

文章编号: 1671-6612 (2020) 02-191-06

相变材料在夏热冬冷地区 建筑围护结构中应用的性能研究

孙小琴¹ 樊思远¹ 林逸安¹ 涂航¹ 廖曙光²

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院 长沙 410114

2. 长沙麦融高科股份有限公司 长沙 410015)

【摘要】 相变材料 (Phase change material, PCM) 在建筑围护结构中的应用是一种改善室内热环境和居住舒适度的有效方法。为探索相变材料在夏热冬冷地区应用的节能潜力, 对比研究了不同相变材料应用方法的节能效果, 以能源使用强度 (Energy use intensity, EUI) 评价不同应用方法的建筑性能, 旨在找出最优的应用方法。所用的相变材料以高密度聚乙烯球封装, 并嵌入在 XPS 保温板中, 形成 XPSPCM 板。研究表明: 在制冷季, 将 XPSPCM 板安装在建筑物墙体内部表面时的 EUI 比其装在建筑物墙体外部表面时降低了 0.27~0.66kWh/m², 采暖季的降低幅度为 0.68~0.88kWh/m²。综合考虑全年工况时, 当 XPSPCM 板安装至建筑物墙体靠近内表面时 EUI 值最小。以 EUI 雷达图对比 XPSPCM 板集中于建筑不同朝向的应用效果, 结果显示对于熔点为 25℃ 的相变材料, 相变材料集中布置于西向外墙时时建筑能耗最低。

【关键词】 相变材料; 建筑墙体; 建筑朝向; 能源使用强度

中图分类号 TU111.4 文献标识码 A

Performance of the Building Envelopes Enhanced by Phase Change Materials in Hot Summer and Cold Winter Region

Sun Xiaoqin¹ Fan Siyuan¹ Lin Yian¹ Tu Hang¹ Liao Shuguang²

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, 410114;

2. Changsha Maxxom Hi-Tech Co., Ltd, Changsha, 410015)

【Abstract】 The application of Phase Change Materials (PCMs) in building envelopes is an effective way to improve indoor thermal environment and residential comfort. To explore the energy saving potential of PCMs in hot summer and cold winter region, this paper compared the energy saving effects of different PCM application methods. The building performance with various PCM application methods was evaluated using energy use intensity (EUI). The PCM was encapsulated in a high density polyethylene sphere and embedded in an XPS thermal insulation panel, forming XPSPCM boards. The results show that the EUI was reduced by 0.27 ~ 0.66 kWh/m² when the XPSPCM board was installed near the inner surface of building walls during cooling season, compared to the case when XPSPCM board was installed near the outer surface of the building walls. The EUI reduction in heating season was 0.68 ~ 0.88 kWh/m². For annual thermal performance, the lowest EUI was achieved when the XPSPCM board was installed to near the inner surface of building walls. In addition, the building performance was better with the PCM concentrated on

基金项目: 国家自然科学基金 (51308051); 湖南省自然科学基金 (2019JJ30027); 湖南省湖湘青年英才项目 (2017RS3036); 湖南省人才托举工程项目 (2017TJQ05); 长沙市杰出创新青年培养计划 (kq1802032)

作者 (通讯作者) 简介: 孙小琴 (1988.01-), 女, 博士, 副教授, E-mail: xiaoqinsun@csust.edu.cn

收稿日期: 2019-05-28

the south-facing wall than the case with PCM distributed on each wall. For the PCM with a melting point of 25°C, the energy consumption was the lowest when the PCM concentrated on the west-facing walls.

【Keywords】 Phase change material; Building wall; Building orientation; Energy use intensity

0 引言

中国建筑能耗研究报告显示 2016 年我国建筑能源消费总量为 8.99 亿吨标准煤, 占全国能源消费总量的 20.6%, 其中电力和采暖能耗分别占比 46%和 25%^[1]。在建筑能源消费总量中 25%的能源用于建筑室内采暖与空调系统, 该能耗高于同纬度甚至高纬度发达国家的一倍, 对我国的能源节约和可持续发展造成不利影响。

相变材料 (Phase change material, PCM) 拥有良好的等温蓄放热特性, 其在建筑节能领域中的应用已成为国内外学者的研究热点。相变材料在建筑围护结构中应用的节能效果主要受室内外环境和材料性能的影响, 如其在夏热冬冷地区的应用可满足夏季室内舒适度要求, 但未能有效提高冬季室温^[2]。为提高冬季建筑的性能, 采用相变温度为 20°C 的定形相变板可降低室内温度波动 65%^[3]。

目前相变材料在建筑围护结构中的节能应用研究主要集中于分析不同气候类型和相变材料熔点等对建筑室内温度环境的影响, 而相变材料在不同朝向围护结构中的应用对建筑的能源性能亦产生较大的影响^[4-6]。各朝向围护结构接收的太阳辐射的差异导致其壁面温度不同, 从而影响外墙体中相变材料的蓄放热过程, 导致建筑的室内环境以及能源性能变化。本文对比研究相变材料均匀布置于各朝向外墙与集中布置于南向外墙时的能源使用强度 (Energy use intensity, EUI), 并分析相变材料应用于外墙中的不同位置及不同朝向对建筑能源性能的影响, 以 EUI 为指标评价不同应用方式的节能效果, 最终获得相变材料在夏热冬冷地区建筑围护结构中应用的最优方式。

1 研究方法

1.1 建筑模型

选取如图 1 所示位于长沙的一座轻型建筑为研究对象, 建筑占地面积 6.25m² (2.5m×2.5m), 层高 2.4m, 顶部为坡度为 16.5° 的双坡顶, 建筑的北向墙带有尺寸为 0.9m×2.0m 的铝合金门, 东向有一扇 0.76m×1.04m 灰色镀膜单层普通玻璃外

窗。

为研究相变材料不同应用方式对建筑性能的影响, 建立如图 3 所示的物理模型 1~5, 各模型所使用的外墙材料及参数见表 1。材料 3, 4 为自制的 XPSPCM 板, 该材料由 PCM 球和 XPS 保温板组成, PCM 封装在直径为 25mm 的高密度聚乙烯球壳内, 所用的 PCM 为熔点 25°C 的石蜡, 材料 3 和材料 4 中的 PCM 质量百分比分别为 40.3wt.% 和 66.9wt.%。模型 1~3 的外墙材料从外到内分别为表 1 中的 1225, 1235 和 1325, 模型 4, 5 则是在模型 1 的基础上, 将其南向外墙的材料分别改为 1245 和 1425。模型 2~5 所含相变材料的质量均为 4.56kg, 相变材料在外墙中的位置各不相同, 其中模型 2 和 3 的相变材料分别均匀布置于四个朝向外墙的内侧和外侧, 模型 4 和 5 的相变材料分别集中于南外墙的内侧和外侧。



图 1 轻型围护结构建筑

Fig.1 Lightweight building

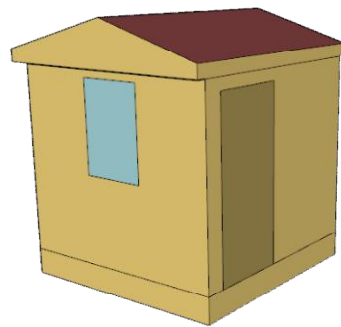


图 2 建筑物理模型

Fig.2 Physical model of the building

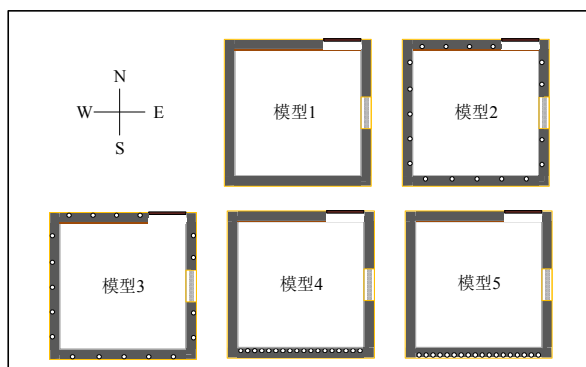


图 3 模型 1~5 的外墙结构

Fig.3 Exterior wall structure of each model

表 1 墙体材料及参数

Table 1 Wall materials and parameters

编号	材料	密度 (kg/m ³)	比热容 (J/kg·K)	导热系数 (W/m·K)	厚度 (mm)
1	铁	7800	450.0	50	2
2	挤塑板	35	1400.0	0.89	20
3	XPSPC M 板 A	380.6	1732.5	0.81	20
4	XPSPC M 板 B	723.5	2062.4	0.70	20
5	石膏板	640	1150.0	0.16	5

1.2 模拟参数

采用 Energyplus 建筑能耗模拟软件对五个模型进行模拟, 物理模型如图 2 所示。模拟气象参数来源于中国气象数据 CSWD 中的长沙气象参数文件, 长沙是典型的夏热冬冷地区, 全年温度变化范围为-3.2~38.2℃, 夏季太阳辐射强度较大, 其全年室外干球温度与太阳辐射数据如图 4 所示。各模型的全年制冷时段与采暖时段的室内空调温度分别设定为 26℃和 20℃, EER 与 COP 分别设定为 4.5 和 4.0^[7]。相变材料的传热过程计算主要依赖于相变材料的焓值-温度的函数关系^[8], 该关系由 DSC 测试取得, 所使用石蜡相变材料的焓值-温度曲线坐标点采用式 (1) 计算。

$$\Delta h = C_p \times \Delta T \quad (1)$$

其中, Δh 是热量, C_p 是相变材料的比热, ΔT 为温差。

以模型 2 为研究对象, 模拟结果和实测结果如图 5 和图 6 所示, 其中西向、南向和东向内壁温度模拟值和实测值的平均偏差分别为 6.48%, 4.05% 和 8.77%, 模拟与实验的室内温度偏差为 5.02%。

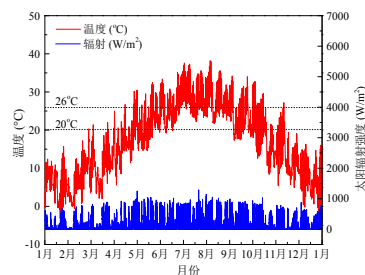


图 4 长沙全年室外温度与辐射强度

Fig.4 Annual temperature and solar radiation in Changsha

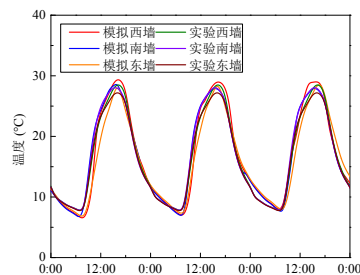


图 5 内壁温度校核结果

Fig.5 Inner wall temperature

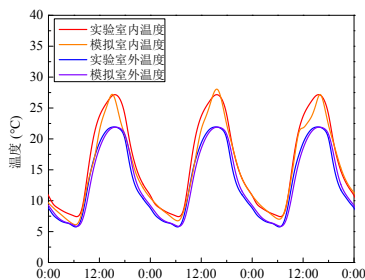


图 6 室温校核结果

Fig.6 Indoor air temperature

2 结果与讨论

2.1 相变材料在外墙中的不同位置时的建筑性能

表 2 为各模型在采暖、制冷两季与全年时段下的 EUI 与节能率, 节能率由式 (1) 计算。制冷时段时, 模型 4 的节能率最高, 其值为 3.3% (2.79kWh/m²), 模型 3 的节能率最低, 约为 1.85% (1.59kWh/m²)。模型 4 的节能率相对于模型 2 的节能率提高了 0.66%, 模型 5 的节能率相对于模型 3 的节能率提高了 1.12%, 说明将相变材料集中布置于南墙的使用效果优于均匀分散布置于各朝向外墙。此外, 模型 2 的节能率大于模型 3, 模型 4 的节能率大于模型 5, 说明将相变材料安装于外墙内侧时建筑性能更优。对于采暖季, 各模型的节能率均低于制冷季,

但模型 4 的节能率仍是模型 2~5 中最高的，其节能量为 2.35kWh/m²。模型 2~5 制冷季与采暖季的节能量分别为 1.59~2.79kWh/m² 和 1.88~2.35kWh/m²，制冷与采暖两季的节能量近似。值得说明的是，采暖季所有模型的 *EUI* 均远大于同模型下制冷时段的 *EUI*，这是由于几乎整个采暖季室外气温（见图 1）均低于冬季室内空调温度设定值 20℃，且各模型外墙的保温性较弱，故采暖季室内

热负荷远大于制冷季的冷负荷。

在全年工况中将相变材料集中布置于南向外墙内侧更有利于发挥相变材料对建筑性能的提升作用，且将相变材料集中布置于南墙始终比将等量的材料均匀分散于各面外墙的使用性能更好。

$$\text{节能率} = \frac{EUI_{\text{模型1}}}{EUI_{\text{模型1}} - EUI_{\text{模型}(i=2,3,4,5)}} \times 100\% \quad (2)$$

表 2 各模型的节能率与 *EUI*

Table 2 Energy saving rate and *EUI* of each model

时段	节能率与 <i>EUI</i> (kWh/m ²)									
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
制冷	87.31	85.06	2.64%	85.72	1.85%	84.52	3.30%	84.79	2.97%	
采暖	677.44	675.33	0.31%	675.56	0.28%	675.09	0.35%	675.5	0.29%	
全年	764.75	760.39	0.60%	761.28	0.45%	759.61	0.67%	760.29	0.58%	

2.2 相变材料在不同朝向外墙中的建筑性能

相变材料应用于建筑中的性能受各种室外气象条件的影响，除室外环境温度的影响外，还受风速、风向、太阳辐射、相对湿度等的影响^[9,10]，其中太阳辐射对建筑中相变材料的应用性能影响较大，尤其是在太阳辐射的热量能充分传递至建筑中相变材料时，例如相变材料安装于外墙或特朗勃墙等，长时段较低太阳辐射与较低的白天室外气温可能导致建筑中的相变材料无法充分融化蓄热，较高的太阳辐射与较高的夜间室外气温可能导致建筑中的相变材料始终保持在液相而无法有效释放热量。为探究太阳辐射对应用相变材料的建筑性能的影响，选取上述研究中全年节能率最高的模型 4 为研究对象，分析其在如图 7 所示的 16 个朝向下的节能性能。此处建筑的朝向指模型 4 中带有相变材料的外墙面对的方向。

图 8 为模型 4 在 16 个不同建筑朝向下的 *EUI* 雷达图。图 8 (a) 所示的模型 4 在制冷季不同朝向下的 *EUI* 变化幅度 $\Delta EUI_{\text{制冷}} = 6.88 \text{ kWh/m}^2$ ，*EUI* 的最大值与最小值分别为东北向 88.17kWh/m² 和西向 81.29kWh/m²。另外，东向的 *EUI* 为 81.3kWh/m² 与西向 81.29kWh/m² 的差值仅为 0.01kWh/m²，其他朝向下的 *EUI* 均明显大于此值。这是因为建筑朝向不同，受太阳辐射的影响室内平均辐射温度（Mean Radiant Temperature, MRT）随之变化，制冷季较低的 *MRT* 和采暖季较高的 *MRT* 均有利于降低建筑能耗，其中 *MRT* 是假设区域中心存在一人员的情况下按照式 (2) 计算得出^[11]。如图 9 所示，制冷季 *MRT* 的最小值为西向的 28.3℃，因此西向是制冷季 *EUI* 最低的朝向。

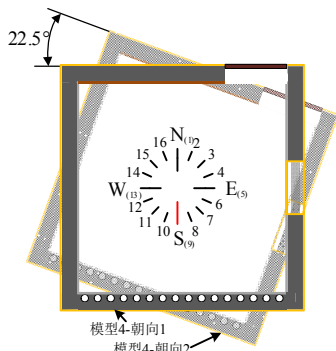
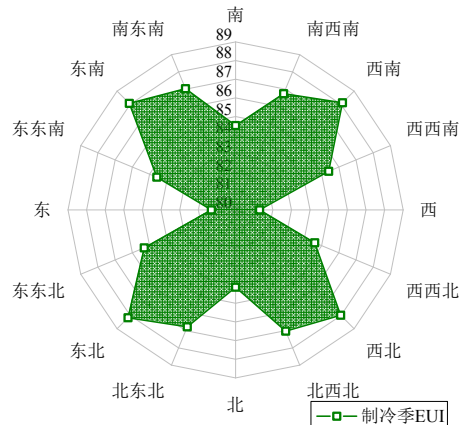


图 7 建筑朝向变更示意图

Fig.7 Schematic diagram of building orientation



(a) 制冷季 EUI

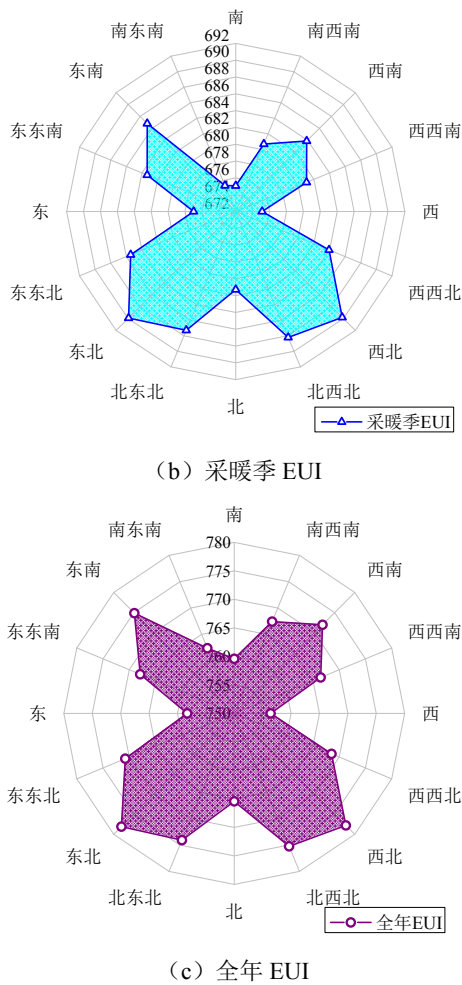


图 8 不同朝向下的建筑 EUI 雷达图

Fig.8 EUI radar chart for buildings with different orientations

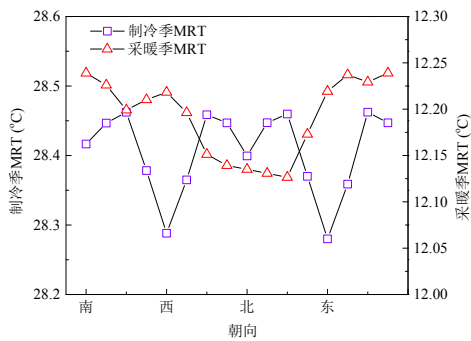


图 9 室内平均辐射温度

Fig.9 Indoor air mean radiant temperature

$$T_r = T_{surf-1}F_{surf-1} + T_{surf-2}F_{surf-2} + \dots + T_{surf-n}F_{surf-n} \quad (3)$$

式中, T_r 为平均辐射温度, T_{surf-n} 为内壁面温度, F_{surf-n} 为壁面与人之间的角系数。

图 8 (b) 为采暖季 EUI 雷达图, 当相变材料安装于南向外墙时 EUI 最小, 为 675.06kWh/m^2 , 西墙的 675.12kWh/m^2 次之。在图 8 (b) 以东、西连线为界的上半部分 7 个朝向与下半部分 7 个朝向之间的 EUI 平均差值为 5.68kWh/m^2 , 说明将相变材料集中于“南面外墙”或南向附近更有利于提升建筑性能, 这是因为采暖季室外环境气温始终低于所使用的相变材料的熔点 25°C , 而将带有相变材料的外墙调整至南向附近可以使墙体充分接收太阳辐射为相变材料蓄能, 储存的能量可向室内传递, 消除部分室内热负荷。

图 8 (c) 为建筑全年的 EUI 分布, 相变材料布置在不同朝向围护结构中的建筑性能存在明显的差异, EUI 最大值为东北向的 778.09kWh/m^2 , 最小值为西向的 756.41kWh/m^2 , 两者之间差值达到 21.68kWh/m^2 。各朝向下的建筑性能具体表现为将带有相变材料的墙体布置于建筑的正东正西正南(数值)三个方向的能耗显著低于其他方向的能耗, 以正西方向布置的建筑性能为最优。

3 结论

相变材料在建筑节能中的应用效果受其在围护结构中的应用方式影响, 同样的相变材料在不同应用方式中的节能效果存在较大差异。本文对比研究了相变材料布置于建筑围护结构外表面和内表面时的建筑用能变化, 结果表明不管是制冷季还是采暖季, 将相变材料安装于外墙内表面时的建筑性能要优于将相变材料安装于外墙外表面。此外, 将相变材料集中布置于南向外墙时, 相对于将等量的相变材料均匀布置于各朝向外墙, 单位面积建筑能耗可降低 1kWh/m^2 。对比相变材料在不同朝向建筑围护结构中的应用, 夏季制冷工况时, 当相变材料集中布置于西向外墙时节能效果最显著; 冬季采暖工况时, 当相变材料集中布置于南向外墙时节能效果最显著; 全年工况时, 将相变材料集中布置于西向外墙时 EUI 最小, 相对于将其布置于东北朝向时 EUI 可降低 21.68kWh/m^2 。

参考文献:

[1] 2018 中国建筑能耗研究报告[J].建筑,2019(2):26-31.

- [2] 丁理峰,叶宏.相变材料和隔热材料在不同地区建筑中应用效果之比较分析[J].太阳能学报,2011,32(4):508-516.
- [3] 肖伟,王馨,张寅平.轻质建筑中定形相变内隔墙板冬季应用效果研究[J].工程热物理学报,2011,32(1):123-125.
- [4] Wan Iman Wan Mohd Nazi, Yaodong Wang, Haisheng Chen, et al. Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High-rise Office Building in Tropical Climate[J]. Energy Procedia, 2017,142:2295-2302.
- [5] Sun Xiaoqin, Medina Mario A, Zhang Yuan. Potential Thermal Enhancement of Lightweight Building Walls Derived From Using Phase Change Materials (PCMs) [J]. Frontiers in Energy Research, 2019,7:13.
- [6] Amirreza Fateh, Davide Borelli, Francesco Devia, et al. Summer thermal performances of PCM-integrated insulation layers for light-weight building walls: Effect of orientation and melting point temperature[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018,6:361-369.
- [7] GB 50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [8] A Castilho, A V Sá, V Abrantes. Energy performance of a school building with phase change materials[R]. Madeira, Portugal: 40th IAHS World Congress on Housing: Sustainable Housing Construction, 2014.
- [9] Mohammad Saffari, Alvaro de Gracia, Svetlana Ushak, et al. Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,80:1239-1255.
- [10] R. David Beltrán, Javier Martínez-Gómez. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment[J]. Journal of Building Engineering, 2019,24:100726.
- [11] ASHRAE. 2010. Standard 55-2010 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI approved) [S]. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA.