温度, 一方面提高电池发电效率, 同时回收利用余热; 另一方面, 夜间通过辐射制冷方式, 获得冷量, 从而实现电热冷联产。通过实验测试分析, 光伏辐射板同比 PV 组件发电效率可提高 8%~16%, 且集热效率达到 45% 左右, 制冷能力为 40~80 W/m²。

关键词:光伏电热联用; 辐射板; 光伏辐射板; 电热冷联产

中图分类号:TK514

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)10-114-06

Poly-generation of cooling, heating and power performance analysis of PV radiant panel PV/T system

YIN Baoquan^a, WANG Yiping^{a,b}, ZHU Li^a, CUI Yong^c, HUANG Qunwu^b

(a. School of Architecture; b. School of Chemical Engineering and Technology;

c. Architecture Design Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A combined cooling, heating and power mono-silicon solar photovoltaic radiant panel (PV/R) is proposed, which compounds the radiant panel with the PV module. The PV operating temperature is decreased through the internal cycling of liquid pipe of radiant panel. Thus the power efficiency of PV module is increased, at the same time, the heat of PV using for heating can be recollected. While at night, the cooling used for the daytime is collected through the nocturnal cooling storage. In the experiment testing, the PV/R not only increases the power efficiency by 8%~16%, but obtains the heating efficiency by 45% and gets the cooling capacity of 40~80 W/m².

Key words: PV/T; radiant panel; PV radiant panel; combined cooling

入射在太阳能电池上的太阳辐射, 通常只有不到 20% 的辐照度转化成电力, 其余部分转化为热量^[1], 这部分热量将导致太阳能电池温度升高, 伴随着温度的升高, 受温度效应系数影响, 发电效率降低。为了回收利用太阳能电池产生的热量, 降低太阳能电池工作温度, 光伏光热一体化 (PV/T) 被提出和广泛研究。自从 1978 年 Kern^[2] 首次提出使用水或空气作为载

热介质的 PV/T 系统的这一概念后, 世界上已有许多研究者对 PV/T 系统进行了理论分析^[3-9]。其中, Sandnes Bjornar 和 Rekstad John 将单晶硅光伏电池粘贴在由聚苯醚工程塑料制成的扁盒式太阳能集热板上, 表面覆盖玻璃盖板, 进行了实验研究^[3]。Hisashi Saitoh 等将单晶硅光伏电池粘贴在铝板上, 铝板背面附有铜管, 用盐水作为换热介质, 测试了系

收稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金外国青年学者研究基金资助项目 (2012B2-0018); 天津大学优秀博士论文基金

作者简介: 尹宝泉 (1984-), 男, 天津大学博士研究生, 主要从事太阳能建筑一体化和绿色建筑与新能源研究。

朱丽 (联系人), 女, 天津大学教授, 博士生导师, (Tel) 022-27404771; (E-mail) zly_tj@163.com。

统的性能^[4]。Zakharchenko R 等使用商用太阳能集热器,表面覆盖黑色的 PVC 吸热板,并与不同的光伏电池粘结,制成 PV/T 收集器^[5]。季杰等提出了一种扁盒式太阳能光伏热水一体墙,并进行了理论分析^[6]。蔡康等^[7]指出当太阳能电池冷却器翅片高度为 10~20 mm,间距为 20~40 mm 时,冷却效果最好,其背板温度最高可以降低 15 °C,相对电效率提高约 12%。裴刚等^[8]对有无玻璃盖板的 PV/T 系统性能进行了研究。Ursula Eicker 等^[9]开发了一种新的 PV/T 系统,通过夜间冷辐射,可以获得 60~80 W/(m²·h)左右的冷量。PV/T 既能提高电池发电效率,又能提供与建筑用能匹配的热量,获得了光伏行业的一致认可,ECN 连续几年就 PV/T 的研究进展进行了综述并提出了研究方向^[10-11]。

为尽可能提高太阳能利用的综合效率,文中在电池背面敷设流体通道带走热量以降低电池温度,夜间利用辐射制冷方式获得冷量,这种既能发电又能提供热能和制冷的组件即为光伏辐射板(Photovoltaic radiant panel, PV/R)。相比 PV/T, PV/R 能更有效的降低电池背板温度,提升电池的发电效率,更全面均衡的解决建筑对于电力、采暖、制冷、热水的需要。

1 实验装置

1.1 实验材料

1.1.1 辐射板

辐射板,是一种能量集散装置,通常为金属材料。文中采用铝型材与铜管耦合的方式,铝型材为集散热翅片,铜管为工质循环管路。白天,太阳光入射到辐射板表面,流体循环收集热量;夜间,辐射板表面与低温太空进行辐射换热,同时与周围空气进行对流换热,与周围环境辐射换热,得到冷量。

1.1.2 单晶硅 PV 组件

单晶硅 PV 组件 CNPV-240M(东营光伏),尺寸为 1 650 mm×985 mm,开路电压 V_{oc} 为 37.6 V;短路电流 I_{sc} 为 8.40 A;最大功率电压 V_{mp} 为 30.8 V,最大功率电流 I_{mp} 为 7.80 A。组件功率温度效应系数为 -0.45(%/°C),不同工作温度下,组件的 I-V 曲线,如图 1 所示。

1.1.3 电热冷联产单晶硅 PV/R 组件

PV/R 组件是将辐射板与电池组件耦合,在光伏组件及辐射板之间,可耦合一层薄铝板,用于均匀传力及传热。光伏辐射板组件的构造,如图 2 所示。

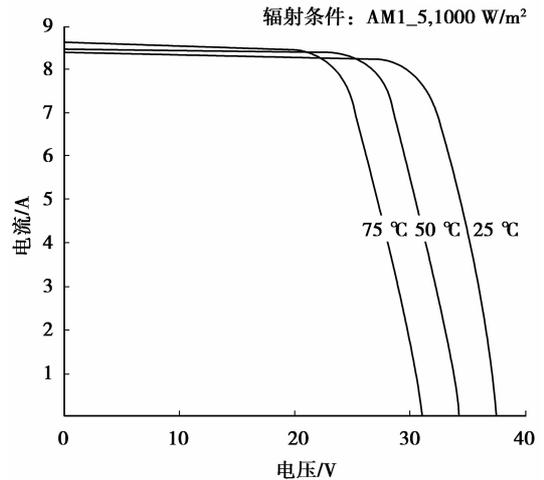


图 1 不同温度条件下 PV 组件 I-V 曲线图

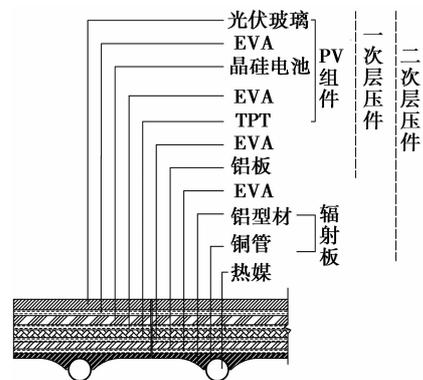


图 2 电热冷联产光伏辐射板组件构造图

1.2 实验系统

实验选取 2 块 PV 组件,2 块 PV/R 组件进行对比测试分析,如图 3 所示。

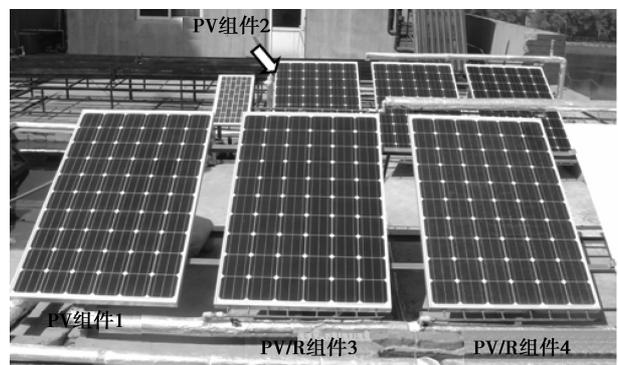


图 3 电热冷组件实验系统图

为避免组件彼此的遮挡,测试组件间距为 3.7 m。设置 1.2 m³ 的冷热收集箱;1.5 kW 制冷量的热泵机组;额定流量 1.8 m³/h,功率 275 W 的循

环泵;量程范围 $0 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$,精度为 10 L/h 的流量计,此外,配备了 I-V 曲线仪, Pt100 传感器(精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$),多路巡检仪及其它数据采集分析等设备,如图 4 所示。

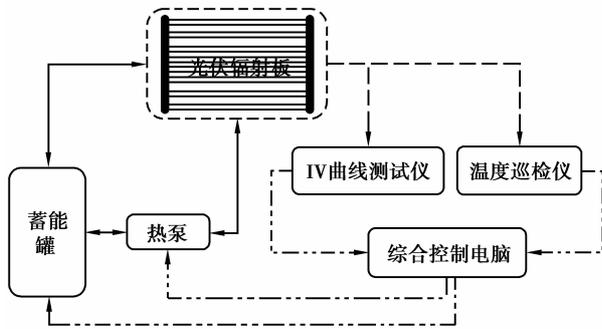


图4 电热冷组件实验系统构成图

1.3 系统控制

检测 PV 背板、PV/R 的进出口及背板、蓄能罐等的温度,对系统运行模式进行控制,如图 5 所示。

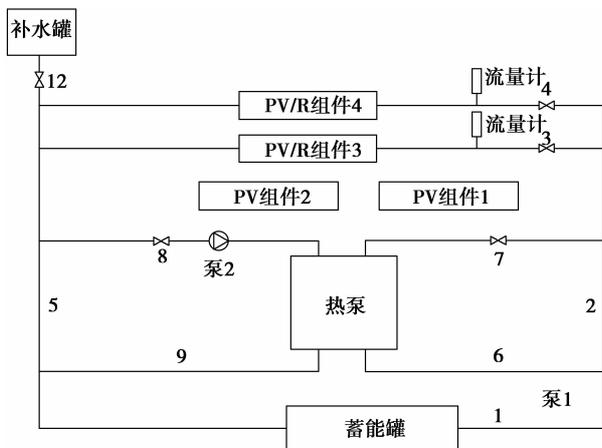


图5 电热冷组件实验控制流程图

系统的控制模式分为 3 种:1)昼间 PV/R 集热循环。当 PV/R 背板温度高于 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ($2 \text{ }^\circ\text{C}$ 温差控制,即 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 启, $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 停),蓄能罐回收 PV/R 组件的余热;2)夜间 PV/R 辐射制冷循环。当 PV/R 背板温度低于蓄能罐温度,循环开始, $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 温差控制循环;3)PV/R 耦合热泵制冷循环。当夏季夜间通过 PV/R 组件辐射制冷难以获得较低的温度时,开启热泵,此时,PV/R 组件与热泵的冷凝器相连,充当表冷器,蓄能罐与热泵的蒸发端相连。当蓄能罐的温度达到设定温度($20 \text{ }^\circ\text{C}$)时,热泵自动停机。

2 理论分析

2.1 电性能

PV 发电效率受其工作温度的影响,根据温度效应系数,其发电效率变化为

$$\eta_{el} = \eta_0 [1 - 0.45\% (T - 25)], \quad (1)$$

其中: η_{el} 为组件的实际发电效率,%; η_0 为标况下 PV 组件的发电效率, 14.7% ; T 为实际运行过程中,电池背板的温度, $^\circ\text{C}$ 。

2.2 热性能

测试期间,设该 PV/R 组件吸收的太阳辐射热量为

$$Q_1 = I \times \eta_c \times A \times \beta, \quad (2)$$

其中: Q_1 为 PV/R 组件吸收的太阳辐射热量,W; I 为太阳能辐照度, W/m^2 ; η_c 为组件的集热效率,%; A 为组件的面积, m^2 ; β 为 1.15,修正系数(组件主管及支管外露部分的面积为集热面积的 15% ,考虑其吸收系数与硅相近,故取值 1.15)。

PV/R 组件集热量 Q_h 可通过进出口的温差和流量进行计算

$$Q_h = c \times m \times (T_{out} - T_{in}), \quad (3)$$

其中: Q_h 为 PV/R 组件的集热量,W; c 为循环介质的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; m 为介质的质量流量, kg/h ; T_{in} 、 T_{out} 为 PV/R 组件的进口温度。

基于能量平衡,PV/R 组件吸收的太阳辐射热量等于 PV/R 组件的集热量

$$Q_1 = Q_h, \quad (4)$$

由式(2)和式(4),可得 PV/R 组件集热效率

$$\eta_t = [c \times m \times (t_{out} - t_{in})] / (I \times A \times \beta \times 3.6). \quad (5)$$

通过式(5)可知,PV/R 组件的集热效率 η_t 辐照度、进出口温差及管路循环介质流量的影响。

2.3 冷性能

制冷期间,根据 PV/R 组件的制冷面积和制冷能力,则可求其制冷量

$$Q_c = \eta_c \times A \times \beta, \quad (6)$$

其中: Q_c 为 PV/R 组件通过辐射制冷、对流换热等方式的散热量,W; η_c 为组件的制冷能力, W/m^2 ; A 为组件的制冷面积, m^2 ; β 为管路损失补偿,修正系数,1.15(组件主管及支管部分外露部分的面积为 PV/R 组件面积的 15% ,夜间集冷,管路材质与组件表面的性质相似,故取值 1.15)。

根据 PV/R 组件进出口的温差及循环流量,可求其制冷量

$$Q_{cc} = c \times m \times (T_{in} - T_{out}), \quad (7)$$

其中: Q_{cc} 为 PV/R 组件集冷量, W; c 为循环介质的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m 为循环介质的流量, kg/h ; T_{in} 为 PV/R 组件的进口温度, $^\circ\text{C}$; T_{out} 为 PV/R 组件的出口温度, $^\circ\text{C}$ 。

基于能量平衡, PV/R 组件的集冷量等于 PV/R 释放的冷量

$$Q_c = Q_{cc}. \quad (8)$$

由式(6)和(8),求 PV/R 组件的 η_c

$$\eta_c = [c \times m \times (T_{in} - T_{out})] / [3.6 \times (A \times \beta)]. \quad (9)$$

通过式(9)可知, PV/R 组件的制冷能力 η_c 受进出口温差、管路循环质量流量等的影响。

3 结果与讨论

3.1 电性能

选取典型晴天,气象参数如图 6 所示。

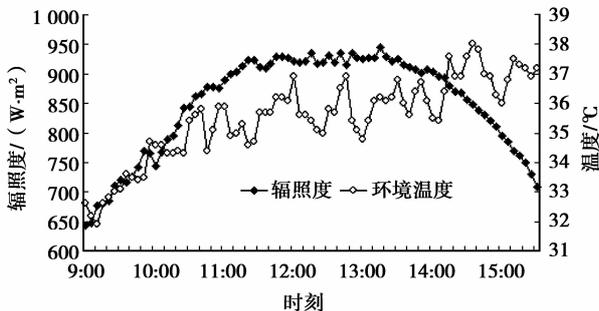


图 6 辐照度及温度图

通过 I-V 测试仪,测得的 PV/R 组件与 PV 组件发电的最大功率及差值, PV/R 组件同比于 PV 组件,发电效率提高 8%~13%,如图 8 所示。

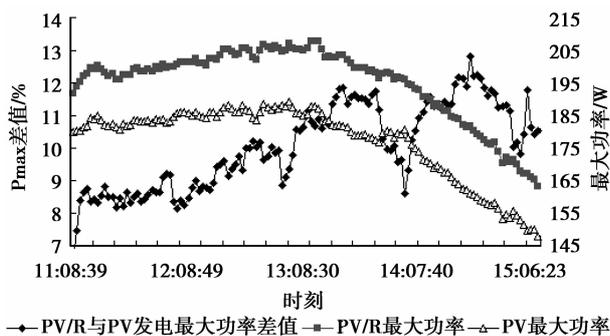


图 7 PV/R 组件与 PV 组件的瞬时功率及差值图

根据式(1),已知 PV/R 与 PV 组件背板温度,可计算其发电效率差值, PV/R 组件同比于 PV 组件,发电效率提高 11%~16%,如图 8 所示。

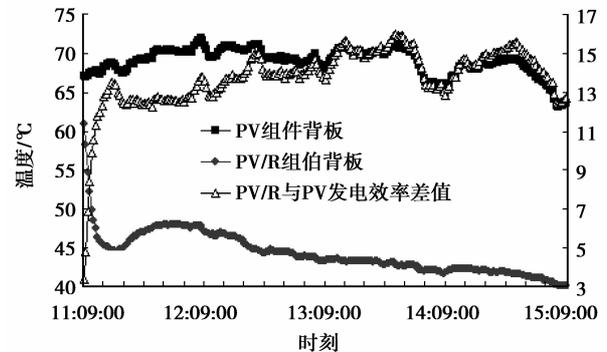


图 8 受温度影响 PV/R 组件与 PV 组件的发电效率增幅图

通过图 7 和图 8 可以看出 PV/R 组件较 PV 组件发电效率有 10% 左右的提高。然而二者有些许差别,这里做出说明:一方面是因为 I-V 曲线测试仪数据记录的频率为每分钟一次,而气象站太阳辐照度的记录为每 5 min 一次,发电效率计算有些偏差;另一方面组件背板的温度取的是平均值,接线盒处温度较高也会影响其发电效率。但二者的整体趋势是一样的。综上所述, PV/R 组件同比于 PV 组件,发电效率可提高 8%~16%。

3.2 热性能

PV/R 组件热性能受到背部管路排布、循环流量、进出口温差等的影响。通过红外热像仪(飒特 G-90)的分析, PV/R 组件正面的温度分布,如图 9 所示。

PV/R 组件背部接线盒处辐射板管路较其他地方宽 30 mm 左右,这导致此处背板的温度较其它各处高近 10°C,由图 9 中 L01 可以看出,其余各处的温度分布较为均匀。

由红外拍摄 PV/R 及 PV 组件背板温度分析,如图 10 所示。

通过图 8 和图 10 可以看出, PV 与 PV/R 组件背板温度相差近 20°C。

通过 PV/R 组件各处的测温点测得的温度,其各层的温度分布,如图 11 所示。

已知 PV/R 组件进出口的温差及循环媒介流量,根据公式(5),求其集热效率, PV/R 组件的集热效率为 45% 左右,如图 12 所示。

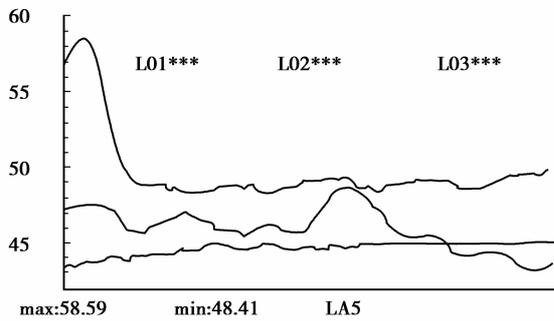
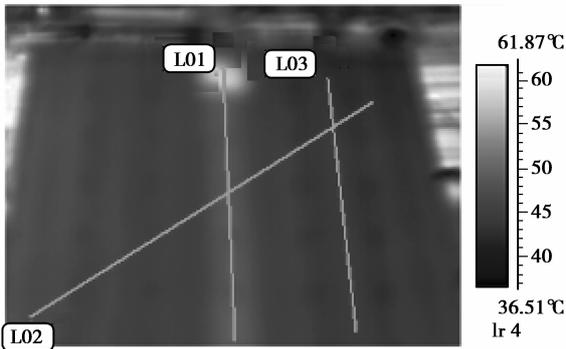


图 9 PV/R 组件正面温度分布图

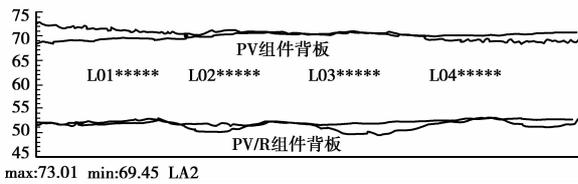
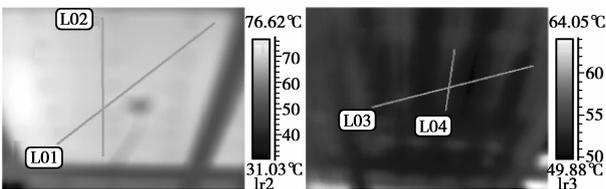


图 10 电热冷组件与常规电池组件的背板温度图

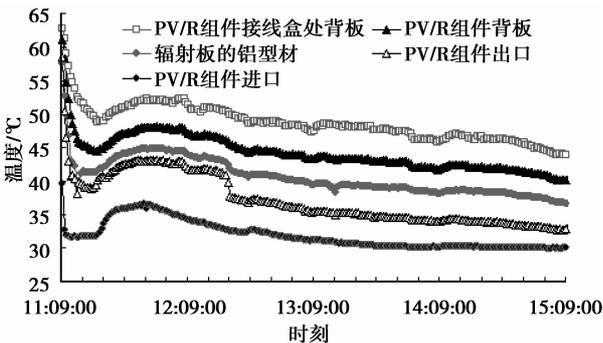


图 11 PV/R 组件背面的温度分布图

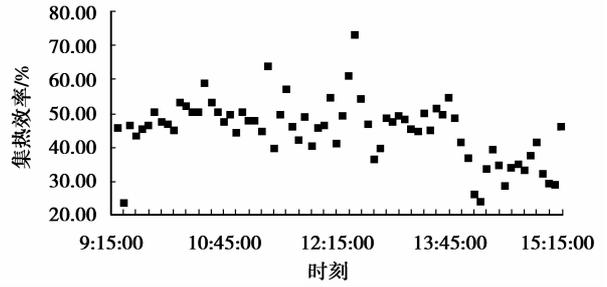


图 12 电热冷组件的集热效率图

3.3 冷性能

夜间制冷期间,选取典型晴天和阴天进行分析,其气象参数,如图 13 所示。

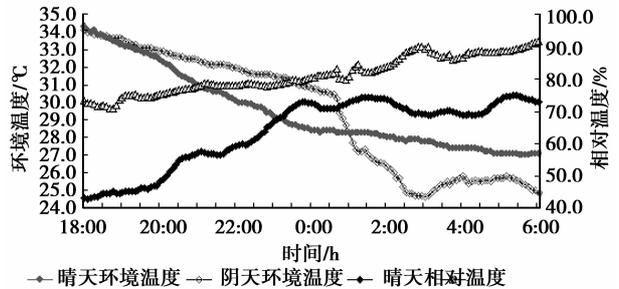


图 13 夜间相对湿度及温度图

已知 PV/R 组件的进出口温度,介质循环流量,根据式(9),可求 PV/R 组件的制冷能力,如图 14 所示。

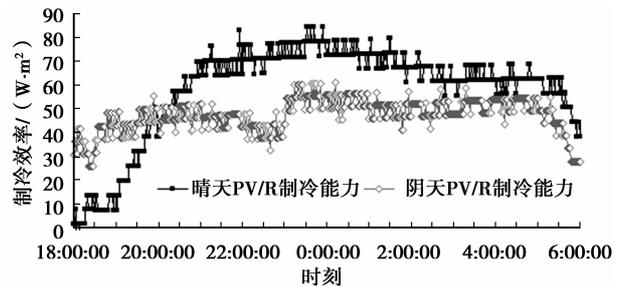


图 14 电热冷组件的制冷能力图

阴天时,由于大气透明度较低,PV/R 组件的制冷能力下降;晴天时,PV/R 的制冷能力较高。综上所述,PV/R 组件的制冷能力为 40~80 W/m²。

4 结 论

通过实验测试分析,电热冷光伏辐射板组件同比 PV 组件发电效率可提高 8%~16%,集热效率达

到 45%左右,制冷能力为 40~80 W/m²。这种电热冷联产组件,可同时为建筑物提供电力、采暖、热水和制冷等所需的能量,易于实现与建筑的一体化。此外,该组件可与建筑围护结构整合,同时加工及安装,不仅可以降低建筑的冷热负荷,还可节省器材和安装费用,降低光伏发电的成本,延长电池使用寿命,节省占地面积。

参考文献:

- [1] Mwssenger R A, Ventre J. 光伏系统工程 [M]. 王一波,廖华,伍春生,译. 北京:机械工业出版社,2012:43.
- [2] Kern E C J, Russell M C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector system [C]//Proceedings of the 13th Photovoltaic Specialists Conference, June 5-8, 1978, Washington DC, US. Institute of Electrical and Electronics Engineers,1978:1153-1157.
- [3] Sandnes B, John R. A photovoltaic /thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate Experimental study and analytical model [J]. Solar Energy, 2002, 72(1):63-73.
- [4] Saitoh H, Hamada Y, Kubota H, et al. Field experiments analyses on a hybrid solar collector [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23 (16): 2089-2105.
- [5] Robles J F P, Hernalez J G, Vorobiev Y. Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2004, 82 (1/2): 253-261.
- [6] 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,2005,26(2):170-173.
- JI Jie, CHENG Hongbo, HE Wei, et al. Experimental study on a hybrid photovoltaic/thermal solar system [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2005, 26 (2): 170-173.
- [7] 蔡康,关欣,刘鹏,等. 太阳能电池冷却器的设计与研究 [J]. 能源研究与信息,2009,25(3):166-171. CAI Kang, GUAN Xin, LIU Peng, et al. Design and study of the solar-cell cooling system [J]. Energy Research and Information,2009,25(3):166-171.
- [8] 裴刚,周天泰,季杰,等. 有无玻璃盖板工况对系统性能的影响[J]. 太阳能学报,2008,29(11):1370-1374. PEI Gang, ZHOU Tiantai, JI Jie, et al. Performance contrastive analysis of PV/T system with and without glaze conditions [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008,29(11):1370-1374.
- [9] Eicker U, Dalibard A. Photovoltaic - thermal collectors for night radiative cooling of buildings [J]. Solar Energy,2011,85(7):1322-1335.
- [10] Zondag H A, Helden W G J, Bakker M, et al. PVT roadmap: a European guide for the development and market introduction of PVT technology [C]// Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, June 6-10, 2005, Barcelona, Spain. Energy in the Built Environment, 2005,1-4.
- [11] Zondag H A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2008,12(4):891-959.

(编辑 陈移峰)