

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-218-06

通风模块对相变-通风光伏幕墙的热电性能影响

刘荣鹏¹ 章文杰² 唐凯² 赵英博²

(1. 中铁建设集团有限公司 北京 100040;

2. 南京理工大学能源与动力学院 南京 210094)

【摘要】 建筑排风可以降低光伏背板温度, 从而减小系统向室内的热量传递, 研究制备了石蜡/膨胀石墨复合相变材料, 搭建相变-通风冷却光伏幕墙 (BIPV-PCM) 系统和光伏建筑一体化 (BIPV) 系统的对比实验平台, 对复合相变材料在光伏幕墙中的冷却效果进行研究, 分析不同风速 (1.0m/s、1.5m/s、2.0m/s、2.5m/s、3.0m/s、3.5m/s) 对系统的发电性能和热工性能的影响。研究表明: 风速为 2.0m/s 对电性能和系统全天的得热量的增幅最高; 不同风速下, BIPV-PCM 系统的组件背板温度和室内得热量明显低于 BIPV 系统, 光电转换效率高于 BIPV 系统。

【关键词】 相变-通风冷却光伏幕墙; 光伏建筑一体化; 发电性能; 热工性能; 光电转换效率
中图分类号 TU201.5/TM615 文献标志码 A

Ventilation Module for Phase Change-Ventilated Photovoltaic Curtain Wall

Liu Rongpeng¹ Zhang Wenjie² Tang Kai² Zhao Yingbo²

(1. China Railway Construction Group Corporation Limited, Beijing, 100040;

2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

【Abstract】 Building exhaust can reduce the temperature of photovoltaic backplane, thereby reducing the heat transfer from the system to the room. In this study, paraffin / expanded graphite composite phase change material was prepared, and a comparative experimental platform of phase change-ventilation cooling photovoltaic curtain wall (BIPV-PCM) system and photovoltaic building integration (BIPV) system was built. The cooling effect of composite phase change material in photovoltaic curtain wall was studied, and the effects of different wind speeds (1.0m/s, 1.5m/s, 2.0m/s, 2.5m/s, 3.0m/s, 3.5m/s) on the power generation performance and thermal performance of the system were analyzed. The results show that the wind speed of 2.0m/s has the highest increase in the electrical performance and the heat gain of the system throughout the day; under different wind speeds, the component backplane temperature and indoor heat gain of the BIPV-PCM system are significantly lower than those of the BIPV system, and the photoelectric conversion efficiency is higher than that of the BIPV system.

【Keywords】 Phase change-ventilation cooling photovoltaic curtain wall; Photovoltaic building integration; Power generation performance; Thermal performance; Photoelectric conversion efficiency

0 引言

近年来, 可再生能源对全球可持续发展和环境保护的贡献得到了广泛认可, 人们对全球变暖、能

源短缺和化石燃料价格飙升的认识日益增强, 促进太阳能光伏 (Photovoltaic, PV) 的长足发展^[1-4]。太阳能光伏建筑一体化 (Building Integrated

基金项目: 中铁建设集团有限公司科技研究开发计划项目 (LX22-31B); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51908287)

作者简介: 刘荣鹏 (1985.05-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: 605765674@qq.com

通讯作者: 章文杰 (1986.10-), 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: zhangwenjie001@139.com

收稿日期: 2024-10-28

Photovoltaic, BIPV) 技术通过将光伏电池集成到建筑本身, 使建筑从纯粹的能源消耗端转变成一定程度的产能端, 可以实现建筑运行能耗的部分自给乃至完全自给。目前广泛使用的光伏电池, 其光电转化效率只有 15~20%, 其余的太阳能则被组件吸收转化成了热能, 在高温季节, 这种积蓄的热能使光伏电池工作时的整体温度最高达到 80℃^[5]。光伏电池的工作温度将直接影响它的发电效率, 研究结果表明^[6]组件的工作温度高于标准工况的 25℃时, 工作温度每升高 1℃, 发电效率将降低 0.4~0.65%^[7], 此外, 工作温度过高还会加速电池的热降解, 对电池造成长期的不可逆结构性损伤^[8], 以晶硅电池为例, 当其运行温度达到上限以后, 电池温度每上升 10℃, 晶硅电池的老化速率将增加一倍^[9]。因此无论从光伏电池的即时发电效率或长期的电池运行寿命角度考虑, 采取一定的冷却措施来提高光伏电池的光电转化效率和使用寿命是十分必要的。

相变材料 (Phase Change Material, PCM) 是指温度不变的情况下而改变物质状态并能提供潜热的物质, 物态转变的过程称为相变过程, 此时的相变材料将吸收或释放大量的潜热。相变材料具有能量密度高、潜热大、相变过程中接近恒温且体积变化小等优点。Ma^[5]等从系统优化、数值模型、材料选择、强化传热、经济可行性和环境效益的生命周期评价等多角度对 PV-PCMs 技术的发展和特点进行了文献调研和深入总结。Aneli^[10]等用仿真的方式分析了使用两种不同相变材料的光伏电池电学性能, 结果表明, 夏季工况下与传统的光伏电池相比, PV-PCMs 系统的电池温度更低, 日发电量增加约 5.5%, 而冬季不同光伏系统的性能几乎是相似的。王珍珍^[11]通过在光伏背板集成相变温度为 42℃的石蜡, 分别研究了垂直、最佳倾角和水平放置下相变光伏组件的热电性能表现, 在该系统中光伏组件的最大温差分别达到了 8.2℃、14.5℃和 18.1℃, 光电转换效率分别提升 6.02%、12.47%和 15.60%。

相变材料应用于光伏建筑一体化的主要障碍之一就是如何改善 PCM 材料热导率低的现状, 为了克服 PCM 热导率低的问题, 通常采用插入翅片^[12]、添加纳米颗粒^[13]和多孔材料^[14]等方法。在 PCM 中插入翅片已经被证明在提高传热性能和抑

制温升方面是有效的, 但由于翅片的安装特点导致它们只能接触到换热表面的一小部分, 从而使换热表面的温度分布表现出非均匀性, 最终导致光伏组件产生裂纹, 缩短使用寿命。添加纳米材料和多孔材料本质上都是通过高热导率的材料强化相变材料内部的换热, 从而使相变材料整体表现出更高的传热性能。

本研究对相变材料在光伏幕墙中的冷却效果展开研究, 考虑到相变材料热导率低的特性, 完全相变后对光伏组件的散热反而起到抑制效果, 一方面对相变材料进行改性以增强其导热性能, 另一方面引入风冷系统对相变冷却失效后的阶段继续控温。由于通风冷却需要投入新的能源实现强制对流效果, 考虑利用建筑排风中的动压实现风冷的驱动, 可以利用夏季空调排风中的冷量, 实现废弃的余热、余压再利用。有助于提高建筑的能源利用效率, 减少对传统能源的依赖, 实现节能减排的目的。

1 复合相变材料的制备

在相变材料中添加金属基、碳基材料或纳米材料可以有效地改善相变材料的导热性能, 但金属密度较高, 容易导致整个蓄热系统的质量增加, 而添加纳米材料虽然可以大幅提高相变材料的导热性能^[15], 但纳米复合材料的制备和热物性能比较复杂且成本高昂, 并不是广泛应用于 PV-PCM 系统的最佳选择。碳基材料具有导热系数高、相对密度较低以及价格低廉的优势, 其中的膨胀石墨是一种疏松多孔的碳基材料, 比表面积大并且与有机相变材料的浸润性出色, 是改善石蜡导热系数的理想素材^[16], 因此本研究选择使用石蜡/膨胀石墨复合相变材料对光伏电池控温。

1.1 实验材料

研究采用的复合相变材料各组分及规格型号如表 1 所示。

表 1 实验原料及规格

Table 1 Experimental materials and specifications	
实验材料	规格
40 号石蜡	RT40 (37.5~42.5℃)
膨胀石墨	粒度 80 目; 纯度 99%; 膨胀率 200 倍

1.2 材料的制备

本研究采用膨胀石墨质量分数为 10%的石蜡/膨胀石墨复合相变材料, 具体制备流程如下:

(1) 分别称量质量比为 9:1 的块状石蜡和膨胀石墨放入烧杯中,用保鲜膜将烧杯口密封以防止加热过程中膨胀石墨吸收水分,影响复合相变材料的导热性能;

(2) 恒温加热磁力搅拌器设置 80℃ 水浴加热,待石蜡完全融化后(约 30min)开启磁力搅拌器的搅拌功能,在 30Hz 的搅拌速率下中速搅拌 30min,这一过程将保证熔融状态下的石蜡被膨胀石墨的微孔充分填充吸收;

(3) 待石蜡和膨胀石墨搅拌至匀质无气泡状态后关闭搅拌器,取出烧杯并静置冷却,即可得到在常温下形状稳定且无液态石蜡析出的石蜡/膨胀石墨复合相变材料。

复合相变材料如图 1 所示。

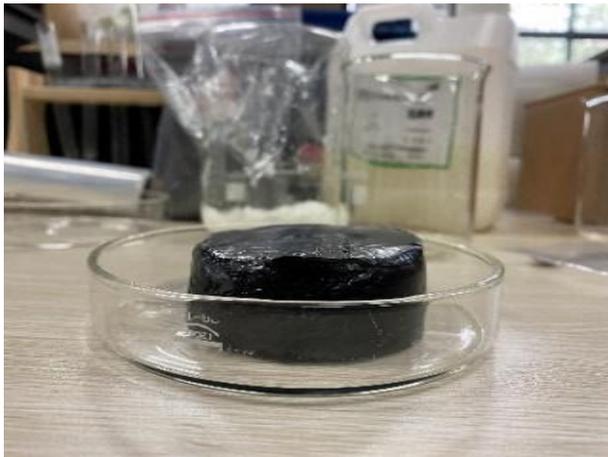


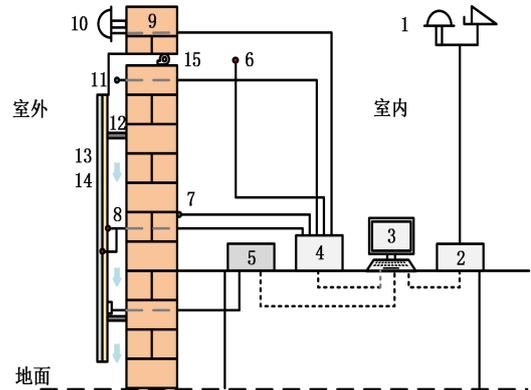
图 1 复合相变材料

Fig.1 Composite phase change materials

复合相变材料在常温下(夏季无空调室内工况)呈现形状稳定的粘土状,白天最高温度达 35℃ 的室内环境连续放置一周,形状稳定,无液态石蜡析出,重新加热至 40℃ 以上后逐渐融化为黑色液体,最后将复合相变材料灌装至光伏背板的封装盒内。

2 实验台的搭建

为研究强制对流冷却装置的光伏幕墙整体的热电性能的影响,搭建了相变-通风光伏幕墙(BIPV-PCMV)实验平台,分析不同风速对系统的发电性能和热工性能的影响,通过布置温度测点、辐照测点以及功率追踪仪器对两系统的散热性能和光伏发电功率进行全天 24 小时的实时监测,实验平台的整体框架如图 2 所示。



- 1-室外气象站; 2-气象数据记录仪; 3-电脑;
- 4-数据记录仪; 5-微型逆变器; 6-室内温度传感器;
- 7-墙体温度传感器; 8-相变材料及光伏背板温度传感器;
- 9-墙体; 10-墙面辐照传感器; 11-热线风速仪;
- 12-空气流道; 13-光伏电池; 14-相变材料;
- 15-轴流风机

图 2 实验平台整体框架图

Fig.2 The overall frame diagram of the experimental platform

2.1 光伏幕墙模块

光伏幕墙模块主要包括光伏板和固定框架,综合考虑制备成本及系统的稳定性,选用徐州希凯德能源有限公司生产的型号为 XKD-18-30W 的单晶硅光伏组件,具体参数如表 2 所示。

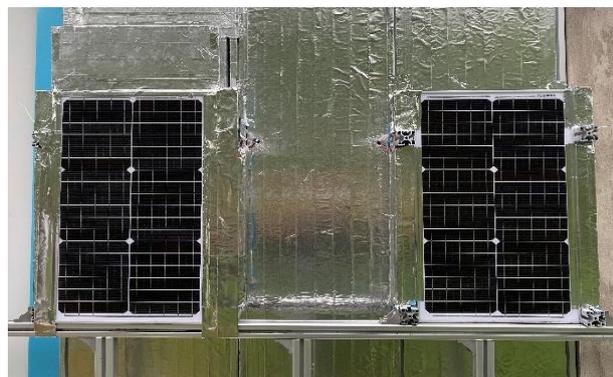
表 2 光伏组件性能参数

Table 2 Photovoltaic module performance parameters

技术参数	规格
尺寸	633mm×352mm×17mm
峰值功率	30W
开路电压	22.02V
短路电流	2.11A
工作电压	17.95V
工作电流	1.92A
功率容差	±5%
电池片	单晶硅

光伏实验室为方便光伏幕墙的构建,南向墙体均为镂空,采用铝型材框架支撑,铝型材之外的镂空部分采用 40mm 厚的 XPS 挤塑阻燃板填充保证室内的保温性能,在表面贴附铝箔胶带防止太阳直射老化。普通光伏组件背板与墙面的气隙厚度调整为 100mm,相变光伏组件的铝制封装盒表面与墙面的气隙厚度调整为 100mm。在光伏组件下方架

设横梁, 横梁由三根立柱直接支撑, 形成稳固的光伏幕墙结构。搭建好的对比实验平台如图 3 所示。



(a) BIPV-PCM 系统 (b) BIPV 系统

图 3 对比实验平台外观

Fig.3 Compare the appearance of the experimental platform

2.2 通风模块

通风模块采用风道+排风电路结合的形式实现光伏背板的强制对流, 使用的实验材料主要包括挤塑板、散热风扇、直流电源和电线。风道截面为 300mm×100mm, 选用台湾三巨电机有限公司生产的 SJ9225 型小型散热风扇, 该散热风扇需要在 24V 额定电压下直流供电, 不能直接接入实验室的电路中, 需要配备稳压电源, 电源选用明纬企业股份有限公司生产的 LRS-100-24 型开关电源, 具体参数规格如表 3 所示。

表 3 排风电路设备性能参数

Table 3 Exhaust circuit equipment performance parameters

设备名称	实物图	技术参数	规格
散热风扇 SJ9225		额定电压	24V
		额定电流	0.11A
		输出功率	2.64W
开关电源 LRS-100-24		输出电压	24V
		额定电流	4.5A
		输入电压	85-264VAC

将挤塑板裁剪成合适的大小, 并用铝箔胶带将挤塑板粘接, 随后将排风电路连接好, 置入风道中, 构成动力内嵌式的排风管道, 搭建好的通风模块实验设备如图 4 所示。



图 4 通风模块搭建

Fig.4 Ventilation module construction

3 实验结果分析

在 BIPV-PCM 系统中, 通风模块的风速会对系统的控温效果产生影响, 风速的变化对 BIPV-PCM 系统产生两方面的作用, 一方面通过改变表面的对流换热, 对光伏组件的温度产生影响; 另一方面带走系统的热量产生一定程度的变化, 从而改变室内的得热量。通过改变风速变量来研究 BIPV-PCM 系统的发电性能和热工性能, 设定风速从 1m/s 开始, 依次递增 0.5m/s, 直至 3.5m/s, 输出光伏组件的背板温度随时间的变化趋势如图 5 所示。

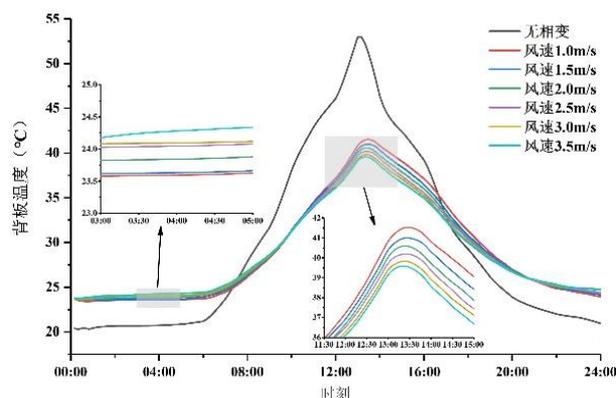


图 5 不同风速下光伏组件背板温度对比

Fig.5 Comparison of backplane temperature of photovoltaic modules under different wind speeds

风速的增强在一定程度上降低了光伏组件白天工作期间的背板温度, 与 BIPV 在 13:10 达到的背板峰值温度 (53.0℃) 相比, 风速从 1m/s 提高至 3.5m/s 的过程中, 同一时刻 BIPV-PCM 系统的

背板峰值温度分别下降至 41.2℃、40.8℃、40.4℃、40.1℃、39.7℃和 39.5℃，峰值冷却温差分别达到 11.8℃、12.2℃、12.6℃、12.9℃、13.3℃和 13.5℃，峰值冷却温差随风速的增加而逐渐减小，从刚开始每 0.5m/s 的风速增幅带来 0.4℃的降温温差降低至 0.2℃。夜里背板温度的分布规律与白天相反，风速越高，背板温度越高。

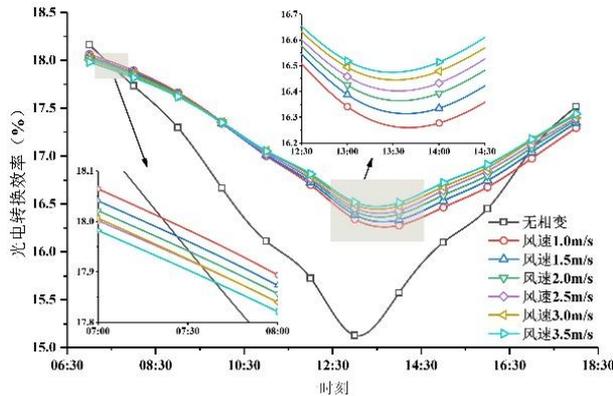


图 6 BIPV 系统与不同风速 BIPV-PCMV 系统的光电转换效率

Fig.6 The photoelectric conversion efficiency of BIPV system and BIPV-PCMV system with different wind speeds

不同风速下 BIPV-PCMV 系统的光电转换效率随背板温度的变化趋势产生相应变化，如图 6 所示，白天的光电转换效率随风速的增强逐渐抬高，与 BIPV 系统的谷值效率 15.13%相比，各风速下 BIPV-PCMV 系统的即时效率分别为 16.34%、16.39%、16.43%、16.46%、16.49%和 16.52%，同比提升 8.00%、8.33%、8.59%、8.79%、9.00%和 9.19%。在风速较低的区间（1.0m/s-2.0m/s）内提升量在 0.3%左右浮动，风速超过 2m/s 时，提升量在 0.2%左右，呈现逐渐降低的趋势。

BIPV 系统当日的峰值输出功率为 12.15W，不同风速 BIPV-PCMV 系统的当日峰值输出功率分别为 13.13W、13.17W、13.19W、13.22W、13.25W 和 13.27W，峰值功率分别提升了 0.97W、1.01W、1.04W、1.07W、1.10 和 1.12W；从全天的发电量来看，BIPV 系统的当日发电量为 68.97Wh，不同风速的 BIPV-PCMV 系统当日发电量分别为 71.91Wh、72.04Wh、72.17Wh、72.25Wh、72.37Wh 和 72.43Wh，环比提升 4.27%、4.46%、4.65%、4.77%、4.93%和 5.03%，在 1m/s-2m/s 的区间内全天发电量提升幅度为 0.2%左右，超过 2m/s 以后提

升幅度在 0.1%左右浮动。综合 BIPV-PCMV 系统的电性能考虑，虽然风速的提高对电性能一直存在增幅作用，但将风速控制在 2m/s 的效益最高。不同风速的 BIPV-PCMV 系统与 BIPV 系统的逐时输出功率对比如图 7 所示。通风风速的增加可以更好的控制光伏组件的背板温度，也会改变表面的温度从而改变通风模块带走的冷负荷。

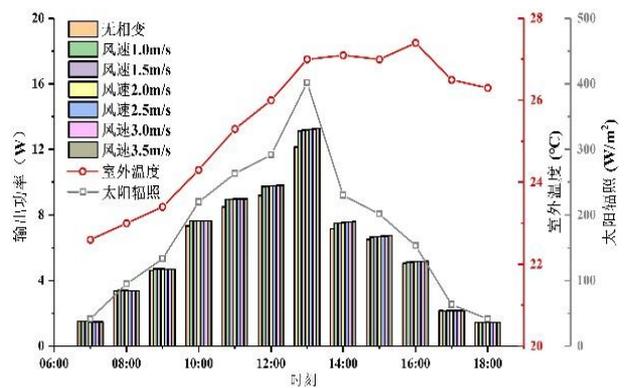


图 7 BIPV 系统与不同风速 BIPV-PCMV 系统的输出功率
Fig.7 The output power of BIPV system and BIPV-PCMV system with different wind speed

在稳定运行的夜间，BIPV-PCMV 系统的铝板温度和出口风温随风速的提高而增加，通风温度的 28℃要高于夜间的系统温度，通风模块起到了加热作用；在稳定运行的白天工况下，铝板温度和出口风温随风速的提高而降低，各风速下铝板的峰值温度分别为 40.8℃、40.2℃、39.7℃、39.4℃、38.9℃和 38.6℃，各风速下通风出口的峰值温度分别为 28.56℃、28.47℃、28.41℃、28.38℃、28.35℃和 28.33℃，铝板温度的降低使风冷的换热效率下降，如图 8 和图 9 所示。

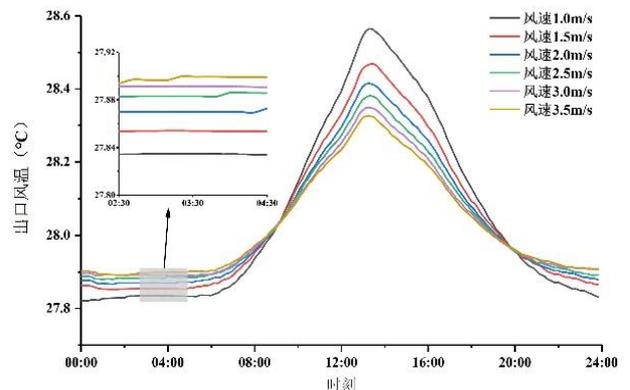


图 8 不同风速的铝板温度

Fig.8 Temperature of aluminum plate at different wind speeds

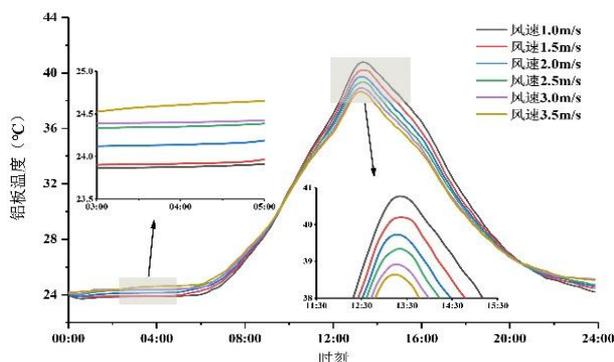


图 9 不同风速的通风出口风速

Fig.9 Ventilation outlet air temperature of different wind speed

不同风速下 BIPV-PCMV 系统的全天和白天 (8:00-18:00) 室内得热量如图 10 所示, 各风速下的全天室内得热量分别为 $1171.4\text{W}/\text{m}^2$ 、 $1136.2\text{W}/\text{m}^2$ 、 $1111.1\text{W}/\text{m}^2$ 、 $1063.1\text{W}/\text{m}^2$ 、 $1056.8\text{W}/\text{m}^2$ 和 $1042.2\text{W}/\text{m}^2$, 与 BIPV 系统全天 $1583.5\text{W}/\text{m}^2$ 的得热量相比, 分别削减了 26.0%、28.2%、29.8%、32.9%、33.3% 和 34.2%, 白天室内得热量分别为 $951.8\text{W}/\text{m}^2$ 、 $849.5\text{W}/\text{m}^2$ 、 $764.0\text{W}/\text{m}^2$ 、 $669.1\text{W}/\text{m}^2$ 、 $607.4\text{W}/\text{m}^2$ 和 $553.0\text{W}/\text{m}^2$, 与 BIPV 系统白天 $1287.4\text{W}/\text{m}^2$ 的得热量相比, 分别削减了 26.1%、34.0%、40.1%、48.0%、52.8% 和 57.1%。BIPV-PCMV 系统的室内得热量明显低于 BIPV 系统, 随着风速的增加, BIPV-PCMV 系统全天得热量的趋势逐渐放缓并趋于恒定, 而白天的室内得热量逐渐下降十分迅速, 得热量的最高降幅达 57.1%, 结果反映了通风策略对系统起到节能的作用。

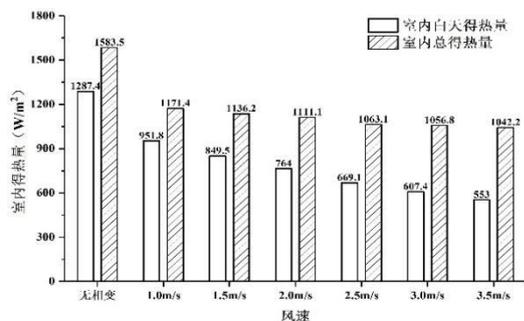


图 10 不同风速 BIPV-PCMV 系统的室内得热量

Fig.10 Indoor heat gain of BIPV-PCMV system with different wind speeds

4 结论

本文搭建了 BIPV 系统和 BIPV-PCMV 系统的

对比实验平台, 采用风道+排风电路结合的形式实现光伏背板的强制对流, 对 BIPV-PCMV 系统的热电性能进行了分析, 得到的主要结论如下:

(1) 风速的变化在一定程度上降低了光伏组件白天工作期间的背板温度, 提高光电转换效率, 削减室内的热量。

(2) 综合风速变化在电性能和热性能上的表现, 认为 $2.0\text{m}/\text{s}$ 的风速较为合理, BIPV-PCMV 系统的整体收益较高, 光伏组件的背板温度降幅最高可达 12.6°C , 峰值输出功率提升 8.6% , 全天室内得热量削减 29.8% 。

参考文献:

- [1] Awan A B, Zubair M, Memon Z A, et al. Comparative analysis of dish Stirling engine and photovoltaic technologies: Energy and economic perspective[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021,44:101028.
- [2] Ma T, Yang H, Lu L. Performance evaluation of a stand-alone photovoltaic system on an isolated island in Hong Kong[J]. Applied Energy, 2013,112:663-672.
- [3] Maiti S, Banerjee S, Vyas K, et al. Self regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal-wax composite phase change matrix[J]. Solar energy, 2011,85(9):1805-1816.
- [4] Wang Y, He J, Chen W. Distributed solar photovoltaic development potential and a roadmap at the city level in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021,141:110772.
- [5] Ma T, Yang H, Zhang Y, et al. Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: A review and outlook[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,43:1273-1284.
- [6] Krauter S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels[J]. Solar energy materials and solar cells, 2004,82(1-2):131-137.
- [7] Radziemska E. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells[J]. Renewable energy, 2003,28(1):1-12.

(下转第 280 页)