

文章编号:0253-4339(2018)03-0114-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2018.03.114

相变窗传热特性实验研究

张爱军^{1,2} 孙志高¹ 李成浩¹ 金玉琴² 丁慧娟²

(1 苏州科技大学环境科学与工程学院 苏州 215009; 2 麦克维尔中央空调有限公司苏州分公司 苏州 215009)

摘要 本文采用熔融共混法制备十四酸(MA)-十六醇(HD)二元有机复合相变材料,利用差示扫描量热仪(DSC)确定了复合相变材料的相变温度和相变潜热。相变温度为 35.5 °C,相变潜热为 218.23 kJ/kg,经过 300 次热循环实验,结晶温度变化在 0.2 °C 以内,热稳定性良好。利用高低温交变试验箱模拟夏季室外温度变化(变化范围 18~58 °C),测试了双层窗与相变窗内外表面温度随环境温度的变化特性。结果表明:相变窗外表面温度峰值较双层窗降低 5.9 °C,相变窗内表面温度峰值较普通双层窗降低 0.6 °C,温度持续稳定 100 min,整个测试过程中相变窗控温效果明显。相变窗较双层窗具有良好的负荷转移能力。

关键词 相变材料;相变窗;热负荷;实验工况;传热

中图分类号:TB61⁺1;TB34

文献标识码:A

Experimental Study on Heat Transfer of PCM-filled Window

Zhang Aijun^{1,2} Sun Zhigao¹ Li Chenghao¹ Jin Yuqin² Ding Huijuan²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215009, China; 2. McQuay Central Air Conditioning (China) Co., Ltd. Refrigeration Division, Suzhou, 215009, China)

Abstract Two kinds of binary composite phase change materials (PCMs) were prepared using a melt blending method with myristic acid (MA) and cetyl alcohol (HD) as the raw materials. The eutectic temperature and latent heat in phase change were tested using DSC, and they are 35.5 °C and 218.23 kJ/kg, respectively. After 300 thermal cycles applied during the experiment, the results show that the MA-HD eutectic temperature in phase change undergoes a change of less than 0.2 °C. This indicates that the thermal stability of the MA-HD binary composite phase change material is good. A high-low temperature box within a temperature range of 18-58 °C was used to simulate the outdoor temperature during the summer. The temperature response for a PCM-filled window and a hollow window was tested. The experimental results show that the temperatures of the outer and inner surface of PCM-filled window are 5.9 °C and 0.6 °C lower than those of a hollow window, respectively. The surface temperatures of the PCM-filled window remain constant for 100 min, and the effects of the temperature control are good, which shows that the PCM-filled window has a good load transfer capability.

Keywords phase change materials; PCM-filled window; heat load; test conditions; heat transfer

相变材料(PCMs)是指在相变过程中进行能量储存或释放的材料,具有储能密度大,温度变化小等优点。相变材料被广泛应用于航空、医疗、工业、建筑等行业。在我国,建筑能耗占社会总能耗 40% 以上,其中,空调和采暖占建筑总能耗 50% 左右,建筑节能已成为社会关注的焦点^[1]。将相变材料与建筑围护结构相结合,可以有效减小室内外热流强度波动幅度^[2-4],提高室内热舒适度,减小空调能耗,缓解电力供应与需求在时间和空间上不匹配的矛盾。

窗户作为建筑围护结构的重要组成部分,同时也是整个建筑围护结构保温性能最薄弱的环节,窗户的能耗^[5]占整个围护结构的 30% 左右。改善窗户的隔

热保温性能,对降低建筑能耗具有重要意义。针对窗户的节能问题,国内外已有诸多研究。例如,能够有效增加窗户密封性的固定窗,窗户遮阳的自动调节设计,具有良好隔热性能和透光度的 Low-e 玻璃窗^[6]。但这些节能技术普遍存在使用不便、制造成本高、全年节能效果不明显等缺点^[7],窗户的节能技术^[8]有待进一步研究。F. Goia 等^[9]以石蜡为原料制备相变窗,进行对比实验,评价了相变窗的传热性能以及对室内热舒适的影响。罗庆等^[10]以 CaCl₂·6H₂O 为充注材料,制备相变窗,通过实验与模拟相结合的方法,表明相变窗具有良好的温度调节能力,内壁面峰值温度比中空玻璃窗降低 3~4 °C。Li S. H. 等^[11]搭建玻

璃窗动态传热性能测试装置,获得了夏季晴天相变窗内表面温度变化规律,并以此验证模型,进一步论证相变窗在冬季、过渡季的实用性。

本文以脂肪酸和脂肪醇为原料,制备复合相变材料,相比于无机相变材料,具有过冷度小,无相分离的优点^[12-15],在应用中更加稳定可靠。制备相变窗,采用实验测量方法,得到相变窗温度调节及节能效果。

1 实验

1.1 原料与仪器

实验材料为十四酸(MA)和十六醇(HD),主要参数见表1。相变材料制备主要仪器包括数据采集仪和温度传感器等,具体参数见表2。

表 1 原材料物性参数

Tab. 1 Raw material physical parameters

材料	分子量	熔点/℃	纯度	生产厂家
十四酸	228.37	53 ~ 55	分析纯	天津市光复精细化工研究所
十六醇	242.45	46 ~ 50	分析纯	天津市光复精细化工研究所

表 2 实验设备

Tab. 2 Experimental installations

设备	型号	参数	生产厂家
电子天平	BSA224S	量程 220 g,精度 ±0.1 mg	赛多利斯贸易有限公司
高低温交变试验箱	ETE-GDW-200 L	控温范围 -40 ~ 120 °C	无锡索亚特试验设备有限公司
数据采集仪	Agilent34 970 A	—	美国 Agilent 公司
计算机	W1 972 a	—	惠普公司
温度传感器	PT100	精度 ±0.1 °C	北京赛亿林有限公司

1.2 相变窗制备

首先制备复合相变材料。称取一定质量的 MA 和 HD,按 48:52 比例混合^[15],将装有相变材料的试管置于 70 °C 的恒温水浴中加热,在熔融状态下用玻璃棒搅拌 5 min,混合均匀,再冷却至室温,得到 MA-HD 二元复合相变材料。

采用 6 mm 厚普通白玻璃制备双层玻璃窗,尺寸为 300 mm × 200 mm。玻璃四周采用厚度为 10 mm 的中空铝条和中性硅酮密封胶进行支撑和密封,并对双层窗进行水压实验,持续时间 24 h,确保无泄漏。建立实验对照组,测试对象分为两类:1) 普通玻璃窗,内注空气;2) 相变玻璃窗,内注 MA-HD 复合相变材料,质量 200 g。

1.3 实验过程

实验研究了复合相变材料的热稳定性。设定高低温交变试验箱温度为 15 °C,保持稳定。先将装有 MA-HD 低共晶混合物的试管置于 60 °C 的水浴中熔化,试管内的 PCMs 完全熔化后,放在高低温交变试验箱中,直至 PCMs 完全凝固,记录试管内温度变化,记录时间间隔为 100 s,重复上述过程 300 次。

利用差示扫描量热法(DSC)测量 MA-HD 混合

相变材料的相变潜热。称取 MA-HD 低共晶混合相变材料 3 ~ 6 mg,采用 Pyris Diamond DSC 测试实验样品相变潜热。将样品置于铝制坩埚中,并放入炉腔内,测试气氛为氮气(20 mL/min),扫描温度范围为 15 ~ 60 °C,升温速率为 2 °C/min。

以高低温交变试验箱为热环境,模拟夏季室外白天温度变化,分别测试普通双层窗和相变窗内外表面的温度响应。窗户的外表面与高低温箱模拟热环境直接接触,内表面与室内环境接触,室内温度为 20 °C,模拟热环境的温度变化范围为 18 ~ 58 °C。模拟热环境温度变化分为升温段、高温段、降温段和低温段。升温段温度从 18 °C 均匀升至 58 °C,持续时间 200 min,在高温段 58 °C 定温 90 min,再在 200 min 内均匀降温至 15 °C,再定温 30 min。数据采集仪记录窗内外表面温度变化,记录间隔 10 min。实验装置如图 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 相变材料热性能

MA-HD 二元有机复合相变材料的 DSC 曲线如图 2 所示,相变起始温度为 35.5 °C,相变潜热为

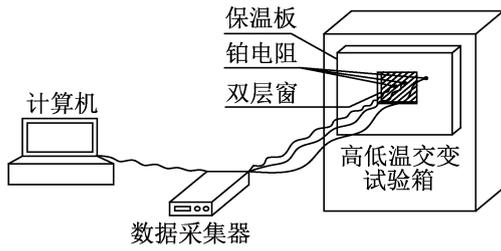


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

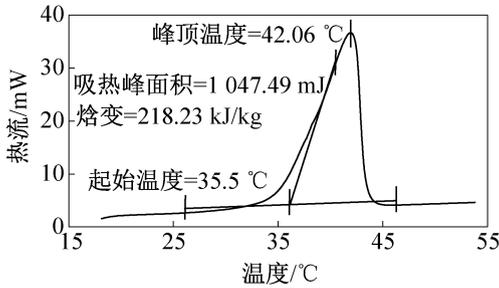


图 2 MA-HD 低共晶混合物 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curve of low eutectic mixture of MA and HD

218.23 kJ/kg。在相变过程中,只存在一个吸热峰,

表 3 材料物性参数

Tab. 3 Material physical parameters

材料	密度/(kg/m ³)	比热容/(kJ/(kg·°C))	导热系数/(W/(m·K))	相变温度/°C	相变潜热/(kJ/kg)
普通玻璃	2 500	0.84	0.76	—	—
空气	1.16	1.01	0.026 4	—	—
MA-HD	832	1.94	0.25 ^[16]	35.5	218.23

表 4 双层窗和相变窗各阶段平均温度

Tab. 4 The average temperatures of double window and PCM-filled window of each stage

类别	升温段	高温段	降温段	低温段	
双层窗	外表面平均温度/°C	32.5	51.4	32.6	15.5
	内表面平均温度/°C	24.4	34.2	25.8	17.4
相变窗	外表面平均温度/°C	28.3	45.5	32.3	17.0
	内表面平均温度/°C	24.7	33.6	29.4	18.8

图 4 所示为普通双层窗和相变窗内外表面温度响应,表 4 所示为两组测试对象在各个阶段的平均温度。图 4 和表 4 表明,相变材料的加入改变了双层窗的传热过程,实现了能量的转移。与普通双层窗外表面温度变化相比,升温过程中相变窗外表面温度在 140 min 时升温速率大幅下降,温度在 50 min 内仅升高 1.8 °C。这是由于相变材料开始相变,吸收热量,减小进入室内的热量。相变过程结束后,温度继续升

这表明 MA 和 HD 混合均匀,已形成低共晶混合物。

将 MA-HD 低共晶混合物进行 300 次热循环实验,没有发生相分离。图 3 所示为 MA-HD 低共晶混合物 300 次降温曲线,MA-HD 共晶混合物步冷曲线未发生明显改变,结晶温度变化在 0.2 °C 以内,说明 MA-HD 共晶混合物具有良好的热稳定性。

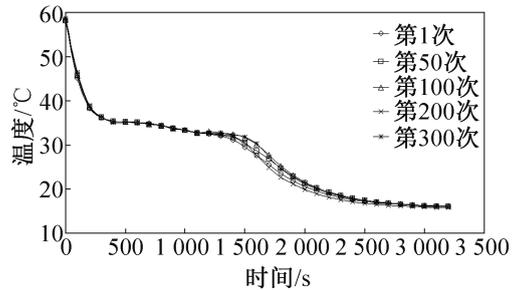


图 3 MA-HD 低共晶混合物 300 次热循环降温曲线

Fig. 3 Cooling curves of low eutectic mixture of MA and HD within 300 times cycle

2.2 相变窗传热特性

制备双层窗和相变窗原材料物性参数见表 3。

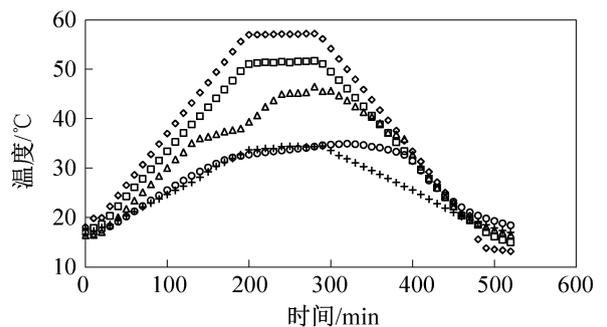


图 4 双层窗和相变窗内外表面温度响应

Fig. 4 The inside and outside surface temperature response of double window and PCM-filled window

高,并保持稳定。相变窗在高温段外表面平均温度比双层窗低 5.9 °C,峰值温度降低明显。运行 290 min 时,温度开始降低,并出现短暂的控温平台。之后温度继续下降,且始终高于双层窗外表面温度。相变窗

外表面温度曲线与双层窗外表面温度所围成的面积表明相变材料对进入室内的负荷具有良好的转移能力。

与双层窗内表面温度变化相比,在升温阶段,相变窗内表面温度高于双层窗,这是由于相变材料的导热性优于空气。相变窗在高温段的内表面平均温度比双层窗降低 0.6 °C,温度调节效果不明显。在 290 min 时,热环境温度开始降低,相变窗内表面温度始终保持一个恒定温度,持续 100 min,随后温度降低,内表面温度始终高于双层窗内表面温度。在降温过程中,相变材料释放热量,减小了室内负荷衰减,从而保持温度恒定状态,说明相变窗具有良好的保温性能,且相变窗内表面降温曲线与双层窗内表面降温曲线围成的面积表明负荷的转移效果明显。

3 结论

1) 采用熔融共混法制备了 MA-HD 二元复合相变材料,相变温度为 35.5 °C,相变潜热为 218.23 kJ/kg。经过 300 次热循环实验,结晶温度变化在 0.2 °C 以内,热稳定性良好,适用于建筑材料。

2) 制备了双层窗与相变窗,分别进行了温度响应测试。加入相变材料有效改变了双层窗的传热过程。在升温过程中,相变过程持续 50 min,降低了相变窗外表面升温速率。相变窗外表面峰值温度较双层窗降低 5.9 °C,外表面温度降低效果明显。在降温段,降温速率缓慢,外表面温度始终高于双层窗。

3) 在相变材料的作用下,相变窗内表面温度峰值较双层窗降低 0.6 °C,随后在降温段依旧保持 100 min 的温度稳定,说明 MA-HD 复合相变材料具有良好的保温功能,对负荷的转移明显。

本文受江苏省自然科学基金项目(BK2012602)和苏州科技大学研究生创新项目(SKCX15_029)资助。(The project was supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2012602) and Graduate Innovation Fund of Suzhou University of Science and Technology (No. SKCX15_029).)

参考文献

[1] 李成浩,孙志高,张爱军,等. 乳液浆体蓄冷性能实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(6):66-70. (LI Chenghao, SUN Zhigao, ZHANG Aijun, et al. Experimental study on cold storage performance of emulsion slurry[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(6):66-70.)

[2] SHARMA A, TYAGIB V V, CHENA C R. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Re-

views, 2009, 13(2):318-345.

[3] 刘菁伟,杨文彬,谢长琼,等. HDPE/EG/石蜡导热定形相变材料的制备及性能[J]. 材料工程, 2015, 43(4):42-46. (LIU Jingwei, YANG Wenbin, XIE Changqiong, et al. Preparation and properties of HDPE/EG/Paraffin thermal conducting shape-stabilized phase change material[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(4):42-46.)

[4] 赵之贵,孙志高,焦丽君,等. 新型相变储能试板的制备与性能实验研究[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(8):27-30. (ZHAO Zhigui, SUN Zhigao, JIAO Lijun, et al. Make and experimental research on the performance of a new phase change energy storage wallboard[J]. New Building Materials, 2015, 42(8):27-30.)

[5] 王菲菲,郑修齐. 门窗的节能技术方法及发展趋势[J]. 门窗, 2015, 37(11):25-26. (WANG Feifei, ZHENG Xiuqi. Energy saving technology and development trend of doors and windows[J]. Doors & Windows, 2015, 37(11):25-26.)

[6] 卜增文,毛洪伟,杨红. Low-e 玻璃对空调负荷及建筑能耗的影响[J]. 暖通空调, 2005, 35(8):119-121. (BU Zengwen, MAO Hongwei, YANG Hong. Influence of Low-e glass on air conditioning load and building energy consumption[J]. Journal of HV & AC, 2005, 35(8):119-121.)

[7] 钟克承,李舒宏,周盈盈,等. 相变玻璃窗与中空玻璃窗的动态传热特性[J]. 化工学报, 2014, 65(增刊2):114-123. (ZHONG Kecheng, LI Shuhong, ZHOU Yingying, et al. Dynamic heat transfer characteristics of PCM-filled glass window and hollow glass window[J]. CIESC Journal, 2014, 65(Suppl. 2):114-123.)

[8] ALAWADHI E M. Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain[J]. Energy and Buildings, 2012, 47(4):421-429.

[9] GOIA F, PERINO M, HAASE M. A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing systems[J]. Energy and Buildings, 2012, 54:141-153.

[10] 罗庆,刘庆开,夏煦,等. 双层相变玻璃窗动态热调节过程研究[J]. 材料导报, 2010, 24(16):69-72. (LUO Qing, LIU Qingkai, XIA Xu, et al. Dynamic thermal performance of phase change materials filled in glass window[J]. Materials Review, 2010, 24(16):69-72.)

[11] LI S H, ZHONG K C, ZHOU Y P, et al. Comparative study on the dynamic heat transfer characteristics of PCM-filled glass window and hollow glass window[J]. Energy & Buildings, 2014, 85:483-492.

[12] ZUO Jianguo, LI Weizhong, WENG Lindong. Thermal performance of caprylic acid/1-dodecanol eutectic mixture as phase change material (PCM)[J]. Energy and Build-

ings, 2011, 3(1):207-210.

- [13] 何小芳, 吴永豪, 王月明, 等. 相变储能材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2014, 42(12):27-29. (HE Xiaofang, WU Yonghao, WANG Yueming, et al. Research progress of phase change materials for energy storage[J]. New Chemical Materials, 2014, 42(12):27-29.)
- [14] 陶文博, 谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 39(1):52-59. (TAO Wenbo, XIE Ruhe. Research and development of organic phase change materials for cool thermal energy storage[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 39(1):52-59.)
- [15] 吴学红, 李伟平, 王立勋, 等. 填充相变材料的复合搁架的传热与蓄冷特性[J]. 制冷学报, 2015, 36(4):23-28. (WU Xuehong, LI Weiping, WANG Lixun, et al. The heat transfer and cool storage characteristic of composite shelf filled with phase change materials[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(4):23-28.)

- [16] 张爱军, 孙志高, 蔡伟, 等. 二元有机复合相变材料性能实验研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(7):127-129. (ZHANG Aijun, SUN Zhigao, CAI Wei, et al. Experimental research on binary organic composite phase change materials[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(7):127-129.)

通信作者简介

孙志高,男,博士,教授,苏州科技大学环境科学与工程学院, (0512)63176109, E-mail:szg.yzu@163.com。研究方向:储能与节能技术。

About the corresponding author

Sun Zhigao, male, Ph. D., professor, School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, +86 512-63176109, E-mail:szg.yzu@163.com. Research fields: energy storage and energy conservation technology.