

[文章编号] 1002-8528(2013)08-0034-05

周期性热作用下 相变材料内部相变传热特征实验研究

冉茂宇, 赵红利(华侨大学 建筑学院, 厦门 361021)

[摘要] 为了揭示周期性热作用下相变材料内部相变传热特征, 为建筑外表相变隔热设计和计算提供支撑, 本文设计制作了能模拟太阳运行、提供周期性加热的装置, 并将正 18 烷封装于塑料圆桶容器中, 使容器底部和侧面绝热, 制作了测试试件。利用热电偶和巡检仪自动记录了周期性热作用下相变材料内部各层温度的变化。测试结果表明, 在稳定周期性热作用下, 材料内部相变传热特征主要可表述为: 1) 材料在非稳态周期性相变传热阶段, 各层温度在达到相变温度点之前, 温度变化明显; 相界面会随着周期性加热次数的增加间断性地向内部扩展; 温度平均值和振幅值向稳态周期性相变传热时的平均值和振幅值靠近。2) 材料在稳态周期性相变传热阶段, 内部各点温度也表现出与外界热作用等周期性变化, 温度振幅从外到内依次减小。这与发生在固体中的周期性传热特性类似。但材料内温度变化呈现折转现象, 在温度明显升高前出现等温滞后, 在温度降低时会出现等温冷却。这与发生在固体中的传热现象有很大的区别。3) 材料在稳定周期性热作用下, 内部不会出现多个相界面共存现象。4) 空气流速对相变材料中温度振幅和相界面移动速率都有较大影响, 提高空气流速可以降低温度振幅和减慢相变进程。这意味着当相变材料用于建筑外表进行相变隔热时, 可以通过组织自然通风减少其用量。

[关键词] 相变材料; 周期性热作用; 相变传热特征; 等温滞后; 等温冷却

[中图分类号] TU55⁺1 **[文献标识码]** A

Experimental Study on the Characteristics of Phase Change Heat Transfer in PCM with Outside Periodic Heating and Cooling

RAN Mao-yu, ZHAO Hong-li (School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

[Abstract] In order to reveal the phase change heat transfer characteristics in PCM with outside steady periodic heating and cooling and provide some supports for thermal insulation of building skin with PCM, an apparatus which can simulate the sun running and provide periodic heating was designed and made in this paper; a test specimen was also fabricated by encapsulating the octadecane into a plastic circular container with its bottom and side thermal insulation. The temperature variations of each layer in the PCM were automatically recorded by thermocouples and instrument during the steady periodic heating and cooling process. The test results show that the characteristics of phase change heat transfer in PCM can be mainly described as followings: 1) at the unsteady periodic phase change stage, the temperature of each layer in PCM changes obviously before it reaches the phase transformation point; the phase change interface moves intermittently from outside to inside with the increase of times of periodical heating and cooling; the value of average temperature and temperature amplitude in PCM changes gradually closing to the value of that at the steady periodic phase change stage. 2) at the steady periodic phase change stage, the temperature of each layer in PCM changes periodically with the same period of outside heating and cooling; the temperature amplitude in PCM decreases from outside to inside. Those are similar to that occurred in solid. However, the temperature changes with folding phenomena; the isothermal lag occurs before temperature obviously rising and isothermal cooling occurs during temperature dropping. This is quite different from that occurred in solid. 3) with outside steady periodic heating and cooling, multiple phase change interfaces will not happen in PCM. 4) The air velocity has great influence on the temperature amplitude and the moving rate of the phase change interface, increasing the air flow rate can reduce the temperature amplitude and slow the phase change process. This means that when the PCM is used in the exterior skin of building to prevent the solar heating, its dosage can be reduced by the organization of natural ventilation.

[Keywords] phase change material, periodic heating and cooling, characteristic of phase change heat transfer, isothermal lag, isothermal cooling

[收稿日期] 2013-03-14 **[修回日期]** 2013-05-02

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51078156); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01297); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室资助项目(2009KB13); 华侨大学基本科研业务费专项基金资助(JB-JC1006)

[作者简介] 冉茂宇(1967-), 男, 博士, 教授

[联系方式] ranmaoyu@yahoo.com.cn

1 引言

相变材料(phase change material, PCM)是指在一个相对稳定的温度下发生物态转变能吸收或释放大量的潜热的材料。它具有良好的热能保存和热缓冲器的作用,在能源、航天、军事、农业、化工、冶金等领域得到广泛研究^[1]。近 20 年来,随着能源匮乏和建筑节能受到重视,在建筑中利用相变材料也得到了持续关注 and 极大发展^[2]。相变材料在建筑中有多种用途,可以用来进行主动式储热储冷,减小采暖空调设备容量,对电力起到“削峰填谷”作用^[3-5];可以用于寒冷地区吸收太阳能,实现被动式采暖,抑制室内温度波动,提高室内热舒适度^[6-11];可以用于围护结构中,增加热惰性,衰减室外温度波动^[12-15];还可以用于炎热地区建筑外表隔热,对气候进行缓冲,实现建筑轻质隔热^[16-18]。然而,无论是在建筑领域中利用相变材料,还是在其他领域中利用相变材料,相变材料所受到的热冷作用大多是外界周期性热冷作用,而据现有文献看来,尚未见到周期性热作用下相变传热的实测研究。早期文献[19]基于温度的误差函数分布假设,导出了恒温边界条件下固-液相界面位置随时间移动的理论关系。冉茂宇曾用拉普拉斯变换导出了恒温边界条件下固-液相界面移动速率随时间的变化关系,得出相变速率随时间推移而减小的结论^[20]。林辉等利用数值计算和实测方法研究了恒热流边界条件下相变传热过程,指出相变速率随时间推移而增加^[21]。关于变温边界条件或第 3 类边界条件下相变传热研究,目前的文献无例外都是基于数值计算方法而进行的^[22-25]。在数值计算方法中,依能量方程中比热的处理可分为焓法、显热容法或等效热容法,而计算结果也因处理方法不同有所差异。周期性热作用下相变材料内部相变传热有哪些特征是需要明确的重要课题,而究竟用哪种方法来处理能量方程中比热参数较为合理也需要实验验证。本文的目的之一是在创建稳定的周期性热作用条件基础上,对周期性热作用下相变材料内部温度变化进行测试,以揭示周期性热作用下材料内部相变传热特征,明确材料内部温度变化和相界面移动规律;目的之二是为变温第 3 类边界条件下相变传热数值计算中比热处理方法的选用提供实验依据,进而为建筑外表相变隔热设计和计算提供支撑,也可供其他相关研究参考。

2 周期性热作用装置及其性能

笔者自行设计和制作了能模拟太阳运行、提供周期性加热的装置,如图 1a 所示。将试件 6 置于图 1 中旋转臂中间位置,设置控制器运行周期和运行圈数,启动装置,模拟灯便东升西落,模拟太阳运行、周期性加热被测试件。调整支撑架倾斜度可以模拟任意时节太阳赤纬角,调整模拟灯罩口与试件上表面之间的距离 L ,可以调节灯的辐射加热大小。太阳模拟灯是由旋转抛物面灯罩和金属卤化物灯组成,旋转抛物面灯罩口直径 0.4 mm,焦距为 0.196 m。为了提高模拟灯辐射加热均匀性,采用内锥半球壳反射体遮挡中心辐射,同时提高灯罩非中心区域的辐射能力,如图 1b 所示。

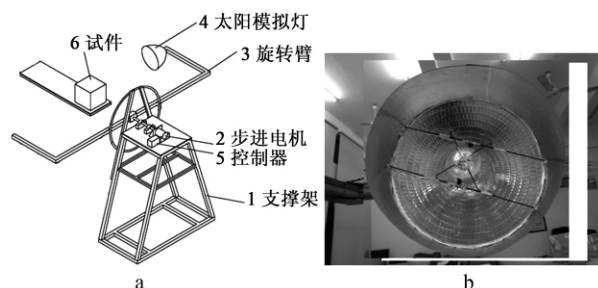


图 1 周期性加热装置及太阳模拟灯

图 2 示出了模拟灯距试件不同距离 L 处垂直照射试件上表面形成的光斑辐射能流分布。在距离 L 为 1.126 m 条件下,辐射光斑直径小于 0.16 m 范围内,辐射能流分布均匀,相对误差为 0.057%。图 3 示出了距离 L 为 0.58 m 和 1.126 m 模拟灯运转时在试件水平面上产生的辐射强度变化。图 3 显示,水平面受到的辐射强度随模拟灯运转符合余弦变化规律。由此可知,周期性加热装置具有良好的周期性加热性能。

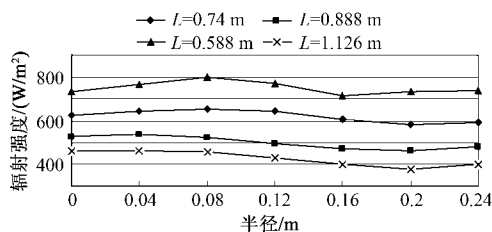


图 2 太阳灯辐射光斑能流密度分布

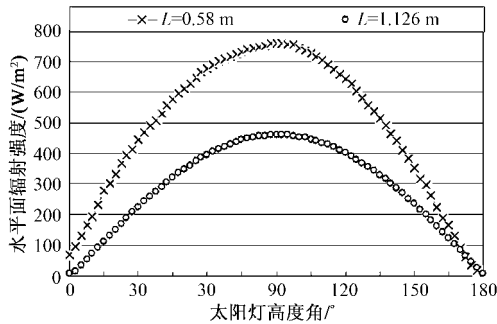


图3 模拟灯运转时水平面辐射强度变化

3 相变材料及试件制作

有机石蜡正 18 烷是适于建筑用的相变材料,其相变温度范围为 $27 \sim 28.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,相变热焓在 $242.67 \sim 243.6 \text{ kJ/kg}$ 之间,其具有无毒、无腐蚀、多次热循环试验后仍能保持优良的相变性能。本文选用其作为相变材料进行测试,以便进行后续的理论分析和计算模拟。试件制作时,先用聚乙烯泡沫切割成底座和保温圆环筒。底座尺寸为 439 mm (长) \times 439 mm (宽) \times 350 mm (高),保温圆环筒高 56 mm ,外直径 439 mm ,内直径 138 mm 。将保温圆环筒叠加在底座泡沫上,形成试件绝热体。后将装有正 18 烷的塑料圆桶嵌入到绝热体中,形成完整的被加热试件,如图 4a 所示。相变材料的盛装及测温热电偶布置见图 4b。用壁厚为 2 mm 透明塑料圆桶制成盛装容器,容器外直径 136 mm ,内直径 132 mm 。容器顶面是厚 0.2 mm 的镀锌铁皮圆片,铁皮圆片通过强力粘胶剂与圆桶壁粘接。在铁皮圆片与圆桶壁粘接前,先布置和固定测温热电偶。沿塑料圆桶高度打小孔,将热电偶端头固定在细铁丝上,细铁丝和热电偶穿过小孔并胶结在圆桶壁上,这样可保证热电偶线在圆筒内部平直以及容器的密封性。1#热电偶用于测试室内空气温度,在图 4b 中没有标示出来。2#热电偶贴于顶面铁皮圆片上表面,位于圆片中心,其他热电偶位于相变材料中。为了观察热量向材料内部传递是否均匀,在同一高度层布置了 2 对热电偶,分别是 5#和 6#、8#和 9#。盛装正 18 烷相变材料时,先将其加热至液态,然后从预留的壁孔处注入,直至气泡全部排除。确保液态相变材料在容器中无渗漏。冷却相变材料,将盛装容器放入泡沫绝热体中,用铝箔剪出中心圆口,贴盖在泡沫绝热体上,完成试件制作和位置安装。

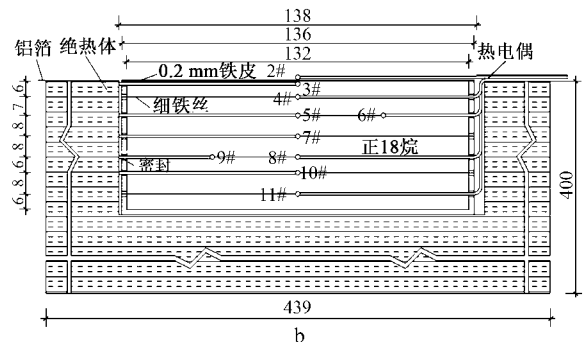
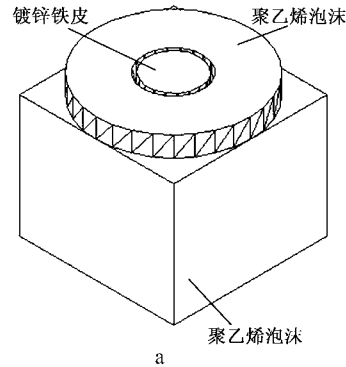


图4 试件及热电偶布置固定

4 测试方法与实测工况

将制作好的试件放置到周期性热作用装置下,调节模拟灯使灯罩口距试件表面距离为 1.126 m 。将热电偶接入热工巡检仪进行温度监测。用室内气候仪监测试件附近气温和空气流速。热工巡检仪和室内气候仪布置及现场实测见图 5。



图5 监测仪器布置及测试现场

测试工况是在稳定周期性热作用下进行的,包括工况 I—材料非稳态周期性相变传热、II—材料稳态周期性相变传热、III—风速对材料稳态周期性相变传热的影响。稳定周期性热作用是这样实现的:室内气温用空调维持在 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近;稳定的热作用周期设置为 24 h ,太阳模拟灯在试件上半空间运

转时, 定时控制器接通电路, 模拟灯通电, 辐射加热试件表面; 而在试件下半空间运转时, 定时控制器断开电路, 试件表面不受辐射加热自然冷却。图 6 示出了对应于工况 I 的周期性热作用条件。工况 II 和工况 III 的辐射加热强度与工况 I 相同, 只是室内气温波动稍有不同, 参见图 8 和图 9 中气温变化。测试期间, 房间门窗关闭, 设置热工巡检仪和室内气候仪每隔 20 min 自动记录 1 次。实测工况 I 和工况 II 的风速是室内自然风速, 平均值分别为 0.068 m/s 和 0.062 4 m/s; 工况 III 的风速是在离试件适当距离处使用风扇吹送水平气流, 平均风速为 0.957 5 m/s。

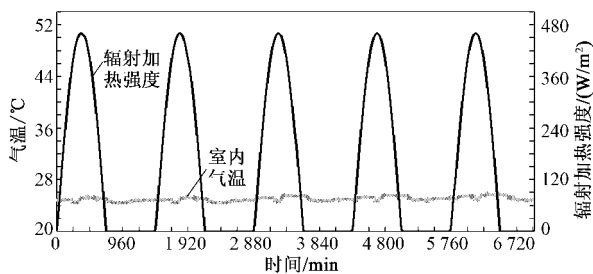


图 6 工况 I 试件表面周期性加热与冷却条件

5 实测结果及其分析

图 7 是工况 I 的实测结果。从图 7 可以看出, 在稳定的周期性热作用条件下, 材料内温度变化呈现以下温度变化特征: 1) 各层温度从固相初始温度迅速上升, 在未达到相变温度点之前, 温度变化随时间推移一直处于上升状况, 上升到相变温度点时, 出现平缓现象。这是因为, 在材料达到相变温度点之前, 依靠固相导热获得显热, 因此温度升高表现显著。固相温度上升到相变温度点时, 材料吸收的热量用于相转变表现为潜热, 故而温度变化平缓。2) 材料层发生固—液相变是从外到内依次进行的, 接近表层的材料较先发生固—液相变(2#和3#在第 1 个周期就发生了相变), 远离表层的材料较后发生固—液相变(11#在第 4 个周期才出现明显的相变), 即材料层发生固—液相变从外到内间断性扩展。这是因为, 在各层温度达到稳态周期性变化之前, 试件在一个周期内受热时得到的热量总是大于冷却时散失的热量, 获得的净热量从表层向内层传入, 只有接近表层的材料发生固—液相变后, 才能将热量进一步传给内层, 故而固—液相变向内层间断

性扩展。3) 材料层发生相变液化后, 受热温度会再次迅速上升, 受冷温度会迅速下降, 但冷至相变温度点时, 温度下降平缓变化。这是因为材料处于液相时, 受热或受冷时表现的都是显热, 故而温度变化明显; 当材料冷至相变温度点时, 冷量表现为潜热, 故而温度变化再次呈现平缓现象。4) 材料层发生固—液相变后, 温度变化呈明显的周期性, 温度曲线呈现显著折转性, 且随热作用周期数增加, 温度振幅值和周期平均温度值逐渐增大并向稳态周期性变化之值靠近。这是因为, 在各层温度达到稳态周期性变化之前, 材料层受热大于受冷, 因此, 周期平均温度和振幅会逐渐升高; 又由于材料处于液相时受热或受冷表现为显热, 所以温度变化明显, 周期性变化得以凸显。温度曲线呈现折转性, 是因为材料层在受冷时, 最低温度降到了相变温度点, 温度曲线呈平缓变化, 而当在下一周期受热为潜热时温度变化仍不会明显, 但受热为显热时温度变化迅速上升, 故而温度曲线呈现显著折转性。

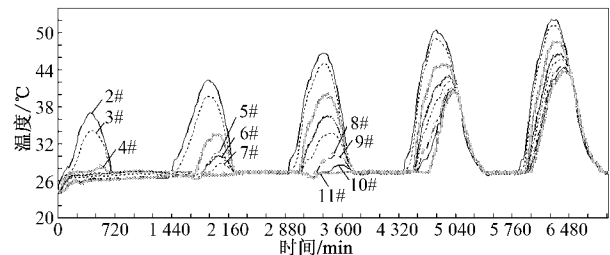


图 7 工况 I—材料层非稳态周期性相变传热温度变化

图 8 是工况 II 的实测结果, 它是工况 I 经多次周期性热作用后达到稳态周期性相变传热的状况。从图 8 可以看出, 当材料层达到稳态周期性相变传热后, 存在着以下相变传热特征: 1) 材料内各层温度也表现出周期性变化, 其周期与外部热作用周期相同; 材料内各层温度振幅从外到内依次减小, 仍然表现出对外部温度波的衰减作用。这一特征与固态材料中温度周期性变化和振幅衰减类同。2) 材料内各层温度变化曲线不再总是光滑连续, 而是部分出现平直折转。材料层在受热温度明显升高前温度变化表现平直, 而在受冷温度明显下降后温度变化再次出现平直。平直变化的温度值处于相变温度点附近。这一温度变化特征与固态材料中温度光滑连续变化有明显区别。3) 材料在受热温升阶段, 温度变化表现出从外到内等温滞后再依次升高的特性; 材料在受冷温降阶段, 温度变化表现出从外到内依

次降低后再等温冷却。这与固体材料中非等温滞后和非等温冷却又有很大的区别。这是因为,在升温阶段,热量总是从外向内依次传递,外层材料较先获得热量较先发生相变,内层材料较后获得热量较后相变。另外,在升温阶段,外层温度总是高于内层温度,外层处于内层之上,液态材料不易发生对流混合,内层相变和温升的滞后故而明显。在受冷阶段,外层较先受到冷却,当出现上层温度低于下层温度时,液态材料发生对流混合会阻止上层温度继续下降,从而导致等温下降现象。4) 在稳态周期性热作用下,材料内部不会出现多个相界面情况。这是因为,在温升时相界面向内层移动,在外层形成液相区,在内层形成两相区或固相区,而在冷却时外层液相区会出现等温冷却,外层温度不会出现明显低于内层温度的情况,直至液态材料全部变成固相后,才会出现外层温度明显低于内层温度。因此,在材料内部不会出现多个相界面情况。

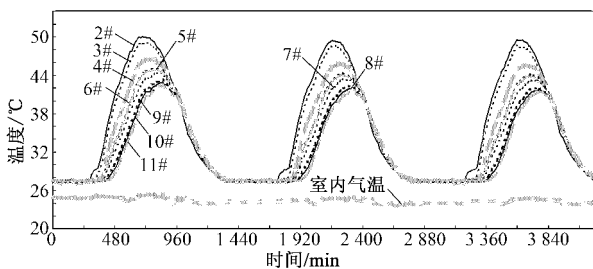


图 8 工况 II—材料层稳态周期性相变传热温度变化

图 9 是工况 III 实测结果。对比图 8 和图 9 中相同测点温度变化曲线,不难发现工况 III 的风速提高,既降低了材料各层的平均温度(例如 4# 热电偶在图 8 中平均温度为 33.9 °C 左右,而在图 9 中其值为 33.3 °C 左右),也降低了材料内部各层温度的周期性振幅(例如 4# 热电偶在图 8 中最高温度为 46 °C 左右,而在图 9 中其值为 37 °C 左右),还降低了相界面在材料中的移动速率(例如,在图 8 中,11# 测点开始明显温升比 3# 测点滞后约为 200 min,而在图 9 中此滞后时间约为 300 min)。这是因为,在稳定的周期性热作用下,试件外表所受到的周期性热作用可以用稳定的周期性综合温度 $t_z = t_a + \rho l / \alpha_e$ 表示,其中 t_a 为空气温度, l 为辐射加热强度, ρ 为试件表面对辐射的吸收系数, α_e 为试件表面与空气之间的换热系数。综合温度平均值为 $\bar{t}_z = \bar{t}_a + \rho \bar{l} / \alpha_e$, 当空气流速增加时,换热系数 α_e 增加,因此综合温度平

均值 \bar{t}_z 将减小,这导致材料内部达到稳定周期性相变传热时,周期平均温度值减小。由于在本文实测工况下,空气温度 t_a 波动相对于辐射当量温度 $\rho l / \alpha_e$ 波动很小,综合温度 t_z 的振幅近似为 $A_z = \rho (I_{\max} - \bar{l}) / \alpha_e$, 其中 I_{\max} 为试件表面受到的最大辐射加热强度, \bar{l} 为试件表面受到的平均辐射强度。由此可知,当空气流速增加时,换热系数 α_e 增加,同样导致综合温度振幅值 A_z 减小,故而材料内部达到稳定周期性相变传热时振幅相应变小。由此可推知,在建筑外表利用相变材料进行隔热(例如在屋面),自然风速大的地区更有优势,可以用相变温度较低的材料,材料用量也会减少。另外,采取遮阳措施阻隔太阳辐射或使用吸收系数小的反射材料,同样可以减弱综合温度振幅和平均温度,对于相变隔热是最为行之有效的办法。

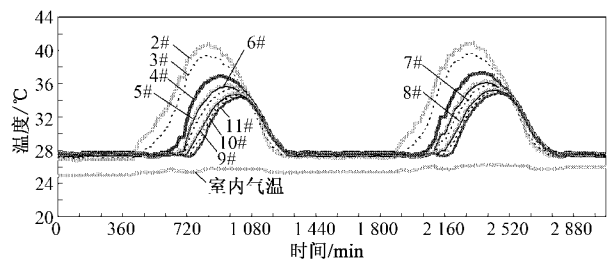


图 9 工况 III—风速提高后
材料层稳态周期性相变传热温度变化

6 主要结论

本文设计制造了模拟太阳运行的周期性热作用装置,并用其对周期性热作用下相变材料的相变传热特征进行了实验研究。实测数据表明,在稳定周期性热作用下,相变材料相变传热特征与传统固态材料有着显著的区别,也与恒温或恒热流边界条件下的相变传热有很大差别,主要可以归结为以下几点:1) 材料在非稳态周期性相变传热阶段,各层温度在达到相变温度点之前,温度变化明显;相界面随着周期数的增加从外向内逐渐扩展,材料中各层平均温度和温度振幅随周期数增加向稳态周期性相变时的平均温度和振幅靠近。2) 当达到稳态周期性相变时,材料层内部各点温度也表现出等周期性变化,温度振幅从外到内依次减小,但材料层温度变化会出现平直折转现象,在温升阶段会出现等温滞后温升,在冷却阶段会出现等温冷却。3) 在稳定周

(下转第 44 页)

- [18] Fogh CL, Byrne MA, Rod J, et al. Size specific indoor aerosol deposition measurements and derived I/O concentrations ratios [J]. Atmospheric Environment, 1997, 31(15): 2193 ~ 2203.
- [19] 王扬锋, 马雁军, 陆忠艳, 等. 辽宁本溪大气颗粒物浓度特征 [J]. 环境化学, 2012, 31(2): 235 ~ 242.
- [20] 段琼, 张渝, 李红格, 等. 太原市某办公室 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 的实测与研究 [J]. 能源研究与信息, 2006, 22(1): 12 ~ 17.
- [21] Austen PR. Contamination Index [S]. AACC, 1965.

(上接第 38 页)

周期性热作用下, 材料内部不会出现多个相界面共存现象。4) 风速对周期性相变传热有很大影响, 减弱周期性热作用综合温度, 可以降低相变材料内部各层温度振幅和周期平均温度, 有助于减少相变隔热相变材料的用量。

【参考文献】

- [1] 张寅平, 康艳兵, 江亿. 相变和化学反应储能建筑供暖空调领域的应用研究 [J]. 暖通空调, 1999, 29(5): 34 ~ 37.
- [2] Zhou D, Zhao CY, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications [J]. Applied Energy, 2012, 92: 593 ~ 605.
- [3] Neepser D. Benefits of Wallboard Impregnated with Phase Change Material for Residential Heating and Cooling [R]. Final Report for SERI contract DX-9-190371, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- [4] Karen L, George Michael, Shepard. Phase Change Wallboard for Peak Demand Reduction [R]. Los Alamos National Laboratory (LANL) Report. TM-93-4, 1993.
- [5] Helmut E Feustel, Corina Stetiu. Thermal Performance of Phase Change Wallboard for Residential Cooling Applications [R]. Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-38320UC1600, 1997.
- [6] Athienitid AK, Liu C, Banu D, et al. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage [J]. Building and Environment, 1997, 32(5): 405 ~ 410.
- [7] J Kelly kissock, J Michael Hannig, Thomas I. Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings [C] // Proceedings of 1998 International Solar Energy Conference, New York: ASME, 1998.
- [8] Takeshi Kondo, Tadahiko Ibamoto, Tsubota Yuuji. Research on the storage of PCM wallboard [C] // 日本建筑学会论文集 2001, No. 540: 23 ~ 29.
- [9] 冯国会, 吕石磊, 陈旭东, 等. 冬季工况下相变墙对室内环境影响的试验 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(6): 701 ~ 704.
- [10] 叶宏, 王军, 庄双勇, 等. 定形相变贮能式地板辐射采暖系统的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 651 ~ 656.
- [11] 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 定形相变材料蓄热地板电采暖系统热性能 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1618 ~ 1621.
- [12] 林坤平, 张寅平, 江亿. 夏季“空调”型相变墙热设计方法 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(2): 145 ~ 150.
- [13] 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(2): 46 ~ 52.
- [14] 冯国会, 曹广宇, 于瑾, 等. 夏季昼夜温差较大地区相变墙蓄冷可行性分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(4): 350 ~ 353.
- [15] 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, 34(9): 37 ~ 39.
- [16] 肖伟, 王馨, 张寅平. 定形相变墙板改善轻质墙体夏季隔热性能研究 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(9): 1561 ~ 1563.
- [17] 冉茂宇, 田化. 建筑外皮相变隔热研究(II)——建筑相变隔热设计与方法 [J]. 建筑科学, 2011, 27(12): 71 ~ 75.
- [18] 冉茂宇, 赵红利. 建筑外表相变隔热研究(III)——多重相变温度及材料用量确定的理论与方法 [J]. 建筑科学, 2012, 28(2): 95 ~ 99.
- [19] 埃克尔特 ERG, 德雷克 RM. 传热与传质 [M]. 北京: 科学出版社, 1963: 116 ~ 118.
- [20] 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.
- [21] 陈林辉, 田怀璋, 王石, 等. 第二类边界条件下硬脂酸固液相变蓄能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(1): 1128 ~ 1131.
- [22] 何叶从, 周杰, 王厚华, 等. 相变墙房间传热特性研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(10): 1085 ~ 1090.
- [23] 周国宾. 建筑内墙温度波动条件下定形相变材料热行为研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1211 ~ 1216.
- [24] Zhou Guobing, Yang Yongping, Xu Hong. Performance of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside heat flux waves [J]. Applied Energy, 2011, 88(6): 2113 ~ 2121.
- [25] Zhou Guobing, Yang Yongping, Wang Xin, et al. Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves [J]. Applied Energy, 2010, 87(8): 2666 ~ 2672.