

严寒地区光伏复合墙体冬季主被动热利用模式研究

曹 也¹, 李辰琦², 周宏敞³

(1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学 建筑与规划学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 国家能源集团 绿色能源与建筑研究中心, 北京 102211)

摘要: 光伏复合墙体是光伏建筑一体化(BIPV)的应用形式之一, 凭借其特殊的构造体系, 具有冬季保温、夏季隔热的性能。基于沈阳地区实验装置的监测数据, 研究光伏复合墙体冬季温度变化规律, 通过实测和模拟, 量化了主被动两种热利用方式的供热量和供热效率。冬季太阳直射条件下, 南墙光伏组件的温度可达到 45~55 °C, 空气间层温度可达到 35~45 °C。在被动模式下, 光伏复合墙体内部的空气与室内空气自然循环, 适用于空气间层温度高于 30 °C 工况, 基于对比实验装置, 发现相对于未使用光伏复合墙体的 B 建筑, 应用光伏复合墙体内部循环模式的 A 建筑可节约 36% 采暖能耗, 模拟发现在立冬日的供热效率为 14%。在主动模式下, 光伏复合墙体与新风机结合, 新风机启停受控于空气间层温度, 启动温度为 30 °C, 停止温度为 28 °C, 实际应用于沈阳某办公建筑, 光伏复合墙体面积为 8.64 m²。实测结果表明 11 月、2 月和 3 月光伏复合墙体的新风机每日工作时间平均为 5 h, 供热效率约为 22%, 供热量为 17.8 MJ, 单位面积日均供热量为 2.1 MJ/(m² · d)。

关键词: 光伏复合墙体; 热利用; 新风系统; 供热效率

中图分类号: TU111.4; TK519

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0927-07

Study on active and passive heat utilization mode of photovoltaic wall in winter in severe cold area

CAO Ye¹, LI Chenqi², ZHOU Hongchang³

(1. School of municipal and environmental engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;
2. School of architecture and planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;
3. Green energy and Building Research Center, CHN Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: Photovoltaic wall is one of the application forms of BIPV. With its special structure system, it has the performance of heat preservation in winter and heat insulation in summer. Based on the monitoring data of the experimental device in Shenyang, the paper studies the winter temperature variation of the photovoltaic wall. Through actual measurement and simulation, the heating capacity and efficiency of the active and passive heat utilization methods are quantified. Under direct sunlight in winter, the temperature of photovoltaic modules on the south wall can reach 45~55 °C, and the temperature of air interlayer can reach 35~45 °C. In the passive mode, the air in the photovoltaic wall circulates naturally with the indoor air, which is suitable for the condition that the air interlayer temperature is higher than 30 °C. Based on the comparative experimental device, it is found that compared with building B without photovoltaic wall, building A with photovoltaic wall internal circulation mode can save 36% of heating energy consumption, and the simulation shows that the heating efficiency is 14% on Lidong Day. In the active mode, the photovoltaic wall is combined with the fresh air fan. The start and stop of the fresh air fan is controlled by the air interlayer temperature, the start temperature is 30 °C and the stop temperature is 28 °C. It is actually applied to an office building in Shenyang, of which the area of the photovoltaic wall is 8.64 m². The measured results show that in November, February and March, the average daily working time of fresh air fan is 5 h, the heating efficiency of photovoltaic wall is about 22%, the heating capacity is 17.8 MJ, and the daily average heating capacity per unit area is 2.1 MJ/(m² · d).

Key words: photovoltaic wall; heat utilization; fresh air system; heating efficiency

收稿日期: 2021-07-11

修改稿日期: 2021-10-29

基金项目: 沈阳市科学技术计划(20-206-4-14); 国家自然科学基金项目(51878417)

第一作者: 曹 也(1993—), 女, 博士生, 主要从事光伏光热建筑一体化方面的研究。E-mail: 846397486@qq.com

通信作者: 李辰琦(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事光伏建筑一体化和绿色建筑的研究。E-mail: lcq3000@163.com

建筑能耗占全国能源消费总量的 40% 以上^[1], 建筑碳排放量约占总量的 36%^[2], 节能减碳空间大。光伏复合墙体(Photovoltaic Wall, PV Wall)作为光伏建筑一体化(BIPV)技术形式之一, 充分利用建筑立面空间, 同时具备围护结构功能和发电功能, 能够实现建筑发电就地消纳, 促进建筑领域的节能减排和碳中和目标的实现。

光伏复合墙体一般由光伏组件、空气间层和保温墙体组成, 根据光伏组件的种类, 目前光伏复合墙体中应用较多的有半透光和不透光的晶硅、非晶硅、染料敏化和钙钛矿基太阳能电池产品^[3-13]。光伏组件经太阳辐照后, 一部分能量转换为电能, 另一部分能量转化为热能^[14], 研究表明各类型的光伏组件的发电效率均会随工作温度升高而降低, 因此国内外学者针对不同散热方式的光伏复合墙体的热性能和发电效率开展了相关研究。Mehdi Shahrestani 等^[3]通过数值模拟与实验验证, 发现自然通风能够提高晶体硅光伏通风立面的年发电量 4%。Nuria Martín-Chivelet 等^[4]将不透光的晶体硅光伏墙体应用于西班牙某改造建筑中, 发现通风模式可以提高 2.5% 的发电效率。Jinqing Peng 等^[5]研究了中国香港地区的透光非晶硅光伏墙体在不通风、浮力和通风 3 种模式下的热性能和发电效率, 发现不通风模式的隔热性能最好, 而通风模式太阳能得热系数 SHGC 最低且发电效率提高了 3%。通过模拟发现朝南光伏墙相比于普通墙体, 夏季得热量和冬季热损失的年减少率分别约为 56.2% 和 32.0%^[6]。Suzana Domjan 等^[7]以强制通风模式利用透明单晶硅光伏复合墙体预热新风后送入室内, 实验发现高达 10% 的太阳辐射可用于供电和供热, 空气预热可利用高达 75% 的所接收的太阳辐射。Lijie Xu 等^[8]建立了 BIPV/T 太阳能墙的数值模型, 采暖季太阳能墙空气通道中的热空气可承担部分热负荷, 模拟发现在北京、合肥和西宁的太阳能保证率分别为 49.9%、38.7% 和 41.3%。季杰^[9]、徐小炜^[10]、马杨^[11]等人提出将光伏电池与 Trombe 墙结合, 根据光伏组件安装位置分为内置式和外置式 PV-Trombe 墙, 采用 CFD 方法研究了墙体的光电光热性能, 发现内置式的 PV-Trombe 墙的集热效果更好, 而光电转化效率低于外置式。Siliang Yang 等^[12]比较了非晶硅太阳能电池、染料敏化太阳能电池和钙钛矿基太阳能电池应用于光伏复合墙体, 在不通风、自然通风和强制通风模式下的发电和热性能, 发现在澳大利亚最适宜应用钙钛矿基太

阳电池的自然通风光伏复合墙体。

已有研究中阐述了应用不同光伏材料的光伏复合墙体在亚热带和温带等气候区的光电光热综合利用的节能优势, 但关于应用非透光铜铟镓硒薄膜类光伏组件的光伏复合墙体热利用的研究有限, 且多数研究采用数值模拟的方法, 缺乏基于实测数据的进一步验证。

因此, 本文提出了一种采用非透光铜铟镓硒薄膜太阳能电池的光伏复合墙体, 是能够在实际中广泛应用的幕墙体系^[14-15], 如图 1。构造组成由外至内依次为光伏组件、龙骨与空气间层、保温与内墙层和内装饰层, 属于建筑的非透光围护结构, 不具有建筑采光功能。为合理利用光伏复合墙体内部的热量, 在墙体上下端设置内外通风器, 形成呼吸式构造。夏季, 光伏复合墙体采用外循环模式, 即外部通风器开启, 空气间层与室外环境连通, 通过烟囱效应, 及时排除空气间层内热量(图 2(a)); 冬季日间, 采用内循环运行模式, 内部通风器开启, 空气间层与室内环境联通并形成内循环, 光伏复合墙体的热量可被建筑利用(图 2(b)); 冬季夜间, 光伏复合墙体保持密闭, 封闭的空气间层具有一定的保温性(图 2(c))。



图 1 惠州潼湖科技小镇项目^[14]

Fig. 1 CIGS-BIPV Photovoltaic Demonstration Building in Tonghu Science and Technology Town

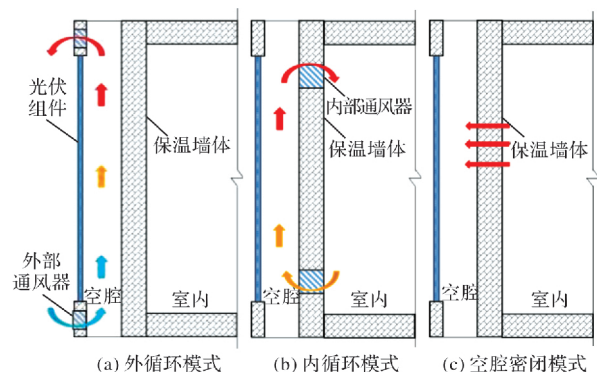


图 2 光伏复合墙体工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of photovoltaic wall

光伏复合墙体凭借其特殊的呼吸式构造体系, 具有冬季保温、夏季隔热性能, 本文重点研究其在我国严寒地区冬季的主被动热利用模式及效果, 基于沈阳地区的实验装置, 进行了 2 a 的长期监测实验, 取得了大量的实测数据, 总结了冬季不同太阳辐射强度和环境温度条件下, 光伏复合墙体热能的动态变化的规律, 进一步提出了主被动热利用的有效模式, 量化了两种热利用模式的供热量和供热效率, 为其在严寒地区的应用提供了数据支撑和应用策略。

本文除引言和结论外, 分为 4 个主要部分。第 1 节为光伏复合墙体对比实验平台简介; 第 2 节统计分析了冬季工况下, 实验装置中光伏复合墙体空腔密闭状态时的各部分温度实测数据; 第 3 节提出了光伏复合墙体被动式热利用模式, 基于对比实验装置实测其对建筑采暖能耗的节能效果, 通过 CFD 模拟研究其供热量和供热效率; 第 4 节提出了与新风机结合的光伏复合墙体主动式热利用模式, 通过实验测试研究其供热能力。

1 实验平台

在我国建筑热工分区为严寒地区、太阳能资源为Ⅲ类地区的沈阳, 搭建光伏复合墙体对比实验装置, 包括 A、B 两个微型建筑, 除南墙外, 两建筑的围护结构均相同。其中, A 建筑南立面应用了光伏复合墙体, 外饰面是 8 块尺寸为 0.6 m×1.2 m 的铜铟镓硒(CIGS)光伏组件, 内保温材料为苯板, 两者之间形成约 300 mm 厚的空气间层。B 建筑南墙表面未覆盖光伏组件, 内墙材料与实验

建筑相同。

设置气象环境监测站, 监测室外干球温度和南向垂直面的太阳辐射强度。在建筑内部中心位置垂直安装 3 个温度传感器监测室内温度, 在光伏组件内表面安装 2 个温度传感器、空气间层和保温材料表面各安装 2 行 4 列共 16 个温度传感器, 监测光伏复合墙体各部分温度。监测数据由 MC-B802 主机采集, 按照 1 min 的间隔保存在内置的 TF 卡中。

2 光伏复合墙体温度分布特性

在冬季工况下, 实验重点分析了 2020 年 12 月至 2021 年 3 月的各项监测数据, 研究光伏复合墙体空腔密闭状态下各部分的温度分布情况, 为其热利用模式提供数据支撑。日间光伏复合墙体接受太阳辐射, 光伏组件温度逐渐升高, 并通过对流换热方式加热空气间层; 夜间无太阳辐射, 光伏复合墙体各部分温度与环境温度基本相同, 本节主要分析光伏复合墙体在日间(自 8:00 时刻至 16:00 时刻)的温度分布情况。

沈阳冬季漫长, 不同月份的太阳辐射和温度条件具有一定差异性, 挑选太阳辐射条件良好的日期, 逐月分析光伏复合墙体温度分布特性, 发现光伏组件最高温度在 12 月、1 月、2 月、3 月的平均值分别为 46.4℃、45.5℃、51.1℃、53.0℃, 空气间层最高温度的平均值分别为 34.4℃、32.1℃、40.7℃、44.1℃, 光伏组件和空气间层分别与环境温度的差值最高可达 50℃和 40℃, 光伏复合墙体具有保温隔热甚至是充当“热源”的作用, 可以用于建筑辅助供热。

表 1 沈阳地区光伏复合墙体逐月平均温度情况

Tab. 1 Monthly average temperature of photovoltaic wall in Shenyang

月份	日间环境	南向垂直面	光伏组件最高	空气间层最高	保温材料表面日间
	温度/℃	太阳辐射度/(W·m ⁻²)	温度/℃	温度/℃	平均温度/℃
12 月	-3.4	0~450	46.4	34.4	11.9
1 月	-7.8	0~600	45.5	32.1	8.9
2 月	3.0	0~600	51.1	40.7	20.7
3 月	8.5	0~750	53.0	44.1	27.7

3 被动热利用模式研究

3.1 内循环模式

光伏复合墙体的热量通过热传导方式进入建筑室内的效率较低, 向室内提供的热量有限。为提升光伏复合墙体的热利用效率, 在保温墙体上设置上下通风口, 空气间层温度高于室内温度时, 在烟囱效应作用下, 墙体内热空气与室内空气自

然循环, 直接利用光伏复合墙体热量, 该方式不需要机械设备提供能源, 属于被动式热利用方式。

研究发现, 室外环境平均温度为 5℃, 光伏复合墙体空腔密闭状态下, 建筑制热设备温度设定为 21℃, 保持两建筑室温相同, 应用光伏复合墙体可节约 20%采暖能耗。在室外平均温度 2.7℃的条件下, 光伏复合墙体采用内循环模式运行 1 h 后, 实验建筑的室温由 6℃升温至 18℃^[17]。

为进一步明确内循环运行模式对建筑采暖能耗的影响,在实验装置 A 建筑中光伏复合墙体的保温层上设置 4 个直径为 150 mm 的通风口,并安装与主机连接的密闭阀,见图 3(d). 实验人员通过主机给出密闭阀的开闭信号,控制实验装置内的通风口,比较其与 B 建筑的采暖能耗.

如图 4 所示,实验期间,日间平均温度 3 ℃,垂直方向平均太阳辐射照度 310 W/m²,A 建筑的光伏复合墙体的空气间层温度高于 30 ℃开启,低

于 25 ℃关闭,设定两建筑的供热设备温度为 21 ℃. 光伏复合墙体空气间层温度最高达到 36 ℃,与环境温度最大温差达到了 32 ℃,随着太阳辐射强度的降低,光伏复合墙体热量也迅速流失,空气间层温度与室外温度逐渐接近. 通过监测采暖设备能耗,得到 A 建筑的日间采暖能耗为 0.62 kWh, B 建筑的采暖能耗为 0.97 kWh. 应用内循环运行模式光伏复合墙体的 A 建筑,相对于未采用光伏复合墙体的 B 建筑,节约了 36% 的采暖能耗.

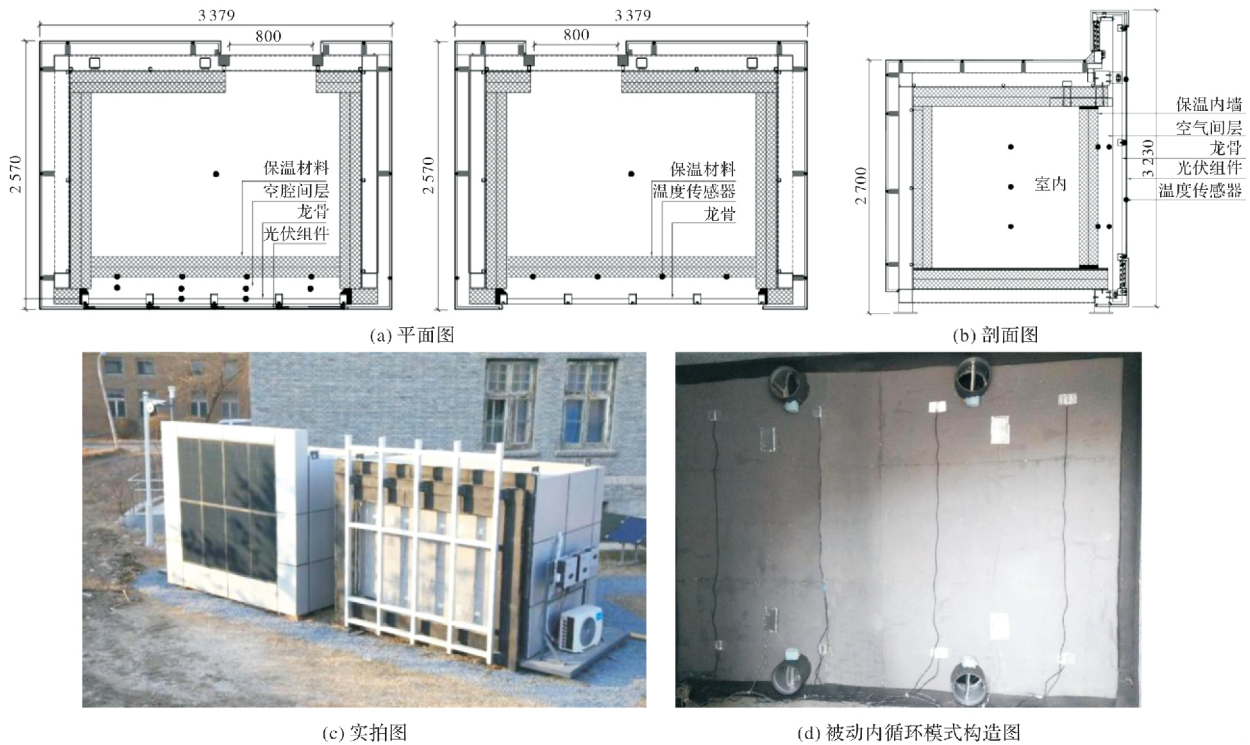


图 3 光伏复合墙体对比实验装置

Fig. 3 Comparative experimental device of photovoltaic wall

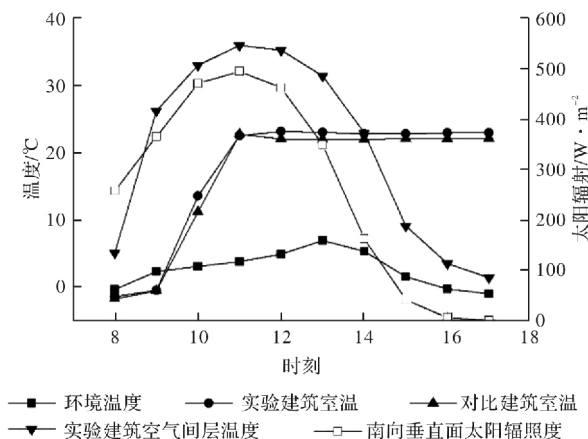


图 4 光伏复合墙体被动内循环模式的温度变化趋势

Fig. 4 Temperature change trend of passive internal circulation mode of photovoltaic wall

实验表明,光伏复合墙体内部循环运行模式直接利用墙体内热空气,节能效果更显著,相比于空腔密闭时节约 20% 的采暖能耗^[16],内循环模式

能够向室内提供更多的热量.

3.2 内循环模式供热能力研究

为量化内循环模式光伏复合墙体的供热量,利用 Fluent 软件模拟稳态条件下^[18]光伏复合墙体内部的气流和传热情况. 建立光伏复合墙体的简化模型,忽略横竖龙骨构造后,空气间层厚度设为 0.2 m,墙体高和宽为 0.6 m×2.4 m,上下部通风口尺寸为 0.2 m×0.1 m,材料属性与实验平台应用的墙体一致. 温度场和速度场的求解基于 RNG k-ε 模型,并在打开浮升力选项的同时将材料的密度属性设置成 boussinesq. 太阳辐射对光伏组件的作用是开启了自带的太阳辐射模型并给定太阳能热吸收率实现的,设置光伏组件吸热率 0.75. 分析立冬(11 月 7 日)、冬至(12 月 21 日)、小寒(1 月 4 日)3 天 12:00 时刻的光伏复合墙体内部循环模式的气流和传热情况,环境温度和光伏组件对流换热系数设置见表 2,模拟结果如表 2 所示.

表 2 内循环运行模式模拟结果

Tab. 2 Simulation results of internal circulation operation mode

日期	南向垂直面太阳 辐照度/(W·m ⁻²)	光伏组件对流换热系数 /[W·(m ² ·K) ⁻¹]	环境温度/℃	进口温度/℃	出口温度/℃	流量/(kg·s ⁻¹)
立冬	617	13.3	11.0	18.0	33.0	0.010
冬至	824	13.3	3.0	18.0	31.0	0.010
小寒	701	17.5	-13.5	18.0	26.5	0.008

将模拟结果与实测数据对比^[17], 在环境温度为 6℃, 南向垂直面太阳辐射为 680 W/m², 光伏复合墙体进口温度为 18℃, 实测的光伏复合墙体出口温度为 35℃, 实测与模拟结果具有相近的趋势, 本文建立的光伏复合墙体内部循环运行模型较为合理. 进一步计算立冬、冬至和小寒 3 d 的单位面积墙体供热量为 105 W/m²、91 W/m²、48 W/m². 定义单位面积墙体供热量与墙体接受的太阳辐照度之比为供热效率, 经计算, 供热效率分别为 17%、11%和 7%. 可见, 环境温度低会导致光伏复合墙体的空气间层温度较低, 其供热量大幅衰减. 在空气间层的温度低于 30℃时, 不宜采用内循环运行模式.

4 主动热利用模式研究

4.1 新风取热运行模式

光伏复合墙体内部循环运行模式的工作原理是利用烟囱效应将热空气导入室内, 该热利用方式的空气循环动力不足, 供热效率较低, 且仅适用于小空间建筑. 同时, 内保温墙体上的密闭阀门属于保温性能薄弱部位, 导致的冷热桥问题会严重影响墙体夜间的保温能力. 故提出了一种主动式的光伏复合墙体热利用方式, 将墙体与新风机结合, 提供热量的同时兼顾改善室内空气质量.

新风系统由取风口、通风阀、风机、过滤器和温控开关组成. 温控开关的温度设定可根据实际需求更改, 冬季当空气间层温度高于温控系统的高限设定值, 温度控制开关给出启动风机信号, 将空气间层中被预热后的新风导入室内, 同时, 室外新鲜空气通过外循环通风器的缝隙缓慢渗入空气间层并被逐渐加热, 如此循环完成新风取热的过程. 当空气间层温度低于温控系统的低限设定值时, 温度控制开关给出关闭风机信号, 密闭的空气间层起保温作用. 夏季新风取热系统停用, 外循环通风器开启, 烟囱效应的作用下空气间层与室外环境联通并形成循环流动, 完成光伏组件

的降温过程, 提高其发电效率, 如图 5 所示.

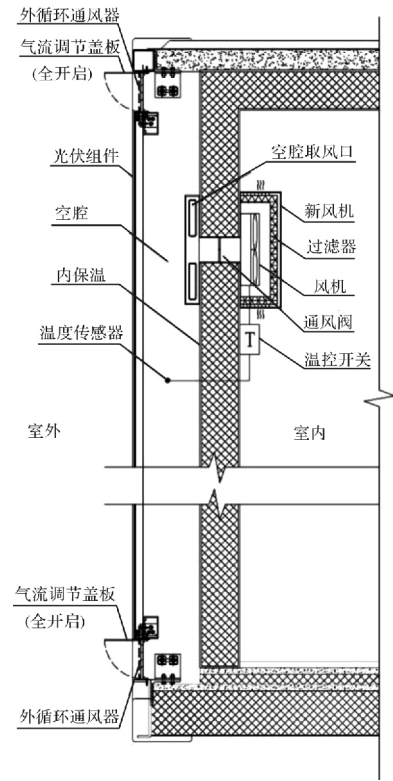


图 5 与新风机结合的光伏复合墙体构造示意图

Fig. 5 Structural diagram of photovoltaic composite wall combined with fresh air fan

4.2 新风取热模式供热能力研究

将与新风系统结合的光伏复合墙体实际应用于沈阳市某办公建筑, 建筑面积 54 m². 南侧光伏复合墙体面积 8.64 m², 新风机风量 180 m³/h. 温控系统设置空气间层温度高于 30℃新风机开启工作, 低于 28℃停止工作. 光伏复合墙体向建筑室内提供的瞬时供热量 Q 按公式(1)计算, 得

$$Q = cm(t_k - t_n) \tag{1}$$

式中: c 为空气的定压比热容, 取值 1.005 kJ/(kg·K); m 为空气间层进入室内的空气的质量流量, 单位 kg/s. $m = \rho \cdot V$, 其中, ρ 为空气密度, V 为体积流量; t_k 为空气间层温度,℃; t_n 为建筑室内温度,℃.

光伏复合墙体空气温度变化范围较广, 不同

空气温度时的密度按公式(2)计算:

$$\rho = 1.293[273/(273+t)](B/101.3) \quad (2)$$

式中: t 为空气实际温度, $^{\circ}\text{C}$; B 为实际大气压力, kPa .

以2021年11月7日和2021年2月27日、3月30日为例,分析8:00至15:59期间的实测数据,计算光伏复合墙体利用新风机向室内提供的热量,其中体积流量为 $180 \text{ m}^3/\text{h}$,空气间层温度 t_k 和建筑室内温度 t_n 取实际监测值,如图6所示.在空气间层中心位置设置1个温度传感器、建筑室内布置2个温度传感器,监测数据每隔1 min采集记录一次.将计算出的供热量瞬时值作为每一分钟的代表值,累加后求得新风机工作期间的供热量.实验期间新风机每日的工作时间分别为4 h、5 h和6 h,光伏复合墙体向室内提供的热量为1 1782 kJ、18 892 kJ和22 652 kJ,即3.2 kWh、5.2 kWh和6.3 kWh.

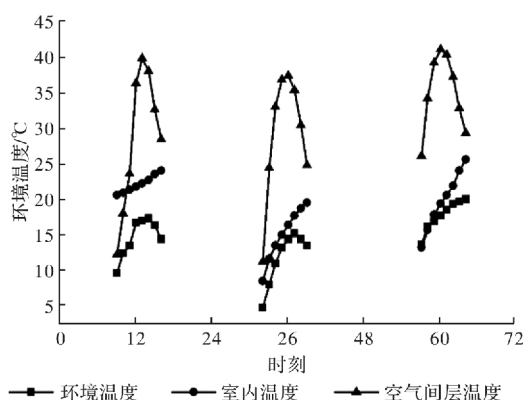


图6 实验期间光伏复合墙体和室内温度情况

Fig. 6 Photovoltaic wall and indoor temperature during the experiment

为量化光伏复合墙体的供热效率,计算单位面积的光伏复合墙体供热量与接收到的太阳辐照度之比^[19],按公式(3)计算,得到实验期间3天的光伏复合墙体供热效率变化趋势,如图7所示,光伏复合墙体的单位面积供热量随着太阳辐射强度的增加而升高,而日平均供热效率却呈下降趋势,依次为27%、23%和17%.可见,在太阳辐射条件较良好的2月和3月,应该通过增加新风机风量来加大光伏复合墙体供热量,进而提升其供热效率.

$$\eta = \frac{Q}{A \cdot I} \quad (3)$$

式中: Q 为光伏复合墙体的供热量, W ; A 为光伏复合墙体面积, m^2 ; I 为光伏复合墙体接收的太阳辐照度, W/m^2 .

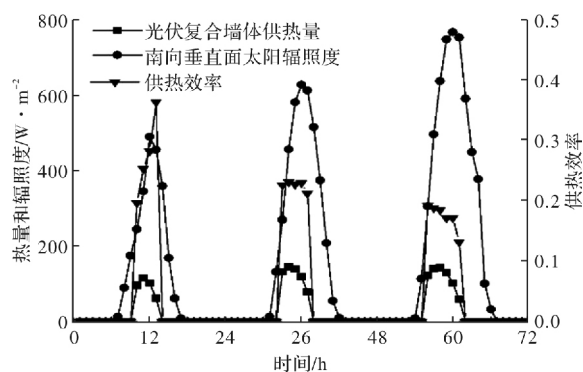


图7 实验期间光伏复合墙体供热效率

Fig. 7 Heating efficiency of photovoltaic wall during the experiment

5 结论

本文针对应用非透光的铜铟镓硒薄膜太阳能电池的光伏复合墙体的热利用模式开展研究,在沈阳地区搭建了光伏复合墙体对比实验装置,并将其实际应用于某办公建筑,取得了大量的现场实测数据,通过实验和模拟结合的方式,量化了光伏复合墙体在严寒地区的主被动热利用模式的供热能力,主要结论如下:

(1)沈阳地区冬季工况下的光伏复合墙体,光伏组件温度可达到 $45 \sim 55^{\circ}\text{C}$,空气间层温度可达到 $35 \sim 45^{\circ}\text{C}$,具有明显的保温隔热作用;

(2)室外环境平均温度为 3°C 条件下,基于对比实验平台,发现应用光伏复合墙体内循环运行模式的A建筑,相对于应用普通墙体的B建筑,可节约36%采暖能耗,内循环模式的供热量高于空腔密闭模式.通过模拟得到光伏复合墙体内循环运行模式在立冬、冬至和小寒3天的供热效率分别为17%、11%和7%,空气间层温度低于 30°C 不适宜使用内循环运行模式;

(3)提出了光伏复合墙体采用与新风机结合的主动式热利用方式,新风机启停受控于空气间层温度,启动温度设定为 30°C ,停止温度为 28°C ,实际应用于沈阳某办公建筑,光伏复合墙体面积 8.64 m^2 .实验发现光伏复合墙体的新风机在11月、2月和3月每日工作时间平均为5 h,供热效率约为22%,平均每日供热量为17.8 MJ,单位墙体面积的日均供热量为 $2.1 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

参考文献 References

- [1] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告2020[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(2): 1-6.
China Association of Building Energy Efficiency. Chi-

- na Building Energy Consumption Annual Report 2020 [J]. Journal of BEE, 2021, 49(2): 1-6.
- [2] 张楠, 杨柳, 罗智星. 建筑全生命周期碳足迹评价标准发展历程及趋势研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 569-577.
ZHANG Nan, YANG Liu, LUO Zhixing. Carbon emission assessment standards for building life cycle: research status, development and potential trends[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 569-577.
- [3] MEHDI Shahrestani, RUNMING Yao, ESSAH Emmanuel, et al. Experimental and numerical studies to assess the energy performance of naturally ventilated PV façade systems [J]. Solar Energy, 2017, 147: 37-51.
- [4] NURIA Martín-Chivelet, JUAN Carlos Gutiérrez, MIGUEL Alonso-Abella, et al. Building retrofit with photovoltaics: Construction and performance of a BIPV ventilated façade[J]. Energies, 2018, 11: 17-19.
- [5] PENG Jinqing, LU Lin, YANG Hongxing, et al. Comparative study of the thermal and power performances of a semi-transparent photovoltaic façade under different ventilation modes[J]. Applied Energy 2015, 138: 572-583.
- [6] PENG Jinqing, LU Lin, YANG Hongxing, et al. Investigation on the annual thermal performance of a photovoltaic wall mounted on a multi-layer façade[J]. Applied Energy, 2013, 112: 646-656.
- [7] SUZANA Domjan, LENART Petek, CIRIL Arkar, et al. Experimental study on energy efficiency of multi-functional BIPV glazed façade structure during heating season[J]. Energies 2020, 13: 2772.
- [8] 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.
- [9] 季杰, 何伟. 光伏墙体年发电性能及年得热动态预测[J]. 太阳能学报, 2001, 22(3): 311-316.
JI Jie, HE Wei. Dynamic prediction of annual power generation performance and annual heat gain of photovoltaic wall[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22(3): 311-316.
- [10] 徐小炜, 苏亚欣. 内置式 PV-Trombe 墙自然通风的数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(5): 23-28.
XU Xiaowei, SU Yaxin. Numerical analysis of natural ventilation in built-in photovoltaic-trombe wall [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(5): 23-28.
- [11] 马杨, 季杰, 孙炜, 等. 2 种 PV-Trombe 墙的光电光热性能对比研究 [J]. 太阳能学报, 2019, 40 (8): 2323-2328.
MA Yang, JI Jie, SUN Wei, et al. Comparative study on photoelectric and photothermal properties of two PV Trombe wall[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(8): 2323-2328.
- [12] YANG Siliang, CANNAVALE Alessandro, ALDO Di Carlo, et al. Performance assessment of BIPV/T double-skin façade for various climate zones in Australia: Effects on energy consumption[J]. Solar Energy, 2020, 199: 377-399.
- [13] VINEET Saini, ROHIT Tripathi, TIWARI G N, et al. Electrical and thermal energy assessment of series connected N partially covered photovoltaic thermal (PVT)-compound parabolic concentrator (CPC) collector for different solar cell materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 1611-1623.
- [14] 武威, 李辰琦, 高雪松, 等. 铜铟镓硒光伏建筑一体化创新设计研究——广东惠州潼湖科技小镇起步区光伏示范建筑[J]. 建筑学报, 2019(S2): 100-104.
WU Wei, LI Chenqi, GAO Xuesong, et al. Research on innovative design of CIGS-BIPV photovoltaic demonstration building in the starting area of tonghu science and technology town, Huizhou, Guangdong Province[J]. Architectural Journal, 2019 (S2): 100-104.
- [15] 范新宇, 李辰琦, 刘汉青, 等. 彩色 CIGS 光伏技术在海南三亚珊瑚宫商业中心的集成应用[J]. 建筑学报, 2019(S2): 105-108.
FAN Xinyu, LI Chenqi, LIU Hanqing, et al. Integrated application of color CIGS photovoltaic technology in the commercial center of coral palace in Sanya, Hainan[J]. Architectural Journal, 2019 (S2): 105-108.
- [16] 李辰琦, 曹也, 李志新. 严寒地区铜铟镓硒光伏墙体的热效能研究[J]. 建筑学报, 2019(S2): 72-75.
LI Chenqi, CAO Ye, LI Zhixin. Thermal efficiency study of CIGS photovoltaic wall in severe cold region [J]. Architectural Journal, 2019(S2): 72-75.
- [17] 何泉, 盛昂昂, 刘大龙. 围护结构保温设计中非稳态计算方法适用性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 561-567.
HE Quan, SHENG Angang, LIU Dalong. Study on the applicability of unsteady calculation method in thermal insulation design of enclosure structure in cold area [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(4): 561-567.
- [18] 苏亚欣, 徐小炜, 邓文义. 电池内置式 PV-Trombe 墙的热利用特性数值研究[J]. 太阳能学报, 2016, 10 (37): 2639-2646.
SU Yaxin, XU Xiaowei, DENG Yiwen. Numerical study on heat utilization characteristics of PV-Trombe wall with built-in battery [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 10(37): 2639-2646.