

极端热湿气候区相变屋顶隔热性能优化分析

景鹏飞¹, 谢静超¹, 徐鑫¹, 张召锋², 崔娜³

(1. 北京工业大学 绿色建筑环境与节能技术北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 陕西建工安装集团有限公司, 陕西 西安 710068;
3. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088)

摘要: 为顺应南海岛礁开发建设与可持续发展, 针对该地区建筑内部空调负荷较大, 传统围护结构节能效果较差的问题, 提出将相变屋顶应用于该地区, 利用风洞试验测试探究其在不同辐射强度、相变层厚度和水平风速条件下的传热特性, 并结合 Matlab 模拟进一步确定适合该地区的相变层应用形式、厚度及相变温度, 结果表明: 增大辐射强度可增加屋顶相变层融化和凝固初始阶段的外表面温升速率; 增大相变层厚度及风速均可明显增加延迟时间, 而风速对传热衰减度的影响不明显; 当相变层厚度由 0 mm 增加至 40 mm 时, 各风速下的传热延迟时间平均增加 1.6 h, 当风速由自然对流增加到 3 m/s 时, 屋顶的传热延迟时间平均减小 0.7 h; 相变层在室外侧时可更好地降低内外表面温度并提高屋顶的传热衰减度, 相比于相变层在室内侧时传热衰减度提高了 1.1 倍, 内表面峰值温度降低 1.6 °C; 相变层厚度不应超过 30 mm; 相变温度区间处于 34~36 °C 时传热衰减度最大, 为 4.73, 隔热效果最好。

关键词: 相变; 衰减度; 延迟时间

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0887-10

Optimization analysis of thermal insulation performance of phase change roof in extreme hot-humid region

JING Pengfei¹, XIE Jingchao¹, XU Xin¹, ZHANG Shaofeng², CUI Na³

(1. Beijing Key Laboratory of Green Built Environment and Energy Efficient Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. SCEGC Installation Group Co., Ltd., Xi'an 710068, China;
3. China Jingye Engineering Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to comply with the development and sustainable development of islands and reefs in the South China Sea, in view of the large air conditioning load in the buildings and the poor energy-saving effect of traditional envelope structure in the region, this paper proposes to apply the phase change roof to the region, and uses the wind tunnel test to explore its heat transfer characteristics under different radiation intensities, phase change layer thicknesses and horizontal wind speeds, and then, combined with Matlab simulation to further determine the application form, thickness and phase transition temperature of the phase change layer suitable for this area. The results show that increasing the radiation intensity can increase the temperature rise rate of the outer surface of the roof phase change layer at the initial stage of melting and solidification, and increasing the thickness of phase change layer and wind speed can significantly increase the delay time, but the effect of wind speed on heat transfer attenuation is not obvious. When the thickness of the phase change layer increases from 0 mm to 40 mm, the heat transfer delay time at each wind speed increases by an average of 1.6 h. When the wind speed increases from natural convection to 3 m/s, the heat transfer delay time of the roof decreases by an average of 0.7 h. When the phase change layer is on the outdoor side, it can better reduce the internal and external surface temperature and increase the heat transfer attenuation of the roof. Compared with the phase change layer on the indoor side, the heat transfer attenuation is increased by 1.1 times, and the peak temperature of the inner surface is reduced by 1.6 °C; the thickness of the phase change layer should not exceed 30 mm; when the phase change temperature range is 34~36 °C, the heat transfer attenuation is the largest, which is 4.73, and the heat insulation effect is the best.

Key words: phase change; attenuation degree; delay time

收稿日期: 2021-04-11

修改稿日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51590912); 国家“十三五”重点研发计划课题(2018YFC0704505)

第一作者: 景鹏飞(1995—), 男, 硕士生, 主要从事建筑热工方面的研究. E-mail: 1440134581@qq.com

通信作者: 谢静超(1976—), 女, 教授, 主要从事建筑热工、相变蓄热技术及室内空气品质方面的研究. E-mail: xiejc@bjut.edu.cn

极端热湿气候区是指某地近地表面的空气温度、相对湿度和太阳辐射参数的峰值和平均值常年处于地表极高值区间,是不适宜人居住的气候区^[1]。我国南海诸岛屿位于北回归线以南,皆属于极端热湿气候区,其年辐射量超过 $6\,500\text{ MJ/m}^2$ 。根据太阳能资源丰富程度等级划分标准,该地区为 1 级,太阳资源最丰富。外围护结构外表面受到的日晒时数和太阳辐射强度,以水平面为最大^[2]。所以,隔热的重点在屋顶。对于有屋顶房间,通过屋面得热占总得热的 $40\%\sim 60\%$ ^[3-4],是房间南墙得热的 2.78 倍^[5]。

由于公共建筑夏季建筑负荷和室外的辐照度在时间上具有“同步”特性^[6],而相变材料作为新型储能材料,通过把相变过程中吸收或释放的大量热能储存起来而实现能量的时空转换^[7],因此相变储能技术已经成为近年来可再生能源领域的研究热点,建筑围护结构结合相变材料能够大幅提高其蓄热性能,削弱室外环境波动对室内热环境的不利影响^[8]。近年来,国内外学者针对相变材料的封装方式、相变储能围护结构的热工性能等进行了大量的研究。付舜宇等^[9]分析了影响相变材料储放热性能的因素,讨论了相变材料应用于建筑围护结构中的设计规则。结果表明:相变材料的应用应充分考虑与气候环境的匹配性,选择具有合适潜热和相变温度的相变材料才能使其发挥出最大效益。贾敬芝^[10]对国内外应用相变材料的超低能耗建筑进行分析。结果表明:墙体、窗体及屋顶等不同应用形式均能减少室内温度的波动,降低供暖、空调设备的容量。叶海等^[11]搭建了彩钢板轻质缩尺模型室,将铝箔袋封装的相变材料贴附在实验舱内壁进行实验,测试了相变材料在上海冬季的应用效果。结果表明:相变材料对实验舱的调温效果与天气情况密切相关。相变材料的使用使得温度波动幅度减小,提高了热舒适时间百分比。罗振宇等^[12]将不同相变温度的定型相变板分别应用于实验房的内外两侧,并对其夏季的隔热特性进行分析。结果表明:相变温度较高的外层定性相变板,能够很好地吸收太阳辐射的热量,降低并延缓室内温度峰值。刘加平等^[13]对热湿地区的建筑隔热措施进行了深入的文献调研工作,探索了该地区建筑隔热技术的发展方向。结果表明:相变围护结构具有良好的应用前景。

本文针对极端热湿气候区的特点,通过风洞试验台探究辐射强度及相变层厚度对相变隔热屋顶热工性能的影响机理,并利用 Matlab 数值模拟,进一步确定适合该地区的应用形式、相变层厚度

及相变温度,以期热湿地区相变围护结构在公共建筑的应用提供参考。

1 实验内容

1.1 实验构件制作

本次实验所用到的相变材料为导热性能良好的石墨烯复合微胶囊,相变材料的 DSC 曲线如图 1 示。

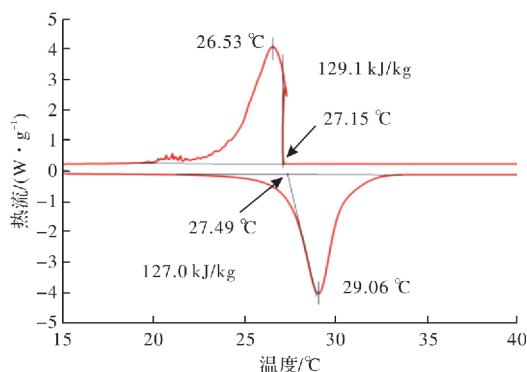


图 1 相变材料 DSC 测试结果

Fig. 1 DSC testing result of the PCM

由曲线中可以看出,相变材料熔化过程的相变区间为 $22\sim 33\text{ }^{\circ}\text{C}$,凝固过程中为 $27\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,熔化外推起始温度为 $27.49\text{ }^{\circ}\text{C}$,凝固外推起始温度为 $27.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,熔化过程的峰值温度和相变焓值分别为 $29.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 127.0 kJ/kg ,凝固过程分别为 $26.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 129.1 kJ/kg 。相变材料 DSC 从曲线中热流曲线可以看出,相变材料在相变区间内的吸/放热量远大于非相变区间,即相变材料在相变区间内的比热容远大于非相变区间,这也正体现了相变材料具有良好的蓄热能力。

相变构件在厚度方向上分为相变层和隔热层两层,构件上下表面及两层分界面均使用玻璃纤维网格布分隔。其中相变添加在室外侧,即借助相变材料的融化以防止辐射得热传入室内。根据风洞实验台中对实验构件大小的要求,制作了 4 块相变构件,实验构件的示意图以及实物图如图 2 所示。

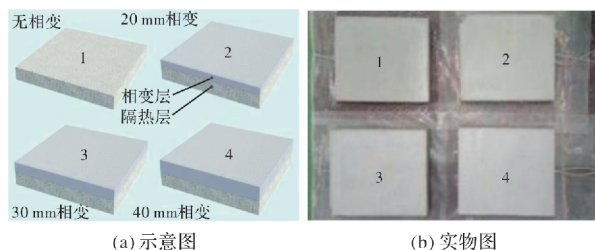


图 2 实验构件图示

Fig. 2 Diagram of experimental components

该相变构件的尺寸如表 1 所示。相变层由水泥、沙子和相变微胶囊(质量分数 20%)构成,其厚度分别选取 0 mm 、 20 mm 、 30 mm 及 40 mm ,隔热层由

粉煤灰和聚苯乙烯颗粒构成, 经实验测量, 相变层导热系数为 $0.35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, 隔热层导热系数为 $0.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, 各构件的隔热层厚度均为 40 mm .

表 1 实验构件尺寸设定

Tab. 1 Experimental component size setting /mm

实验构件编号	相变层厚度	隔热层厚度	总厚度	平面尺寸
1	0	40	40	300×300
2	20	40	60	
3	30	40	70	
4	40	40	80	

1.2 实验方法

湿热气候风洞实验台剖面图如图 3 所示. 风洞内表面无凸凹, 可通过空调小室及入口段加热器控制风洞洞体内的空气温度. 风洞平台可控制的参数及精度如表 2 所示, 为防止风洞内表面与试样表面有过大的长波辐射换热, 在风洞内表面贴铝箔. 为减少风洞内壁与外界的热量传递, 在风洞外壁夹层内设置 40 mm 厚的聚苯乙烯.

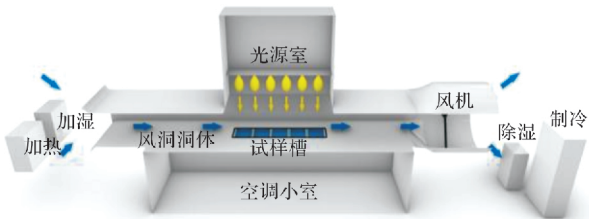


图 3 湿热气候风洞实验台剖面图

Fig. 3 Cross section of wind tunnel test bench

表 2 风洞平台控制参数

Tab. 2 Control parameters of wind tunnel platform

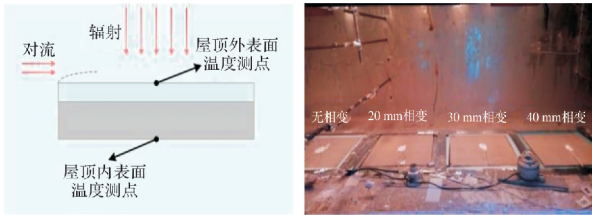
控制参数	风速 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	温度 $/^{\circ}\text{C}$	相对湿度 度/%	太阳辐射照 度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
调节范围	0.5~10	10~40	40~98	0~1 000
偏差	$\leq 5\%$	$\leq 0.3\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$

在风洞洞体内, 沿风流动方向布置有五个 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的试样槽位, 每个试样槽由“回”形槽和中心的称重槽组成. 称重槽尺寸 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 四周应与“回”形槽有一定间隙. 试样上表面与风洞内表面平齐, 构成风洞内表面的一部分. 实验台内温度控制范围在 $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$, 垂直于试样上表面辐射照度模拟控制范围为 $0 \sim 1\,000 \text{ W}/\text{m}^2$, 试样上表面水平风速控制范围为 $0 \sim 5 \text{ m}/\text{s}$. 通过连接数据测控系统可监控和记录逐时的数据.

1.3 实验步骤

实测过程中在构件的上下表面中心位置均布置了 T 型热电偶用于测量屋顶内外表面的温度,

其测量范围为 $-25 \sim 100^{\circ}\text{C}$, 精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. 在光源室下方布置了太阳总辐射传感器用于测量加载的辐射强度, 其型号为 LP PYRA 02, 测量灵敏度为 $10 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$, 测量范围为 $0 \sim 2\,000 \text{ W}/\text{m}^2$, 光谱范围(50%)为 $205 \sim 2\,800 \text{ nm}$. 将 4 块构件的四周均做保温处理, 并依次放入试样槽, 使其上表面与风洞的内表面平齐, 实测过程示意图及实景图如图 4 所示.



(a) 示意图

(b) 实景图

图 4 实测过程图

Fig. 4 Actual measurement process

实验具体操作步骤如下:

(1) 在构件上下表面布置热电偶, 构件四周保温处理. 将构件依次放入试样槽, 构件上表面与风洞内表面齐平;

(2) 设定上、下边界温度和水平风速为工况给定值, 待温度稳定后, 开启光源至某一辐射强度值开始实验(逐时边界通过导入 csv 格式文件进行自动控制);

(3) 时间到达指定融化时长后, 关闭光源, 开始凝固阶段, 凝固时间到达指定时长后结束实验.

1.4 实验工况

本次实验设定辐射强度分为恒定辐射强度及逐时辐射强度, 以西沙为例, 恒定辐射强度根据该地区水平面上逐时太阳辐射强度的时均值等差选取了三个辐射强度值分别为 $223 \text{ W}/\text{m}^2$ 、 $323 \text{ W}/\text{m}^2$ 及 $423 \text{ W}/\text{m}^2$; 水平风速的设定依次为自然对流、 $1 \text{ m}/\text{s}$ 、 $2 \text{ m}/\text{s}$ 及 $3 \text{ m}/\text{s}$; 相变层厚度分别为 0 mm 、 20 mm 、 30 mm 及 40 mm . 为了使相变材料经历完整的熔化和凝固过程, 融化时长和凝固时长各为 12 h , 风洞洞体内空气温度设定为低于相变温度的 20°C .

表 2 试验工况表

Tab. 2 Test condition table

试验 工况	辐射值 $/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	水平风速 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	相变层厚 度/mm
工况一	223、323、423	自然对流	20
工况二	逐时辐射强度	自然对流、 1、2、3	20
工况三	逐时辐射强度	1	0、20、30、40

2 传热模拟

2.1 模型假设

为了简化计算,突出物理本质,现对传热过程做如下假设:

(1)传热过程为一维传热,即只沿构件的厚度方向传热;

(2)除相变材料在相变区间的等效比热以外,其余热物性参数均为常数;

(3)不考虑相变材料熔化时的自然对流以及凝固时的过冷现象。

2.2 传热方程及边界条件

该问题为多层围护结构的一维相变传热,其中相变材料的特性使用热容法来表征,故而整体可用统一的控制方程来表示。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: ρ 为各层材料的密度, kg/m^3 ; c_p 为各层材料比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为各层材料的温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时间, s ; λ 为层材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; x 为沿厚度方向的坐标, m 。

差分形式选择外节点法,时间上的向后差分,空间上的中心差分。围护结构上表面为对流换热与辐射换热的综合边界,其边界方程如下。

$$x=L_2, q_r + h_{c1}(T_{f1} - T) = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

式中: q_r 为上表面接收的太阳辐射强度, W/m^2 ; h_{c1} 为上表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{f1} 为上表面空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

上表面边界方程的差分形式如下。

$$\rho_{n+1} c_{p,n+1} \frac{T_{n+1}^t - T_{n+1}^{t-1}}{\Delta \tau} = 2 \times \frac{q_r + h_{c1}(T_{f1} - T_{n+1}^t)}{\Delta x} + 2\lambda_{n+1} \frac{T_n^t - T_{n+1}^t}{(\Delta x)^2} \quad (3)$$

围护结构下表面为对流换热边界,其边界方程如公式(4)。

$$x=0, h_{c2}(T - T_{f2}) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

式中: h_{c2} 为下表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{f2} 为下表面空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

下表面边界方程的差分形式如下。

$$\rho_1 c_{p,1} \frac{T_1^t - T_1^{t-1}}{\Delta \tau} = 2\lambda_1 \frac{T_2^t - T_1^t}{(\Delta x)^2} - 2 \times \frac{h_{c2}(T_1 - T_{f2})}{\Delta x} \quad (5)$$

围护结构的初始状态则设定统一温度,初始条件如下。

$$\tau=0, T(x, \tau) = T_0 \quad (6)$$

初始条件的差分形式为

$$T_j^1 = T_0 \quad (7)$$

2.3 传热模型验证

大量研究表明,相变围护结构需要考虑与气候条件的匹配性,故本文对相变层的应用形式、相变层厚度及相变温度进行了数值模拟计算,以期对各项参数进行优化分析。模拟将西沙逐时的太阳辐射强度、室外空气干球温度、室外风速气象数据导入作为室外侧边界条件,室内侧空气温度设置为 25°C 。选取6月22日的气象条件进行计算并进行计算结果分析和讨论。计算从前一天开始进行,以排除初始条件对计算结果的影响。6月22日的逐时气象条件如图5。

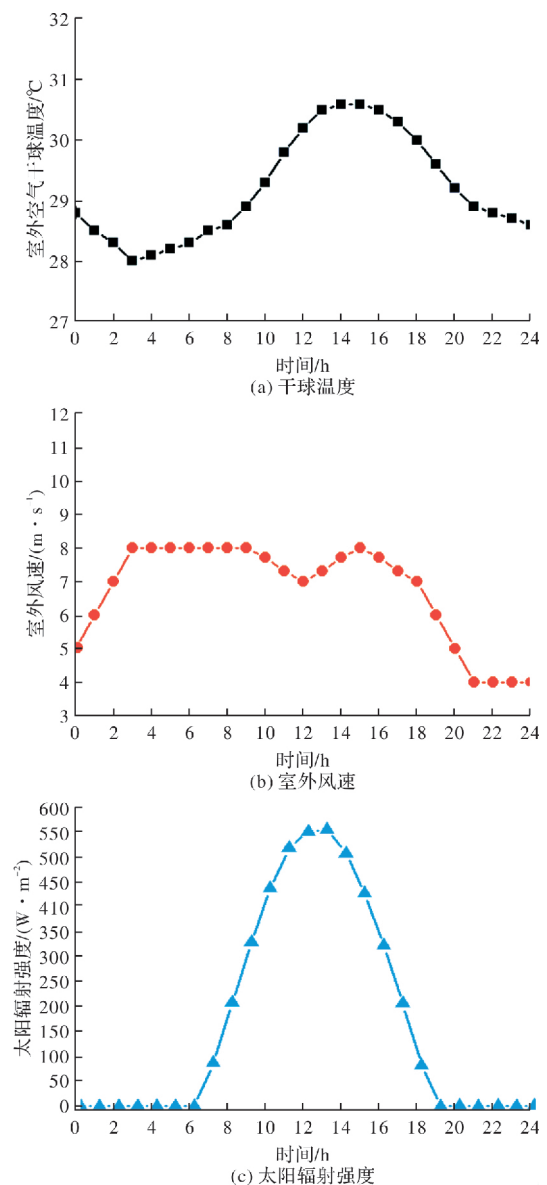


图5 室外气象条件

Fig. 5 Outdoor meteorological conditions

数值传热模型结果的准确性需要使用实验结果进行验证。经无关性验证最终确定时间步长本研究时间步长为 60 s, 空间步长为 1 mm。图 6 为数值传热模型计算结果与实验结果的构件外表面温度的对比曲线。由图中可以看出, 两条温度曲线的变化趋势相同。使用公式(8)对数值传热模型的计算结果与实验结果这两条曲线的均方根误差进行计算, $RMSE = 0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可认为数值传热模型的计算结果可靠。

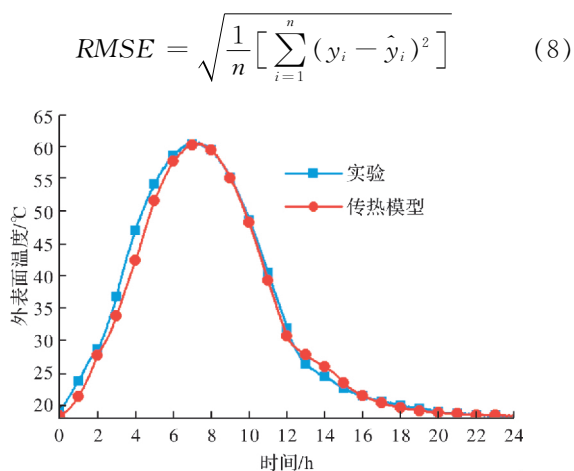


图 6 传热模型结果与实验结果外表面温度对比

Fig. 6 Comparison of surface temperature between numerical simulation and experimental results

3 结果与讨论

3.1 实验结果与讨论

3.1.1 辐射强度的影响

本次实验首先测试了垂直于构件上表面三种辐射强度下四块实验构件的融化和凝固过程。各辐射强度下相变构件和非相变构件的外表面温度如图 7 所示。

由图中可以看出, 各工况下的外表面温度均呈现相同的趋势: 融化过程开始后, 由于辐射得热的作用, 构件外表面温度迅速升高并逐渐达到稳定; 凝固过程开始后, 由于构件表面与空气之间温差的作用, 构件外表面温度迅速降低并逐渐稳定。即温升和温降的速率在融化和凝固的起始阶段较大, 随着融化和凝固过程的进行而逐渐减小。

对比非相变构件的温度曲线可知, 在融化阶段起始的两小时内, 不同辐射强度下非相变构件外表面温度平均升高了 $23.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相变构件平均升高 $21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 融化阶段结束时非相变构件外表面温度比相变构件平均升高了 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在凝固阶段起始的两小时内, 相变构件外表面温度平均降低了

$23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而非相变构件外表面温度平均降低 $24.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即添加相变材料不仅降低了融化(凝固)起始阶段的外表面升温(降温)速率同时也降低了外表面最终温度。

对比同一构件不同辐射强度的温度曲线可知, 增大辐射强度可增加融化和凝固初始阶段的温升速率, 同时也增大了构件外表面的最终温度。由图 7(a)可以看出, 当垂直于构件上表面的辐射强度为 232 W/m^2 和 432 W/m^2 时, 融化过程约 6 h 和 8 h 后温度达到稳定。即辐射强度增大时, 外表面温度到达稳定所需的时间会相应增加。

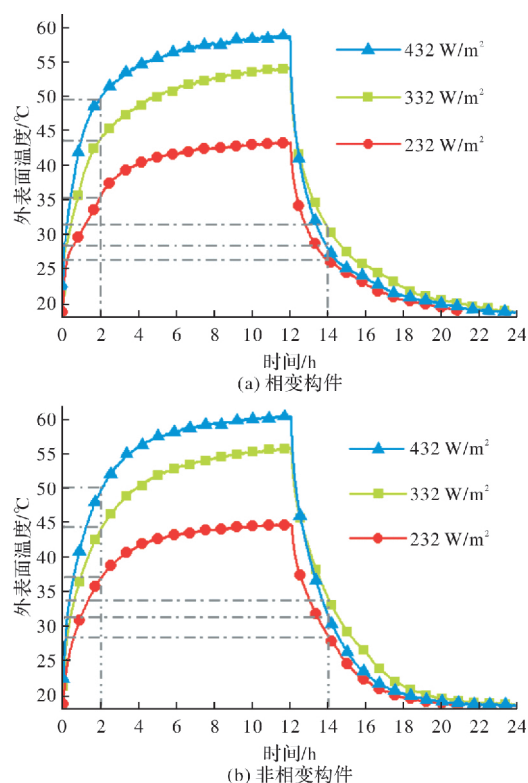


图 7 不同构件外表面温度

Fig. 7 External surface temperature of different component

由图 8 可以看出, 各辐射强度下融化阶段相变构件和非相变构件的内外表面温差变化均呈现相同的趋势: 融化开始时温差迅速升高至最大值, 之后逐渐降低并达到稳定。融化过程开始时, 外表面温度迅速升高, 内表面温度由于构件自身的延迟而并未快速响应, 从而温差会迅速升高。待室外边界影响到内表面温度后, 内外表面温差则逐渐降低。

对比非相变构件的温差曲线可知, 添加相变材料增大了内外表面温差, 且增大了温差到达峰值的时间, 即添加相变材料延长了内表面温度的响应时间。对比同一构件不同辐射强度的内外表面温差可知, 当垂直于构件上边面的辐射强度每

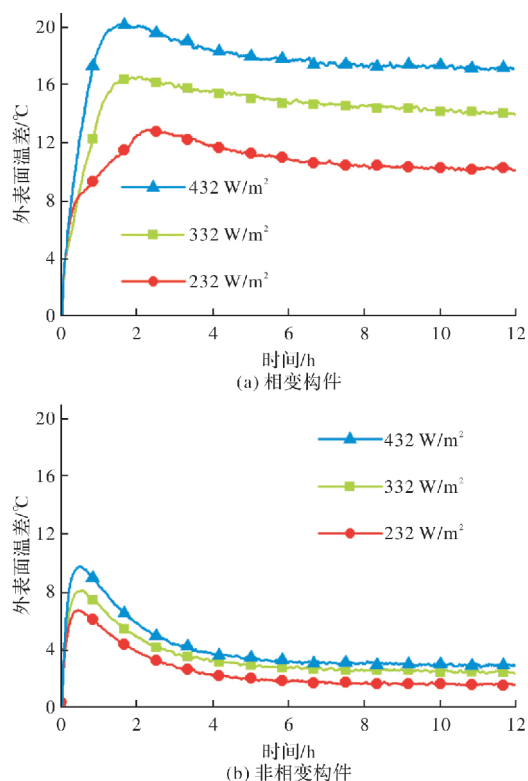


图8 构件内外表面温差

Fig. 8 Temperature difference between inner and outer surfaces of component

增大 100 W/m^2 时, 相变构件内外表面温差相应增大 4°C , 非相变构件增大 0.8°C .

3.1.2 水平风速的影响

如图9为各风速条件下相变层厚度为 20 mm 构件的外侧空气综合温度及上下表面温度。

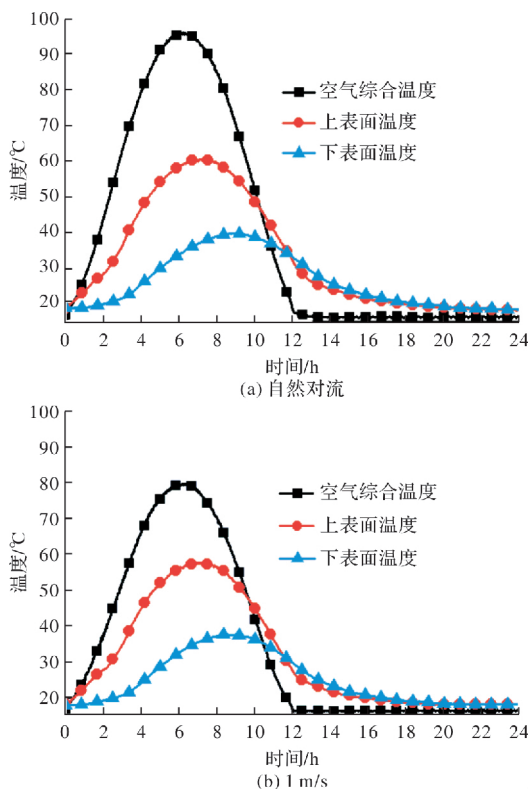


图9 风速对构件温度的影响

Fig. 9 Effect of wind speed on component temperature

由图中可以看出, 水平风速对空气综合温度的影响最为明显, 空气综合温度的峰值出现在 6 h 左右. 由图9(a)中三条曲线对比可知, 在得热量从构件外侧传递到构件内侧的过程中, 温度波幅会有相应程度的衰减, 且温度峰值出现的时间也会有一定的延迟. 这是因为热量在传递时会被材料吸收从而导致了传热的衰减现象. 对比不同风速条件的曲线可知, 增加风速会降低外侧空气综合温度波幅, 进而使得构件的外表面温度波幅和内表面温度波幅降低.

3.1.3 相变层厚度的影响

如图10为 1 m/s 风速条件下不同相变层厚度构件的外侧空气综合温度及内外表面温度. 对比图中不同相变层厚度的温度曲线可以看出, 增加相变层厚度对构件外表面温度波幅的影响较小, 而对构件内表面温度波幅的影响较大. 当相变层厚度由 0 mm 增加至 40 mm 时, 外表面温度波幅由 62.0°C 降为 47.6°C , 降低了 23.2% , 而内表面温度波幅由 58.9°C 降为 32.0°C , 降低了 45.7% .

3.1.4 传热衰减度与延迟时间

图11为不同风速工况、不同相变层厚度构件的传热衰减度. 传热衰减度即围护结构外侧综合温度的波幅与内表面温度波幅的比值. 由图中可以看出, 不同风速条件下, 不同厚度的相变层均

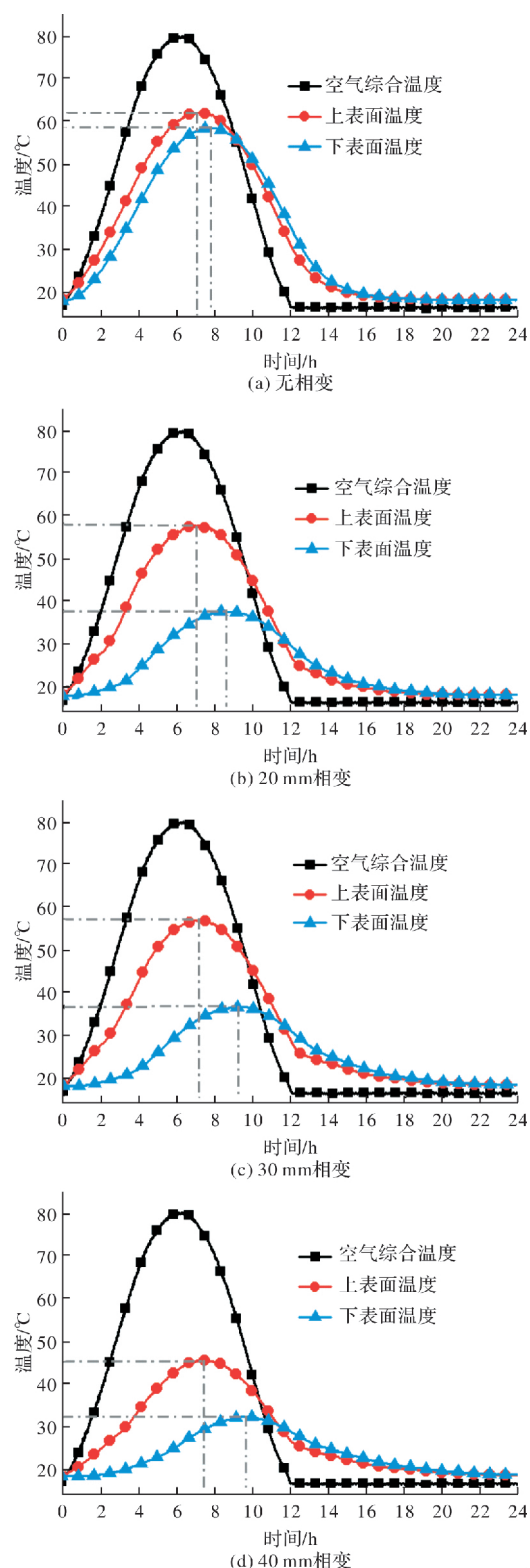


图 10 相变层厚度对构件温度的影响

Fig. 10 Effect of phase change layer thickness on component temperature

会明显增大传热衰减度. 随着风速的增加, 传热衰减度的变化趋势不明显, 结合风速对构件温度影响的曲线可知, 这是由于增加风速会同时影响外侧空气综合温度和内表面温度. 当相变层厚度由 20 mm 增加至 30 mm 时, 传热衰减度并未明显

增加, 分析这是由于相变层厚度为 30 mm 时, 相变过程仍然能够完全发生, 而当相变层厚度为 40 mm 时, 一部分相变材料并未发生相变, 仅增加了构件的厚度, 因此传热衰减度明显增大. 当风速为 3 m/s, 相变层厚度为 40 mm 时, 传热衰减度达到最大, 最大为 6.4.

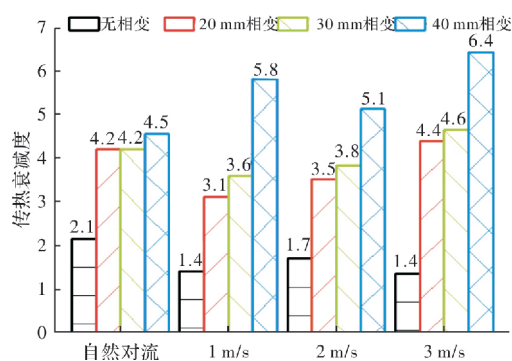


图 11 传热衰减度

Fig. 11 Heat transfer attenuation

图 12 为不同风速工况、不同相变层厚度构件的传热延迟时间. 延迟时间即内表面温度波对外侧综合温度的相应滞后. 由图中可以看出, 传热延迟时间随风速的增加呈现减小的趋势, 但当风速继续增加时, 传热延迟时间基本不再变化. 当风速由自然对流增加到 3 m/s 时, 各构件的传热延迟时间平均减小 0.7 h. 传热延迟时间随相变层厚度的增加而增加, 但当相变层厚度较大时, 传热延迟时间随相变层厚度的增加幅度较小. 当相变层厚度由 0 mm 增加至 40 mm 时, 各风速下的传热延迟时间平均增加 1.6 h.

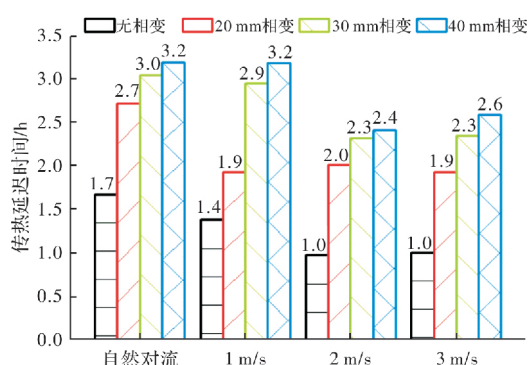


图 12 传热延迟时间

Fig. 12 Heat transfer delay time

3.2 模拟结果与讨论

3.2.1 分层形式的影响

将相变材料应用于围护结构中时, 相变层可放置于室内侧或室外侧. 为了讨论分层形式对相变隔热屋顶热工性能的影响, 传热模型中分别设置相变层在室外侧和相变层在室内侧两种形式,

同时保持相变层和隔热层的厚度不变,分别为20 mm和40 mm. 以下将对两种分层形式的外表面温度、内表面温度进行对比分析讨论.

图13(a)为两种分层形式下屋顶外表面温度. 对比太阳辐射强度曲线图可以看出,随着屋顶室外侧太阳辐射强度的增加,外表面温度呈现明显升高的趋势,即太阳辐射对屋顶外表面温度的影响效果明显. 当相变层在室外侧时,屋顶外表面峰值温度较小,且屋顶外表面温度波幅也较小. 即相变层设置在室外侧时,可借助相变材料的潜热作用来降低屋顶外表面温度.

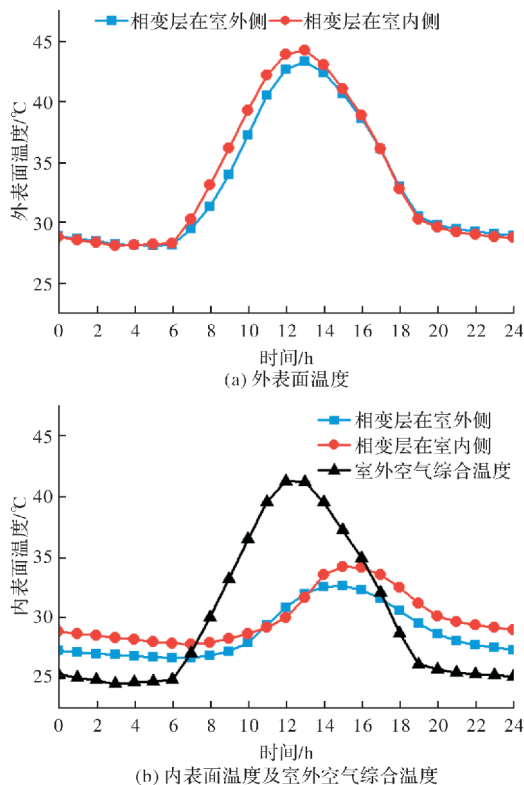


图13 不同分层形式的屋顶表面温度

Fig. 13 Roof surface temperature of different layered forms

如图13(b)为两种分层形式下的屋顶内表面温度以及室外空气综合温度. 由图中可以看出,屋顶内表面温度相对室外空气综合温度有明显的衰减和延迟. 当相变层在室外侧时,屋顶的传热衰减度为2.91,内表面峰值温度为32.6 °C;当相变层在室内侧时,屋顶的传热衰减度为2.64,内表面峰值温度为34.2 °C. 因而,将相变层设置在室外侧时,屋顶的传热衰减度较大,同时内表面峰值温度较小.

综上,对比以上两种分层形式可知,相变层在室外侧时可更好地降低内外表面温度并增加传热衰减度. 所以将相变层设置在室外侧能使围护结构更好地应对室外环境的波动,起到隔热的作

用,以减小室外环境对室内环境的影响.

3.2.2 相变层厚度的影响

当相变层中相变材料的质量分数不变时,改变相变层厚度即代表改变了相变材料的用量. 为了探究相变层厚度对相变隔热屋顶热工性能的影响,传热模型中分别设置10 mm、20 mm、30 mm和40 mm的相变层厚度,且隔热层均为40 mm. 以下将对各工况的外表面温度、内表面温度和分界面温度进行对比分析讨论.

图14为不同相变层厚度下屋顶的外表面温度. 对比图中曲线可知,随着相变层厚度的增加,屋顶外表面温度的波幅呈现减小趋势,但变化效果不明显,当相变层厚度由10 mm增加至40 mm时,外表面温度波幅从10.5 °C降低至9.6 °C. 外表面温度日均值不受相变层厚度影响,当相变层厚度由10 mm增加至40 mm时,外表面温度日均值一直保持在33.0 °C.

图15为不同相变层厚度下屋顶的内表面温度及室外的空气综合温度. 由图中可以看出,屋顶内表面温度相对室外空气综合温度有明显的衰减和延迟,且传热衰减度和传热延迟时间均随相变层厚度的增加而增加. 当相变层厚度由10 mm增加至40 mm时,传热衰减度从2.38增加到了4.94.

图16为不同相变层厚度下相变层与隔热层分界面的温度,其中两条水平线为相变温度区间. 通过对分界面温度与相变温度的比较,可以判定相变层是否已经完全液化或凝固. 对比图中各曲线可知,相变层厚度增加时,相变隔热屋顶在蓄热时完全液化的时间越晚,同时放热时完全凝固的时间也越晚. 但当相变层厚度大于30 mm时,分界面温度在夜间放热时已无法降低至相变温度区间以下,即相变材料在夜间不能完全释放潜热,因此相变层厚度不能大于30 mm.

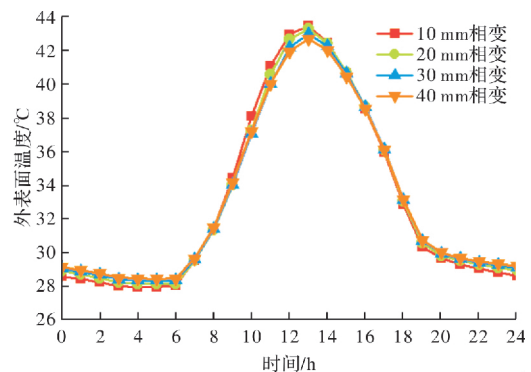


图14 屋顶外表面温度

Fig. 14 External surface temperature of roof

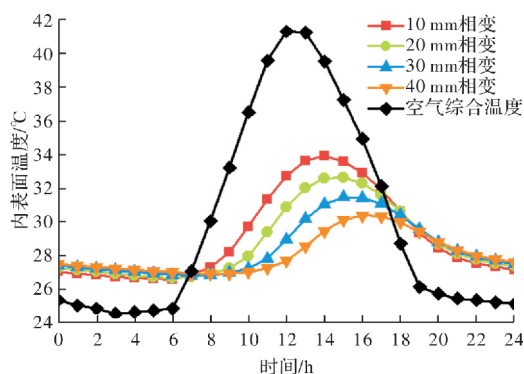


图 15 屋顶内表面温度

Fig. 15 Internal surface temperature of roof

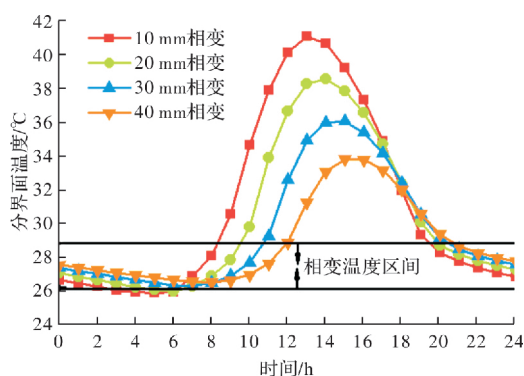


图 16 分界面温度

Fig. 16 Roof interface temperature

综上,相变层厚度越大,内外表面温度波幅均会减小,且屋顶的传热衰减度和传热延迟时间均会增大,这使得屋顶更有利于隔热。但是当相变层厚度大于 30 mm 后,相变层将不能完全放热,因此相变层合理的厚度应为 30 mm。

3.2.3 相变温度的影响

相变材料虽然可以在相变过程中储存大量潜热,但是如果相变温度区间选择不恰当时,就不能良好地发挥其潜热的作用。因而相变温度区间作为遴选相变材料时所需要考虑的重要参数之一,往往对相变材料的应用效果有着巨大的影响。为了对比相变温度区间对相变隔热屋顶热工性能的影响,传热模型中设置相变温度区间为 28~30 °C、30~32 °C、32~34 °C、34~36 °C、36~38 °C 和 38~40 °C 的对比工况,同时保持其他参数不变。以下将选取三种相变温度区间的结果进行直观对比,并对各工况的外表面温度和内表面温度进行分析讨论。

如图 17 为不同相变温度区间下屋顶的表面温度。由图可知,由于相变温度的不同,虽然各外表面温度曲线在蓄热升温 and 放热降温的阶段的变化速率不同,但当温度进入各自的相变区间时,

各外表面温度曲线的升温速率和降温速率均会呈现减小的趋势。内表面温度随相变温度区间的变化趋势与外表面温度曲线相似。为了进一步分析相变温度区间的影响,图 18 中列出了各工况下屋顶的传热衰减度,对比可知,由于相变温度区间的变化影响了内表面温度的波幅,所以当相变温度区间升高时,传热衰减度呈现先增大后减小的趋势。在相变温度区间处于 34~36 °C 时传热衰减度达到峰值 4.7。

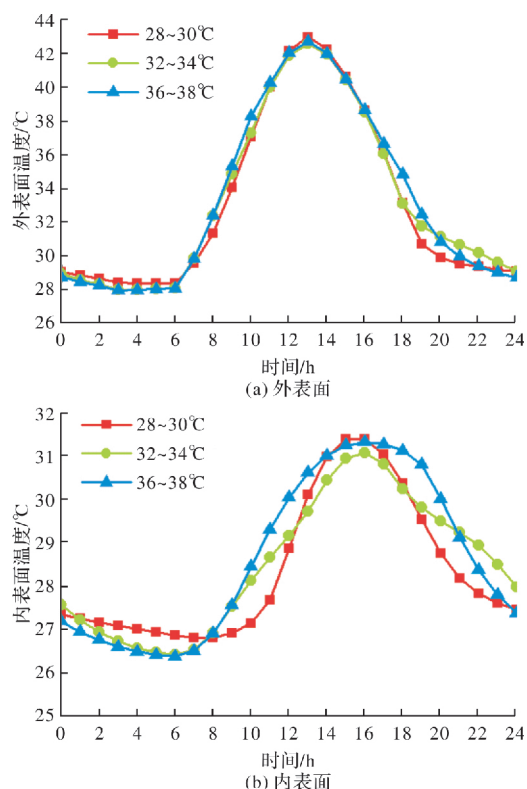


图 17 不同相变温度区间的表面温度

Fig. 17 Surface temperature of different phase change temperature ranges

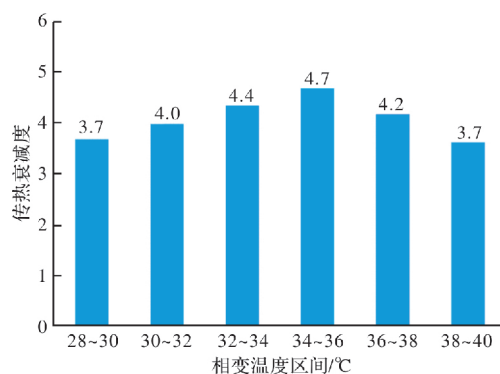


图 18 不同相变温度区间的屋顶传热衰减度

Fig. 18 Heat transfer attenuation of roof in different phase change temperature range

综上可知,相变潜热会使得内外表面温度在进入相变区间时升温和降温的速率减小,故而改

变相变温度区间会改变温度曲线的走向,进而改变内外表面的温度波幅。如图17所示,当相变温度区间处于 $34\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时传热衰减度达到最大值,即该工况下相变隔热屋顶的隔热效果最好。

4 结论

本文利用热湿气候风洞实验台测试了作为相变隔热屋顶的应用形式下相变构件的热性能,探究不同辐射强度、水平风速及相变层厚度对隔热性能的影响规律,并通过Matlab数值模拟进一步确定了适合该极端热湿气候区的屋顶形式、相变层厚度及相变温度。主要结论如下:

(1) 相变层可明显增大屋顶内外表面温差,增大辐射强度可增加融化和凝固初始阶段的外表面升温速率;增大水平风速可以明显降低传热的延迟时间而对传热衰减度的影响不明显;

(2) 相变层在室外侧时可更好地提高屋顶的传热衰减度,相变层合理的厚度应为 30 mm ,当相变层厚度大于 30 mm 后,屋顶分界面温度在夜间放热时已无法降低至相变温度区间以下,即相变层将不能完全放热;

(3) 改变相变温度区间会改变内外表面的温度曲线的走向,进而改变温度波幅从而影响屋顶的传热衰减度。当相变温度区间处于 $34\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时传热衰减度最大,隔热效果最好。

参考文献 References

- [1] 朱志明,杨红,谢静超. 极端热湿气候区的建筑屋面节能构造浅析[J]. 中国建筑防水,2017,23:26-31.
ZHU Zhiming, YANG Hong, XIE Jingchao. Analysis on energy saving structure of building roof suitable in extreme hot and humid climate area[J]. China Building Water proofing, 2017, 23: 26-31.
- [2] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
LIU Jiaping. Architectural physics[M]. Beijing: China Architecture & Industry Press, 2015.
- [3] SOUBDHANT Feuilleardt, Badef. Experimental evaluation of insulation material in roofing system under tropical climate[J]. Solar Energy, 2005, 79(3): 311-320.
- [4] BIWOLEPH Woloszyn, M. POMPEOC. Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summertime[J]. Energy Buildings, 2008, 40(8): 1487-1497.
- [5] 项铮, 储依. 几种屋顶绿化形式的隔热及节能效果研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011(增刊): 42-44.
XIANG Zheng, CHU Yi. Study on heat insulation and energy saving effect of several roof greening forms[J].

- Journal of Civil and Environmental Engineering, 2011(S): 42-44.
- [6] 孙峙峰, 赵耀华, 徐伟, 等. 相变蓄冷技术在公共建筑太阳能空调系统中的应用研究[J]. 太阳能学报, 2019, (40)11: 3148-3155.
SUN Shifeng, ZHAO Yaohua, XU Wei, et al. Application study on phase-change storage of solar air conditioning system in public buildings[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, (40)11: 3148-3155.
- [7] 谢静超, 邵腾, 李悦, 等. 相变构件导热系数测定方法的研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2013, 45(2): 192-198.
XIE Jingchao, SHAO Teng, Li Yue, et al. Reserch on thermal conductivity measurement of PCM components[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013, 45(2): 192-198.
- [8] 付舜宇, 杨英英, 武卫东. 相变材料应用于建筑围护结构中定型封装方法研究进展[J]. 化工新型材料, 2020.
FU Shunyu, YANG Yingying, WU Weidong, A review of packaging methods of phase change materials in building envelopes[J]. New Chemical Materials, 2020.
- [9] 乔宇豪, 鲍嘉阳, 刘衍, 等. 典型外墙构造复合相变层的热工性能研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(6): 1994-2021.
QIAO Yuhao, BAO Jiayang, LIU Heng, et al. Investigation of thermal performance of typical exterior wall structure with PCMs layer[J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(6): 1994-2021.
- [10] 贾敬芝. 近零能耗建筑中相变建筑材料的研究进展[J]. 暖通空调, 2021, 51(2): 47-54.
JIA Jingzhi. Review on phase change building materials in nearly zero energy buildings[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(2): 47-54.
- [11] 叶海, 王钰君, 钱锋. 相变蓄能围护结构的冬季调温性能实验研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(4): 99-106.
YE Hai, WANG Yujun, QIAN Feng. Experimental study on temperature adjusting performance of envelope structure with PCM energy storage in winter[J]. Building Science, 2020, 36(4): 99-106.
- [12] 罗振宇, 朱娜, 胡乃帅, 等. 双层定型相变围护结构夏季热特性实验研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(8): 37-42.
LUO Zhenyu, ZHU Na, HU Naishuai, et al. An experimental study on thermal characteristics of shape stabilized phase change material in summer[J]. Building Science, 2020, 36(8): 37-42.
- [13] 刘加平, 罗戴维, 刘大龙. 热湿气候区建筑防热研究进展[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(1): 1-9.
LIU Jiaping, LUO Daiwei, LIU Dalong. Review of building thermal protection in the hot and humid climate[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48(1): 1-9.

(编辑 吴海西 沈 波)