

相变墙体与夜间通风改善轻质建筑室内热环境

李百战¹, 庄春龙^{1,2}, 邓安仲², 李胜波², 沈晓东²

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400030; 2. 后勤工程学院, 营房管理与环境工程系, 重庆 400016)

摘要:将自制复合有机相变材料,与EPS保温材料相粘和,制作成轻质建筑用墙体材料,结合夜间通风技术,在重庆地区进行了含相变材料层和不含相变材料层轻质房间的室内热环境对比实验,以分析相变材料用量、相变温度及相变墙体结构等因素对相变墙体的蓄热、放热性能及对室内热环境的影响。实验结果表明:相变材料应用于轻质房间,能显著增强围护结构的热惰性,提高室内的热舒适性,采取夜间通风技术,可以有效地将日间蓄积的热量散至室外;含相变墙体材料房间与普通房间相比较,室内温度最高降低11℃左右,节能效果显著;室内平均温度符合《野营住房空间与环境参数限值》(GJB 4306-2002)中6.2条规定的3级要求;相变材料用量及相变温度对室内温度的控制效果较为明显,采用不同的相变温度,并将相变墙体房间相变材料用量提高1倍,两轻质房间室内温差最大值从3℃增大至11℃左右;进行相变墙体结构设计时,采取不同相变温度的材料搭配使用可以大幅提高其使用效果。

关键词:通风;室内热环境;节能;相变材料;轻质建材

中图分类号:TU831 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)03-0109-05

Improvement of Indoor Thermal Environment in Light Weight Building Combining Phase Change Material Wall and Night Ventilation

LI Bai-zhan¹, ZHUANG Chun-long^{1,2}, DENG An-zhong², LI Sheng-bo²

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Department of Barracks' Management and Environmental Engineering, PLA Logistic Engineering University, Chongqing 400016, P. R. China)

Abstract: Comparative experiments of indoor thermal environment were undertaken, with night ventilation, in lightweight buildings with Phase Change Material (PCM) and without PCM. And the lightweight building fabric with PCM is made of self-making compound organic PCM and attached with EPS. Analysing the influence of PCM dosage, phase change temperature and PCM wall structure on the PCM wall performance of heat storage and release and indoor thermal environment, it was shown that the thermal inertia of enclosure could be advanced with PCM and indoor thermal comfort could be improved as well. With the night ventilation, the heat accumulated in daytime could be released outdoor. And the maximum indoor temperature decreased 11 °C in PCM building compared with that in common building, which met the third grade requirement from *spatial and indoor environmental parametric requirements for camping* (GJB 4306-2002) and held remarkable energy efficient potential. With regard to the influencing factors, dosage and phase change temperature were the key factors. And with different phase change temperatures, the temperature difference could be increased from 3 °C to 11 °C when PCM dosage doubles. Optimization design of Phase change temperature and dosage could improve the PCM performance

收稿日期:2008-12-16

基金项目:国家“十一五”科技支撑重大项目课题(2006BAJ02A09, 2006BAJ02A13-4);重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2008BB0145)

作者简介:李百战(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事建筑节能及通风空调方面研究,(E-mail)baizhanli@cqu.edu.cn.

effectively.

Keywords: ventilation; indoor thermal environment; energy efficiency; phase change materia(PCM); light weight building materials

近年来随着材料技术的发展,采用不同技术对相变材料(Phase Change Material-PCM)进行封装处理,并将相变材料加入到石膏板、塑料、水泥及其他墙板中,作为建筑围护结构的一部分,不但可起到储存能量、保温绝热的作用,而且起到提高墙体热惰性,降低室内温度波动,减少建筑能耗的作用^[1-3]。轻钢结构等轻质建筑因具有自重轻、抗震性能好、施工速度快、工业化程度高等一系列优点,广泛地应用在体育场所、娱乐场所、车站、货场、野营活动建筑以及其它民用建筑物的建设上。但由于轻质建筑热惰性较低,室内温度波动较大,热舒适性较差,因此应用上受到了限制。为解决这一问题,国内外学者提出将相变材料应用于轻质建筑,并开展了一些相关的研究工作^[4-7]。

夜间通风技术被认为是具有较大节能潜力的被动式节能技术之一。对于夜间通风技术,国内外学者也开展了大量的工作。Geros 等在不同建筑结构、通风情况和气候条件下,研究了夜间通风的影响因素和限制条件^[8], Roucoult 等人研究了建筑热惯性与夜间自然通风的相互影响^[9],王昭俊等利用夜间通风改善室内热环境进行了实验研究^[10]。

对于相变材料用于轻质建筑围护结构作为储热功能层,其效果与材料用量、相变温度及相变墙体结构设计等因素间的关系,目前国内外研究的较少。对于昼夜温差较大地区,应用相变墙体与通风技术改善夏季室内热环境的效果较为理想,有关文献已有所论述^[11]。对于昼夜温差不大的炎热地区,利用相变墙体蓄热,可能引起热量在室内聚集的问题,即前一天蓄存的热量,如不能很好的散至室外环境,将会在次日通过墙体传热散至室内,达不到利用相变材料改善室内热环境的目的^[12]。基于上述问题,本研究采用溶胶-凝胶法制备了复合相变材料,制作了二种相变温度的相变墙体材料,并在围护结构上做了调整。同时结合夜间通风技术,在重庆地区进行了夏季工况下相变墙体房间与普通墙体房间的室内温度对比测试研究,初步分析了相变墙材材料用量、相变温度及墙体结构设计等对相变墙体的蓄热、放热性能及改善室内热环境的影响,以及减少建筑能耗的可行性。

1 实验材料及方案

1.1 实验材料制备

1.1.1 复合相变材料制备 采用溶胶-凝胶法,以

正硅酸乙酯(TEOS)、无水乙醇、蒸馏水、脂肪酸等为原材料,二氧化硅作为载体,根据重庆地区夏季室外空气温度的特点及为达到《野营住房空间与环境参数限值》(GJB 4306-2002)中规定的三级要求,制备了相变温度分别为 33℃及 40℃的两种复合相变材料。复合相变颗粒材料经过多次加热-冷却循环相变后,在相变温度点以上时依然保持坚硬固体颗粒状。图 1 为研制的复合相变材料。



图 1 复合相变材料样品

1.1.2 相变材料特性 采用差示扫描量热仪(DSC)对样品分析。相变点温度为 33℃时,相变潜热为 77 J/g,相变点温度为 40℃时,相变潜热为 85 J/g。由于二氧化硅凝胶是多孔结构,在溶胶向凝胶转化过程中,将胶体内的相变材料“封装”进孔隙内。其孔径多数在 100 nm 以下,具有很大的表面作用力,将相变材料牢牢地吸附在孔壁内,同时其孔结构本身也有一定的物理约束作用,有效地防止相变材料渗漏、逃逸。制备的复合相变材料即使在相变点上也呈固体粉末状,适合于作为功能填料制备成涂料、板材等使用^[13-15]。

1.1.3 相变材料轻质板 国内外许多学者在相变储热墙体材料制作方面进行了研制工作^[16-18]。多采用将石蜡等相变材料与建材基体(石膏板(不含纤维)、石膏纤维板及粘土砖)相结合,制成蓄能建材。制作工艺较为复杂,或易产生液相渗漏的问题。

采用溶胶-凝胶工艺封装后的复合相变材料以固体颗粒的形态能够方便地制作成板材形式,可直接应用在墙体、地板及天花板等建筑围护结构中。本研究制作两种相变温度的墙体材料,其相变温度分别为 40℃及 33℃(40℃相变材料,记为 40#PCM、33℃相变材料,记为 33#PCM),按 5 kg/m²面密度制作成约 6 mm 厚的板材。采用苯丙乳液作为粘结剂,将复合相变材料按设计密度复合到 EPS 泡沫板表面。乳液干燥固化后,将复合相变材料和 EPS 泡沫

板粘结成一体化板材,相变材料轻质板如图 2 所示。

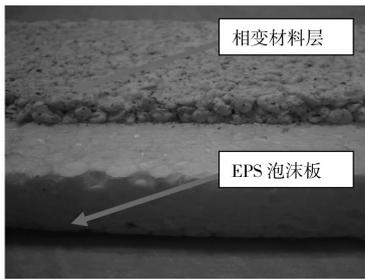


图 2 相变材料轻质板

1.2 实验方案

1.2.1 实验房设置 分别在重庆市某八层建筑楼顶完全无遮挡位置搭建 2 个相同尺寸的实验房:一个为对比用的普通实验房,一个为围护结构含相变材料的 PCM 实验房,见图 3。实验房间的尺寸:长×

宽×高 = 1.5 m×1.5 m×2.0 m;门窗:东墙开门 1.5 m×0.6 m;南北墙对角线开窗 0.3 m×0.4 m。

采用木框架+50 mm 厚的轻质 EPS 泡沫板结构,内外墙面用 1.2 mm 厚木层板,外墙面刷白色外墙涂料。根据不同设计需要将相变材料层安装在木层板和 EPS 泡沫板之间,具体结构见表 1。



图 3 实验房间

表 1 实验房间围护结构组成

实验房编号	外墙面	PCM 层一	保温材料层	PCM 层二	内墙面
普通实验房	1.2 mm 厚木工板		50 mm 厚 EPS 泡沫板		1.2 mm 厚木工板
40# PCM 房	1.2 mm 厚木工板	6 mm 厚 40# PCM	50 mm 厚 EPS 泡沫板		1.2 mm 厚木工板
40#+33# PCM 房	1.2 mm 厚木工板	6 mm 厚 40# PCM	50 mm 厚 EPS 泡沫板	6 mm 厚 33# PCM	1.2 mm 厚木工板

1.2.2 测试方案 分别在对比普通实验房和 PCM 实验房中间距地板 1.5 m 高度设置温度传感器,在室外无太阳直射、通风,距楼顶屋面 1.5 m 处设置温度传感器记录室外环境温度。计算机控制的温度巡检仪每 3 min 检测记录各点相应的温度。

分别于 2007 年 8 月 13 日~14 日、8 月 23 日~26 日进行了总计 4 d 的实验。方案为:采取 40# PCM 及 40#+33# PCM 相互组合的相变墙体实验房与普通实验房进行对比实验,测试两轻质房间室内温度变化情况及相变点选用和材料用量对室温的影响。同时又分别采取了白天关闭门窗,夜间打开窗户通风或关闭窗户两种工况的实验。用以测试夜间通风技术对相变墙体的放热性能及改善室内热环境的作用。

高,相对于普通墙材实验房室内温度约低 3~4℃。下午 16:00 以后,相变材料完全熔化,不再起到吸热控温作用,室内温度逐渐趋于一致。夜间(19:00 以后),当围护结构外表面相变材料层温度降低到 40℃后,相变材料开始结晶释放热量。在向室外环境释放热量的同时,也经过墙体的导热作用将热量传递至室内,减缓室内温度的降低。由于实行夜间通风,两实验房间温度下降均较快,基本和环境温度相一致,相变材料房间和普通房间室内温度差别在 1℃以内。同时,复合相变材料在夜间完全结晶,实现蓄热量的释放。但白天室内温度在 35℃以上,不能满足《野营住房空间与环境参数限值》(GJB4306—2002)中 6.2 条规定的三级要求。

2 结果分析

2.1 40# PCM 实验结果

图 4 为将相变温度为 40℃的相变材料颗粒(40# PCM)按 5kg/m² 的面密度粘结在 EPS 泡沫板外侧构成的相变墙材实验房与普通房间的室内外温度变化曲线,测试时间为 2007 年 8 月 13 日 21:00~8 月 14 日 21:00。当阳光照射到 40# PCM 实验房表面,外墙表面温度超过 40℃后,相变材料开始熔化并吸收热量,减缓热量向室内传递,控制室内温度升

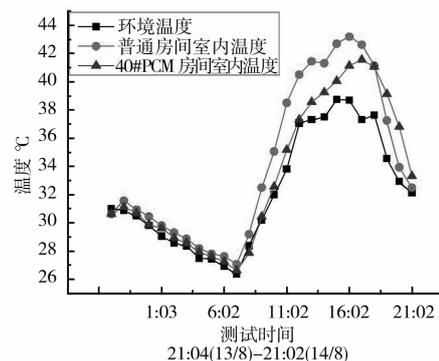


图 4 40# PCM 房和普通试验房室内温度变化曲线(夜间通风)

2.2 40# + 33# PCM 实验结果

图 5, 6, 7 为相变温度为 40 °C (40# PCM) 的复合相变材料颗粒按 5 kg/m² 的面密度粘结复合在 EPS 泡沫板外侧, 相变温度为 33 °C (33# PCM) 的复合相变材料颗粒按 5 kg/m² 的面密度粘结复合在 EPS 泡沫板内侧时的相变实验房与普通房间的室内外温度变化曲线。当外墙表面温度超过 40 °C 后, 外层 40# PCM 相变材料层开始熔化并吸收热量, 减缓热量向室内传递。当室内侧相变材料温度达到 33 °C 时, 33# PCM 相变材料层开始熔化吸热, 进一步减缓热量传导至室内, 控制室内温度升高。在室外环境温度达到 39 °C 时, 仍然能够控制室内温度在 35 °C 以下, 最高室内温度比普通实验房间低 11 °C 左右。该轻质相变墙材实验房在夏季无空调情况下, 室内平均温度满足《野营住房空间与环境参数限值》(GJB 4306-2002) 中规定的三级要求。

根据《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2005) 条文说明, 在冷却工况下, 室内计算温度每提高一度, 能耗可减少 8%~10%。与之相对应, 在夏季空调工况下, 降低室内空气温度, 同样可以起到降低空调设备能耗的效果。因此, 可以预测在重庆地区夏季空调工况下, 相变墙材轻质实验房与普通轻质房相比较, 其节能效果显著。

与单独使用 40# PCM 实验结果相比较, 可以看出, 由于采用 2 种相变温度的相变材料, 且相变材料用量提高一倍, 室内温度的控制效果更为明显。两轻质房间室内温差最大值从 3 °C 增大至 11 °C 左右, 同时有效储热时间更长, 全天控温更均匀。这说明在应用相变材料改善轻质房间夏季室内热环境时, 应注重相变材料用量及相变温度点的选取对效果的影响。在相变墙体结构设计时, 不同相变温度的材料搭配使用可以大幅提高其使用效果。

图 5 为两实验房间在未采用夜间通风情况下于 8 月 23 日 9:42~24 日 9:41 连续 24 h 的室内外温度变化曲线。从图中可以得出, 40# + 33# PCM 房夜间温度下降缓慢, 比普通实验房高 3~4 °C。图 6、图 7 分别为 8 月 24 日 7:42~26 日 7:41 连续 2 个昼夜实行夜间通风后的室内外温度曲线。从图中可以看出, 由于采用夜间通风技术, 两实验房间室内温度下降均很快, 基本和环境温度相一致。这说明采用夜间通风技术可有效促进相变墙材日间蓄热量的释放。

图 6 及图 7 的区别在于: 图 6 所示为 24 日 7:42~25 日 7:43 全晴天气的 24 h 室内外温度曲线, 图 7 为 25 日 7:42~26 日 7:41 阵雨天气情况的 24 h 室内外温度变化曲线。25 日中午 2 点左右有阵雨出现, 从图 7 中可以看出, 由于室外气温急剧波动, 普通实验房温度也同样随着大幅度波动, 而 40# + 33#

PCM 房室内温度波动很小。这进一步说明了围护结构加入相变材料后, 热惰性明显提高, 有利于室内温度的平稳, 提高了轻质建筑的室内热舒适性。

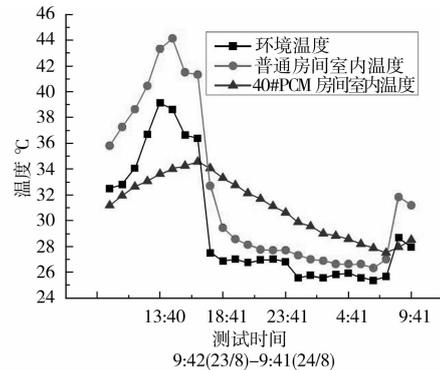


图 5 40# + 33# PCM 房和普通试验房室内温度变化曲线(无夜间通风)

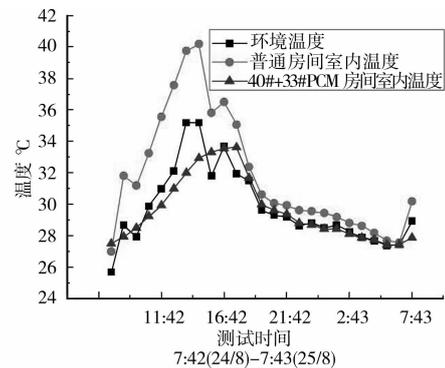


图 6 40# + 33# PCM 房和普通试验房室内温度变化曲线(夜间通风)

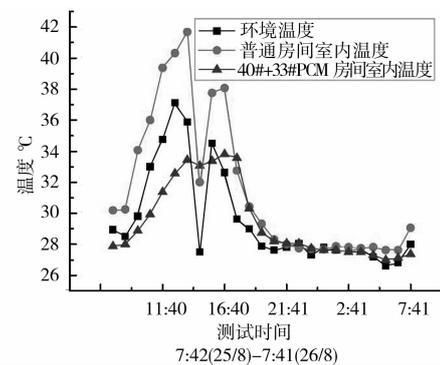


图 7 40# + 33# PCM 房和普通试验房室内温度变化曲线(夜间通风, 午后下雨)

3 结 论

1) 将相变材料制作在围护结构中, 能显著增强围护结构的热惰性, 保持室内良好的热稳定性。在夏季炎热的环境条件下, 具有明显的控制室内温度升高的作用, 可降低室内温度最高达 11 °C。

2) 在炎热气候条件下, 利用相变墙体材料改善室内热环境时, 采用夜间通风技术可以将相变材料

积蓄的热量有效地释放到室外环境中,避免热量在房间蓄积。

3)相变墙体轻质实验房与普通轻质房相比较,节能效果显著。

4)相变材料直接用于建筑物围护结构作为储热功能层,其使用效果与室外环境有关,更受相变材料用量、相变温度及相变墙体结构设计等因素影响。

本研究对于相变材料作为墙体材料直接在轻质围护结构中的应用,仅实现对夏季隔热性能这一单一特定类型的研究。对于相变墙体材料层的优化设计、经济性及不同气候区的适用性等,还需大量的后续研究工作。

参考文献:

- [1] HADJIEVA M, STOYKOV R, FILIPORA TZ. The composite salt-hydrate concrete system for building energy storage[J]. *Renew Energy*, 2000, 19(1):111-118.
- [2] ISMAIL K A R, HENRIQUEZ J R. Thermally effective windows with moving phase change material curtains[J]. *Applied Thermal Eng*, 2001, 21(18): 1909 - 1913.
- [3] KHUDHAIR AMAR M, FARID MOHAMMED M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials[J]. *Energy Conservation and Management*, 2004,45(2):263 - 267.
- [4] A PASUPATHY, R VELRAJ. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40 :193 - 203.
- [5] FRE' DE' RIC KUZNIK, JOSEPH VIRGONE, JEAN NOEL. Optimization of a phase change material wallboard for building use [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28 :1291 - 1298.
- [6] C K HALFORD, R F BOEHM. Modeling of phase change material peak load shifting [J]. *Energy and Buildings*,2007 ,39:298 - 305.
- [7] ATHIENITIS A K, LIU C, HAWES D, et al. Investigation of the thermal performance of a passive solar test room with wall latent heat storage[J]. *Build Environment*,1997,(32):405 - 410.
- [8] GEMS V, SANTAMOURIS M, TSANGRASOULIS A, et al. Experimental evaluation of night ventilation phenomena[J]. *Energy and Buildings*, 1999, 29(2): 141 - 154.
- [9] J M ROUCOULT, DOUZANE O, LANGLET T. Incorporation of thermal inertia in the aim of installing a natural night time ventilation system in buildings[J]. *Energy and Buildings*,1999,29(2):129-133.
- [10] 王昭俊,孙晓利,赵加宁,等. 利用夜间通风改善办公建筑热环境的实验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*,2006, 38(12):2084-2088.
- WANG ZHAO-JUN, SUN XIAO-LI, ZHAO JIA-NING, et al. Experimental study on night ventilation to improve thermal environment in office rooms [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(12):2084-2088. (in chinese)
- [11] 林坤平,张寅平,江亿. 我国不同气候地区夏季相变墙房间热性能模拟和评价[J]. *太阳能学报*,2003,24(1): 46-52.
- LIN KUNPING, ZHANG YIN-PING, JIANG YI. Simulation and evaluation on the thermal performance of pcm wallboard rooms located in various climate regions of china in summer[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2003,24(1):46-52. (in chinese)
- [12] 殷维,覃小玲,彭建国,等. 夜间通风与建筑蓄热的非线性耦合[J]. *建筑热能通风空调*, 2006,25(3): 81-82.
- YIN WEI, QIN XIAO-LING, PENG JIAN-GUO, et al. Nonlinear coupling between night ventilation and thermal mass [J]. *Building Energy & Environment*, 2006,25(3): 81-82. (in chinese)
- [13] 邓安仲,李胜波,沈小东,等. 脂肪酸/SiO₂ 复合相变材料储能行为研究[J]. *材料导报*, 2007,21(5A):282 - 286.
- DENG AN-ZHONG, LI SHENG-BO, SHEN XIAO-DONG, et al. Study on preparation and energy-storing behavior of fatty acid/SiO₂ composite phase changematerial[J]. *Material Review*, 2007, 21(5A): 282-286. (in chinese)
- [14] M MISHEVA, N DJOURELOV, F M A MARGACA, et al. Positronium study of porous structure of sol-gel prepared SiO₂: influence of pH [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2001,279:196 - 203.
- [15] ZHUANG CHUN-LONG, DENG AN-ZHONG, LI SHENG-BO, et al. The field study of temperature distribution in the floor radiation heating room with new phase change material[J]. *Journal of Center South University Of Technology*,2007(14):91 - 94.
- [16] AHMET SAIL, KAMIL KAYGUSUZ. Some fatty acids used for latent heat storage:thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling[J]. *Renewable Energy*,2003,28:939 - 948.
- [17] AHMET SARY. Thermal reliability test of some fattyacids as PCMs used for solar therm al latent heat storage applications [J]. *Energy Conversion and Management*,2003,44:2277 - 2287.
- [18] FENG GUO-HUI, CAO GUANG-YU. Experiment and field study of energy storage and exchange on PCM wallboard room using night ventilation [C]//*Heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies*. France: Grenoble, 2005: 301 - 206.

(编辑 陈蓉)