

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.07.006

热风式相变蓄热建筑热特性研究

刘馨璐¹, 李隆键¹, 崔文智¹, 冯雅², 李维平¹

(1. 重庆大学 能源与动力工程学院; 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 中国建筑西南建筑设计研究院有限公司, 成都 610041)

摘要:文中设计、加工了一种热风式相变蓄热板, 布置在建筑墙体内侧, 应用于建筑采暖系统中。实验测试和分析了基于相变蓄热板的模型房间换热特性, 在 TRNSYS 软件中搭建相变蓄热房间的动态热模型, 模拟得到相变蓄热房间热特性的变化规律。结果表明, 安装有相变蓄热系统的房间平均温度高出普通房间 4~5 °C, 说明该相变蓄热系统可以提高房间温度, 改善房间的热舒适性, 建立的相变蓄热系统动态热特性模型能较好地预测温度变化过程, 为太阳能热风式相变蓄热建筑设计提供了参考。

关键词:相变蓄热建筑; 热特性测试; TRNSYS 软件

中图分类号: TK512.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)07-053-08

Study on the thermal properties of hot air phase change thermal storage building

LIU Xinlu¹, LI Longjian¹, CUI Wenzhi¹, FENG Ya², LI Weiping¹

(1. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technology and Systems, Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. China Southwest Architectural Design and Research Institute Corp., Ltd., Chengdu 610041, P. R. China)

Abstract: In this study, a phase change thermal storage plate, heated by hot air, was designed. It could be mounted on the internal wall of the building and applied in the building heating system. The thermal characteristics of the model room assisted by the phase change thermal storage system was experimentally studied and compared with that of ordinary room. The TRNSYS model of the phase change thermal storage building was employed to simulate the transient thermal characteristics. The measured and simulated results show that the temperature of the room assisted by the thermal storage system increased from 4 °C ~ 5 °C compared with the ordinary room, suggesting that the proposed system can improve the thermal comfort of the room. In addition, the TRNSYS model of the phase change thermal storage building can precisely forecast the transient thermal characteristics.

Keywords: phase change thermal storage building; measurement of transient thermal characteristics; TRNSYS model

收稿日期: 2020-02-17

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAJ03B04)。

Supported by National Science and Technology Support Program during the 12th Five-year Plan (2013BAJ03B04).

作者简介: 刘馨璐(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事建筑储能研究, (E-mail)530376090@qq.com。

通信作者: 李隆键, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)longjian@cqu.edu.cn。

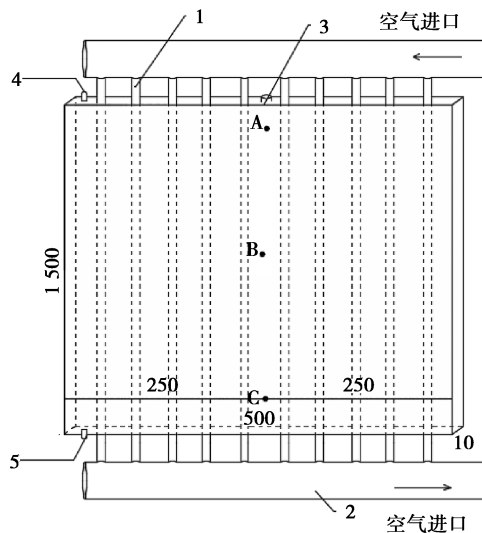
相变蓄热是利用相变材料在发生相变时所产生的较大能量的吸收或释放而进行的能量存储方式^[1]。相变材料作为蓄热介质,能减小房间昼夜温差,增加室内热舒适性。国内外相变蓄热系统的相关研究中^[2-5],多将相变材料敷设于地板下构成地板采暖系统,主要有结合太阳能空气集热器和利用电加热 2 种类型,但无论采用哪种系统,通常要在相变层上再铺设 8~14 cm 厚的普通地板和保温层,导致相变层到室内空气的传热过程热阻较大,需夜间通风将储存的热量送入室内。目前,关于相变蓄热墙的研究,多采用封装有相变材料的塑料管,通过铁架横向固定,利用管外的热空气,加热相变材料并蓄热^[6]。将热空气通过固定在相变蓄热板内的管道与相变材料换热,并将相变蓄热板置于墙体内侧形成相变蓄热墙,与恒定功率的电加热器和风机共同组成热风式相变蓄热采暖系统。蓄热系统能明显减小相变板与室内空气之间的传热热阻,白天将热能储存在管外相变材料中,夜间通过自然散热将蓄热板储存热量释放出来用于采暖,减少了夜间通风能耗。该系统可采用太阳能空气集热器加热,结合被动式太阳房,应用于昼夜温差大、太阳辐射强的寒冷地区(如西北、青藏高原地区),降低采暖能耗。笔者从实验和模拟两方面对该系统进行了研究,通过实验测试热风式相变蓄热系统采暖效果,建立了热风式相变蓄热建筑热特性仿真模型,通过实验结果进行验证,为热风式相变蓄热建筑的推广应用奠定基础。

1 实验方案

为研究热风蓄热的采暖效果,建造了尺寸和围护结构构造均相同的两间房进行实验。房间地点在重庆,一间装有相变蓄热系统,另一间为无相变蓄热系统的普通房间。房间长、宽、高尺寸分别为 1.5 m×1.5 m×1.7 m,东北墙安装有夹心塑钢门(0.6 m×1.5 m),房屋主体结构采用 190 m 空心砖,水泥砂浆层厚度为 10 mm,屋顶采用夹心彩钢板,保温层厚 5 mm。

实验采用的相变材料为癸酸(CA),密度 850 kg/m³,相变温度 27.9~31.2 °C,熔化潜热 142.7 J/g,凝固潜热 145.1 J/g,液相比热 2.08 kJ/(kg·°C),液相和固相导热系数分别为 0.14 W/m·°C、0.19 W/m·°C。

热风式相变蓄热板平铺于实验房间西南墙内侧,共 3 块,单块相变蓄热板的外观尺寸为 500 mm×1 500 mm×10 mm,采用 1 mm 厚不锈钢板焊接而成,如图 1 所示。相变蓄热板的顶部设有灌注口和排气孔,底部设有排液口,内部灌注有 28.6 kg 的相变材料,灌注相变材料时,相变蓄热板内部多余的空气,可由蓄热板顶部的排气孔排出。在相变蓄热板水平方向的中心位置,布置有 3 个温度测点,如图 1 所示,A 点、C 点分别距顶部和底部 10 mm,B 点距顶部 700 mm。此外,相变蓄热板内部平均布置有 10 根长度为 1 600 mm 的进风铜管,铜管的外径为 8.5 mm,内径为 8 mm,铜管的间距为 50 mm,在铜管两端布置有不锈钢集流管,热风沿图中箭头方向在管内流动,3 块相变蓄热板的不锈钢集流管串联连接。图 2 为采暖系统实验图,包括相变蓄热板的实物图和实验房间的外观。



注:1.热风铜管;2.不锈钢集流管;3.排气孔;4.灌注口;5.排液口

图 1 相变蓄热板结构示意图

Fig. 1 Schematic of the heat storage plate



图 2 采暖系统实验图

Fig. 2 Picture of the experiment locale

实验采用额定功率 600 W 的电加热器模拟太阳能空气集热器加热空气。使用离心式风机向相变蓄热板送风,风量为 $240 \text{ m}^3/\text{h}$ 。图 3 是该相变蓄热系统的原理图,以及房间内温度测点的布置图。相变蓄热系统由电加热器、风机、相变蓄热板以及测量装置组成。在白天的时候,空气经电加热器加热,通过离心风机抽送至实验房间的相变蓄热板中,加热相变材料至发生相变,达到蓄热的目的。在夜晚的时候,关闭加热装置和风机,相变材料中吸收的热量则释放出来,对房间内供暖。实验测试时间为 11 月 16 日—11 月 30 日,共计 14 天。实验期间早上 9:00 开始对相变蓄热板进行蓄热,傍晚 18:00 停止蓄热,同时一直关闭房门,室内外只依靠围护结构进行传热。实验测量了相变蓄热房间和普通房间的室内平均温度、相变蓄热板一侧内墙表面的温度变化,另外,在没有相变蓄热板的墙体两侧也布置有热电偶,以测量房间内外的温度变化,如图 3 所示。根据相变蓄热板空气进出口温度(IN,OU),可以获知相变蓄热板的蓄热量。使用温湿度自记仪和太阳能辐射测试系统记录室外气象参数。

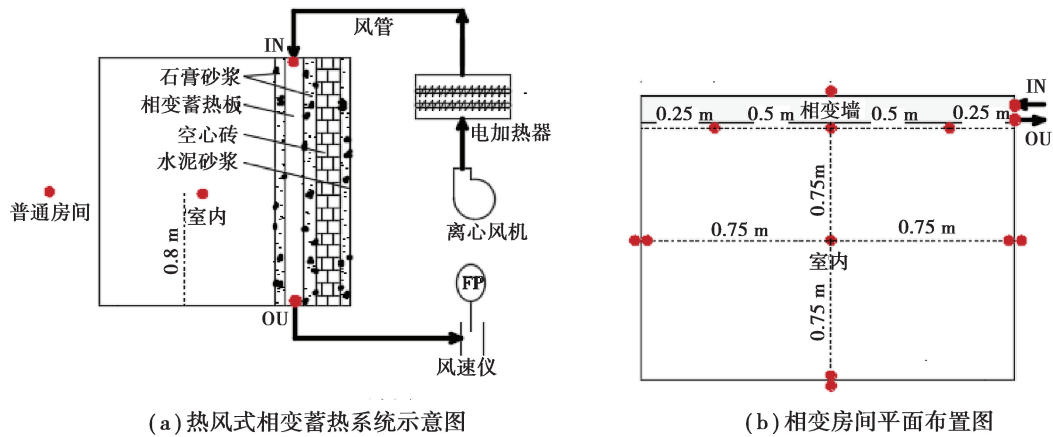


图 3 热风式相变蓄热系统原理及测点布置示意图

Fig. 3 Layout of the point for temperature measurement

2 系统模型

基于软件 TRNSYS 中的建筑模块,利用 FORTRAN 语言自定义编写的热风式相变蓄热墙体传热模型,可模拟得到相变蓄热建筑的动态热特性^[7-10]。

相变传热过程与一般传热过程不同,存在两相共混区,考虑到求解相变传热过程的复杂程度,文中采用等效热容法,可将相变材料的潜热热容视为当量比热容,将相变传热过程简化为单相的非线性导热过程,在这个过程中温度场是时间的连续函数。采用阶梯比热容函数计算当量比热容^[11],表达式为

$$C_f = \begin{cases} C_s, & T < T_s; \\ \frac{C_s + C_l}{2} + \frac{L}{T_l - T_s}, & T_s \leq T \leq T_l; \\ C_l, & T_l < T; \end{cases} \quad (1)$$

其中, C_f 为当量比热容; C_s 、 C_l 分别为相变材料在固态和液态时的比热大小, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; L 表示相变材料的潜热量, J/g ; T_s 、 T_l 为 DSC 法所测得的相变起始和结束的温度值, $^\circ\text{C}$ 。

热风通过铜管向相变材料的传热过程, 可以处理为换热模型中的内热源项^[12-13], 通过相变蓄热板的传热过程简化为一维非稳态导热过程, 以便与 TRNSYS 软件的其他部件连接。以 1 个标准单元即 1 根铜管的传热面积为研究对象, 内热源 S_g 表达式为

$$S_g = \frac{1}{R_w + R_i + R_v} (T_f - T_v), \quad (2)$$

其中, R_w 、 R_i 、 R_v 为空气与铜管间对流换热热阻、铜管导热热阻和铜管与相变材料间导热热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$; T_f 为管内空气进出口平均温度, $^\circ\text{C}$; T_v 为相变材料平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

引入“焓-多孔度”模型^[14], 用液相率 f 表示相变材料中液相所占的比例, 可用来描述潜热释放量的大小。因此, 其控制方程为

$$\rho_f C_f \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \text{grad}T) + S_g, \quad (3)$$

$$\rho_f = f_i \rho_i + (1 - f_i) \rho_s, \quad (4)$$

$$\lambda_f = f_i \lambda_i + (1 - f_i) \lambda_s, \quad (5)$$

其中, f_i 为液相率; ρ_f 为随液相率变化的密度大小, ρ_s 、 ρ_l 分别为固液、液相的密度, kg/m^3 ; λ_f 为随液相率变化的导热系数, λ_s 、 λ_l 分别为固液、液相的导热系数, $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

图 4 为 TRNSYS 软件中搭建的相变蓄热系统运行原理图, 所用到 TRNSYS 的模块有: 天气信息模块 (Type109)、启停控制模块 (Type14)、焓湿图模块 (Type33)、相变蓄热模块 (Type205)、建筑模块 (Type56)、数据输出模块 (Type65)、太空温度计算模块 (Type69)、辐射处理模块 (Type16)。计算时, 将实验测得的室外干球温度、水平面太阳辐射强度、空气进口温度导入建立的 TRNSYS 模型中进行计算。设置启停控制模块 (Type14) 的输入信号 1 为白天, 0 为夜间, 实现对系统的控制。保持蓄热板管内白天空气的进口温度, 夜间没有空气进入。在蓄热模块中编写程序, 使相变墙体达到白天蓄热, 夜间放热的效果。

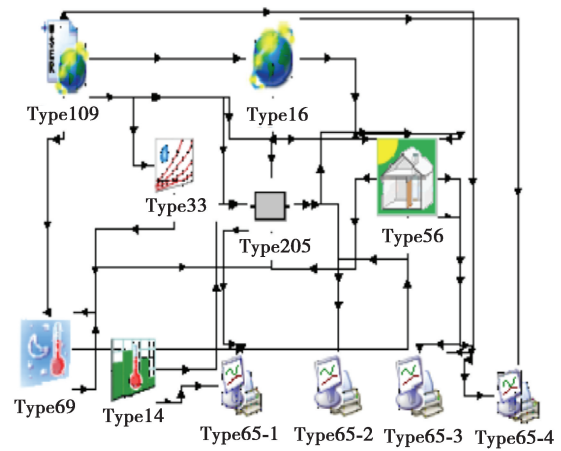


图 4 相变蓄热系统运行原理图

Fig. 4 Schematic of the operation of the heat storage system

3 结果讨论

3.1 实验结果分析

图 5 给出了相变蓄热板进出口空气温度的实验值。实验中, 相变蓄热系统中的热风流量为 $26 \text{ m}^3/\text{h}$, 由于室外环境温度的变化, 以及进风量的波动, 热风进入相变蓄热板的最高温度为 $65 \sim 69 \text{ }^\circ\text{C}$, 流出相变蓄热板的最高温度为 $23 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$, 热风的进出口温差为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。可以得知, 相变蓄热板吸收的热量为 $378 \sim 397 \text{ W}$, 蓄热系统的热损失为 35% 。

图 6 给出了装有相变蓄热系统的房间与普通房间室内平均温度对比。可以看出, 相变房间白天峰值温度在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 夜间峰谷温度高于 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在安装相变蓄热系统的房间中, 温度变化较大, 普通房间中的温度波动较小, 2 个房间平均温度相差 $3 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$, 最高达 $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。验证了相变蓄热板可以有效调节室内温度, 提高夜间的房间温度。

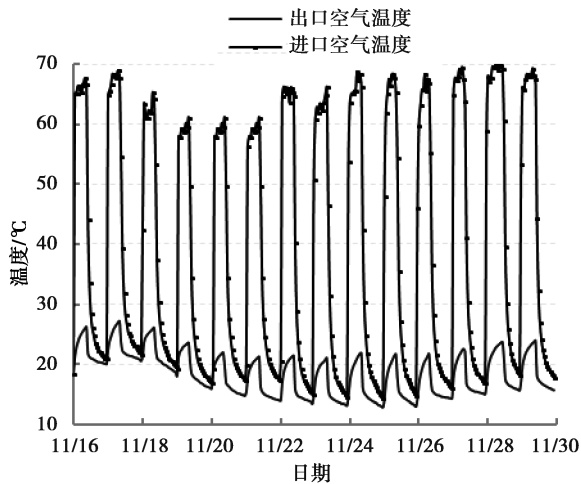


图 5 相变板内铜管进出口空气温度

Fig. 5 Temperature of air inside the copper tube

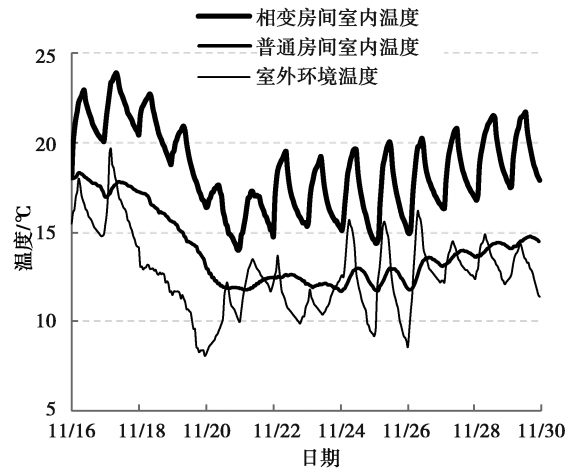


图 6 相变房间与普通房间室内温度对比

Fig. 6 Comparison of room temperature

3.2 模拟结果分析

图 7 显示了布置在管路中间的相变蓄热板内部相变材料的温度变化。可以看出,相变材料沿高度方向的温度变化非常明显。底部相变材料无法达到相变温度,没有发生相变。而靠近空气入口的顶部相变材料在所有白天都达到了相变温度。可以发现,在白天的时候,相变材料模拟得到的平均温度介于 A 点、B 点温度之间,这是由于热风的温度沿流动方向呈非线性变化,在靠近热风入口处的 A 点、B 点,空气温度高,换热温差较大,与相变材料的换热量大,热风的温度在流动换热过程中快速下降,靠近出口附近的空气温度较低,换热量较小。夜间放热时,模拟的起始温度较高,会导致模拟的放热量大于实际放热量,造成模拟温度低于 B 点,略高于 C 点。

图 8 给出了安装有相变蓄热板的墙体内外侧的平均温度的实测值和模拟值,可以看出,安装有相变蓄热板的墙体内侧温度与相变材料的温度吻合较好,昼夜温差 $11\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该墙体外侧的温度测量值与模拟所得的温度变化规律较为一致,但在中午太阳直射的时间段里,测试温度偶尔会比模拟温度高出 $5\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由于模拟中太阳辐射的计算方式与实验中太阳辐射的测量方式不同导致的。实验只把单一水平面上接受到的太阳辐射作为模拟的太阳辐射,房间西南墙受到的实际太阳辐射是西北、东北墙所受到的太阳辐射的 2 倍,在 $11:00\sim 13:00$ 辐射较强的测试时间里,模拟所设定的西南墙接收的辐射值较小,造成模拟得到的外墙温度较小。

图 9 对比了安装有相变蓄热系统的房间、普通房间内部平均温度的实测值和模拟值。可以发现,模拟结果与实验结果吻合较好,安装有相变蓄热系统的房间模拟温度略高于实验温度。结果表明,模拟所设定的房间围护结构参数可靠准确。

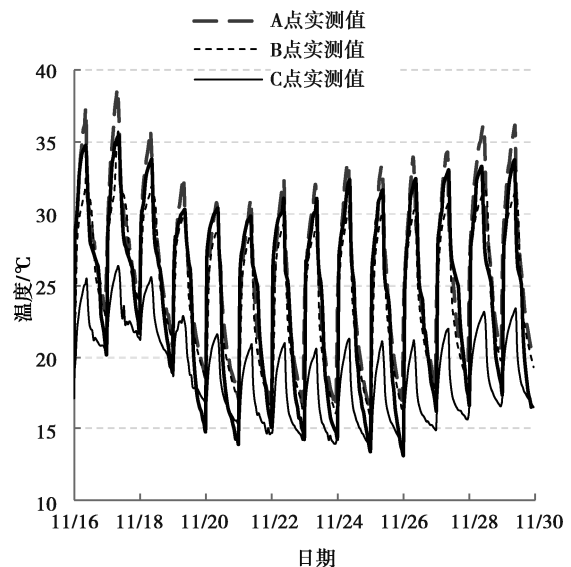


图 7 蓄热板内相变材料温度

Fig. 7 Temperature of phase change material

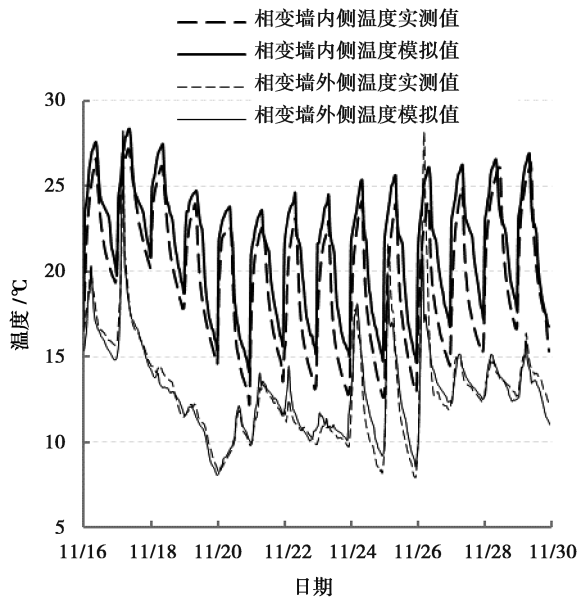


图 8 相变蓄热墙内外侧温度实测值和模拟值

Fig. 8 Comparison of the measured and simulated temperature

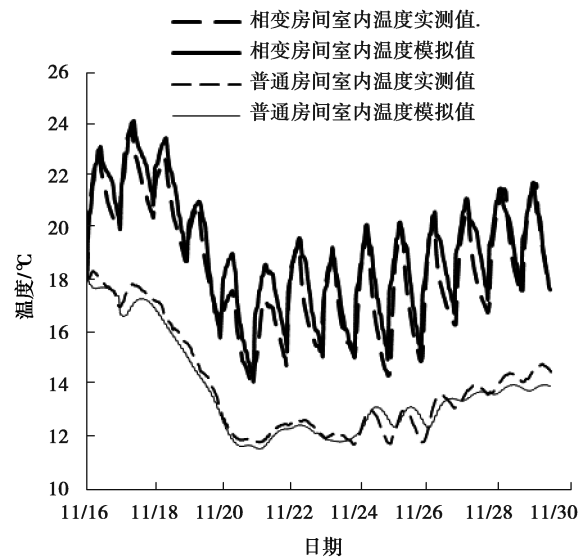


图 9 2 个房间室内温度实测值与模拟值

Fig. 9 The measured and simulated temperature inside two rooms

3.3 一致性分析

为进一步检验相变蓄热房间模型,采用标准差-平均差值(Bland-Altman)方法进行一致性分析^[15]。该方法是根据模拟值与实测值的差值来进行估计的,以均数 d 作为衡量标准, d 的大小可用差值的标准差 S_d 来表示,其中,选用 $d \pm 1.96S_d$ 作为 95% 的一致性界限,如果大部分的差值结果位于该区间内,说明结果的一致性较好,可用模拟值代替实验值。普通房间与相变房间所有测点的模拟值与实测值的分析如表 1 所示。

表 1 各温度测点模拟与实测结果的一致性分析

Table 1 Agreement analysis of the measured and simulated temperature

| 房间类型 | 测点 | d | S_d | $\bar{d} \pm 1.96S_d$ | 偏离一致性界限的数据占比/% |
|------|---------|-------|-------|-----------------------|----------------|
| 相变房间 | 室内空气 | 0.03 | 0.70 | -1.34~1.39 | 4.2 |
| | 西南墙内侧 | -0.45 | 1.03 | -2.47~1.56 | 10.4 |
| | 西南墙外侧 | 0.03 | 0.76 | -1.45~1.52 | 14.6 |
| | 东北墙内侧 | -0.02 | 0.44 | -0.88~0.85 | 4.2 |
| | 东北墙外侧 | 0.29 | 0.42 | -0.54~1.12 | 6.5 |
| | 西北墙内侧 | 0.01 | 0.54 | -1.06~1.08 | 3.9 |
| | 西北墙外侧 | 0.38 | 0.41 | -0.42~1.18 | 4.5 |
| | 隔墙(相变侧) | -0.35 | 0.51 | -1.36~0.66 | 6.9 |
| 普通房间 | 隔墙(普通侧) | 0.03 | 0.43 | -0.81~0.87 | 7.3 |
| | 室内空气 | 0.19 | 0.35 | -0.51~0.88 | 6.4 |
| | 西南墙内侧 | 0.04 | 0.26 | -0.48~0.55 | 4.2 |
| | 西南墙外侧 | 0.32 | 0.68 | -1.01~1.65 | 9.0 |

由表 1 可知,除了相变墙体内外侧温度模拟值与实测值一致性相差较大外,其余各测点模拟值与实测值的一致性都较好。可证明建立的换热模型,能较好模拟出热风式相变蓄热房间的换热特性。

4 应用分析

为了更好地说明蓄热房间采暖效果,实验模拟最冷的1月份的相变房间和普通房间室内温度变化。由于文中所验证的热风式相变蓄热建筑模型未采用任何保温措施,外墙传热系数为 $1.835 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,远高于重庆市《居住建筑节能65%(绿色建筑)设计标准》中规定的 $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 限值,不利于抵御环境变化对室内舒适度的不良影响,用已验证的模型对本相变蓄热房间增加保温层后室内空气温度进行模拟预测。为减少相变房间温度波动对普通房间的影响,模拟中设定普通房间和相变房间为无关联房间,在房间原有墙体内侧与外侧分别增加20 mm和30 mm厚无机保温砂浆,相变蓄热板布置于墙体内侧,覆盖有保温砂浆起保温作用,计算出传热系数为 $0.794 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$,达到节能设计标准。模拟时间从1月18日至2月1日,共计14天,模拟设置的蓄热板内空气进口温度与11月模拟时相同,室外气象参数通过实验获得。

图10是在最冷的1月份室外条件下,有无外墙保温的相变房间和普通房间室内空气温度变化模拟值。可以看出,未采用相变蓄热的普通房间,有无外墙保温时温差较小。使用相变蓄热采暖系统的2个房间室内空气平均温度的差值为 $5 \sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$,比未采用相变蓄热的普通房间温度高 $8 \sim 9 \text{ }^\circ\text{C}$,说明相变蓄热系统在有外墙保温时采暖效果明显提升。有保温层的房间夜间室内温度最低为 $15.4 \text{ }^\circ\text{C}$,平均为 $17.8 \text{ }^\circ\text{C}$,基本满足夜间采暖舒适性要求,但昼夜温差变化不大,说明相变蓄热板白天得热是造成较大昼夜温差的原因。

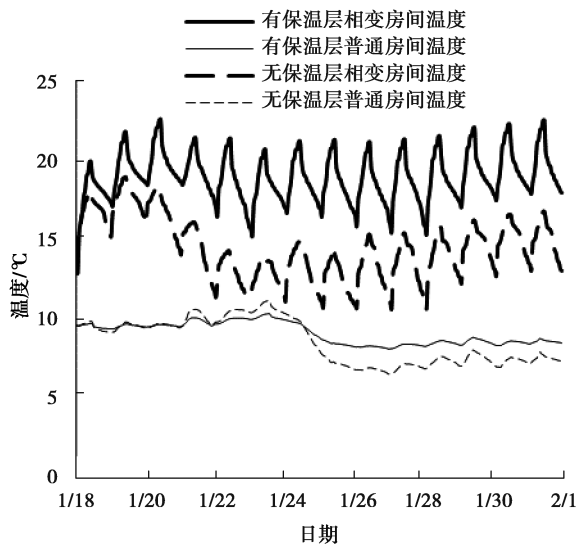


图10 实验房间有无保温层室内空气温度模拟值

Fig. 10 Simulated temperature of room with and without insulation

5 结束语

文中提出了一种将封装相变材料的不锈钢板置于墙体内侧的热风式相变蓄热采暖系统,通过可行性实验和建立的 TRNSYS 相变蓄热建筑模型结果分析,得出以下结论:

1) 与普通房间相比,热风式相变蓄热采暖系统可使室内平均温度提高 $4 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$,夜间室内最低温度为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,提高 $3 \text{ }^\circ\text{C}$,增加了房间的热舒适性;

2) 基于 TRNSYS 软件,利用 FORTRAN 自定义函数,建立了热风式相变蓄热建筑模型,通过实验验证其可行性,为太阳能相变蓄热建筑设计和运行提供指导;

3) 模拟结果显示,当建筑围护结构传热系数达到标准时,热风式相变蓄热系统在最冷月时,增加保温材料后相变房间室内温度平均提高 $5 \sim 7 \text{ }^\circ\text{C}$,比普通房间室内温度高 $8 \sim 9 \text{ }^\circ\text{C}$,夜间最低温度达到 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,基本满足夜间采暖舒适性要求。

参考文献:

- [1] 汪意, 杨睿, 张寅平, 等. 定形相变材料的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(4): 362-368.
Wang Y, Yang R, Zhang Y P, et al. Recent progress in shape-stabilized phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(4): 362-368.(in Chinese)
- [2] 肖伟, 王馨, 张群力, 等. 结合太阳能空气集热器的定形相变蓄能地板采暖系统实验研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(11): 1319-1323.
Xiao W, Wang X, Zhang Q L, et al. Experimental study on underfloor air supply system with air solar collector and shape-stabilized pcm[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008, 29(11): 1319-1323.(in Chinese)
- [3] Iten M, Liu S L, Shukla A. A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 61: 175-186.
- [4] Jayalath A, Lu A Y, Mendis P, et al. Effects of phase change material roof layers on thermal performance of a residential building in Melbourne and Sydney[J]. Energy and Buildings, 2016, 121: 152-158.
- [5] Huang K L, Feng G H, Zhang J S. Experimental and numerical study on phase change material floor in solar water heating system with a new design[J]. Solar Energy, 2014, 105: 126-138.
- [6] 刘馨, 冯国会, 黄凯良. 太阳能空气集热器和相变储能墙复合采暖系统分析[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(6): 632-637.
Liu X, Feng G H, Huang K L. Integration of solar air collector with phase change material wall for a heating system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(6): 632-637.(in Chinese)
- [7] Kuznik F, Virgone J, Johannes K. Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(7): 1004-1009.
- [8] Al-Saadi S N, Zhai Z. A new validated TRNSYS module for simulating latent heat storage walls[J]. Energy and Buildings, 2015, 109: 274-290.
- [9] Liu M, Saman W, Bruno F. Computer simulation with TRNSYS for a mobile refrigeration system incorporating a phase change thermal storage unit[J]. Applied Energy, 2014, 132: 226-235.
- [10] Zwanzig S D, Lian Y S, Brehob E G. Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 69: 27-40.
- [11] Ibáñez M, Lázaro A, Zalba B, et al. An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(11/12): 1796-1807.
- [12] 曾艳, 田怀璋, 余鹏, 等. 固液相变蓄能中有效导热系数的数值分析与实验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 497-503.
Zeng Y, Tian H Z, Yu P, et al. Research on effective thermal conductivity of energy storage system with solid-liquid phase change by numerical analysis and experiments[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(4): 497-503.(in Chinese)
- [13] 孙丹. 新型被动式太阳能相变集热蓄热墙系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Sun D. Research on a new passive solar collector-storage wall system with phase change materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] Lu S L, Zhao Y Q, Fang K, et al. Establishment and experimental verification of TRNSYS model for PCM floor coupled with solar water heating system[J]. Energy and Buildings, 2017, 140: 245-260.
- [15] 缪华章, 陈林, 刘玉秀. 定量方法对比研究一致性评价 Bland-Altman 法 LoA 的可信区间估计[J]. 中国卫生统计, 2014, 31(1): 64-67.
Miao H Z, Chen L, Liu Y X. Confidence interval estimation for the bland-Altman limits of agreement in quantitative method comparison studies[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2014, 31(1): 64-67.(in Chinese)