

# 基于辐射制冷和微槽道热管的相变墙体实验研究

余才锐<sup>1,2</sup>, 沈冬梅<sup>2</sup>, 何 伟<sup>1</sup>, 胡中停<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 皖西学院建筑与土木工程学院, 六安 237012)

**摘 要:** 为防止夏季室外温度过高情况的发生, 提高建筑墙体的节能率, 提出一种集相变材料、微槽道热管、丙烯酸树脂辐射制冷板为一体的新型节能墙体。为测试新型墙体的热工性能, 构建1个南墙为新型墙体的实验房间(房间C); 另外搭建2个南墙分别为砖墙、相变-砖墙的实验房间(房间A、B)作为参照房间。经实验测试分析得: 1) 房间C南墙内表面峰值温度比室外综合峰值温度低30.7℃, 降低了52.5%, 时间延迟为4.5 h; 2) 房间C室内日平均温度比房间B低0.4℃; 3) 房间C通过南墙的得热量比房间A、B分别低41.4%、21.3%。因此, 新型节能墙体在夏季降低温度、减少得热量等方面均具有较好的实践效果。

**关键词:** 建筑节能; 相变材料; 微槽道热管; 天空辐射制冷; 大气窗口

**中图分类号:** TK02

**文献标志码:** A

## 0 引 言

在中国, 建筑能耗占社会总能耗40%以上, 其中, 空调和采暖约占建筑能耗的50%, 建筑节能已成为社会关注的焦点问题<sup>[1]</sup>。为实现中国“十三五”建筑低能耗的要求, 很多专家学者在诸如太阳能、地热能利用、余热回收等可再生能源作了很多研究。其中, 相变储能材料(PCM)由于本身具有高潜热值、相变温度区间窄、化学稳定性好、体积变化率低、吸放热循环次数多等优点, 在热能储存系统中得到广泛应用<sup>[2]</sup>。

国内外关于相变材料在建筑围护结构中的应用已有较多的研究, 常见的有PCM结合墙体<sup>[3-5]</sup>、PCM-Tromb墙<sup>[6]</sup>、PCM屋顶<sup>[7]</sup>、PCM地板<sup>[8-9]</sup>等。为使相变材料能满足全年使用的要求, 出现了将不同相变温度组合材料, 如双层PCM-地板<sup>[10]</sup>、组合式PCM墙体<sup>[11-13]</sup>等。这些研究表明, 相变材料和围护结构可明显消减温度的峰值、改善室内温度波动问题、提高室内的热舒适性和节约能量等功能。

然而, 相变材料具有热导率低的特点, 特别在炎热的夏季, 室外温度和太阳辐射较高或有内热源, 日间吸收过多的热量, 而夜间不能完全释热, 可能会造成次日PCM不能继续吸热, 从而失去相变材料蓄热储能的目的。为此, 本文提出一种热管-相变-辐射的新型墙体系统, 该结构从里向外的材质分别为水泥砂浆、红砖、相变

材料、微通道热管, 具体形式如图1所示。该系统是将热管的蒸发端嵌入PCM内部, 冷凝端固定涂有光谱选择性吸收涂层(丙烯酸树脂、固化剂、稀释剂)的辐射制冷板, 利用辐射板在夜间以天空辐射制冷、对流的形式进行释放PCM内部的热量。该墙体系统可实现炎热夏季夜间快速释热。

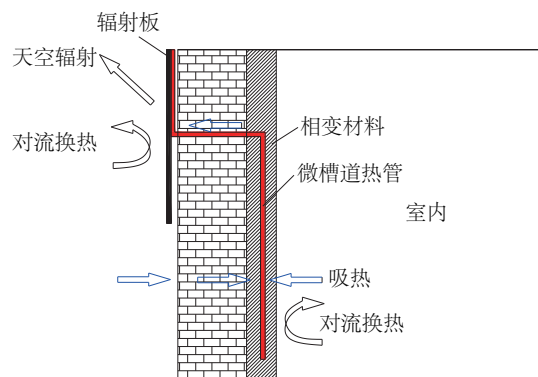


图1 相变-辐射-热管墙体结构图

Fig. 1 Schematic diagram of phase change-radiation-heat pipe wall

## 1 辐射制冷的原理和辐射板的制作

### 1.1 理想辐射体的提出

在炎热的夏季, 夜间室内外温差较低, 如果墙体仅

收稿日期: 2019-04-11

基金项目: 青海省科技合作项目(2017-HZ-807); 安徽省自然科学基金青年项目(JZ2019AKZR0248)

通信作者: 何 伟(1975—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能利用、建筑节能方面的研究。hwei@hfut.edu.cn

靠对流形式向外散热,相变材料往往不能完全释放其内在能量,为使相变材料更好地释热,可利用辐射的方式进行散热。地球大气层外宇宙空间的温度接近于绝对零度,大气层的存在却阻碍了地面物体向它直接散热。但在  $8\sim 13\ \mu\text{m}$  波段内,大气层中水蒸汽及  $\text{CO}_2$  的吸收能力较弱,这个波段具有很高的透明度,通常称为“大气窗口”<sup>[14-16]</sup>,通过这个窗口,地面辐射体可向外层空间辐射散热,可得到一定的冷却效果(辐射制冷)。这种无需消耗其他外界能量新颖的制冷方法,具有一定的研究价值。

根据文献[17]得知:理想的辐射体在太阳光谱段( $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ )需是理想的反射体,在“大气窗口”波段( $8\sim 13\ \mu\text{m}$ )是理想的发射体。当辐射板温度大于环境温度时,为得到较大的辐射功率,除上述 2 个波段外,其他波段也应该是理想的发射体,如图 2 所示。从图 2 可看出,理想辐射体白天的反射率为 1,不吸收太阳的辐射热,不会将太阳能通过热管导入墙内;而夜间的发射比为 1,则可将墙内的 PCM 热量辐出去。

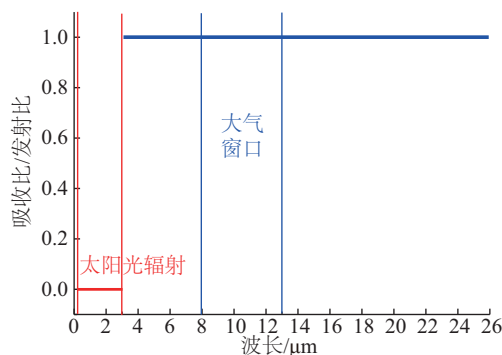


图2 理想辐射体的光谱吸收比/发射比

Fig. 2 Spectral absorptivity/emissivity of ideal radiators

## 1.2 选择性吸收涂层的制作与测试

基于以上的分析可知,夜间为取得较大的辐射功率,就必须获得发射比接近如图 2 的选择性吸收涂层。为此,本文在文献[18]研究的基础上将丙烯酸树脂、固化剂、稀释剂按体积 2:1:1 比例进行调和掺匀,用软毛刷将调和剂均匀地涂在铝板上,待晾干后,用相同方法再涂刷一层,辐射制冷铝板(下文简称辐射板)如图 3 所示。辐射板制作完成后,需要对此进行光学测试,本文采取光学仪器 DUV-3700 型紫外-可见-近红外分光光度计和 Bruker Equinox 55 型傅里叶变换激光中红外分光光度计进行测量,结果如图 4 所示。从图 4 可看出在太阳光谱段的平均发射比约为 0.311,大气光谱段平均发

射比为 0.916,其他光谱段分别为 0.829 和 0.904,虽比图 2 所示的发射比要差,但大于  $3\ \mu\text{m}$  光谱段大发射比较大,基本可实现日间反射大部分的太阳辐射能,而夜间可通过辐射制冷释放墙体内部的热能。需特别强调的是,由文献[19]的普朗克分布图可看出,常温下黑体的辐射功率大部分集中在波长为  $8\sim 13\ \mu\text{m}$  的“大气窗口”内,也就是说,“大气窗口”的发射比是整个辐射制冷效果的关键因素。



图3 辐射制冷铝板表面选择性吸收涂层结构图

Fig. 3 Structural diagram of selective absorption coating on radiative cooling aluminum plate

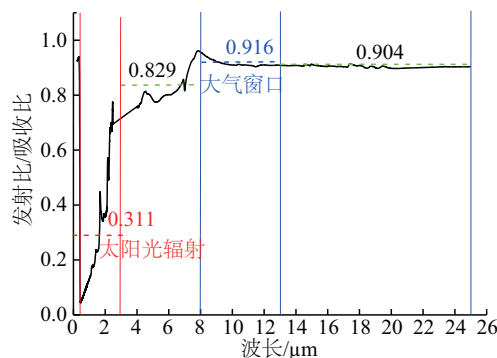


图4 实测辐射制冷板的吸收比/发射比

Fig. 4 Absorptivity/emissivity measured of radiative cooling plate

## 2 实验台搭建与性能评价

### 2.1 实验台搭建与温度监测

为比较辐射板的辐射性能,在合肥工业大学土木实验室楼顶搭建 3 个外尺寸相同的( $1000\ \text{m}\times 950\ \text{mm}\times 1000\ \text{mm}$ )实验房间(A、B、C),实验台如图 5 所示。除南墙外,每个房间的墙体(东、西、北、底)均采用厚度为 50 mm 的聚苯乙烯保温材料(EPS),而顶面为厚度为 75 mm 的 EPS 板。实验房间 A 南墙由尺寸为  $240\ \text{mm}\times 120\ \text{mm}\times 53\ \text{mm}$  的红砖砌筑而成,两侧均用 10 mm 的水

泥砂浆抹平;房间 B 南墙在 A 南墙的基础上增加厚为 20 mm 的相变材料(相变温度 28 ℃、潜热 250000 kJ/(kg·℃)、导热系数 0.2 W/(K·m));房间 C 南墙又在房间 B 的基础上增设微槽道热管,并在热管的冷凝端上固定 1.2 节所述的辐射板。为下文介绍方便,把实验房间 A、B、C 南墙依次命名为砖墙、相变-砖墙、相变-辐射-砖墙。

实验所用温度均采用精度为±0.2 ℃的铜-康铜 T 型热电偶进行测量,B、C 南墙内表面在中心点和两条对角线四等分点分别布置 5 个热电偶,房间中心和室外表面各布置 1 个热电偶以测室内外空气温度;热管的蒸发段均布 2 个热电偶,冷凝段则布置 1 个热电偶;辐射板布置一个热电偶,所有热电偶为避免辐射影响,在其端部使用铝箔纸进行遮挡。太阳辐照测量使用 TBQ-2 辐照仪(±11.04 μV/(W·m²)),室外空气速度使用热线式风速仪(±0.01 m/s)进行测量。所有温度和辐照值均由 HIOKI LR840-21 采集仪记录,采集时间间隔为 1 min。

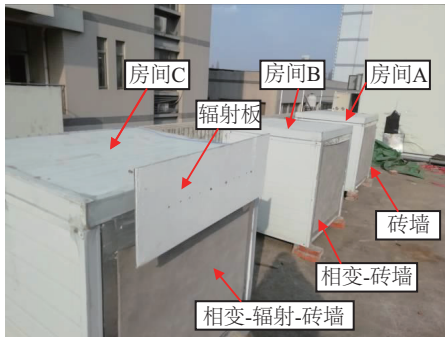


图5 测试房间实物图

Fig. 5 Photo of three testing rigs

## 2.2 墙体热性能评价

为评估墙体抵抗室外气候环境能力的大小,采用室外综合温度进行评价。综合温度是综合考虑室外空气温度、太阳辐射、墙面吸收比等因素的影响,综合温度( $t_z$ )表达式为:

$$t_z = t_w + \frac{\alpha I}{h_w} \quad (1)$$

式中, $t_w$ ——室外空气温度,℃; $\alpha$ ——墙面的吸收系数,0.65; $I$ ——太阳的辐射强度,W/m²; $h_w$ ——外墙对流换热系数,W/(m²·K),取 18.6。

夏季房间的冷负荷是由通过建筑围护结构得热组成,为了表征新型墙体的热工性能,需计算通过南墙的总得热量,并与砖墙、相变-砖墙的得热量进行比较,计算公式如下:

$$Q_{sw(PCM,ARC)} = \int_{t_1}^{t_2} h_i (T_{iw} - T_a) d\tau \quad (2)$$

$$\eta = \frac{Q_{sw} - Q_{sw(PCM,ARC)}}{Q_{sw}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $Q_{sw(PCM,ARC)}$ ——通过南墙(砖墙( $sw$ )、相变-砖墙(PCM)、相变-辐射-砖墙(ARC))的得热量,W/m²; $h_i$ ——墙体内表面的换热系数,取 8.6 W/(m²·K); $T_{iw}$ ——墙体内表面温度,℃; $T_a$ ——室外空气温度,℃。

## 3 实验数据分析

为测试新型相变-辐射-热管墙体的热工性能,本文对实验装置进行为期 7 d 的实验测试,挑选太阳辐射比较稳定的时间段:2018 年 10 月 4 日 18:00~10 月 7 日 18:00。从图 6 可看出,室外温度维持在 19~30 ℃;太阳辐射最大值约为 800 W/m²,出现在 12:00 左右,属于晴朗天气,室外风速为 1.5~2.5 m/s。

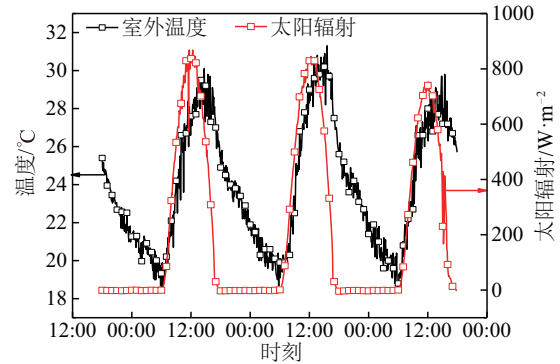


图6 室外空气温度与太阳辐射变化曲线图

Fig. 6 Evolution curves of outdoor temperature and solar intensity in three days

图 7 为室外综合温度连续 3 d 变化曲线图。从图 7 中可看出,第 1 天的室外峰值综合温度为 58.5 ℃,出现

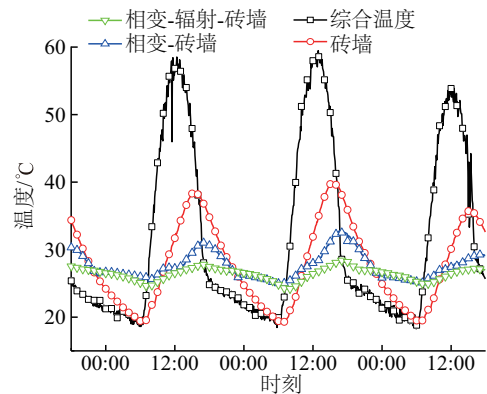


图7 综合温度和南墙内表面温度变化曲线图

Fig. 7 Evolution temperature curves of interior surface of south wall and solar-air for three rooms in three days

时刻为 12:20;而房间 A、B、C 南墙内表面峰值温度分别为 38.4、31.1、27.8 °C,相对应出现的时刻为 15:35、16:25、16:50 °C;温度分别下降 20.1、27.4、30.7 °C,时间分别约延迟 3、4、4.5 h;相变-砖墙温度(房间 B)下降 46.8%,而相变-辐射-砖墙(房间 C)则下降 52.5%,峰值延迟时间比相变-砖墙多 0.5 h,由此可见,相变-辐射-砖墙对室外环境气象参数的影响有较强的抑制作用。

图 8 为室内空气 3 d 内变化的趋势,从图 8 可看出,房间 A 的逐时温度要大于房间 B、C 的温度,而房间 B、C 温度相差不大,分析主要原因有:1)空气的热容量较小,受外界因素的影响较大;2)除南墙外房间的其他围护结构热阻不大。在实验测试的 3 d 内日平均温度分别为 26.4、26.3、25.9 °C,房间 B 和 C 相差 0.4 °C。因此可说明,加入辐射板后,夜间可通过辐射板释放储存在相变材料内的热量,以便次日相变材料的吸热。

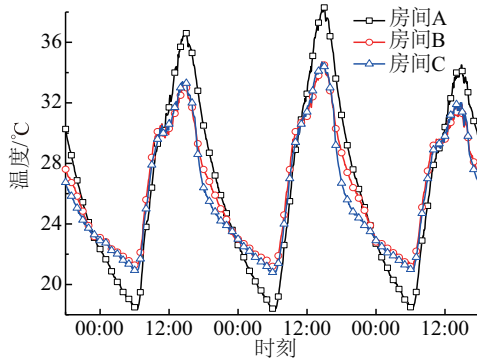


图 8 房间室内空气温度变化曲线图

Fig. 8 Evolution temperature curves of indoor air for three rooms in three days

图 9 为微槽道热管蒸发端与冷凝端的温度变化曲线,从曲线可看出,16:00 开始至次日 08:00,热管蒸发端的温度大于冷凝端的温度,根据热力学可知,此时的热管是工作的,时长达 16 h;也就是说,在这个时间段,热管可以将相变材料储存的热量传递给室外。反之,08:00~16:00,由于太阳的辐射强度较高,此时热管的冷凝段温度要大于蒸发段的温度,热管不能工作,即相变材料储存能量不会释放出去。

图 10 为辐射板与室外温度的变化曲线图,从图 10 可看出一般在 16:00 至次日 07:30,时长 15.5 h,此时辐射板温度低于室外空气温度,两者温差最大达到 2.1 °C,出现的时刻为夜间 23:00,说明夜间辐射制冷起到一定作用。此外,图 8、图 9 的数据可相互验证,热管工作时间和辐射板向外释热的时间基本一致,时长都为 16 h。

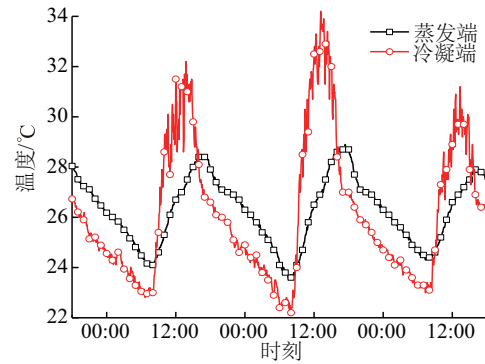


图 9 微槽道热管蒸发端与冷凝端的温度变化曲线

Fig. 9 Evolution temperature curves of evaporation side and condensation side of micro-channel heat pipe in three days

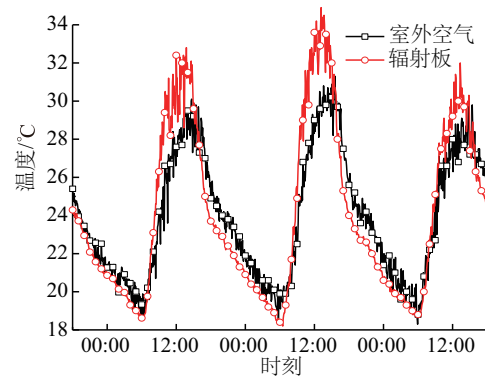


图 10 辐射板表面与室外空气温度的变化曲线

Fig. 10 Evolution temperature curves of radiative plate and outdoor air in three days

根据式(2)、式(3)计算出房间通过南墙的 3 d 内的得热量,以房间 A 南墙得热量为基准,可得出房间 B、C 的得热量减小值。从图 11 中可看出相变-砖墙可减少 21.3% 的得热量,而相变-辐射-砖墙则可减少 41.4% 的得热量,后者比前者减少 20.1% 得热量。由此可看出新型墙体在减少得热量(冷负荷)方面有较好的节能效果。

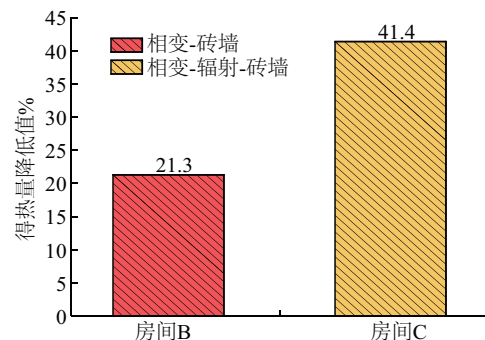


图 11 房间 B、C 的南墙得热量相对于房间 A 的减少率

Fig. 11 Reduction of heat-gain in room B and C based on room A



## 4 结 论

本文提出新型的相变-辐射-砖墙节能墙体,该墙体集合了相变材料、热管、辐射制冷三者的优点,通过搭建试验台并对此进行为期 3 d 的实验测试,测试结果如下:

1)从室外综合温度的峰值来看,相变-砖墙峰值温度(房间 B)下降 46.8%,而相变-辐射-砖墙的峰值温度(房间 C)下降 52.5%,后者比前者多下降 5.7%;相应的峰值时间分别为 4.0、4.5 h,相变-辐射-砖墙则比相变-砖墙墙体多延迟 0.5 h。

2)从室内空气温度值来看,3 个房间的日平均分别为 26.4、26.3、25.9 °C,后两者相差 0.4 °C,新型墙体在降低室内温度方面具有一定的积极作用。

3)从通过南墙的得热量来看,加入相变材料和热管后,得热量都有一定减少,房间 B 的得热量比房间 A 减少 21.3%,房间 C 比房间 A 减少 41.4%,即房间 C 比房间 B 减少近 20%,说明在夏季新型墙体对减少得热量(冷负荷)方面有较好的节能作用。

通过以上的分析可以看出相变-辐射-砖墙墙体在降低室内温度和得热量等方面具备一定的节能效果。今后将在墙体的理论方面需做进一步研究,为该新型墙体以后的应用提供理论和实践依据。

### [参考文献]

- [1] 张爱军,孙志高,李成浩,等.相变窗传热特性实验研究[J].制冷学报,2018,39(3):114-118.  
ZHANG A J, SUN Z G, LI C H, et al. Experimental study on heat transfer of PCM-filled window[J]. Journal of refrigeration, 2018, 39(3): 114-118.
- [2] LIANG Z F, ZHOU G P, ZHANG Y H, et al. Vibration analysis and sound field characteristics of a tubular ultrasonic radiator[J]. Ultrasonics, 2006, 45(1-4): 146-151.
- [3] KONG X F, LU S L, HUANG J Y, et al. Experimental research on the use of phase change materials in perforated brick rooms for cooling storage[J]. Energy and buildings, 2013, 62: 597-604.
- [4] 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.  
XIAO W, WANG X, ZHANG Y P, Thermal analysis on shape-stable PCM panel as partition walls for energy storage in winter[J]. Journal of engineering thermophysics, 2011, 32(1): 123-125.

- [5] 邓安达,李胜波,庄春龙,等.相变储热轻质围护结构夏季隔热节能的实验研究[J].暖通空调,2009,39(9):75-79.  
DENG H Z, LI S B, ZHANG C L, et al. Experimental study of heat insulation and energy performance of lightweight PCM building envelope[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2009, 39(9): 75-79.
- [6] 徐礼颐,罗成龙,季杰,等.双流道-中间隔热型太阳能相变蓄热墙体系统实验研究[J].太阳能学报,2017,38(5):1227-1232.  
XU L J, LUO C L, JI J, et al. Experimental research of a building-integrated double-channel and middle positioned-insulation solar PCM wall[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(5): 1227-1232.
- [7] LU S L, CHEN Y F, LIU S B, et al. Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials[J]. Energy and buildings, 2016, 127: 159-169.
- [8] 叶宏,何汉峰,葛新石.定形相变贮能式地板辐射采暖系统的实验研究[J].太阳能学报,2004,25(5):651-656.  
YE H, HE H F, GE X S, et. Experimental study on the radiant floor heating system utilizing form-stable PCM as the thermal mass[J]. Acta energiae solaris sinica, 2004, 25(5): 651-656.
- [9] 闫全英,岳立航,霍冉.低温热水辐射供暖相变墙板传热特性影响因素的研究[J].建筑科学,2013,29(6):89-93.  
YAN Q Y, YUE L H, HUO R. Research on factors influencing heat transfer characteristics of phase change wallboard with low-temperature hot water radiant heating[J]. Building science, 2013, 29(6): 89-93.
- [10] XIA Y, ZHANG X S, Experimental research on a double-layer radiant floor system with phase change material under heating mode[J]. Applied thermal engineering, 2016, 96: 600-606.
- [11] 孟二林,于航,张美玲,等.组合式相变围护结构夏季换热性能试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(10):1572-1578.  
MENG E L, YU H, ZHANG M L, et al. Experimental research on summer heat exchange performance of combined phase change materials envelopes[J]. Journal of Tongji University(nature science), 2013, 41(10): 1572-1578.
- [12] DIACONU B M, CRUCERU M. Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings[J]. Energy and buildings,

- 2010, 42(10): 1759-1772.
- [13] EL OMARIK, LE GUER Y, BRUEL P. Analysis of micro-dispersed PCM-composite boards behavior in a building's wall for different seasons[J]. Journal of building engineering, 2016, 7: 361-371.
- [14] 孙孝兰, 葛新石. 辐射致冷及辐射体的光谱选择性对致冷效果的影响[J]. 太阳能学报, 1982, 3(2): 128-136.
- SUN X L, GE X S, radiation cooling and the effect of spectral selective characteristics of the radiator on cooling power[J]. Acta energiae solaris sinica, 1982, 3(2): 128-136.
- [15] 胡明科, 裴刚, 郑仁春, 等. 太阳能集热-辐射制冷复合表面及其试制与性能分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1248-1254.
- HU M K, PEI G, ZHENG R C, et al. Preliminary manufacture and analysis of a spectral selectivity surface for both solar heating and radiative cooling [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(5): 1248-1254.
- [16] 芮智刚, 左然. 太空辐射致冷空调装置的实验研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 57-62.
- RUI Z G, ZUO R, Experimental study on air conditioning plant with space radiative cooling[J]. Journal of refrigeration, 2010, 31(2): 57-62.
- [17] HUANG Z F, RUAN X L, Nanoparticle embedded double-layer coating for daytime radiative cooling[J]. International journal of heat and mass transfer, 2017, 104: 890-896.
- [18] Bagiorgas H S, Mihalakakou G. Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling [J]. Renewable energy, 2008, 33(6): 1220-1227.
- [19] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: p. 365-367.
- YANG S M, TAO W Q. Heat transfer[M]. 4th Ed. Beijing: High Education Press, 2006: 365-367.

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON PHASE CHANGE WALL BASED ON SKY RADIATIVE COOLING AND MICRO-CHANNEL HEAT PIPE

Yu Cairui<sup>1,2</sup>, Shen Dongmei<sup>2</sup>, He Wei<sup>1</sup>, Hu Zhongting<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, China)

**Abstract:** To prevent the excessive of the excessive indoor temperature in summer and improve the energy savings of building walls, a novel wall is proposed, which is made up of the phase change materials (PCMs), micro-channel heat pipes (MCHP) and the radiative cooling (RC) plate with acrylic resin. In order to investigate the thermal performance of the novel wall, an experimental room (Room C) is built as reference room in which the south wall is RC-MCHP-PCMs wall. Additionally, two same size experimental rooms are also built, one of which the south wall was brick wall (Room A), other of which the south wall is PCMs-brick wall (Room B). The experimental results show: 1) the interior surface peak temperature of south wall for Room C is 30.7 °C lower than the solar-air peak temperature, which is reduced by 52.5% and the time lag is 4.5 h; 2) the average daily air temperature of Room C is 0.4 °C lower than that of Room B; 3) the heat gain of Room C is respectively 41.4% and 21.3% lower than that of Rooms A and B through the south wall. Totally, the novel wall has a good practical effect on reducing temperature and heat gain in summer season.

**Keywords:** building energy saving; phase change materials; micro-channel heat pipe; radiative cooling; atmospheric window