

文章编号:1006-3080(2017)04-0495-06

DOI:10.14135/j.cnki.1006-3080.2017.04.007

癸酸-棕榈酸/膨胀珍珠岩定型相变材料的制备与热性能

叶志林, 魏婷, 易红玲, 赵媛媛, 郑柏存

(华东理工大学体育新材料研发中心, 上海 200237)

摘要:采用真空浸润法制备一种定型复合相变材料,其中癸酸(CA)和棕榈酸(PA)低共熔物为相变工作物质,膨胀珍珠岩(EP)为载体材料。通过FT-IR、SEM、DSC和TG等手段研究定型相变材料的化学稳定性、微观结构、热性能和热稳定性。结果表明:CA-PA合金通过物理结合被均匀地吸附在膨胀珍珠岩的孔道中。膨胀珍珠岩吸附CA-PA合金的最佳质量分数为55%,熔融潜热、凝固潜热分别为81.5、79.7 J/g,对应的熔融温度、凝固温度分别为27.9、19.1 °C。冷热循环1 000次后,CA-PA/EP定型复合相变材料的热性能基本不变,具有很好的稳定性。

关键词:癸酸-棕榈酸合金;膨胀珍珠岩;真空浸润法;相变材料

中图分类号:TB34

文献标志码:A

Preparation and Thermal Properties of Capric-Palmitic Acid/Expanded Perlite Shape-Stabilized Phase Change Materials

YE Zhi-lin, WEI Ting, YI Hong-ling, ZHAO Yuan-yuan, ZHENG Bai-cun

(Advanced Sports Material Research and Development Center, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Shape-stabilized phase change materials (PCMs) were prepared by incorporation of capric-palmitic acid (CA-PA) eutectic mixtures within the expanded perlite (EP) via vacuum impregnation. The chemical stability, microstructure, thermal properties and thermal stability of PCMs were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, differential scanning microscopy and thermogravimetry. The results indicated that CA-PA was impregnated into EP by physical attraction. The optimal mass fraction of CA-PA adsorbed on EP was 55%, and the latent heats of fusion and solidification were 81.5 J/g and 79.7 J/g, respectively, with the corresponding melting and solidification temperatures of 27.9 °C and 19.1 °C. The thermal properties of PCMs kept almost unchanged after 1 000 melting-freezing cycles.

Key words: capric-palmitic acid eutectic; expanded perlite; vacuum impregnation; phase change materials

热能存储是当今社会最重要的能量存储形式之一,它可以通过潜热、显热和化学能三种方式进行存储。由于潜热储能能力大、体积小、使用方便

和安全,因而在建筑节能、太阳能储存、空调制冷和采暖以及工业多余能量的回收和军事等领域有着广泛的应用^[1]。相变储能材料在建筑中的应用一直

收稿日期:2016-10-28

基金项目:国家自然科学基金(21506064)

作者简介:叶志林(1991-),男,安徽定远人,硕士生,从事相变材料研究。

通信联系人:郑柏存, E-mail: baicun@ecust.edu.cn

受到研究者的广泛重视^[2]。潜热型相变材料可以与石膏板^[3]、混凝土^[4]、塑料板^[5]等建筑材料结合制备建筑节能材料,与传统建筑材料相比,它具有移峰削谷、降低空调负荷和节约电能等优点。

脂肪酸及其多元合金是一种常用的相变材料,具有良好的热稳定性及化学稳定性、无过冷现象、无毒和储能密度大等优点^[6-7],但是脂肪酸在发生固液转变时的泄露问题限制了其应用。为克服这一问题,需要对其进行固定封装处理,目前主要有两种方法:胶囊封装法^[8]和多孔负载法^[9-10]。多孔负载法相对于胶囊法制备工艺简单、成本低、较易实现工业化。用于载体的多孔材料主要有硅藻土、膨胀石墨、膨胀珍珠岩和金属泡沫等^[11-15]。膨胀珍珠岩相对于其他多孔材料,具有质量轻、资源丰富、价格低廉和孔隙率大等优点,是负载相变材料的理想建筑材料。文献[14]制备了月桂酸-棕榈酸-硬脂酸/膨胀珍珠岩复合相变材料,膨胀珍珠岩的内部孔道可吸收脂肪酸,不会发生泄露。Sari 等^[15]把月桂酸吸附于膨胀珍珠岩中,结果表明,当月桂酸吸附量达到最大值 55% 时,月桂酸可均匀地分布于膨胀珍珠岩中。然而,当以上相变复合材料应用于夏季平均气温为 28 °C 的亚热带地区建筑室内墙体时,相变温度均偏高^[16]。

本文以棕榈酸和癸酸为目标体系制备了一种相变温度为 28.2 °C 的新型相变材料,通过真空浸润法制备膨胀珍珠岩负载棕榈酸-癸酸相变复合材料。利用 FT-IR、SEM、DSC 和 TG 等手段对相变复合材料的结构、微观形貌、储热性能和热稳定性进行分析。

1 实验部分

1.1 实验原料

棕榈酸(palmitic acid, PA),分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;癸酸(capric acid, CA),化学纯,上海凌峰化学试剂有限公司;乙醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;膨胀珍珠岩(expanded perlite, EP),河北灵寿县博川矿物加工厂,EP 平均粒径为 29.1 μm、比表面积为 4.12 m²/g,孔隙率高达 90%,EP 的化学成分通过 X 射线荧光光谱分析仪测得,见表 1。

1.2 实验仪器

差示扫描量热仪(DSC),DSC-200PC 型,德国 Netzsch 公司;傅里叶红外光谱仪(FT-IR),Nicolet 6700 型,美国 Thermo Electron 公司;扫描电子显微镜(SEM),JSM-6360LV 型,日本 JEOL 公司;热重分析仪(TGA),SDT-Q600 型,美国 TA 公司;热

台偏光显微镜, BX-51 型,日本 Olympus 公司;X 射线荧光光谱分析仪, XRF-1800 型,日本岛津公司。

表 1 EP 的化学成分

Table 1 Chemical constituents of EP

Composition	w/%	Composition	w/%
SiO ₂	74.6	K ₂ O	6.2
Al ₂ O ₃	13.6	CaO	2.8
MgO	0.3	Na ₂ O	1.1
Fe ₂ O ₃	0.9	Others	0.5

1.3 CA-PA 合金和 CA-PA/EP 复合相变材料的制备

为了确定 CA-PA 合金的比例,制备一系列不同比例的脂肪酸合金,CA 的质量分数分别为 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%。将共混物置于 80 °C 水浴锅中溶解混合搅拌 1 h,冷却至室温。通过 DSC 测定 CA-PA 合金的熔点。

基于物理化学原理,制备二元共晶体系,假设二元体系为理想液体,固相时各组分完全不相容,体系存在低共熔点,对应的温度为复配后的 CA-PA 相变温度。根据施罗德公式(式(1))计算低共熔点对应的配比和温度。当 $m(\text{CA}) : m(\text{PA}) = 4 : 1$ 时,其 CA-PA 共晶体的理论熔点为 28 °C。

$$\ln w_A = \frac{\Delta H_A}{R} \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T} \right) \quad (1)$$

式中: ΔH_A 是物质 A 在熔点 T_A 时的摩尔熔化热, J/mol; T 是共晶混合物的熔点, K; w_A 是物质 A 的质量分数; R 是气体摩尔常数, 8.314 J/(mol · K)。

CA-PA 二元体系熔融温度的测试结果如图 1 所示,当 CA 的质量分数为 80%~90% 时,相变温度很低,约为 28.2 °C,实验选取 $m(\text{CA}) : m(\text{PA}) = 4 : 1$,熔融温度为 28.2 °C 作为相变材料。该结论与施罗德公式的计算结果一致。

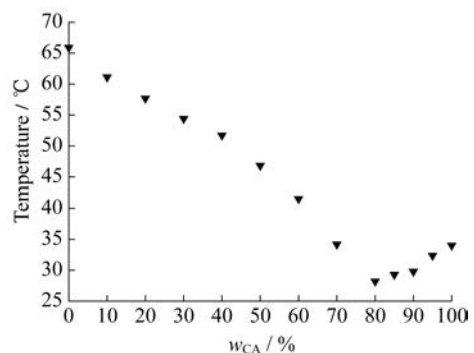


图 1 CA-PA 二元体系熔融温度

Fig. 1 Melting temperature of CA-PA binary mixtures

采用真空浸润法^[10,14]制备 CA-PA/EP 复合相变材料。为确定 EP 对 CA-PA 的最大吸附量,脂肪酸合金 CA-PA 加入的质量分数设定为 55%、60%、65% 和 70%。在室温下,脂肪酸不发生泄露的最大质量分数为 65%。

1.4 表征与测试

1.4.1 CA-PA/EP 复合相变材料的表征 用差示扫描量热仪对复合相变材料的热性能进行分析,测试温度 -20~80 °C,氮气气氛,升温速率 5 °C/min;采用 THMS-600 热台对复合相变材料进行程序加热,用 BX-51 型偏光显微镜同步观察复合相变材料在升温过程中的形态变化。热台扫描温度范围为室温至 70 °C,升温速率 10 °C/min,每隔 10 °C 保温 1 min 观察样品;采用傅里叶变换红外光谱仪分析材料的组成结构;采用热分析仪分析 EP 和 CA-PA/EP 热失重行为,从室温升温至到 600 °C,升温速率 10 °C/min,氮气气氛;采用导热系数仪(瞬态平面热源法)测定样品导热系数。

1.4.2 CA-PA/EP 复合相变材料储热性能与热稳定性测试 CA-PA/EP 复合相变材料储热性能:分别称取 5 g CA-PA/EP、CA-PA 放置于玻璃杯中,热电偶放置于玻璃杯中心部位。冷浴和热浴分别为 10 °C 和 50 °C,熔融加热过程放置于 50 °C 的水浴

中恒温,随即放置于 10 °C 水浴中凝固冷却恒温,采用 central 300 型温度记录仪 4 s 记录一次。

CA-PA/EP 复合相变材料的热稳定性测试过程是先把玻璃杯放置于 50 °C 水浴至恒温,再放置 10 °C 水浴至恒温,记录一个循环。

2 结果与讨论

2.1 CA-PA/EP 复合相变材料的热性质

表 2 所示为不同 $w(\text{CA-PA})$ 的复合相变材料 CA-PA/EP 的相变温度和相变潜热。表 2 中, $\Delta H^* = \Delta H \times w$, 其中, ΔH^* 为复合相变材料的理论计算值, ΔH 为纯脂肪酸 CA-PA 的相变焓, w 为复合相变材料中 CA-PA 的质量分数; ΔH_m 、 ΔH_f 分别为复合相变材料的熔融焓与凝固焓; T_m 、 T_f 分别为复合相变材料的熔融温度和凝固温度。实际制备的 CA-PA/EP 的相变潜热及相变温度与理论预测值基本相同,说明 CA-PA 已均匀吸附于 EP 的孔道中。此外, DSC 实际测试熔融焓、凝固焓与理论计算值存在细微差别,并且熔融温度和凝固温度也略低于纯脂肪酸的熔融温度和凝固温度。这可能是因为测试误差或者 EP 与脂肪酸之间存在微弱的相互作用^[17]。

表 2 CA-PA 和 CA-PA/EP 的相变温度和相变潜热

Table 2 Phase change temperature and latent heats of CA-PA and CA-PA/EP

$w(\text{CA-PA})/\%$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$T_f/^\circ\text{C}$	$\Delta H_f/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$\Delta H_m^*/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$\Delta H_f^*/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
100	28.2	151.5	20.1	149.8		
55	27.9	81.5	19.1	79.7	83.3	82.4
60	27.8	84.7	19.9	83.5	90.9	89.9
65	28.1	95.6	19.0	96.4	98.5	97.4
70	28.1	102.1	19.2	103.4	106.1	104.9

当膨胀珍珠岩等多孔材料通过孔道吸附和毛细管力吸附对脂肪酸达到吸附饱和后,多余的会泄露出来,并且随着温度升高,分子运动的加剧会使得泄露情况更加严重。本次实验考察了程序升温过程中 CA-PA 质量分数不同时 CA-PA/EP 的泄露情况。由图 2(a)、2(b)可知,当 CA-PA 质量分数为 55% 时,温度从 50 °C 升到 70 °C,复合相变材料的表面颗粒边界清晰,并没有明显的液体出现;由图 2(c)可知,当 CA-PA 质量分数为 60%,温度达到 50 °C 时,出现部分液滴,并且 EP 部分界面已经变得模糊,说明此时 EP 已经达到饱和吸附,多余的 CA-PA 泄露出来;当温度达到 70 °C 时,泄露情况更加严重(图 2(d));当 CA-PA 质量分数达到 65%,在

50 °C 和 70 °C 时,已经严重泄露,可明显观察到 CA-PA 液滴,并且 EP 界面已经模糊不清(图 2(e)、2(f))。综上所述,EP 稳定吸附 CA-PA 的最大质量分数为 55%,此时 CA-PA/EP 是一种性能优良的定型复合相变材料。

2.2 CA-PA/EP 复合相变材料的结构

图 3 所示为 EP 和 CA-PA/EP 的微观形貌图。由图 3(a)可知,EP 的孔结构由大量的大孔及微孔组成,内部为不规则的孔道,表现显蜂窝状,这些孔隙为 CA-PA 的吸附提供了足够的空间,具有很强的吸附能力。由图 3(b)可以看出,CA-PA 和 EP 复合后,表面变得相对平整和光滑,说明 CA-PA 均匀分布在 EP 的孔道结构中。

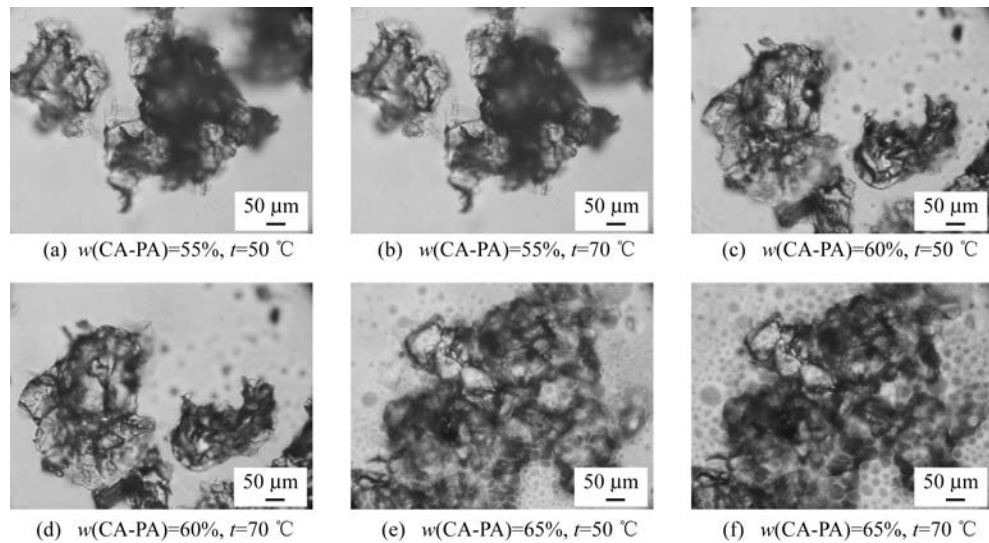


图 2 不同温度下 CA-PA/EP 的偏光显微镜图

Fig. 2 POM images of CA-PA/EP with different temperature

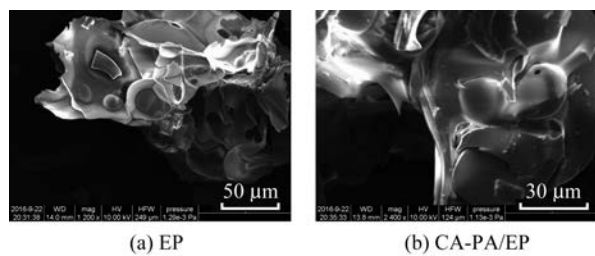


图 3 EP 和 CA-PA/EP 的 SEM 图

Fig. 3 SEM images of EP and CA-PA/EP

通过 FT-IR 表征 CA-PA/EP 复合相变材料的化学相容性。由图 4 所示,EP 红外光谱中 $1\ 058\ \text{cm}^{-1}$ 处的强吸收峰是 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 的非对称伸缩振动峰, $3\ 461\ \text{cm}^{-1}$ 处出现的宽峰可能为吸附于 EP 中的少量水所致, $1\ 637\ \text{cm}^{-1}$ 处为吸附水的弯曲振动峰。在 CA-PA 合金中, $1\ 710\ \text{cm}^{-1}$ 处的强峰为 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰, $1\ 466\ \text{cm}^{-1}$ 处为 $-\text{COO}-$ 的对称伸缩振动峰, $939\ \text{cm}^{-1}$ 和 $723\ \text{cm}^{-1}$ 处分别是 $-\text{OH}$ 的面外弯曲振动峰和面内弯曲振动峰, $2\ 923\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2\ 854\ \text{cm}^{-1}$ 处分别是 $-\text{CH}_2-$ 的不对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰的波数。对比 EP、CA-PA、CA-PA/EP 图谱可知, CA-PA/EP 的图谱只是 CA-PA 和 EP 图谱的简单叠加, 并没有出现新的峰, 说明 CA-PA/EP 复合物并没有新的物质生成。此外, 在 $1\ 540\sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ 以及 $1\ 464\sim 1\ 360\ \text{cm}^{-1}$ 处并没有出现脂肪酸盐酯基的反对称、对称伸缩振动峰^[18], 可进一步证明 CA-PA 和 CA-PA/EP 之间并没有发生化学反应, EP 和 CA-PA 之间仅仅是物理嵌合, 在表面张力和毛细管力的作用下, CA-PA 被限制在 EP 的孔中, 阻止其泄露^[10]。

因此, EP 和 CA-PA 之间具有较好的化学相容性。

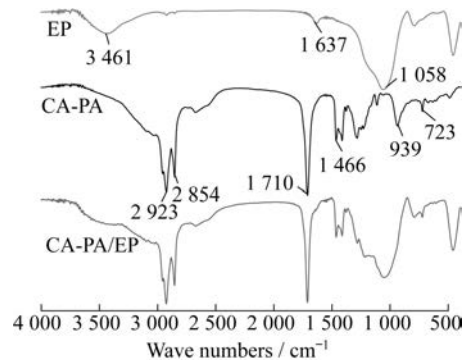


图 4 EP、CA-PA 和 CA-PA/EP 的红外光谱图

Fig. 4 FT-IR spectra of EP, CA-PA and CA-PA/EP

2.3 耐热性能

在实际建筑中使用时, 为防止相变材料在高温时发生蒸发或者降解, 相变材料必须具有优良的耐热性能。CA-PA、EP 和 CA-PA/EP 在氮气气氛条件下的失重曲线如图 5 所示。当 EP 从室温升到 $600\ ^\circ\text{C}$ 时, 质量损失为 2.6% , 失重集中在 $100\ ^\circ\text{C}$, 为吸附在 EP 里的少量水。当 CA-PA/EP 从室温升到 $600\ ^\circ\text{C}$ 时, 只有一个失重峰, 这是由于 CA-PA 蒸发所致, 完全失重的温度为 $220\ ^\circ\text{C}$, 该温度为 CA-PA/EP 的使用上限温度。当 CA-PA 和 CA-PA/EP 失重 5% 时, 温度均高于 $135\ ^\circ\text{C}$ 。这说明作为建筑储能材料, CA-PA/EP 在工作温度范围内具有优良的耐热稳定性。

2.4 CA-PA/EP 复合相变材料的热循环稳定性

对于相变储能材料来说, 具有优良的热循环稳定性是十分必要的。由图 6 及表 3 可知, 经过 500

次和 1 000 次冷热循环后,CA-PA/EP 的熔融温度和凝固温度并没有发生显著变化;经过 500 次冷热循环后,CA-PA/EP 的熔融焓和凝固焓分别降低 2.5%、2.8%;经过 1 000 次冷热循环后,CA-PA/EP 的熔融焓和凝固焓分别降低 5.6%、1.0%,相变焓基本没有变化。结果表明,CA-PA/EP 具有良好的热循环稳定性。

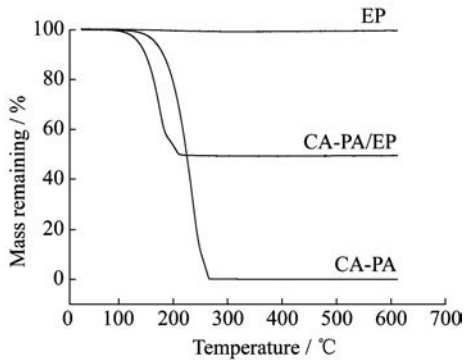


图 5 EP,CA-PA 和 CA-PA/EP 的热重曲线
Fig. 5 TG curves of the EP,CA-PA and CA-PA/EP

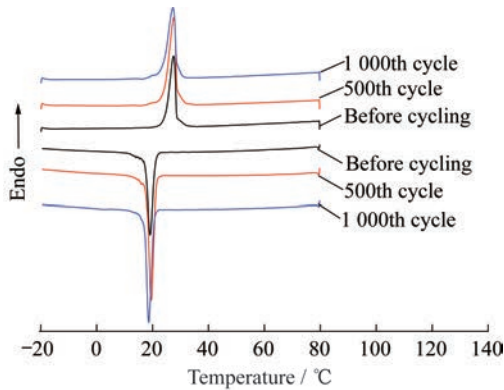


图 6 热循环前后 CA-PA/EP 的 DSC 曲线
Fig. 6 DSC curves of CA-PA/EP before and after thermal cycling

表 3 热循环前后 CA-PA/EP 的相变焓和相变温度
Table 3 Latent heats and phase change temperature of CA-PA/EP before and after thermal cycling

No. of cycles	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_i/^\circ\text{C}$	$\Delta H_i/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
0	27.9	81.5	19.1	79.7
500	27.6	79.5	19.5	75.2
1 000	27.26	79.2	18.7	78.9

2.5 CA-PA/EP 复合相变材料的导热系数

相变材料的导热系数大小直接影响吸、放热速率,从而影响其应用。由表 4 知,EP 导热系数较低,

CA-PA 导热系数相对较大,CA-PA/EP 导热系数介于两者之间,并且导热系数随着 CA-PA 质量分数的增加而提高。

表 4 EP、CA-PA 和 CA-PA/EP 的导热系数
Table 4 Thermal conductivity of EP,CA-PA and CA-PA/EP

Samples	$w(\text{CA-PA})/\%$	Thermal conductivity/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
EP	0	0.05 ± 0.01
CA-PA/EP	55	0.10 ± 0.01
CA-PA/EP	60	0.10 ± 0.01
CA-PA/EP	65	0.11 ± 0.01
CA-PA/EP	70	0.11 ± 0.01
CA-PA	100	0.14 ± 0.01

2.6 CA-PA/EP 复合相变材料的储热性能

通过检测 CA-PA/EP 相变复合材料的熔融结晶曲线可以直观了解 CA-PA/EP 相变复合材料的储放热性能。由图 7 可以看出,EP 的熔融结晶只有一个过程,在升降温过程中,温度迅速变化并达到平衡。CA-PA/EP 相变复合材料的熔融结晶曲线分为 3 个阶段:第 1 阶段,在开始升降温的过程中,由于相变材料与环境之间的温差较大,温度迅速变化;第 2 阶段,相变复合材料开始发生熔融、凝固相变转化,吸收大量能量,从而使温度在一定范围内保持恒定,此阶段温度变化缓慢;当固液转变完成后,进入第 3 阶段,CA-PA/EP 相变复合材料温度再次开始快速变化至环境温度并保持平衡。CA-PA/EP 和 EP 从 10 °C 升高到 40 °C 分别需要 1 064 s 和 444 s,从 40 °C 降到 10 °C 分别需要 2 248 s 和 1 512 s,说明 CA-PA/EP 具有较好的储热控温功能。

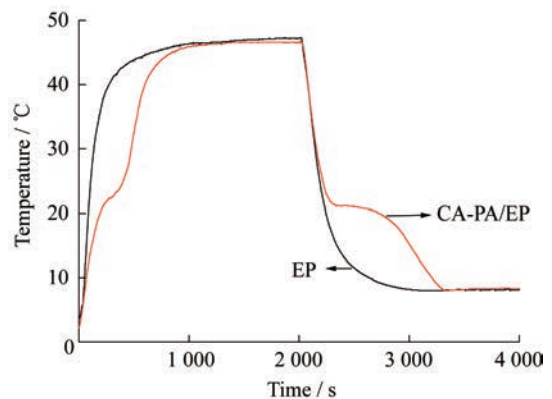


图 7 EP 和 CA-PA/EP ($w(\text{CA-PA})=55\%$) 的熔融结晶曲线
Fig. 7 Melting-cooling curves of EP and CA-PA/EP ($w(\text{CA-PA})=55\%$)

3 结 论

(1) CA 与 PA 以质量比为 4 : 1 的比例混合制备二元合金,用真空浸润法制备 CA-PA/EP 复合相变材料,通过程序升温泄露测得 CA-PA 在 CA-PA/EP 复合相变材料的最佳吸附质量分数为 55%。

(2) CA-PA 合金被均匀地吸附到 EP 的孔隙中,CA-PA/EP 复合相变材料没有发生任何化学结构的变化,CA-PA 合金与 EP 化学相容性良好。

(3) $w(\text{CA-PA}) = 55\%$ 的复合相变材料 CA-PA/EP 的熔融温度、凝固温度分别为 27.9、19.1 °C,熔融潜热、凝固潜热分别为 81.5、79.7 J/g,经过 1 000 次冷热循环后相变焓和相变温度基本没有变化,说明 CA-PA/EP 复合相变材料循环稳定性良好。

(4) $w(\text{CA-PA}) = 55\%$ 的复合相变材料 CA-PA/EP 具有良好的储热性能,在达到相变温度时通过吸收或释放热量从而使温度在一定范围内维持平衡,可用于建筑节能。

参考文献:

- [1] ZALBA B, MARIN J M, CABEZA L F, *et al.* Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(3): 251-283.
- [2] ZHU Na, MA Zhenjun, WANG Shengwei. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(12): 3169-3181.
- [3] KHADIRAN T, HUSSEIN M Z, SYAMSI H W, *et al.* Laboratory-scale studies on smart gypsum composite boards incorporated with nano-encapsulated organic phase change material for thermal comfort building application [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(3): 04015137.
- [4] CABEZA L F, CASTELLON C, NOGUES M, *et al.* Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings [J]. *Energy and Buildings*, 2007, 39(2): 113-119.
- [5] ZHANG Y P, LIN K P, YANG R, *et al.* Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(10): 1262-1269.
- [6] YUAN Yanping, ZHANG Nan, TAO Wenquan, *et al.* Fatty acids as phase change materials: A review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29(7): 482-498.
- [7] HASAN A, SAYIGH A A. Some fatty acids as phase-change thermal energy storage materials [J]. *Renewable Energy*, 1994, 4(1): 69-76.
- [8] JACOB R, BRUNO F. Review on shell materials used in the encapsulation of phase change materials for high temperature thermal energy storage [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 48(Suppl 1): 79-87.
- [9] XU Biwan, LI Zongjin. Performance of novel thermal energy storage engineered cementitious composites incorporating a paraffin/diatomite composite phase change material [J]. *Applied Energy*, 2014, 121: 114-122.
- [10] SARI A, KARAIPEKLI A. Preparation, thermal properties and thermal reliability of palmitic acid/expanded graphite composite as form-stable PCM for thermal energy storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(5): 571-576.
- [11] ZHAO C Y, LU W, TIAN Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs) [J]. *Solar Energy*, 2010, 84(8): 1402-1412.
- [12] ZHANG Zhengguo, ZHANG Ni, PENG Jing, *et al.* Preparation and thermal energy storage properties of paraffin/expanded graphite composite phase change material [J]. *Applied Energy*, 2012, 91: 426-431.
- [13] XU Biwan, LI Zongjin. Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2013, 105: 229-237.
- [14] ZHANG Nan, YUAN Yanping, YUAN Yaguang, *et al.* Lauric-palmitic-stearic acid/expanded perlite composite as form-stable phase change material: Preparation and thermal properties [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82: 505-511.
- [15] SARI A, KARAIPEKLI A. Preparation, thermal properties and thermal reliability of capric acid/expanded perlite composite for thermal energy storage [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 109(2-3): 459-464.
- [16] PEIPPO K, KAURANEN P, LUND P D. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating [J]. *Energy and Buildings*, 1991, 17(4): 259-270.
- [17] ZHANG Dong, TIAN Shengli, XIAO Deyan. Experimental study on the phase change behavior of phase change material confined in pores [J]. *Solar Energy*, 2007, 81(5): 653-660.
- [18] 罗曼, 关平, 刘文汇. 利用红外光谱鉴别饱和脂肪酸及其盐 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(2): 250-253.