

LA-SA 复合相变材料的制备与性能研究

胡明玉^{1,2,3}, 李东旭¹, 吴琼^{1,2,3*}, 胡佳乐¹

(1.南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2.江西省超低能耗建筑重点实验室, 江西 南昌 330031;
3.江西省近零能耗建筑工程实验室, 江西 南昌 330031)

摘要:以月桂酸-硬脂酸二元低共熔脂肪酸(LA-SA)为相变材料、膨胀珍珠岩(EP)和膨胀石墨(EG)为负载材料,采用真空吸附法制备 LA-SA/EG 和 LA-SA/EP 复合相变材料。通过 FT-IR、ESEM、DSC 和小室试验等对复合相变材料的化学组成、微观结构、热物性和调温性能等进行分析。结果表明,LA-SA 与负载材料复合基本不改变相变材料的储放能性能;由于 EG 空间网络孔隙体积大,微孔和表面吸附力比 EP 大,故其比 EP 负载 LA-SA 能力强,EG 和 EP 的最佳 LA-SA 负载率分别为 90% 和 40%。小室试验结果表明,复合相变材料 LA-SA/EG、LA-SA/EP 不仅可以降低小室内最高气温,还能延迟小室内达到最高气温的时间,有效调节室内热环境;由于 LA-SA/EG 材料导热系数和相变潜热高,故其调温效果比 LA-SA/EP 更好,对建筑的节能减碳作用更显著。

关键词:脂肪酸;二元相变材料;膨胀珍珠岩;膨胀石墨;复合相变材料

中图分类号:TU53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)09-0097-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.09.021

Preparation and performance of LA-SA composite phase change materials

HU Ming-yu^{1,2,3}, LI Dong-xu¹, WU Qiong^{1,2,3*}, HU Jia-le¹

(1.School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2.Jiangxi Provincial Key Laboratory for Ultra-low Energy Consumption Buildings, Nanchang 330031, China;

3.Jiangxi Provincial Engineering Laboratory for Nearly Zero Energy Consumption Buildings, Nanchang 330031, China)

Abstract:LA-SA/EG and LA-SA/EP composite phase change materials are prepared via vacuum adsorption method using lauric acid-stearic acid (LA-SA) as phase change material, and expanded perlite (EP) and expanded graphite (EG) as the loading materials. The chemical composition, microstructure, thermal properties and thermoregulation properties of the composite phase change materials are analyzed by means of FT-IR, ESEM, DSC and small chamber tests. It is shown that the composition between LA-SA and the loading material has hardly changed the energy storage and discharge performance of LA-SA. Due to its large pore volume of the space network, EG has larger microporous and surface adsorption force than EP, so it is more capable of loading LA-SA than EP. The optimal loading rates of LA-SA by EG and EP are 90% and 40%, respectively. The small room test shows that LA-SA/EG and LA-SA/EP can reduce the maximum temperature in the small room, also delay the time of reaching the maximum temperature in the small room, effectively regulating the indoor thermal environment. Due to its high thermal conductivity and phase change latent heat, LA-SA/EG shows better temperature regulation effect than LA-SA/EP, which has a more significant effect on the energy saving and carbon dioxide emission reduction of the building.

Key words: fatty acids; binary phase change materials; expanded perlite; expanded graphite; composite phase change material

2019 年我国建筑全过程能耗占全国能源消费总量的 45.9%, 碳排放占全国碳排放的总量的 50.6%^[1]。因此,在我国“双碳”目标背景下建筑节能是节能减碳的重要任务之一。利用围护结构的保温隔热及储能性能,减缓因室外温度变化对室内温度的影响,在保证居住者舒适的前提下减少建筑运行能耗是建筑节能的主要措施之一^[2]。相变材料(Phase Change Material, PCM)是利用相变吸收或释

放热量实现能量储放的材料^[3-4],将其置入建筑围护结构中,在室外温度变化时通过材料相变的吸放能量维持围护结构及室内温度稳定,达到降低建筑运行能耗及减碳目的。

脂肪酸类有机相变材料具有相变潜热高、相变过程体积变化小、价格低等优点^[5]。但单一的脂肪酸相变温度较高,不能满足高温季节建筑围护结构的相变条件,将不同种类的脂肪酸共熔可以调整其

收稿日期:2022-11-09;修回日期:2023-07-04

基金项目:国家自然科学基金(51362021);江西省水利厅科技项目(KT201648)

作者简介:胡明玉(1958-),女,博士,教授,研究方向为生态环境材料、建筑节能材料和建筑结构材料, humingyude@163.com;吴琼(1986-),女,硕士,讲师,研究方向为城市更新、乡村振兴,通讯联系人, 405532451@qq.com。

相变温度和相变潜热^[6]。此外,若将固-液相变材料脂肪酸直接使用易产生渗漏,造成结构腐蚀等耐久性问题,故需要将相变材料进行封装处理。目前常用的封装方法主要有微胶囊法和多孔基体吸附法^[7-8]。微胶囊法是用性能稳定的聚合物薄膜或无机壁材胶囊包裹相变材料达到封装的目的,但其工艺较复杂、制备成本较高、工程应用具有局限性;多孔基体吸附法为用多孔基体负载相变材料,负载后的相变材料具有结构和功能一体化的优点,故其综合效益好^[9-11]。李玉洋等^[12]以正辛酸-癸酸(OA-CA)为基液、膨胀石墨(EG)为载体制备 OA-CA/EG 复合相变材料,研究表明 EG 对 OA-CA 的最高吸附率为 92%且 OA-CA/EG 在实际应用中能够保持稳定的热力学性能。叶志林等^[13]用癸酸和棕榈酸(CA-PA)为相变材料、膨胀珍珠岩(EP)为载体,采用真空浸润法制备 CA-PA/EP 复合相变材料,EP 对 CA-PA 的最高负载率为 55%,其熔融、凝固温度分别为 27.9、19.1℃,对应的相变潜热分别为 81.5、79.7 J/g,复合相变材料 CA-PA/EP 具有良好的储热性能,可用于建筑节能领域。YadongBian 等^[14]制备了强吸附性膨胀珍珠岩气凝胶(AEP)复合载体,用其负载癸酸-硬脂酸,负载率可达 200%,加热后的质量损失率小于 1.0%,热稳定性高。

目前,关于相变材料自身热物性已有较多研究,但对其具体应用以及复合不同基体后的性能对比研究尚不足。笔者以月桂酸-硬脂酸(LA-SA)为相变材料,分别以膨胀珍珠岩(EP)和膨胀石墨(EG)为负载体制备复合相变材料。利用 ESEM、DSC 和 FTIR 等分析复合相变材料的微观结构、热物性,并设计了小室试验测试和分析对比材料对小室的调温效果。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

膨胀珍珠岩(EP),粒径为 2~5 mm,信阳市厚普矿业公司生产;膨胀石墨(EG),粒径为 150 μm,青岛腾盛达碳素机械公司生产,利用热常数分析仪测得 EP 和 EG 的导热系数分别为 0.058 W/(m·K)和 8.421 W/(m·K);月桂酸(LA)、硬脂酸(SA),均为化学纯,国药集团化学试剂有限公司生产,采用差示扫描量热仪(DSC)测定 LA 和 SA 的相变温度分别为 44.2℃和 70.7℃,相变潜热分别为 177 J/g 和 203 J/g。

1.2 研究方法

1.2.1 LA-SA 低共熔物的制备

以南昌地区夏季围护结构内部温度为参考,选定相变材料的相变温度范围为 35~38℃。LA 和 SA 的相变温度分别为 44.2℃和 70.7℃,而所配制的 LA-SA 低共熔物温度应为 35~38℃,故需要将这 2 种相变材料按一定比例共熔才能满足相变材料所需的相变温度。拟通过试验找出不同温度下 LA-SA 的最低共熔比,以确定满足相变温度的 LA 与 SA 比例。拟取 LA 的质量分数分别为 0%、15%、25%、35%、45%、50%、55%、65%、75%、85%、100%的比例进行试验。

1.2.2 复合相变材料的制备

分别以 EP 和 EG 为载体负载确定好 LA、SA 质量比的共熔相变材料。设计不同脂肪酸与 EP 或 EG 质量比,采用真空吸附法制备复合相变材料。制备方法是:将混合物置于烧杯中,封闭后放入 60℃烘箱中加热 3 h,期间每隔 30 min 取出烧杯搅拌 5 min,每隔 1 h 在真空压缩箱中加压 30 min,工作压力为-0.1 MPa,制得 LA-SA/EP 和 LA-SA/EG 复合相变材料。

1.2.3 组成和微观结构分析

利用 FT-IR 仪(Nicolet5700 型,美国热电尼高力公司生产)表征复合相变材料的化学结构;利用 ESEM(Quanta 200FEG 型,美国 FEI 公司生产)分析材料的微观结构和孔隙特征。

1.2.4 复合相变材料的热性能及热可靠性

利用 Hot Disk 热常数分析仪(TPS1500 型,瑞典 Hot Disk AB 公司生产)测试复合相变材料的导热系数,每组样品测量 3 次,取平均值。利用 DSC(DSC-131PC 型,法国 SETARAM 公司生产)测定 LA-SA 二元体系的相变温度和相变潜热,以及经 100 次热循环后复合相变材料的相变温度和相变潜热的热可靠性。测试时设定仪器的试验温度范围为 10~60℃。

1.2.5 小室试验

搭建 2 个体积均为 750 mm×650 mm×700 mm 的小室,分别为试验和对照小室,其由厚度为 30 mm 的蜂窝纸箱围护而成,每个小室由 3 部分组成:加热区、砖砌隔墙、测试区。热电偶分别置于每个小室加热区、隔墙和测试区的正中位置。小室测试系统如图 1 所示。测试开始时,打开热源灯使加热区升温,加热区的热量通过热传递使小室其他部位的温度升高。当试验组隔墙内部温度达到 40℃时关闭所有

热源,2 个小室各区域的温度也产生相应变化。采用 Keysight Technologies 34972A 无纸记录仪记录测试过程各区域的温度变化。

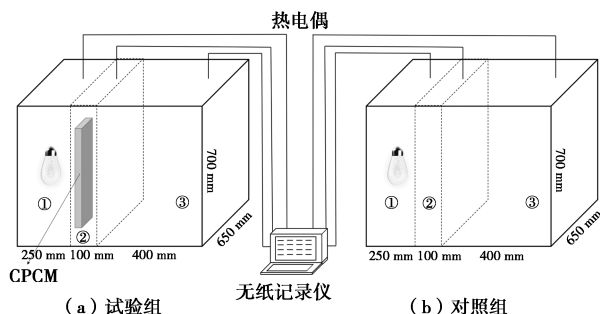


图1 小室试验系统

2 结果和讨论

2.1 LA-SA 低共熔物

取 LA 的质量分数分别为 0%、15%、25%、35%、45%、50%、55%、65%、75%、85%、100%, 将 LA 和 SA 按上述质量分数分别放入各烧杯中, 将烧杯置于 60℃ 恒温水浴中, 用磁力搅拌机搅拌 1 h (转速为 400 r/min), 以保证其均匀混合; 然后将不同质量分数的 LA-SA 共熔物冷却至室温, 利用 DSC 测定各 LA-SA 共熔物的相变温度, 结果如图 2 所示。由图 2 可得, 当 $m(\text{LA}) : m(\text{SA}) = 76 : 24$, 共熔物的相变温度为 37℃。故后续试验均采用 $m(\text{LA}) : m(\text{SA}) = 76 : 24$ 的 LA-SA 低共熔物为相变材料。

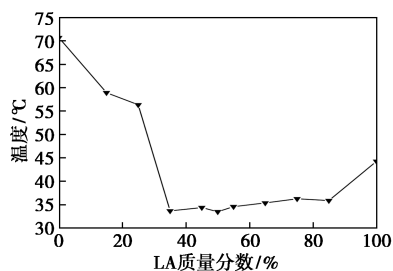


图2 LA-SA 二元体系相变温度

2.2 EP 和 EG 的最佳负载率

参照扩散-渗出圈测试法^[15], 分别将 0.5 g 各组 LA-SA/EP 和 LA-SA/EG 复合相变材料(材料组成见表 1)置于标准滤纸中央直径为 30 mm 的测试区域内, 将其移至 60℃ 烘箱中加热 1 h, 分别计算加热后样品的脂肪酸泄漏率 α 和渗出直径百分比 β :

$$\alpha = M_1 / M_s \quad (1)$$

$$\beta = [(D_{1-\max} + D_{1-\min}) / 2 - D_s] / D_s \quad (2)$$

式中: M_s 为加热前复合相变材料的质量, g; M_1 为加热后复合相变材料泄漏的质量, g; $D_{1-\max}$ 、 $D_{1-\min}$ 分别

为 PCM 渗漏圈的最大、最小尺寸, mm; D_s 为测试区域直径, mm。

根据 α 和 β 分析并确定 EP 和 EG 的最佳负载率, 试验测定及计算结果分别如图 3 和表 1 所示。根据文献[15], 当相变材料的渗出直径百分比 β 不大于 5%、泄漏率 α 不超过 1.5% 时, 认为基本不泄漏, 相变材料稳定。因此, 由图 3 和表 1 可知, EP 和 EG 稳定吸附 LA-SA 的最高质量分数分别为 40% 和 90%, EP 和 EG 基本稳定吸附 LA-SA 的最高质量分数分别为 45% 和 92%。可见由于 EP 和 EG 的组成

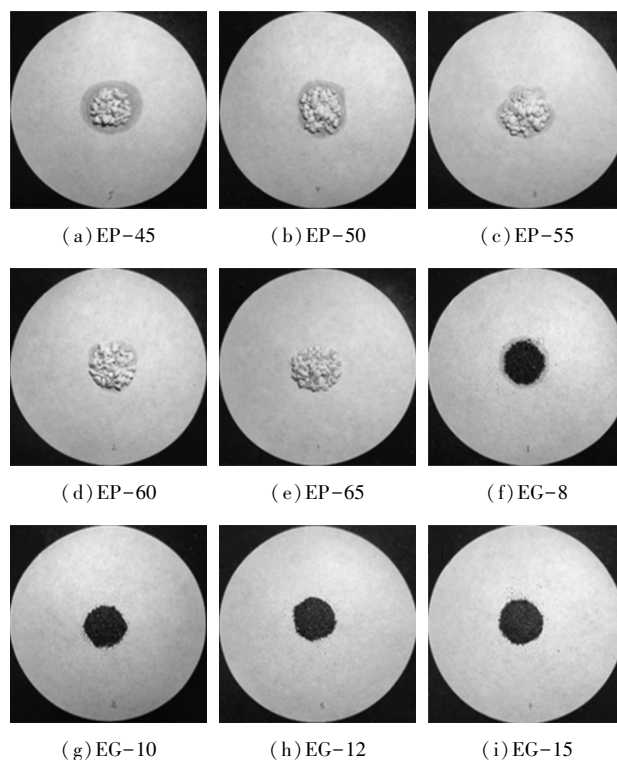


图3 加热后各复合相变材料中多孔材料对脂肪酸的负载情况

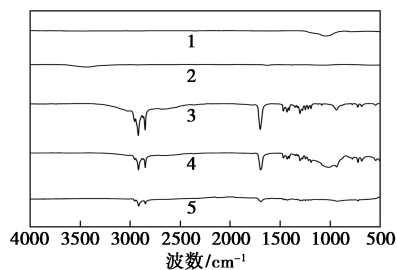
表1 热扩散渗透测试结果

样品	复合相变材料组成	脂肪酸 泄漏率 $\alpha / \%$	脂肪酸 渗出直径 百分比/ $\%$	稳定性 评价
EP-45	55% LA-SA+45% EP	1.99	16.67	基本不稳定
EP-50	50% LA-SA+50% EP	1.91	13.30	基本稳定
EP-55	45% LA-SA+55% EP	1.69	6.00	基本稳定
EP-60	40% LA-SA+60% EP	1.42	0	非常稳定
EP-65	35% LA-SA+65% EP	1.40	0	非常稳定
EG-8	92% LA-SA+8% EG	1.71	10.00	基本稳定
EG-10	90% LA-SA+10% EG	0.75	0	非常稳定
EG-12	88% LA-SA+12% EG	0.52	0	非常稳定
EG-15	85% LA-SA+15% EG	0.45	0	非常稳定

和微观结构的差异,EG 对 LA-SA 的吸附率远远高于 EP。因此,后续试验均采用 EP 和 EG 负载率分别为 40%和 90%的 LA-SA/EP 和 LA-SA/EG 复合相变材料。

2.3 复合相变材料的 FT-IR 表征

对 LA-SA 及 EP 和 EG 的负载率分别为 40%和 90%的复合相变材料 LA-SA/EP、LA-SA/EG 进行红外光谱分析,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,LA-SA 图谱 721.11 cm^{-1} 和 935.23 cm^{-1} 处的吸收峰分别为—OH 的面内摆动振动峰和面外弯曲振动峰,LA-SA/EP 图谱中相应的峰偏移至 722.21 cm^{-1} 和 936.24 cm^{-1} 处,而 LA-SA/EG 图谱中相应的峰偏移至 718.61 cm^{-1} 和 937.56 cm^{-1} 处;LA-SA 中 1704.24 cm^{-1} 处是脂肪酸中常以羧酸二聚体形式存在的官能团 C=O 的伸缩振动峰,LA-SA/EP 图谱中该峰偏移至 1702.26 cm^{-1} ,而 LA-SA/EG 中该峰偏移至 1703.31 cm^{-1} ;LA-SA 中 2850.58 cm^{-1} 和 2919.82 cm^{-1} 处的特征吸收峰分别是—CH₂ 基团的对称伸缩振动吸收峰和—CH₃ 基团的不对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰^[16-19],LA-SA/EP 和 LA-SA/EG 的前一个峰的波数没有改变,仍是 2850.58 cm^{-1} ,而后一个峰分别偏移至 2920.53 cm^{-1} 和 2920.66 cm^{-1} 。总体上复合相变材料的峰位与相变材料 LA-SA 的峰位相近,但在多孔材料 EP 或 EG 吸附力的作用下 LA-SA 峰位发生微小改变。综上分析可知,复合相变材料 LA-SA/EP 和 LA-SA/EG 的图谱只是 LA-SA 共晶物图谱和 EP 或 EG 图谱的简单叠加,在真空吸附过程中复合相变材料各成分间仅发生了物理吸附,没有发生明显的化学反应,因此复合过程基本不会改变 LA-SA 的储放能性能。



1—EP;2—EG;3—LA-SA;4—LA-SA/EP;5—LA-SA/EG

图 4 LA-SA 和复合相变材料的 FT-IR 图谱

2.4 复合相变材料的微观结构

对负载材料 EP、EG 和复合相变材料 LA-SA/EP、LA-SA/EG 进行 ESEM 分析,结果如图 5 所示。由图 5(a)、图 5(b)中可以看出,EP 表面凹凸,内部

存在许多不规则大孔和微孔,且各孔之间相互贯通,为容纳 LA-SA 分子提供了空间和进入的通道;由图 5(d)、图 5(e)中可以看出,EG 呈蠕虫状,内部不仅具有大量独特的网络状微孔结构,由微米级石墨片叠合而成的平行塌陷片层构成,片层之间还形成许多裂纹,具有良好的吸附、包覆性能,这些结构有利于复合脂肪酸的存储。

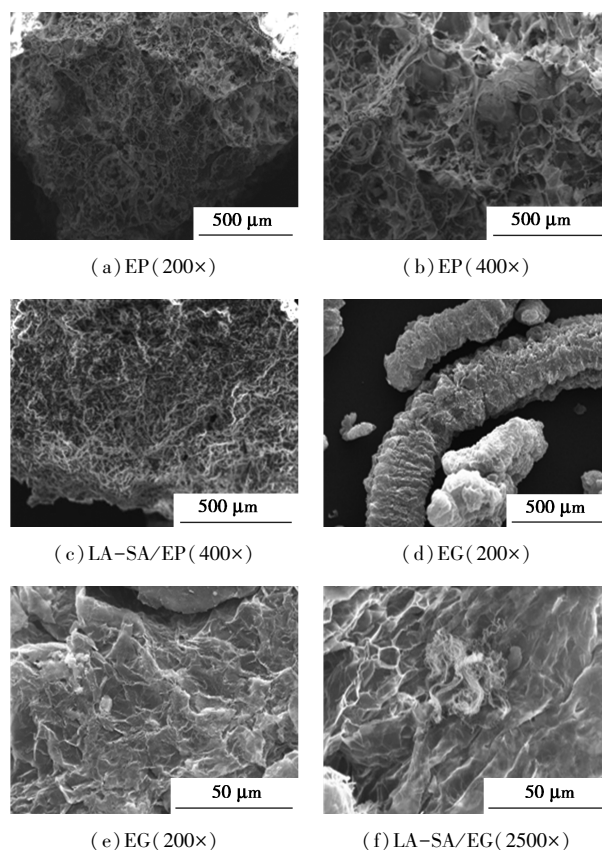


图 5 EP、EG 及复合相变材料的 ESEM 图

由图 5(c)可知,复合 LA-SA 后,由于 EP 毛细管和表面张力的作用有效地吸附了脂肪酸,EP 表面孔隙数量、尺寸和凹凸程度大大降低,复合效果良好;由图 5(f)中可以看出,复合后 EG 表面无块状大颗粒串连和大面积薄层状有机物,其片层之间的裂纹也被 LA-SA 脂肪酸填满,表面光滑。EG 通过微孔束缚和表面吸附作用实现对相变材料颗粒级分散,使相变材料较好地吸附于 EG 的网络孔隙结构和片层中。由于 EG 的空间网络孔隙体积大^[20],加上其微孔束缚和表面吸附力比 EP 更大,故 EG 比 EP 具有更大负载 LA-SA 脂肪酸的能力。

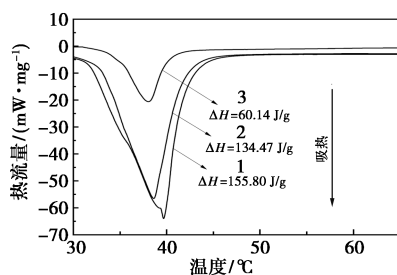
2.5 复合相变材料的热性能

对 LA-SA 和 LA-SA/EP、LA-SA/EG 复合相变材料进行导热系数(λ)和 DSC 热性能分析,每种材料取样 3 次,测定后取其平均值作为测定结果,如表

2和图6所示。由表2可知,LA-SA和LA-SA/EP、LA-SA/EG的导热系数分别为0.256、0.185、1.562 W/(m·K)。LA-SA/EP的导热系数比LA-SA低,而LA-SA/EG的导热系数是LA-SA的6.1倍、LA-SA/EP的8.4倍。由1.1部分可知,EG和EP的导热系数分别为8.421 W/(m·K)和0.058 W/(m·K),即EG的导热系数是EP的145倍。石墨为层状结构,层内每个C与其他C只形成3个共价键,仍保留1个自由电子传输能量,故其具有高导热性,而EP以低导热系数为主要特征。另外,EG呈蠕虫状结构,大量网络状微孔使EG在LA-SA/EG中形成首尾相连的网状结构,形成导热通路,因此,LA-SA/EG具有高热导率,其导热系数远大于LA-SA/EP。

表2 LA-SA 共熔物和复合相变材料的导热系数、相变温度与相变潜热变化

样品	λ /[W·(m·K) ⁻¹]	T_s /℃	T_p /℃	T_e /℃	ΔH / (J·g ⁻¹)
LA-SA	0.256	36.1	39.7	41.8	155.80
LA-SA/EP	0.185	34.8	38.0	40.1	60.14
LA-SA/EG	1.562	33.0	38.5	42.0	134.47
100次热循环后的 LA-SA/EP	—	36.3	38.3	39.9	57.13
100次热循环后的 LA-SA/EG	—	34.1	38.7	42.3	131.78



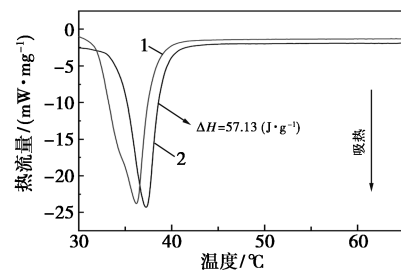
1—LA-SA;2—LA-SA/EG;3—LA-SA/EP

图6 LA-SA 和复合相变材料的 DSC 曲线

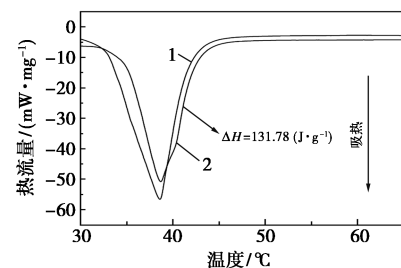
由表2和图6可知,LA-SA的起始相变温度(T_s)、峰值相变温度(T_p)和相变终止温度(T_e)分别为36.1、39.7℃和41.8℃,LA-SA/EP的相应相变温度分别是34.8、38.0℃和40.1℃,而LA-SA/EG的分别是33.0、38.5℃和42.0℃,即总体上2种复合材料的相变温度均略低于LA-SA的相变温度,但其峰值相变温度均 ≥ 38 ℃。已有研究表明,复合相变材料中相变材料与负载材料孔内表面的作用强弱

决定负载后材料相变温度的偏移方向,若其作用强则相变温度升高,反之则降低^[21]。LA-SA/EP中LA-SA均含—COOH官能团,具弱酸性,但EP也为弱酸性,故LA-SA与EP间的吸引力较弱,因而LA-SA/EP相变温度向低偏移;对于LA-SA/EG材料,EG的吸附具有两向性,以吸附非极性分子为主,但在一定环境中也会吸附极性分子^[22],故其对LA-SA的吸引力略强于EP,LA-SA/EG的相变温度略高于LA-SA/EP。LA-SA的相变潜热为155.80 J/g,LA-SA/EP和LA-SA/EG的相变潜热分别为60.14、134.47 J/g。如前所述,2种复合材料中EP、EG的负载率分别为40%、90%,而LA-SA/EP和LA-SA/EG相变潜热为LA-SA的38.6%和86.3%,略低于其实际负载的相变材料的潜热,这是由于DSC测试时小坩埚的试样容量小,致使样品的代表性有误差所致。由于EG的负载能力强于EP,LA-SA/EG的相变潜热高于LA-SA/EP,故LA-SA/EG材料的调控温作用应该会更好。

在实际建筑中应用复合相变材料须考虑材料在反复相变循环后热性能的稳定性的。2种复合材料热循环100次后的DSC曲线如图7所示。从图7中可以看出,热循环100次后LA-SA/EP、LA-SA/EG的起始相变温度分别为36.3℃和34.1℃,峰值相变温度分别为38.3℃和38.7℃,相变潜热分别为57.13 J/g和131.78 J/g。与循环前相比,LA-SA/



(a) LA-SA/EP



(b) LA-SA/EG

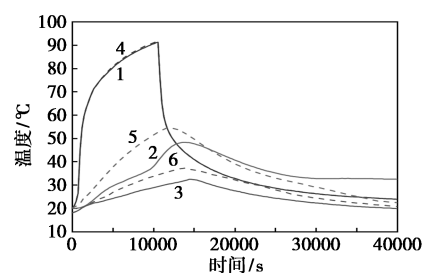
1—热循环前;2—热循环后

图7 复合相变材料经100次热循环前后的DSC曲线

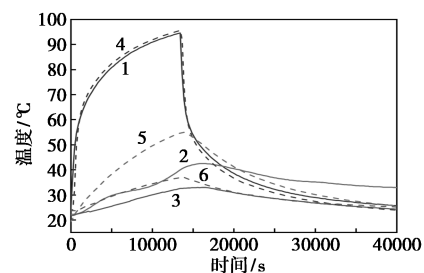
EP 和 LA-SA/EG 的起始相变温度分别增加 4.3% 和 3.3%, 而峰值相变温度只分别增加 0.8% 和 0.5%, 其相变潜热分别衰减 5.0%、2.0%。因此, 2 种材料经热循环后相变温度和相变潜热变化均较小, 在实际工程中具有很好的热稳定性, 可以满足建筑节能的耐久性要求。

2.6 复合相变材料的小室试验

通过小室试验分别对 LA-SA/EP 和 LA-SA/EG 两种复合相变材料的调温性能进行测试, 试验和对照小室各部位的温度变化情况如图 8 所示。由图 8(a) 可以看出, 热源灯加热时, 试验和对照小室加热区温度上升速度相同, 加热 176 min 时试验小室隔墙内达到设定的 40℃, 其中的 LA-SA/EP 可以产生相变。至此, 同时关闭试验和对照小室的热源, 2 个加热区内的温度均以相同速度迅速下降, 即加热区温度升/降变化基本一致; 由于试验小室隔墙内填充相变材料, 且由表 2 可知, LA-SA/EP 材料开始相变的温度为 34.8℃, 由于相变吸热使试验小室比对照小室隔墙内温度上升速度减慢, 故其温度明显低于对照小室相同部位的温度; 热源灯关闭 20 min 时, 对照小室隔墙内达到最高温度 54.6℃, 而热源关闭 52 min 时, 试验小室隔墙内温度才升至最高 48.3℃, 即试验小室隔墙内的最高温度比对照小室延迟 22 min 且低 17.4℃; 由于 2 个小室隔墙温度的差异, 导致他们测试区温度差异: 对照小室关闭热源 52 min 时达到最高 37.2℃, 而试验小室关闭热源 64 min 后温度才升至最高 32.4℃, 即试验小室测试区最高温度比对照小室的延迟 12 min 且低 4.8℃。类似地, 从图 8(b) 中可以看出发, 试验小室加热区加热 224 min 时其隔墙内达到设定的 40℃, 此时同时关闭试验和对照小室的热源, 2 个加热区内的温度也均以相同的速度迅速下降; 同样地, 由于试验小室隔墙内填充了 LA-SA/EG 材料, 且由表 2 可知, LA-SA/EG 材料开始相变的温度为 33.0℃, 相变吸热使试验小室隔墙内温度明显低于对照小室相同部位的温度; 热源关闭 8 min 时, 对照小室隔墙内达到最高温度 54.9℃, 而在热源关闭 40 min 时试验小室隔墙内温度才升至最高 42.4℃, 即试验小室隔墙内的最高温度比对照小室的延迟 32 min 且低 12.5℃; 同样由于 2 个小室隔墙温度的差异, 导致其测试区温度差异: 对照小室关闭热源 4 min 时达到最高温度 36.9℃, 而试验小室关闭热源 48 min 时温度才升至最高 32.9℃, 即试验小室测试区最高温度比对照小室的延迟 44 min 且低 4℃。



(a) LA-SA/EP



(b) LA-SA/EG

1—试验组加热区; 2—试验组 CPCM 隔墙; 3—试验组测试区;
4—对照组加热区; 5—对照组普通隔墙; 6—对照组测试区

图 8 小室试验中各部位温度变化情况

LA-SA/EP 和 LA-SA/EG 的相变材料相同, 只是负载材料不同, 分别为膨胀珍珠岩(EP)和膨胀石墨(EG), 致使其相变材料负载量、相变潜热、导热系数等有很大不同, 进而致调温性能有很大不同。由表 2 可知, LA-SA/EG 和 LA-SA/EP 的导热系数分别为 1.562 W/(m·K) 和 0.185 W/(m·K); 由于 EG 对相变材料的负载能力比 EP 的强(分别为 90% 和 40%), 故 LA-SA/EG 的相变潜热会比 LA-SA/EP 的高, 分别为 134.47 J/g 和 60.14 J/g。由图 8 可知, 虽然测试 2 种复合相变材料时都是以隔墙内温度达到 40℃ 关闭热源, 但由于 LA-SA/EP 的导热系数低、热响应慢, 故关闭热源后 52 min 内隔墙温度可继续升至 48.3℃, 即升高 8.3℃; 而采用 LA-SA/EG 时关闭热源 40 min 隔墙内温度只升高了 2.4℃, 说明其热响应速度大大提高。由此可知, 填充 LA-SA/EG 和 LA-SA/EP 时测试区最高温度延迟时间分别为 44 min 和 12 min, 最高温度分别为 32.4℃ 和 32.9℃。

测试 2 种复合相变材料时都是设定隔墙内温度 40℃ 时关闭热源, 但由于 2 种材料的热性能不同, 使 LA-SA/EP 和 LA-SA/EG 材料关闭热源的时间分别为 176 min 和 224 min, 关闭热源时其加热区的温度分别达到 91.3℃ 和 94.5℃, 即当隔墙内温度都达到 40℃ 时 LA-SA/EG 组加热时间比 LA-SA/EP 组长 48 min, 加热区温度比 LA-SA/EP 组高 3.2℃。

由此可以判断,LA-SA/EG组隔墙容纳来自加热区的热量更大,但隔墙内达到的最高温度更低,达到最高温度所需的时间更长,说明LA-SA/EG材料的调温性能比LA-SA/EP好得多。事实上,我国长江中下游地区夏季最高气温40℃左右,远低于本试验加热区的高于90℃,所以LA-SA/EG复合相变材料对室内温度的调节效果会比本试验结果更好。因此,LA-SA/EG复合相变材料更有利于营造舒适的室内温度环境。

3 结论

(1)采用真空吸附法分别制备了LA-SA/EP、LA-SA/EG复合相变材料。LA-SA共熔物被EP、EG的微孔隙的毛细作用力和表面张力稳定吸附,复合过程EP、EG与LA-SA共熔物不产生化学反应。

(2)扩散-渗出圈法试验结果表明,EG对LA-SA的负载能力强于EP,LA-SA/EP、LA-SA/EG复合相变材料的最佳LA-SA负载率分别为40%、90%。经DSC测试,LA-SA/EP的起始相变温度、峰值相变温度和相变潜热分别为34.8、38.0℃和60.14 J/g;LA-SA/EG的起始相变温度、峰值相变温度和相变潜热分别为33.0、38.5℃和134.47 J/g。

(3)LA-SA/EP、LA-SA/EG复合相变材料的起始相变温度经100次热循环后分别增加4.3%和3.3%,但峰值相变温度几乎无明显变化,其相变潜热分别衰减5.0%、2.0%,2种材料都具有良好的热可靠性,能满足实际应用的要求。

(4)小室试验表明,LA-SA/EP、LA-SA/EG复合相变材料通过相变吸放热不仅可以降低室内最高温度,且能延迟室内到达最高温度的时间,有效控制环境温度。由于LA-SA/EG导热系数高、热响应快,故调温效果明显好于LA-SA/EP材料,更有利于营造舒适的室内温度环境。

参考文献

- [1] CABEE. 2021 中国建筑能耗与碳排放研究报告:省级建筑碳达峰形势评估[R].北京:中国建筑节能协会,2021.
- [2] 孟多,赵康,王东旭.二元脂肪酸/硅藻土助滤剂定形相变复合材料的制备及性能[J].复合材料学报,2018,35(9):2558-2565.
- [3] 黄玥铭,吴子华,王嘉伟,等.有机复合相变材料光热转换和储热性能研究进展[J].材料导报,2022,(S2):1-20.
- [4] 王成君,苏琼,段志英,等.基于多孔支撑体的形状稳定复合相变储能材料的研究进展[J].化工进展,2021,40(3):1483-1494.
- [5] A Y Y, A N Z, B W T, *et al.* Fatty acids as phase change materials: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29(7):482-498.
- [6] 王成君,段志英,王爱军,等.基于共晶系相变材料的研究进展[J].材料导报,2021,35(13):13058-13066.
- [7] 夏永鹏,崔韦唯,张焕芝,等.复合相变储能材料的制备及强化传热研究进展[J].现代化工,2017,37(6):15-19,21.
- [8] 李兴会,陈敏智,周晓燕.复合定形相变材料的封装及应用研究新进展[J].工程科学学报,2020,42(11):1422-1432.
- [9] Min L, Kao H, Wu Z, *et al.* Study on preparation and thermal property of binary fatty acid and the binary fatty acids/diatomite composite phase change materials[J]. Applied Energy, 2011, 88(5):1606-1612.
- [10] 张鸿,武晓华,王晓磊,等.月桂酸/十六醇/二氧化硅复合相变材料的结构与性能[J].材料科学与工程学报,2010,28(5):672-675.
- [11] 何燕,张雄.相变石墨工艺及其耐久性研究[J].建筑材料学报,2016,19(1):181-184.
- [12] 李玉洋,章学来, Munyalo Jotham Muthoka, 等.正辛酸-癸酸/膨胀石墨低温复合相变材料的制备及热物性研究[J].化工新型材料,2019,47(8):39-43,48.
- [13] 叶志林,魏婷,易红玲,等.癸酸-棕榈酸/膨胀珍珠岩定型相变材料的制备与热性能[J].华东理工大学学报(自然科学版),2017,43(4):495-500.
- [14] Bian Y, Wang K, Wang J, *et al.* Preparation and properties of capric acid/Stearic acid/hydrophobic expanded perlite-aerogel composite phase change materials[J]. Renewable Energy, 2021, 179:1027-1035.
- [15] 周东一,肖湘华,肖懿,等.脂肪类复合相变储能材料中脂肪酸最佳质量含量的确定方法[J].化工学报,2021,72(S1):560-566.
- [16] 李琳,李东旭,张毅,等.脂肪酸/膨胀珍珠岩复合相变材料的制备与性能表征[J].南京工业大学学报(自然科学版),2016,38(4):11-16.
- [17] 杨英英,伏舜宇,武卫东,等.新型建筑用二元复合定型相变材料的制备及性能评价[J].化工进展,2020,39(10):4119-4126.
- [18] Jin W Z, Jiang L H, Chen L, *et al.* Enhancement of thermal conductivity by graphene as additive in lauric-stearic acid/treated diatomite composite phase change materials for heat storage in building envelope[J]. Energy & Buildings, 2021, 246:111087.
- [19] 李云涛,晏华,汪宏涛,等.正癸酸-月桂酸-硬脂酸三元低共熔体系/膨胀石墨复合相变材料的制备与表征[J].材料导报,2017,31(4):94-99.
- [20] Zhang N, Yuan Y P, Wang X, *et al.* Preparation and characterization of lauric-myristic-palmitic acid ternary eutectic mixtures/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 231:214-219.
- [21] Dong Z, Tian S, Xiao D. Experimental study on the phase change behavior of phase change material confined in pores[J]. Solar Energy, 2007, 81(5):653-660.
- [22] 沈万慈,曹乃珍,温诗铸,等.膨胀石墨对有机化合物的吸附[J].炭素技术,1996,(3):1-5. ■