

组合式相变围护结构夏季换热性能试验研究

孟二林^{1,2}, 于航^{1,2}, 张美玲^{1,2}, 谢涛^{1,2}

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学暖通空调及燃气研究所, 上海 201804)

摘要: 提出了组合式相变房间的方法, 即在不同朝向的围护结构上布置不同相变温度的相变材料, 分别用于在冬季和夏季通过发生相变改善室内热环境。搭建了组合式相变房间试验装置, 对其进行了夏季工况的试验研究, 测量并计算了相变房间的室内空气温度以及不同朝向围护结构的对流换热及辐射换热的热流密度, 并与普通房间进行了对比分析。结果显示这种新型相变房间能有效改善夏季室内热环境, 其围护结构换热性能也与普通房间存在一定的差异。

关键词: 组合式相变房间; 围护结构热流; 换热方式

中图分类号: TK02

文献标志码: A

Experimental Research on Summer Heat Exchange Performance of Combined Phase Change Material Envelops

MENG Erlin^{1,2}, YU Hang^{1,2}, ZHANG Meiling^{1,2}, XIE Tao^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. HVAC & GAS Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper presents an idea about combined phase change material room, which lays two different kinds of phase change material (PCM) in building envelopes of different orientation. The two PCMs occur phase transition separately in winter and summer. The experimental rooms of combined phase change material and ordinary material are built and the experiment is done for summer condition. Measurement and calculation are done to indoor air temperature and convection and radiation heat fluxes of the combined PCM room. Comparison is done with ordinary room. Results show that this new type of room can effectively improve indoor thermal environment during summer, thermal performance of the building envelopes also shows some differences with ordinary room.

Key words: combined phase change material room; heat

fluxes of the building envelopes; heat exchange method

相变材料(phase change material, PCM)与建筑围护结构的结合可以提高室内舒适性,降低建筑能耗,是目前国内外研究的热点问题^[1-2]。Ibanez等^[3]指出相变墙体在夏季应用时相变材料应该布置在西墙和屋顶,相变墙体最大可以使室内温度降低3℃。Pasupathy等^[4]将2种不同相变温度的相变材料布置在屋顶的内层和外层,并对这种屋顶进行了全年的试验和模拟研究,结果显示,双层相变材料有利于减少室内温度波动,适用于全年所有季节。张群力等^[5]设计了一种利用不同相变温度的定形相变材料蓄能的吊顶形式,通过对吊顶热性能影响因素的敏感性分析得知,相变材料的热导率主要影响吊顶蓄热效率和蓄热量,相变温度和相变潜热主要影响吊顶表面热通量的衰减时间。Frederic Kuznik等^[6]比较了相变房间和普通房间不同围护结构表面的热流变化情况,得出相变房间围护结构内表面的热流密度比普通房间大、相变墙体的蓄热量和放热量都比普通墙体大的结论。Maha Ahmad等^[7]研究了相变材料用于轻质墙体时内表面热流变化情况,得出无PCM的墙体1d中的蓄放热量基本相等,而PCM墙体1d的蓄热量大于其放热量。另外,目前有学者^[8-11]研究了相变墙体内表面对流换热情况对墙体蓄、放热性能以及室内热环境的影响。为了改善室内全年热环境,本文提出了组合式相变房间的方法,即在房间不同朝向的围护结构上布置2种不同相变温度的相变材料,相变温度较高的相变材料在夏季发生相变改善夏季室内热环境,相变温度较低的相变材料在冬季发生相变改善冬季室内热环境。本文建立了组合式相变房间的试验装置,并对其室内热环境和

收稿日期: 2012-11-15

基金项目: 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学)开放基金(201304)

第一作者: 孟二林(1982—),男,博士生,主要研究方向为相变储能技术。E-mail: m20_njnu@126.com

通讯作者: 于航(1964—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为低能耗建筑技术。E-mail: yuhang@tongji.edu.cn

围护结构的换热性能进行了试验研究.

1 试验设计

1.1 试验装置

如图 1 所示,试验对象是 2 个尺寸为 1 m×1 m×1 m 的缩尺寸房间,在 2 房间的南墙上都开有 0.7 m×0.7 m 的窗户.2 房间围护结构从外到内的材料构成见表 1.

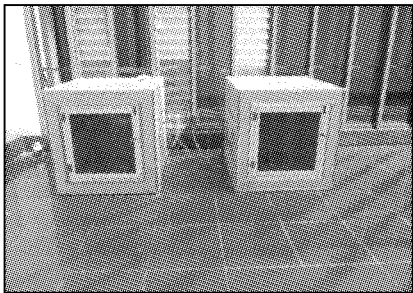


图 1 测试装置
Fig.1 Test equipments

表 1 围护结构材料构成

Tab.1 Composition of the wall materials		
房间	材料(由外到内)	厚度/mm
组合式相变房间	彩钢板	1.2
	泡沫聚苯乙烯保温板	75.0
	彩钢板	1.2
	相变材料板	10.0
普通房间	彩钢板	1.2
	泡沫聚苯乙烯保温板	75.0
	彩钢板	1.2

在组合式相变房间的内表面贴有 2 种不同相变温度的相变材料板,分别为 SP29 和 RT18,其中 SP29 是无机材料,RT18 是有机材料.2 种相变材料在组合式相变房间内的布置方式见表 2.2 种相变材料的物性参数见表 3.2 种材料的封装方式如图 2 所示.

表 2 相变材料在室内的布置方式

Tab.2 PCMs arrangement in the room			
围护结构	相变材料	围护结构	相变材料
东墙	RT18	屋顶	SP29
北墙	RT18	地板	SP29
西墙	SP29		

注:由于南墙上开了窗户,因此没有布置相变材料.

1.2 测试参数及测点布置

试验过程中测试的参数包括:2 房间内的空气温度以及各内表面的壁面温度、室外空气温度、室外太阳辐射强度、墙体内表面热流密度.各测试仪器及其精度见表 4.

表 3 相变材料的物性参数

Tab.3 Physical characteristics of the PCM				
相变材料	相变温度/℃	相变潜热/(kJ·kg ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)
SP 29	28~30	190	1 530(固态) 1 520(液态)	0.6
RT 18	17~19	225	880(固态) 770(液态)	0.2

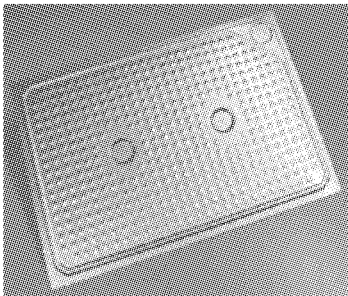


图 2 相变材料封装方式
Fig.2 Encapsulation method of the PCM

表 4 测试参数及仪器

Tab.4 Parameters and instruments		
测试参数	测试仪器	仪器精度
空气和壁面温度	热电偶	±0.3℃
墙体表面热流密度	热流仪	±0.5 W·m ⁻²
太阳辐射	太阳辐射强度计	±1.0 W·m ⁻²

测点布置情况见图 3,其中测点 7 为室内中心点,是室内空气温度的测点,其他各点布置在各面墙体的中心点,在这 6 个点同时测量壁面温度以及热流密度.室外太阳辐射强度的测点布置在相变房间外的屋顶上(无任何遮挡),室外空气温度的测点布置在距离试验房间 1 m 远的阴凉处.

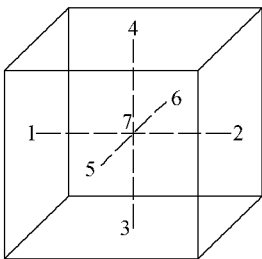


图 3 测点布置
Fig.3 Distribution of the measuring points

2 室内热环境试验结果

从图 4 可以看出:普通房间室内空气最高温度达到 48.0℃,而组合式相变房间的为 42.5℃,温差为 5.5℃.普通房间室内空气最低温度为 29.5℃,组合式相变房间的为 30.7℃,温差为 1.2℃.

试验过程中普通房间室内空气温度变化幅度为

18.5℃,组合式相变房间的为11.8℃,后者波动更小.相变材料起到了改善室内热环境的作用.另外还可以发现由于相变材料增加了围护结构的热惰性,组合式相变房间室内空气温度的波动比普通房间有一定的延迟.

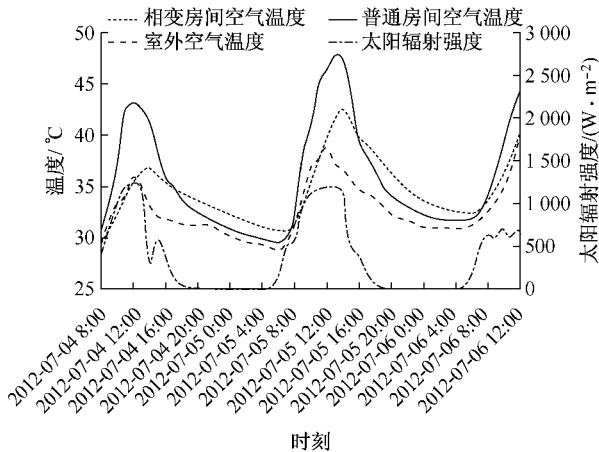


图4 空气温度与太阳辐射强度的变化

Fig.4 Air temperature and solar radiation

3 围护结构内表面换热计算

3.1 热流

房间某一围护结构内表面与其他5个内表面的辐射换热热流 q_r 计算公式为

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_i^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_i}(\frac{1}{\epsilon_i} - 1)} \quad (1)$$

式中: σ 为斯忒藩-波尔兹曼常量,为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; T_1 为计算围护结构表面温度,K; T_i 为除计算围护结构外其他5个围护结构内表面的面积加权平均温度,K; ϵ_1 为计算围护结构表面发射率; A_1 为计算围护结构表面积, m^2 ; A_i 为除计算围护结构外其他5个围护结构表面积之和, m^2 ; ϵ_i 为其他5个围护结构表面发射率.

由于本试验中使用的墙体材料的发射率为0.97,因此 $(\frac{1}{\epsilon_i} - 1)$ 非常小,又因为 $\frac{A_1}{A_i}$ 也比较小,因此 $\frac{A_1}{A_i}(\frac{1}{\epsilon_i} - 1)$ 与 $\frac{1}{\epsilon_1}$ 相比可以略去不计,则式(1)可以简化成

$$q_r = \epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_i^4) \quad (2)$$

通过围护结构内表面的总热流可以用热流仪测得,因此其对流热流即为

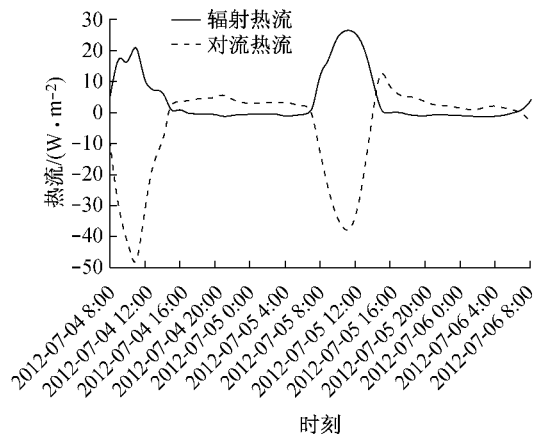
$$q_c = q_z - q_r \quad (3)$$

式中: q_z 为围护结构表面总热流.

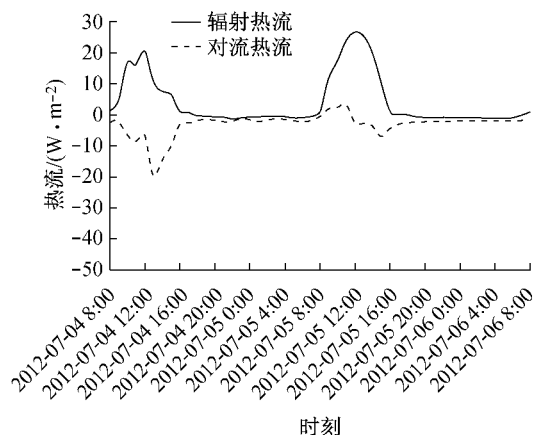
本文用围护结构中心点处的热流密度代表该围护结构的平均热流密度.

3.2 屋顶内表面热流

从图5可以看出,白天时组合式相变房间屋顶的辐射热流为正值(向室内放热),对流热流为负值(从室内吸热),但是对流热流的绝对值更大,因此总热流为负值,即主要以对流的方式从室内吸热.



a 相变屋顶



b 普通屋顶

图5 屋顶辐射热流和对流热流的变化

Fig.5 Radiation and convection heat fluxes of the roof

普通房间白天屋顶的辐射热流为正值,对流热流为负值,但是辐射热流的绝对值更大,因此总热流为正值,即主要以辐射的方式向室内放热.

夜晚时无论组合式相变房间还是普通房间,屋顶内表面的热流都比较小,其中普通房间屋顶内表面的辐射热流基本为零,对流热流为负值,因此普通房间屋顶主要以对流的方式从室内吸热.组合式相变房间屋顶的辐射热流基本为零,对流热流为正值,其中对流热流的绝对值更大,因此组合式相变房间屋顶主要以对流的方式向室内放热.

分别比较组合式相变房间和普通房间的辐射热流和对流热流可以发现:2个房间的屋顶和室内的辐

射换热热流差别不大,其峰值相差 $0.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,但是组合式相变房间屋顶和室内空气之间的对流换热热流却远大于普通房间的屋顶,其峰值相差 $28.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.3 西墙内表面热流

如图 6 所示,白天时组合式相变房间和普通房间西墙都主要以对流的方式从室内吸热.在第 2 d 14:00 左右,由于太阳直射的原因,普通房间西墙内表面温度升高,其辐射热流出现短暂的正值.

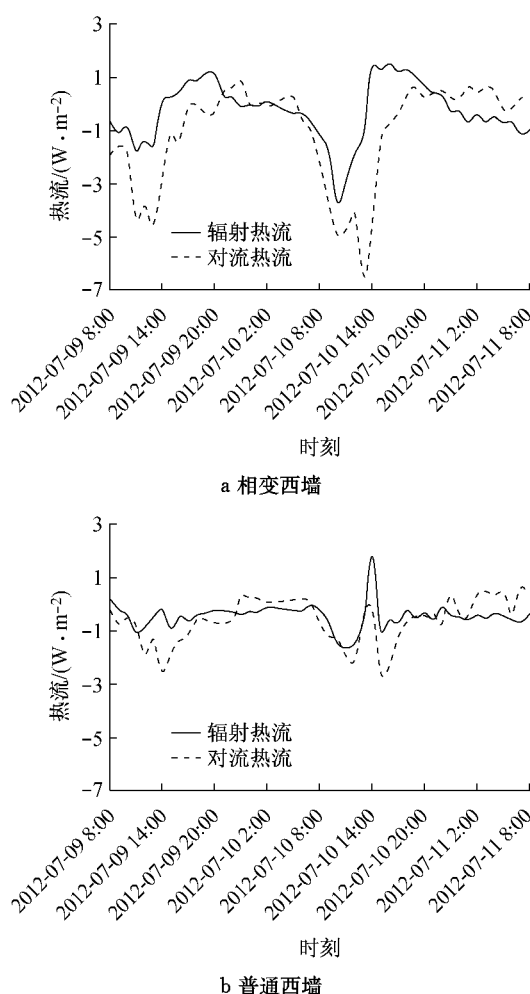


图 6 西墙辐射热流和对流热流的变化

Fig. 6 Radiation and convection heat fluxes of the west wall

夜晚时组合式相变房间西墙的辐射和对流热流基本都为正值,其中辐射的热流更大,即主要以辐射的方式向室内放热.

普通房间西墙夜晚时的辐射和对流热流基本都为负值,两者之间没有明显的强弱关系.

由上述分析可知组合式相变房间西墙内表面的辐射和对流热流都大于普通房间的西墙,其中辐射热流的峰值相差 $2.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,对流热流的峰值相

差 $3.91 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.4 地板内表面热流

从图 7 可以看出,白天时,组合式相变房间地板的对流和辐射热流都为负值,其换热方式以辐射为主.普通房间地板的对流和辐射热流也都为负值,但是其换热方式以对流为主.

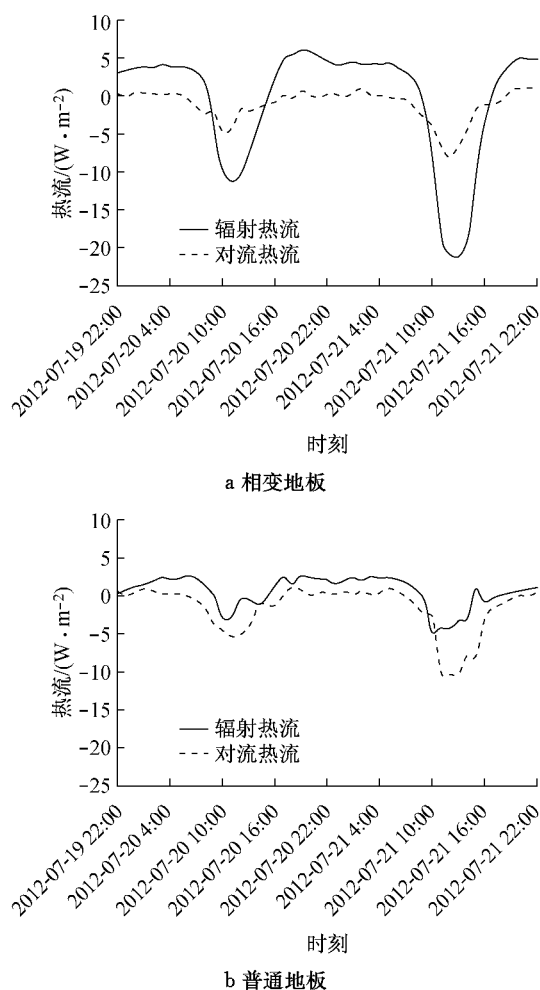


图 7 地板辐射热流和对流热流的变化

Fig. 7 Radiation and convection heat fluxes of the floor

夜晚时,组合式相变房间和普通房间地板都主要以辐射的方式向室内放热.

组合式相变房间地板和普通房间地板内表面的对流热流差别较小,其峰值相差 $2.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,但是组合式相变房间地板的辐射热流远大于普通房间,其峰值相差 $16.42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.5 东墙内表面热流

如图 8 所示,组合式相变房间东墙白天的辐射热流为正值,原因是组合式相变房间的东墙布置的相变材料是 RT18,其相变温度为 18°C 左右,在试验过程中一直处于液态,相变潜热不能发挥作用,因此其内表面温度比较高,而西墙、屋顶和地板布置的是

SP29 相变材料,试验过程中相变潜热的作用使得围护结构内表面温度不会太高,而北墙虽然也是 RT18 相变材料,但由于其未受到太阳直射,其内表面温度也不会太高,因此组合式相变房间东墙内表面的辐射热流为正值. 其对流热流为负值的主要原因是白天时通过窗户的得热量较大,因此室内空气温度比较高,大于东墙内表面温度. 普通房间东墙的辐射和对流热流呈现出相似的变化规律,上午 10:00 左右由于受太阳直射作用导致内表面温度突然上升,使内表面热流出现正值的峰值;12:00 左右出现负值的峰值,此时受太阳辐射得热的影响室内空气温度比较高,导致室内空气和东墙内表面的温差增大.

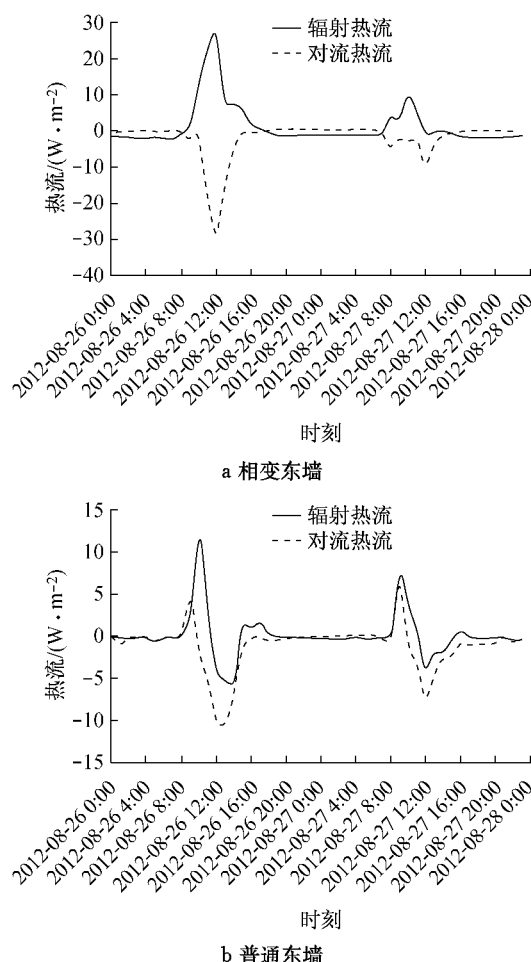


图8 东墙辐射热流和对流热流的变化
Fig.8 Radiation and convection heat fluxes of the east wall

组合式相变房间东墙夜晚的对流热流基本为零,辐射热流为负值,即主要以辐射方式从室内吸热. 普通房间东墙夜晚时的对流和辐射换热没有明显的强弱关系.

组合式相变房间东墙的对流和辐射热流均大于普通房间,其中辐射热流的峰值相差 $14.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

m^{-2} ,对流热流的峰值相差 $18.82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.6 北墙内表面热流

从图9可以看出,组合式相变房间北墙白天时的辐射和对流热流均为负值,其中对流热流的绝对值更大,因此组合式相变房间北墙白天主要通过对流的方式从室内吸热. 夜晚时辐射热流为负值,且绝对值更大,即主要以辐射的方式从室内吸热.

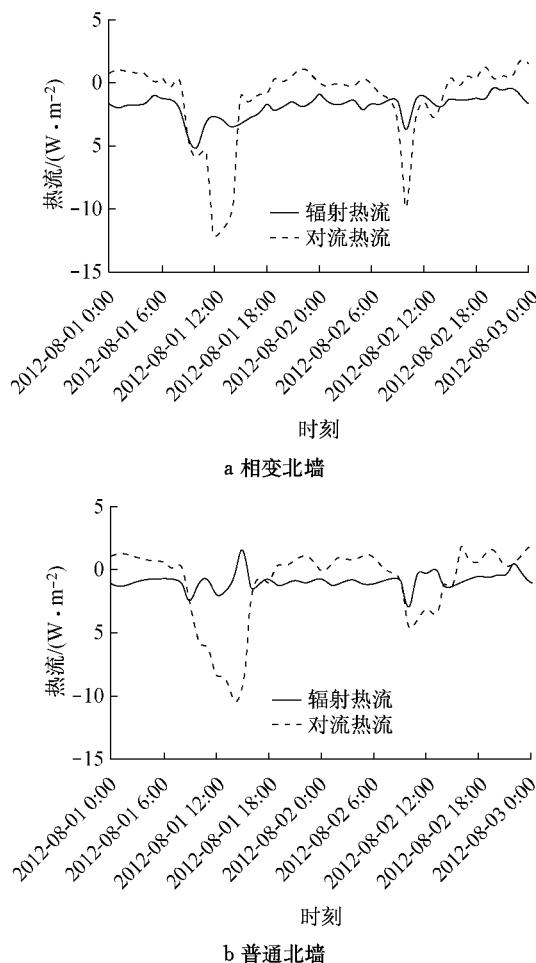


图9 北墙辐射热流和对流热流的变化

Fig.9 Radiation and convection heat fluxes of the north wall

分别比较组合式相变房间和普通房间的辐射热流和对流热流可以发现,组合式相变房间东墙的对流和辐射热流均略大于普通房间东墙,其中辐射热流的峰值相差 $2.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,对流热流的峰值相差 $1.46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

4 围护结构热性能

4.1 辐射和对流热流

4.1.1 白天

(1) 对流热流. 组合式相变房间和普通房间各围

护结构白天的对流热流都为负值,只有房间屋顶和东墙、西墙在短时间内出现短暂的正值.主要原因是白天时室内空气温度高于各围护结构壁面的温度.

(2)辐射热流.组合式相变房间和普通房间的东墙和屋顶白天的辐射热流都出现了正值,原因是组合式相变房间东墙的相变材料全部处于液态,不发生相变,受太阳直射时其内表面温度上升较快.而屋顶虽然有相变温度较高的相变材料可以吸收部分太阳辐射热量,但是其受太阳直射的时间较长,因此其内表面温度较高.普通房间西墙白天辐射热流出现正值,而组合式相变房间西墙的辐射热流始终为负值,原因是组合式相变房间西墙虽然在下午也受到太阳直射,但是其直射时间比较短,而且组合式相变房间西墙有相变温度较高的相变材料发生相变,吸收了大部分太阳辐射热量,避免内壁面温度上升过大.

4.1.2 夜晚

(1)对流热流.组合式相变房间和普通房间夜晚时各壁面的对流热流基本都为正值.只有普通房间屋顶的对流热流为负值.主要原因是房间通过窗户的散热量较大,使得室内空气温度较低,低于围护结构内表面温度.而普通房间屋顶对流热流为负的原因是屋顶夜晚和天空的长波辐射量较大,使得其内表面温度较低.

(2)辐射热流.组合式相变房间和普通房间夜晚除了地板外的其他围护结构的辐射热流基本都为负值,只有地板的辐射热流是正值.主要原因是地板表面的温度较高.

4.2 围护结构表面主要换热方式

从表 5 中可以看出,白天无论组合式相变房间还是普通房间,其内表面的换热方式都主要以对流为主,原因是白天通过窗户的得热量较大,使得室内空气温度上升较快,流动加速,导致对流热流较大.组合式相变房间地板白天以辐射换热为主的原因是

表 5 2 房间围护结构主要换热方式

房间	围护结构	白天	夜晚
相变房间	屋顶	对流	对流
	西墙	对流	辐射
	地板	辐射	辐射
	东墙	对流	辐射
	北墙	对流	辐射
普通房间	屋顶	对流	对流
	西墙	对流	对流/辐射
	地板	对流	辐射
	东墙	对流	对流/辐射
	北墙	对流	对流/辐射

其地板中含有的 SP29 的相变材料发生相变使得其表面温度比室内其他表面温度都低,形成了比较大的辐射热流.另外由于地板表面温度低于室内空气温度,形成了“冷面朝上”的对流换热形式,其对流热流相对较小.

夜晚通过 2 房间围护结构的辐射和对流热流都比较小,其中组合式相变房间内的换热方式主要以辐射为主,主要是由于房间内不同围护结构含有 2 种不同的相变材料,其中 SP29 相变材料发生相变,而 RT18 相变材料没有发生相变,导致组合式相变房间内围护结构内壁面温度差别比较大,因此辐射换热热流也比较大.普通房间由于围护结构本身的蓄热能力比较有限,夜晚时各面墙的温度差别不大,其辐射换热和对流换热没有明显的强弱关系.

5 结论

(1)相对于普通房间而言,组合式相变房间改善夏季室内热环境的效果更加明显.

(2)白天组合式相变房间和普通房间围护结构的换热方式都以对流为主,但是夜晚组合式相变房间围护结构的换热方式主要以辐射为主,而普通房间围护结构的对流和辐射换热则没有明显的强弱关系.

(3)组合式相变房间围护结构的对流和辐射热流密度都比普通房间围护结构大.

(4)本文的试验结果可以作为数值研究的验证.

参考文献:

- [1] Khudhair A M, Farid M M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(2): 263.
- [2] Tyagi V V, Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: a state of art[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6): 1146.
- [3] Ibanez M, Lazaro A, Zalba B, et al. An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRANSYS [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(11/12): 1796.
- [4] Pasupathy A, Velraj R. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management [J]. Energy and Buildings, 2008, 3(40): 193.
- [5] 张群力,狄洪发,张寅平,等. 双层相变材料蓄能型辐射采暖与空调吊顶热性能[J]. 化工学报, 2006, 57(S): 74.
ZHANG Qunli, DI Hongfa, ZHANG Yinping, et al. Thermal performance of radiant heating and cooling ceiling with two kinds of phase change materials for thermal energy storage[J].

- Chemical Industry and Engineering Society of China Journal, 2006, 57(S): 74.
- [6] Kuznik F, Virgone J, Roux J J. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation [J]. Energy and Buildings, 2008, 2(40): 148.
- [7] Maha Ahmad, Bontemps A, Sallee H, et al. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material [J]. Energy and Buildings, 2006, 6(38): 673.
- [8] Neeper D A. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage [J]. Solar Energy 2000, 68: 393.
- [9] Koo J, So H, Hong S W. Effects of wallboard design parameters on the thermal storage in buildings [J]. Energy and Buildings, 2011, 8(43): 1947.
- [10] ZHOU Guobing, ZHANG Yiping, LIN Kunping, et al. Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates [J]. Renewable Energy, 2008, 6(33): 1228.
- [11] David D, Kuznik F, Roux J J. Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behavior of a phase change material wall [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 16(31): 3117.

~~~~~

(上接第 1561 页)

- [7] 孟德建, 张立军, 余卓平. 通风盘式制动器热耦合理论建模与有限元分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 890.
- MENG Dejian, ZHANG Lijun, YU Zhuoping. Theoretical modeling and FEA of thermo-mechanical coupling dynamics of ventilated disc brake [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(6): 890.
- [8] Belhocine A, Bochetara M. Thermal analysis of a solid brake disc [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 32: 59.
- [9] Hwang Pyung, Wu Xuan. Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3D thermo-mechanical coupling model [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1): 81.
- [10] Apte A A. FE prediction of thermal performance and stresses in a disc brake system [C]// Advancements in Braking: Analysis, Electrical & Mechanical. [S.l.]: SAE, 2006: 2055-2064.
- [11] Gao C H, Lin X Z. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional model [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 513.
- [12] 杨智勇, 韩建民, 李卫经, 等. 制动盘制动过程的热机耦合仿真 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 88.
- YANG Zhiyong, HAN Jianmin, LI Weijing, et al. Thermal-mechanical coupling simulation of braking process of brake disc [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 88.
- [13] 唐扬扬. 热机耦合效应对盘式制动器制动尖叫的影响分析 [M]. 上海: 同济大学, 2011.
- TANG Yangyang. Analysis of thermo-mechanical coupling effect on brake squeal of disc brake [M]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [14] 陈璐, 张立军, 孟德建, 等. 汽车制动盘热翘曲与影响因素分析 [J]. 汽车工程, 2010, 32(7): 605.
- CHEN Lu, ZHANG Lijun, MENG Dejian, et al. Simulation analysis on the thermal distortion and its influencing factors of brake disc [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(7): 605.