

复合相变蓄热墙体材料应用于日光温室的效果研究

薛亚宁, 陈超, 李清清, 李琢, 周玮

(北京工业大学 建工学院 北京 100124)

摘要:日光温室墙体作为集蓄热保温隔热于一体的墙体围护结构,对温室热环境的影响至关重要。现将课题组曾研制的复合相变蓄热墙体材料涂抹于日光温室后墙内表面,利用相变材料能够在较小的温度区间下蓄存和释放大量的相变潜热的特点,研究日光温室相变蓄热墙体的蓄热能力。结果表明:涂抹相变蓄热材料后,在不用加大砖墙厚度的情况下可获得较大的蓄热能力。

关键词:日光温室;复合相变蓄热墙体材料;蓄热能力

中图分类号:S 625.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2010)15-0006-06

日光温室构建方式简单,主要由后墙、东西山墙、后坡和前坡四部分组成(图1)。作为日光温室的重要蓄热体后墙体和土壤,白天,接受太阳光直接照射后,一部分热量以对流换热的方式传递给室内空气,使空气温度提高;另一部分热量则以导热的方式向墙体或土壤内部传递,其中一部分被蓄存于墙体和土壤内。夜间,随着室外空气温度的持续降低,蓄存在墙体和土壤中的热量以对流和长波辐射的方式,一方面传递到温室内维持温室内热环境,同时向室外散热导致热损失。



图1 日光温室外观图

Fig.1 Greenhouse appearance

根据建筑围护结构(墙体)传热过程,通常可用热阻 R 、蓄热系数 S 和热惰性指标 D 等指标评价建筑围护结

构的热特性^[1]。其中,热阻 R 表示热量从墙体材料层的一侧空间传至另一侧空间所受到的总阻抗, R 值越大说明墙体材料层的保温(隔热)性能越好;蓄热系数 S 表征墙体材料层对热流波动作用反应的敏感程度,反映墙体材料层对温度波动的抵抗能力,同样热流波动条件下,该值越大说明墙体材料层表面温度波的波动越小、热稳定性越好;热惰性指标 D 表示背波面上温度波衰减程度的一个主要指标,该值越大说明材料层抵抗周期性温度波动的能力以及蓄热的能力越强。

温室的墙体(后墙、东墙、西墙)其热工作用主要体现在二方面:一是作为蓄热材料蓄存投射在其上的太阳热能,二是作为保温材料阻挡流向温室外的热损失。对于温室常采用的红砖墙体来说,根据建筑围护结构热工计算方法^[1]以及表1可知,其导热系数较大,因而显热蓄热能力有限。因此,为了提高砖墙蓄存太阳热能的能力、同时减少向外热损失,通常采用加大砖墙厚度的方法,提高墙体蓄热作用,但其带来的负面影响是红砖用量大且土地利用率低。为此,现根据日光温室的构筑特点,将该课题组曾研制的复合相变蓄能墙体材料涂抹于日光温室墙体内部表面,利用相变材料能够在较小的温度区间内蓄存和释放大量的相变潜热的特点,以远小于砖墙的厚度获得较大的蓄热能力^[2]。在节约资源的前提下,达到高效利用太阳能的目的。

1 相变蓄热墙体材料及其热工性能

1.1 相变蓄热墙体材料

相变材料属于功能材料,是相变蓄热,与砖墙的显热蓄热比较,具有在较小相变温度区间内可吸收和释放大量的热量。该课题组研制的定形相变材料具有较高的相变潜热量(图2a),相变温度区间($8\sim 28^{\circ}\text{C}$), $q=138.84\text{ mJ/mg}$,且70%以上的相变潜热量集中在较小的

第一作者简介:薛亚宁(1984),男,在读硕士,现主要从事相变蓄热技术研究工作。

通讯作者:陈超(1958),女,工学博士,教授,现主要从事建筑节能方面的教学与科研工作。E-mail: chenchaoy@bjut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(3102006)。

收稿日期:2010-06-25

相变温度区间内(17~24℃)(图 2b); 并且该定形材料无需任何外封装、物化性能稳定, 无任何过冷和相分离现象; 发生相变时, 材料内部虽为固-液相变, 但材料外观却为固-固相变, 材料外形保持原状不变, 蓄、放热效率

高。将该定形相变材料与普通水泥砂浆直接混合即可形成相变蓄热墙体砂浆材料(图 3a), 涂抹在温室砖墙内表面(图 3b), 涂层厚度 40 mm, 以提高温室墙体(后墙等)的太阳能蓄热能力。

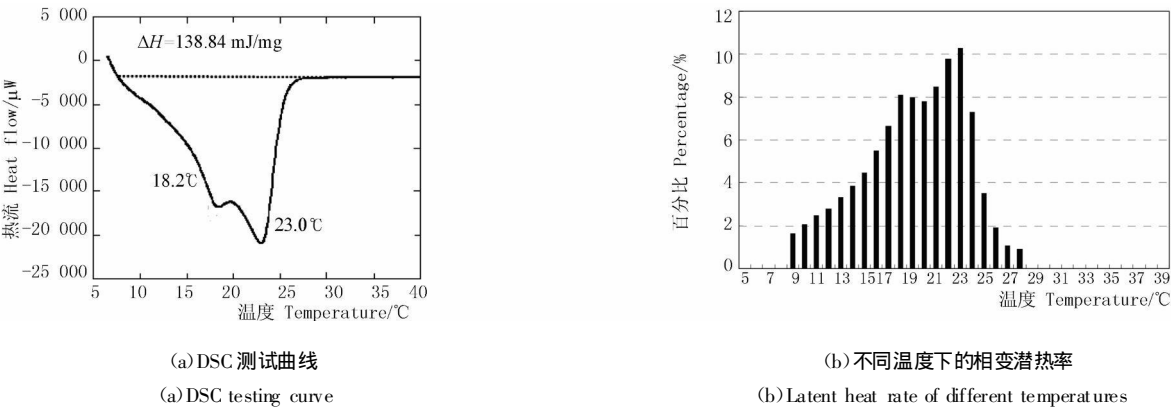


图2 课题组研制定形相变材料主要热工性能

Fig.2 Main thermal performance of phase change materials

注: 相变蓄热率为对应 DSC 曲线相变区间内单位温度相变潜热量占总相变潜热量的百分数。



图3 相变蓄热墙体材料及施工

Fig.3 Phase change thermal storage wall material

1.2 热工性能

关于建筑围护结构热特性的 3 个主要评价指标热阻 R 、蓄热系数 S 和热惰性指标 D , 对于多层墙体材料层(假设有 n 层), 其计算表达式如式(1)~(3)^[1]。

$$\sum R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum \frac{\delta}{\lambda_i} \tag{1},$$

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c p}{T}} \tag{2},$$

$$\sum D = D_1 + D_2 + \dots + D_n = \sum P_i \times S_i \tag{3}.$$

式中, 各变量说明见表 1。

由式(1)可见, 墙体材料层的厚度 δ 越厚, 导热系数 λ 越小, 其热阻 R 越大; 式(2)是墙体材料层周期为 1 d (24 h) 的蓄热系数 S , 其值的大小取决于材料的导热系数及材料的体积热容量(即比热与密度的乘积), 同时也因热流波动的周期而异。对于多层墙体材料层, 墙体的蓄热系数 S 由各层材料的蓄热系数加权求得。同理, 热

惰性指标 D 也为各层材料的热惰性指标之和式(3)。

表 1 为普通红砖墙体与该课题组研制的相变蓄热墙体热工性能比较结果。由表 1 可知 对于厚度 δ 同为 10 mm 的 2 种墙体材料, 作为保温性能, 相变蓄热墙体材料优于红砖墙, 其导热系数 λ 约为砖墙的 1/2, 其热阻 R 是普通砖墙的 2.5 倍; 作为蓄热性能, 相变蓄热墙体材料对应 23℃ 的等价比热 c 远大于砖墙, 约为后者的 14 倍, 因此反映材料蓄热能力的热惰性指标值 D 也大于砖墙, 约为后者的 3.5 倍。

2 相变墙体材料在日光温室中应用试验

显然, 如果将一定厚度的相变蓄热墙体材料涂抹于日光温室砖墙内表面, 无疑将会对温室后墙太阳能贮存能力的提高产生积极作用。为了进一步确认所研制相变蓄热墙体材料的蓄能作用, 该研究于 2010 年 2 月 1 日~3 月 31 日, 在北京地区某一种植番茄的日光温室进行了该项研究。

表 1 普通红砖墙与相变蓄热墙体材料热工性能比较

Table 1 Thermal performance comparison between brick wall and PCM wall

墙体种类 Type of wall	厚度 Thickness δ/mm	密度 Density ρ/kg·m ⁻³	导热系数 Thermal conductivity conductivity λ/W·(m·K) ⁻¹	比热 Specific heat c/kJ·(kg·K) ⁻¹	热阻 Resistance R/(m ² ·K)·W ⁻¹	蓄热系数 To retain heat coefficient S/W·(m ² ·K) ⁻¹	热惰性指标 D Inertia target D
普通红砖墙体 Ordinary brick wall	10	1700	0.76	1.05	0.013	9.93	0.13
相变蓄热墙体 PCM wall	10	600	0.40	14.24	0.033	13.64	0.45

2.1 试验对象

该温室坐北朝南, 建筑几何尺寸为长×宽×高=88 m×9 m×3.6 m, 红砖后墙厚约 1 000 mm, 东、西红砖墙厚度约为 240 mm; 前坡面覆盖塑料薄膜厚度约 0.1~0.12 mm; 夜间保温覆盖材料为草苫子, 厚度约为 50 mm。为了比较相变蓄热墙体材料作为蓄热体的热工性能, 在该温室内约 20 m 长的后墙上涂抹了 40 mm 厚的相变蓄热墙体材料, 并在该区域的两侧悬挂了塑料薄膜, 以减少该区域空气与普通红砖墙区域的热交换(图 4a)。该试验条件对两侧的空气温度虽有一定影响, 但对该研究讨论的墙体温度影响有限, 壁面温度主要受太阳辐射的影响。

2.2 测点布置与数据采集

为了比较不同室外气象参数条件下, 相变蓄热墙体

与普通墙体作为蓄热体的热工性能, 分别在二者的墙体表面或内部设置了温度测点(图 4b~c), 进行实时监测; 同时, 利用气象站对试验期间几个重要的室外气象参数进行了实时监测。室外气象参数: 室外气象参数包括太阳辐照度、空气温度及风速等参数利用辽宁锦州三二二研究所研制生产的小型室外气象站进行实时监测。其中, 太阳直射辐照度和总辐射采用 TBS-2-2 型太阳直射辐射仪和 TBQ-2 型太阳总辐射仪进行测量, 并配合 RH LOG 系列自记仪实现对太阳辐射的即时跟踪和自动记录。墙体材料层温度: 在红砖墙表面以及相变蓄热墙体材料层分别布置了铜—康铜 T 型热电偶, 结合 HP 34970A 型自动巡检仪, 并通过 HP Benchlink Data Logger 软件与计算机连接, 对各测点温度每 5 min 记录 1 次。

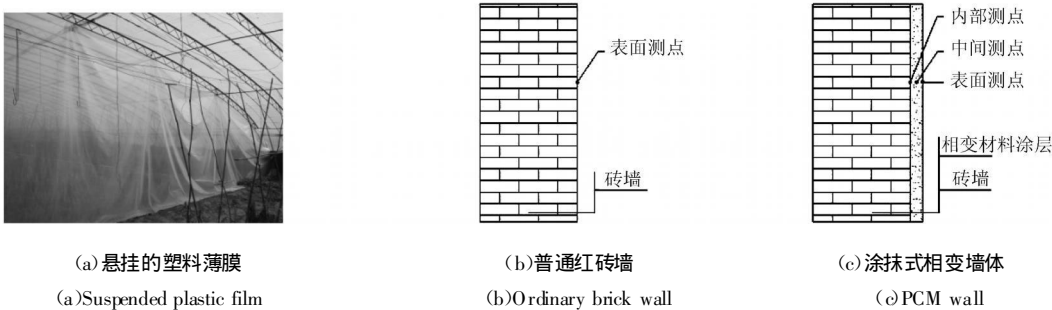


图 4 后墙温度测点布置示意图

Fig. 4 Temperature measuring points of north wall

3 结果与分析

3.1 实测期间室外气象特点

北京地区冬季太阳资源非常丰富, 具有较高的利用价值, 图 5 为典型气象年和近 2 a 北京地区冬季 55° 倾角朝南斜面不同太阳日辐射等级天数分布图。其中, 典型气象年数据源自美国能源局建筑能耗分析模拟软件 Energyplus 提供的根据(E+ 典型气象年); 近 2 a 的数据源自课题组的实测数据。“E+ 典型气象年”数据基本反映了北京地区冬季太阳辐照度的特点: 太阳日辐射总量超过 20 MJ/(m²·day) 的晴好天气的天数占 40% 左右,

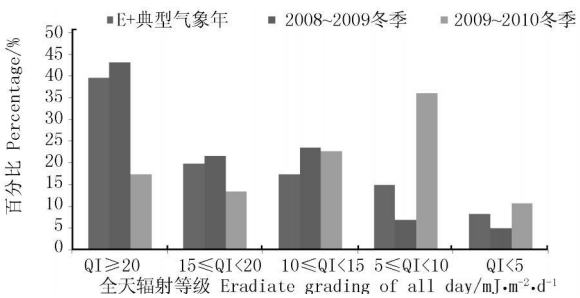


图 5 北京地区冬季 55° 倾角朝南斜面不同太阳日辐射等级天数分布

Fig. 5 Distribution of days of different radiation levels in 55° angle in Beijing

15~20 MJ/(m²·day)的较好晴天(有云)的天数约占20%,10~15 MJ/(m²·day)的多云天数也约占20%,余下的20%即为无太阳能利用价值阴、雨、雪天,2008年12月5日至2009年3月5日与典型气象年基本接近;但2009年11月15日至2010年1月28日较典型气象年寒冷,雨雪天比较多,属于寒冬。

图6为试验期间北京地区冬季太阳辐射照度和室外空气温度随时间变化情况。由图6a可见,2月份雨雪

天比较多,大约占20%,平均温度约为2.2℃;加之受雨雪天的影响,不能在正常时间开(关)棚,导致部分试验数据受到影响。为了便于比较,该研究重点选取了2月3~6日和2月20~23日作为2月份的典型分析日进行比较分析。由图6b可知,3月份虽然雨雪天气较2月份减少了,室外空气温度也开始上升,但是阴天较多,晴好天气仅占30%,课题组选取3月11~15日作为3月份的典型分析日。

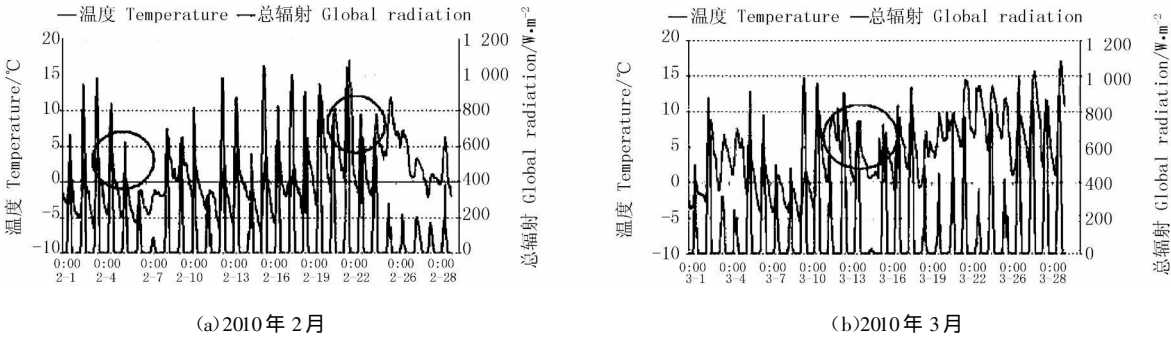


图6 太阳辐射度与室外空气温度随时间变化图

Fig. 6 Solar radiation and outdoor air temperature

由表2可知,2月3~6日试验期间先晴后阴,虽然室外空气温度处于较低的水平(-6~4℃),但晴天的太阳辐射度较大;而2月20~23日期间为连续晴天,但以多云天为主,室外空气温度也逐渐回升。

表2 2010年2月室外气象条件

Table 2 Analysis on outdoor weather conditions in February

日期 Date/月-日	日辐射总量 I Global radiation in day /MJ·m ⁻²	昼夜温度变化范围 Daily change of temperature/℃
2-3	19.20	-6~4
2-4	16.99	-4~4
2-5	9.263	-5~0
2-6	4.727	-5~0
2-20	13.75	0~10
2-21	21.98	0~15
2-22	14.88	-2~7
2-23	13.73	-2~9

表3 2010年3月11~15日室外气象条件

Table 3 Analysis on outdoor weather conditions in March

日期 Date/月-日	日辐射总量 I Global radiation in day/MJ·m ⁻²	昼夜温度变化范围 Daily change of temperature/℃
3-11	8.88	0~10
3-12	21.16	0~10
3-13	17.08	0~8
3-14	0.52	0~6
3-15	17.65	0~10

由表3可知,3月11~15日试验期间属于阴晴相间天气,晴天时的太阳辐射照度较大,室外空气温度已高于0℃,在0~10℃间变化。

3.2 墙体温度比较

图7为2月3~6日相变蓄热墙体表面、中间和内部各测点温度与普通红砖墙体表面温度随时间变化的实测结果(先晴后阴天气)。

无论是相变蓄热墙体还是普通红砖墙,其材料层温度的变化趋势都直接受室外空气温度变化的影响,不过相变蓄热墙体材料层内部测点温度峰值出现的时间已较表面层延迟1.5 h,反映具有较强蓄热能力的相变材料的热惰性特征已显现。

另外,无论是晴天还是阴天,相变蓄热墙体的表面温度始终高于砖墙,最高时可相差4℃左右(2月4日);普通砖墙表面温度与相变蓄热墙体材料层中间测点的温度接近,说明同样日照条件下,相变蓄热墙体具有更强的太阳能集热能力。

关于相变蓄热墙体材料层的蓄放热能力,以2月4日为例,中午,相变蓄热墙体材料层的表面和中间测点温度均超过相变区间的上限,说明近壁面层蓄热已基本完全;至下午2:40内部测点温度也达到了18℃,其对应层已完成最大蓄热量的48.8%,此时整个相变蓄热材料层已完成全部相变蓄热量的96.2%;夜间,随着室外温度的持续下降,墙体温度也随之下降,其中蓄热性较差且热阻也较小的砖墙的温度下降较快,而相变蓄热墙体材料层的温度下降速度明显要慢些,尤其是内部测点的温度全天都在10℃以上,说明相变蓄热墙体的放热速度更有利于温室环境温度的控制(试验墙体比对照厚,该试验是在原有砖墙上再附加40 mm厚)。

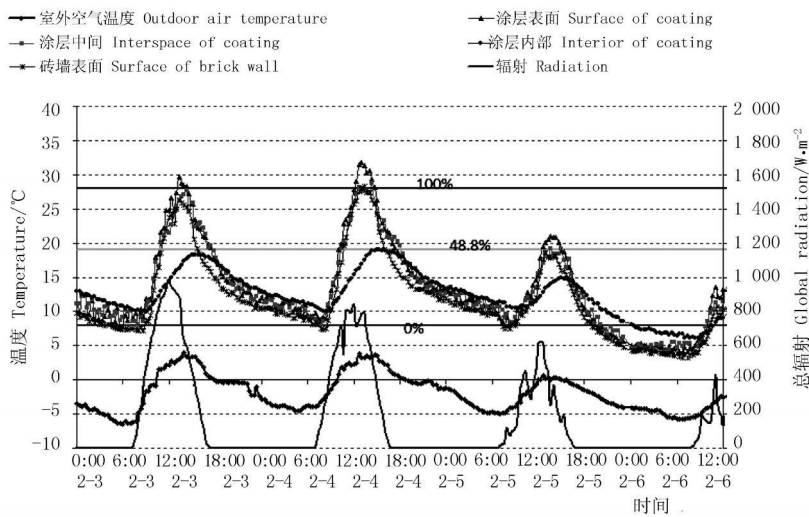


图 7 2010 年 2 月 3~6 日实测结果比较

Fig.7 Experimental results comparison(2010-2-3~2010-2-6)

图 8 为 2 月 20~21 日(连续晴天)相变蓄热墙体表面、中间和内部各测点温度与普通红砖墙体表面温度随时间变化的实测结果,同样有与图 7 类似的规律。

所不同的是,2 月下旬的室外空气温度已逐渐回升,相变蓄热墙体材料的蓄热优势得到更为充分发挥。以太阳辐照度最大的 2 月 21 日为例,较 2 月上旬温室室外空气温度明显升高(0~15℃),相变蓄热墙体材料层内部

测点中午就已达到相变温度区间的上限值 28℃,说明整个相变蓄热墙体材料层已全部蓄热;夜间,相变蓄热墙体开始向温室环境放热,但直到次日 2 月 22 日上午 9:00,该测点的温度仍然保持在 17℃,较砖墙表面温度约高 2℃左右,21 日蓄存的太阳能尚有 26.1%的热量可在 22 日继续利用。

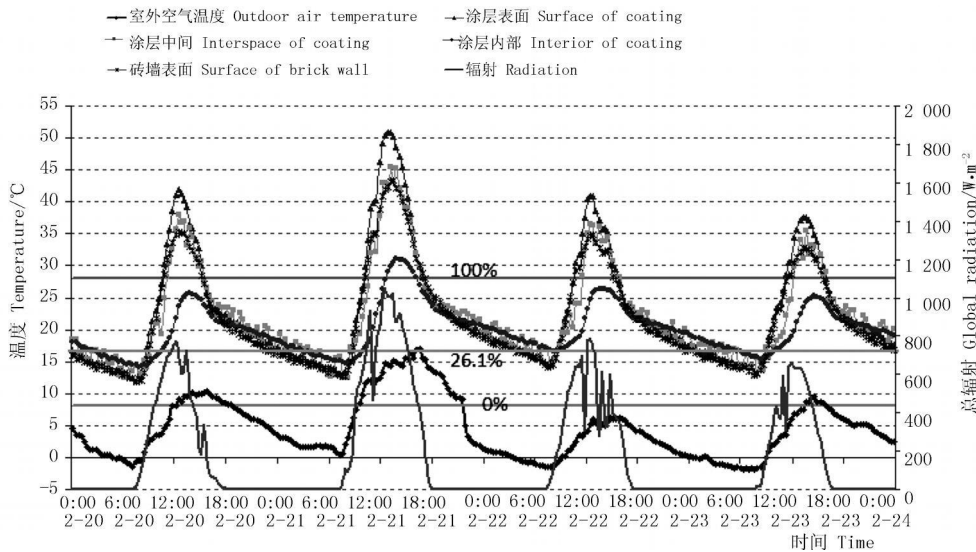


图 8 2010 年 2 月 20~23 日实测结果比较

Fig. 8 Experimental results comparison(2010-2-20~2010-2-23)

图 9 为 3 月 11~15 日(阴晴雨雪相间天气)相变蓄热墙体表面、中间和内部各测点温度与普通红砖墙体表面温度随时间变化的实测结果,同样有类似图 7 的试验结果。

以 3 月 12 日为例,随着室外空气温度的持续升高,

相变蓄热墙体材料层在中午已蓄热完全,而且,经过一夜的放热,至次日 3 月 13 日温室环境温度再次升高时,仍有 16.1%的太阳能可以继续利用。该值较 2 月 22 日的 26.1%要小,是因为受 3 月 11 日阴天的影响。另外,即使在 3 月 14 日和 3 月 15 日出现了连续的雨雪天,但

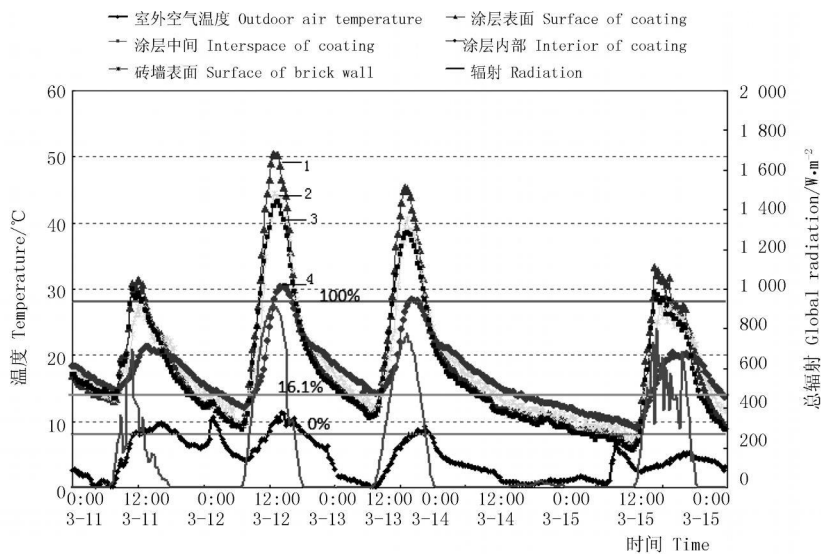


图 9 2010 年 3 月 11~15 日实测结果比较

Fig. 9 Experimental results comparison(2010-3-11~2010-3-15)

相变蓄热墙体内部测点的温度始终较砖墙表面温度约高 2℃,体现了相变蓄热墙体具有较好的蓄热性能。

4 结论与讨论

对于厚度相同的相变蓄热墙体和普通红砖墙体的保温性能,相变蓄热墙体的保温性能优于普通红砖墙体。前者的导热系数 λ 约为后者的 1/2,前者的热阻 R 约为后者的 2.5 倍;作为蓄热性能,相变蓄热墙体的蓄热性能明显优于普通红砖墙体,前者对应 23℃的等价比热 c 约为后者的 14 倍,前者的热惰性指标值 D 约为后者的 3.5 倍。无论是晴天还是阴天,相变蓄热墙体的表面温度始终高于砖墙。2 月份的晴天,即使室外温度很低,二者表面温度最高时可相差 4℃左右(2 月 4 日);普通砖墙表面温度仅与相变蓄热墙体材料层中间测点的温度接

近,说明同样日照条件下,相变蓄热墙体具有更强的太阳能集热能力。

相变蓄热墙体材料层厚度为 40 mm 的试验条件下,2 月份的晴天,即使室外温度很低,相变蓄热材料层的蓄热量相当该材料层总蓄热量的 96.2%。

参考文献

[1] 彦启森,赵庆珠.建筑热过程[M].北京:中国建筑工业出版社,1986:60-80.
[2] 周玮,陈超,薛亚宁.被动式太阳能—相变蓄热温室传热特性的初步研究[J].中国工程热物理学会学术会议论文,2009:87.
[3] 蹇瑞欢.相变蓄热技术及理论在空调蓄热装置中的应用研究[D].北京:北京工业大学,2004.
[4] 张寅平,胡汉平,孔祥冬,等.相变储能—理论 and 应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1996:34-78.

Experimental Results of the PCM Wallboard Material
Applied in the Solar Greenhouse

XUE Ya-ning¹, CHEN Chao¹, LI Qing-qing¹, LI Zhuo¹, ZHOU Wei¹

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: As the main thermal storage and insulation structure, the north wall had important impact on the indoor thermal environment. Using the characteristics of storing and releasing large amounts of latent heat in a small temperature range, the composite phase change material applied in the inner wall surface of greenhouse can get a larger thermal storage capacity than the brick wall. The results showed that the after daub the phase change material, under not increase thickness of brick wall by red brick, availability of large thermal storage capacity.

Key words: solar greenhouse; composite phase change material storage wall materials; thermal storage capacity