

硅胶废料复合相变材料的合成及控温性能

解卓学^{1,2}, 寇艳², 史全², 田颖¹

(1. 大连交通大学材料科学与工程学院, 大连 116028;

2. 中国科学院大连化学物理研究所热化学实验室, 大连 116023)

摘要 将采用硅胶废料(SGW)制备的多孔二氧化硅(PSD)作为载体, 以癸酸-十六醇(DA-HD)作为基础相变材料, 制备了复合相变材料癸酸-十六醇/多孔二氧化硅(PSD-DA-HD), 并引入膨胀石墨(EG)来增强其导热能力. 采用差示扫描量热法(DSC)、热重分析法(TGA)和热常数分析法对复合相变材料的热性能进行了评价. 将复合相变材料与水泥石浆按比例进行共混, 形成相变砂浆, 研究了相变砂浆在模拟应用实验中的控温能力. 结果表明, DA-HD通过物理作用被包裹在PSD孔隙中, 负载能力可达61.7%, 其焓值为105.6 J/g, 负载后的PSD-DA-HD复合相变材料具有定型性. 膨胀石墨的引入可使PSD/EG-DA-HD复合相变材料的导热系数增至0.9513 W/(m·K), 但其负载能力降至49.5%, 焓值变为88.1 J/g. PSD-DA-HD和PSD/EG-DA-HD的最高工作温度为92.2 °C, 在该温度以下可确保材料具有热稳定性. 将PSD-DA-HD和PSD/EG-DA-HD分别与水泥砂浆进行共混, 制成的相变砂浆C-PSD-DA-HD和C-PSD/EG-DA-HD均具有良好的储热控温特性, 在18~32 °C范围内分别可维持12.7和6.7 min. 在模拟实验中, 与没有相变材料的空白组相比, 含有PSD-DA-HD的相变砂浆在18~32 °C范围内的控温时间增加了267.92%.

关键词 相变材料; 复合材料; 硅胶废料; 控温; 相变砂浆

中图分类号 O614; TB34; TU5

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240372

Synthesis and Temperature Control Performance of Silica Gel Waste Composite Phase Change Materials

XIE Zhuoxue^{1,2}, KOU Yan², SHI Quan², TIAN Ying^{1*}

(1. College of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University,

Dalian 116028, China;

2. Thermochemistry Laboratory, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences,

Dalian 116023, China)

Abstract In this study, silica gel waste (SGW) was utilized to prepare porous silicon dioxide (PSD) as a carrier, combined with capric acid-hexadecyl alcohol (DA-HD) as the base phase change material (PCM), to develop the composite PCM capric acid-hexadecyl alcohol/porous silicon dioxide (PSD-DA-HD). Expanded graphite (EG) was introduced to enhance the thermal conductivity of the material. The thermal performance of the composite PCM was evaluated using differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), and thermal constant analysis. The composite PCM was then blended with cement mortar to form phase change mortar, and its temperature regulation capability was studied in simulated application experiments. The results indicate that DA-HD is physically

收稿日期: 2024-07-30. 网络首发日期: 2024-11-18.

联系人简介: 田颖, 女, 博士, 教授, 主要从事储能材料方面的研究与应用. E-mail: greenhusk@126.com

基金项目: 辽宁省教育厅项目(批准号: JDL2017035, 201802011)和国家自然科学基金(批准号: 51078050, 21273025)资助.

Supported by the Liaoning Provincial Education Department Project, China (Nos. JDL2017035, 201802011) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 51078050, 21273025).

encapsulated within the pores of PSD, achieving a loading capacity of 61.7%, with an enthalpy value of 105.6 J/g. The PSD-DA-HD composite PCM demonstrates good shape stability. The introduction of expanded graphite increased the thermal conductivity of the PSD/EG-DA-HD composite PCM to $0.9513 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ but reduced its loading capacity to 49.5%, with an enthalpy value of 88.1 J/g. Both PSD-DA-HD and PSD/EG-DA-HD exhibit a maximum working temperature of $92.2 \text{ }^\circ\text{C}$, ensuring thermal stability below this threshold. When PSD-DA-HD and PSD/EG-DA-HD were mixed with cement mortar, the resulting phase change mortars displayed excellent heat storage and temperature regulation properties. The phase change mortars C-PSD-DA-HD and C-PSD/EG-DA-HD maintained stable temperatures for 12.7 and 6.7 min, respectively, within the temperature range of $18\text{--}32 \text{ }^\circ\text{C}$. In the simulation experiments, the phase change mortar containing PSD-DA-HD extended the temperature regulation duration by 267.92% compared to the control group without PCMs in the same temperature range.

Keywords Phase change material; Composite material; Silica gel waste; Temperature control; Phase change mortar

相变材料(PCM)是一种绿色节能的材料,通过固液可逆相变能够吸收或释放大量的潜热.因此,相变材料被广泛应用于储能系统中.将相变材料添加到建筑物的墙壁、天花板和地板中可以减小室内温度的波动,提高人体的舒适度,并减少建筑物的能耗^[1-9].自20世纪70年代以来,许多研究人员致力于将相变材料应用于建筑领域,以改善轻质建筑的热舒适性.其中,多数是在建筑材料中引入形态稳定的相变材料,该类相变材料由多孔材料负载传统的固液相变物质制备^[10].在多孔材料中,轻质骨料和多孔粉末被视为混凝土中负载相变材料介质的理想选择^[11].矿渣、膨胀粘土、膨胀珍珠岩和膨胀蛭石等多种轻质骨料在混凝土中作为相变材料载体表现出良好的性能^[12-15].

硅胶废料在许多工业过程中产生,且由于其化学稳定性和难以降解的特性,处理这些废料成为一个环保和经济上的挑战.为了有效利用这些废料,一种可行的方法是通过化学合成将硅胶废料转化为二氧化硅.二氧化硅具有价格低廉、高度化学和物理稳定性、阻燃性及相对较高的导热性等优点^[11].它既可以作为形态稳定相变材料的外壳材料^[16],也可以作为支撑材料^[17].目前,二氧化硅作为相变材料的载体被广泛应用于研究之中,用以解决相变过程中的泄漏问题.然而,在目前的研究中,二氧化硅载体通常使用高成本的化学试剂(如正硅酸乙酯等^[18-20]),不仅昂贵,还有一定的毒性、化学腐蚀性和环境危害性.此外,使用此类试剂制备二氧化硅载体的工艺相对复杂,因此,不适用于大规模的生产和实际应用^[21].

本文采用硅胶废料作为二氧化硅的合成原料,通过溶胶-凝胶法制备了多孔二氧化硅载体.然后,通过真空浸渍法将二元有机相变材料负载到二氧化硅载体中制得复合相变材料,并通过引入膨胀石墨改善复合相变材料的导热能力.再将复合相变材料与水泥砂浆混合,制备得到相变砂浆,对其导热性能以及其控温性能进行了研究.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

正癸酸(DA,纯度99%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;十六醇(HD,纯度99%),上海迈瑞尔化学技术有限公司;硅胶废料(Silica gel waste, SGW,工业级),河北唐山硅胶生产企业;膨胀石墨(EG,膨胀温度: $900 \text{ }^\circ\text{C}$),北京蓝木科技有限公司;氢氧化钠(NaOH),分析纯,国药集团化学试剂有限公司;醋酸,分析纯,西陇科学股份有限公司.

X'pert Pro⁻¹型X射线衍射仪(XRD,射线源为Cu $K\alpha$,电压为40 kV,电流为40 mA,扫描范围为 $5^\circ\text{--}90^\circ$,扫描时长为6 min),荷兰帕纳科公司;JSM-7800F型扫描电子显微镜(SEM),日本电子株式会社;Discovery DSC型差示扫描量热仪(DSC),美国TA公司;Setsys 16/18型热重分析仪(TG),法国赛塔拉姆仪器公司;Hot Disk TPS2500S型热常数分析仪,瑞典Hot Disk公司;SDJ201型高低温交变湿热试验箱,上海建恒仪器有限公司;34970A型数据采集装置,美国安捷伦科技有限公司;704050型温湿度

智能监控宝, 深圳市品诺能源有限公司.

1.2 实验过程

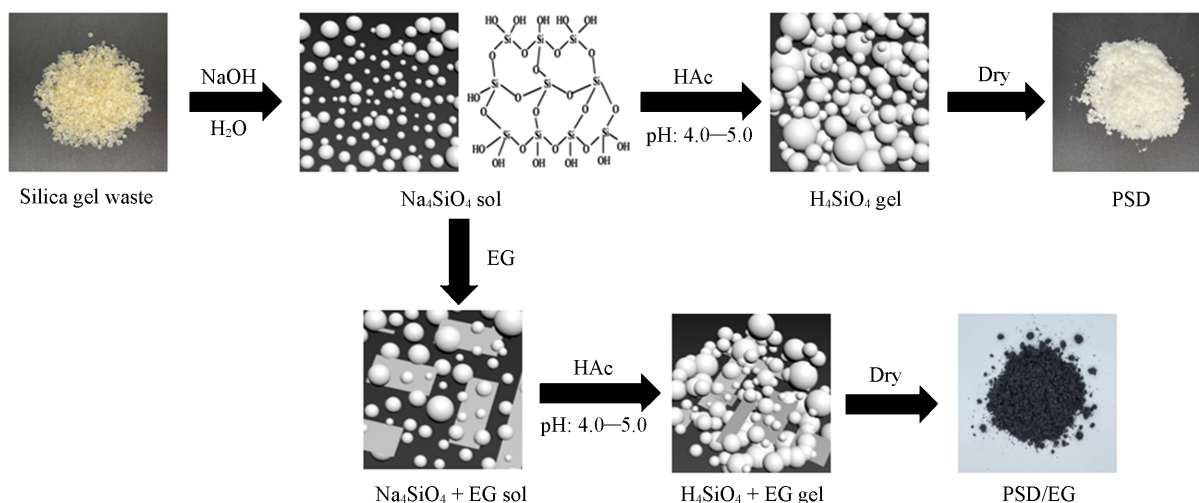
1.2.1 二元有机相变材料的制备 为了满足人体对舒适温度的要求, 选择了脂肪酸中 DA 和脂肪醇中的 HD 为原材料. 依据二元低共熔混合物共晶理论, 通过液相线方程制备介于低共熔点下的二元共晶相变材料^[22],

$$\ln X_i = \frac{H_i}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_m} \right) \quad (1)$$

式中: T_m (K)为共晶体系的相变共熔点(相变温度); X_i , T_i (K)和 H_i (kJ/mol)分别为共晶混合物中第 i 种组分的摩尔分数、熔化温度和熔化潜热; R (8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹)为气体常数.

将 DA(相变温度为 30.7 °C, 焓值为 170.9 J/g)和 HD(相变温度为 48.9 °C, 焓值为 240.8 J/g)相应的热物性参数代入液相线中, 确定癸酸与十六醇的摩尔比约为 4:1. 按此比例准确称量两种原料, 在 60 °C 下混合加热 30 min, 并均匀搅拌, 制备得到二元相变材料(DA-HD).

1.2.2 硅胶废料及复合相变材料的制备 参照文献^[23]方法, 采用溶胶-凝胶法将 SGW 制备成多孔二氧化硅, 其过程见 Scheme 1. 首先, 将 6 g 硅胶废料加入 60 mL 6 mol/L 的氢氧化钠溶液中. 在磁力搅拌的作用下, 硅胶废料溶解, 形成透明的溶液, 过滤除去少量不溶物杂质, 得到 Na₄SiO₄ 溶胶. 随后, 使用醋酸调整溶胶的 pH 值至 4.0~5.0, 并继续磁力搅拌 1 h, 直至形成白色的 H₄SiO₄ 凝胶. 将凝胶经过抽滤后, 用蒸馏水多次冲洗以去除多余的醋酸, 然后在 80 °C 烘箱中烘干 12 h, 最终制备得到多孔二氧化硅支撑载体(Porous silicon dioxide, PSD). 为了进一步提升载体的导热性能, 将 EG 通过超声的手段分散到 Na₄SiO₄ 明胶中, 然后通过凝胶、干燥等方法获得 PSD/EG 的复合支撑载体材料.



Scheme 1 Flow chart of preparing porous silicon dioxide from silica gel waste

将 PSD 和 PSD/EG 分别放入两个烧杯中, 并按质量比 1:10 分别加入 DA-HD, 搅拌混合. 最后, 将烧杯置于真空恒温干燥箱中, 在 80 °C 和 -0.1 MPa 条件下进行真空吸附 3 h. 之后, 将样品取出置于滤纸上进行多次泄漏实验, 直至滤纸上无泄漏痕迹为止. 最后即得到 PSD-DA-HD 和 PSD/EG-DA-HD 复合相变材料.

1.2.3 相变砂浆的制备 采用普通硅酸盐水泥作为基础材料, 将硅酸盐水泥、复合相变材料和水以质量比 2:1:1 混合, 并通过机械搅拌将其搅拌均匀, 即得到相变水泥砂浆. 其中复合相变材料分别采用 PSD-DA-HD 和 PSD/EG-DA-HD. 随后, 将混合好的砂浆倒入模具中, 并在 20 °C 下固化 48 h, 然后取出试块. 接着, 将试块置于相对湿度为 60%~80% 的标准养护室内, 室温维持在 20 °C, 进行 28 d 的养护. 之后, 将试块放置在室内进行自然干燥, 最终得到由相变水泥砂浆制作的相变砂浆试块, 分别记为 C-PSD-DA-HD 和 C-PSD/EG-DA-HD(图 S1, 见本文支持信息).

1.3 样品控温性能实验

采用数据采集系统和T型热电偶对样品在不同温度环境下的温度变化进行测试。将热电偶夹于两个相变砂浆试块之间，每10 s采集一次数据。首先，将制作好的相变砂浆试块先放置在40 °C的恒温环境中，进行温度数据采集，直至相变砂浆试块的温度达到40 °C；然后，再将其放于0 °C的恒温环境中直至相变砂浆试块的温度降至0 °C，完成温度数据采集，最后将测得数据绘制成曲线，分析其控温性能。

采用温湿度智能监控宝测试样品对内环境的温度调节效果。选用了C-PSD-DA-HD水泥砂浆试块进行实验，将多个试块贴合于实验室自制的尺寸为15 cm×15 cm×15 cm的木质方盒内壁摆放，再将温湿度智能监控宝的探头置于木盒内部环境中(图S2，见本文支持信息)，最后将盒顶封好，该组实验为相变组。另外一个木盒不放相变砂浆试块，该组实验为对照组。将两个木盒平移至高低温交变湿热试验箱中(图S3，见本文支持信息)，进行控温性能测试。试验箱的温度设置为0~60 °C，升降温速率为3 °C/min，每完成一次升温或降温后恒温10 min，100 min为一个升降温循环，总测试时间为10 h。温湿度智能监控宝记录木盒内部环境的温度变化。

2 结果与讨论

2.1 硅胶废料复合相变材料的表征

图1为相变材料的SEM照片，由图1(A)可见，经溶胶-凝胶法处理的二氧化硅载体展现出规则的小圆球形状。这些小球相互堆积，形成了一个堆积多孔网络结构。该结构为相变材料的进入和扩散提供了充足空间。由图1(B)可见，层状结构的EG被嵌入到二氧化硅载体中，构成了一个复合网络结构，该结构可提升材料的导热性能。同时，相变材料也能有效地负载在这一复合网络结构中。由图1(C)和(D)可见，相变材料被吸附并分散到PSD和PSD/EG的多孔结构中，证明了相变材料能够充分负载于PSD和PSD/EG的多孔网络之中。

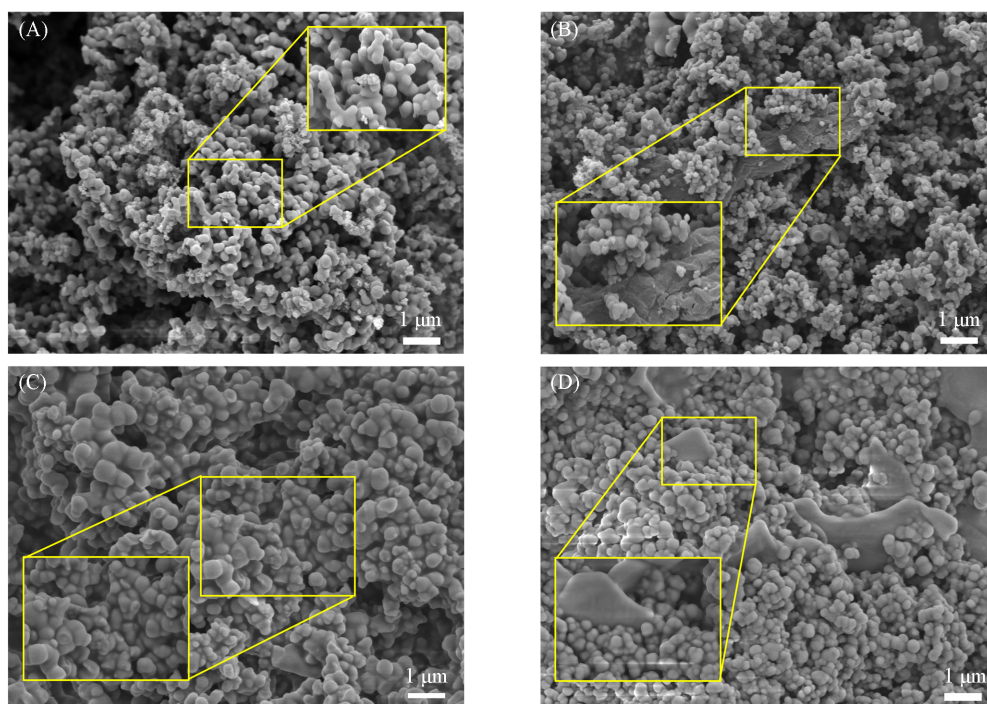


Fig. 1 SEM images of PSD(A), PSD/EG(B), PSD-DA-HD(C) and PSD/EG-DA-HD(D)

图2为相变材料的XRD谱图，可见，PSD/EG-DA-HD在 $2\theta=10.48^\circ$ ， 11.54° ， 19.24° ， 21.46° ， 23.6° ， 30.96° ， 38.96° 和 47.18° 处出现了对应DA的特征峰。在 $2\theta=20.7^\circ$ ， 21.88° ， 24.76° 和 36.38° 处

存在4个对应HD的特征峰. 而在DA-HD的XRD谱图上无新的衍射峰出现^[24]. PSD-DA-HD和PSD/EG-DA-HD复合相变材料在 $2\theta=20^\circ\sim 30^\circ$ 范围内存在宽峰, 这些峰对应于无定形的PSD的特征峰. 在 $2\theta=26^\circ$ 处存在一个明显的对应EG的特征峰^[23].

图2中未显示出其它XRD特征峰, 这表明二元共晶相变材料以及与二氧化硅及膨胀石墨在PSD-DA-HD和PSD/EG-DA-HD中主要通过物理作用相互结合.

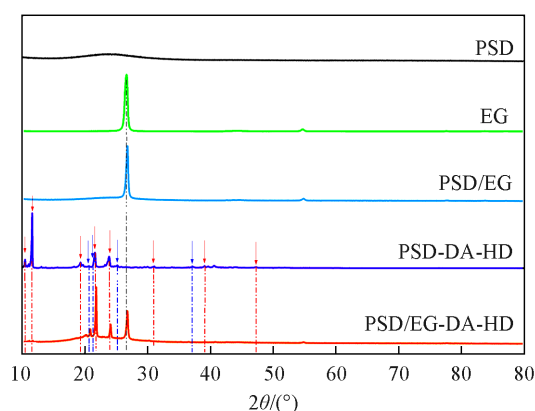


Fig. 2 XRD patterns of PSD, EG, PSD/EG, PSD-DA-HD and PSD/EG-DA-HD

2.2 硅胶废料复合相变材料的形状稳定性

在相变材料的研究中, 形态稳定性是其应用的重要特性, 通过熔融状态下的泄漏实验来评估这类材料的形状稳定性. 将PSD-DA-HD, PSD/EG-DA-HD与DA-HD分别放置于滤纸上, 然后在 80°C 的烘箱中加热2 h. 通过检查滤纸上的泄漏痕迹, 可以有效地判断相变材料是否发生了泄露.

从图3可见, 在室温下, 所有样品均为固态. 然而, 当温度升至 80°C 时, 相变材料DA-HD开始融化, 20 min后, 它们完全融化为液体后渗透到滤纸中. 与之形成对比的是, 复合相变材料在 80°C 的环境条件下仍然表现为固态, 并且在20 min后, 未观察到任何泄漏痕迹. 结果表明, 复合相变材料展现了较好的形状稳定性. 这一优点归因于PSD载体与相变材料之间的相互作用. 此外, 根据XRD结果得知, 在复合过程中, 相变材料与PSD载体并未形成新的化学键, 它们之间为物理相互作用. 这种物理作用包括氢键、毛细管力和表面吸附力等, 它们可有效地抑制相变材料在液态时流动, 因此保持了其固态性质^[25,26].

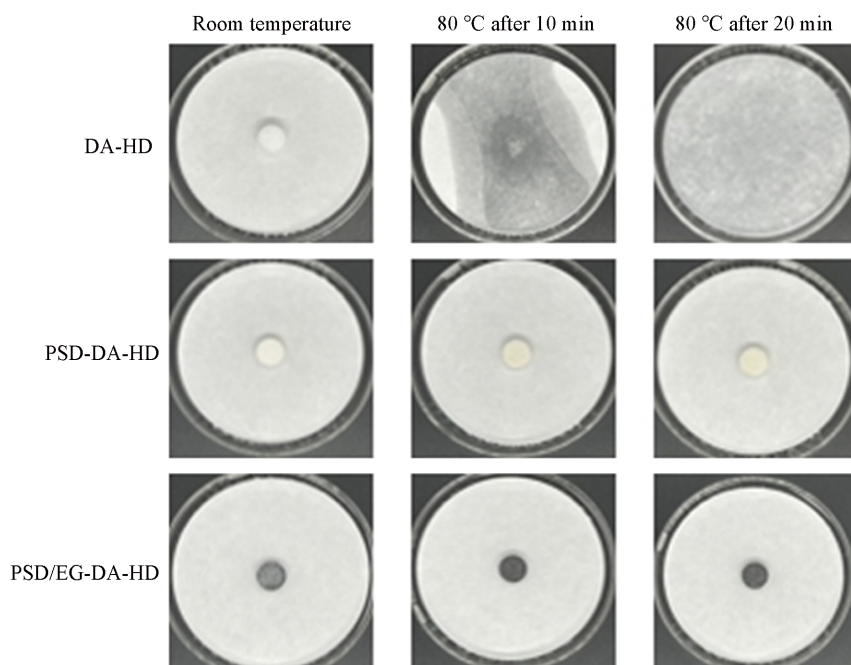


Fig. 3 Morphological stability diagrams of silica gel waste composite phase change material

2.3 硅胶废料复合相变材料的相变性能

相变性能是衡量相变材料储热性能的主要参数, 相变材料和复合相变材料的相变性能通过DSC测试得到^[27], 图4为样品的DSC曲线, 将其相变性能列于表1[其中, $T_{\text{onset}}(^{\circ}\text{C})$ 为起始温度; $\Delta H_c(\text{J/g})$ 为

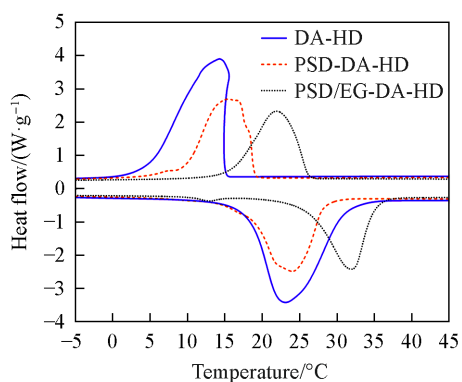


Fig. 4 DSC curves of DA-HD, PSD-DA-HD and PSD/EG-DA-HD

Table 1 Phase change properties of silica composite phase change materials

Sample	Melting		Crystallizing		R(%)
	$T_{onset}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_{onset}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	
DA	30.7	170.9	25.4	170.3	—
HD	48.9	240.8	48.0	236.3	—
DA-HD	18.4	178.0	14.8	178.2	—
PSD-DA-HD	18.2	109.9	18.9	105.6	61.7
PSD/EG-DA-HD	26.0	88.1	26.2	85.1	49.5

2.4 硅胶废料复合相变材料的热稳定性

DA-HD, PSD, PSD-DA-HD 和 PSD/EG-DA-HD 的热稳定性参数见图 5 和表 2. 可见, PSD 在大约 90 °C 时开始失重, 在 200~600 °C 范围内失重趋于稳定, 总失重量大约为 10%. 这一失重主要是由于二氧化硅载体表面吸附的水分分解所致^[23].

DA-HD 的热重分析结果显示, 在大约 120 °C 之前, DA-HD 样品能够保持热稳定; 但超过 120 °C 后, DA-HD 开始分解, 在约 300 °C 出现二段失重, 其原因是, DA-HD 是由两种相变材料共晶而成, 两种复合材料的失重温度相差较远, 因而导致产生二段失重的现象^[30-32]; 随后直到 390 °C 后失重趋于平稳, 总失重率约为 94.5%.

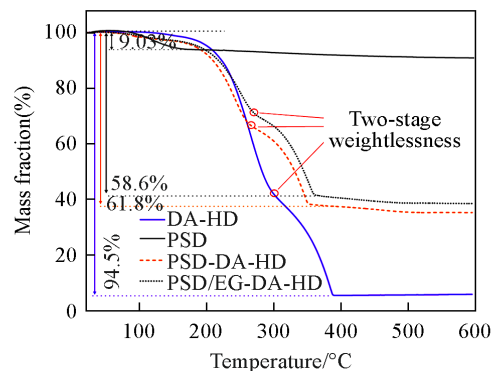


Fig. 5 TG curves of PSD, DA-HD, PSD-DA-HD and PSD/EG-DA-HD

Table 2 TG data of silica composite phase change materials

Sample	Mass loss (%)	PCM content (%)	Initial decomposition temperature/°C	End decomposition temperature/°C
PSD	9.03	0	88.7	550.5
DA-HD	94.50	100.00	120.9	390.8
PSD-DA-HD	61.80	61.74	92.2	357.0
PSD/EG-DA-HD	58.60	57.49	92.2	366.2

对于 PSD-DA-HD 和 PSD/EG-DA-HD 复合相变材料, 两者在大约 90 °C 之前能够保持良好的热稳定性. 这段期间所观察到的少量失重主要是由于样品表面吸附的少量水分被移除所致. 在 90 °C 之后开始失重, 同 DA-HD 失重曲线一样, 复合相变材料在约 250 °C 左右会出现二段失重, 分别于 357 和 366 °C 时结束失重. 两者的失重率分别为 61.74% 和 57.49%. 值得注意的是, 负载于 PSD 和 PSD/EG 载体中的

结晶熔]. 为了表明复合相变材料的储热能力, 通过下式对其进行计算^[28,29]:

$$R = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m,PCM}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $R(\%)$ 为相变材料在复合相变材料中的含量; ΔH_m 和 $\Delta H_{m,PCM}$ (J/g) 分别为复合相变材料的熔化焓和所选相变材料的熔化焓. 研究表明, 负载在二氧化硅中的相变材料充分展示了其相变特性, PSD-DA-HD 和 PSD/EG-DA-HD 对于相变材料的负载率分别为 49.5% 和 61.7%, 间接表明了复合相变材料也具有一定的热能存储性能.

DA-HD的分解温度低于纯DA-HD的分解温度,其二段失重的温度也同样低于纯DA-HD二段失重温度.这种分解温度差异在之前的定型相变材料的研究中也有所报道^[33-35],其原因可能是由于PCM与载体之间的物理相互作用使得DA-HD的热稳定性有所降低^[36].

2.5 硅胶废料复合相变材料及相变砂浆试块的导热性能

相变材料的导热系数(λ)列于表3,可见,DA-HD的导热系数为0.1712 W/m·K.无论是PSD-DA-HD还是PSD/EG-DA-HD相对于所用的相变材料DA-HD,其导热性能分别提升113.2%和436.4%.研究结果显示,利用硅胶废料制备复合相变材料的方法有效提升了相变材料的导热性能.此外,加入膨胀石墨还可进一步提升复合相变材料的导热性能.然后,又对普通水泥砂浆、含有PSD-DA-HD和PSD/EG-DA-HD的相变砂浆进行了导热性能测试.需要注意的是,导热系数可能会影响相变砂浆的控温性能.因此,将导热系数视为评估相变砂浆控温性能的重要指标之一.结果显示,与复合相变材料相比,相变砂浆的导热系数均有所提高.

Table 3 Thermal conductivity data of silica composite phase change materials

Sample	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$			
	Run1	Run2	Run3	Average
DA-HD	0.1734	0.1647	0.1756	0.1712
PSD-DA-HD	0.3585	0.3679	0.3685	0.3650
PSD/EG-DA-HD	0.9753	0.9445	0.9342	0.9513
Cement mortar	0.6352	0.6320	0.6286	0.6319
C-PSD-DA-HD	0.5949	0.5954	0.5978	0.5961
C-PSD/EG-DA-HD	0.7394	0.7377	0.7368	0.7380

2.6 相变砂浆的控温性能

将样品暴露在不同温度下,以模拟温度变化的情况.通过结果分析了相变砂浆的温度变化情况,测试结果见图6.

通过上述实验方法获得了相变水泥砂浆在不同条件下的温度变化数据.随后,结合人们对室内外热环境及其主观热感觉进行的研究分析可知^[37,38],对样品在18~32 °C温度范围内的温控表现进行了研究,并将数据列于表4.结果显示,水泥砂浆作为空白对照组在18~32 °C温度范围内仅维持了3.7 min,而掺有复合相变材料的相变砂浆均表现出一定的温控性能.

通过温湿度智能监控宝测试样品对内环境的温度调节效果(图7).该实验同样以样品维持木盒内

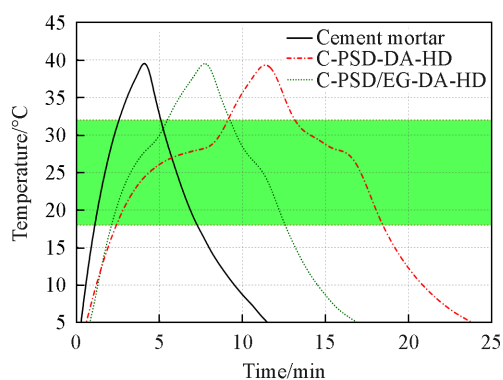


Fig. 6 Temperature change curves of cement mortar and phase change mortar

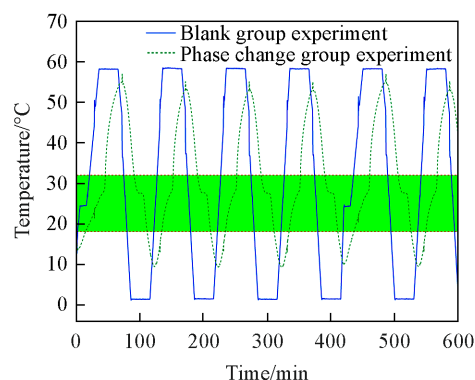


Fig. 7 Temperature change curves of ambient temperature regulation experiment

Table 4 Temperature control duration of cement mortar and phase change mortar

Sample	Heating process	Constant temperature duration/min		Total time
		Heating process	Cooling process	
Cement mortar	1.45	2.25	3.7	
C-PSD-DA-HD	6.73	5.97	12.7	
C-PSD/EG-DA-HD	3.37	3.33	6.7	

18~32 °C的时间作为评价其控温性能的标准,测试结果列于表5.

Table 5 Temperature control time of phase change mortar and blank control group

Sample	Time of temperature control at 18—32 °C/min		
	Heating process	Cooling process	Total time
Blank group experiment	5.3	5.3	10.6
Phase change group experiment	18.0	21.0	39.0

实验结果显示,在一个循环内,与空白对照组相比,相变砂浆在木盒内部显著减缓了温度的变化速度.空白组在18~32 °C仅能维持10.6 min,而带有相变砂浆的相变组表现较好,可以在18~32 °C内维持39 min.通过相变组实验的曲线可以看到明显的恒温平台,表明相变砂浆在减少室内温度波动上起到了一定的作用.与空白组相比,控温组的维持时间增加了267.9%.

3 结 论

首先,以相变建筑中人体对温度的需求,选取十酸和十六醇作为原料,通过二元混合相变介质的液相线方程确定原料混合比例,制备了相变温度为18.4 °C且具有较高相变焓(178.0 J/g)的二元相变材料.随后,以硅胶废料为原料,将通过溶胶-凝胶法合成的具有堆积孔三维网络结构的二氧化硅作为载体,并通过引入膨胀石墨增强其导热性能;然后,将二元相变材料浸渍于PSD和PSD/EG网络结构中.结果表明,PSD和PSD/EG对相变材料均具有良好的吸附效果,PSD-DA-HD的负载量可达61.7%,相变焓为105.6 J/g,PSD/EG-DA-HD的负载量可达49.5%,相变焓为88.1 J/g.在热稳定性研究中,PSD-DA-HD和PSD/EG-DA-HD可以在92.2 °C以下稳定工作.与PSD-DA-HD相比,引入EG后的PSD/EG-DA-HD的导热系数可增至 $0.9513 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.随后将PSD-DA-HD和PSD/EG-DA-HD作为骨料,分别与水泥、水按比例进行混合形成相变水泥砂浆,然后通过干燥养护后形成相变砂浆作为实验样品.与普通水泥砂浆相比,含有PSD-DA-HD水泥砂浆的导热系数降至 $0.5961 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,而含有PSD/EG-DA-HD水泥砂浆的导热系数则增至 $0.7380 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.两者均具有良好的储热控温特性,C-PSD-DA-HD和C-PSD/EG-DA-HD在18~32 °C温度范围内分别可维持12.7和6.7 min.在模拟应用控温实验中,相比于没有相变材料的空白组,含有PSD-DA-HD的相变砂浆在18~32 °C维持的时间可增加267.92%.综上所述,硅胶废料与相变材料的搭配更符合节能环保的研究趋势,也为制备绿色型相变建筑控温材料提供了新的思路.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20240372>.

参 考 文 献

- [1] Ibanez M., Lázaro A., Zalba B., Cabeza L. F., *Appl. Therm. Eng.*, **2005**, *25*, 1796—1807
- [2] Bentz D. P., Turpin R., *Cem. Concr. Compos.*, **2007**, *29*, 527—532
- [3] Pasupathy A., Velraj R., Seeniraj R., *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **2008**, *12*, 39—64
- [4] Baetens R., Jelle B. P., Gustavsen A., *Energy Build.*, **2010**, *42*, 1361—1368
- [5] Khudhair A. M., Farid M. M., *Energy Convers. Manag.*, **2004**, *45*, 263—275
- [6] Sadineni S. B., Madala S., Boehm R. F., *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **2011**, *15*, 3617—3631
- [7] Kuznik F., Virgone J., Johannes K., *Renew. Energy*, **2011**, *36*, 1458—1462
- [8] Alawadhi E.M., Alqallaf H. J., *Energy Convers. Manag.*, **2011**, *52*, 2958—2964
- [9] Behzadi S., Farid M. M., *HVAC&R Res.*, **2011**, *17*, 366—376
- [10] Milian Y. E., Ushak S., *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **2020**, *94*, 67—79
- [11] Zhu Y., Liang S., Wang H., Zhang K., Jia X., Tian C., Zhou Y., Wang J., *Energy Convers. Manage.*, **2016**, *119*, 151—162
- [12] Rudd A. F., *ASHRAE Trans.*, **1993**, *99*, pt 2
- [13] Kuznik F., David D., Johannes K., Roux J. J., *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **2011**, *15*, 379—391
- [14] Cabeza L. F., Castellon C., Nogues M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O., *Energy Build.*, **2007**, *39*, 113—119
- [15] Mo S., Mo B., Wu F., Jia L., Chen Y., *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **2021**, *99*, 220—229
- [16] Čejková J., Hanuš J., Štěpánek F., *J. Colloid Interface Sci.*, **2010**, *346*, 352—360

- [17] Min X., Fang M., Huang Z., Liu Y. G., Huang Y., Wen R., Qian T., Wu X., *Sci. Rep.*, **2015**, *5*, 12964
- [18] Tang B., Cui J., Wang Y., Jia C., Zhang S., *Solar Energy*, **2013**, *97*, 484—492
- [19] Tang F., Liu L., Alva G., Jia Y., Fang G., *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **2017**, *160*, 1—6
- [20] Qian Y., Wei P., Jiang P., Li Z., Yan Y., Ji K., Deng W., *Energy Convers. Manage.*, **2013**, *76*, 101—108
- [21] Williams J. D., Peterson G. P., *Nanomaterials*, **2021**, *11*(10), 2578
- [22] Anand A., Kant K., Shukla A., Chen C. R., Sharma A., *Energies*, **2021**, *14*, 4509
- [23] Sun K. Y., *Research on a New Passive Solar Collector-storage Wall System with Phase Change Materials*, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, **2021**(孙克衍. 导热增强型有机相变材料的合成与应用研究, 北京: 中国科学院大学, **2021**)
- [24] Gu Q. J., Fei H., Wang L. Y., Fang M., Jiang D. H., Zhao Y. C., *Chem. Ind. Engin. Prog.*, **2019**, *38*(11), 5033—5039(顾庆军, 费华, 王林雅, 方敏, 蒋达华, 赵运超. 化工进展, **2019**, *38*(11), 5033—5039)
- [25] Li J. R., He L. H., Liu T. Z., Cao X. J., Zhu H., *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **2013**, *118*, 48—53
- [26] Fu Z., Su L., Liu M., Li J., Li J., Zhang Z., Li B., *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **2016**, *80*, 180—188
- [27] Sun D., *Studies on Synthesis and Application of Thermally Enhanced Organic Phase Change Materials*, Dalian University of Technology, Dalian, **2016**(孙丹. 新型被动式太阳能相变集热蓄热墙系统研究, 大连: 大连理工大学, **2016**)
- [28] Zhang H. Z., Wang X. D., Wu D., *J. Colloid Interface Sci.*, **2010**, 246—255
- [29] Li B. X., Liu T. X., Hu L. Y., Wang Y. F., Gao L., *ACS Sustain Chem. Eng.*, **2013**, *1*, 374—380
- [30] Wang Y., Li L., *New Chem. Mater.*, **2016**, *44*(7), 64—66(王宇, 李琳. 化工新型材料, **2016**, *44*(7), 64—66)
- [31] Wu Y. N., Wang X., Tang B. T., *Fine Chem.*, **2023**, 1—12(吴亚楠, 王璇, 唐炳涛. 精细化工, **2023**, 1—12)
- [32] Bai J. G., Yuan Z. J., Liu Y., Zhang Y. S., Lu X. F., *Chem. Ind. Engin. Prog.*, **2022**, *41*(8), 4441—4448(白金刚, 苑正己, 刘雨, 张义师, 吕喜凤. 化工进展, **2022**, *41*(8), 4441—4448)
- [33] Kong W., Lei Y., Jiang Y., Lei J., *J. Therm. Anal. Calorim.*, **2017**, *130*, 1011—1019
- [34] Zhang X. G., Huang Z. H., Ma B., Wen R. L., Zhang M., Huang Y. T., Fang M. H., Liu Y. G., Wu X., *RSC Adv.*, **2016**, *6*, 58740—58748
- [35] Zhang X. G., Huang Z. H., Ma B., Wen R. L., Min X., Huang Y. T., Yin Z. Y., Liu Y. G., Fang M. H., Wu X., *Thermochim. Acta*, **2016**, *638*, 35—43
- [36] Ramakrishnan S., Sanjayan J., Wang X. M., Alam M., Wilson J., *Appl. Energy*, **2015**, *157*, 85—94
- [37] Liu J., *Study on the Indoor Thermal Environment and Human Thermal Comfort in Natural Ventilation Building in Summer-hot and Winter-cold Zone*, Chongqing University, Chongqing, **2007**(刘晶. 夏热冬冷地区自然通风建筑室内热环境与人体热舒适的研究, 重庆: 重庆大学, **2007**)
- [38] Mao Y., *Study on Climate Adaptability of Human Beings to Thermal Comfort in China*, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, **2007**(茅艳. 人体热舒适气候适应性研究, 西安: 西安建筑科技大学, **2007**)

(Ed.: Y, K, S)