

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.01.002

基于微通道平板热管的新型光伏光热墙体/热泵系统性能实验研究

罗 亮, 王仙玲, 刘光明, 胡梦龙, 王璋元

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 本文提出一种基于微通道平板热管的新型光伏光热墙体/热泵(MFHP-WIPV/T-HP)系统, 该系统将太阳能光伏光热建筑一体化系统进行拓展, 与太阳能热泵技术和微通道平板热管相结合, 用以减少冬季供暖、供热水能耗。在广州冬季典型阴天、晴天气候条件下对该系统进行测试研究, 分析不同环境参数对系统的光电转化效率、平均集热效率和制热效率的影响规律。研究表明: 在阴天气候条件下, 系统平均集热效率达 40.36%, 光电转化效率达 8.98%, 制热效率达 15.96%; 而在晴天气候条件下, 系统平均集热效率达 46.69%, 光电转化效率达 10.08%, 制热效率达 16.04%; 水箱水温温升阴天下可达 14.1 °C, 晴天下可达 25.2 °C, 能有效满足室内供热和生活热水需求。

关键词: 光伏光热墙体; 光电转化效率; 集热效率; 制热效率; 微通道平板热管

中图分类号: TK513.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)01-0013-07

Experimental study of a novel hybrid photovoltaic-thermal wall/heat pump system based on micro-channel flat heat pipes

LUO Liang, WANG Xianling, LIU Guangming, HU Menglong, WANG Zhangyuan
(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This paper proposes a novel hybrid photovoltaic-thermal wall/heat pump (MFHP-WIPV/T-HP) system based on micro-channel flat plate heat pipe, and it extends the integrated solar photovoltaic-thermal building system with solar heat pump technology and micro-channel flat plate heat pipe to reduce energy consumption for heating and hot water in winter. Under the typical cloudy and sunny weather conditions in Guangzhou in winter, the integrated system is tested and analyzed. The influence of different environment factors on the photovoltaic conversion efficiency, average heat conversion efficiency and heating efficiency of the integrated system are analyzed. The results show that under cloudy weather condition, the average heat conversion efficiency of the system reaches 40.36%, the photovoltaic conversion efficiency 8.98%, and the heating efficiency 15.96%; under sunny weather condition, the average heat conversion efficiency of the system reaches 46.69%, the photovoltaic conversion efficiency 10.08%, and the heating efficiency 16.04%. The temperature rise of the water tank can reach 14.1 °C in cloudy weather and 25.2 °C in sunny weather, which could effectively meet the demand of indoor heating and domestic hot water.

Key words: hybrid photovoltaic-thermal wall; photovoltaic conversion efficiency; average heat conversion efficiency; heating efficiency; micro-channel flat heat pipe

近年来,随着我国居民生活水平不断提高,夏热 冬冷地区居民用于冬季供暖和供热水的能耗急剧增

收稿日期: 2021-03-27; 网络出版日期: 2021-07-20

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20210719.1629.010.html>

基金项目: “十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFE0133300)

第一作者: 罗亮,男,硕士生,研究方向为可持续能源技术。E-mail: Luo13631480454@126.com

通信作者: 王璋元,女,博士,教授,硕导,研究方向为可持续能源技术。E-mail: zwang@gdut.edu.cn

加^[1-3]。而太阳能光伏光热建筑一体化(BIPV/T)系统^[4]通过将光伏阵列敷设在建筑物外表面或者代替外围护结构的方法,充分运用了建筑外表面,同时提供建筑所需热能和电能,有效减少居民供暖和热水能耗,获得双重收益^[5-6]。

国内外学者对光伏光热建筑一体化系统进行了大量的研究。Gholami等^[7]通过生命周期成本分析法评估了BIPV系统作为建筑外围护结构的经济可行性,结果发现该系统不仅能成功回收成本,还能成为建筑物的收入来源。Debbarma等^[8]对BIPV和BIPV/T技术应用及发展进行了回顾,发现二者均能满足部分或全部的建筑物能耗需求。Xu等^[9-10]提出了一种多功能BIPV/T墙体系统,该系统可以满足中国建筑的季节性能源需求,不仅能全年发电,还能产生热空气以减少供暖负荷,产生热水以满足用水要求。吴双应等^[11]提出了一种采用热管冷却技术的太阳能光伏光热一体化系统,结果表明该系统的光电转化效率和光热效率分别为6.99%~7.46%和51.0%~63.2%。Wang等^[12]提出了一种新型的热管式太阳能光伏光热建筑一体化(HP-BIPV/T)系统,结果表明,与传统的BIPV/T系统相比,该系统的效率提高了25.5%。相较于常规的圆形热管,新型微通道平板热管^[13-14]能更好地与换热面紧密贴合,且轴向和径向导热系数高,热响应性快,具有良好的均温性。因此,在阵列式密排的情况下,将该热管应用到光伏光热系统中,有利于提高系统综合性能,实现高效的光伏光热建筑一体化设计。Quan等^[15]将上述新型平板热管与光伏光热系统相结合,该系统的光热效率和光电效率分别为25.8%和14.5%,整体效率可达40.3%,比传统的光伏光热系统效果更好。Fu等^[16]通过将热泵技术与光伏光热系统相结合,提高了系统性能的稳定性和减少了能耗。现有研究推进了太阳能光伏光热建筑一体化系统的发展,但现有研究普遍存在集热效率低、受天气影响较大的问题。

因此,本文将太阳能光伏光热建筑一体化系统进行拓展,将其与太阳能热泵技术和微通道平板热管相结合,提出一种基于微通道平板热管的新型光伏光热墙体/热泵(MFHP-WIPV/T-HP)系统用以提供建筑生活热水,并在冬季实现家庭供暖,减少供暖、供热水能耗。在广州冬季典型阴天、晴天气候条件下对系统进行实验测试,分析不同环境参数对系统的光电转化效率、平均集热效率和制热效率的影响规律,以期光伏光热建筑一体化系统节能设计提供参考。

1 新型光伏光热墙体/热泵系统结构及工作原理

新型光伏光热墙体/热泵系统结构见图1,由光伏光热模块和非直膨热泵模块两部分组成,其中光伏光热模块光伏光热墙体、连接管道、直流循环水泵和水箱组成,热泵系统由蒸发器、换向阀、压缩机、冷凝器和节流装置组成。光伏光热墙体结构见图2,由光伏板、微通道平板热管、相变材料、集热管、保温材料、木框构成。将34根微通道平板热管平行铺设在光伏电池板的背部,光伏电池板与热管、热管与集热管之间均为干式接触,并涂有导热硅胶以减少接触热阻。同时,通过在热管和光伏板之间填充具有高导热和储热能力的相变材料GR52和铝丝材料,以及在背部粘贴保温材料,能有效减少热损失并提高系统效率。该光伏光热墙体可作为外围护结构,垂直铺设到建筑墙体(或阳台)外表面,以实现与建筑一体化。

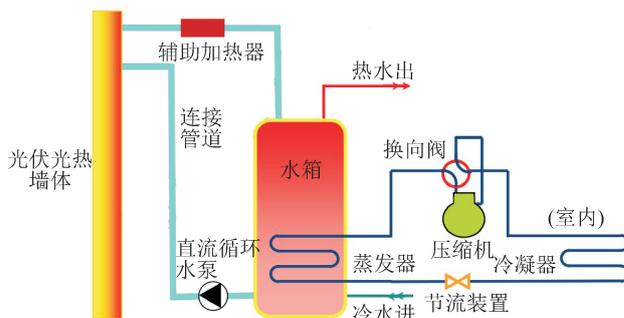


图1 系统结构图

Fig. 1 Structure of the system



图2 光伏光热墙体结构图

Fig. 2 Structure of PV/T wall

系统的工作原理即:1)太阳光照射到光伏光热墙体上,光伏板吸收太阳辐射并与蓄电池连接,储存电能;2)光伏板板壁温度上升,将热量传递到背部的微通道平板热管,热管蒸发段中的工作介质吸热气化;3)热管内的蒸汽在压差的作用下,由蒸发段流向冷凝段,并在冷凝段将热量传递给集热管中的循环水;4)热管内的蒸汽放热后又重新凝结成液体,并在重力作用下沿热管内壁流回蒸发段,如此往复循环将热量传递给集热管中的循环水。辅助加热器则是在无太阳辐射或太阳辐射较低时,保证满足热泵运

行所需要的热负荷。

冬季取暖时,在温度传感器和控制器的作用下,换向阀转向供热工作位置,蒸发器中的低温低压液态制冷剂从水箱中吸热气化成高温蒸汽,再经过压缩机排入室内换热器(用作冷凝器)。高温高压蒸汽在室内换热器内冷却凝结成低温液体,散发出热量与室内空气换热达到供热目的。高压制冷剂经节流阀减压成低压制冷剂然后重新进入蒸发器开始下一个制热循环。

2 测试方案及性能指标

2.1 测试方案

通过测试系统在冬季阴晴两种典型天气条件下的运行特性,分析该系统的热电性能以及环境条件参数对热电性能的影响。本次实验的测量参数为:1)光伏板、热管、水箱温度;2)光电模块中蓄电池电压、电流;3)环境温湿度与太阳辐射强度;4)测试设备的相关参数见表1。

表1 系统测试设备

Tab.1 Specification of the test instrumentations

设备名称	主要参数
空气源热泵 KFS7	规格:220 V、50 Hz;额定功率:950 W
电子秤 CTS-21	电源电压:220 V;功耗:14 W;最大称量:75 kg
小型自助气象站 QHZ-DH	准确度±0.2 °C;相对湿度测量范围0%~100% RH
浮子流量计 SFL52	准确度(温度为25 °C时系统准确度):±(0.1 m/s ±5%读数)
水泵 ORS25-10G	电压:220 V;功率:60 W;扬程:10 m
高精度全自动交流稳压电源 WJD-1200	输出电压:220 V ± 3%, 110 ± 4%;频率:50~60 Hz
太阳辐射测试仪 FTJT	光谱范围:0.3~3.2 μm;灵敏度:7~14 mv/kW·m ⁻²
辅助加热器 BESJ-3F	规格:220 V、50 Hz;额定电流:13 A;额定功率:3 kW
多路温度巡检仪 JK-8/16 AT4532	温度测试范围:-50~1000 °C,供电电源:220 V ± 10%,50 Hz ± 2%
多晶硅光伏板 100 W	规格:1500 mm×760 mm×5 mm;面积:1.14 m ²
光合硅能蓄电池	容量:200 AH;电压:12 V

系统的温度测点布置见图3,通过在光伏板和

热管表面、水箱内部、进出口水管内部布置K型热电偶来测量温度,数据用多路温度巡检仪JK-8/16 AT4532采集并记录,1~4为进出水口测点,5~6为水箱内部测点,7~8为集热管水平方向测点,9~16为光伏板表面测点,17~24为热管表面测点,25~32为内部填充空间测点。

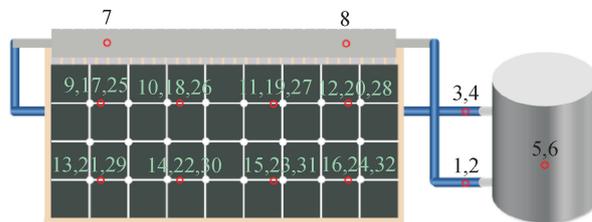


图3 温度测点布置

Fig.3 Position of thermal resistance in device

实验在搭建的独立实验平台内进行,以减少外界的干扰。9:00开始进行实验测试,调节水箱初始温度为20 °C,揭开光伏板面的遮阳布,使太阳光满幅照射在光伏板正面,并开启太阳辐射测试仪,实时记录太阳辐射的变化。开启环路阀门及水泵,调节循环水流量至预设工况值600 L/h。开启蓄电池进行电能储存,并每整点由测电仪记录电流及电压大小。开启多路温度巡检仪,每10 min记录光伏板、热管、水箱内测点的温度值。15:00开启热泵提升室内温度,开启辅助加热器对水箱进行加热,记录进出口风的温度以及独立实验平台内的温度变化。17:00实验结束,采集并整理所测数据。

2.2 性能指标

相对于单一的光伏发电系统或热水器系统而言,新型光伏光热墙体/热泵系统的评价标准较复杂,故考虑采用综合效率进行评价。综合效率分别与系统的光电转化效率、平均集热效率以及制热效率三者相关,因此综合效率的计算式为:

$$\eta = \epsilon\eta_e + \eta_t + \eta_a \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{A_{PV}}{A_{PVT}} \quad (2)$$

式中: η 为综合效率,%; η_e 为光电转化效率,%; η_t 为平均集热效率,%; η_a 为制热效率,%; ϵ 为光伏电池转换系数; A_{PV} 为光伏电池面积,m²; A_{PVT} 为光伏光热模块面积,m²。

该系统的能量投入为太阳能辐照量和水泵、热泵所消耗的电能,能量产出为该系统向外输出的电能和热能,则该系统向外输出的能量与水泵、热泵所消耗的能量的差值为该系统的实际能量收益。水泵、热泵的总耗能功率P的计算式为:

$$P = P_1 + P_2 = \frac{q_v \rho g H}{3600 \eta_{\text{泵}}} + P_2 \quad (3)$$

式中: P 为总耗能功率, W ; P_1 为水泵功率, W ; P_2 为热泵功率, W ; q_v 为水泵内工质的流量, m^3/h ; ρ 为工质的密度, kg/m^3 ; H 为水泵的扬程, m ; g 为重力加速度, 取 $9.81 m/s^2$; $\eta_{\text{泵}}$ 为水泵效率, %。

系统的光电转化效率 η_e 为单位时间内该系统向外输出的电能与系统的能量投入之比, η_e 的计算式为:

$$\eta_e = \frac{Q_e}{AI} = \frac{I_m V_m}{AI + P} \quad (4)$$

式中: Q_e 为发电量, W ; A 为光伏光热模块的面积, m^2 ; I 为整个测试时间段的整点对应的太阳辐射强度, W/m^2 ; I_m 为电池组件在最大功率点的电流, A ; V_m 为电池组件在最大功率点的电压, V 。

系统的平均集热效率 η_i 为单位时间内该系统向外输出的热能与系统的能量投入之比, η_i 的计算式为:

$$\eta_i = \frac{c_p M \Delta T}{(AI_i + P) \Delta t} \quad (5)$$

式中: η_i 为平均集热效率, %; M 为集热水箱中水的质量, kg ; c_p 为水的比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; Δt 为时间差, s ; I_i 为光伏板接收的太阳光照辐射强度平均值, W/m^2 ; A 为光伏板的集热面积, m^2 ; ΔT 为水箱集液管中前后两个时刻的水温差, $^\circ C$ 。

系统在制热模式下的制热量 Q_1 可采用空气焓值法计算^[17], Q_1 的计算式为:

$$Q_1 = \frac{A_0 v c_p (t_1 - t_2)}{V_n (1 + W_n)} \quad (6)$$

式中: $t_1 - t_2$ 为热泵进出口风测点的温度差, $^\circ C$; A_0 为热泵排风口的面积, m^2 ; v 为排风速度, m/s ; V_n 为出风口测点处的空气比容, m^3/kg ; W_n 为出风口测点处的空气湿度, $kg/kg(\text{干})$ 。

热泵的 COP 为热泵的制热量与制热功率之比, COP 的计算式为:

$$COP = \frac{Q_1}{W} \quad (7)$$

式中: Q_1 为热泵的制热量, W ; W 为热泵的制热功率, W 。

系统的制热效率 η_q 与光伏板的光电转化效率、平均集热效率和热泵的制热系数三者相关, η_q 的计算式为:

$$\eta_q = \eta_e \eta_i COP \quad (8)$$

式中: η_q 为制热系统的制热效率, %; η_e 为光电转化效率, %; η_i 为平均集热效率, %; COP 为热泵的制热系数。

3 系统性能测试分析

本文对冬季阴、晴两种典型天气条件进行实验测试, 水箱的初始水温设定在 $20^\circ C$ 。测试当天, 阴天平均太阳辐射为 $209.20 W/m^2$, 环境平均温度为 $21.38^\circ C$, 平均湿度为 52% ; 晴天平均太阳辐射为 $368.98 W/m^2$, 环境平均温度为 $24.21^\circ C$, 平均湿度为 53% 。

3.1 温度变化曲线

图 4 和图 5 分别为冬季阴天和晴天下光伏板、热管和水箱随时间的温度变化曲线。由图 4 可知, 在阴天, 由于太阳辐射强度不稳定, 故温度变化趋势呈波动状。在 $9:00 \sim 11:00$ 时, 随着太阳辐射强度的增加, 光伏板和热管的温度逐渐上升。在 $11:00 \sim 11:30$ 时, 受到云层遮挡的影响, 光伏板和热管的温度呈现出略微下降的变化趋势。在 $11:30 \sim 13:00$ 时, 太阳辐射强度出现最大值 $583 W/m^2$, 升温速率最快, 光伏板的温度最大值达到 $54.2^\circ C$, 热管的温度最大值达到 $36.3^\circ C$ 。在 $13:00 \sim 17:00$ 时, 随着太阳辐射强度呈波动状态缓慢下降, 光伏板和热管的温度呈现下降趋势, 并最终趋于稳定。水箱的温度随着时间的变化呈现缓慢上升的趋势, 并最终趋于稳定达到 $34.1^\circ C$ 。

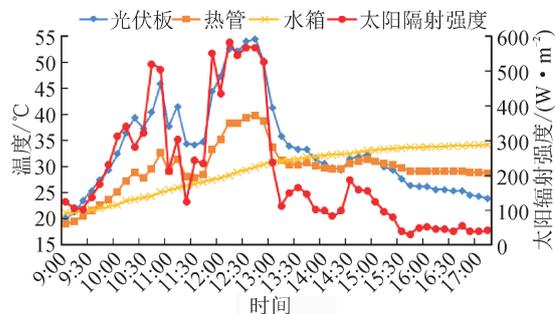


图 4 阴天各项温度变化曲线图

Fig. 4 Temperature variation of cloudy day

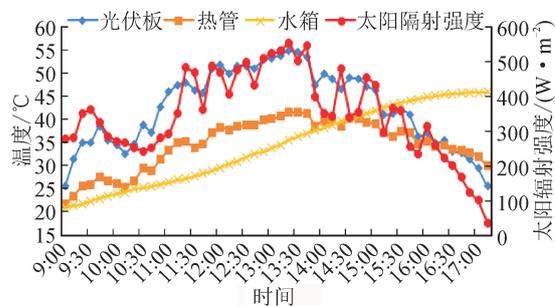


图 5 晴天各项温度变化曲线图

Fig. 5 Temperature variation of sunny day

由图 5 可知, 在晴天, 由于太阳辐射强度较稳定, 光伏板和热管的温度变化与太阳辐射强度呈正

相关,温度变化曲线总体呈现出先升高后降低的变化趋势。在 9:00~10:30 时,太阳辐射强度呈先上升后下降的变化趋势,光伏板和热管的温度也随着太阳辐射强度而变化。在 10:30~13:30 时,太阳辐射强度呈现缓慢上升趋势并保持在较高值,光伏板和热管的温度逐渐上升并达到最大值,光伏板温度最大值达到 54.8 °C,热管温度最大值达到 40.3 °C。在 13:30~17:00 时,随着太阳辐射强度呈波动状缓慢下降,光伏板和热管的温度也呈现下降趋势,并趋于稳定。水箱的温度随着时间的变化呈现缓慢上升趋势,在 11:30~14:30 时温升速率最快,并最终趋于稳定达到 45.2 °C。

从图 4 和图 5 中可以看出,微通道平板热管在启动阶段缓慢温升后,随即进入高效导热阶段,热管温度趋于平稳,能有效降低光伏板板壁温度。当太阳辐射强度减弱,光伏板和热管温度呈现下降趋势时,水箱的温度仍保持上升趋势,这是由于填充的相变材料将热量储存起来并传递给热管,减缓了温度下降趋势。同时水箱中的水在水泵的作用下仍与热管的冷凝段充分换热,使水箱温度仍可以保持上升趋势,水箱温度的上升能有效提高系统中热泵系统的蒸发温度,进而提高热泵系统冬季利用率。

3.2 集热效率和光电效率变化曲线

图 6 和图 7 分别为阴天和晴天下蓄电池电压电流变化曲线。图 8 和图 9 分别为阴天和晴天下瞬时效率值变化曲线。从图 6 和图 8 可知,在阴天,由于太阳辐射强度不稳定,电压电流的变化曲线呈现波动状,瞬时集热效率变化曲线起伏较大,光电转化效率也呈现波动状变化而后逐渐降低的变化趋势。在 9:00~11:00 时,随着太阳辐射强度的增加,光电转化效率呈现上升趋势并达到最大值 12.89%,瞬时集热效率呈现波动状变化并保持在较高值。在 11:00~12:00 时,光电转化效率呈现下降趋势,瞬时集热效率呈现上升趋势,这是由于太阳辐射强度的变化引起光伏板板壁温度随之变化,板壁温度又会影响光伏板的光电转化效率。在 12:00~13:30 时,随着光伏板与背部热管换热强度逐渐增强,光伏板板壁温度下降,系统的光电转化效率和瞬时集热效率呈现上升趋势。在 13:30~17:00 时,由于太阳辐射强度呈波动状逐渐下降,光电转化效率呈现缓慢下降的趋势,瞬时集热效率呈现波动状变化并保持在较低值。

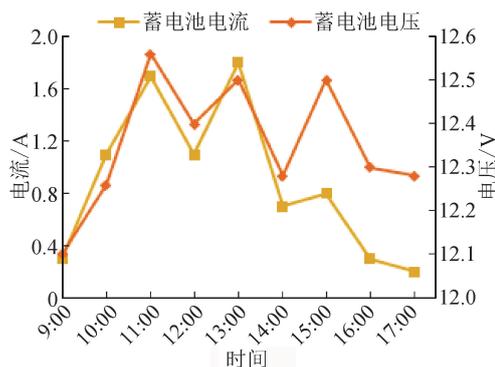


图 6 阴天蓄电池电压电流变化曲线
Fig. 6 Battery voltage/current variation of cloudy day

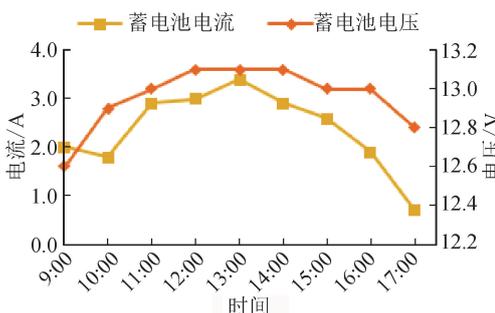


图 7 晴天蓄电池电压电流变化曲线
Fig. 7 Battery voltage/current variation of sunny day

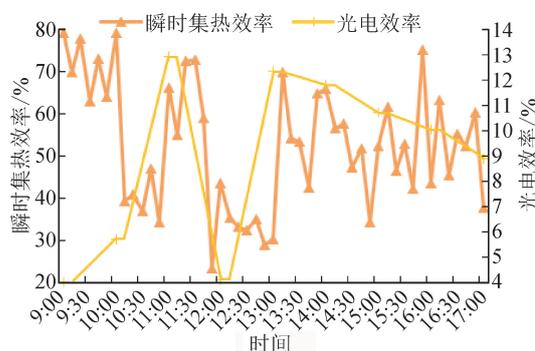


图 8 阴天瞬时效率值变化曲线图
Fig. 8 Instant efficiency of cloudy day

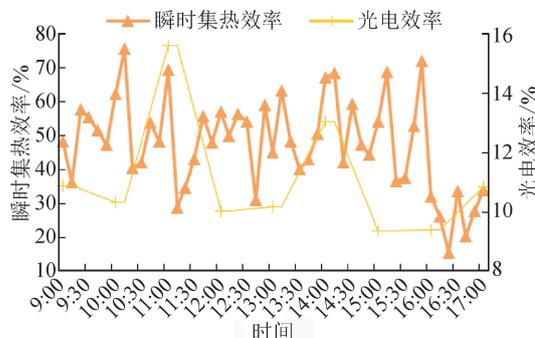


图 9 晴天瞬时效率值变化曲线图
Fig. 9 Instant efficiency of sunny day

从图7和图9可知,在晴天,由于太阳辐射强度较稳定,电压电流变化曲线随时间变化呈现抛物线状,光电转化效率和瞬时集热效率变化曲线呈现先上升后下降的交替变化趋势。这是由光伏板本身的特性决定的,光伏板的光电转化效率与光伏板板壁温度成反比,瞬时集热效率又与光伏板板壁温度成正比。在9:00~13:00时,随着太阳辐射强度逐渐增加,光电转化效率呈现先上升后下降的趋势并达到最大值15.59%,瞬时集热效率总体呈现缓慢上升的趋势,起伏较小。在13:00~17:00时,随着太阳辐射强度逐渐降低,光电转化效率和瞬时集热效率呈现缓慢下降的趋势。

从图8和图9还可看出,瞬时集热效率与光伏板板壁温度成正比,但当板壁温度过高时,与环境温度之间的差值越大,对室外的热损失也越大,瞬时集热效率反而呈现下降趋势。结合图8和图9可知,在阴天和晴天工况下,系统的光电转化效率最低分别能达到3.99%和9.32%,瞬时集热效率最低分别能达到21.07%和14.31%,说明一体机具有较为稳定的光电转化和集热性能。

3.3 综合效率

新型光伏光热墙体/热泵系统的综合效率与光电转化效率、平均集热效率以及制热效率三者相关。通过计算式(1)~(8)可以得出:阴天工况下,光电转化效率为8.98%,平均集热效率为40.36%,制热效率为15.96%,综合效率为65.3%;晴天工况下,光电转化效率为10.08%,平均集热效率为46.69%,制热效率为16.04%,综合效率为72.81%。

与常规平板热管式太阳能光伏光热一体化系统^[18]性能相比,系统综合效率平均提高了23.68%。从上述的系统性能参数分析和比较中可知,该系统在冬季具有良好的运行性能,可有效实现供暖与制备热水的目的。

4 结论

本文提出了一种新型光伏光热墙体/热泵系统,并对该系统在冬季阴、晴两种天气条件下的运行性能进行了测试分析,分析计算了系统的光电转化效率、平均集热效率和制热效率,并通过温度变化分析系统的运行特性,分析结果详述如下。

1) 微通道平板热管能够很好地适用于光伏光热墙体中,在启动阶段缓慢温升后,即进入高效导热阶段,能有效降低光伏板板壁温度,提高光伏板的光电转化效率。水箱温度较高,能有效提高系统中热泵系统的蒸发温度,进而提高热泵系统的冬季利

用率。

2) 在冬季室外给水水温为20℃条件下,水箱水温在阴天下可升至34.1℃,晴天下可升至45.2℃,水温平均可上升19.65℃。能基本满足室内的热水需求。

3) 与传统的太阳能结合热泵系统相比,该系统在冬季阴天下综合效率可达65.3%,晴天下综合效率可达72.81%,既可以产生高品位的电能,又能提供低品位的热能,可有效实现供暖和制备热水的目的。因此,该新型光伏光热墙体/热泵系统具有更良好的发展前景。

参考文献:

- [1] 习近平. 推动我国生态文明建设迈上新台阶[J]. 奋斗, 2019(3):1-16.
- [2] 赵东来,胡春雨,柏德胜,等. 我国建筑节能技术现状与发展趋势[J]. 建筑节能, 2015,43(3):116-121. ZHAO Donglai, HU Chunyu, BO Desheng, et al. Building energy conservation technology status and development trend in China[J]. Building Energy EFFICIENCY, 2015,43(3): 116-121.
- [3] 狄承刚. 建筑设计中的建筑节能措施分析[J]. 江西建材, 2017(23):11.
- [4] 方津,刘永生,杨晶晶,等. 太阳能光伏光热建筑一体化系统的研究进展[J]. 华东电力, 2012,40(1):108-111. FANG Jin, LIU Yongsheng, YANG Jingjing, et al. The study of building-integrated photovoltaic/thermal solar system[J]. East China Electric Power, 2012,40(1):108-111.
- [5] 安文韬,刘彦丰. 太阳能光伏光热建筑一体化系统的研究[J]. 应用能源技术, 2007(11):33-35,39. AN Wentao, LIU Yanfeng. The study of photovoltaic/thermal integrated building solar system[J]. Applied Energy Technology, 2007(11):33-35,39.
- [6] TRIPANAGNOSTOPOULOS Y, NOUSIA T, SOULIOTIS M, et al. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems[J]. Solar Energy, 2002, 72(3):217-234.
- [7] GHOLAMI H, RÖSTVIK H N. Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe[J]. Energy, 2020,204:117931.
- [8] DEBBARMA M, SUDHAKAR K, BARENDAR P. Thermal modeling, energy analysis, performance of BIPV and BIPV/T: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,73:1276-1288.
- [9] XU Lijie, LUO Kun, JI Jie, et al. Study of a hybrid BIPV/T solar wall system[J]. Energy, 2020,193:116578.
- [10] XU Lijie, JI Jie, LUO Kun, et al. Annual analysis of a multi-functional BIPV/T solar wall system in typical cities of China[J]. Energy, 2020,197:117098.

- [11] 吴双应,张巧玲,肖兰,等. 采用热管冷却技术的太阳能光伏电-热一体化系统性能分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(32):137-144.
WU Shuangying, ZHANG Qiaoling, XIAO Lan, et al. Analysis on performance of solar photovoltaic-thermal hybrid system with heat pipe cooling[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(32):137-144.
- [12] WANG Zhangyuan, ZHANG Jun, WANG Zhixian, et al. Experimental investigation of the performance of the novel HP-BIPV/T system for use in residential buildings [J]. Energy and Buildings, 2016, 130: 295-308.
- [13] 赵耀华,王宏燕,刁彦华,等. 平板微热管阵列及其传热特性[J]. 化工学报,2011,62(2):336-343.
ZHAO Yaohua, WANG Hongyan, DIAO Yanhua, et al. Heat transfer characteristics of flat micro-heat pipe array[J]. CIESC Journal, 2011,62(2):336-343.
- [14] 杨露露,徐洪波,王惠惠,等. 平板微热管阵列的研究现状与进展[J]. 制冷学报,2020,41(5):1-11,22.
YANG Lulu, XU Hongbo, WANG Huihui, et al. Research status and progress of flat plate micro heat pipe array[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(5):1-11, 22.
- [15] QUAN Zhenhua, LI Ningjun, ZHAO Yaohua. Experimental study of solar photovoltaic /thermal (PV/T) system based on flat plate heat pipe[C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2011.
- [16] FU H D, PEI G, JI J, et al. Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump/heat-pipe system[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 40:343-350.
- [17] 王文治,李芳,彭飞. 空气焓差法测量空调制冷量的影响因素分析[J]. 制冷与空调,2012,26(4):385-387.
WANG Wenzhi, LI Fang, PENG Fei. Analysis of influencing factors on air conditioners by air enthalpy test[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2012,26(4):385-387.
- [18] 张远巍,郭泉,汪凌飞,等. 新型太阳能光伏光热一体化系统性能实验研究[J]. 可再生能源,2018,36(10):1449-1454.
ZHANG Yuanwei, GUO Xiao, WANG Lingfei, et al. Experimental study of a new solar hybrid photovoltaic-thermal modules [J]. Renewable Energy Resources, 2018,36(10):1449-1454.

(责任编辑 王绪迪)