

# 自然通风模式及光伏透过率对双层皮幕墙冬季运行特性影响研究

朱 静<sup>1</sup>, 马明一<sup>1</sup>, 李 丕<sup>2</sup>, 程 征<sup>1</sup>, 徐春雯<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 青岛有住信息技术有限公司, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 通过搭建实验装置, 实测封闭模式、日间自然通风模式及中午自然通风模式下双层皮幕墙的运行参数, 研究自然通风模式及光伏透过率对双层皮幕墙冬季运行特性的影响。实验结果表明: 三种通风模式下内层皮温度、传导热流密度和辐射热流密度差异较小, 说明通风模式对室内得热量基本无影响; 日间部分时间段空腔顶部温度高于 20 ℃, 合理选择自然通风时间可同时为室内提供热量和新风; 且日间自然通风模式更有利于提高发电功率。光伏材料可改善双层皮幕墙的保温性能, 并大幅度降低冬季室内得热量。

**关键词:** 双层皮幕墙; 光伏; 自然通风; 传热特性; 实验研究

**中图分类号:** TU111. 4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2021)06-0939-08

## Study on effect of natural ventilation mode and photovoltaic transmittance on the performance of double-skin façade in winter

ZHU Jing<sup>1</sup>, MA Mingyi<sup>1</sup>, LI Pi<sup>2</sup>, CHENG Zheng<sup>1</sup>, XU Chunwen<sup>1</sup>

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Qingdao Youzhu Information Technology Co., Ltd., Qingdao 266580, China)

**Abstract:** The effect of natural ventilation mode and photovoltaic transmittance on the performance of Double-Skin Façade in winter is studied by setting up experimental equipment and measuring the operation parameters in closed mode, daytime natural ventilation mode and noon natural ventilation mode. The results show that there are little differences in inner skin temperature, conduction heat flux and radiation heat flux under three ventilation modes, indicating that the ventilation mode has no effect on the heat gain. As the temperature on the top of the cavity is higher than 20 ℃ in part of the day time, reasonable selection of natural ventilation time can provide indoor heat and fresh air at the same time, and the natural ventilation mode in the daytime is more conducive to increasing the power generation. Photovoltaic materials can improve the thermal insulation performance of double-skin Curtain Wall, and greatly reduce indoor heat gain in winter.

**Key words:** double-skin façade; photovoltaic; natural ventilation; heat-transfer character; experimental study

建筑围护结构得热及热损失是引起建筑制冷和供暖能耗的主要原因之一<sup>[1]</sup>。由内、外层玻璃及通风空腔组成的双层皮幕墙(Double-Skin Façade, DSF), 是一种具有节能潜力的被动式窗体<sup>[2-4]</sup>。光伏发电和建筑相结合而产生的建筑一体化光伏系统具有多种功能与优点, 将半透明光伏玻璃(Semi-transparent photovoltaic glass, STPV)与 DSF 耦合得到的半透明光伏双层皮幕墙(STPV-DSF)是建筑一体化光伏系统的重要形式<sup>[5]</sup>。在此基础上发

展而来的通风式 STPV-DSF, 能够有效促进热通道内空气的自然对流, 带走大量太阳辐射热, 有效降低室内负荷和空调系统能耗<sup>[6]</sup>。

国内外学者对通风式 STPV-DSF 的运行特性及节能效果进行了大量研究。王京南等<sup>[7]</sup>通过建立双层皮幕墙数学模型, 以长沙地区某外循环式双层皮幕墙为例, 进行夏季自然通风工况下双层皮幕墙的热工性能模拟。陈友明等<sup>[8]</sup>在已搭建的实验平台上, 对夏季自然通风和机械通风下 DSF 热通

收稿日期: 2021-06-20

修改稿日期: 2021-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008393); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE060)

第一作者: 朱 静(1978—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事城市燃气供应、建筑节能等方面的研究。E-mail: 272142629@qq.com

通信作者: 徐春雯(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事建筑通风技术、人体微环境个性化控制、绿色建筑幕墙技术等研究。E-mail: cxu@upc.edu.cn

道内的流场和温度场进行对比分析,得出自然通风效果较好的 4 种工况,并利用 Fluent 模拟和分析自然通风下最佳玻璃幕墙空腔间距及遮阳百叶位置.郭猛等<sup>[9]</sup>基于区域方法和气流网络模型,结合双层皮玻璃幕墙机械通风的特点,综合考虑了通风空腔内热压、风压和横向交叉气流的作用,建立了机械通风双层皮玻璃幕墙的模型.朱丽等<sup>[10]</sup>模拟在寒冷地区应用透光薄膜光伏幕墙,结果表明夏季通风口单位宽度带走约 72.92 W 热量.文献<sup>[11]</sup>将通风型 STPV-DSF、单层光伏窗以及封闭型 STPV-DSF 三种类型窗体进行比较,发现通风型 STPV-DSF 在降低光伏电池运行温度、减少夏季室内得热方面表现最优.

上述研究成果对光伏双层皮幕墙的优化设计起到一定的借鉴作用,但现有研究大多是针对夏季工况外循环通风展开<sup>[12]</sup>.冬季 STPV-DSF 运行中能否应用自然通风,目前尚不清楚.另外,少量文献对冬季 STPV-DSF 的节能效果进行了研究,如 Chow 等<sup>[13]</sup>发现光伏双层皮幕墙可降低冬天热耗散,同时吸收太阳能产生电能以减少建筑耗能;高峰等<sup>[14]</sup>针对寒冷地区冬季双层光伏窗办公建筑,利用 Energyplus 软件模拟研究了不同运行模式下双层光伏外窗对建筑节能特性的影响.但冬季 STPV-DSF 的运行效果是否优于 DSF,并未见报道.本文通过搭建实验装置,实测多种通风模式下 STPV-DSF 的运行参数,以研究自然通风对窗体传热特性的影响,明确冬季应用自然通风的可行性;并通过与 DSF 运行参数的对比,分析光伏材料对冬季双层皮幕墙运行特性及节能效果的影响.

## 1 研究方法

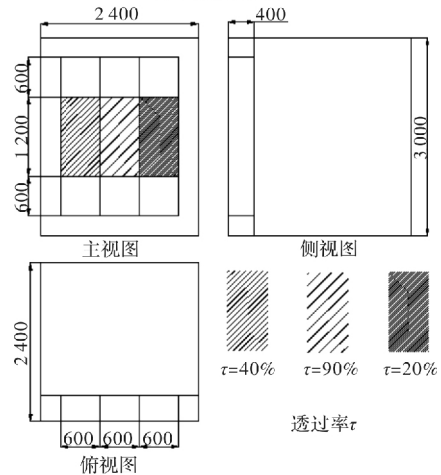
### 1.1 实验装置

通过建立实验房进行实际测试是探究窗体运行特性有效且直观的方式<sup>[15-16]</sup>.在山东省胶州市(东经 119°37',北纬 36°)搭建光伏双层皮幕墙全尺寸实验房.该地处北温带季风区域,属寒冷区,实验房尺寸如图 1 所示.南向窗体为三个尺寸相同的双层皮窗户,从西至东依次为:半透明光伏双层皮 STPV-DSF( $\tau=40\%$ )(外层皮透过率为  $\tau=40\%$ 的碲化镉光伏玻璃)、双层皮 DSF( $\tau=90\%$ )(外层皮为  $\tau=90\%$ 的普通 6 mm 玻璃)、半透明光伏双层皮 STPV-DSF( $\tau=20\%$ )(外层皮透过率为  $\tau=20\%$ 碲化镉光伏玻璃),内外层之间为 0.4 m 的空腔,内层皮均为普通双层 6 mm 中空玻璃.三个窗体之间相互独立,中间设绝热隔板.在内外层皮的上、下端设置尺寸相同的通风口(0.6 m×0.6 m).外层皮上、下通风口均可向上开启,开启角

度为 30°,内层皮上下通风口采用向内开启的平开窗.通过改变内外通风口的开闭组合,可实现不同的运行模式,本实验选取三种不同运行模式进行测试,具体见表 1.



(a) 实验房实景图



(b) 实验房三视图

图 1 实验房尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Size of the experimental room

表 1 运行模式设置

Tab. 1 Setting of running mode

编号	运行模式
case1	封闭模式
case2	日间自然通风模式(8:00~17:00 外层皮下窗打开,内层皮上窗打开,其余封闭)
case3	中午自然通风模式(12:00~13:00 外层皮下窗打开,内层皮上窗打开,其余封闭)

### 1.2 实验仪器及测点布置

实验测点布置见图 2.  $T$  为温度测量,采用顶峰科技 20100 热电阻,内、外层皮内表面沿中间轴线上各均匀布置 3 个热电阻,空腔内沿中心轴线布置 5 个热电阻,伸展在空腔内相应位置.  $C$  和  $R$  分别为通过窗体进入室内的传导热流密度和总辐射热流密度,采用传导热流传感器及辐射热流传感器测量,其中传导热流传感器贴附在各系统内层

皮中间位置处, 辐射热流传感器由三脚架支撑, 放置在靠近各内层皮中间位置附近. 辐射热流传感器感应面垂直向外, 白天测量透射到室内的太阳辐射热流密度, 夜间可测量室内向外的辐射热流损失.

另外, 热流及温度电信号均连接 Agilent

34970A 数据采集仪进行记录; PV 玻璃发电功率、电压、电流由 MPPT 记录并上传到电脑; 室外温湿度、风速气象条件采用 DAVIS Vantage Pro2 plus 06162 型气象站进行记录; 太阳总辐射及散射辐射强度采用 Delta OHM LP PYRA02 辐射强度计进行测量. 实验仪器规格及技术参数见表 2.

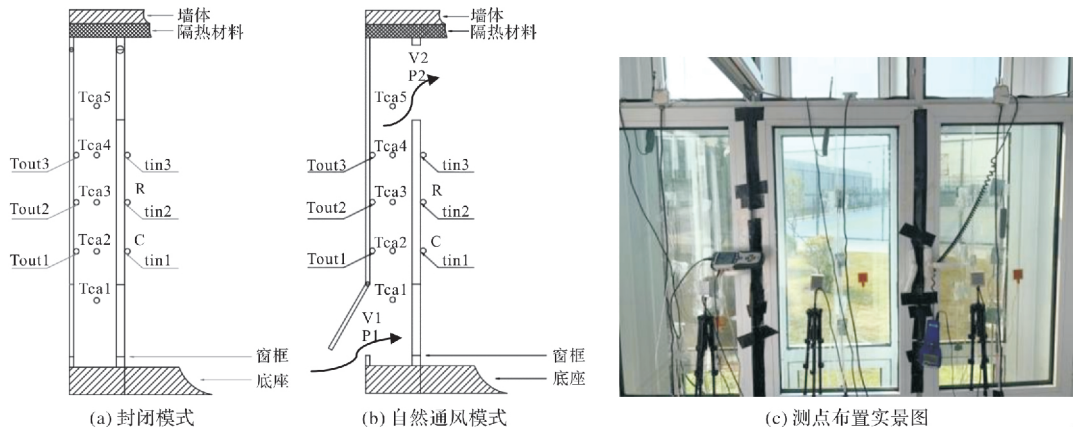


图 2 实验系统的测点布置  
Fig. 2 Distribution of measuring points

表 2 实验仪器规格及技术参数

Tab. 2 Specifications and technical parameters of experimental instruments

设备	型号	灵敏度或可测量数据	测量误差
气象站	DAVIS (Vantage Pro2 plus 06162)	温湿度灵敏度: 0.1 °C, 0.1 %RH; 量程: -20~70 °C, 0~100 %RH 风速灵敏度: 0.01 m/s; 量程: 0.1~45 m/s	温度: ±0.5 °C 风速: ±3 % RDG±0.1
辐射强度计	Delta LP PYRA02	灵敏度: 10 μV/(W/m²); 量程: 0~2 000 W/m²	
表面热电阻	PT 100	量程: 0~100 °C	±0.1 °C
传导热流计	CHS-30	灵敏度 1.11 μV/(W/m²);	<3 %
辐射热流计	TS-34C	灵敏度: 2.7 μV/(W/m²);	<3 %
数据采集仪	Agilent 34970A		温度: ±0.06 °C

1.3 评价指标

双层皮幕墙内部能量流动及传热过程极其复杂, 以 STPV-DSF 封闭模式为例: 外层皮接收到的太阳辐射一部分被玻璃层反射, 一部分被太阳能电池层吸收并产生余热, 其余部分进入空腔内; 空腔内空气与外层皮内表面及内层皮外表面通过自然对流进行换热; 内层皮得到热量并通过透射、对流及辐射作用将热量传递到室内.

本文主要的评价指标包括: 太阳得热系数 (Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)、内外层皮温度、辐射热流强度、传导热流强度、围护结构导热系数  $U$  值及发电功率.  $SHGC$  值及  $U$  值需要通过以下公式计算得到, 其他参数可由仪器直接测量.

$SHGC$  指通过围护结构成为室内得热量的太阳辐射占投射到围护结构上的太阳辐射的比例, 采用公式(1)进行计算.

$$SHGC \approx \frac{G_1 + G_2}{G_5}$$

(1)

式中:  $G_1$  为通过透光围护结构透射到室内的太阳辐射,  $W/m^2$ ;  $G_2$  为太阳辐射被透光围护结构吸收后再传热室内得热量, 包括围护结构通过长波红外辐射向室内辐射的热量  $G_3$  及围护结构与室内的传导热量  $G_4$  两部分,  $W/m^2$ ;  $G_5$  为窗体接收到的总的太阳辐射,  $W/m^2$ .

其中,  $G_1 + G_3$  由辐射热流传感器 TS-34C 测得,  $G_4$  由传导热流传感器 CHS-30 测得,  $G_5$  由辐射强度计 Delta OHM LP PYRA02 测得.

$U$  指围护结构的导热系数, 表示围护结构在单位面积上允许热量通过的能力.  $U$  值可在室内外都没有辐射的夜间测量得到, 表征建筑结构的保温能力. 根据测试条件, 按照公式(2)<sup>[17]</sup>近似计算.

$$U \approx \frac{G_6 + G_7}{\Delta T}$$

(2)

式中:  $G_6$  为夜间室内向外的辐射热损失,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $G_7$  为夜间室内向外的传导热损失,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\Delta T$  为夜间室内空气温度与室外空气温度之差,  $\text{K}$ .

其中,  $G_6$  由辐射热流传感器 TS-34C 测得,  $G_7$  由传导热流传感器 CHS-30 测得.

#### 1.4 实验测试

实验测试条件选择室外晴天微风时进行, 选取室外气象条件及太阳辐射强度接近的晴天工况进行比较. 确定 12 月 23 日、12 月 27 日及 1 月 1 日分别作为封闭模式、日间自然通风模式及中午自然通风模式的典型日, 三天内天气状况接近, 太阳辐射日波动曲线及室外空气温度日波动曲线基本重合, 减小了天气情况造成的实验误差, 图 3、图 4 分别为典型日太阳辐射日波动曲线及室内外空气温度日波动曲线. 实验过程中对室外气象条件、玻璃各表面温度、空腔及室内外温度、进入室内的平均辐射热量与平均传导热量等进行了测量记录.

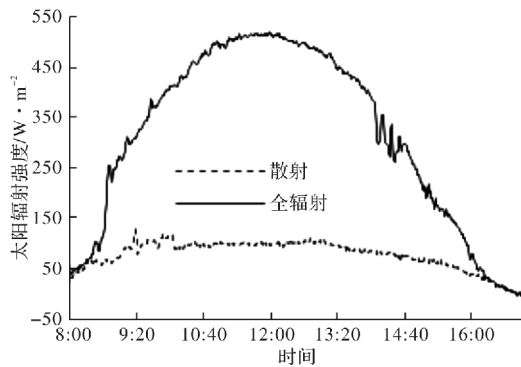


图 3 太阳辐射日波动曲线

Fig. 3 Diurnal fluctuation curve of solar radiation

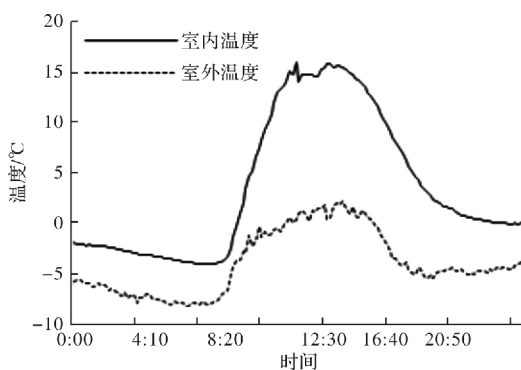


图 4 室内外空气温度波动曲线

Fig. 4 Fluctuation curve of indoor and outdoor air temperature

## 2 结果与讨论

### 2.1 通风模式对冬季 STPV-DSF (以 $\tau = 20\%$ 为例) 运行特性的影响

#### 2.1.1 STPV-DSF 空腔内温度分布

空腔内温度分布是决定冬季自然通风效果的重要因素. 自然通风状态下, 室外冷空气从底部

进入, 在空腔内被加热后从顶部进入室内. 若进入室内空气温度较高, 则有利于室内得热, 降低冬季室内热负荷.

图 5 为 STPV-DSF 在 case1 时空腔内温度分布图, 由图可知, 各测点温度及温度梯度均随太阳辐射强度增强而增大, 12:00 左右达到峰值, 空腔顶部温度约  $29.9^\circ\text{C}$ , 空腔顶部和底部最大温差为  $8.9^\circ\text{C}$ .

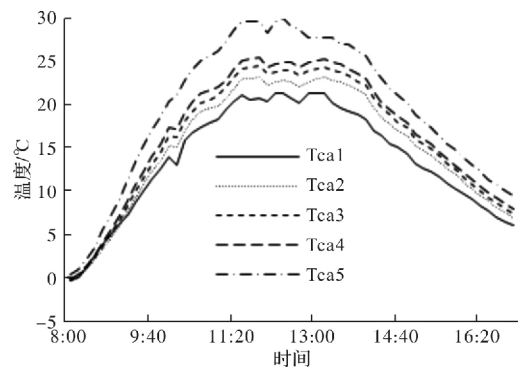


图 5 STPV-DSF case1 时空腔温度分布

Fig. 5 Cavity temperature of STPV-DSF in case1

图 6 为 STPV-DSF 在 case2 时空腔内温度分布, 由图可知, 最高温度  $26.0^\circ\text{C}$ , 较 case1 模式下降  $3.9^\circ\text{C}$ , 这是由于室外新风流经空腔时通过对流换热作用吸收热量, 降低了空腔温度. 若将冬季室内设计温度设定为  $20^\circ\text{C}$ , 10:40~14:00 时间段  $T_{ca5}$  高于  $20^\circ\text{C}$ , 可为室内提供高于供暖设计温度的新风, 降低室内热负荷; 其他时间段  $T_{ca5}$  低于  $20^\circ\text{C}$ , 由于冷风渗透可增加室内热负荷.

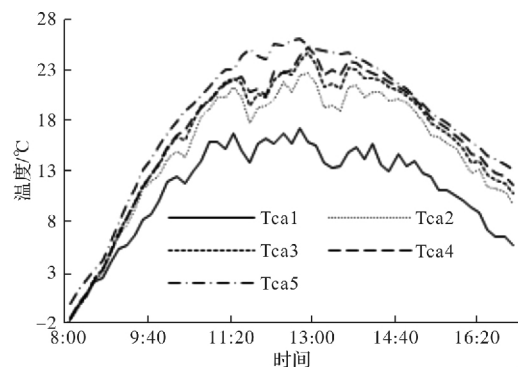


图 6 STPV-DSF case2 时空腔温度分布

Fig. 6 Cavity temperature of STPV-DSF in case2

图 7 为 STPV-DSF 在 case3 时空腔内温度分布. 由图 7 可见, 12:00 左右  $T_{ca5}$  达到峰值约  $29^\circ\text{C}$ , 此时打开外层皮下窗及内层皮上窗通风, 室外冷空气从底部进入, 被加热后在空腔内向上移动, 空腔上层热空气进入室内形成自然通风. 虽然开窗后由于冷空气的渗入造成空腔内温度整体降低, 但通风时间段进入室内的热空气温度  $T_{ca5}$  不低于  $20^\circ\text{C}$ , 因此在提供新风的同时有利于室内得热.

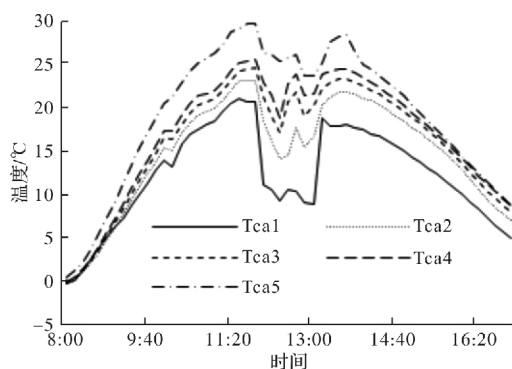


图7 STPV-DSF case3 时空腔温度分布

Fig. 7 Cavity temperature of DSF in case3

### 2.1.2 内外层皮表面温度分布

图8为STPV-DSF三种通风模式下的外层皮温度对比图。由图8中可以看出,不同通风模式下外层皮温度变化趋势一致,均随着室外辐射强度和温度的变化而变化,呈现先升高后降低的趋势。其中,case2温度分布整体低于case1和case3温度分布,这是由于流经空腔的新风与外层玻璃进行对流换热,带走热量使得外层皮温度降低;且随室外辐射强度和温度的升高,外层皮与室外空气的温差逐渐增大,对流换热作用增强,与case1外层皮温差逐渐增大,最大温差可达 $5.02^{\circ}\text{C}$ 。case3与case1相比,12点之前由于都处于封闭状态外层皮温度分布基本一致,12点开窗后温度略有下降,最大温差 $2.1^{\circ}\text{C}$ 左右。

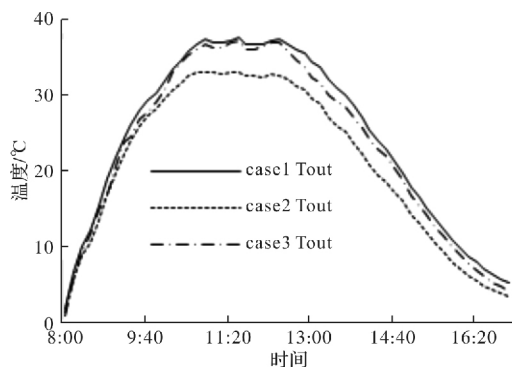


图8 STPV-DSF 三种通风模式下的外层皮温度

Fig. 8 Temperature of external curtain wall of STPV-DSF under three ventilation modes

图9为STPV-DSF三种通风模式下的内层皮温度对比图。由图可见,通风模式对内层皮温度的影响并不太大。其中,case3与case1相比,内层皮温度并没有明显变化;case2内层皮温度始终最低,但最大温差不超过 $2^{\circ}\text{C}$ 。分析原因,由于STPV-DSF外层皮光伏材料大量吸收太阳辐射能量,使得日间外层皮温度迅速升高,正午时分明显高于内层皮温度,进入空腔的冷空气与外层皮的对流换热作用更为强烈,因此对内层皮温度的

影响不大。由上可以得出,不同通风模式下STPV-DSF内表面与室内的对流换热量和辐射换热量相差不大。

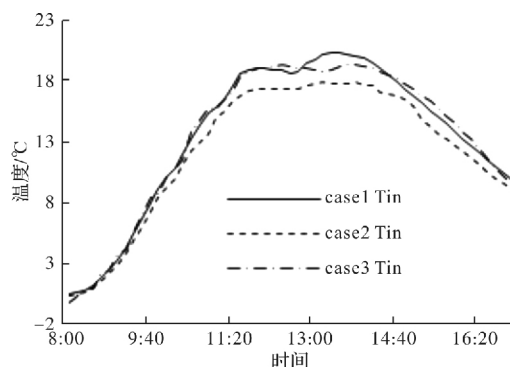


图9 STPV-DSF 三种通风模式下的内层皮温度

Fig. 9 Temperature of internal curtain wall of STPV-DSF under three ventilation modes

### 2.1.3 太阳得热系数(SHGC)

图10和图11为STPV-DSF三种通风模式下的传导热流密度和辐射热流密度,由图可见,传导热流密度和辐射热流密度均随着室外辐射强度和温度的变化而变化,呈现先升高后降低的趋势,10:00~12:00左右达到峰值。从数值来看,三种通风模式下的传导热流密度和辐射热流密度基本一致,无明显差异和规律。分析原因:(1)传导热流密度取决于内层皮与室内的温差,室内初始温度相同时,即取决于内层皮温度,由于三种通风模式下的内层皮温度差异不大,所以传导热流密度也差异很小;(2)辐射热流密度包括透过窗体进入室内的直射太阳辐射和内层皮向室内的辐射两部分,取决于室外辐射强度及内层皮温度,三种通风模式下的室外辐射强度及内层皮温度相近,因此其辐射热流密度数值相近。另外,有些时间段的辐射热流密度及传导热流密度出现负值,说明随室外辐射强度及室内外温度的变化,此时热量的传递方向由室内向室外。

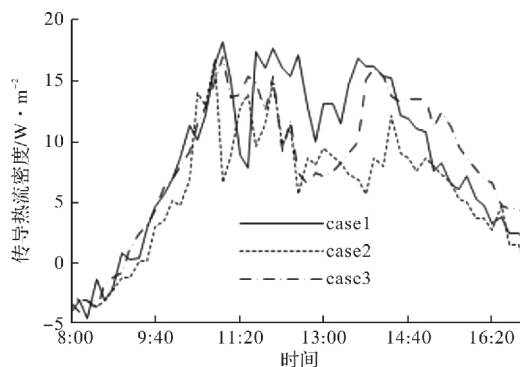


图10 STPV-DSF 三种通风模式下的传导热流密度

Fig. 10 Conduction heat flux of STPV-DSF under three ventilation modes

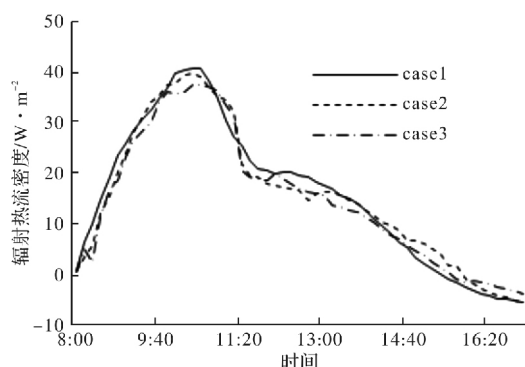


图11 STPV-DSF三种通风模式下的辐射热流密度

Fig. 11 Radiant heat flux of STPV-DSF under three ventilation modes

根据测得的传导热流密度和辐射热流密度的数值, 带入公式(1), 计算得到  $SHGC$  值平均为 0.091 左右, 运行模式对  $SHGC$  值无明显影响。

#### 2.1.4 发电功率

选取封闭模式及日间自然通风模式进行 STPV-DSF 冬季发电性能分析, 如图 12 所示。光伏组件从 7:00 左右开始出现发电功率, 10:00~11:30 发电功率达到最高水平, 11:30 后随太阳辐射强度减弱发电功率急剧下降, 16:00 左右发电结束。与前期测量的夏季发电性能相比, 冬季发电时间明显缩短, 发电功率明显下降, 这是由于寒冷地区冬季光照时间短, 太阳辐射强度弱, 能够激活光伏组件进行发电的时间更短。实验测得 STPV-DSF 封闭模式下日发电总量约  $24 \text{ W} \cdot \text{h}$ , 日间自然通风模式下日发电总量约  $54 \text{ W} \cdot \text{h}$ , 远低于该实验装置测得的同地区夏季日发电总量(约  $160 \text{ W} \cdot \text{h}$ )。通风模式对发电功率有明显影响, 日间自然通风模式下, 由于空气流通强化了换热, 外层皮温度低于封闭模式, 较低的运行温度更有利于提高发电功率。

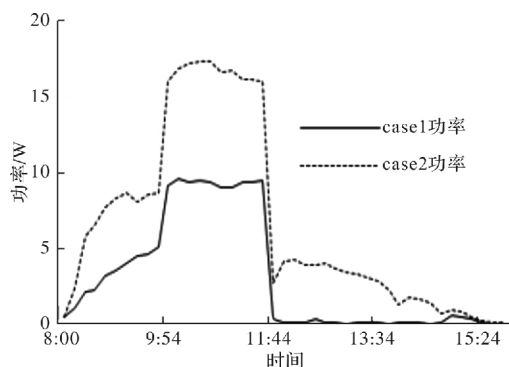


图12 STPV-DSF发电功率

Fig. 12 Power generation of STPV-DSF

### 2.2 冬季 STPV-DSF (以 $\tau=20\%$ 为例) 及 DSF 传热特性对比

夏季 STPV-DSF 可降低室内得热及空调冷负

荷, 较 DSF 具有更大的节能潜力。由于冬季室内得热有利于降低供暖热负荷, 因此冬季 STPV-DSF 并不一定为最优窗体。冬季影响室内热负荷的因素主要包括室内得热量、 $SHGC$  值、内层皮温度以及窗体的保温性, 以下以封闭模式为例对两种窗体的性能进行对比。

#### 2.2.1 热流密度及 $SHGC$ 值对比

图 13 为一日内 STPV-DSF 及 DSF 热流密度对比图。

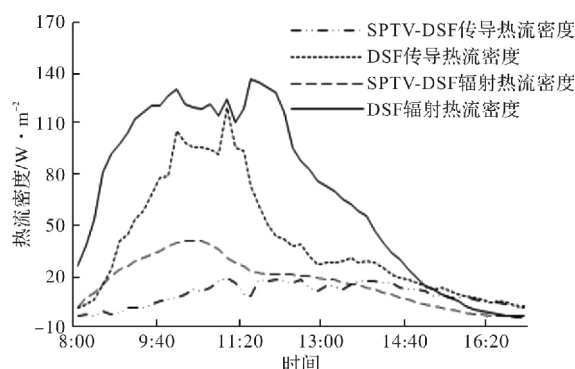


图13 case1时 STPV-DSF 及 DSF 热流密度

Fig. 13 Heat flux density of STPV-DSF and DSF in case1

由图可知, DSF 辐射热流密度峰值及传导热流密度峰值分别为  $133 \text{ W/m}^2$ 、 $120 \text{ W/m}^2$ ; STPV-DSF 热流密度值大幅度下降, 辐射热流密度峰值为  $39 \text{ W/m}^2$ , 较 DSF 降低 71%, 传导热流密度峰值为  $18 \text{ W/m}^2$ , 较 DSF 降低 85%。这是因为在相同的室外太阳辐射下, STPV-DSF 由于外层光伏玻璃大量吸收太阳辐射能量, 致使透射进入的太阳辐射热流密度大幅度降低, 而到达内层皮的辐射热流密度降低, 致使内层皮温度降低, 传导热流密度也相应减少。根据测得的 DSF 传导热流密度和辐射热流密度的数值, 计算得到其  $SHGC$  值平均为 0.396。已测得 STPV-DSF 的  $SHGC$  值平均为 0.091, 因此较 DSF 降低约 77%。

#### 2.2.2 内外层皮温度对比

图 14 为 STPV-DSF 及 DSF 内外层皮温度对比图。由图可知, STPV-DSF 外层皮温度明显高于 DSF 外层皮温度, 这是因为 STPV-DSF 外层皮光伏材料大量吸收太阳辐射能量, 部分转化为电能, 部分被自身吸收使其温度升高, 而 DSF 外层皮为低吸收率、高透过率的普通玻璃, 二者最大温差可达  $15^\circ\text{C}$ 。而 STPV-DSF 内层皮温度低于 DSF 内层皮温度, DSF 内层皮最高温度为  $24.6^\circ\text{C}$ , STPV-DSF 内层皮最高温度降低  $3.92^\circ\text{C}$ 。可见由于 STPV-DSF 透射进入的太阳辐射热流密度大幅度降低, 致使内层皮温度降幅明显。内层皮温度决定了内层皮与室内的对流换热量和辐射换热量, 因此 DSF 更有利于室内得热。

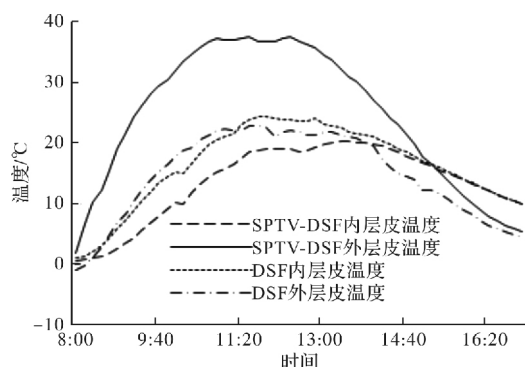


图 14 case1 时两种窗体的玻璃表面温度分布

Fig. 14 Temperature distribution on glass surface of STPV-DSF and DSF in case1

### 2.2.3 导热系数( $U$ )对比

$U$  值测量在夜间无太阳辐射时进行,通过测量夜间的室内外温度、室内向外的辐射热损失及传热损失,由公式(2)计算得 STPV-DSF 及 DSF 两种窗体的平均  $U$  值分别为  $0.74 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $0.81 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,说明窗体透过率对  $U$  值有一定影响,但影响较小。STPV-DSF 的  $U$  值略低,这是由于夜间室内温度高于室外温度,室内向室外辐射热量,透过率较低的光伏外层皮阻碍了夜间室内向室外的辐射换热过程,保温效果更优。两种窗体的  $U$  值都远低于普通中空玻璃的传热系数约  $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,说明双层皮结构冬季具有更好的保温效果。

## 3 结论

(1)自然通风对外层皮温度影响较大,日间自然通风模式外层皮温度最低,与封闭模式最大温差可达  $5.02^\circ\text{C}$ 。三种通风模式下内层皮温度、传热流密度和辐射热流密度差异较小,说明通风模式对室内得热量基本无影响。日间自然通风模式下空腔最高温度较封闭模式下降  $3.9^\circ\text{C}$ ,且  $10:40\sim 14:00$  时间段  $T_{\text{ca5}}$  高于  $20^\circ\text{C}$ ;中午自然通风时空腔最高温度基本不变,且通风时间段  $T_{\text{ca5}}$  均高于  $20^\circ\text{C}$ 。因此,合理选择自然通风时间可同时为室内提供热量和新风。另外,日间自然通风模式由于外层皮温度降低更有利于提高发电功率。综上,冬季太阳辐射强度较高的正午时间利用自然通风可行,有利于提高 STPV-DSF 的节能效果。

(2)光伏材料可改善双层皮幕墙的保温性能,STPV-DSF 较 DSF 的导热系数降低;但冬季室内得热量大幅度降低,封闭模式下 STPV-DSF 较 DSF 的辐射热流密度峰值降低  $71\%$ ,传热流密度峰值降低  $85\%$ , $SHGC$  值降低  $77\%$ ,内层皮最高温度降低  $3.92^\circ\text{C}$ 。由于 STPV-DSF 夏季具有较显著的节能及发电功能,因此需结合全年节能总

效果综合考虑。

## 参考文献 References

- [1] 杜妮妮. 双层玻璃幕墙的不同结构对房间热环境的影响[D]. 西安:长安大学,2007.  
DU Nini. The impact of different structure of double-skin glass facades to room heat environment [D]. Xi'an:Chang'an University,2007.
- [2] 郭晓琴,龙一飞,何微微,等. 双层皮玻璃幕墙研究新进展介绍[J]. 门窗,2019(5):20-21.  
GUO Xiaoqin, LONG Yifei, HE Weiwei, et al. New Development of double-skin Glass Curtain Wall [J]. Doors & Windows, 2019(5):20-21.
- [3] NAN Tuba, BASARAN Taksin. Experimental and numerical investigation of forced convection in a double skin façade by using nodal network approach for Istanbul [J]. Solar Energy, 2019(183):441-452.
- [4] 陈海辉,熊建明. 热通道玻璃幕墙的特性研究及应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2002,30(12):50-73.  
CHEN Haihui, XIONG Jianming. Feature and application of glazing curtain wall with thermal channel [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2002, 30(12):50-73.
- [5] 彭晋卿,吕琳,杨洪兴. 太阳能光伏建筑一体化技术研究[J]. 建设科技,2012(21):54-59.  
PENG Jinjing, LÜ Lin, YANG Hongxing. Technical research of solar building-integrated photovoltaics [J]. Construction Science and Technology, 2012 (21): 54-59.
- [6] PENG J Q, LU L, YANG H X, 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.
- [7] 王京南,陈友明,王衍金,等. 双层皮幕墙自然通风模型与实验验证[J]. 太阳能学报,2018,39(6):1543-1551.  
WANG Jingnan, CHEN Youming, WANG Yanjin, et al. Natural ventilation model and experiment verification of double skin curtain wall [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(6):1543-1551.
- [8] 陈友明,高丽慧,王衍金,等. 夏热冬冷地区 VDSF 自然通风实验研究与优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):120-125.  
CHEN Youming, GAO Lihui, WANG Yanjin, et al. Experimental research and optimization of natural ventilation for VDSF in zones hot in summer and cold in winter [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(5):120-125.
- [9] 郭猛,陈友明,陈桦,等. 夏热冬冷地区机械通风双层皮玻璃幕墙动态模拟及实验研究[J]. 建筑科学,

- 2018,34(10):82-90.
- GUO Meng, CHEN Youming, CHEN Hua, et al. Dynamic simulation and experimental study of mechanical ventilation double skin facade in hot-summer and cold-winter areas [J]. Building Science, 2018, 34 (10): 82-90.
- [10] 朱丽, 霍玉佼, 孙勇, 等. 天津地区双层透光薄膜光伏幕墙热工性能研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 1026-1031.
- ZHU Li, HUO Yujiao, SUN Yong, et al. Study of thermal performance of double layers translucent thin film PV curtain wall in tianjin[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(4): 1026-1031.
- [11] 裴刚, 季杰, 蒋爱国, 等. 光伏双层窗的综合性能研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 441-444.
- PEI Gang, JI Jie, JIANG Aiguo, et al. Performance analysis of PV double-glazed window[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2009, 30 (4): 441-444.
- [12] PENG J Q, CURCIJA D C, LU L, et al. Numerical investigation of the energy saving potential of a semi-transparent photovoltaic double-skin facade in a cool-summer Mediterranean climate[J]. Applied Energy, 2016, 165: 345-356.
- [13] CHOW T T, LIN Z, HE W, et al. Use of ventilated solar screen window in warm climate[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(16): 1910-1918.
- [14] 高峰, 程远达, 贾捷, 等. 寒冷地区冬季光伏双层窗的节能特性研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(4): 24-32.
- GAO Feng, CHENG Yuanda, JIA Jie, et al. Study on the energy-saving performance of double-paned photovoltaic window in winter in cold regions[J]. Building Science, 2020, 36(4): 24-32.
- [15] LUO Y, ZHANG L, LIU Z, et al. Experimental study and performance evaluation of a PV-blind embedded double skin facade in winter season[J]. Energy, 2018, 165: 326-342.
- [16] PREET S, SHARMA M K, MATHUR J, et al. Performance evaluation of photovoltaic double-skin facade with forced ventilation in the composite climate[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101733.
- [17] WANG M, PENG J Q, LI N P, et al. Comparison of energy performance between PV double skin facades and PV insulating glass units[J]. Applied Energy, 2017, 194: 148-160.
- (编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 926 页)

- [9] 胡德星. 蒸发冷却冷水机组和常规冷水机组联合供冷方式的应用[J]. 暖通空调, 2016, 46(7): 30-32.
- HU Dexing. Application of combined system of evaporative cooling water chiller and conventional water chiller[J]. Journal of HV&AC, 2016, 46(7): 30-32.
- [10] 李飞. 辐射供冷供热与风机盘管加新风系统在工程中的联合应用[J]. 暖通空调, 2016, 46(7): 23-25
- LI Fei. Application of radiant cooling and heating combined with fan coil and outdoor air system to an engineering project[J]. Journal of HV&AC, 2016, 46 (7): 23-25
- [11] 殷平. “干盘管”经济性分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(11): 45-49.
- YIN Ping. Economic analysis of "dry coil"[J]. Journal of HV&AC, 2008, 38(11): 45-49.
- [12] 沈列丞, 龙惟定. 干盘管系统设计中风机盘管冷量修正法的研究[J]. 制冷与空调, 2006, 6(2): 18-21.
- SHENG Liecheng, LONG Weiding. Reserch on the cooling capacity correction method of fan coil for dry coil system[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2006, 6(2): 18-21.
- [13] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 71-89.
- Meteorological Data Room of National Meteorological Information Center, Department of Building Science of Tsinghua University. Special meteorological data set for China's building thermal environment analysis[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 71-89.
- [14] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 1601-1606.
- LU Yaoqing. Practical handbook of heating and air conditioning design[M]. 2nd. ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 1601-1606.
- [15] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB50736-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 59-60.
- China Academy of Building Research. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB50736-2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 59-60.
- (编辑 吴海西 沈 波)