

正癸酸/十八醇二元相变材料的热性能研究

蒋达华, 杨昊天, 刘景滔, 徐玉珍

(江西理工大学土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 有机固液相变材料在相态变化时能够释放或吸收大量的潜热, 将其应用在建筑中能减少室内温度波动, 提升室内热舒适性, 降低建筑能耗。采用熔融共混法制备正癸酸(CA)/十八醇(OD)二元复合相变材料, 通过理论预测法与步冷曲线法确定二元低共熔混合物最佳质量配比为 $m_{\text{CA}} : m_{\text{OD}} = 85 : 15$ 。通过差示扫描量热法、蓄放热实验、热重分析、傅里叶红外光谱仪对 CA/OD 的热性能、循环热稳定性、耐热性及结构特征进行了分析。CA/OD 低共熔混合物的熔化和凝固温度分别为 27.95 和 25.42 °C, 熔化和凝固潜热分别为 154.2 J/g 和 157.0 J/g, 在 300 次蓄放热循环过程中热性能变化小, 热循环稳定性较好, 蓄热控温性能良好。热重分析表明 CA/OD 二元低共熔混合物在 125.7 °C 以下没有热失重现象, 耐热性能好。傅里叶变换红外光谱证实 CA 与 OD 是通过物理作用相结合, 二元低共熔混合物中没有新物质产生。综合结果表明, 该 CA/OD 二元复合相变材料适合在室温附近 24~30 °C 区间使用, 基本满足人体舒适温度范围, 在日常热环境下循环耐用性强, 为建筑节能材料提供了新的选择。

关键词: 正癸酸; 十八醇; 复合材料; 相变; 热性能

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)02-0168-06

引用格式: 蒋达华, 杨昊天, 刘景滔, 等. 正癸酸/十八醇二元相变材料的热性能研究[J]. 中国材料进展, 2023, 42(2): 168-173.

JIANG D H, YANG H T, LIU J T, *et al.* Thermal Properties of Capric Acid/Octadecanol Binary Phase Change Materials[J]. Materials China, 2023, 42(2): 168-173.

Thermal Properties of Capric Acid/Octadecanol Binary Phase Change Materials

JIANG Dahua, YANG Haotian, LIU Jingtao, XU Yuzhen

(School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Organic solid-liquid phase change material can release or absorb a lot of latent heat when its phase state changes. The application of phase change materials in buildings can reduce indoor temperature fluctuations, improve indoor thermal comfort and reduce building energy consumption. Binary phase change material of capric acid (CA) and octadecanol (OD) was prepared by melting blending method. The optimal mass ratio of eutectic mixture is determined as $m_{\text{CA}} : m_{\text{OD}} = 85 : 15$ by theoretical prediction and step cooling curve. Thermal properties, cycle thermal stability, heat resistance and structure characteristics of CA/OD composite were analyzed by differential scanning calorimetry, heat storage and release experiment, thermogravimetric analysis and Fourier infrared spectroscopy. The melting and solidification temperatures of CA/OD eutectic mixture are 27.95 and 25.42 °C, respectively, and the latent heat of melting and solidification are 154.2 and 157.0 J/g, respectively. Its thermal properties change little during 300 cycles of heat storage and release, and it has good thermal cycle stability, good heat storage and temperature control performance. Thermogravimetric analysis shows that the CA/OD binary eutectic mixture has no thermogravimetric phenomenon below 125.7 °C, and has good heat resistance. Fourier infrared spectroscopy analysis shows that CA and OD are combined by physical action, and no new substances are produced in the eutectic mixture. Comprehensive

analysis shows that the CA/OD binary composite phase change material is suitable for operation at 24~30 °C range of room temperature, meets the comfortable temperature range of human body basically, and has strong cycling durability under the daily thermal environment, which provides a new choice for building energy-saving materials.

Key words: capric acid; octadecanol; composite material; phase transition; thermal property

收稿日期: 2021-05-17 修回日期: 2021-07-10

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20192BAB206040); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ180459)

第一作者: 蒋达华, 男, 1977 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: dahuajustanyue@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202105019

1 前言

相变材料基于潜热储能能够以较小的体积空间提供高储热容量,储能密度大,并可在几乎恒定的温度下进行蓄热放热。相变材料的蓄放热恒温特性有利于增加室内外热阻,减小建筑物室内外温度变化幅度,降低空调系统的冷热负荷,达到节能和改善热舒适度的目的^[1-3]。

在现有的相变材料中,脂肪酸类和脂肪醇类相变材料具备相变潜热大、相转变过程体积变化小、无毒、无腐蚀、不易燃等优势^[4]。单一的脂肪醇或脂肪酸因其相变温度过高或过低不适合在室温条件下使用,这一缺点限制了脂肪醇类和脂肪酸类相变剂的发展^[5]。而脂肪醇类相变材料在结晶时又存在液-固、固-固两次相变过程,影响了使用效果。通常将脂肪酸与脂肪醇进行复合形成二元低共熔混合物,或者将几种脂肪酸混合形成二元或多元脂肪酸共熔混合物,或者将脂肪酸与石蜡共混制备出二元复合相变材料^[6]。采用熔融共混法制备的脂肪酸-脂肪醇二元复合相变材料基于脂肪酸-脂肪醇共晶效应可获得适宜的相变温度和较高的相变潜热。已有的二元相变材料研究涉及十二醇/脂肪酸体系^[7]、棕榈酸/十六醇^[8]、十四酸/十四醇^[9]、十六酸/十四醇^[10]、十六醇/癸酸或月桂酸或肉豆蔻酸^[11]、硬脂酸/十八醇^[12, 13]、肉豆蔻酸/十四醇^[14]、癸酸/十六醇^[15-17]、肉豆蔻酸/棕榈醇^[18]等等,上述研究结果表明,采用熔融法制备的脂肪酸/脂肪醇类二元体系具有最低共熔点,且相变温度与其中单一相变物质相比有所降低,增强了二元相变材料在建筑节能领域的应用性。本文以正癸酸(CA)、十八醇(OD)为原料,采用熔融法制备二元共熔混合物,利用理论计算和步冷曲线法确定 CA/OD 二元共熔混合物最低共熔点(二元低共熔混合物)的质量配比和共晶温度,并研究了热物性能。

2 实验材料与方法

2.1 材料及制备

正癸酸(CA),化学纯,上海麦克林生化科技有限公司;1-十八醇(OD),化学纯,国药集团化学试剂有限公司。分别称取一定量的 CA 和 OD 置于烧杯中,密封烧杯口后在 80 ℃ 恒温干燥箱中加热融化混合物,用恒温水浴磁力搅拌器搅拌 30 min,使混合均匀,再将搅拌均匀的材料置于试管中,自然冷却至室温,得到不同质量比的 CA/OD 二元共熔混合物。

2.2 测试与表征

(1)步冷曲线测试。测试前,先将恒温水浴锅和恒温恒湿培养箱温度分别设置为 70 和 10 ℃ 并保持恒定。

将装有相变材料的试管置于 70 ℃ 水浴锅中,待试管中相变材料完全融化后把热电阻测温导线穿过橡胶试管塞塞入相变材料中,塞紧试管塞并使热电阻金属端完全浸没在相变材料液面下并尽量处于中心位置,且确保热电阻不接触试管壁。接着,当相变材料温度稳定在 70 ℃ 时立即从水浴锅中取出试管,放入 10 ℃ 恒温恒湿培养箱中,使相变材料冷却结晶。采用温度巡检仪间隔 1 s 记录相变材料的温度数据,直至其温度恒定不变,根据相变材料降温过程中随时间变化的温度数据绘制步冷曲线。通过相变材料的步冷曲线观察材料冷却结晶过程,读取结晶温度,根据测得的不同质量配比的 CA/OD 二元共熔混合物的结晶温度绘制相图,确定 CA/OD 二元共熔混合物的最低共熔点及质量配比。

(2)蓄放热特性测试。称取 10 g CA/OD 试样置于玻璃试管中,用带有热电阻导线的试管塞塞紧后置于 10 ℃ 低温培养箱中,待试样温度降至 10 ℃ 后立即放入 45 ℃ 恒温干燥箱中,进行吸热实验;当试样温度不再升高后,再将试管迅速置于 10 ℃ 低温培养箱中,进行放热实验。采用温度巡检仪间隔 1 s 记录整个蓄、放热周期样品温度变化情况,并绘制出温度-时间曲线。根据 CA/OD 二元低共熔混合物在整个吸、放热过程中的温度变化情况,分析相变材料的蓄、放热特性。

(3)热性能及结构表征。采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)对 CA/OD 的热物性能进行测试,测试前,先对设备系统进行校正和预热;取 1~10 mg 样品进行测试,实验参数设置为:氮气氛围,流量为 50 mL/min,升温范围 10~80 ℃,降温范围 80~10 ℃,升降温速率 5 ℃/min。利用热重分析法(thermogravimetry, TG)测试样品的失重温度和失重区间。利用 Spectrum 200 傅里叶变换红外(Fourier transform infrared, FTIR)光谱仪对 CA、OD 及二元低共熔混合物进行官能团结构分析,设置扫描范围为 4000~600 cm⁻¹,分辨率 4 cm⁻¹。

3 结果与讨论

3.1 CA/OD 二元体系低共熔点温度与组成

根据热力学第二定律和相平衡理论^[19, 20],推导出二元共晶物达到平衡后的液相线的表达式(式(1)),可解出二元复合相变材料的最低共熔点温度及各组分物质的量分数。

$$\begin{cases} T_m = 1 / (1/T_A - R \ln X_A / H_A) \\ T_m = 1 / (1/T_B - R \ln X_B / H_B) \\ X_A + X_B = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_A 、 T_B 、 T_m 分别为相变材料 A、B 及二元共晶的熔点温度(K); H_A 、 H_B 、 H_m 分别为相变材料 A、B 及二

元共晶物的熔化相变潜热 (J/mol); X_A 、 X_B 分别为相变材料 A、B 在二元共晶物中所占的物质的量分数, 两者之和为 1; R 为气体常数, 为 $8.315 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

确定 CA、OD 的相变温度分别为 31.02 和 57.8°C , 分子量分别是 172.26 和 270.49 g/mol , 确定相变潜热分别是 141.67 和 215.59 J/g , 代入式(1)后得到 CA/OD 二元共晶物的液相线表达式(式(2)):

$$T_m = 1 / (1/304.17 - 8.315 \times \ln X_A / 24404.0742)$$

$$T_m = 1 / (1/330.95 - 8.315 \times \ln X_B / 58314.9391) \quad (2)$$

$$X_A + X_B = 1$$

利用式(2)绘制理论平衡相图, 确定理论共晶点对应成分, 如图 1 所示。可以看出, CA/OD 二元共熔混合物的理论最低共熔点为 300.35 K , 即 27.2°C , 此时 CA 与 OD 的物质的量比为 $88.45:11.55$, 即最低共熔点理论质量分数配比为 $83\% \text{CA}:17\% \text{OD}$ 。

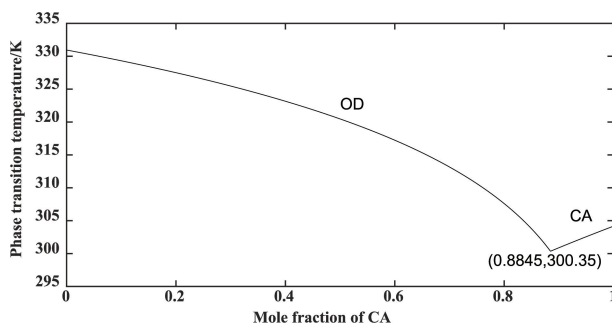


图 1 不同 CA 物质的量分数的 CA/OD 二元体系理论相图

Fig. 1 Theoretical phase diagram of CA/OD binary system with different CA mole fraction

纯相变材料 CA 和 OD 的降温过程步冷曲线如图 2 所示, CA 和 OD 在降温过程中均发生了相变, 结晶温度分别为 30.8 和 57.2°C 。CA 质量分数分别为 20% , 40% , 60% , 80% , 85% , 90% 和 95% 的 CA/OD 混合物的降温过程步冷曲线如图 3 所示, 随着 CA 质量分数的增加,

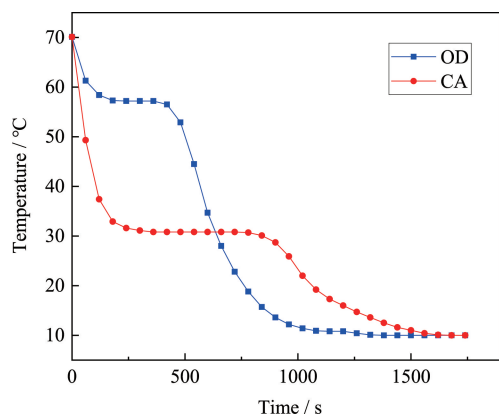


图 2 CA 与 OD 纯物质的步冷曲线

Fig. 2 Step cooling curves of CA and OD pure substances

CA/OD 二元共熔混合物结晶温度不断降低, 当 CA 质量分数在 $80\% \sim 90\%$ 区间时结晶温度达到最低, 当 CA 质量分数高于 90% 后结晶温度升高。因而, 可以确定 CA/OD 二元低共熔体系质量分数配比处于 $8:2 \sim 9:1$ 之间。

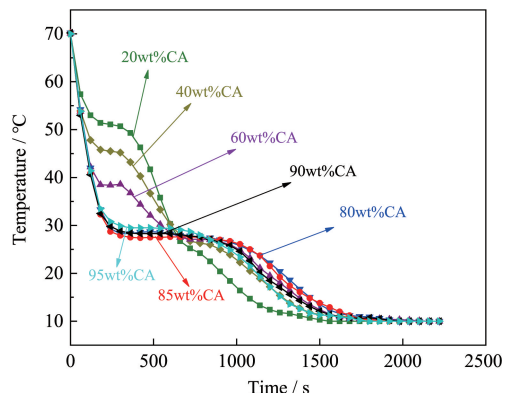


图 3 不同 CA 质量分数的 CA/OD 二元体系步冷曲线

Fig. 3 Step cooling curves of CA/OD binary systems with different CA mass fraction

图 4 是预测的低共熔点附近的组分比例的不同 CA/OD 二元共熔混合物降温过程的步冷曲线, CA 质量分数在 $81\% \sim 89\%$ 区间时, 结晶温度随 CA 含量增加先降低后升高, 当 CA 比例达到 85% 时结晶温度达到最低的 27.6°C 。根据不同质量配比下 CA/OD 的结晶温度及 CA 质量分数在 $80\% \sim 90\%$ 内时相变平台的温度波动值确定不同质量分数的二元共熔混合物的过冷度, 绘制 CA/OD 二元共熔混合物相图及过冷度情况, 如图 5 和图 6 所示。

从图 5 中可以看到, 随着 CA 质量分数的增加, CA/OD 的结晶温度先减小后增大, 当 CA 的质量分数为 85% 时, CA/OD 二元共熔混合物的结晶温度达到最低值 27.6°C , 结合对 CA 质量分数为 84% , 85% 和 86% 的 CA/OD 二元共熔混合物的 DSC 测试分析(图 7)可以确定, CA/OD 二元共熔混合物达到实际最低共熔点质量分

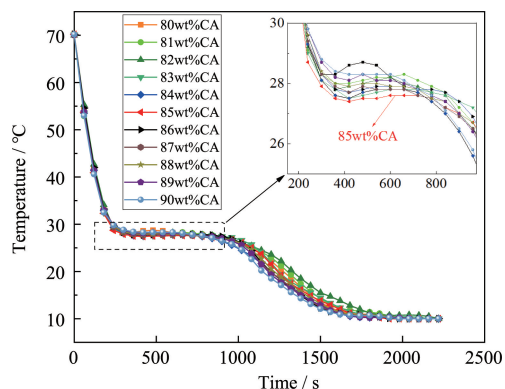


图 4 CA 质量分数在 $80\% \sim 90\%$ 时的 CA/OD 二元体系步冷曲线

Fig. 4 Step cooling curves of CA/OD binary systems with CA mass fraction of $80\% \sim 90\%$

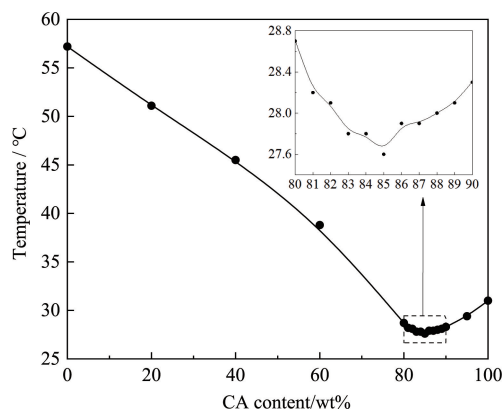


图5 CA/OD 二元体系相图

Fig. 5 Phase diagram of CA/OD binary system

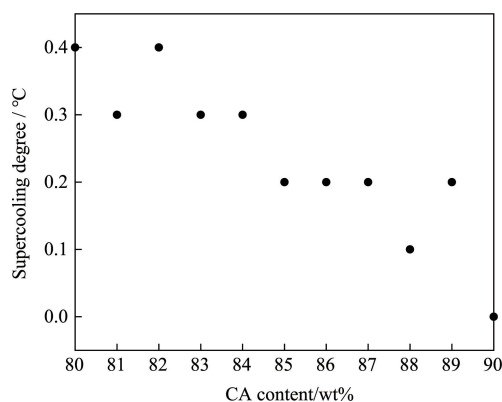


图6 CA/OD 二元体系过冷度

Fig. 6 Super-cooling degree of CA/OD binary system

数比例为 85%CA : 15%OD。实验确定的 CA/OD 二元最低共熔点混合物质量分数配比与理论预测值仅相差 2%，结果吻合度高。

从图 6 中可知，CA/OD 二元共熔混合物中 CA 质量分数达到 80% 后出现过冷，但最高不超过 0.4 °C。随着二元体系组分配比趋于最佳质量比，过冷度呈下降趋势，CA 质量分数为 85% 的 CA/OD 二元共熔混合物过冷度仅为 0.2 °C，表明其成核能力能较好地满足了实际应用要求。

3.2 CA/OD 二元低共熔混合物的热物性分析

对 CA/OD 低共熔混合物进行 DSC 测试，结果如图 7，其中 T_m 表示熔化温度， T_f 表示凝固温度， H_m 表示熔化潜热， H_f 表示凝固潜热。CA/OD 二元低共熔混合物的相变熔化温度为 27.95 °C，与理论最低共熔温度、步冷曲线结晶温度分别相差 0.75 和 0.35 °C，吻合程度高，并且这一温度处于建筑节能领域所需要的温度区间，说明 CA 和 OD 通过共晶效应获得了适宜的相变温度。同时，CA/OD 二元低共熔混合物的相变潜热为 154.2 J/g，具有良好的储热性能，可以应用于建筑节能领域。

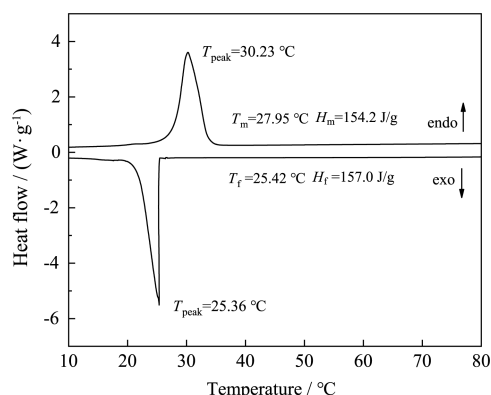


图7 CA/OD 低共熔混合物的差示扫描量热 (differential scanning calorimetry, DSC) 曲线

Fig. 7 DSC curve of CA/OD eutectic mixture

如图 3 所示，当 CA/OD 二元共熔混合物中 OD 质量分数高于 20% 时，其步冷曲线中会出现两次“相变温度平台”，表明样品凝固过程中发生了与 OD 类似的多次相变；当 OD 质量分数低于 20% 时，CA/OD 二元共熔混合物步冷曲线中只出现一次“相变温度平台”，且 DSC 曲线也只出现一个放热峰，二次相变现象消失。这种现象表明，将 CA 与 OD 以合适的比例复合后可以消除 OD 组分的多次相变问题，增强应用性。

3.3 CA/OD 二元低共熔混合物的蓄放热特性分析

测试了蓄放热实验时 CA/OD 二元低共熔混合物在升、降温整个过程中的温度变化，绘制温度-时间曲线如图 8 所示。

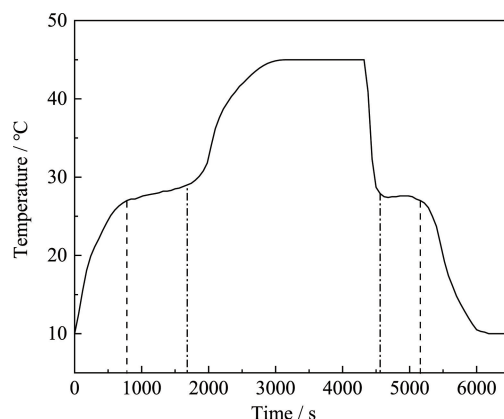


图8 CA/OD 低共熔混合物蓄热/放热时的温度变化曲线

Fig. 8 Temperature variation curve in heat storage/release of CA/OD eutectic mixture

由图 8 可知，CA/OD 低共熔混合物从 10 °C 升高至 45 °C 过程中温度先急速升高，升至 27 °C 左右升温速率明显减缓，继续升至 30 °C 以上时升温速率再次加快，直到与环境温度趋于一致，这说明 CA/OD 的升温过程经历了固态显热吸热→潜热吸热→液态显热吸热→趋于恒定

这 4 个过程, 整个升温过程持续时间为 3180 s。在 27~29 °C 温度区间内持续时间为 900 s, 该温度区间与 CA/OD 低共熔混合物相变温度相吻合, 表明在该温度区间发生了固-液相变。放热阶段温度变化也呈现出与吸热阶段一致的规律, CA/OD 二元低共熔混合物经历了液态显热放热→潜热放热→固态显热放热→趋于恒温这 4 个阶段。CA/OD 低共熔混合物从 45 降低至 10 °C 持续时间为 1860 s, 在 27~28 °C 温度范围内降温速率变缓且持续了 600 s, 该温度区间与 CA/OD 低共熔混合物的结晶温度一致, 表明 CA/OD 发生了液-固相变。可以看出, 所制备的 CA/OD 二元低共熔混合物具有较好的相变储热调温性能, 可作为相变调温材料应用于建筑中。

3.4 CA/OD 二元低共熔混合物的耐热性分析

采用 TG 分析表征 CA/OD 二元低共熔混合物的耐热性, 测试结果如图 9。可以看到, CA/OD 二元低共熔混合物在整个升温过程中产生了一个失重峰, 这是由于有机相变材料在高温下分解生成 CO_2 和 H_2O ; 材料从 125.7 °C 开始失重, 到 203.2 °C 时失重速率达到最快, 当温度达到 288 °C 后完全失重, 失重率为 100%, 这说明在高温下 CA/OD 会完全分解。实际建筑使用环境中不可能达到这么高的使用温度, 可见 CA/OD 二元低共熔混合物适合作为相变储热材料用于建筑领域, 在工作温度内 (<125.7 °C) 拥有良好的耐热性。

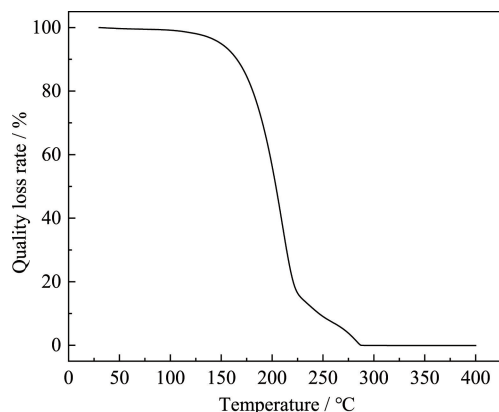


图 9 CA/OD 低共熔混合物的热重 (thermogravimetry, TG) 曲线

Fig. 9 TG curve of CA/OD eutectic mixture

3.5 CA/OD 二元低共熔混合物的热循环稳定性分析

热循环稳定性能对相变材料的实际应用至关重要, 因为在实际使用中, 相变材料需要不断循环吸热熔化和放热结晶。表 1 列出了 CA/OD 二元低共熔混合物经过上百次蓄放热循环后, 通过 DSC 测试得到的相变熔化和相变潜热。表 1 显示, 经 300 次蓄放热循环后 CA/OD 低共熔混合物的相变温度为 28.13 °C, 与循环前的 27.95 °C 偏差值为 0.18 °C, 相变焓值为 125.16 J/g,

降低了 29.04 J/g, 具有蓄热效果, 表明 CA/OD 二元低共熔混合物热循环稳定性较好。

表 1 CA/OD 低共熔混合物多次蓄放热循环后的热性能

Table 1 Thermal properties of CA/OD eutectic mixture after different heat storage/release cycles

Number of cycles	Phase transition temperature/°C	Enthalpy of phase transition/(J · g ⁻¹)
0	27.95	154.20
50	28.32	142.76
100	28.14	140.36
200	27.91	133.86
300	28.13	125.16

3.6 CA/OD 二元低共熔混合物的结构分析

CA、OD 及 CA/OD 二元低共熔混合物的 FT-IR 谱如图 10 所示。可以看出, CA 的 FT-IR 谱在 2910 和 2843 cm^{-1} 处分别出现了 C—H 不对称伸缩振动吸收峰和—CH₂ 对称伸缩振动吸收峰, 在 1689 cm^{-1} 出现的特征吸收峰是由 C=O 的伸缩振动引起的, 在 1459, 1294 和 1073 cm^{-1} 分别出现了—OH 弯曲振动吸收峰、C—O 伸缩振动吸收峰和 C=O 伸缩振动吸收峰, 在 937 和 720 cm^{-1} 出现的特征吸收峰是由—OH 的面外及面内弯曲振动产生。在 OD 的 FT-IR 谱中, 在 2909, 2843, 1459, 1062, 718 cm^{-1} 分别出现了 C—H 不对称伸缩振动吸收峰、—CH₂ 对称伸缩振动吸收峰、—OH 弯曲振动吸收峰、C=O 伸缩振动吸收峰、—OH 面内弯曲振动吸收峰。观察 CA/OD 二元低共熔混合物的 FT-IR 谱形和特征峰发现, 所有特征峰均与 CA、OD 的 FT-IR 谱中的一致, 未见新的特征峰产生, 证明 CA 与 OD 之间的共晶效应只是简单的分子力作用, 没有发生化学反应产生新的物质。

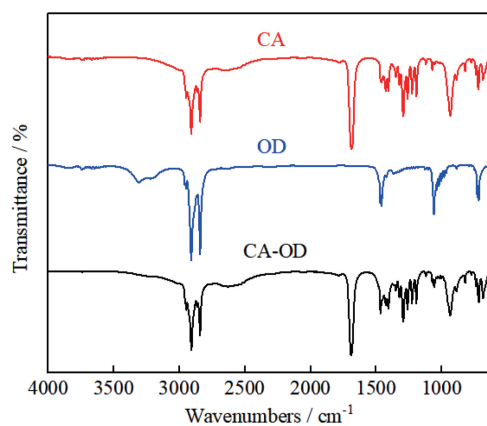


图 10 CA、OD 及 CA/OD 低共熔混合物的 FT-IR 谱

Fig. 10 FT-IR spectra of CA, OD and CA/OD eutectic mixture

4 结 论

(1)采用熔融共混法制备了CA/OD二元低共熔混合物,两个组分通过分子间作用力结合在一起,未发生化学反应,制备工艺简单。复合材料降低了单一相变物质的相变温度,拓宽了相变材料的应用范围,适合在室温状态下使用,为建筑节能材料提供了新的选择。

(2)通过理论预测和步冷曲线测试共同确定了CA/OD二元低共熔混合物的最佳质量配比为85:15,低共熔混合物的相变温度为27.95℃,相变熔化潜热为154.2 J/g,具有较高的相变潜热,蓄热控温效果良好,满足人体舒适温度范围。

(3)CA/OD二元低共熔混合物在温度低于125.7℃时没有热失重现象,有较强的耐热性。在10/45℃热环境条件下进行300次蓄放热循环实验,相变温度最大偏差为0.37℃,相变焓值略有降低,能发挥蓄热控温作用,表明复合材料热稳定性较好,耐用性强,能够基本满足在日常环境下的使用要求。

参考文献 References

- [1] PASUPATHY A, VELRAJ R, SEENIRAJ R V. Renewable and Sustainable Energy Reviews[J], 2008, 12(1): 39-64.
- [2] 颀江龙, 魏霞. 现代化工[J], 2019, 39(11): 48-52.
JIE J L, WEI X. Modern Chemical Industry[J], 2019, 39(11): 48-52.
- [3] ZHOU D, ZHAO C Y, TIAN Y. Applied Energy[J], 2012, 92(4): 593-605.
- [4] ROZANNA D, CHUAH T G, SALMIAH A, et al. International Journal of Green Energy[J], 2005, 1(4): 495-513.
- [5] 曲美洁. 脂肪醇-脂肪酸室温相变材料的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
QU M J. Preparation and Study on Fatty Alcohol-Fatty Acid Phase Change Material for Indoor Temperature[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [6] 顾庆军, 费华, 王林雅, 等. 化工进展[J], 2019, 38(6): 2825-2834.
GU Q J, FEI H, WANG L Y, et al. Chemical Industry and Engineering Progress[J], 2019, 38(6): 2825-2834.
- [7] 李志广, 黄红军, 张敏, 等. 化工新型材料[J], 2007, 35(11): 55-56.
LI Z G, HUANG H J, ZHANG M, et al. New Chemical Materials[J], 2007, 35(11): 55-56.
- [8] 马烽, 秦岩, 陆丰艳, 等. 材料工程[J], 2014(10): 71-74.
MA F, QIN Y, LU F Y, et al. Journal of Materials Engineering[J], 2014(10): 71-74.
- [9] 蔡伟, 孙志高, 马鸿凯, 等. 太阳能学报[J], 2017, 38(9): 2493-2497.
CAI W, SUN Z G, MA H K, et al. Acta Energetica Solaris Sinica[J], 2017, 38(9): 2493-2497.
- [10] 蒋达华, 张鑫林, 廖绍璠, 等. 现代化工[J], 2019, 39(10): 146-149.
JIANG D H, ZHANG X L, LIAO S F, et al. Modern Chemical Industry[J], 2019, 39(10): 146-149.
- [11] 仇影. 二元有机/层状多孔基复合相变材料的制备与性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
QIU Y. Study on Preparation and Properties of Binary Organic/Layered Porous-Based Phase Change Composite Materials[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013.
- [12] 刘旻瑞, 孙志高, 李成浩, 等. 太阳能学报[J], 2019, 40(6): 1553-1559.
LIU M R, SUN Z G, LI C H, et al. Acta Energetica Solaris Sinica[J], 2019, 40(6): 1553-1559.
- [13] 陈之帆, 孙志高, 汤小蒙, 等. 化工进展[J], 2019, 38(4): 1833-1838.
CHEN Z F, SUN Z G, TANG X M, et al. Chemical Industry and Engineering Progress[J], 2019, 38(4): 1833-1838.
- [14] 刘晓, 孙志高, 陈之帆, 等. 化工新型材料[J], 2019, 47(8): 131-134.
LIU X, SUN Z G, CHEN Z F, et al. New Chemical Materials[J], 2019, 47(8): 131-134.
- [15] 吴其胜, 仇影, 黎水平, 等. 建筑材料学报[J], 2014, 17(1): 84-88.
WU Q S, QIU Y, LI S P, et al. Journal of Building Materials[J], 2014, 17(1): 84-88.
- [16] 林性水, 李湘祁, 魏海婷. 新型建筑材料[J], 2016(2): 39-42.
LIN X S, LI X Q, WEI H T. New Building Materials[J], 2016(2): 39-42.
- [17] 顾庆军, 费华, 王林雅, 等. 化工进展[J], 2019, 38(11): 5033-5039.
GU Q J, FEI H, WANG L Y, et al. Chemical Industry and Engineering Progress[J], 2019, 38(11): 5033-5039.
- [18] 李蛟龙, 任子真, 李贵强. 沈阳化工大学学报[J], 2020(3): 236-238.
LI J L, REN Z Z, LI G Q. Journal of Shenyang University of Chemical Technology[J], 2020(3): 236-238.
- [19] ZHANG Y P, JIANG Y. Measurement Science and Technology[J], 1999, 10(3): 201-205.
- [20] ZHAO P, YUE Q, HE H, et al. Applied Energy[J], 2014, 115(4): 483-490.

(编辑 惠 琼)