

研究论文

## 月桂酸-棕榈酸-硬脂酸/膨胀石墨复合相变材料的制备及性能

袁亚光, 袁艳平, 张楠, 李天宇, 曹晓玲

(西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 以理论计算为基础, 制备了月桂酸-棕榈酸-硬脂酸三元低共熔混合物 (LA-PA-SA)。利用膨胀石墨 (EG) 的网状多孔结构, 制备了最佳质量配比为 15: 1 (LA-PA-SA: EG) 的 LA-PA-SA/EG 复合相变材料。综合利用 FT-IR、SEM、DSC、冷热加速循环和蓄放热实验等对复合相变材料的结构和性能进行了研究。结果表明: LA-PA-SA 通过物理吸附作用均匀分布于 EG 的多孔结构中; 复合相变材料的熔化和凝固温度分别为 32.1℃ 和 30.3℃, 熔化和凝固潜热分别为 143.2 J·g<sup>-1</sup> 和 143.1 J·g<sup>-1</sup>; 经过 1000 次冷热循环后具有良好的热稳定性和化学稳定性; EG 的高导热性加快了复合相变材料的蓄放热速率。

**关键词:** 低共熔混合物; 膨胀石墨; 复合相变材料; 结构; 热性能

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.z2.042

**中图分类号:** TK 512

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438—1157(2014)S2—286—07

## Preparation and properties of lauric-palmitic-stearic acid eutectic mixture/ expanded graphite composite phase change material for energy storage

YUAN Yaguang, YUAN Yanping, ZHANG Nan, LI Tianyu, CAO Xiaoling

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on theoretical calculation, lauric acid-palmitic acid-stearic acid ternary eutectic mixture (LA-PA-SA) was obtained firstly. Then, the LA-PA-SA/expanded graphite (EG) composite phase change material (PCM) with an optimum mass ratio of LA-PA-SA: EG = 15: 1 was prepared by the porous structure of EG. The prepared LA-PA-SA/EG composite PCM are characterized by the scanning electron microscope (SEM), Fourier transformation infrared spectroscopy (FT-IR), differential scanning calorimetry (DSC), thermal cycling and thermal performance test. The results showed that LA-PA-SA uniformly distributed in the porous network structure of EG due to the capillary action and surface tension. The melting and freezing temperatures and latent heats of the LA-PA-SA/EG composite PCM were 32.1℃ and 30.3℃, and 143.2 J·g<sup>-1</sup> and 143.1 J·g<sup>-1</sup> respectively. Thermal cycling test results showed LA-PA-SA/EG had a good thermal and chemical reliability after 1000 thermal cycles. Thermal performance test results indicated that the rate of thermal energy storage and release was accelerated due to the high thermal conductivity of EG.

**Key words:** eutectic mixture; expanded graphite; composite phase change material; structure; thermal properties

2014-08-11 收到初稿, 2014-08-18 收到修改稿。

**联系人:** 袁艳平。第一作者: 袁亚光 (1990—), 男, 硕士研究生。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51378426); 教育部新世纪优秀人才基金项目 (NCET-11-0714); 四川省省级建筑节能专项资金项目; 四川省科技创新苗子工程项目 (2014-122); 西南交通大学研究生创新实验实践项目 (YC201402206)。

**Received date:** 2014-08-11.

**Corresponding author:** Prof. YUAN Yanping, ypyuan @ home.swjtu.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (51378426), the Program of Ministry of Education of China for New Century Excellent Talents (NCET-11-0714) and the Special Funds for Building Energy Efficiency Projects in Sichuan Province.

## 引言

相变储能是利用相变材料的相变潜热蓄存和释放能量的一种环境友好新技术。因相变材料具有相变过程近似恒温、蓄能密度大、热稳定性好等特性,可有效解决能量供求双方在时间、空间上的不匹配问题。在太阳能利用、电力行业、工业余热回收、暖通空调及建筑节能等领域有广泛的应用前景,是能源科学和材料科学领域中十分活跃的前沿研究方向<sup>[1-3]</sup>。

在诸多相变材料的研究中,脂肪酸类相变材料因具有热容量高、过冷度小、热稳定性好、无腐蚀性、价格低廉等优点,而成为具有应用潜力的相变储能材料之一<sup>[4-5]</sup>。另外,脂肪酸类相变材料具有低共熔效应,将不同脂肪酸熔融混合形成低共熔混合物,可有效降低混合物的相变温度,从而拓宽了脂肪酸类相变材料相变温度范围,使得其应用领域更加广泛<sup>[6]</sup>。Ahmet 等<sup>[7]</sup>首先制备了相变温度为 24.68℃ 的癸酸-硬脂酸 (CA-SA) 低共熔混合物,然后将 CA-SA 与石膏结合制备定形相变墙体 (PCW),并研究了相变墙体对减少室内空气温度的波动的影响作用;Li 等<sup>[8]</sup>首先利用相图热力学方法计算了癸酸 (CA)、月桂酸 (LA)、棕榈酸 (PA) 和硬脂酸 (SA) 两两混合而制备二元低共熔混合物的混合比,并通过 DSC 对低共熔混合比进行了验证。6 种二元脂肪酸低共熔混合的相变温度在 21.1~55.0℃ 范围内。然而,脂肪酸类相变材料同样具有有机相变材料普遍存在的热导率小的缺点,严重影响了其能量储存和释放速率。相变材料可通过添加金属填料、添加石墨、胶囊封装、加肋片、添加碳纤维和组合相变材料等方式强化传热<sup>[9]</sup>。Zhang 等<sup>[10]</sup>选用硅藻土、有机膨润土、膨胀石墨 (EG) 等 9 种高导热介质来提高相变材料导热性,结果发现 EG 效果最好。膨胀石墨一方面可以改善相变材料的热导率,另一方面可以改善液态相变材料泄漏问题,是目前相变材料领域应用较为广泛的轻质碳材料。本课题组前期对脂肪酸三元低共熔混合物 MA-PA-SA、LA-MA-PA、LA-MA-SA 和 CA-MA-PA 及其 EG 复合相变材料进行了研究<sup>[11-14]</sup>。

本文制备了可应用于空调冷凝热回收、太阳能采暖系统的月桂酸-棕榈酸-硬脂酸/膨胀石墨复合相变材料 (LA-PA-SA/EG),并通过 FT-IR、

SEM、DSC、加速冷热循环和蓄、放热实验等对复合相变材料的结构和性能进行了综合研究。

## 1 实验

## 1.1 实验原料及仪器

实验原料:月桂酸 (LA, AR)、棕榈酸 (PA, AR)、硬脂酸 (SA, 98%, 阿拉丁试剂有限公司);可膨胀石墨 (EG, 粒度 200~160  $\mu\text{m}$ , 膨胀率 200  $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ , 含碳量 99%, 青岛金日莱电子材料厂)。

实验仪器:差示扫描量热仪 (DSC, TA Q20, 美国),氮气气氛,升温速率  $5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ , 温度测试范围为 10~80℃, 温度精度:0.1℃, 热焓精度:0.4%, DSC 曲线中,相变材料的熔化温度和潜热以  $T_m$  和  $H_m$  表示,凝固温度和潜热以  $T_f$  和  $H_f$  表示;傅里叶红外光谱仪 (FT-IR, Nicolet 6700, 美国), KBr 压片,测试频率 400~4000  $\text{cm}^{-1}$ ;扫描电子显微镜 (SEM, Fei Inspect FEI, Netherlands), 样品喷金处理;金属浴 (CHB-T2-E, BIOER ThermoQ, 中国);温度采集仪 (Agilent 34980A), 数据采集间隔为 10 s;集热式恒温加热磁力搅拌器 (DF-101S, 巩义市予华仪器有限责任公司);恒温水浴锅;热电偶 (铜-康铜热电偶, T 型), 测试精度为  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 。

## 1.2 LA-PA-SA 三元低共熔混合物的制备

分别称取一定质量的月桂酸 (LA)、棕榈酸 (PA)、硬脂酸 (SA) 放入烧杯中,将烧杯置于 75℃ 恒温水浴中,待样品全部熔化后,磁力搅拌 30 min (转速:400  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ), 保证 LA、PA、SA 的充分均匀混合,然后将混合物冷却至室温,即得到 LA-PA-SA 三元低共熔混合物。

## 1.3 LA-PA-SA/EG 复合相变材料的制备

首先利用微波法制备了膨胀石墨 (EG),微波功率为 700 W,时间为 30 s。以 LA-PA-SA 三元低共熔混合物为相变材料,EG 为基体制备了一系列 LA-PA-SA/EG 复合相变材料,分别命名为 M1-M8,配比比例见表 1。具体制备过程为:分别称取 0.2 g EG 置于烧杯中,再加入不同质量的 LA-PA-SA 三元低共熔混合物,然后放入 65℃ 的烘箱中加热 24 h,期间每隔 8 h 搅拌以保证 EG 对 LA-PA-SA 的均匀吸附,冷却至室温,最后得到 LA-PA-SA/EG 复合相变材料。

#### 1.4 蓄、放热特性实验

在两个相同玻璃试管中, 分别填充 45 g LA-PA-SA 三元低共熔混合物和 LA-PA-SA/EG 复合相变材料, 并在材料中心位置布置热电偶。将两试管置于 12℃ 的水浴中, 当热电偶测试温度达到稳定后, 迅速放入 45℃ 的恒温水浴中, 进行融化实验; 待其温度不再上升时, 再放回到 12℃ 的水浴中, 进行凝固实验, 直至温度不再下降。通过 Agilent34980A 温度数据采集仪来记录整个蓄、放热周期温度变化过程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 LA-PA-SA 三元低共熔混合物配比的确定

两种或多种脂肪酸相变材料通过混合, 可以在一定比例下得到具有较低熔点的低共熔混合物。低共熔混合物的相变温度和质量配比可以通过 Schröder 理论计算公式(1) 进行理论预测计算<sup>[15]</sup>。

$$T_m = [1/T_i - (R \ln X_i)/H_i]^{-1} \quad (i = A, B) \quad (1)$$

式中,  $T_m$  为共晶系的相变熔点, K;  $T_i$ 、 $H_i$  分别为单一组元的相变熔点、相变潜热, K、 $J \cdot g^{-1}$ ;  $R$  为气体常数,  $8.315 J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ ;  $X_i$  为共晶系中第  $i$  种物质的摩尔分数。式(1) 中所提供的是关于二元共晶系的计算式, 对于  $N$  元共晶系的计算也同样适用, 只需将  $N-1$  个组元与第  $N$  个组元分别视为式(1) 中 A、B 组元即可。

本文首先对月桂酸(LA)、棕榈酸(PA)和硬脂酸(SA)进行了热性能测试, DSC 测试结果显示, LA、PA 和 SA 的熔化温度分别为 44.1℃、62.0℃ 和 68.5℃。而在一些太阳能应用和空调冷凝热回收应用领域中, 需要相变温度更低的相变材料。为了得到具有合适相变温度的脂肪酸类相变材料, 本文利用式(1) 对 LA-PA-SA 三元低共熔混合物的相变温度进行了理论预测计算, 计算结果显示其相变温度为 33.2℃, 适合应用于低温太阳能热储存和空调冷凝热回收领域。

图 1 是本文制备 LA-PA-SA 三元低共熔混合物的 DSC 曲线。LA-PA-SA 的低共熔质量配比为 62.2 : 24.6 : 13.2。从图 1 中可以看出, 在 LA-PA-SA 的升、降温曲线中, 有且仅有一个吸、放热峰, 说明在该质量配比下, 3 种脂肪酸具有很好的低共熔效应。从图 1 还可以看出, LA-PA-SA 的熔化和凝固温度分别为 32.1℃ 和 30.4℃, 熔化和

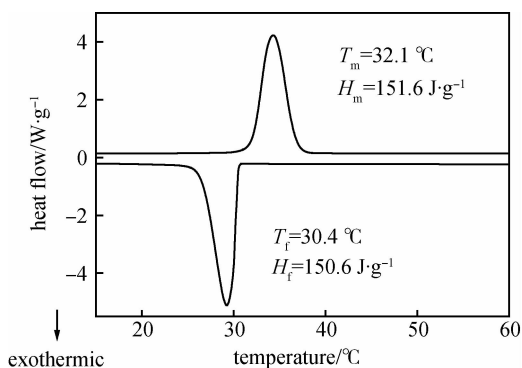


图 1 LA-PA-SA DSC 测试曲线

Fig. 1 DSC curve of LA-PA-SA

凝固潜热分别为  $151.6 J \cdot g^{-1}$  和  $150.6 J \cdot g^{-1}$ 。对比 LA-PA-SA 的 DSC 测试结果和理论预测计算发现, 两者具有较好的吻合。

### 2.2 LA-PA-SA/EG 复合相变材料最佳配比的确定

相变材料的相变温度和相变潜热是影响其应用的两个重要因素, 在合适的相变温度下, 相变材料的相潜热越大, 单位质量材料的储能密度越大。对于本文所制备的 LA-PA-SA/EG 复合相变材料, LA-PA-SA 三元低共熔混合物的含量直接影响复合相变材料的相变潜热, LA-PA-SA 含量越高, 复合相变材料的相变潜热越大, 而基体材料 EG 对复合相变材料的相变潜热几乎没有贡献。EG 的含量将影响复合相变材料的导热性能和泄漏现象。因此, LA-PA-SA 和 EG 之间存在一个最佳质量配比, 本文定义 EG 对 LA-PA-SA 的最大吸附率为两者的最佳配比。为了确定复合相变材料的最佳配比, 分别称取 0.200 g LA-PA-SA/EG 复合相变材料 M1~M8, 并置于滤纸上, 如图 2(a) 所示。将样品放入 65℃ 的烘箱热处理 90 min。热处理后结果如图 2(b) 所示。称量热处理后样品剩余质量, 热处理前后 M1~M8 质量如表 1 所示。对比图 2(a) 和图 2(b) 发现, 热处理后样品 M1~M5 周围滤纸中无明显的油印出现, 说明在滤纸的吸附作用下, 样品在热处理过程中也没有液态 LA-PA-SA 泄漏出来。图 2(b) 中样品 M6~M8 周围则有油印渗出, 且油印面积呈递增趋势, 这是由于当 LA-PA-SA 含量大于 EG 所能吸附量时, 多余的熔融态相变材料会在外力作用下发生渗漏, 从而在滤纸上形成油印, 随着相变材料含量越多, 发生渗漏的材料越多, 油印面积越大。另由表 1 可知, 热处理前后, M1~M5 质量变化不大, 质量损

表 1 热处理前后 LA-PA-SA/EG 质量的变量

Table 1 Mass ratio and mass of LA-PA-SA/EG before and after thermal treatment

| Sample | Mass ratio(LA-PA-SA;EG) | Before heat treatment/g | After heat treatment/g | Mass loss/g | Percentage loss/% |
|--------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|-------------------|
| M1     | 11 : 1                  | 0.200                   | 0.199                  | 0.001       | 0.5               |
| M2     | 12 : 1                  | 0.200                   | 0.199                  | 0.001       | 0.5               |
| M3     | 13 : 1                  | 0.200                   | 0.199                  | 0.001       | 0.5               |
| M4     | 14 : 1                  | 0.200                   | 0.198                  | 0.002       | 1.0               |
| M5     | 15 : 1                  | 0.200                   | 0.198                  | 0.002       | 1.0               |
| M6     | 16 : 1                  | 0.200                   | 0.187                  | 0.013       | 6.5               |
| M7     | 17 : 1                  | 0.200                   | 0.186                  | 0.014       | 7.0               |
| M8     | 18 : 1                  | 0.200                   | 0.177                  | 0.023       | 11.5              |

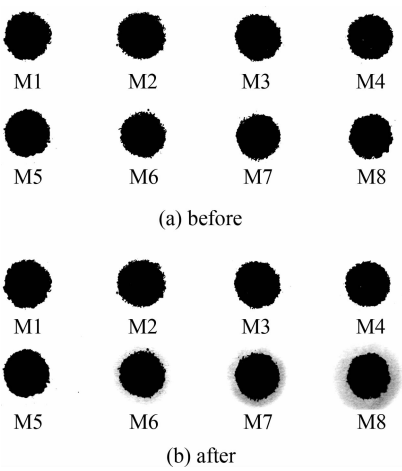


图 2 热处理前、后的 LA-PA-SA/EG

Fig. 2 Photographs of LA-PA-SA/EG composite PCM before and after thermal treatment

失率分别为 0.5%、0.5%、1.0%、1.0% 和 1.0%，而 M6~M8 有明显的质量损失，质量损失率分别为 6.5%、7.0%、11.5%。上述结果表明，LA-PA-SA 与 EG 的最佳质量配比为 15 : 1。本文后续研究中，定义质量配比为 15 : 1 的样品 M5 为 LA-PA-SA/EG 复合相变材料。

2.3 LA-PA-SA/EG 复合相变材料微观形貌及结构

图 3 是 EG、LA-PA-SA 三元低共熔混合物和 LA-PA-SA/EG 复合相变材料的 FT-IR 图。图中 EG 的 FT-IR 曲线在 1640 cm<sup>-1</sup> 处出现特征吸收峰，其中曲线上 3440 cm<sup>-1</sup> 处峰值是 H—O—H 的弯曲振动吸收峰，这可能是由于测试过程中样品中存在少量水分造成的。LA-PA-SA 的 FT-IR 曲线中 2920 cm<sup>-1</sup> 处出现的特征吸收峰是由—CH<sub>3</sub>、—CH<sub>2</sub> 基的伸缩振动引起，C=O 的伸缩振动导致 1700 cm<sup>-1</sup> 处出现特征吸收峰，1470 cm<sup>-1</sup> 处出现的特征吸收峰是由—CH<sub>2</sub> 基的弯曲振动引起，而 1300、937、721 cm<sup>-1</sup> 处出现特征吸收峰则是由

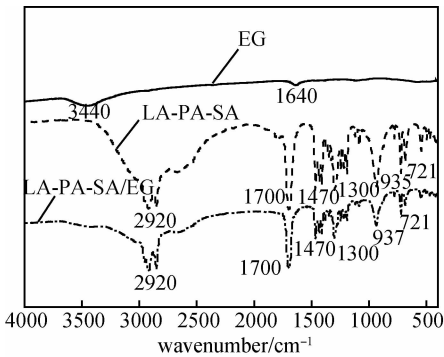
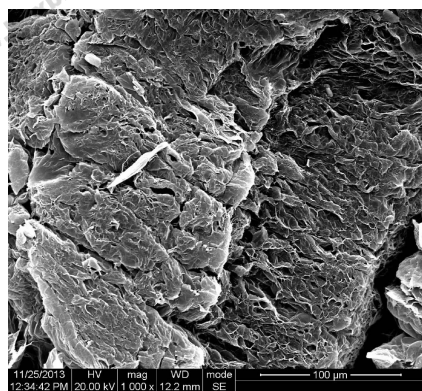


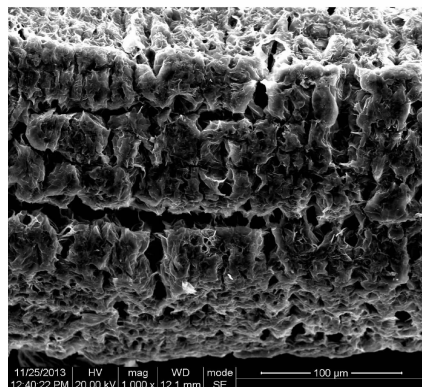
图 3 EG、LA-PA-SA、LA-PA-SA/EG 红外光谱图  
Fig. 3 FT-IR spectra of EG, LA-PA-SA and LA-PA-SA/EG

C—O 基、C—H 基引起。LA-PA-SA/EG 光谱曲线在 2920、1700、1640、1470、1300、935、721 cm<sup>-1</sup> 处也出现特征吸收峰。对比 3 种样品的 FT-IR 曲线可以发现，在 LA-PA-SA/EG 的 FT-IR 曲线上同时存在 LA-PA-SA 和 EG 的特征峰，且没有明显的吸收峰值出现或消失，由此可见，LA-PA-SA/EG 复合相变材料中 EG 与 LA-PA-SA 之间并没有发现反应发生，而是通过物理吸附相互作用。

图 4 (a)、(b) 分别为 EG、LA-PA-SA/EG 材料 SEM 图。从图 4 (a) 可看出 EG 为网状孔隙结构，由许多鳞片状的片层叠加而成，且片层端部有肋片状凸出，增加了其表面积，使相变材料的储存空间变大；孔隙的存在，降低了膨胀石墨的表面张力，从而使吸附过程更容易。从图 4 (b) 中可以看出，复合后 EG 仍然保持着网状结构，但其内部空隙被 LA-PA-SA 均匀填充。综合 FT-IR 和 SEM 结果可以发现，LA-PA-SA 通过与 EG 之间的毛细管和表面张力等物理作用而均匀分布于网状多孔结构中。



(a) EG



(a) LA-PA-SA/EG

图 4 EG、LA-PA-SA/EG 的扫描电镜图

Fig. 4 SEM micrographs of EG and LA-PA-SA/EG

## 2.4 LA-PA-SA/EG 复合相变材料的热性能

图 5 为 LA-PA-SA/EG 复合相变材料的 DSC 曲线,从图中可以看出 LA-PA-SA/EG 的熔化和凝固温度分别为 32.1℃ 和 30.3℃、熔化和凝固潜热分别为 143.2 J·g<sup>-1</sup> 和 143.1 J·g<sup>-1</sup>。对比 LA-PA-SA 的热性能可以发现,二者相变温度基本相等;另一方面,EG 对复合相变材料的相变潜热没有贡献,复合相变材料的相变潜热与其 LA-PA-SA 的含量呈正比关系,已知 LA-PA-SA 相变潜热值、复合相变材料中 LA-PA-SA 所占百分比,根据式 (2),计算得到复合相变材料的熔化和凝固潜热理论值为 142.1 J·g<sup>-1</sup> 和 141.2 J·g<sup>-1</sup>,对比 LA-PA-SA/EG 复合相变材料相变潜热的实际测量值和计算值发现,实际测量值和计算值非常接近,但稍微偏高,这一方面可能是由于 LA-PA-SA 与 EG 多孔表面间发生了表面作用,另一方面可能是由于 DSC 的测试误差。从以上测试结果可以看出,LA-PA-SA/EG 复合相变材料在太阳能利用、空调冷凝热回收、相变墙体等领域具有广泛的应用价值。

$$H_o = \eta H_m \quad (2)$$

式中,  $H_o$  为复合相变材料 LA-PA-SA/EG 的相变潜热值, J·g<sup>-1</sup>;  $H_m$  为 LA-PA-SA 的相变潜热值, J·g<sup>-1</sup>;  $\eta$  为复合相变材料中 LA-PA-SA 的质量分数,  $\eta = M_m/M_o$ 。(其中  $M_m$  为复合相变材料中 LA-PA-SA 的质量, g;  $M_o$  为复合相变材料 LA-PA-SA/EG 的质量, g)。

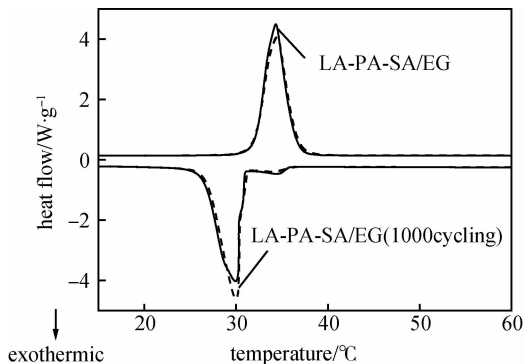


图 5 循环前后 LA-PA-SA/EG 的 DSC 图

Fig. 5 DSC curves of LA-PA-SA/EG before and after thermal cycles

## 2.5 LA-PA-SA/EG 复合相变材料的热稳定性

复合相变材料在经过长期蓄、放热后,必须仍能保持热性能和化学性能的稳定,以保证其使用寿命。本文对 LA-PA-SA/EG 复合相变材料进行了 1000 次加速冷热循环实验,观察循环前后复合相变材料的相变温度和相变潜热的变化。从图 5 中可以看出,在经过 1000 次冷热循环后 LA-PA-SA/EG 的熔化和凝固温度分别为 32.0℃ 和 30.5℃,熔化和凝固潜热分别为 143.0 J·g<sup>-1</sup> 和 142.3 J·g<sup>-1</sup>。对比发现,LA-PA-SA/EG 复合相变材料经历 1000 次冷热循环前后的熔化和凝固温度分别变化了 -0.1℃ 和 0.2℃,熔化和凝固潜热分别降低了 0.2 J·g<sup>-1</sup> 和 0.8 J·g<sup>-1</sup>。从这些结果中很容易看出,不论是 LA-PA-SA/EG 复合相变材料的相变温度,还是相变潜热,在经历多次冷热循环后并没有明显的变化,具有良好热稳定性。

图 6 为 LA-PA-SA/EG 复合相变材料加速冷热循环前后的红外光谱曲线。从图中可以看出,经过冷热循环后,LA-PA-SA/EG 的 FT-IR 曲线没有发生峰型的改变,具有良好的化学稳定性。综合以上测试结果发现,在经过 1000 次冷热循环后,LA-PA-SA/EG 复合相变材料具有较好的热稳定性和化学稳定性。

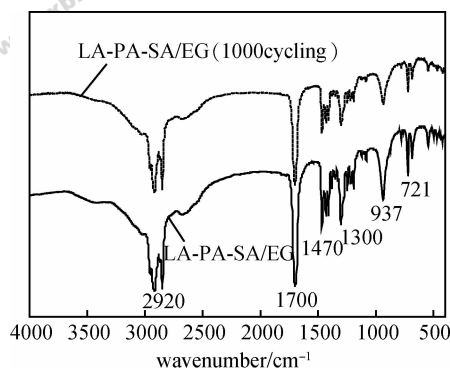


图 6 循环前后 LA-PA-SA/EG 红外光谱图

Fig. 6 FT-IR spectra of LA-PA-SA/EG composite PCM before and after thermal cycles

## 2.6 LA-PA-SA/EG 复合相变材料的蓄、放热性能

复合相变材料对能量的储存和释放速率是影响其应用的另一重要因素。图 7 为 LA-PA-SA 三元低共熔混合物和 LA-PA-SA/EG 复合相变材料蓄热、放热过程温度变化曲线, 从图 7 中可以看出, 整个蓄热过程, LA-PA-SA 从 12℃ 上升高至 45℃ 需要 30 min, 而 LA-PA-SA/EG 仅需要 10 min, 整体升温时间 LA-PA-SA/EG 比 LA-PA-SA 缩减了 67%; 相变材料温度在 28~33℃ 之间时, 此阶段为相变材料发生固-液相变过程阶段, LA-PA-SA 用时 20 min, 而 LA-PA-SA/EG 仅用 3 min。放热阶段, 从 45℃ 下降到 12℃, LA-PA-SA 和 LA-PA-SA/EG 分别用时 60 和 15 min; 固-液相变过程, LA-PA-SA 和 LA-PA-SA/EG 则分别用时 30 和 5 min。结果表明, 在蓄、放热过程中, LA-PA-SA/EG 复合相变材料热量的储存和释放速率较 LA-PA-SA 有很大提高, 这是由于支撑材料 EG 具有较高的导热性能, 促进了相变材料的蓄、放热速率。

## 3 结 论

(1) 制备了具有应用于太阳能利用、空调冷凝热回收及相变墙体等领域合适相变温度的月桂酸-棕榈酸-硬脂酸三元低共熔混合物 (LA-PA-SA)。

(2) 制备了具有最佳质量配比为 15:1 的 LA-PA-SA/EG 复合相变材料, 其熔化和凝固温度分别为 32.1℃ 和 30.3℃、熔化和凝固潜热分别为 143.2 J·g<sup>-1</sup> 和 143.1 J·g<sup>-1</sup>。

(3) LA-PA-SA 三元低共熔混合物通过表面张力和毛细管效应作用均匀分布于 EG 的网状多孔

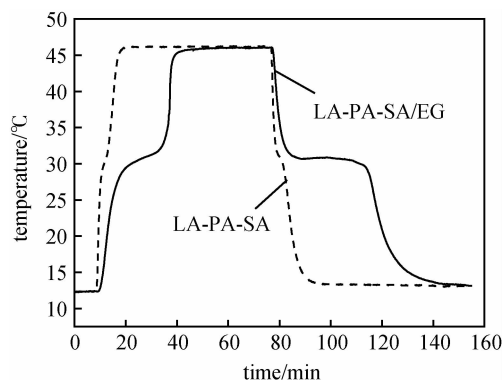


图 7 蓄、放热过程温度变化曲线

Fig. 7 Temperature curves of storage and release process

结构中。

(4) 加速冷热循环实验结果显示, LA-PA-SA/EG 复合相变材料具有很好的热稳定性和化学稳定性。

(5) EG 的加入有效提高了 LA-PA-SA/EG 复合相变材料对能量的储存和释放速率。

## References

- [1] Zhang Yinping (张寅平), Hu Hanping (胡汉平), Kong Xiangdong (孔祥冬). Phase Change Energy Storage Theory and Application (相变储能——理论和应用) [M]. Hefei: University of Science & Technology China Press, 1996
- [2] Li Haijian (李海建), Ji Zhijiang (冀志江), Wang Jing (王静), Xin Zhijun (辛志军). Research status of phase change composite materials [J]. *Materials Review* (材料导报), 2008, **22** (Z2): 248-251
- [3] Zhang Liang (张亮), Yan Hua (晏华), Yu Rongsheng (余荣升), Chen Shulian (陈淑莲), Zhang Jiang (张江). A review of phase change materials: development and application in building energy saving [J]. *Development and Application of Materials* (材料开发与应用), 2010, **25** (1): 69-72
- [4] Ahmet Sari, Kamil Kaygusuz. Some fatty acids used for latent heat storage: thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling [J]. *Renewable Energy*, 2003, **28**: 939-948
- [5] Hasnain S M. Review on sustainable thermal energy storage technologies (1): Heat storage materials and techniques [J]. *Energy Conversion and Management*, 1998, **39** (11): 1127-1138
- [6] Yuan Yanping (袁艳平), Bai Li (白力), Niu Ben (牛犇). Theoretic prediction of phase change temperature and latent heat of fatty acids eutectic mixture [J]. *Materials Review* (材料导报), 2010, **24** (2): 111-113
- [7] Ahmet Sari, Ali Karaiepli, Kamil Kaygusuz. Capric acid and stearic acid mixture impregnated with gypsum wallboard for low-temperature latent heat thermal energy storage [J].

- International Journal of Energy Research*, 2008, **32** (2): 154-160
- [8] Li Min, Kao Hongtao, Wu Zhishen, Tan Jinmiao. 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
- [9] Xie Wangping (谢望平), Wang Nan (汪南), Zhu Dongsheng (朱冬生), Wang Xianju (王先菊). Review of heat transfer enhancement of the PCMs [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2008, **27** (2): 190-196
- [10] Zhang Yinping, Ding Jianhong, Wang Xin, Yang Rui, Lin Kunping. Influence of additives on thermal conductivity of shape-stabilized phase change material [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, **90** (11): 1692-1702
- [11] Zhang Nan, Yuan Yanping, Wang Xi, Cao Xiaoling, Yang Xiaojiao, Hu Shuchun. Preparation and characterization of lauric-myristic-palmitic acidternary eutectic mixtures/expanded graphite composite phase changematerial for thermal energy storage [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **231**: 1214-219
- [12] Yang Xiaojiao, Yuan Yanping, Zhang Nan, Cao Xiaoling, Liu Cheng. Preparation and properties of myristic-palmitic-stearic acid/expanded graphite composites as phase change materials for energy storage [J]. *Solar Energy*, 2014, **99**: 259-266
- [13] Liu Cheng, Yuan Yanping, Zhang Nan, Cao Xiaoling, Yang Xiaojiao. A novel PCM of lauric-myristic-stearic acid/expanded graphite composite for thermal energy storage [J]. *Materials Letters*, 2014, **120**: 43-46
- [14] Yuan Yaguang, Yuan Yanping, Zhang Nan, Du Yanxia, Cao Xiaoling. Preparation and properties of myristic-palmitic-stearic acid/expanded graphite composites as phase change materials for energy storage [J]. *Materials Letters*, 2014, **125**: 154-157
- [15] Lv Shilei, Zhu Neng, Feng Guohui. Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage [J]. *Energy and Buildings*, 2006, **38** (6): 708-711