

相变玻璃围护结构蓄能特性及对室内热环境影响研究

李 栋, 胡宛玉, 张成俊, 刘昌宇, 杨瑞桐

(东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 玻璃围护结构蓄能特性直接影响其热工性能, 其与材料本身有关。传统玻璃围护结构热惰性小、传热系数大特点, 造成建筑能耗较大, 并对室内热环境造成一定的影响。以玻璃围护结构蓄能特性调控为研究目标, 建立了填充多种材料玻璃围护结构建筑热分析模型, 分析了玻璃腔内置空气、二氧化硅气凝胶、相变材料对玻璃围护结构蓄能特性的影响, 并研究了其对室内热环境的影响。研究发现: 玻璃围护结构添加相变材料时蓄能和热惰性更强; 同填充二氧化硅气凝胶、空气相比, 相同室内外环境条件下玻璃围护结构添加相变材料时内表面温度分别降低 1.50 K 和 3.54 K, 内表面峰值热流分别降低 $1.26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 玻璃围护结构添加相变材料能有效改善室内温度分布均匀性和室内热舒适性。

关键词: 玻璃围护结构; 相变材料; 二氧化硅气凝胶; 室内热环境; 蓄能特性

中图分类号: TU832; TK519

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0934-05

Energy storage characteristics of phase change glass envelope and its effect on indoor thermal environment

LI Dong, HU Wanyu, ZHANG Chengjun, LIU Changyu, YANG Ruitong

(School of Civil and Architecture Engineering, Northeast Petroleum University, Heilongjiang Daqing 163318)

Abstract: The thermal performance of glass envelope is directly affected by its energy storage characteristics, which depends on the properties of materials. Traditional glass envelope has the characteristics of small thermal inertia and large heat transfer coefficient, which leads to large building energy consumption and poor indoor thermal environment. Taking the regulation of energy storage characteristics as the research objective, a thermal analysis model of glass envelope building is established, and the influence of different materials including air, silica aerogel and phase change material on energy storage characteristics and indoor thermal environment is analyzed. The results show that the energy storage and thermal inertia are stronger when phase change materials are added to the glass envelope. Compared with glass envelope filled with silica aerogel and air, when phase change materials are added, the inner surface temperature decreases by 1.50 K and 3.54 K, respectively, and the peak heat flux on the inner surface decreases by $1.26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and $2.62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, showing that glass envelope with phase change materials can effectively improve indoor temperature distribution uniformity and indoor thermal comfort.

Key words: glass envelope; phase change material; silica aerogel; indoor thermal environment; energy storage characteristics

建筑能耗在社会总能耗中占比超过 30% 且持续增加^[1], 发展低能耗建筑是降低建筑能耗、实现建筑领域碳中和的重要手段。建筑围护结构是影响建筑能耗的重要部位, 也是影响发展低能耗建筑的重要环节。玻璃围护结构透光性强、传热系数大, 是改善建筑围护结构的重要关注部位^[2]。

在玻璃围护结构内填充相变材料及二氧化硅气凝胶^[3-6], 可提升其隔热及蓄热性能^[7], 降低建筑能耗并延长其使用寿命^[8]。部分学者研究了填充

保温材料玻璃围护结构传热和蓄热特性。Moretti^[9]等、Buratti^[10]等制备颗粒状气凝胶并添加到双层玻璃窗, 发现其比与传统双层玻璃窗保温更好。部分学者研究了适用于玻璃围护结构的相变材料^[11], 并在玻璃围护结构填充, 通过相变吸放热实现太阳能光热利用^[12-13]。作者团队^[14-15]前期发现含相变材料玻璃结构存在一定的太阳能蓄热效果, 可使外界影响室内传热峰值减小和延迟。现有研究成果表明玻璃围护结构填充相变材料后,

收稿日期: 2021-04-25

修改稿日期: 2021-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(52078110); 住房和城乡建设部科学技术项目计划(2020-K-186, 2020-K-162)

第一作者: 李 栋(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事建筑节能研究。E-mail: lidonglvyan@126.com

其热惰性显著增大, 可降低建筑能耗。然而, 有关含相变材料玻璃围护结构蓄能过程对建筑内部热环境影响研究较少。

本文以玻璃围护结构蓄能特性调控为研究目标, 建立了填充多种材料玻璃围护结构建筑热分析模型, 分析了填充空气、二氧化硅气凝胶、相变材料等对玻璃围护结构蓄能特性的影响, 并进一步研究了其对室内热环境的影响。

1 数理模型

1.1 物理模型

如图1, 研究对象房间尺寸为 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$, 玻璃厚度为 4 mm , 填充材料厚度为 20 mm , 房间内部监测点布置如图1(b)。填充材料玻璃围护结构主要分为三部分, 内外层均为玻璃, 中间层分别填充相变材料、空气以及二氧化硅气凝胶。太阳辐射通过玻璃围护结构时分为三部分, 一是外层玻璃反射, 二是填充材料、玻璃所吸收, 三是穿过玻璃围护结构转换成室内得热量。室外侧玻璃外表面与外部环境、室内侧玻璃内表面与室内空间均发生对流与辐射的耦合换热。

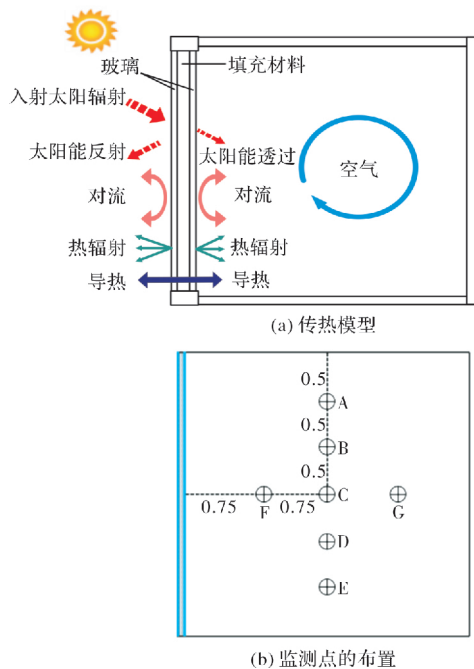


图1 传热模型及监测点位置

Fig. 1 Heat transfer model and monitoring points
为简化计算, 作如下假设:

- (1) 空气、二氧化硅气凝胶、相变材料和玻璃均为各向同性材料;
- (2) 忽略相变过程体积膨胀及散射效应;
- (3) 除相变潜热外, 文中涉及不同熔点相变材料物性参数均相等。

1.2 数学模型

玻璃围护结构中玻璃、二氧化硅气凝胶和空气区域传热方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_g}{\rho_g c_{p,g}} \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_g}{\rho_g c_{p,g}} \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + S^T = \frac{\partial T_g}{\partial \tau} \quad (1)$$

其中: τ 为时间, s; T_g 为温度, K; ρ_g , k_g 和 $C_{p,g}$ 分别为玻璃、二氧化硅气凝胶和空气的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 和比热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), S^T 为辐射源, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

相变材料区域为

$$\rho_p \frac{\partial H}{\partial \tau} = k_p \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_p \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + S^T \quad (2)$$

其中: H 为相变材料比焓, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; ρ_p 和 k_p 分别为相变材料的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

$$H = \int_{T_{\text{ref}}}^T c dT + \beta Q_L \quad (3)$$

$$\beta = 0, \quad T < T_s \quad (4)$$

$$\beta = \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, \quad T_s \leq T \leq T_l \quad (5)$$

$$\beta = 1, \quad T > T_l \quad (6)$$

其中, T_{ref} 为参考温度, K; T_s 与 T_l 分别为相变材料固相和液相温度, K; c 为相变材料比热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; Q_L 为相变材料相变过程的潜热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; β 为计算区域液相率。

源项 S^T 传热方程为

$$S^T = \int_{\Omega_i=4\pi} I(s, \vec{s}_i) \vec{\Omega} d\Omega_i \quad (7)$$

辐射传热方程为

$$\frac{dI(s, \vec{s})}{ds} = -(\alpha + \sigma) I(s, \vec{s}) + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{4\pi} I(s, \vec{s}') d\vec{s}' + \alpha I_b(s, \vec{s}') \quad (8)$$

其中: $I(s, \vec{s})$ 为空间位置和方向的太阳辐射强度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; α 和 σ 分别介质吸收系数, m^{-1} 和厚度, m。

玻璃围护结构最外层边界条件如下。

$$-k_g \frac{\partial T}{\partial x} = q_{\text{rad}} + h_{\text{out}} (T_{\text{out}} - T_{a,\text{out}}) \quad (9)$$

其中: q_{rad} 为外玻璃层外表面与外界环境辐射换热, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, h_{out} 、 T_{out} 和 $T_{a,\text{out}}$ 分别为外层玻璃外表面对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; T_{out} 外层玻璃外表面温度, K 和 $T_{a,\text{out}}$ 环境温度, K。

与外界环境辐射换热 q_{rad} 计算如下:

$$q_{\text{rad}} = q_{\text{rad},\text{air}} + q_{\text{rad},\text{sky}} + q_{\text{rad},\text{ground}} \quad (10)$$

其中, $q_{\text{rad},\text{air}}$ 、 $q_{\text{rad},\text{sky}}$ 和 $q_{\text{rad},\text{ground}}$ 分别为玻璃结构与大气、天空和地面的辐射换热量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

内层玻璃内表面边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{\text{in}} = h_{\text{in}} (T_{\text{in}} - T_{\text{a,in}}) \quad (11)$$

其中, h_{in} 、 T_{in} 和 $T_{\text{a,in}}$ 分别为内层玻璃内表面对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 、温度和室内温度, K.

中间材料层和内层玻璃交界处边界条件:

$$-k_g \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{g=I} = -k_l \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{g=I} \quad (12)$$

$$T_g = T_l \quad (13)$$

其中, T_g 和 T_l 分别为外侧玻璃内表面温度和中间材料层外表面温度, K.

1.3 模型求解方法

基于有限体积法求解本文模型, 其压力-速度耦合方程选用 SIMPLE 算法, 辐射传热采用 DO 模型. 压力采用 PRESTO! 离散求解, 动量、能量及 DO 模型方程的离散格式分别为二阶迎风、一阶迎风、一阶迎风.

采用三组网格数据验证其独立性: 第一组玻璃填充层网格尺寸为 $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 室内空间网格尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 网格数为 8 000; 第二组玻璃填充层网格尺寸为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 室内空间网格尺寸为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 网格数为 20 000; 第三组玻璃填充层网格尺寸为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 室内空间网格采用内疏外密划分方式, 网格数为 12 000. 图 2 为网格独立性验证结果, 经过分析最终网格数选取 12 000, 其网格形式如图 3.

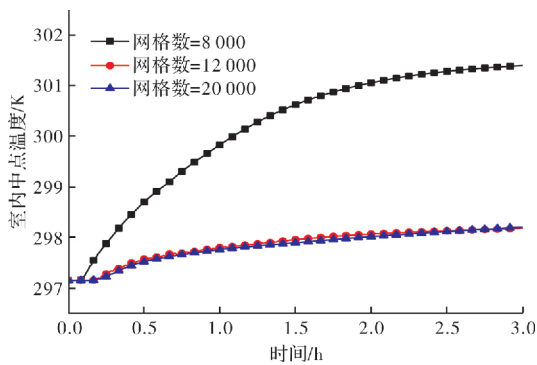


图2 网格验证结果

Fig. 2 Grid validation results

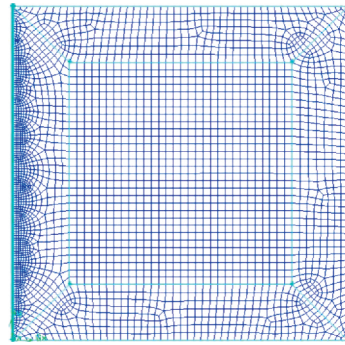


图3 网格形式

Fig. 3 Grid form

采用文献[13]中的算例验证本文模型, 图 4 为验证结果对比, 本文模拟值与文献平均相对偏差为 6.03%, 表明本文模型的可靠性.

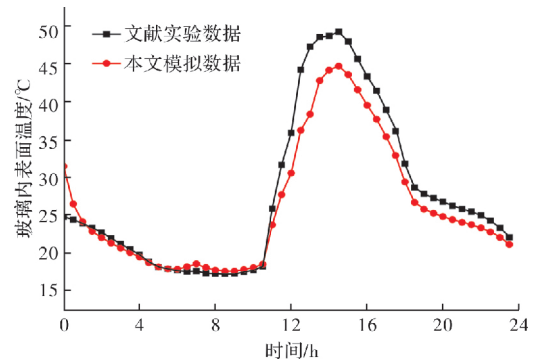


图4 模型验证结果

Fig. 4 Model validation results

2 分析与讨论

计算条件: 春季室内、室外温度分别为 18°C 、 20°C , 太阳辐照为 $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 室内外对流换热系数分别为 $8.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. 夏季室内、室外温度分别为 26°C 、 38°C , 太阳辐照为 $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 室内外对流换热系数分别为 $8.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. 计算初始温度均为 20°C . 春季所用的相变材料熔点为 $20 \sim 22^\circ\text{C}$, 夏季所用相变材料熔点为 $27 \sim 29^\circ\text{C}$, 相变材料、二氧化硅气凝胶、空气和玻璃的物性参数如表 1.

表1 材料光热物性参数

Table. 1 Parameters of materials

材料	密度 $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	导热系数 $/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	比热 $/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	折射率	吸收系数 $/\text{m}^{-1}$	潜热 $/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
玻璃	2 700	0.96	840	1.5	12	—
相变材料	885(固)	0.2(固)	2 320(固)	1.3	80(固)	180(春)
	880(液)	0.21(液)	2 240(液)		20(液)	205(夏)
二氧化硅气凝胶	100	0.018	1 500	1.01	10	—
空气	1.255	0.024 2	1 006.4	1	0	—

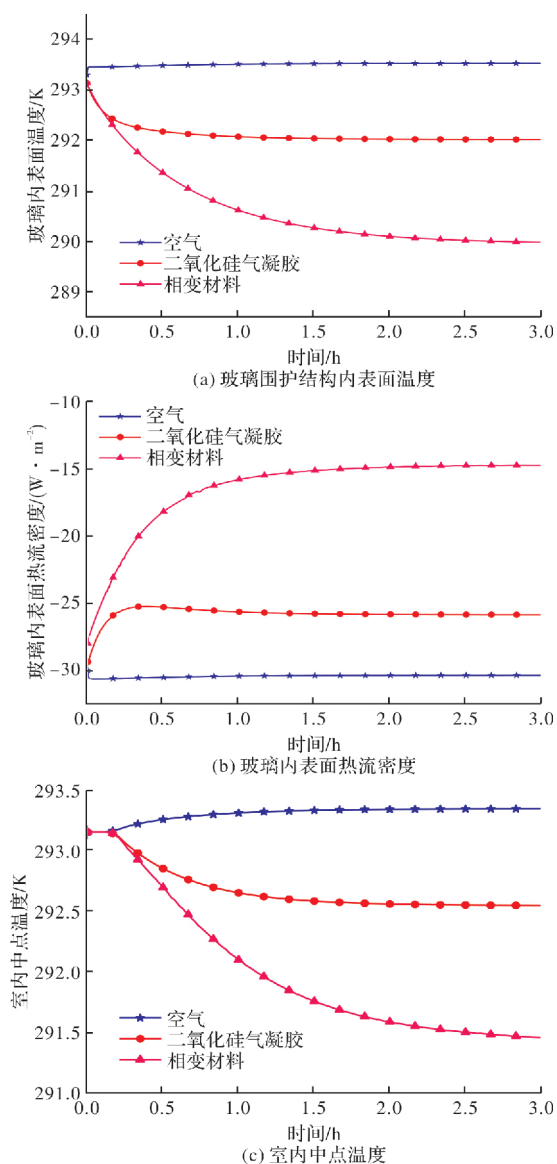


图5 春季填充不同材料玻璃围护结构性能曲线

Fig. 5 Performance of glass envelope filled with different materials in spring

由图 5(a)可知, 同填充空气、二氧化硅气凝胶相比, 玻璃围护结构添加相变材料后, 其内表面温度分别降低 1.50 K 和 3.54 K; 中空玻璃围护结构内表面温度在 0.5 h 内达到稳定, 气凝胶玻璃围护结构、相变玻璃围护结构分别经历 1 h、2.8 h 达到稳定, 相变玻璃围护结构内表面温度达到稳定时间是气凝胶、中空玻璃围护结构的 2.8、5.6 倍, 说明其热惰性明显强于其他两类玻璃围护结构. 原因在于相变玻璃围护结构内相变材料吸收太阳能, 减少了辐射能直接进入室内的机会.

由图 5(b)可知, 同填充空气、二氧化硅气凝胶相比, 玻璃围护结构添加相变材料后其内表面峰值热流的绝对值分别降低 1.26 $W \cdot m^{-2}$ 和 2.62 $W \cdot m^{-2}$. 同时由图可见, 相变材料虽然吸

收太阳能熔化但保持其在一定的温度范围波动, 由于室内侧表面温度保持 291.15 K 造成相变玻璃围护结构内表温度降低而导致其热流密度绝对值减小, 从而造成如图 5(c)室内中点(高度为 1.5 m, 且与外窗水平距离为 1.5 m)的温度分布. 由此可见, 虽然太阳辐照相变玻璃围护结构, 但室内空气温度仍然在降低, 从而说明玻璃围护结构填充相变材料显著提高其热惰性, 并有效改善室内侧温度调控力度.

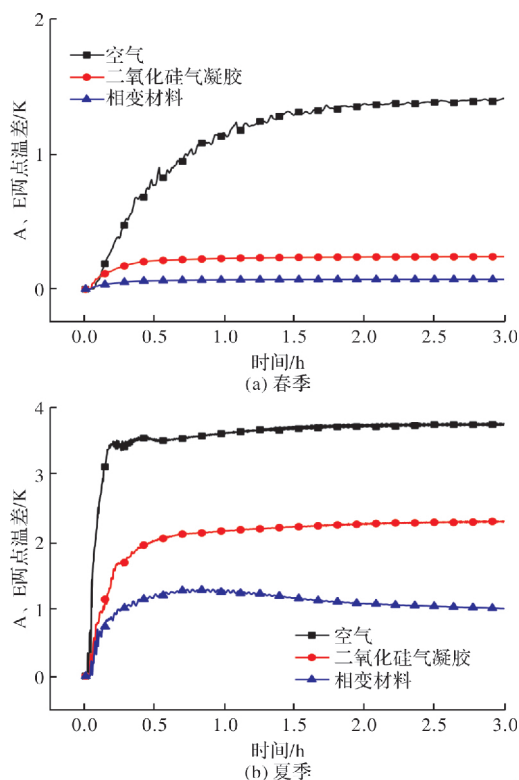
图6 填充不同材料的玻璃围护结构室内 A、E 两点的温差
Fig. 6 Temperature difference between A and E points of indoor when glass envelope filled with different materials

图 6 为 A、E 两个监测点的温差, 其用来评估室内的温度均匀性, 如图可知玻璃围护结构填充相变材料后, 其室内温度均匀性明显强于其他两类玻璃围护结构, 在夏季则更加显著, 其室内温度分布均匀性比中空玻璃围护结构和气凝胶玻璃围护结构分别提升了 73% 和 57%.

3 结论

本文建立了双层玻璃围护结构建筑热分析模型, 研究空气、二氧化硅气凝胶、相变材料等填充物对玻璃围护结构蓄能特性的影响, 并进一步分析其对室内热环境的影响, 得到如下结论:

(1) 玻璃围护结构添加相变材料后其内表面温度达到稳定的时间明显增加, 在相同条件下相变

玻璃围护结构内表面温度达到稳定时间分别为气凝胶玻璃围护结构、中空玻璃围护结构的 2.8 倍和 5.6 倍,说明相变玻璃围护结构蓄能效果增强;

(2) 玻璃围护结构填充相变材料后,其内表面温度和热流密度均明显降低,在相同条件下,同二氧化硅气凝胶玻璃围护结构、中空玻璃围护结构相比其内表面温度分别降低 1.50 K 和 3.54 K,内表面峰值热流分别降低 $1.26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;

(3) 玻璃围护结构填充相变材料后,由于其蓄能效果和热惰性能提升,导致其室内温度分布更加均匀;同二氧化硅气凝胶玻璃围护结构、中空玻璃围护结构相比,其温度分布均匀性分别升高 73% 和 57%,使其室内热舒适程度明显改善。

参考文献 References

- [1] 王登甲,吴航,刘艳峰,等.孤立岛礁自持化光伏空调建筑能量平衡优化匹配研究[J].太阳能学报,2020(7):105-112.
WANG Dengjia, WU Hang, LIU Yanfeng, et al. Research on optimal matching of energy balance of self-sustained PV air-conditioning building in isolated island[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020(7): 105-112.
- [2] GONZÁLEZ-JULIÁN E, XAMÁN J, MORAGA NO, et al. Annual thermal evaluation of a double pane window using glazing available in the Mexican market[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 100-111.
- [3] MORETTI E, ZINZI M, MERLI F, et al. Optical, thermal, and energy performance of advanced polycarbonate systems with granular aerogel[J]. Energy and Buildings, 2018, 166:407-417.
- [4] ZHONG KC, LI SH, SUN GF, ET AL. Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material[J]. Energy and Buildings, 2015, 106: 87-95.
- [5] JIANG W, LIU B, ZHANG X et al. Energy performance of window with PCM frame[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 45: 1-9.
- [6] JALAL M J, SALIH M S. Experimental and numerical investigation of paraffin wax as thermal insulator in a double glazed window[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35:1-12.
- [7] LI D, WU Y Y, WANG B C, et al. Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: A review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233: 1-25.
- [8] BHAMARE D K, RATHOD M K, BANERJEE J. Numerical model for evaluating thermal performance of residential building roof integrated with inclined phase change material (PCM) layer[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 28:1-10.
- [9] MORETTI E, BELLONI E, MERLI F, et al. Laboratory and pilot scale characterization of granular aerogel glazing systems[J]. Energy and Buildings, 2019, 202:1-15.
- [10] BURATTI C, MORETTI E, ZINZI M. High energy-efficient windows with silica aerogel for building refurbishment: experimental characterization and preliminary simulations in different climate conditions[J]. Buildings, 2017, 7(1):1-12.
- [11] MEMON Ali S. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 31: 870-906.
- [12] ANNA W, DARIUSZ H. Modeling of thermal processes in a glazing structure with temperature dependent optical properties-An example of PCM-window[J]. Renewable Energy, 2020, 160:653-662.
- [13] QIAN W, WU R, YU W, et al. Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction[J]. Energy and Buildings, 2018, 172:65-72.
- [14] ZHANG S, HU W Y, LI D, et al. Energy efficiency optimization of PCM and aerogel-filled multiple glazing windows[J]. Energy, 2021, 222:119916.
- [15] LI D, WU Y Y, ZHANG G J, et al. Influence of glazed roof containing phase change material on indoor thermal environment and energy consumption[J]. Applied Energy, 2018, 222:343-350.

(编辑 吴海西 沈波)