

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-636-06

太阳能光伏降温与 热风内墙蓄热耦合系统发电与供暖特性研究

祁式展 余 涛

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 提出一种耦合光伏发电余热与热风内墙的供暖系统（简称 PV/T-HVIW 系统），该系统能有效提高光伏发电效率和室内温度。使用 TRNSYS 软件建立该系统的仿真模型，模拟分析了光伏电池累计发电量、集热器集热量、室内空气温度和供暖负荷。结果表明：本系统相较于独立运行的光伏发电系统在供暖季发电量提高 8.2%，平均发电效率提升约 1.6%；回收的余热能够有效改善室内热舒适，相较于无该系统的普通居住建筑和热风直接供暖的建筑，室内夜间最低空气温度分别提高了 6.3℃ 和 2.7℃，保证室内最低温度为 15℃ 时，夜间供暖负荷减少了 88.0% 和 61.1%。

【关键词】 光伏余热；热风内墙；蓄热；发电特性；供暖特性

中图分类号 TU834.3+1 文献标志码 A

Study on Power Generation and Heating Characteristics of Solar Photovoltaic Cooling and Hot Air Interior Wall Heat Storage

Qi Shizhan Yu Tao

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 This paper presents a heating system coupling photovoltaic waste heat and hollow ventilation interior wall (PV/T-HVIW system), which can effectively improve photovoltaic power generation efficiency and indoor temperature. TRNSYS software was used to establish the simulation model of the system, and the cumulative power generation, collector heat, indoor air temperature and heating load were simulated and analyzed. The results show that compared with the independent photovoltaic power generation system, the power generation capacity of the system is increased by 8.2% and the average power generation efficiency is increased by about 1.6% in the heating season. The recovered waste heat can effectively improve indoor thermal comfort. Compared with ordinary residential buildings without this system and buildings with direct hot air heating, the minimum indoor air temperature at night is increased by 6.3℃ and 2.7℃ respectively, ensure that the minimum indoor temperature is 15℃, the night heating load is reduced by 88.0% and 61.1%.

【Keywords】 Photovoltaic waste heat; Hot-air interior wall; Heat storage; Power generation characteristic; Heating characteristic

0 引言

太阳能光电转换方式利用光生伏特效应原理，将太阳能光直接转化为品位较高的电能，该过程不污染环境、没有噪声、安全可靠、维护简便^[1]，是

一种较好的利用方式。光伏电池工作会产生热量、温度上升，长期处于较高温度不仅影响太阳能电池的性能，还会造成电池的永久性结构损伤^[2]。采取空气冷却的方式对其降温，可以提高光伏发电效

作者简介：祁式展（1998-），男，在读硕士研究生，E-mail: 13086613121@163.com

通讯作者：余 涛（1987-），男，博士，副教授，硕士生导师，E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn

收稿日期：2024-02-29

率^[3], 且无水冷却的防冻问题。目前, 太阳能光伏组件的冷却技术主要分为自然循环冷却、强制循环冷却、光伏光热冷却以及新型冷却^[4], 如在 PV 板背部设置能使气流均匀分布的肋板结构^[5]等。光伏组件降温后, 空气温度升高, 对该部分热风的热量进行回收利用, 可进一步节能。现有研究集中于集光伏与光热于一体的系统 (PV/T), 但多将 PV/T 系统与地源热泵等系统^[6]相结合, 几乎很少有与建筑围护结构耦合的系统, 通风冷却后的热空气用于建筑供暖, 可有效缓解高峰电力供需矛盾, 确保太阳能电池的使用寿命。

居住建筑的供暖需求主要集中在夜间, 为实现持续稳定的能量供应, 应采用蓄热技术。现有的大多数蓄热技术^[7-9]侧重于利用外墙作为蓄热载体。然而在夜间室外气温较低时, 外墙热量损失较大, 导致室内有效热量利用程度降低^[10]。若增加外保温措施, 虽能减轻热量损失, 但又会影响外墙的蓄热效果。而内墙具有较高的蓄热性能^[11], 并且对于中空墙体结构, 其蓄热与放热效果良好^[12], 若能与光伏发电系统结合, 在不影响建筑外围护结构性能和建筑美观的前提下, 即可通过合理的建筑内部自身设计改善室内昼夜热舒适性。

本文提出一种太阳能光伏降温与热风内墙蓄热耦合的供暖系统 (简称 PV/T-HVIW 系统), 将光伏余热利用与建筑围护结构蓄热相结合, 既能为光伏板降温, 提高光伏发电效率, 又能利用建筑内墙蓄存光伏余热, 并于夜间释放至室内, 提升室内夜间温度, 改善室内热舒适性。本文通过某居住建筑的仿真模拟, 对该系统的发电和供暖特性进行了研究。

1 系统原理与传热过程分析

1.1 系统原理

本文提出的 PV/T-HVIW 系统是由集热发电模块与蓄热模块组成的闭式循环系统, 如图 1 所示。在白天, 带有空气流道的光伏电池板吸收太阳辐射产生电能, 同时其温度升高, 光伏电池背板的吸热材料通过对流换热的方式加热空气通道内的循环空气。这些热空气在光伏直驱风机的驱动下通过保温风管被送入热风内墙进行换热, 经过换热后, 循环空气的温度降低, 最后从热风内墙的出风口返回 PV/T 空气集热器, 开始新一轮循环。

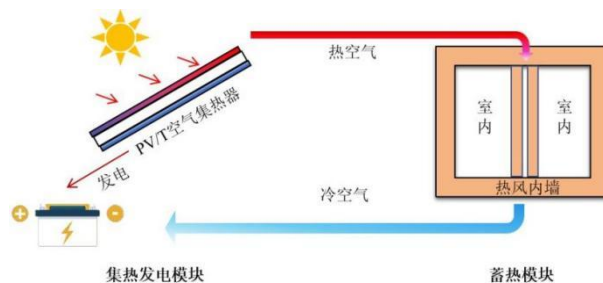


图 1 系统原理图

Fig.1 System schematic diagram

PV/T 空气集热器结构如图 2 所示, 集热器顶部带有玻璃盖板, 盖板下部为光伏集热板, 集热板下表面设置空气通道, 循环空气流经通道后吸收集热板热量向内墙供热, 同时降低光伏电池温度以保证其在最优发电效率下运行工作。内墙被加热, 当内墙表面温度高于室内温度时, 热量以对流和辐射方式传递至室内, 整个传热过程中由于建筑热质的蓄热作用使热量被蓄存在内墙中。夜间随着室内温度的降低, 内墙蓄积的热量以对流和辐射方式逐渐释放到室内, 从而有效提高夜间室内温度, 减少供暖负荷, 其蓄放热原理如图 3 所示。

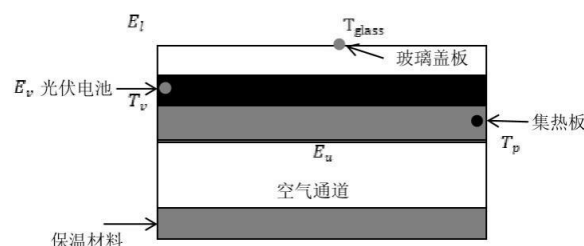


图 2 PV/T 空气集热器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of PV/T air collector

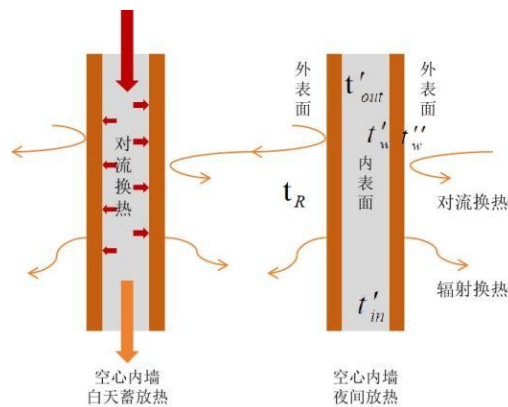


图 3 热风内墙蓄放热原理

Fig.3 Warm-air interior wall principle of heat storage and release

1.2 传热过程分析

根据能量守恒原则, PV/T 空气集热器所接收到的总辐射能有少部分被玻璃盖板反射到外界, 而绝大多数能量被系统所吸收。其中, 光伏电池所吸收的总能量 E 由三部分构成, 分别为电池转换电能 E_v 、电池向集热板及流体介质传递热能 E_u 以及 PV/T 空气集热器向环境散失的热量 E_l , 其能量守恒关系如式 (1) 所示:

$$E = E_v + E_u + E_l \quad (1)$$

热风内墙传热过程主要由循环空气与内墙内表面间的对流换热、内墙导热、内墙外表面与室内空气间的对流换热及内墙外表面与室内其他表面间的辐射换热组成。

其中, 对流换热量为:

$$Q_1 = c_p \dot{m} (t'_{in} - t'_{out}) = h_i A_i (t_f - t'_w) \quad (2)$$

式中: t'_{in} 为热风内墙入口空气温度, $^{\circ}\text{C}$; t'_{out} 为热风内墙出口空气温度, $^{\circ}\text{C}$; h_i 为内墙内表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_i 为内墙内表面传热面积, m^2 ; t_f 为空气平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t'_w 为内墙内表面平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

内墙外表面与室内空气间的对流换热为:

$$Q_2 = h_0 A_0 (t''_w - t_R) \quad (3)$$

式中: h_0 为内墙外表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_0 为内墙外表面传热面积, m^2 ; t_R 为室内空气平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t''_w 为内墙外表面平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

内墙外表面与室内其他表面间的辐射换热为:

$$Q_3 = \sum \varepsilon_{iw} X_{iw} c_b \left[\left(\frac{T''_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \right] A_0 \quad (4)$$

式中: ε_{iw} 为内墙外表面与室内表面 i 之间的系统发射率; X_{iw} 为内墙外表面与室内表面 i 之间的角系数; c_b 为黑体辐射系数, $5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T''_w 为内墙外表面平均温度, K ; T_i 为室内 i 表面平均温度, K 。

2 PV/T-HVIW 系统仿真模型

2.1 建筑概况

为评估 PV/T-HVIW 系统在高寒偏远地区的应

用潜力, 本文以四川省甘孜州配置该系统的普通居住建筑为例。模拟建筑为一单层三居室建筑, 建筑朝南, 单个房间长 7m、宽 4m、高 3m, 外窗设置在南向外墙, 尺寸为 $1.5 \text{m} \times 1.5 \text{m}$, 窗墙比 0.19, 热风内墙厚度为 120mm, 内部空腔厚度为 100mm, 建筑模型如图 4 所示。依据四川省居住建筑节能设计气候分区, 甘孜州被划归为严寒地区, 所有设计标准均按照严寒地区的取值进行, 围护结构均按照《四川省居住建筑节能设计标准》^[13]选取。单个 PV/T 组件尺寸为 $1300 \text{mm} \times 700 \text{mm}$, 为使 PV/T 的设置尽可能充分利用屋顶空间, 建筑屋顶面积可利用系数取 0.7^[14], PV/T 组件分为 4 组, 每组 14 块, 总面积为 50.96m^2 , 根据《太阳能供热采暖工程技术规范》^[19]可知, 集热器安装倾角宜选择在当地纬度 $\pm 20^{\circ}$ 范围内。甘孜州地区纬度为 $31^{\circ}36'$, 根据前期计算, 取光伏集热器安装倾角为 35° 。

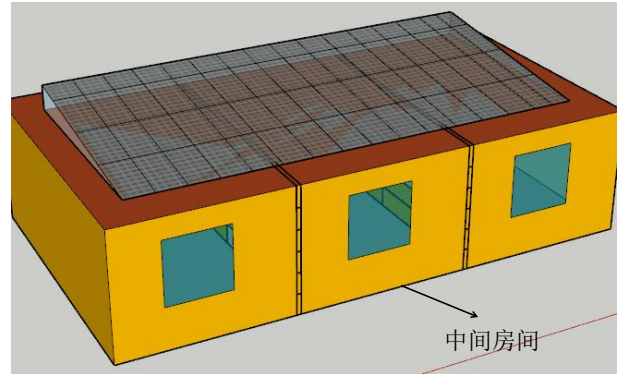


图 4 建筑模型

Fig.4 Building model

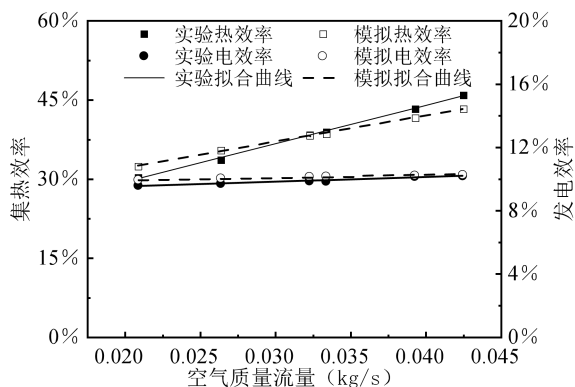
2.2 仿真模型建立

本文采用 TRNSYS 软件模拟耦合系统的发电和供暖特性。PV/T 空气集热器模型采用 TRNSYS 软件带有空气流道的 TESS 模块 Type566, 该模型控制变量分别为集热器安装倾角及方位角、入口空气质量流量及温度。输出逐时数据主要有 PV/T 空气集热器出口空气温度、发电量及光电效率、发热量及光热效率、接收太阳辐射量、光伏电池平均温度等。建筑模型使用 TRNSYS 的 TRNBuild 根据建筑的实际情况设置建筑参数来进行模拟。

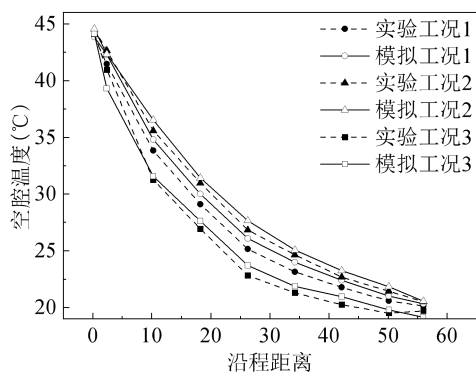
2.3 计算方法及验证

TRNSYS 软件具有模块化分析的特点, 可模拟全年 8760 个小时的建筑室内热环境参数及能耗情况, 同时还能输出墙体表面温度及逐时蓄热量等参数。利用 TRNSYS 软件建立模型并对带有空气流

道的 TESS 模块 Type566 和热风内墙模型进行验证。



(a) PV/T 集热器发电效率及集热效率对比



(b) 热风内墙热空气沿程温度变化对比

图5 仿真模型验证

Fig.5 Simulation model verification

文献[15]设计并制作了具有光伏空气集热模式的太阳能集热器,搭建了光伏空气集热模式实验平台,实验平台可以实现不同流量、不同进口温度、不同初始条件下的集热器光伏光热性能测试。本文建立光伏组件及风机系统模型,用实验数据验证不同空气流量下热、电效率的变化情况,验证结果如图5(a)所示。随着空气流量由0.021kg/s增加至0.042kg/s,实验光热效率由30.3%增加至46.0%,模拟最大误差为2.6%;光电效率则由9.6%增加至10.2%,模拟最大误差为0.4%。文献[16]提出一种耦合太阳能的空心通风内墙系统为高寒地区普通居住建筑进行供暖,通过搭建具有空心内墙结构的实验房间,分别进行内墙稳态和动态传热过程实验,根据测试结果进行分析墙体传热特性。本文建立空心内墙模型,用实验数据验证温度变化情况,验证结果如图5(b)所示。整个空腔流动热空气

温度呈衰减趋势,与实验一致。绝大多数热量从前半段流程传入室内,对应空腔位置热空气温度偏差也在1℃以内,与实验测试结果的规律一致。

3 结果分析

选取图4建筑模型中间房间作为研究对象,运用 TNRSYS 软件,当 PV/T 模块的出风温度与房间温度的温差大于5℃时,控制空气合流器开始热风供暖,循环风量为360m³/h;当温差小于2℃时,循环风机停止工作。首先模拟典型日及供暖季的室内温度与供暖负荷,并与无该系统的普通房间、将集热器产生的热空气直接通入室内的房间进行对比,研究室内温度与供暖节能潜力。其次,针对该系统中 PV/T 的气流通道有无空气流过的两种情况,对该系统的发电量以及集热量进行分析,研究系统性能的提升效果。

3.1 集热器性能分析

3.1.1 评价指标

PV/T 组件瞬时电效率被定义为太阳电池的瞬时发电量与投射到太阳电池表面上的太阳辐射量之比^[18]:

$$\eta_{e(PV)} = \frac{UI}{G(\tau\alpha)_{pv} A_{pv}} \quad (5)$$

式中: U 为 PV/T 组件或单独光伏电池的输出电压, V; I 为 PV/T 组件或单独光伏电池的输出电流, A; A_{pv} 为光伏电池的有效采光面积, m²。

全天光电效率定义为 PV/T 组件或光伏电池的总发电量与全天接受的总辐射能之比^[18]:

$$\bar{\eta}_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} UI dt}{H(\tau\alpha)_{pv} A_{pv}} \quad (6)$$

3.1.2 结果分析

对本系统在 TRNSYS 模型中进行逐时模拟仿真,分别研究典型日及整个供暖期的系统发电特性。图6是无降温的光伏发电系统与 PV/T-HVIW 系统的结果, PV/T-HVIW 系统在典型工况日下发电量共计37.2kWh,不带冷却循环的单一光伏发电系统典型工况日下发电量共计34.7kWh,前者较后者典型工况日下发电量高出7.2%,平均发电效率提升约1.4%。从数据可知, PV/T 系统中的空气流动循环可以有效地降低光伏板组件温度,进而提高

光伏电池的发电效率。

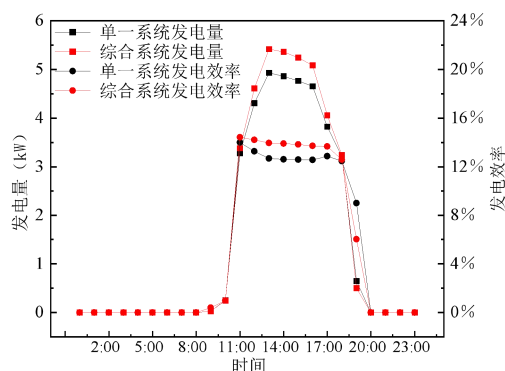


图6 典型工况日发电性能对比

Fig.6 Comparison of power generation during typical conditions

图7为供暖季PV/T-HVIW系统与单一光伏发电系统进行逐月发电量及效率对比,前者累计发电量为6448.6kWh,后者累计发电量为5918.4kWh,供暖季总计产电量高出约8.2%,平均发电效率提升约1.6%。由此可以看出PV/T-HVIW系统可以高效的利用的收集到的热能,并且有效地降低了光伏电池背板温度,提高了光电效率。

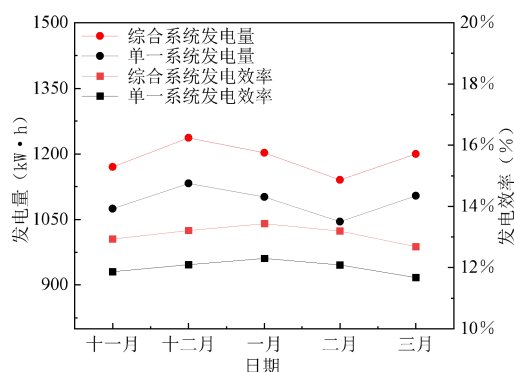


图7 供暖季逐月发电性能对比

Fig.7 Comparison of monthly power generation during the heating season

3.2 室内空气温度分析

综合考虑我国严寒地区村镇居民的居住特点,文献[17]从影响热舒适环境的主要因素入手,提出了适合严寒地区村镇住宅冬季室内舒适温度区间为15℃至18℃。考虑到我国青藏高原地区人民的生活水平以及他们长期适应的寒冷环境,本研究将12℃作为青藏高原寒冷地区普通居住建筑冬季室内的下限温度。将15℃设为可接受的室内温度,即最低的热舒适温度。

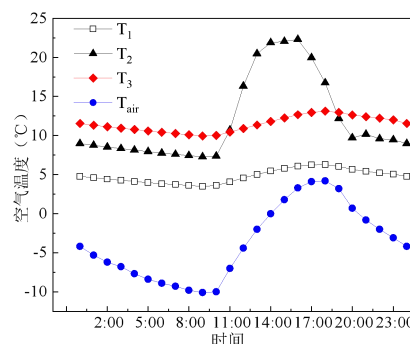


图8 典型室内空气温度变化

Fig.8 Indoor air temperature change during the typical day

图8为中间房间典型日的室内温度变化情况,图中 T_{air} 为室外空气温度, T_1 为工况一即无该系统的普通房间中间房间的室内空气温度, T_2 为工况二即热空气直接通入房间的室内空气温度, T_3 为工况三即本系统作用下的室内空气温度。工况一夜间(20:00~8:00)温度在3.6~5.7℃之间,低于室内下限温度12℃;工况二夜间温度在7.2~10.3℃之间,由于白天将集热器产生的热空气直接送入室内,因此工况二中白天室内温度较高;工况三夜间温度在9.9~12.4℃之间,采用了PV/T-HVIW系统,白天该系统将集热器产生的热量储存在热风内墙中,夜间逐渐释放至室内,该工况室内最高温度低于工况二的室内最高温度。通过利用空心通风内墙的蓄放热特性,工况三在夜间实现了室内温度的有效提升。夜间最低温度相比工况一提高6.3℃,相比工况二提高2.7℃。

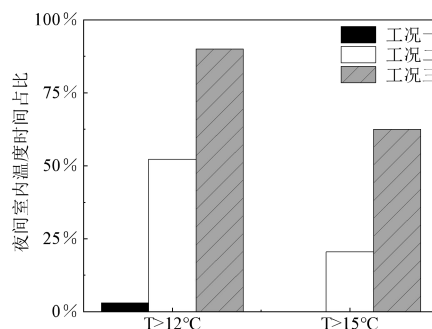


图9 供暖期中间房间夜间室内温度统计

Fig.9 Statistics on indoor temperature of nighttime during the heating period.

图9统计了中间房间整个供暖期夜间的室内温度情况。其中工况一夜间室内温度无法达到

15℃,达到12℃的时间占3.1%;工况二夜间室内温度高于12℃的时间占52.3%,高于15℃的时间占20.5%;而工况三夜间室内温度高于12℃的时间占90.0%,并且有62.4%的时间室内温度高于15℃。由此可见PV/T-HVIW系统能够有效提高夜间室内温度,改善室内热舒适性。

3.3 供暖负荷分析

根据3.2节模拟结果,PV/T-HVIW系统能够有效改善室内热舒适性,尤其对夜间室内温度的提高有着显著的作用效果。但整个供暖期内,中间房间室内温度低于15℃的时间有37.6%。为满足室内舒适性要求,本节探讨其与辅助供暖设备共同作用下的节能潜力。模拟时,分别设置供暖温度为12℃与15℃,辅助供暖设备在夜间(20:00~8:00)运行时,中间房间供暖负荷如表1所示。由图中数据可知,保证室内最低温度为12℃时,工况三相比工况一和工况二,供暖负荷分别减少95.0%与78.2%;保证室内最低温度为15℃时,供暖负荷分别减少88.0%与61.1%。可见,通过热风内墙的蓄放热特性,白天集热器向室内供热时,将热量储存在热风内墙之中。夜间,这些热量逐渐释放,产生移峰填谷的效果,降低夜间的供暖负荷,从而使得工况三相较于工况二更具节能潜力,PV/T-HVIW系统能源利用效率较高。

表1 夜间不同供暖温度下房间供暖负荷

Table 1 Nighttime heating load under different heating temperatures

供暖温度/℃	工况一供暖负荷/kWh	工况二供暖负荷/kWh	工况三供暖负荷/kWh
12	549.8	119.8	16.0
15	814.0	316.9	93.3

4 结论

本文提出了一种适用于偏远高寒地区居住建筑的PV/T-HVIW系统,该系统借助建筑热风内墙储存太阳能PV/T空气集热器降温时的余热,可以在提升室内温度、降低供暖负荷、提高发电效率。结论如下:

(1) PV/T-HVIW系统比不带冷却循环的单一光伏发电系统供暖季总计发电量高出约8.2%,平均发电效率提升约1.6%,本系统可以通过有效地降低光伏电池背板温度,提高发电效率。

(2) 与未配备该系统的房间(工况一)以及热风直接供暖的房间(工况二)相比,系统中间房间其夜间室内最低温度分别提高6.3℃与2.7℃,最低温度10℃左右,有效改善了室内热舒适性。

(3) 采用辅助供暖设备并保证室内最低温度为12℃时,工况三相比工况一和工况二,供暖负荷分别减少95.0%与78.2%;保证室内最低温度为15℃时,供暖负荷分别减少88.0%与61.1%,本系统具有更高的节能潜力。

参考文献:

- [1] 毕二朋,胡明辅,袁江,等.光伏系统设计中太阳辐射强度影响的分析[J].节能技术,2012,30(1):45-47.
- [2] Chow T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology[J]. Applied Energy, 2009,87(2):365-379.
- [3] 张宗敏.空冷型PV/T组件的结构优化与热电性能研究[D].济南:山东大学,2019.
- [4] Li M, Ji X, Li G L, et al. Performance investigation and optimization of the Trough Concentrating Photovoltaic/Thermal system[J]. Solar Energy, 2011,85(5):1028-1034.
- [5] 王杰,张孟雷,徐元清.PVT光伏光热系统结合地源热泵的应用性研究[J].现代电子技术,2013,36(22):168-170.
- [6] Teo H G, Lee P S, Hawlader M N A. An active cooling system for photovoltaic modules[J]. Applied Energy, 2012,90(1):309-315.
- [7] 杨洪兴,周伟.太阳能建筑一体化技术与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [8] Balcomb J. Heat Storage and Distribution inside passive Solar Buildings[D]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1983.
- [9] 于靖华,田利伟,徐新华,等.空心砌块通风墙体技术及传热模型研究进展[J].建筑热能通风空调,2014,33(4):40-43.
- [10] 张在喜.墙体蓄放热特性及其对建筑能耗影响的研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [11] 杨文晓,陈滨,张志成,等.关于建筑热质对太阳能空气采暖建筑热稳定性影响的研究[J].太阳能学报,2012,33(10):1777-1782.
- [12] 任晓萌,程杰宇,夏楠,等.日光温室自然对流蓄热中空墙体蓄放热效果研究[J].中国农业大学学报,2017,22(2):115-122.

(下转第661页)

次衬砌过程中的某些操作,尤其是喷射混凝土,是粉尘产生的主要源头。

(3) 各粉尘对总悬浮颗粒物的贡献比排序大小为二次衬砌>初期支护>掌子面的开挖。 PM_{10}/TSP 在各阶段的贡献率为二次衬砌>掌子面开挖>初期支护; $PM_{2.5}/TSP$ 在各阶段的贡献率为掌子面开挖>二次衬砌>初期支护; PM_4/TSP 在各阶段的贡献率为二次衬砌>掌子面开挖>初期支护; PM_{10}/TSP 在各阶段的贡献率为初期支护>二次衬砌>掌子面开挖。通过分析贡献率我们可以更直观地看到不同粒径粉尘在各施工阶段的变化情况。这有助于我们识别主要污染源,并在不同施工阶段采取对应的控制措施。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国交通隧道工程学术研究综述.2022[J].中国公路学报,2022,35(4):40.
- [2] 世界工程量和建设规模第一的公路隧道—秦岭天台山隧道在陕西贯通[J].隧道建设,2021,41(1):76.
- [3] 宋富美,李季.我国煤矿尘肺病现状及预防对策研究[J].煤矿安全,2014,45(5):231-233,237.
- [4] 谢德兴,温建斌.闽西煤矿尘肺发病状况及影响因素研究[J].中国卫生工程学,2018,17(4):523-525.
- [5] 郭中峰.煤矿粉尘对人体健康的危害及防治措施研究[J].河北企业,2018,(11):45-46.
- [6] Fuchs N. A(著),顾震潮(译).气溶胶力学[M].北京:科学出版社,1960.
- [7] 童志权.大气污染控制工程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [8] Bhaskar R, Ramani, RV. Behavior of Dust Clouds in Mine Airways[J]. SME Transactions, 1986,(280):31-40.
- [9] Waiton A, Cheng A Y S. Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon-part II: idealise canyon simulation[J]. 2002,36(22):3615-3627.
- [10] 孙忠强,苏昭桂.隧道出渣过程粉尘扩散规律研究[J].工业安全与环保,2017,43(2):100-103.
- [11] 孙忠强,方宝君.施工隧道内粉尘受力分析及其运动研究[J].煤炭技术,2016,35(5):176-178.
- [12] 乔力伟,蒋葛夫.施工隧道通风位置与污染物浓度场演化特征关系分析[J].环境工程,2018,36(9):74-80.
- [13] 董芹.公路建设项目施工过程中粉尘的测定研究[D].西安:长安大学,2006.
- [13] DB 51/5027,四川省居住建筑节能设计标准[S].成都:西南交通大学出版社,2019..
- [14] 伍品,王智超,杨英霞,等.长江流域居住建筑空气源热泵结合太阳能屋顶的应用研究[J].暖通空调,2020,50(5):10-13.
- [15] 郭超.多功能太阳能光伏光热集热器的理论和实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2015.
- [16] 赵江东.太阳能空心通风内墙蓄放热过程实验与理论研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [17] 金虹.严寒地区村镇住宅冬季室内热舒适环境研究[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(12):2108-2111.
- [18] Yang X J, Sun L L, Yuan Y P, et al. Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T system[J]. Renewable energy, 2018, 119:152-159.
- [19] GB50495-2019,太阳能供热采暖工程技术规范:GB50495-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.

(上接第 641 页)