

相变材料应用于建筑外墙的温度与能耗模拟*

陈喜明^{1,2}, 任俊¹, 谢泽伟^{1,2}, 董凯军³

(1. 深圳市建筑科学研究院股份有限公司, 广东 深圳 518049; 2. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055; 3. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510650)

摘要: 使用 EnergyPlus 能耗模拟软件对相变材料作为外墙表面隔热材料的应用效果进行模拟, 在小空间和小型办公室的模型上, 改变相变材料的相变温度、材料结构和用量等使用条件, 并进一步考虑室内热源和不同气候区的影响, 对比分析在空调季节里空间内部温度的变化情况和空调节能效果。模拟结果表明: 相变温度稍高的相变材料更有利于夜间散热蓄冷, 同时, 结合双层复合结构可获得更好的温度抑制和节能效果; 内热源的存在会提高房间空调能耗的基数, 从而使相变材料空调节能率计算值降低, 并且在一定程度上掩盖了相变材料对室内平均温度的抑制作用, 尽管如此, 相变材料在有内热源环境下使用时空调节能量仍与无内热源时相当。

关键词: 相变材料; 外墙隔热; EnergyPlus 模拟; 温度抑制; 能耗

中图分类号: TU111.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2017)04-0056-07

Temperature and Energy Consumption Simulation of Phase Change Materials Applied to Building Exterior Wall

CHEN Xi-ming^{1,2}, REN Jun¹, XIE Ze-wei^{1,2}, DONG Kai-jun³

(1. Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd., Shenzhen 518049, Guangdong, China; 2. Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: EnergyPlus software was employed to simulate the application of PCMs as thermal insulation materials on exterior wall surface. The simulations were performed in a small box model and an office model. By changing the melting/solidification temperature, board structure and the amount of PCMs, and furthermore taking into account the effects of internal heat source and different climate zones, the zone temperature variations and the cooling energy reductions during air conditioning season were analyzed and compared. The simulation results show: PCMs with melting/solidification temperature a little bit over average outdoor air temperature are apt to restore their cool storage during night time. When they are combined with insulation materials to form double layer hybrid structure, it can result in better temperature suppression effect and higher cooling energy reduction rate. Internal heat source also has a negative effect on the contribution of PCM to cooling energy reduction rate and it can, to some degree, override the temperature suppression effect of PCM. Nonetheless, the amount of cooling energy reduction due to the presence of PCM almost remains unchanged in the simulation with or without internal heat source.

Keywords: Phase Change Materials (PCM); exterior wall thermal insulation; EnergyPlus simulation; temperature suppression; energy consumption

0 引言

相变储能技术的基础及应用研究自 20 世纪 70 年

代的能源危机以来在世界发达国家迅速崛起并不断发展。相变材料 (Phase Change Material, PCM) 在一定温度范围内能够以环境和材料的温度差作为推动力改变其物理状态 (如固-固、固-液等), 实现储热

收稿日期: 2016-07-22; 修回日期: 2016-08-40

* 基金项目: 深圳市科技计划项目 (CXZZ20140903152243524)

或放热。这一储热特性使得其在建筑围护结构、供暖储热系统和空调储冷系统等建筑节能方面的应用具有非常广的前景^[1-3]。从实用性的角度来看,用于建筑围护结构的 PCM 的选择首先要考虑其相变温度,一般在人体舒适度范围 16~28 °C 之间,同时还要考虑使用地区气候条件和用途(储热或储冷)影响,通常认为相变温度在所处环境的日平均温度值之上 1~3 °C 效果最好^[4]。PCM 一般用于室内墙板、地板和天花板之中,起到调温节能的作用^[5]。对于夏季高温的地区,PCM 也适合应用于外墙围护结构,主要起到表面隔热的作用。当建筑围护结构外表面直接暴露在阳光下时,普通墙体外表面的温度可高达 60 °C,通过使用 PCM 可以降低墙体外表面的温度,减少墙体内外表面的温差,从而有效地控制热量从室外通过墙体传入室内,降低整个建筑物夏季的空调制冷能耗^[6]。

PCM 的应用效果受 PCM 的用量、PCM 在墙体结构中的位置、墙体的朝向和使用地区的气候条件等众多因素影响,通过实验对这些条件进行系统分析必定要耗费大量时间和人力成本,而采用软件模拟的手段则可以快速评估 PCM 的温度抑制和节能效果。由于 PCM 一般具有较大的相变潜热,通常可看成其比热在相变过程中发生巨大的变化,而且其导热系数也会在相变前后产生一定的变化,这使多数只考虑恒定比热和恒定导热系数的建筑能耗模拟软件难以胜任 PCM 应用效果的模拟。由美国能源部主持开发的 EnergyPlus 能耗模拟软件包含热传导有限差分(Conduction Finite Difference, CondFD)的算法^[7],能够对比热和导热系数随温度变化的材料进行模拟,因此被广泛应用到含 PCM 建筑围护结构的模拟分析中^[8-10]。

本文以 EnergyPlus 能耗模拟软件对相变材料作为外墙表面隔热材料的应用效果进行分析。首先从小空间的模型上分析在空调季节里使用不同相变温度、不同材料结构和不同用量的相变材料对空间内部温度的抑制情况和空调节能效果。随后,在此模拟

结果的基础上,进一步考虑室内热源和不同气候的影响,建立小型办公室的模拟,再一次对比分析空调能耗和室内温度的状况,总结相变材料用于外墙隔热的优缺点。

1 模拟方法

1.1 模拟空间说明

模拟的小空间为一密闭立方体箱子,其体积为 1 m³。箱子的测试面材料采用厚度为 50 mm 的石膏板、相变材料或掺杂 10%相变材料的石膏板,其他面采用近似绝热的材料(设置低导热系数、高密度和高比热容,不考虑这些面对空间传热产生的影响)。PCM 结构由 10~20 mm 厚的膨胀石墨复合 PCM 与石膏板形成的多种结构,这些结构包括(从外到内层): 20 mm PCM/30 mm 石膏板双层结构(20P/30G)、15 mm 石膏板/20 mm PCM/15 mm 石膏板三层结构(15G/20P/15G)、10 mm PCM/40 mm 石膏板双层结构(10P/40G)、20 mm 石膏板/10 mm PCM/20 mm 石膏板三层结构(20G/10P/20G)。

小型办公室的空间尺寸为 12.5 m × 8 m × 3.2 m。办公室南面设有一扇 1.5 m × 2 m 的门,主要材料为 25 mm 的木板。南北墙面各有一个 6 m × 1.2 m 的窗,使用双层中空玻璃,空气层为 13 mm。墙体结构采用普通结构和相变材料结构进行对比模拟,分别为 20 mm 石膏板/5 mm 水泥砂浆/200 mm 加气混凝土砌块/5 mm 水泥砂浆和 20 mm PCM/5 mm 水泥砂浆/200 mm 加气混凝土砌块/5 mm 水泥砂浆。屋顶结构采用 20 mm 屋面砖/5 mm 水泥砂浆/50 mm 隔热材料/120 mm 钢筋混凝土/5 mm 水泥砂浆。地面为混凝土和地毯。

模拟中使用了 25 °C、28 °C 和 30 °C 的三种 PCM,其相变温度范围分别为 24.5~25.5 °C、27.5~28.5 °C 和 29.5~30.5 °C,相变潜热都设置为 190 kJ/kg。掺杂 10%相变材料的石膏板的相变温度范围为 27.5~28.5 °C,相变潜热为 18.1 kJ/kg。各种主要材料的热物理性质见表 1。

表 1 各种建筑材料的热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of building materials

	石膏板	相变材料	石膏板加相变材料	隔热材料	水泥砂浆	饰面板	加气混凝土砌块	钢筋混凝土
厚度/mm	15~50	10~20	50	50	5~20	10	200	120
导热系数/[W/(m·K)]	0.73	0.51	1.00	0.03	0.93	0.69	0.22	1.74
密度/(kg/m ³)	1 602	825	1 761	32	1 800	1 858	700	2 500
比热/[J/(kg·K)]	836	1 921	1 180	1 500	1 050	837	1 050	920
热扩散系数/(×10 ⁻⁷ m ² /s)	5.45	3.22	4.81	6.25	4.92	4.44	2.99	7.57

1.2 模拟条件说明

本文主要以深圳地区的 EnergyPlus 气象数据作

为模拟环境,使用建筑能耗模拟软件 EnergyPlus v8.3 分别对小空间和小型办公室进行温度和能耗的模拟。

在进行温度模拟时,不对空间的空调系统进行设置,计算使用 PCM 对空间平均温度的影响。对于能耗模拟,设置空调运行时间为工作日 7:30—18:00,空调设定温度为 26 °C,模拟日期为 5 月 1 日—10 月 31 日,对比计算空间使用 PCM 与否时空调的能耗。在对小型办公室使用 PCM 外墙隔热材料的模拟过程中,增加了内热源(包括室内人员活动、照明和设备,各参数设定值见表 2)的设置,计算内热源对室内温度和空调能耗的影响。

表 2 主要运行参数设定值
Table 2 Setting value of main operating conditions

项目	设定值	活动/运行时间
房间面积 /m ²	100	-
总人数/人	10	7:00—19:00
人员办公时新陈代谢率/(W/人)	117	-
照明强度/(W/m ²)	9	7:00—19:00
设备总功耗/W	500	7:00—19:00

EnergyPlus 使用 CondFD 的算法对 PCM 的传热进行模拟,根据一阶全隐式微分传热方程(1),可通过迭代的方法计算各节点在不同时间下的温度,式中的 C_p 可由输入的相变材料潜热-温度函数和每次迭代计算得到的节点温度按照公式(2)计算,得到的 C_p 也随着节点温度不断更新。在 CondFD 算法中,各层材料都根据算法的时间步长(Δt)和材料的热扩散系数分成多个微分子层,其厚度 Δx 可根据公式(3)计算。本模拟每小时的时间步长数为 20 次,因此 Δt 为 180 s, C 为空间离散度常数,取默认值 3。

$$\frac{\rho \cdot C_p \cdot \Delta x \cdot (T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} = k_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{T_i^{j+1} - T_i^j} \quad (2)$$

$$\Delta x = \sqrt{C \cdot \alpha \cdot \Delta t} \quad (3)$$

式中: ρ 为材料密度 kg/m³;

C_p 为材料比热 kJ/kg;

Δx 为微分子层厚度 m;

T 为各节点温度,°C;

i 为当前节点;

j 为当前时间步长点;

Δt 为时间步长 s;

k_w, k_E 为相邻两微分子层材料之间的导热系数,

W/m·K。

2 结果与讨论

2.1 不同相变温度 PCM 作用的验证

首先以深圳地区的气象环境对 1 m³ 的箱子进行

模拟,箱子用于测试的一面材料为石膏板或 PCM,朝向南面,与地面接触的一面材料为 50 mm 聚苯板,其他暴露在空气中的各面采用接近绝热的材料。假设所用的 PCM 的导热系数、结构厚度、密度和热容与石膏板接近,也就是说除了相变潜热外,其他的物理参数相近,在外界环境下对不同相变温度(25 °C 和 30 °C)的 PCM 的作用效果进行模拟,对比分析使用石膏板和相变材料时箱子内部平均温度的差别,结果如图 1 所示。由于深圳夏天(6—9 月)室外平均温度一般在 27~28 °C 之间,高于 25 °C PCM 的相变温度,难以在夜间对 PCM 进行蓄冷,因此,使用 25 °C PCM 的箱子与使用石膏板的箱子的内部平均温度几乎一致,说明此时 PCM 并未起作用。当 PCM 相变温度提高到 30 °C 时,PCM 则能够在夜间进行蓄冷,从而能够在白天开始的一段时间内阻止外界传入箱子里的热量,抑制和延缓了箱子内部白天平均温度的上升。但由于使用的材料相变温度较高并且箱子内侧没有使用隔热材料,夜间散热时有部分热量又会传入箱子内部,从而使夜间平均温度高于对比的石膏板箱子内部平均温度。由此可见,选择合适的 PCM 的重要性,相变温度太低则不能利用相变过程来蓄冷,相变温度过高则需要结合内保温的方法来减少 PCM 散热时传入室内的热量。

2.2 小空间温度和能耗模拟

根据上述结果,以下的模拟都将采用 28 °C 的 PCM。首先在夏季设计日(7 月 21 日)的气象条件下对各种材料应用的温度抑制效果进行模拟。图 2 列出了石膏板、相变材料、掺杂 10%相变材料的石膏板和隔热材料的温度模拟结果,通过比较各材料温度曲线和外界温度曲线的峰值可以发现:使用隔热材料具有最好的温度平抑作用(温度下降 3.5 °C),但对温度峰值的延缓作用较小(峰值延缓 1 h 出现);使用 PCM 具有较好的温度平抑(下降 2.5 °C)和延缓(4.5 h)作用;使用石膏板和掺杂 10%相变材料的石膏板的作用与隔热材料相反,延缓峰值 3~4 h,但对峰值温度没有平抑作用,单独石膏板的峰值温度甚至比室外温度还高。图 3 比较了不同结构和用量的 PCM 板的温度模拟结果,从图中可以看出,使用双层复合结构 PCM 板比三明治复合结构 PCM 板对温度的抑制效果更好,这主要是因为双层复合结构的 PCM 处于最外层,有利于热量往外散发,并且处于内层的石膏板厚度是三明治复合结构内层石膏板厚度的 2 倍,更好地阻止了热量往箱子内部的传递,其综合结果使得双层复合结构 PCM 板具有更好的隔热作用。此外,20 mm PCM 在夜间的蓄冷量理论上为 10 mm PCM 的 2 倍,能够在白天抵消更多外界传入的热量,降低箱子内部平均

温度,如图3中20P/30G结构的温度曲线所示,然而在15G/20P/15G结构中,PCM白天吸收的热量受到外层石膏板的阻挡,未能在夜间完全散出,导致PCM

不能完全蓄冷,其对温度的抑制作用还不如双层的10P/40G结构,这现象也说明了PCM应用时在夜间散热蓄冷的重要性。

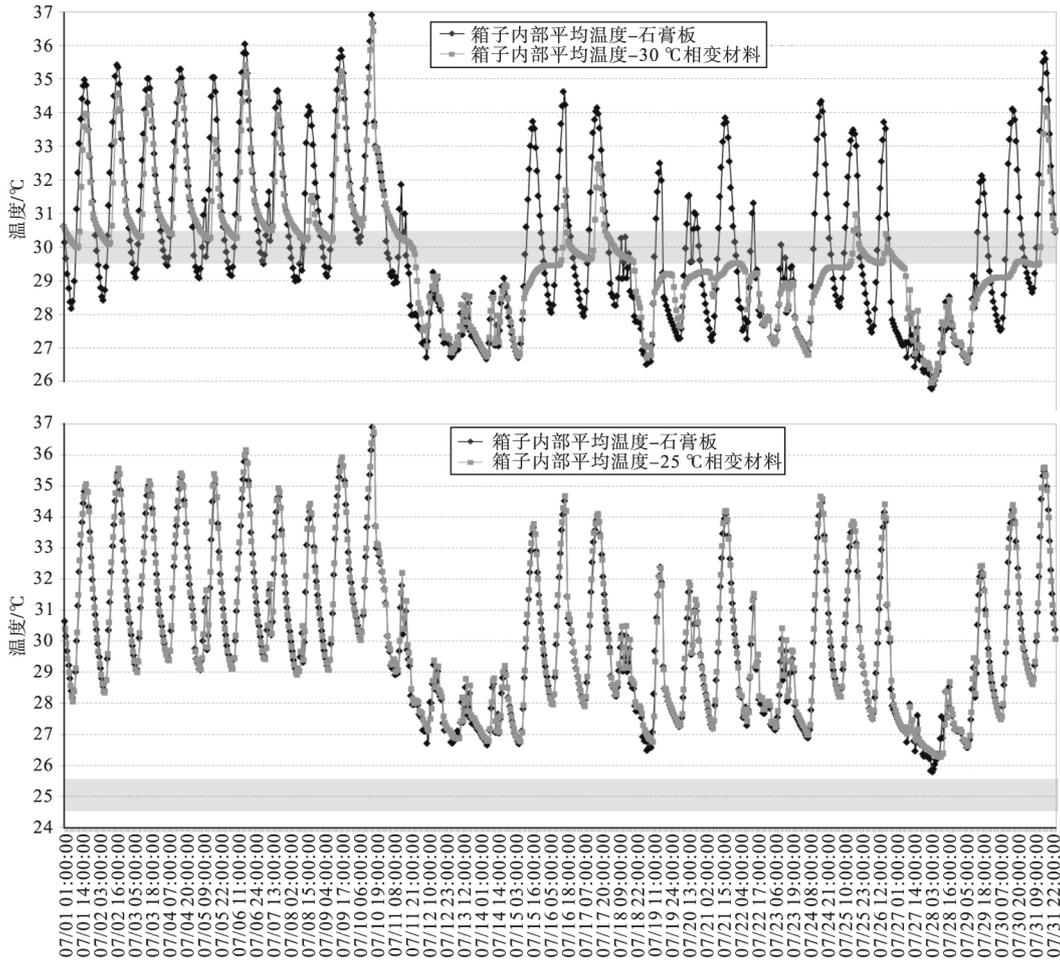


图1 不同相变材料作用下箱子内部温度的模拟结果

Fig.1 Simulation results of box temperature under the effects of different PCMs

随后的温度模拟以20P/30G结构的PCM板和掺杂10%相变材料的石膏板为研究对象,在5月1日—10月31日的空调季节进行,从中选取7月份的模拟结果,分别与单纯石膏板结构的模拟结果作对比,如图4所示。20P/30G结构由于PCM的用量较高(约为掺杂的石膏板的4倍),在夜间获得更多的蓄冷量,因此,具有更好地控温作用,将箱子温度维持在相变温度范围内的天数要比后者多,并能够更好地抑制箱子峰值温度,峰值温度比掺杂的石膏板的低2~3℃。如果简单地以相变温度的基准来计算当月的制冷度时数,计算方法见公式(4),得到的石膏板、20P/30G结构PCM板和掺杂10%相变材料的石膏板在7月份的制冷度时数分别为1667、1002和1389度时,这也在一定程度上反映PCM的节能效果。

$$CDH_{28} = \sum_{i=1}^n (T_i - 28) \text{ for } T_i > 28 \quad (4)$$

根据前面空调系统的设定,对箱子使用不同结构

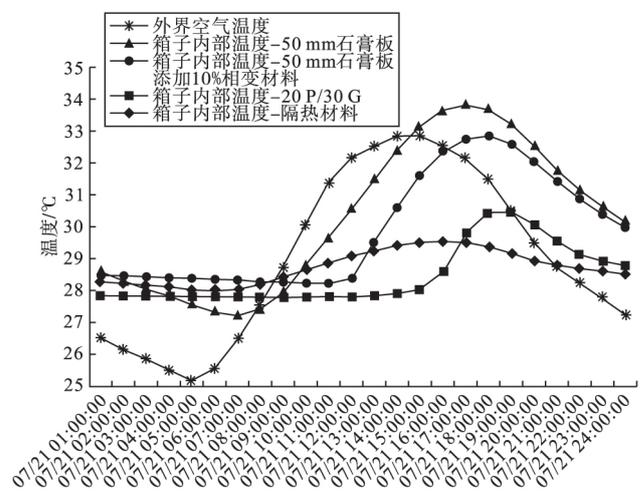


图2 夏季设计日各种材料作用下的箱子内部温度模拟结果

Fig.2 Simulation results of box temperature under the effects of different materials in summer design day

PCM的节能效果进行模拟。图5列出各种结构PCM 5—10月份空调能耗的模拟结果,并与单纯石膏板的

空调能耗为基线作对比。由各曲线计算得到的空调总节能率分别为:掺杂 10%相变材料的石膏板 25.3%、20P/30G 结构 PCM 板 39.3%、15G/20P/15G 结构 PCM 板 27.5%、10P/40G 结构 PCM 板 27.2%和 20G/10P/20G 结构 PCM 板 19.7%,这与温度抑制效果相似 20P/30G 结构 PCM 板的节能效果也是所有结构中最好的。

2.3 小型办公室温度和能耗模拟

前面的模拟结果可以看出,即便是在深圳这种昼夜温差不大的地区,PCM 的应用对小空间的温度抑制仍有良好的效果,节能效果也能达到 30%以上。那么如果将空间范围扩大,PCM 应用效果是否还能保持这种水平呢?根据第一节的模拟设置,本节首先对深圳地区一小型办公室 PCM 作为外墙隔热应用进行温度

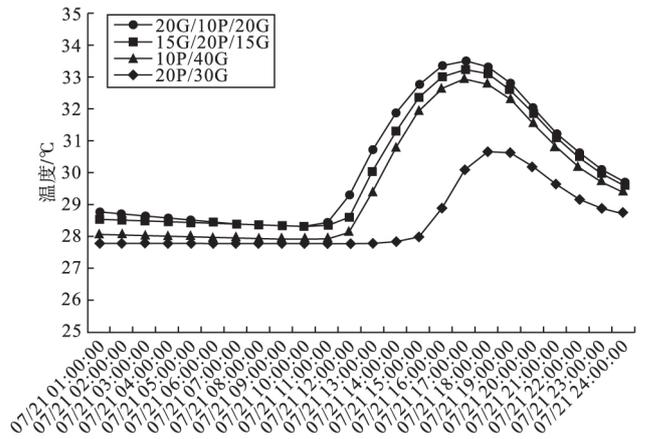


图3 夏季设计日下不同结构和用量相变材料作用下的箱子内部温度模拟结果

Fig. 3 Simulation results of box temperature under the effects of different PCM structure and addition level in summer design day

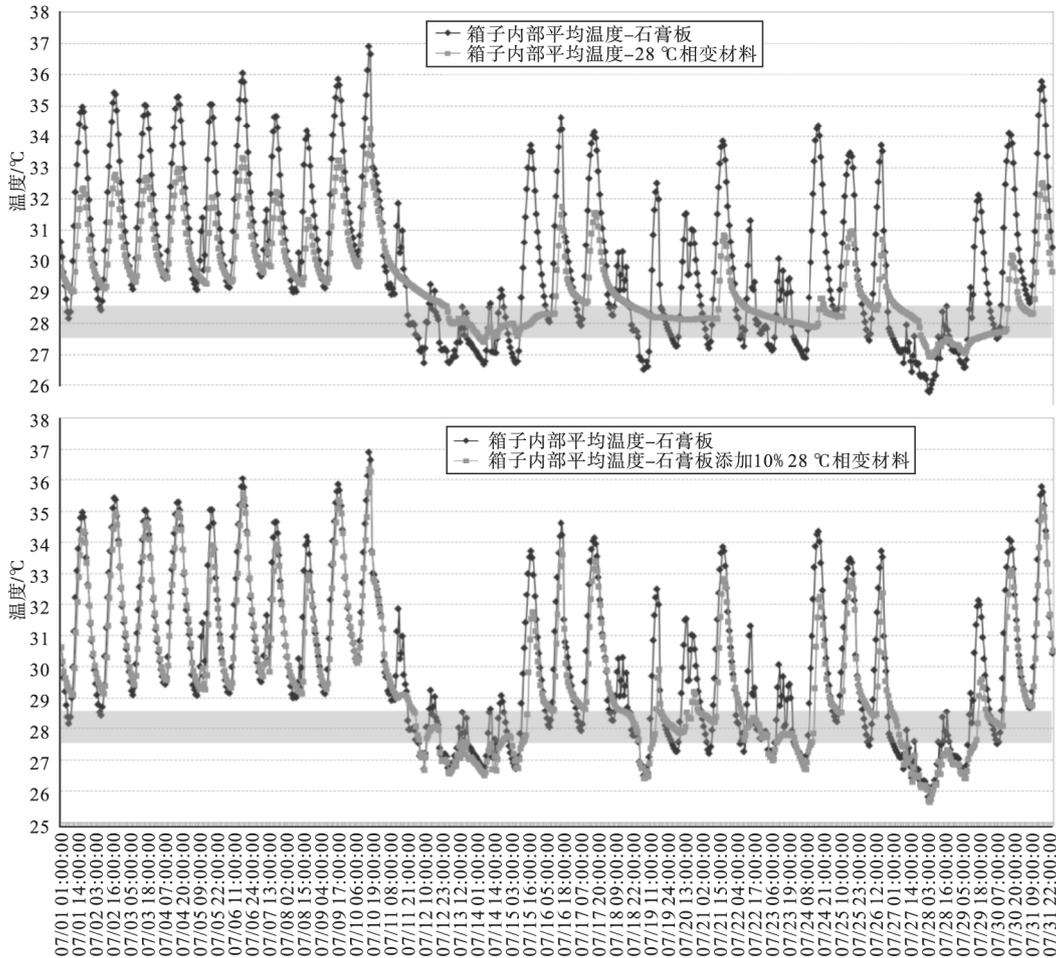


图4 7月份 28 °C PCM 作用下的箱子内部温度模拟结果

Fig. 4 Simulation results of box temperature under the effects of 28 °C PCMs in July

模拟,并考虑有内热源对模拟结果的影响。图 6 给出的是 7 月份 PCM 房间和参照房间西墙内表面温度变化情况,从图中可以看出,不论墙体是否含有 PCM,房间有内热源时都会使墙体内表面温度相应提高近 1 °C;而不论是否开启内热源,PCM 房间墙体内表面温度总比参照房间墙体内表面温度低 1~2 °C,这说明

内热源和 PCM 对墙体温度的作用是相对独立的。而对于室内平均温度而言,内热源直接作用在室内空气上,因此对室内平均温度的影响更明显。如图 7 所示,有内热源的时候 PCM 房间和参照房间的室内平均温度几乎没有差别,说明 PCM 隔热降温的作用被内热源导致的室内温度升高所掩盖而显得作用有限。

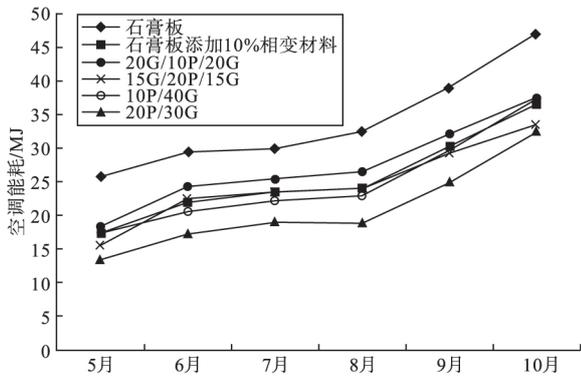


图5 空调季节各种结构相变材料作用下的箱子能耗模拟结果

Fig.5 Simulation results of box energy consumption under the effects of PCMs with different structure during air-conditioning season

但即使在没有内热源的情况下,PCM的隔热作用也仅仅使室内平均温度降低不到1℃,比小空间模拟结果要差好多。这可以通过比较两者PCM用量/空间体积的比值来解释,由于两次模拟使用的PCM厚度都是20mm,因此该比值相当于PCM面积/空间体积之值。通过计算,小空间的比值为 $1\text{ m}^2/\text{m}^3$,小型办公室的比值为 $106.6\text{ m}^2/320\text{ m}^3 \approx 1/3\text{ m}^2/\text{m}^3$,也就是说每单位PCM用量用在办公室时需要作用到的空气体积为用在小空间时的3倍,可见其温度抑制效果要差

一些。

为了研究PCM在不同地区应用的节能效果,除深圳外,还增加了上海、北京和昆明三个城市办公室能耗的模拟,这4个城市分别代表夏热冬暖、夏热冬冷、寒冷、和温和气候区。考虑到各地夏季室外平均气温的差异,上海和深圳在模拟中使用28℃PCM,北京和昆明使用25℃PCM。能耗模拟主要对比不同地区和有内热源的情况下PCM应用的节能效果,从结果统计列出了5—10月份4个城市总的空调节能量和节能率,如图8所示。4个城市模拟环境下的办公室空调能耗有相当大的差异,深圳最大,上海次之,昆明最小,在没内热源的情况下几乎不需要空调整冷。当办公室存在内热源时4个城市PCM房间相对参照房间的节能率都比较低,只有10%左右,这主要是由于内热源引起的空调能耗基数较大造成的。当关闭内热源后4个城市PCM房间的节能率基本上都翻了1倍,然而在实际情况下房间内部的热源是难以完全消除的,这导致PCM应用于外墙隔热会受到一定的限制,尽管如此,从图8可以看出,PCM在有内热源环境下使用时空调能耗减少的绝对值仍与无内热源时相当。

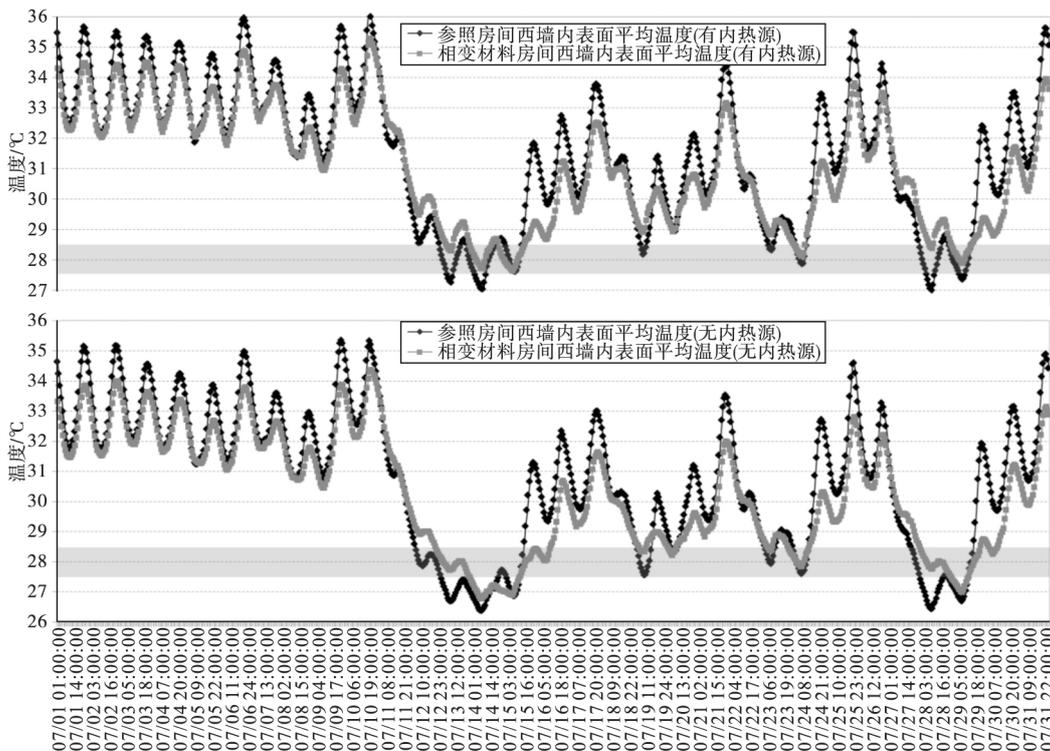


图6 7月份办公室西墙内表面温度模拟结果对比

Fig.6 Simulation results of temperature variations at the internal surface on the west wall of office building in July

3 结论

本文利用EnergyPlus软件对相变材料作为外墙隔热材料应用进行模拟。通过模拟PCM的相变温

度、用量、结构和使用地区,以及模拟空间的大小,有无内热源等条件对PCM隔热应用的效果,得出以下结论:

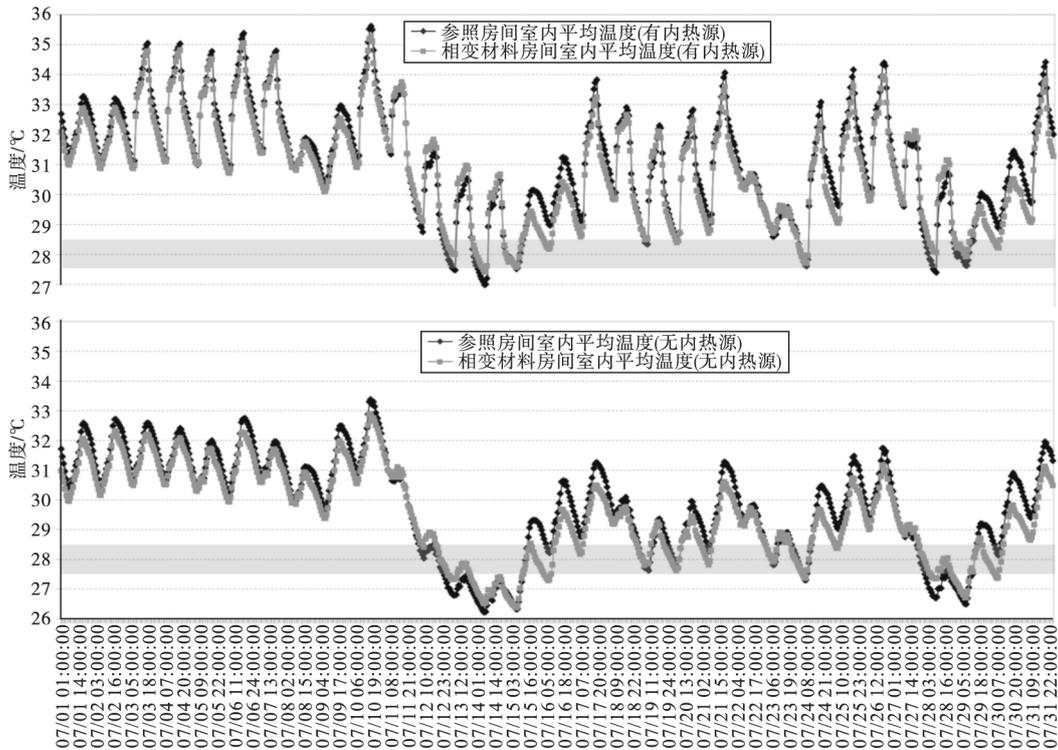


图7 7月份办公室内部温度模拟结果

Fig. 7 Simulation results of office room temperature variation in July

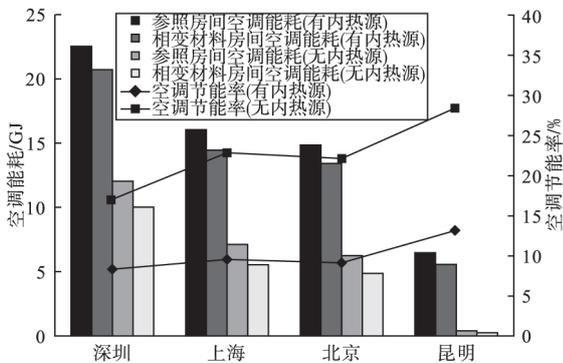


图8 空调季节办公室能耗模拟结果

Fig. 8 Simulation results of cooling energy consumption in a small office building during air - conditioning season

(1) 使用相变温度高的 PCM 有利于夜间散热蓄冷,从而使相变每天循环发生,达到隔热节能的目的,但过高的相变温度又容易使 PCM 白天吸收的热量在夜间传入到室内,须结合内保温的方法才能更好地利用 PCM 的隔热作用。

(2) PCM 的结构对其夜间散热蓄冷有较大的影响,三明治复合结构的 PCM 板由于外层材料阻挡了 PCM 往外界的散热,可能导致 PCM 在夜间未能完全凝固,因此,其对温度的抑制与节能效果要比双层复合结构(PCM 置于外层)差。

(3) PCM 的作用效果与 PCM 用量/空间体积的比值有关,PCM 在小空间模拟的节能效果可以达到 39%,但对于大空间节能效果却不及一半,这是由于大

空间该比值相对较小的缘故。

(4) 内热源直接作用到室内空气上导致其温度升高,它的存在会提高房间空调能耗的基数,从而使 PCM 空调节能率计算值降低,并且在一定程度上掩盖了 PCM 对室内平均温度的抑制作用,尽管如此,PCM 在有内热源环境下使用时空调节能量仍与无内热源时相当。

总的来说,PCM 作为外墙表面隔热材料是一种间接的应用,通过夜间蓄冷来抵消墙体白天吸收的部分热量,从而平抑和延缓室内温度的升高,达到节能的目的,具有一定的应用意义。

参考文献:

[1] Tyagi V V, Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: A state of art [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2007, (11): 1146 - 1166.
 [2] 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): 263 - 275.
 [3] Gracia A de, Cabeza L F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings [J]. Energy and Buildings 2015, (103): 414 - 419.
 [4] Peippo K, Kauranen P, Lund P D. A multi - component PCM wall optimized for passive solar heating [J]. Energy and Buildings, 1991, (17): 259 - 270.
 [5] Memon S A. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, (31): 870 - 906.

(下转第 89 页)

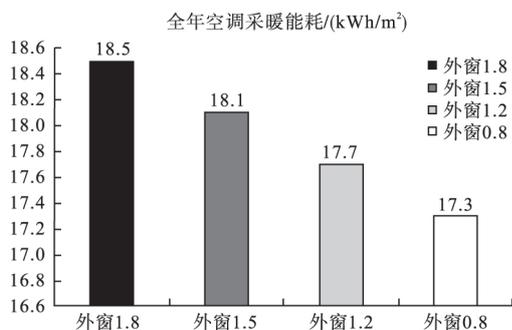


图12 基于实际使用习惯的外窗节能分析(空调方式:户式中央空调)

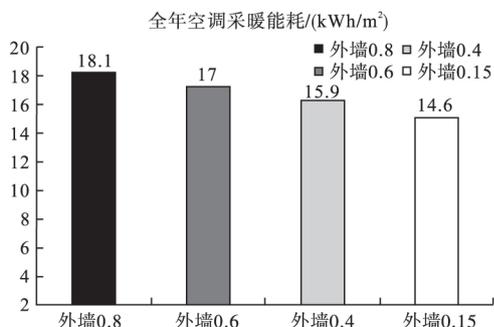


图13 基于实际使用习惯的外墙节能分析(空调方式:户式中央空调)

5 结论

综上所述,研究结果表明:

(1) 目前上海地区住宅建筑的能耗水平较低,按照被动房的能耗水平已处于低能耗的范畴,但当空调形式改变为户式中央空调时,能耗急剧上升,接近低能耗建筑的控制限值边界;由空间能耗分析可见,虽然整体能耗水平较低,但楼层间存在较强的不平衡

性;因此应结合不同的空调方式,对上海地区住宅建筑的低能耗技术路线区别对待。

(2) 上海地区住宅建筑的节能设计应注重本地的用能习惯,不宜盲目“改变”舒适度标准,但可适当考虑室内舒适度或空调使用习惯改变所应采取的节能技术措施。

(3) 现有居住建筑节能设计标准规定的计算方法难以适应以实际能耗控制为目标的变化,需要明确具体室内温湿度要求、气象数据源、空调类型和使用方式、换气方式及空间设置等内容。

(4) 基于负荷分析和节能技术路线研究可见,目前的住宅低能耗技术路线应围绕平衡楼层差异和补足能耗短板做进一步的改进,需要提高性能的方面主要包括提高屋面热工性能、内分隔墙的热工性能、门窗关闭时的建筑气密性,以及可控的自然通风设计等。

参考文献:

- [1] JGJ134—2001 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S].
- [2] DGJ08-205-2011 上海居住建筑节能设计标准[S].
- [3] DGJ08-205-2015 上海居住建筑节能设计标准[S].
- [4] 清华大学建筑节能研究中心. 2013年中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

作者简介: 夏麟(1979),男,辽宁鞍山人,硕士,高级工程师,研究方向:建筑节能、绿色建筑(lin_xia@xd-ad.com.cn)。

(上接第62页)

- [6] 杨勇康,张雄. 相变材料应用于外墙表面隔热的研究[J]. 新型建筑材料,2007,(9):37-40.
- [7] Tabares-Velasco P C, Christensen C, Bianchi M, et al. Verification and Validation of EnergyPlus Conduction Finite Difference and Phase Change Material Models for Opaque Wall Assemblies[R]. Technical Report NREL/TP-5500-55792, July 2012:3-31.
- [8] Alam M, Jamil H, Sanjayan J, et al. Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities[J]. Energy and Buildings, 2014,(78):192-201.

(上接第74页)

- [7] 陈敏. 我国综合医院人流量预测模型的研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- CHEN Min. Study on Visitors Flow Volume Prediction Model of General Hospitals in China[D]. Chongqing:Chongqing University 2012. (in Chinese)
- [8] 陈敏,付祥钊. 诊疗模式对门诊挂号大厅内人员数量分布及新风量的影响[J]. 暖通空调,2012,(9):110-113.
- CHEN Min, Fu Xiangzhao. Influence of Clinic Modes on People Number Distribution and Fresh Air Requirement in Outpatient Registration Halls[J]. Journal of HV&AC 2012,(9):110-113. (in Chinese)

- [9] Becker R. Improving thermal and energy performance of buildings in summer with internal phase change materials[J]. Journal of Building Physics 2014,37(3):296-324.
- [10] Chernousov A A, Chan B Y B. Numerical simulation of thermal mass enhanced envelopes for office buildings in subtropical climate zones[J]. Energy and Buildings 2016,(118):214-225.

作者简介: 陈喜明(1977),男,广东澄海人,毕业于美国罗德岛大学,材料与化学工程专业,博士,主要从事建筑节能材料与室内环境的研究(chenximing@ibrcn.com)。

- [9] 伍小亭. 大型综合医院建筑暖通空调系统设计中的的一些问题[J]. 暖通空调,2009,(4):5-9.
- Wu Xiaotin. Problems in HVAC Design for Large General Hospital Buildings[J]. Journal of HV&AC 2009,(4):5-9.

作者简介: 孙贻昭(1989),女,天津人,硕士研究生,主要从事建筑节能、建筑设计及理论研究(syzlavender@126.com)。

指导教师: 黄琼(1977),女,浙江人,副教授,硕士生导师,主要从事医疗建筑理论及设计、公共建筑节能、开放建筑体系研究(qhuang@tju.edu.cn)。