

夜间通风相变复合墙体动态传热模拟

王雯翡, 王昭俊

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨, wzjw02@yahoo.com.cn)

摘要: 为研究由相变混凝土复合墙体构造的房间在夜间通风下的热环境, 利用焓法建立结合夜间通风的相变混凝土复合墙体动态传热和房间传热数学物理模型, 模拟研究北京地区夏季和过渡季应用该相变复合墙体动态传热和室内热环境的时变特性. 对该相变复合墙体传热的影响因素, 如相变温度、相变层厚度、通风次数、通风时间以及相变层和绝热层的位置等进行优化分析. 优化结果为: 相变材料内置, 相变温度 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相变层厚度 25 mm , 夜间通风时间早晨 $4:00\sim 6:00$, 通风次数 25 次/h .

关键词: 相变墙体传热; 夜间机械通风; 室内热环境; 数值模拟; 节能

中图分类号: TU834.35

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)04-0052-06

Simulation on dynamic thermal characteristics on phase-change composite wall combined with night ventilation

WANG Wen-fei, WANG Zhao-jun

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology,
150090 Harbin, China, wzjw02@yahoo.com.cn)

Abstract: To study the thermal environment of the room which is enveloped by the phase-change concrete composite wall with night mechanical ventilation, the dynamic heat transfer mathematical physics model of the phase-change concrete composite wall with night mechanical ventilation and thermal balance model of the room are given based on enthalpy method. The dynamic heat transfer performance and indoor thermal environment are simulated in summer and the transitional seasons when the phase-change composite walls are applied in Beijing. The influencing factors of the phase-change composite wall, such as phase-change temperature, phase-change layer thickness, ventilation rate, ventilation time, and the locations of phase-change layer and the insulation layer are analyzed. The optimal results are as follows: phase-change layer should be as the inner layer, phase-change temperature is $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, phase-change layer thickness is 25 mm , ventilation time is $4:00\text{ am to }6:00\text{ am}$, and ventilation rate is 25 ach/h .

Key words: heat transfer of PCM wall; mechanical night ventilation; indoor thermal environment; simulation; energy efficiency

夜间通风与相变复合墙体相结合能提高建筑围护结构的保温和蓄热性能, 改善室内热环境, 降低建筑能耗. 新型相变混凝土复合墙体的传热问题是多维、多相、强非线性时变复杂传热问题. 相变墙体传热理论研究与模拟的难点在于相变材料

求解域中存在一个运动的界面, 即在相变材料的熔化和凝固过程中, 其固体和液体边界是运动的, 且运动取决于其潜热被吸收或释放的速度, 故其边界的位置是未知的^[1]. 因此, 研究其数理模型的建立及其数值分析方法, 对于该墙体构造的优化设计具有重要的理论意义. 文献[2-3]模拟研究了相变墙板的温度和热特性, 认为相变墙板的蓄热能力可以充分利用太阳能供暖. Helmut 等^[4]模拟研究了相变墙体与夜间通风联合使用时室内

收稿日期: 2009-12-10.

基金项目: 黑龙江省博士后科研启动资助金项目(LBH-Q07039).

作者简介: 王雯翡(1987—), 女, 硕士.

空气温度、墙体表面温度等参数.认为该相变墙板适用于昼夜温差大的气候区,可使室温波幅下降 2~3℃.Dariusz 等^[5]将相变石膏板墙体应用于自然通风被动太阳房中,模拟研究了其热特性.指出在供暖季,当相变材料熔化温度为 22℃(如高于供暖室内设定温度 2℃)时,储存在相变石膏板墙板中的太阳能可减少供暖能耗高达 90%.文献^[6-7]模拟研究了相变墙体的热性能,相变墙体的厚度均小于 5 cm^[6].陈振乾等^[8]采用显热容法对泡沫金属中相变材料的相变熔化过程进行了数值模拟.冉茂宇^[9]建立了相变传热数学模型,给出了相界面移动位置和速率的计算公式.王昭俊^[10]对相变墙体传热问题进行了分析和评述.

本文采用焓法建立结合夜间通风的相变混凝土复合墙体动态传热和房间热平衡数学物理模型,模拟研究北京地区夏季和过渡季应用该相变复合墙体动态传热和室内热环境的时变特性,并对该墙体传热的影响因素进行优化分析.

1 相变墙体模型和房间热平衡模型

1.1 相变墙体模型

本文中墙体结构共有 3 层,从室内侧到室外侧依次为相变层、混凝土砌块层、绝热层,见图 1.

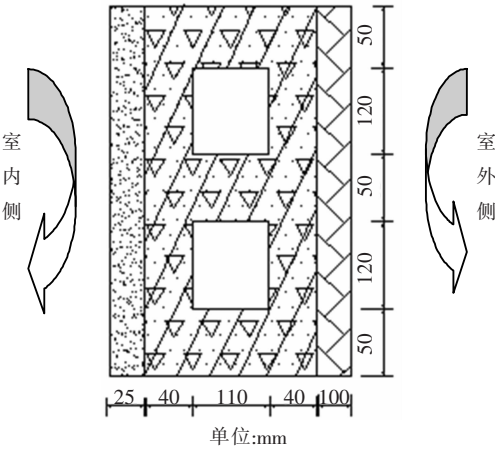


图 1 墙体构造简图

为易于求解,对模型作了如下简化假定:

1) 简化砌块空腔内空气的对流换热,仅考虑空腔内空气的导热,为兼顾可能部分时刻空腔内温度升高,两侧壁面的空气温度差满足形成有限空间内对流换热的条件,将导热系数适当放大;

2) 忽略相变材料在液态时的自然对流,相变在单一温度下发生,复合墙板内的热量变化均匀;

3) 相变蓄热单元体的上下表面绝热.当待求问题的几何形状和边界条件存在着某种对称关系时,只需在部分区域上求解,就可获得整个求解域

上的结果,这时出现了对称边界问题,类同于绝热边界;

4) 忽略 PCM 相变时的体积变化,认为密度相等,忽略接触面上的接触热阻.

其中各层材料的热物理参数见表 1^[11].

表 1 各层材料的热物理参数

名称	ρ kg · m ⁻³	C_p kJ · g ⁻¹ · °C ⁻¹	ΔH_m kJ · kg ⁻¹	λ W · m ⁻¹ · °C ⁻¹
PCM	800	1.300(1,s)	200	0.200 00
混凝土砌块	800	1.050	-	0.200 00
绝热材料 (聚苯板)	42	0.840	-	0.047 00
20% PCM 墙板	1 200	0.964(1,s)	40	0.511 00
空气	1.181	1.005	-	0.026 38

注:(1,s)分别指液态和固态.

墙体传热方程:

$$\rho \frac{\partial (c_p t)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}.$$

式中: c_p 为墙体材料的比热容, kJ/(kg · °C); ρ 为墙体材料的密度, kg/m³; τ 为时间, s; λ 为导热系数, W/(m · °C); t 为墙体材料的温度, °C.

1.2 房间传热模型

房间尺寸^[12]为 5 m × 5 m × 3 m,四面均为外墙,墙体厚度设为 330 mm,由相变层、混凝土层和绝热层构成,在南墙上有 2 m × 2 m 的木门,南墙上有 1.5 m × 1.5 m 的双层钢窗.房间是办公室,办公时间为 8:30 ~ 17:00,其间室内设备、人员、灯光负荷设为 300 W.房间的瞬态传热满足以下 3 个热平衡方程.

1) 墙体的外表面:

外表面的导热量 + 与室外空气对流换热量 + 太阳辐射换热量 + 天空辐射换热量 + 大地辐射换热量 = 0;

2) 墙体的内表面:

内表面的导热量 + 与室内空气的对流换热量 + 辐射换热量 = 0;

3) 房间热平衡:

$$c_{p,a} \rho_a V_R \frac{dt_{in}}{d\tau} = \sum_{k=1}^N Q_{w,k} + Q_{s,c} + Q_L.$$

式中: $c_{p,a}$ 为室内空气比热容; J/(kg · °C); ρ_a 为室内空气密度, kg/m³; V_R 为房间容积, m³; $Q_{w,k}$ 为单位时间内房间围护结构内表面和室内空气的对流换热量, W; $Q_{s,c}$ 为单位时间内房间内照明、人员和设备的对流换热量, W; Q_L 为单位时间内空气渗透或通风造成的传热量, W; 可由以下公式计算:

$$Q_L = c_{p,a} \rho_a G_L (t_{out} - t_{in}).$$

式中 G_L 为房间通风速率, m^3/s .

1.3 定解条件

1.3.1 初始条件

由于本文计算空调在整个夏季和过度季运行的室内温度,在计算一段时间后,初始温度的影响可以忽略不计,即

$$T_{initial} = T_{in}.$$

当结合房间传热模型时,由各房间热量和墙体热量的收支来确定房间的温度,看其是否能够维持在舒适温度范围内.

1.3.2 边界条件

由于在与前后相邻的砌块热交换过程中,其得失热量相等,故认为该单元的前后表面是绝热边界条件,而砌块的内外表面分别与室内、室外空气接触,进行对流换热,属于第3类边界条件,故

前表面绝热:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y_{out}} = 0,$$

后表面绝热:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0,$$

内、外表面对流换热:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_{in}} = h_{in} (T_{in} - T|_{x=x_{in}}),$$

$$\lambda_3 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_{out}} = h_{out} (T_{out} - T|_{x=x_{out}}).$$

式中: λ_1 、 λ_3 分别为墙体最内、外层的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; h_{in} 、 h_{out} 分别为墙体与室内、外空气的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

1.4 离散方程求解

将墙体的传热模型、房间的热平衡方程和定解条件联立,构成一个封闭的方程组,对模型求解区域进行网格划分. 利用附加热源法处理边界条件^[13],采用 TDMA 结合 ADI 方法用 Matlab 对方程组进行编程求解.

2 北京地区室外气候分析

根据 ASHRAE 提供的 IWEC、北京地区气象资料分析和北京地区空调实际使用情况,选择空调系统模拟运行期为:6月10日0:00~8月31日24:00,周六、周日停止运行.

北京地区夏季空调运行期间室外最高温度一般为 25~38 $^\circ C$,夜间最低温度一般为 18~28 $^\circ C$,6月和8月室外最低温度波动比7月份的温度波动小. 根据北京地区气候资料,选取6月20日、6月21日、7月1日、7月19日(与7月7日的室外

最高温度相同,但是7月19日日较差比较大)、8月2日、8月12日作为北京地区夏季空调运行期具有代表性的6d. 这6d中包括了整个夏季中室外最高空气温度和最低空气温度. 其室外空气温度变化如图2所示.

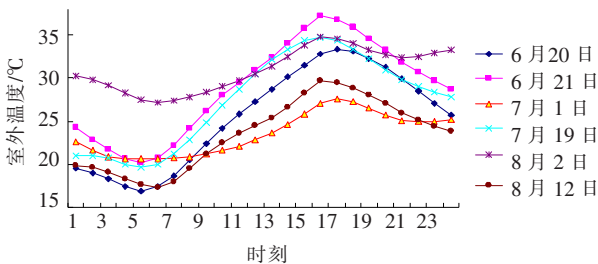


图2 北京地区代表日室外温度变化

3 室内热环境热舒适性评价指标

为了能准确分析相变材料的各种影响因素对办公时间内室内温度的影响,提出了室内热环境热舒适性评价指标、目标域热舒适时间比例 I 、实际域热舒适偏离度 e .

在整个空调运行期,将办公建筑办公时间内室内空气温度维持在 26~28 $^\circ C$ 为目标域,其中 26 $^\circ C$ 为目标域的最优值;实际的室内温度定义为实际域,满足目标域条件的实际域占总实际域的比例定义为目标域热舒适时间比例 I (%),即

$$I = \frac{n}{n_{sum}}.$$

式中: n_{sum} 为按照 Matlab 编程中的时间步长,将整个夏季和过渡季空调运行期分成总的时刻点数; n 为在整个夏季和过渡季空调运行期间,办公时间内室内温度满足舒适温度范围的时刻点数.

而满足条件的实际域偏离目标域最优值的程度定义为实际域热舒适偏离度,即

$$e = \frac{\sum (t_a - t_b)^2}{n}.$$

式中: t_a 为实际域内满足条件的室内温度; t_b 为目标域的最优值.

I 是评价满足热舒适条件的时间长度的指标, e 是在此基础上评价舒适度的高低. 故需综合考虑目标域热舒适时间比例和实际域热舒适偏离度这两项指标,选择出各种影响因素的最优值.

4 模拟结果分析

下面对北京地区办公建筑应用该墙体的动态传热特性和室内热环境进行模拟分析. 当相变层厚度取 25 mm,无夜间通风和室内人员、照明、设备等负荷,将相变温度从 24 $^\circ C$ 变化到 26 $^\circ C$,并与没有发生相变情况比较的计算结果见图3.

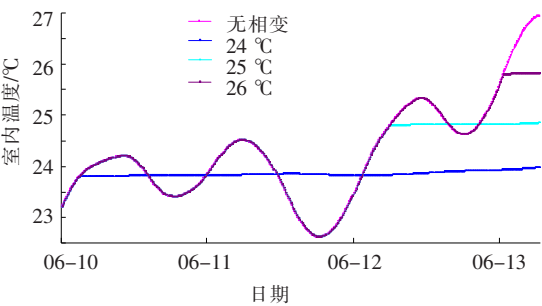


图3 不同相变温度下开始相变时间

图3表明,不同的相变温度发生相变的时间是不同的,且延迟时间也不相同。

4.1 相变温度

对北京地区,当相变温度为24~28℃,相变层厚度为40 mm,通风时间为凌晨0:00~2:00,通风次数为10次/h,相变层内置时的计算结果见表2。

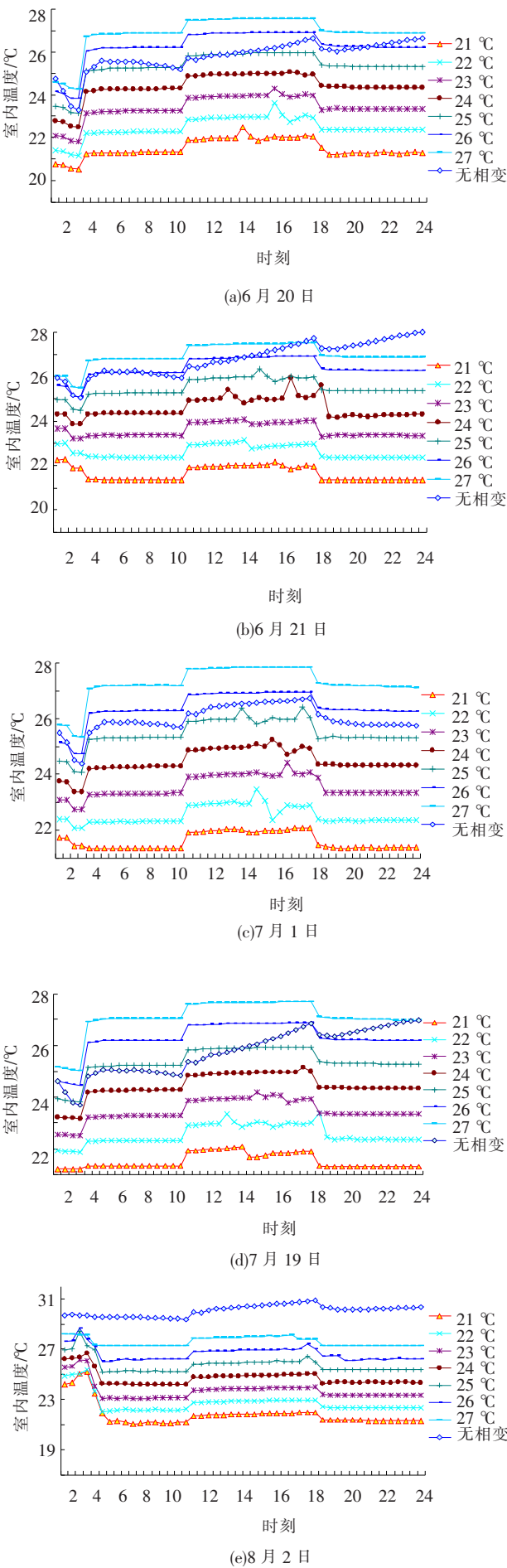
表2 北京地区不同相变温度下的计算结果

$t_m/℃$	n	$I/\%$	e	平均温度/℃
24	0	0	—	23.980
25	474	11.3	0.027 48	24.847
26	4 029	96.23	0.509 66	25.670
27	3 988	95.25	2.334 15	26.486
28	101	2.41	0.609 31	27.318
不相变	101	2.41	0.609 31	27.318

由表2可以看出:①当相变温度为24℃时,办公时间内室内温度均低于26℃,且室内平均温度维持在24℃以下;当相变温度为25℃时,目标域热舒适时间比例*I*比较小,仅为11.3%;而当相变温度为26℃时,*I*为96.23%,即一般都能够满足在26~28℃的室内温度要求;当相变温度为27℃时,*I*为95.25%;而当相变温度为28℃时,*I*急剧下降,仅为2.4%。②根据上面判断可以在相变温度为26和27℃之间进行选择,根据实际域热舒适偏离度*e*可见,相变温度为26℃时对应的*e*值小于相变温度为27℃时的*e*值,且平均温度为25.67℃。

故选取相变温度为26℃时6个代表日来进行比较,结果见图4。

通过对6个代表日的模拟计算与分析可以看出,对于整个夏季来说,26℃的相变温度能够满足大部分室内热环境的要求。但在室内、外环境的综合影响下,也可能有个别天数不能满足热舒适条件。对于这种情况,需要采取辅助措施来保证室内温度,如调整开启通风时间段、改变通风次数、运行空调等。



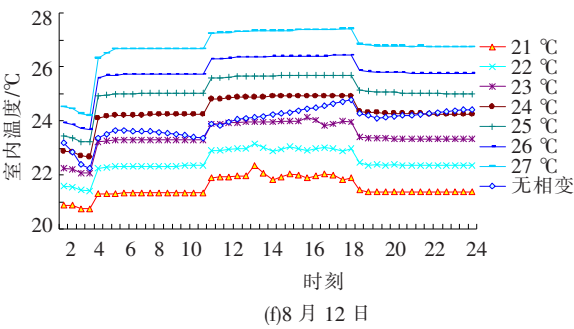


图 4 6 个代表日的相变温度

4.2 相变层厚度

选取合适的相变层厚度,不仅能从经济上节省成本,而且也能少占用空间.模拟条件如下:相变层内置,相变温度取 26 ℃,通风时间为 00:00 ~ 02:00,通风次数为 50 次/h,将相变层厚度从 20 mm 逐渐增加到 60 mm,模拟计算结果见表 3.

表 3 北京地区不同相变层厚度的计算结果

相变层厚度/mm	<i>n</i>	<i>I</i> /%	<i>e</i>	平均温度/℃
20	1 354	95.96	0.625 2	26.606 1
25	1 355	96.03	0.623 9	26.606 2
30	1 357	96.17	0.636 6	26.609 6
35	1 356	96.1	0.650 7	26.617 1
40	1 360	96.39	0.674 7	26.626 4
50	1 344	95.25	0.667 7	26.612 4

由表 3 可以看出,当相变层厚度取 40 mm 时,目标域热舒适时间比例 *I* 最大,约占 96.39%,实际域热舒适偏离度 *e* 为 0.674 7;当相变层厚度取 25 mm 时,*I* 比较大,约 96.03%,*e* 最小,为 0.623 9,即室内温度距离 26 ℃ 的离散度最小,且室内平均温度为 26.6 ℃;当相变厚度取 20 mm 或者 25 mm 时,情况与 25 mm 差不多,从经济性等综合分析,相变层厚度为 25 mm 是最经济合理的.

4.3 通风时间

以上的模拟计算中,通风时间为 0:00 ~ 2:00.为了进一步优化得到合适的通风时间,选择以下通风时间的方案,计算结果见表 4.

表 4 不同通风时间下的计算结果

通风时间	<i>n</i>	<i>I</i> /%	<i>e</i>	平均温度/℃
0:00 ~ 2:00	1 355	96.03	0.620 96	26.606 2
2:00 ~ 4:00	1 356	96.10	0.605 17	25.586 2
4:00 ~ 6:00	1 356	96.10	0.591 33	26.573 3
6:00 ~ 8:00	1 356	96.10	0.603 08	26.586 0
17:00 ~ 19:00	1 359	96.31	0.721 32	26.676 8
19:00 ~ 21:00	1 351	95.75	0.685 56	26.652 5
21:00 ~ 23:00	1 352	95.82	0.661 22	26.632 0
23:00 ~ 24:00	1 354	95.96	0.653 16	26.622 2

由表 4 可以看出,当通风时间为 4:00 ~ 6:00 时,目标域热舒适时间比例 *I* 为 96.10%,比较大;而 17:00 ~ 19:00 时间段内通风,*I* 最大,为 96.31%,主要是在 17:00 ~ 19:00 期间,室外新风温度比较高,故相变层储存的热量也比较多,室内温度升高;实际域热舒适偏离度 *e* 比较可知:在 17:00 ~ 19:00 通风时,偏离度大,其平均温度也最大.结合这 3 种情况可以看出:通风时间在 4:00 ~ 6:00 时,*I* 比较小,且热舒适程度最高,平均温度也符合要求.

4.4 通风次数

选择合理通风次数能降低消耗的电机功率,减少运行费用.选用以下几种通风次数方案,计算结果见表 5.

表 5 不同通风次数下的计算结果

通风次数	<i>n</i>	<i>I</i> /%	<i>e</i>	平均温度/℃
5	1 356	96.10	0.627 515	26.595 32
10	1 356	96.10	0.591 324	26.574 06
15	1 358	96.24	0.558 675	26.547 84
20	1 356	96.10	0.543 326	26.547 84
25	1 360	96.39	0.527 412	26.523 03
30	1 359	96.31	0.521 126	26.520 20
35	1 359	96.31	0.508 926	26.503 19
40	1 359	96.31	0.500 169	26.474 13

由表 5 可以看出,几种不同通风次数的计算结果相差不大,根据目标域热舒适时间比例 *I* 和实际域热舒适偏离度 *e* 的综合比较,选择 25 次/h 的通风次数,此时 *I* 比较大,*e* 最小,舒适度最高,平均温度为 26.52 ℃,满足热舒适要求.

4.5 相变层和绝热层位置模拟结果

为了求出最优化的相变墙体构造,并满足室内环境热舒适要求,对相变层和绝热层的放置顺序进行模拟,计算结果见表 6.

表 6 不同相变层位置时的计算结果

相变层位置	<i>n</i>	<i>I</i> /%	<i>e</i>	平均温度/℃
外置	189	13.39	0.969	23.92
内置	1 353	95.89	0.482	26.47

由表 6 可以看出,当相变层内置、绝热层外置时,目标域热舒适时间比例 *I* 为 95.89%,实际域热舒适偏离度 *e* 为 0.48,远小于相变层外置时的 *e* 值,且平均温度为 26.47 ℃,满足舒适度要求.而相变层外置方案下的平均温度过低,为 23.92 ℃.其中,每个月份最低温度与最高温度的曲线变化如图 5.

由图 5 可见,当相变层内置时,其最高和最低

温度变化幅度都较小,可有效改善室内热环境.

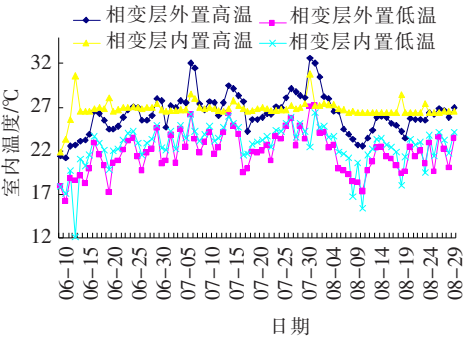


图5 相变层和绝热层位置变化的最高与最低室内温度

5 结 语

优化分析结果为:相变材料内置、相变温度 26 ℃、相变层厚度 25 mm、夜间通风时间 4:00 ~ 6:00、通风次数 25 次/h.

参考文献:

[1] HADJIEVA M, KANEV S, ARGIROV J. Thermo-physical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage[J]. Solar Energy Mater Solar Cells, 1992, 27(2): 181 – 187.

[2] KIM J S, DARKWA K. Simulation of an integrated PCM – wallboard system[J]. International Journal of Energy Research, 2003 (27): 215 – 223.

[3] NEEPER D A. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage[J]. Solar Energy, 2000, 68(5): 393 – 403.

[4] HELMUT E F, CORINA S. Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBL – 38320, UC – 1600. Berkeley: University

of California, 1997.

[5] DARIUSZ H, JOE A C. Numerical modelling and thermal simulation of PCM – gypsum composites with ESP – r[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(8): 795 – 805.

[6] AHMAD M, BONTEMPS A, SALLEE H, *et al.* Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(4): 357 – 366.

[7] CARBONARI A, GRASSI de M, PERNA di C, *et al.* Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(5): 472 – 483.

[8] 陈振乾,顾明伟,施明恒. 泡沫金属内石蜡相变凝固的数值模拟[J]. 热科学与技术,2010,9(2):106 – 111.

[9] 冉茂宇. 建筑外表相变隔热研究(I):变换法求解恒温作用下相界面移动位置及速率[J]. 建筑科学, 2010, 26(2): 99 – 102.

[10] 王昭俊. 相变储能墙体材料传热理论与应用研究综述[J]. 暖通空调, 2008, 38(11): 34 – 39.

[11] 王雯翡. 结合夜间通风的相变混凝土复合墙体动态热特性仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学市政环境工程学院,2009.

[12] 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.

[13] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社,2000: 238 – 240.

(编辑 刘 彤)