

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.11.005

热激活相变复合墙体动态热特性与节能潜力

朱丽^{1,2}, 杨洋¹, 陈萨如拉¹, 孙勇^{1,2}

(1.天津大学建筑学院, 天津 300072; 2.APEC 可持续能源中心, 天津 300072)

摘要:为提升老旧建筑热工性能,基于中国北方清洁供暖背景,提出一种利用夜间低谷电力制取低品位热水作为热源,进行蓄能的热激活相变建筑系统。建立了典型热激活相变复合墙体传热模型并与参照实验进行验证,在寒冷地区供暖季气候条件下,模拟分析了管间距、相变层厚度和朝向等因素对复合墙体热特性以及节能潜力影响。结果表明:将集成内嵌管的相变夹层置于墙体与外保温之间具备技术可行性,可大幅提升墙体热工性能;以南墙为例,因墙体引起的热负荷和一次能源消耗分别减少 105.5%和 14.07%;管间距相比相变层厚度影响更为明显,综合考虑热阻及蓄放热特性,管间距 100 mm 和相变层厚度 30 mm 较优;朝向对复合墙体影响较大且北墙提升最为明显,与南墙相比其一次能源消耗和运行费用减少率分别高出 20.3 和 9.0 个百分点。研究结果为热激活相变围护结构设计及其在清洁供暖和超低能耗建筑应用中提供了参考。

关键词:低能耗建筑;低品位能源;热激活相变系统;热特性;节能潜力

中图分类号: TU86

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2018)11-042-11

Thermal performance and energy saving potential study on a thermo-activated PCM building system

ZHU Li^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, CHEN Sarula¹, SUN Yong^{1,2}

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, P.R.China;

2. APEC Sustainable Energy Center, Tianjin 300072, P.R.China)

Abstract: Based on the clean energy heating context in China, a novel thermo-activated PCM composite building envelope system was proposed to further reduce building energy consumption and improve indoor comfort by utilizing low-grade hot water produced by valley current. A comprehensive heat transfer model was built and validated by comparing with reference test results. Under the condition of heating season in cold area like Tianjin, the effects of pipe spacing, PCM thickness and orientation on thermal behavior and energy saving potential were numerically investigated. The results show that the thermal performance of the composite wall has been changed, and the primary energy as well as the operation cost, taking south

收稿日期: 2018-05-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51478297);国家教育部与国家外国专家局高等学校学科创新引智计划(B13011);天津市应用基础与前沿技术研究计划青年项目(15JJCQNJC43600)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51478297), Overseas Expertise Introduction Project for Discipline Innovation (B13011), The Natural Science Foundation of Tianjin, China (15JJCQNJC43600).

作者简介: 杨洋(1991—),男,天津大学博士研究生,主要从事建筑节能和太阳能建筑一体化方面的研究,(E-mail)yangyang2017@tju.edu.cn。

朱丽(联系人),女,博士生导师,主要从事建筑节能研究,(E-mail)zhuli1978@tju.edu.cn。

wall for example, are reduced by 14.07% and 56.03%, respectively. The pipe spacing shows a more obvious influence than PCM thickness, thereby 100 mm for pipe spacing and 30 mm for PCM thickness seem to be the satisfactory values when taking the thermal resistance and heat charge/discharge into account simultaneously. Orientation has big influence on the performance and the improvement in north orientation is most obvious among the four orientations. The primary energy and operation cost saving ratio in north orientation show a reduction by 20.3 and 9.0 percent respectively compared with that in south. This study can provide reference for pipe-embedded PCM envelope design and its application to buildings of clean heating and low energy consumption.

Keywords: low energy building; low-grade energy; thermo-activated PCM building system; thermal behavior; energy saving potential

近年来,热激活建筑系统(thermo-activated building system, TABs)^[1]作为一种可有效降低建筑热负荷并具备超低温差高效供能/蓄能的新兴技术逐渐得到重视。Yu 等^[2]提出一种毛细管网式热激活砖墙系统,利用内嵌管中循环流动的低品位热水实现阻隔热量通过围护结构进行传递的目的,并间接加热/冷却室内环境。研究人员建立瞬态传热模型对水温、流速的影响进行了分析,结果表明,该系统作为实现建筑低/近零能耗的一种可行方法值得进一步探究。Shen 等^[3]同时研究了耦合低品位冷/热源的热激活砖墙与玻璃幕墙系统,结果表明,TABs 可以有效降低冬/夏季建筑负荷。然而,Prieto 等^[4]指出:TABs 虽然具备较好的节能潜力,但为保证热激活墙体具备较好的蓄放热特性,嵌管层往往被置于砖层或混凝土层中,不利于老旧建筑的节能改造和后期系统维护。通过嵌管中的循环水直接加热/冷却外,能源也可以通过围护结构热质进行储存以实现调峰目的。Mazo^[5]和 Xia 等^[6]分别提出了单/双层相变蓄能地板辐射供能末端,并进行了理论和实验研究。结果表明,该系统相比传统系统可以降低 18% 的能耗^[5]。然而,相变蓄能地板辐射供能技术虽可以缓解建筑用能在时间、空间和密度上的不匹配,但本质上仍属于利用高品位能源进行供暖/冷技术,因此,其源端系统效率仍较低。

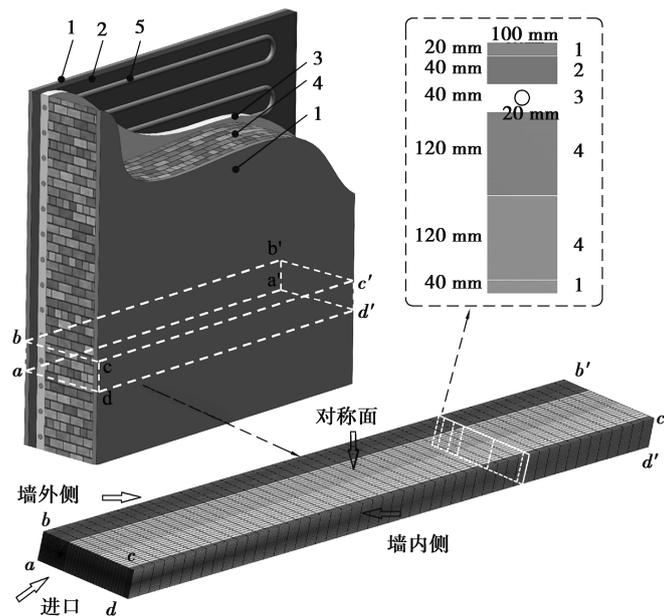
在北方地区推广清洁供暖背景下,如何更多地使用低品位能源(提升源端系统效率)减少通过围护结构热负荷,进而降低建筑能耗并提升室内舒适度的研究还很少。文中在 TABs 与相变蓄能的基础上结合北方地区清洁供暖背景,提出一种热激活相变建筑系统(thermo-activated PCM building system, TAPBs)。TAPBs 利用夜间低谷电力制取低品位热水作为热源,通过在夜间谷电时段蓄存热量,在全时段内向墙体释放热量,在起到有源保温作用的同时进一步降低建筑运行费用。为此,建立了典型热激活相变复合墙体传热模型,并与参考实验进行对比验证,运用 Fluent 软件对天津地区采暖季 TAPBs 热特性、技术可行性与节能潜力进行分析。

1 物理模型

基于典型老旧建筑中广泛应用的 240 砖墙的热激活相变复合墙体结构与物理模型网格划分如图 1 所示。相变埋管层位于墙体结构层与外保温层之间,解决了老旧建筑改造和系统维护难题。其主要特点是可以充分利用夜间低谷电力制取的低品位热水或其它接近室温的低品位能源,并依赖围护结构热质及管内流体与壁面大接触面积在超低温差条件下实现大的热量传输和蓄积,削弱室外气候影响,减少室内外传热并提高热舒适性。考虑到物理模型规整性,取结构单元 $abcd-a'b'c'd'$ 进行建模。文中以德国 RUBITHERM 公司量产的宏观封装石蜡(RT18HC)作为相变夹层材料,内嵌管道位于相变夹层中间,所用聚乙烯 PE 管道公称直径为 20 mm。考虑到安装、改造和后期维修便利,宏观封装的相变夹层固定安置于砖层与挤塑聚苯板(XPS)外保温层之间。在模拟过程中,埋管间距分别取 75、100、125 mm,相变层厚度取 30、40、50 mm。复合墙体物性参数和几何尺寸如表 1 所示。

表 1 热激活相变复合墙体热物性与几何参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	潜热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	厚度/管径/ mm
抹灰	1 800	0.93	1 050	—	20
XPS	30	0.042	1 380	—	40
黏土砖	1 500	0.64	879	—	120
PE 管	950	0.41	2 300	—	20
RT18HC	825	0.2	2 000	260	30,40,50



注:1.抹灰层 2.外保温层 3.相变埋管层 4.砖层 5.内嵌管

图 1 热激活相变复合墙体结构与网格划分示意

Fig.1 Fundamental structure and mesh generation of thermo-activated PCM wall

2 数学模型求解与验证

2.1 模型简化与能量方程

热激活相变复合墙体计算区域分为相变区、固体区和流体区。针对相变区域,Fluent 采用焓-孔隙率法或等效热熔法模拟凝固/融化过程^[7]。由于引入了液相率可以间接跟踪相界面位置变化,采用前者对凝固融化现象求解,简化假设如下:1)所有材料均匀且各向同性;2)不考虑相变层在凝固和融化过程中的自然对流现象;3)复合节能墙体各层之间接触良好;4)考虑墙体外侧与环境之间长波辐射换热,并转化为室外综合温度。

基于以上相关假设,相变层能量方程为

$$\rho_i \frac{\partial h}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

式中: i 代表相变材料; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ 为密度, kg/m^3 ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; h 为焓, kJ/kg 。

相变材料的焓与温度关系如下:

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT + rL, \quad (2)$$

$$r = \begin{cases} 0, & T < T_F (\text{固}); \\ 1, & T > T_F (\text{液}). \end{cases} \quad (3)$$

式中: h_{ref} 为参考焓值, kJ/kg ; T_{ref} 为参考温度, $^{\circ}\text{C}$; r 为液相率; L 为潜热, kJ/kg ; T_F 为相变温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

除相变层外, 其它固体区域能量方程为

$$(\rho C_p)_j \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) j = 1, 2. \quad (4)$$

式中: $j=1$ 为抹灰, $j=2$ 为 XPS, $j=3$ 为黏土砖。

除相变层外, 其它液体区域能量方程如下:

$$\frac{\partial(\rho_x \Phi)}{\partial t} + \nabla(\rho U \Phi) = \nabla(\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) + S_{\Phi}, \quad (5)$$

式中: k 代表水; Φ 为与连续消方程, 温度以及速度有关的变量; Γ_{Φ} 为扩散系数; \bar{U} 为速度向量; S 为源项。

2.2 单值性条件

热激活相变复合墙体内表面边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{\text{in}} (T_{\text{in}} - T_{x=0}), \quad (6)$$

式中: λ_0 为内抹灰层导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_{in} 为室内空气设定温度, $^{\circ}\text{C}$, 此处取 $18^{[8]}$; $T_{x=0}$ 为与室内接触的内抹灰层表面温度, $^{\circ}\text{C}$; α_{in} 为室内侧对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, 取 $8.7^{[8]}$ 。

热激活相变复合墙体外表面边界条件为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_{\text{ex}} (T_a - T_{x=L}) + \rho_s I - R_{\text{ES}}, \quad (7)$$

式中: λ_L 为外抹灰导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_a 为室外空气温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{x=L}$ 为与室外接触的外抹灰层表面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。 α_{ex} 为室外侧对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。 α_{ex} 由以下公式^[7]得到:

$$\alpha_{\text{ex}} = 5.62 + 3.9v, \quad (8)$$

式中, v 为室外环境风速, m/s 。

由太阳辐射以及墙体与室外环境之间的对流引起的热传递为^[9]

$$T_0 = \frac{I \cdot \rho_s}{\alpha_{\text{ex}}} + T_a, \quad (9)$$

式中: T_0 为室外空气综合温度, $^{\circ}\text{C}$; I 为水平面或各朝向太阳辐射, W/m^2 ; ρ 为外抹灰表面辐射热吸收系数, 此处取 $0.65^{[10]}$ 。

当相变层未发生相变时, 不同材料层之间的接触面边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x, \text{layer1}} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x, \text{layer2}}. \quad (10)$$

当相变层发生相变时, 不同材料层之间的接触面边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x, \text{layer1}} = L \rho_i \frac{\partial r}{\partial t} - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x, \text{layer2}}, \quad (11)$$

式中: λ_{layer1} 和 λ_{layer2} 分别为相邻材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

天津市“煤改电”工程实行统一峰谷分时电价制度, 供水时间段定为 $21:00 \sim 06:00$ 。复合墙体内循环流动的低品位热水由空气源热泵提供, 供水温度设定为高于室内设定温度 2.0°C , 进口流速为 0.5 m/s 。文中选取了天津地区供暖季典型采暖日(1月23日)气象条件进行研究, 气象数据来源于《中国建筑热环境分析专用气象数据集》^[11], 如图2所示。此外, Elnajjar等^[12]指出: 涉及相变的数值分析应建立在蓄放热过程达到稳定的基础上。因此, 为保证数据合理性, 所有模拟时长均为5天, 且以运行达到稳定的第5天数据进行分析。

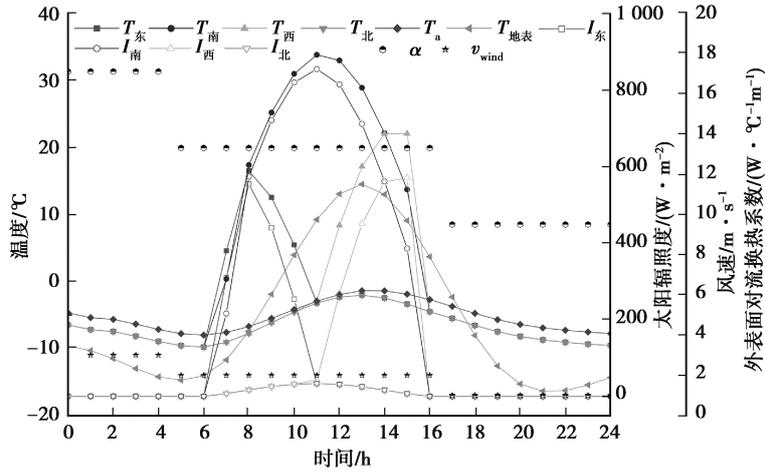


图 2 采暖季天津地区典型天气气象参数

Fig.2 Meteorological data of Tianjin during simulation

2.3 模型验证

为验证数学模型可靠性,采用相同数学模型并按照文献[13]的物理模型和实验条件对一种热水采暖相变墙体蓄放热过程进行了模拟。实验中,相变材料为 48# 石蜡与液体石蜡的混合物,相变温度为 27.8 °C,相变潜热为 145.4 kJ/kg,进口处高温循环热水为 50 °C,室内环境温度维持在 20 °C,供水和停水先后持续 8 h。

图 3 给出了文献中实验和模拟所得以及采用文中所述数学模型所得内外表面温度和热流。总体上,文中模拟值与文献实验值吻合良好,变化趋势基本一致,且比文献中模拟值准确度大幅提升。文中所得模拟值与对比文献实验值最大温差不超过 1 °C,最大热流密度差不超过 4 W/m²。此外,蓄放热过程尤其是放热过程中误差产生原因主要是文献中使用了混合相变材料,物性参数受到掺混的影响并不稳定,且模拟过程较为理想,而实际工况相对复杂,不确定因素较多造成的。因此,建立数学模型是可靠的,可用于进一步对复合墙体的性能进行分析。

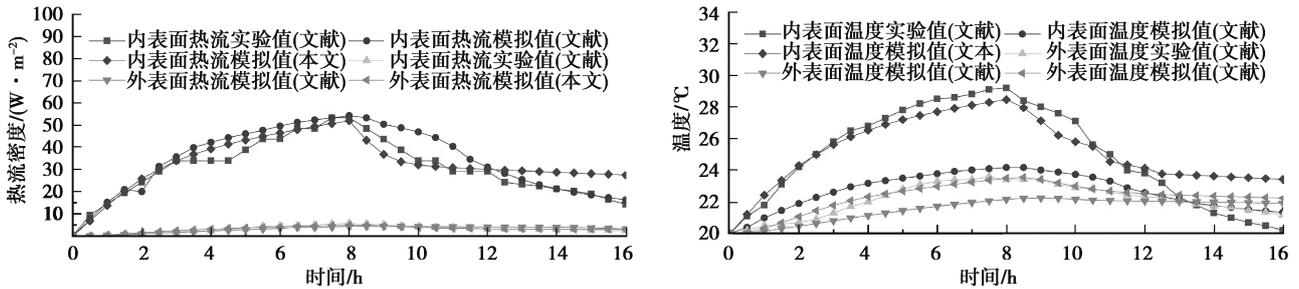


图 3 内外表面温度和热流模拟值与实验值对比

Fig.3 Comparison of the simulated and measured data

2.4 评价方法与指标

通过日累计热负荷、一次能源消耗和运行费用以及各指标减少率对节能潜力进行评价。

其中,日累计热负荷减少率 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{Q_{trad} - Q_{com}}{Q_{trad}} \times 100\%, \tag{12}$$

式中: Q_{trad} 和 Q_{com} 分别为传统墙体和复合节能墙体单位面积日累计热负荷, W/m^2 。

日累计一次能源消耗与节约率 μ 为

$$PE_{pipe} = \left(\frac{Q_{pipe} \cdot \tau}{EER_{pipe} \cdot \eta_{power}} \right) \cdot 3.6 \times 10^{-6} + \frac{P_{pipe}}{\eta_{power}}, \tag{13}$$

$$PE_{\text{trad}} = \frac{Q_{\text{trad}} \cdot \tau}{\eta_{\text{boiler}}} \cdot 3.6 \times 10^{-6} + \frac{P_{\text{trad}}}{\eta_{\text{power}}}, \quad (14)$$

$$P_{\text{pipe}} = (Q_{\text{pipe}} \text{EHR}_{\text{pipe}} + Q_{\text{trad}} \text{EHR}_{\text{trad}}) \cdot \tau \cdot 3.6 \times 10^{-6}, \quad (15)$$

$$P_{\text{trad}} = Q_{\text{room}} \text{EHR}_{\text{trad}} \cdot \tau \cdot 3.6 \times 10^{-6}, \quad (16)$$

$$\mu = \frac{PE_{\text{trad}} - PE_{\text{pipe}}}{PE_{\text{trad}}} \times 100\%, \quad (17)$$

式中:PE 为单位面积日累计一次能源消耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$; Q_{pipe} 为内嵌管单位面积日累计传热量, W/m^2 ; P 为日累计输水能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$; EHR 为供暖系统耗电输热比。

日累计运行费用及减少率 ζ 为

$$C_{\text{pipe}} = \left(\frac{Q_{\text{pipe}}}{\text{EER}_{\text{pipe}} \cdot 100} + P_{\text{pipe}} \right) \cdot E_{\text{elec}} + \frac{Q_{\text{room}}}{\eta_{\text{boiler}}} \cdot \frac{3600E_{\text{fuel}}}{H_{\text{fuel}}}, \quad (18)$$

$$C_{\text{trad}} = P_{\text{pipe}} \cdot E_{\text{elec}} + \frac{Q_{\text{trad}}}{\eta_{\text{boiler}}} \cdot \frac{3600E_{\text{fuel}}}{H_{\text{fuel}}}, \quad (19)$$

$$\zeta = \frac{C_{\text{trad}} - C_{\text{pipe}}}{C_{\text{trad}}} \times 100\%, \quad (20)$$

式中: C 为单位面积日累计运行费用, CNY/m^2 ; E_{elec} 单位电价, $\text{CNY}/\text{kW} \cdot \text{h}$, 根据天津市政策, 取峰电 0.49 (6:00~21:00) 和谷电 0.3 (21:00~6:00); E_{fuel} 分别为单位燃气价格, CNY/Nm^3 , 文中取 2.4; H_{fuel} 为天然气热值, kJ/Nm^3 , 文中取 38 930.7。

3 结果与讨论

3.1 传热特性分析

为探究循环低品位热水的内嵌管置于相变夹层后对复合墙体传热特性的影响, 以南墙为例, 选取管间距 100 mm, 相变层厚度 30 mm 时热激活相变复合墙体 (Case 1) 的模拟结果与普通相变复合墙体 (Case 2, 即与 Case 1 相同, 但无内嵌流体管道) 以及普通墙体 (Case 3, 即与 Case 1 相同, 但无内嵌流体管道和相变层) 内表面温度和内外表面热流进行对比, 如图 4 所示。

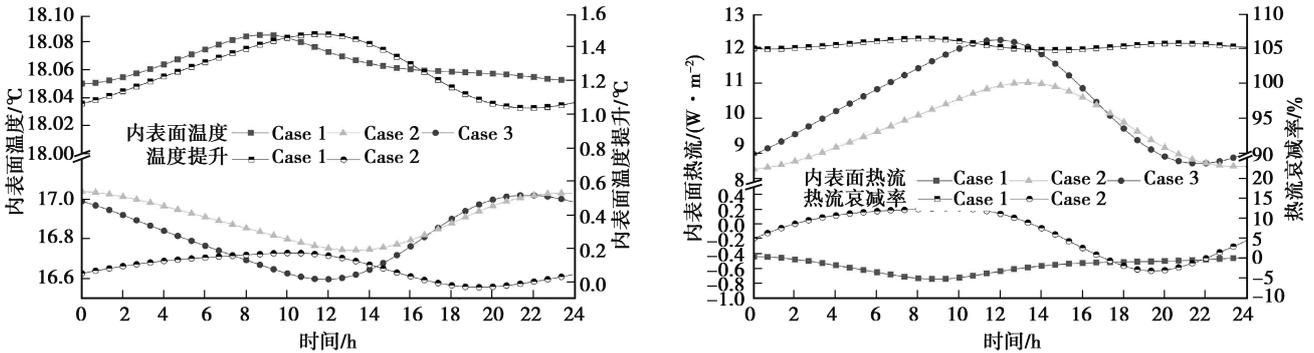


图 4 3 种不同墙体内表面温度与热流变化

Fig.4 Variation of interior heat flux and temperature of the three studied cases

从内表面温度看, Case 1 内表面温度相比 Case 2 和 Case 3 提升 1.0~1.5 $^{\circ}\text{C}$, 且始终维持并接近于室内设定温度 (18 $^{\circ}\text{C}$)。墙体内表面平均辐射温度的提升, 将使得室内热舒适度得到明显改善。图中可看出, 仅增加相变层 (Case 2) 并无法有效提升内表面温度, 此时, 内表面温度提升幅度最大不超过 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 。从内表面热流看, Case 2 和 Case 3 内表面热流最高分别为 12.22 W/m^2 和 10.45 W/m^2 , 而平均值也达到 10.39 W/m^2 和 9.34 W/m^2 。热流密度为正, 表示墙体内表面温度低于室内温度, 热量从室内向墙体传递, 形成热负荷。而 Case 1 在研究条件下热流密度显著减少, 接近于零甚至长时间保持负值, 说明墙体内表面温度高于室内温度, 墙体不仅不从室内吸热, 反而向室内补充热量。这也证明了热激活相变复合墙体具有稳定内表面温度、

抵消和减少室内热损失,甚至可为室内空间补充部分热量的良好效果。

3.2 节能潜力分析

图 5 给出了 3 种墙体日累计热负荷、一次能源消耗、运行费用以及相应指标减少率。可以看出:通过 3 种墙体内表面的日累计传热量分别为 $-0.014, 0.231, 0.248 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^2$ 。与 Case 3 相比,Case 1 和 Case 2 的日累计传热量分别减少 105.5% 和 6.85%。值得注意的是,由于墙体受到内嵌管的加热影响,因此,Case 1 外表面热流相比 Case 3 增加了 47.15%,但这一数值远少于内表面热流减少值,这也证明了将相变嵌管夹层置于外保温层与砖层之间用于减少建筑热负荷的技术可行性。Case 2 中由于采用相变夹层,使得其外表面散热损失有所降低,但仅减少约 6.85%。从图中还可看出,Case 1 一次能源消耗和运行费用相比 Case 3 大幅下降,两者分别下降 14.07% 和 56.03%。

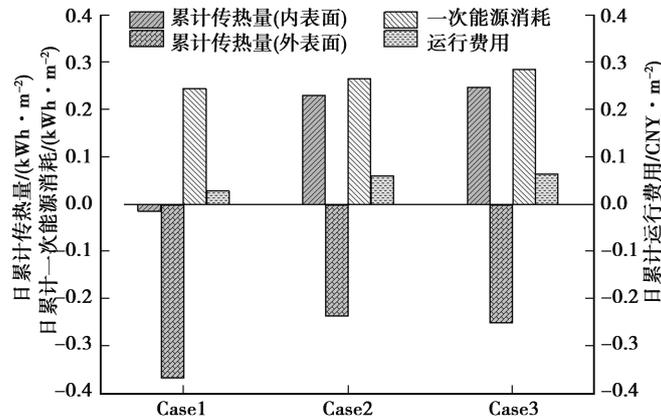


图 5 3 种不同墙体节能潜力对比

Fig.5 Energy saving potential of the three studied cases

3.3 管间距与相变层厚度影响

以北墙为例,对管间距和相变层厚度的影响进行分析,图 6 和图 7 显示了不同管间距(75、100、125 mm)和不同相变层厚度(30、40、50 mm)对复合墙体内表面温度和热流的影响。结果表明:保持相变层厚度不变,内表面温度与热流及其相应减少率随管间距的减少而增加;保持管间距不变,增加相变层的厚度提升效果并不明显。间距为 125 mm 时,复合墙体的内表面热流为正,此时,热量从室内向围护结构传递,形成建筑热负荷;间距为 100 mm 时,内表面热流随之下降,由于相变材料的存在,除在夜间谷时系统运行开始前后一段时间内表面热流为正外,其余时间段均为负值,此时,复合墙体在大部分时间段内不仅不从室内空间吸热,反而向室内空间补充部分热量;间距降至 75 mm 时,内表面热流在研究时间段内均为负值,说明此时室内空间已无通过复合墙体向室外的热损失产生。总之,较小的嵌管间距可以减少室内向室外热损失,并向室内空间补充一部分热能。因此,从建筑热负荷的形成以及经济性角度考虑,建议较优的嵌管间距取 100 mm。

相变材料导热系数为 $0.2 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,相比传统嵌管夹层(即碎石混凝土, $1.51 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)要低。从内表面温度波动看,相变材料越厚,热阻和蓄热能力的增大,墙体内侧温度波动越小,但不同厚度间波动相差不大;从蓄放热角度看,增加相变层厚度增加了嵌管中低温热水向相变层以及相变层向两侧墙体的传热热阻,容易造成换热不充分。对比其他 2 种厚度,相变材料越薄,在停止加热阶段前后,内表面温度相比更高,放热也更为充分,相变材料利用率也更高。事实上,良好的保温隔热特性和蓄放热特性对于利用夜间低谷电力进行蓄能的热激活相变复合墙体都较为重要。模拟结果表明,选择厚度 30 mm 相变材料较为适中,稍薄或稍厚一些也可。

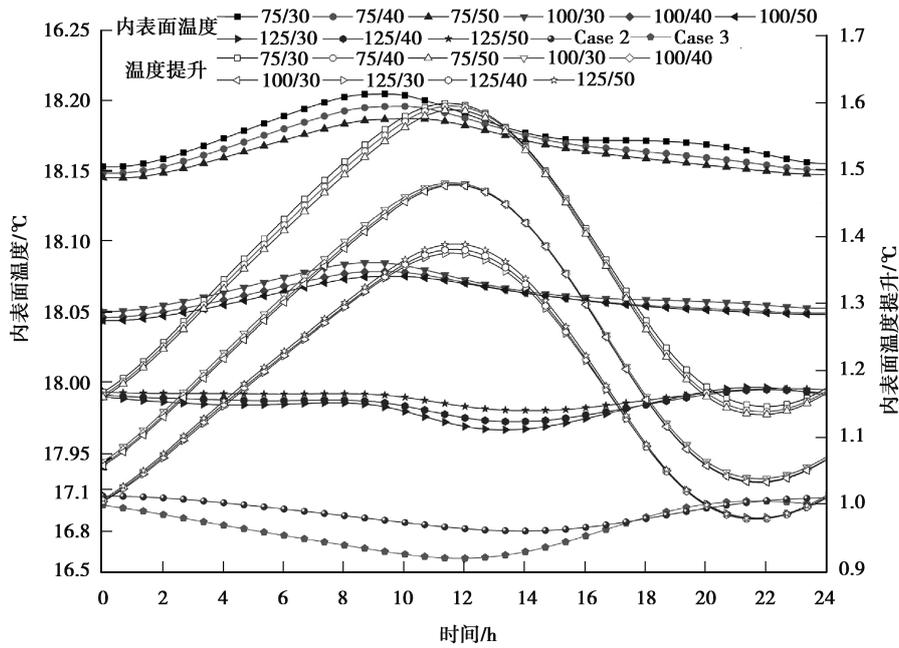


图 6 管间距和相变层厚度对内表面温度变化影响

Fig.6 Effect of pipe spacing and PCM thickness on interior surface temperature

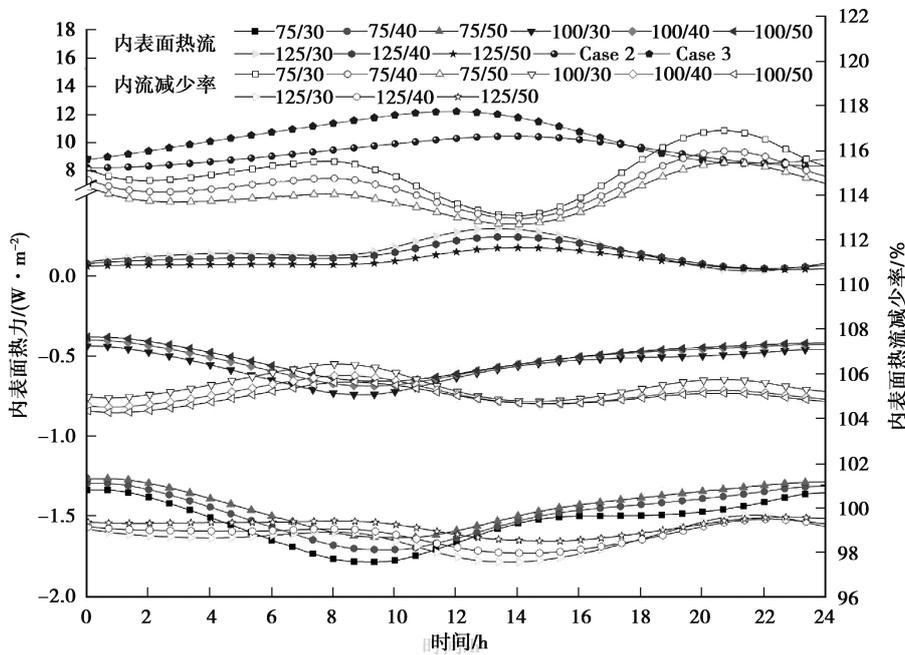


图 7 管间距和相变层厚度对内表面热流变化影响

Fig.7 Effect of pipe spacing and PCM thickness on interior surface heat flux

以间距 100 mm、相变层厚度 30 mm 为例,Case 1 内表面温度最大和最小值分别为 17.98 °C 和 18.05 °C,其平均值相对 Case 2 和 Case 3 分别提升 1.53 °C 和 1.76 °C。同时,Case 1 内表面热流最大和最小值分别为 0.13 W/m² 和 -0.44 W/m²,其平均值相对 Case 2 和 Case 3 分别下降 13.79 W/m² 和 15.29 W/m²,内表面热流减少率相比 Case 3 可达 99%~103%。

3.4 朝向影响

以间距 100 mm、相变层厚度 30 mm 为例,考察朝向因素影响。如图 8 和图 9 所示,由于内嵌管和相变材料存在,不同朝向内表面温度均有明显提升和热流下降,内表面温度接近并维持在室内设定温度附近,提升达到 1.0~1.8 °C。尽管北墙内表面热流最高且内表面温度最低,但北墙内表面热流减少率以及内表面温度提升在所有朝向中均最大。

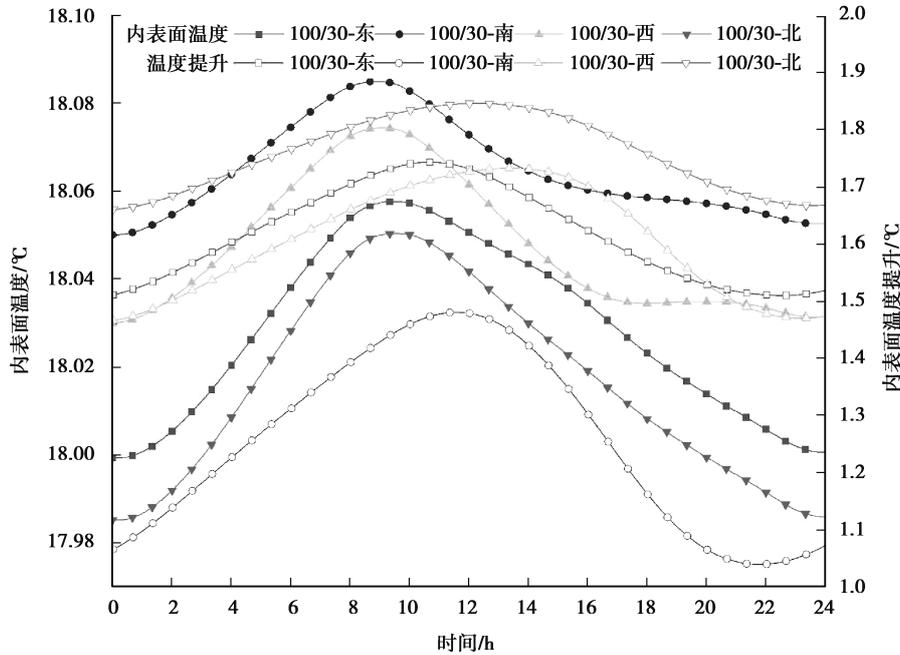


图 8 朝向对内表面温度变化影响

Fig.8 Effect of orientation on interior surface temperature

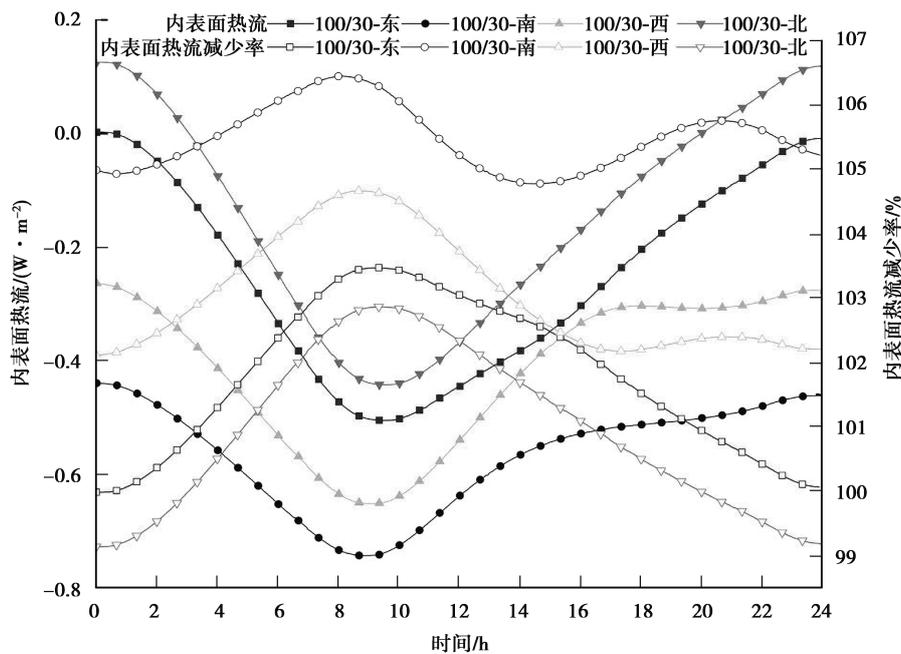


图 9 朝向对内表面热流变化影响

Fig.9 Effect of orientation on interior surface heat flux

如图 10 所示,虽然通过各朝向复合节能墙体内表面的累计传热量差异较大,但减少率较为接近,维持在 101.0%~105.5%。4 个朝向中,南墙的一次能源消耗和运行费用减少率最低,分别为 14.1%和 56.0%;北墙一次能源消耗和运行费用减少率最高,分别为 34.4%和 65.0%。与南墙相比,北墙的一次能源消耗和运行费用减少率分别高出 20.3 和 9.0 个百分点。整体来看,热激活相变复合墙体在各朝向均能有效起到降低建筑能耗和提升室内热舒适度的目的,且在北墙应用提升效果最为明显。

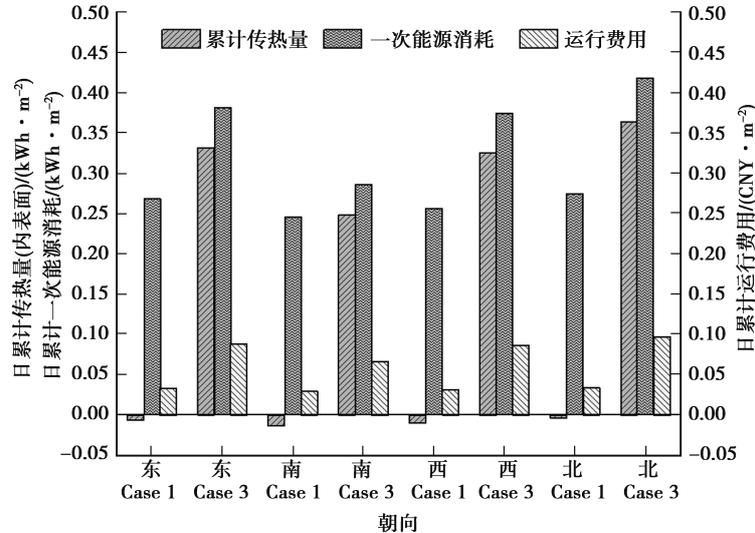


图 10 朝向对复合节能墙体节能潜力影响

Fig.10 Effect of orientation on energy saving potential

4 结 论

建立了热激活相变建筑系统(TAPBs)的动态传热数学模型,并通过数值模拟对可应用于老旧建筑节能改造的典型热激活相变复合墙体动态热特性与节能潜力进行研究,得出如下结论。

1)热激活相变复合墙体具备技术可行性。相比无嵌管的普通相变复合墙体以及普通墙体可以大幅提升内表面温度,降低通过内表面的累计热损失,进而降低建筑能耗并改善室内热舒适性。以南墙为例,应用该技术后通过墙体的热负荷和一次能源消耗分别减少 105.5%和 14.07%。

2)当保持相变层厚度不变时,热激活相变复合墙体内表面温度和热流及其相应减少率随管间距减少而增加;当保持管间距不变时,增加相变层的厚度提升效果并不明显。综合考虑复合墙体的热阻及蓄放热特性,嵌管间距 100 mm 和相变层厚度 30 mm 较优。

3)受太阳辐射时空分布不均影响,不同朝向应用热激活相变复合墙体均可以取得良好应用效果,但北墙的提升效果最为明显。与南墙相比,北墙的一次能源消耗和运行费用减少率分别高出 20.3 和 9.0 个百分点。

参考文献:

- [1] Romani J, Gracia A D, Cabeza L F. Simulation and control of thermally activated building systems (TABS)[J]. Energy & Buildings, 2016, 127:22-42.
- [2] Yu Y, Niu F, Guo H A, et al. A thermo-activated wall for load reduction and supplementary cooling with free to low-cost thermal water[J]. Energy, 2016, 99:250-265.
- [3] Shen C, Li X. Dynamic thermal performance of pipe-embedded building envelope utilizing evaporative cooling water in the cooling season[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106:1103-1113.
- [4] Prieto A, Knaack U, Auer T, et al. Solar coolfacades framework for the integration of solar cooling technologies in the building envelope[J]. Energy, 2017, 137(137):353-368.

- [5] Mazo J, Delgado M, Marin J M, et al. Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump[J]. *Energy & Buildings*, 2012, 47(3):458-466.
- [6] 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.
- [7] Zhu L, Yang Y, Chen S, et al. Numerical study on the thermal performance of lightweight temporary building integrated with phase change materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 138:35-47.
- [8] 中国建筑科学研究院.民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 GB50736-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
China Academy of Building Research. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736-2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.(in Chinese)
- [9] O'callaghan P W, Probert S D. Sol-air temperature [J]. *Applied Energy*, 1977, 3(4):307-311.
- [10] 中国建筑科学研究院.民用建筑热工设计规范 GB 50176-2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
China Academy of Building Research. Code for thermal design of civil buildings: GB 50176-2016 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.(in Chinese)
- [11] 中国气象局气象资料室.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
Meteorological Data Office of China Meteorological Administration. Special meteorological data for analysis of thermal environment in China [M].Beijing: China Construction Industry Press, 2005.(in Chinese)
- [12] Elnajjar E. Using PCM embedded in building material for thermal management: performance assessment study[J]. *Energy & Buildings*, 2017, 151:28-34.
- [13] 霍冉.热水采暖相变墙体的数值模拟与实验研究[D].北京:北京建筑工程学院,2012.
HUO Ran. Study on thermal storage properties of phase change material wallboard with water-heating system [D]. Beijing: School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)