

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.003



复合相变调湿材料的制备与热湿性能

吴智敏¹, 陈智¹, 秦孟昊²

(1. 南京大学 建筑与城市规划学院, 南京 210093; 2. 丹麦科技大学 土木工程系, 哥本哈根 2800)

摘要: 制备一种兼具调热调湿功能的新型复合相变调湿材料 (CMPCM), 该材料由相变微胶囊 (MPCM) 与多孔调湿材料合成。作为被动式节能材料, 能够有效平抑室内温湿度波动和降低建筑能耗。其中, 相变微胶囊由癸酸和十八烷酸的混合物为芯材、二氧化硅为壁材通过溶胶-凝胶法合成, 多孔调湿材料为硅藻土。通过扫描电子显微镜 (SEM)、差示扫描量热法 (DSC)、热重分析法 (TGA)、正杯蒸发法和等温吸放湿法分析表征了复合相变调湿材料的组成结构、热性能、热稳定性以及传湿系数和湿缓冲值。DSC 和 TGA 结果显示, 复合相变调湿材料比普通相变材料有更小的过冷度和更好的热稳定性。传湿特性实验显示, 该新材料比单纯的多孔调湿材料有更大的传湿系数和湿缓冲值。

关键词: 相变材料; 微胶囊; 多孔调湿材料; 热湿特性

中图分类号: TU111.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)04-0013-07

Preparation and heat-moisture properties of phase change hygroscopic materials

Wu Zhimin¹, Chen Zhi¹, Qin Menghao²

(1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China;

2. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Copenhagen 2800, Denmark)

Abstract: A new composite phase change humidity material (CMPCM) was prepared, which has the functions of temperature regulation and humidity controlling. It was synthesized by composite microencapsulated phase change material (MPCM) and porous humidity control material. CMPCM can effectively stabilize the indoor temperature as well as humidity fluctuations, and reduce building energy consumption as a passive energy-saving material. The MPCM was synthesized by sol-gel method with a mixture of capric acid and octadecanoic acid (PCM) as core, and SiO₂ as shell. The diatomite was selected as porous hygroscopic material. The performance of composition and structure, thermal properties, thermal stability, moisture transfer coefficient and moisture buffer value were characterized by scanning electron microscopy (SEM), differential scanning calorimetry (DSC), thermal gravimetric analysis (TGA), positive cup evaporation method and isothermal sorption method respectively. DSC and TGA

收稿日期: 2017-12-19

基金项目: 科技部重点专项 (2016YFC0700500); 国家自然科学基金 (51578278)

作者简介: 吴智敏 (1991-), 男, 博士生, 主要从事建筑节能研究, E-mail: wzm_ben@live.com.

秦孟昊 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: mqin@nju.edu.cn.

Received: 2017-12-19

Foundation item: The National Key Project of the Ministry of Science and Technology (No. 2016YFC0700500); National Natural Science Foundation of China (No. 51578278)

Author brief: Wu Zhimin (1991-), PhD candidate, main research interest: building energy saving, E-mail: wzm_ben@live.com. Qin Menghao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: mqin@nju.edu.cn.

results showed that the super-cooling degree of CMPCM was lower than that of PCM, and the initial degradation temperature of CMPCM was higher than that of PCM. Moisture Transfer Characteristics Test showed that the moisture transfer coefficient and moisture buffer value of CMPCM were higher than that of classical materials.

Keywords: phase change materials; microcapsules; porous humidity control materials; heat and moisture characteristics

随着经济的发展,世界范围内对能源的需求也大幅增长。建筑相关领域的能耗在全球总能耗中的比例已接近 40%,其中 50%消耗于空调和通风系统(HVAC)^[1-2]。因此,如何降低 HVAC 系统能耗成为了亟待解决的问题^[3-6]。一般来说,提高 HVAC 系统的效率和合理利用被动式节能技术是解决上述问题的两种有效方式,而建筑节能材料的应用能从根本上降低 HVAC 系统的能耗,因而是一种较为理想的被动式节能技术。笔者旨在提供一种新型的被动式建筑节能材料,将这种材料运用于室内环境中,可同时起到平抑室内温度和相对湿度波动,对室内的余热、余湿进行“高吸低放”,从而大大减轻空调系统的显热、潜热负荷,最终达到被动式建筑节能的目的^[7-8]。

目前,较为常用的两类被动式建筑节能材料为相变材料和多孔调湿材料,前者在其相态变化时能够对室内显热进行高吸低放,起到平抑室内温度波动的作用^[9-12];后者因其特有的多孔结构,能够对室内湿度进行调节,期间发生的湿缓冲效应能够降低室内的潜热负荷,从而达到节能的目的^[13-14]。但是,由于相变材料较低的热传导性、液态下的流动性以及过高的过冷度,导致相变材料并不能直接应用于建筑领域。因此,通过在二氧化硅无机外壳内包裹相变材料的相变微胶囊技术成为了解决上述问题的常用方法。值得注意的是,以往学者们大多基于相变微胶囊的调湿性能^[15-17]或者多孔调湿材料的调湿性能^[13-14]单独进行研究,而对于兼具两者功能的复合相变调湿材料的研究相对较少,这极大限制了相变材料和多孔调湿材料在建筑领域的应用。因此,制备同时具有调温调湿功能的复合相变调湿材料对于利用被动方式平抑室内温湿度波动,提高室内舒适度,降低 HVAC 系统的能耗具有重要意义。

旨在通过溶胶-凝胶法,以甲基三乙氧基硅烷为前驱体,以二氧化硅为壁材^[18],以癸酸和十八烷酸为相变芯材,硅藻土由于其良好的吸湿性能和无毒性而被用作调湿材料^[19],将上述 3 种材料复合制成二氧化硅基癸酸-十八烷酸-硅藻土微胶囊相变调湿材料,对比分析了复合相变调湿材料与相变微胶囊

材料、单一调湿材料的形态结构、热性能和湿性能上的差异性。

1 实验方法

1.1 主要原料

甲基三乙氧基硅烷(MTES)($C_7H_{18}O_3Si$, 试剂级,东京化成工业株式会社)作为前驱体;无水乙醇(CH_3CH_2OH , 试剂级,国药化学试剂有限公司)和蒸馏水作为溶剂;盐酸(HCL, 试剂级,南京化学试剂有限公司)和氨水($NH_3 \cdot H_2O$, 试剂级,南京化学试剂有限公司)用于控制酸碱度(PH);癸酸($C_{10}H_{20}O_2$, 工业级,鲁尔科技有限公司)和十八烷酸($CH_3(CH_2)_{16}COOH$, 工业级,鲁尔科技有限公司)用于制备芯材,癸酸和十八烷酸的混合物统称为 PCM;十二烷基硫酸钠 SDS($C_{12}H_{25}SO_4Na$, 试剂级,上海化学试剂有限公司)作为油水乳化剂。由癸酸和十八烷酸构成的烷烃混合物的熔点和潜热见表 1^[18]。硅藻土(工业级,上海双江钛白产品有限公司)作为吸湿材料,疏松状态下的密度为 0.47 g/cm^3 ,比表面积为 $38 \text{ m}^2/\text{g}$,孔隙体积为 $0.6 \text{ cm}^3/\text{g}$,孔隙率为 80%。

表 1 差示扫描量热法(DSC)测得的 PCM、MPCM 和 CMPCM 相关特性

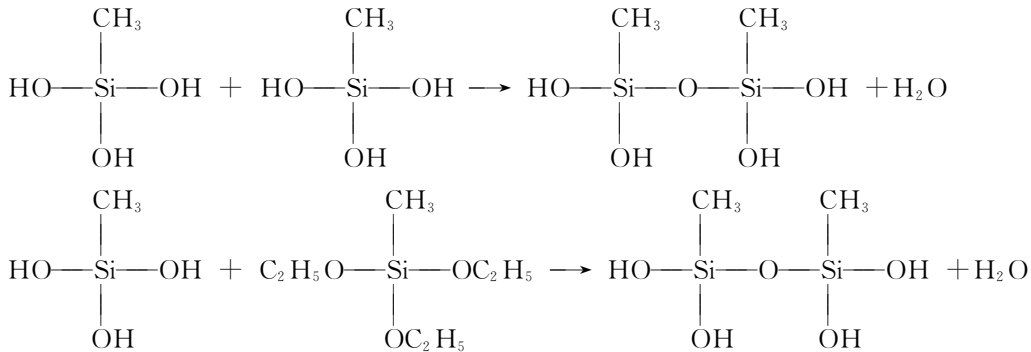
Table 1 DSC data of the PCM, MPCM, CMPCM

样品名称	PCM 封装率/%	熔化/($5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)		凝固/($5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	
		温度/ $^\circ\text{C}$	潜热/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	温度/ $^\circ\text{C}$	潜热/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
PCM	100.0	28.1	145.7	26.2	144.3
MPCM	63.4	27.2	94.4	26.7	89.6
CMPCM	12.9	27.0	19.0	26.7	18.4

1.2 实验原理

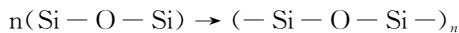
MTES、无水乙醇和去离子水的混合溶液在超声波场的分散作用下充分接触并发生传质作用,使 MTES 充分发生水解反应,导致其中的 Si—O—Si 基团断裂形成含有 OH—Si—OH 前驱体的溶胶溶液^[18],水解反应见化学反应式 1。相变材料(PCM)、SDS 和去离子水的混合溶液在超声波场分散作用和

合适温度条件下发生乳化作用,得到稳定的相变材料微乳液。再将含有大量 OH—Si—OH 前驱体的溶液滴入至碱性的相变材料微乳液中,水解的 OH—Si—OH 基团在相变材料微乳球表面成键包裹,形成以 Si—OH 基团为主的均匀改性二氧化硅溶胶态。在超声波场和适当的温度下,吸附在相变材料微乳球表面且含有 OH—Si—OH 基团的甲基硅酸之间或者甲基硅酸和甲基三乙氧基硅烷之间发生缩聚反应,OH—Si—OH 基团断裂重新形成 Si—O—Si 基团,见反应式 2。低聚合物 Si—O—Si 基团



反应式 2 甲基三乙氧基硅烷的缩聚反应

Scheme 2. The condensation reaction mechanism of the tetraethyl silicate



反应式 3 SiO₂ 外壳的形成

Scheme 3. The shell formation process of the SiO₂

1.3 制备工艺

1.3.1 相变微胶囊的制备 将 2.5 g SDS 和 20 g PCM 溶解于盛有 100 mL 去离子水的烧杯中形成混合溶液。用磁力搅拌器在 35 ℃ 恒温水浴条件下以 600 rpm 的速度搅拌 0.5 h,待溶液冷却至 25 ℃ 时在恒温水浴条件下用磁力搅拌器以 600 rpm 的速度搅拌 0.5 h,制备成 PCM 乳状液。

将 20 g MTES、20 g 无水乙醇和 30 mL 去离子水加入烧杯中混合制备成 MTES 混合溶液,滴入盐酸将 MTES 混合溶液的 PH 值调整到 2~3,50 ℃ 恒温水浴条件下用磁力搅拌器以 600 rpm 的速度搅拌 20 min。通过 MTES 材料的水解反应,获得具有大量 OH—Si—OH 基团的前驱体溶胶溶液。PCM 溶胶在 35 ℃ 恒温水浴条件下以 400 rpm 的速度搅拌,滴入氨水将 PCM 溶胶的 PH 值调整到 9~10,并将具有大量 OH—Si—OH 基团的前驱体溶胶溶液滴入至 PCM 微乳球乳浊液中,让乳浊液持续反应并持续搅拌 2 h。最后,用滤纸过滤反应溶液并收集制成的二氧化硅外壳相变微胶囊材料,将收集好的二氧化硅外壳相变微胶囊材料用去离子水清洗,再放入 0 ℃ 的恒温真空干燥箱中 24 h,从而得到具有调湿功能的二氧化硅外壳相变微胶囊材料

再通过缩聚反应形成二氧化硅外壳并将相变材料微滴包裹^[19-20],制成二氧化硅外壳相变微胶囊材料(MPCM),见反应式 3。再将 MPCM 材料、硅藻土和蒸馏水在超声波场的分散作用下制成混合溶液,在放入真空干燥箱中制成二氧化硅外壳复合相变调湿材料(CMPCM)。



反应式 1 甲基三乙氧基硅烷的水解反应

Scheme 1. The hydrolysis reaction mechanism of the tetraethyl silicate

(MPCM)。

1.3.2 调湿调湿材料的制备 将硅藻土放入 100 ℃ 的恒温真空干燥箱中 10 h,得到干燥的硅藻土样品,再将 5 g 的 MPCM、20 g 干燥后的硅藻土和 80 g 蒸馏水依次称量加入烧杯中,制备成混合溶液。将混合溶液用磁力搅拌器以 200 rpm 的速度搅拌 5 min 后,倒入模具中,得到块状复合实验样品,并将其放入 20 ℃ 的真空干燥箱里 48 h,从而制成 MPCM/硅藻土复合材料,将其命名为 CMPCM。

同时,将 20 g 硅藻土和 40 g 去离子水依次称量加入烧杯中,重复上述步骤,制备相同大小形状的纯硅藻土块状实验样品,其与石膏板、木材一同作为 CMPCM 材料的对照实验材料。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌

分别将制备好的样品加热至超过 30 ℃ 后,放在扫描电子显微镜(日本日立 S-3400NII 型)中进行观察,可得 MPCM 和硅藻土的微结构形貌图,见图 1。从图 1(a)可见,相变后的 MPCM 呈现出球状微胶囊结构,球形表面光滑而没有棱角,大小在 60~80 μm 之间,球状微胶囊的二氧化硅外壳紧密地把 PCM 材料包裹在其内部。当 PCM 材料的温度达到熔点发生相变时,二氧化硅外壳可以有效防止液态

的 PCM 材料外泄,起到了环保和重复利用的作用。从图 1(b)可见,硅藻土呈现出多孔的微观结构。而硅藻土较强的吸湿性能正是得益于其表面大量纳米级别的微观孔洞^[21]。其中,CMPCM 实验样品的完整性得益于其内部 MPCM 和硅藻土恰当的质量比,根据实验研究表明,当 MPCM 在 CMPCM 中的质量比超过 30%以后,试验样品会变得易碎不完整。

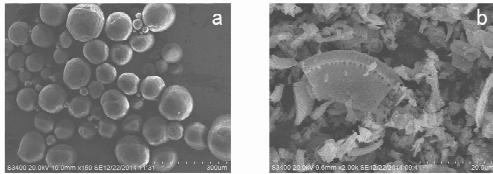


图 1 MPCM 样品(a)和硅藻土样品(b)的形貌 SEM 图像
Fig. 1 SEM photographs of the MPCM(a), diatomite(b)

2.2 热性能

2.2.1 熔点、凝固点、潜热和过冷度 PCM、MPCM 和 CMPCM 材料的热性能分析采用了差示扫描量热计(美国珀金埃尔默股份有限公司 Pyris 1 DSC 型)。使用氩气流以 20 mL/min 的速度对相关实验样品进行 5 °C/min 的升温或降温实验,温度误差为 ±2 °C,焓值误差为 ±5%。

对于 PCM、MPCM 和 CMPCM 的 DSC 测量结果如图 2、图 3 及表 1 所示。图 2、图 3 分别为材料的吸热和放热过程,表 1 为材料的熔点、凝固点、潜热量、过冷度及相应的 PCM 质量占比。从表 1 可得,PCM 的熔点和凝固点分别为 28.1、26.2 °C,熔化潜热和凝固潜热分别为 145.7、144.3 kJ/kg,过冷度为 1.9 °C;MPCM 的熔点和凝固点分别为 27.2、26.7 °C,熔化潜热和凝固潜热分别为 94.4、89.6 kJ/kg,过冷度为 0.5 °C;CMPCM 的熔点和凝固点分别为 27.0、26.7 °C,熔化潜热和凝固潜热分别为

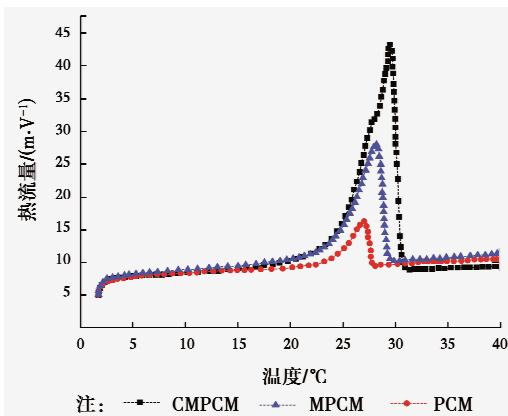


图 2 PCM, MPCM, CMPCM 材料的熔化 DSC 曲线
Fig. 2 Melting DSC curve of PCM, MPCM and CMPCM

19.0、18.4 kJ/kg,过冷度为 0.3 °C。相对于 PCM 材料而言,MPCM 和 CMPCM 拥有更低的熔点、更高的凝固点和更小的过冷度。这些特性使他们能在升温环境中更低的温度条件下熔化吸热,降温环境中更高的温度条件下凝固放热,作为建筑调湿材料而言他们拥有更大的温度调控范围,使得相变微胶囊结构材料更好地适用于建筑节能领域。

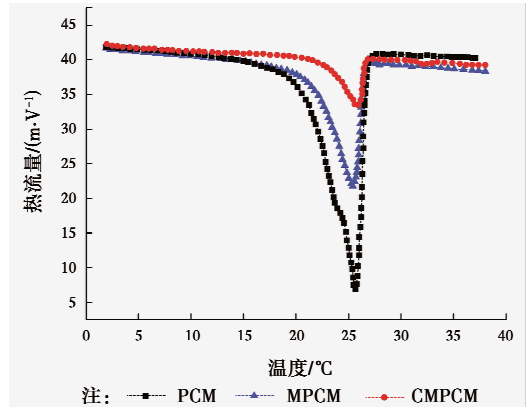


图 3 PCM, MPCM, CMPCM 材料的凝固 DSC 曲线
Fig. 3 Solidifying DSC curve of PCM, MPCM and CMPCM

从表 1 可得,由于硅藻土不具备相变能力,缺少吸放热过程导致含有硅藻土的 CMPCM 材料的潜热小于 MPCM 和 PCM。另外,PCM 的含量正比于 MPCM 和 CMPCM 材料的蓄热能力,因此 PCM 材料的蓄热能力最强,MPCM 材料次之,CMPCM 材料蓄热能力最差。PCM 的含量可用式(1)计算。

$$\eta = \frac{\Delta H}{\Delta H_{PCM}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 指 PCM 在 MPCM 或 CMPCM 中的质量比; ΔH 指 MPCM 或 CMPCM 的平均潜热,J; ΔH_{PCM} 指相同质量的 PCM 平均潜热,J。MPCM 和 CMPCM 中的 PCM 质量占比可见表 1,可得 MPCM 和 CMPCM 材料中的 PCM 质量占比分别为 63.4% 和 12.9%。

2.2.2 热稳定性 PCM、MPCM 和 CMPCM 材料的热稳定性分析采用热重分析仪(美国珀金埃尔默股份有限公司 Pyris 1 TGA 型),使用 20 mL/min 速率的氮气流对相关实验样品进行加热,加热速率为 20 °C/min,温度测量范围控制在 25 ~ 700 °C 之间。

图 4 为 PCM、MPCM 和 CMPCM 材料的热重分析曲线,表 2 为质量损失最大时的加热温度值以及 700 °C 时的残留质量。从图 4 可见,降解分为两个过程发生,PCM 的第 1 降解过程发生在 130 ~ 250 °C 之间,二氧化硅外壳的第 2 降解过程发生在 250 ~ 700 °C 之间。MPCM 和 CMPCM 材料的最大质量

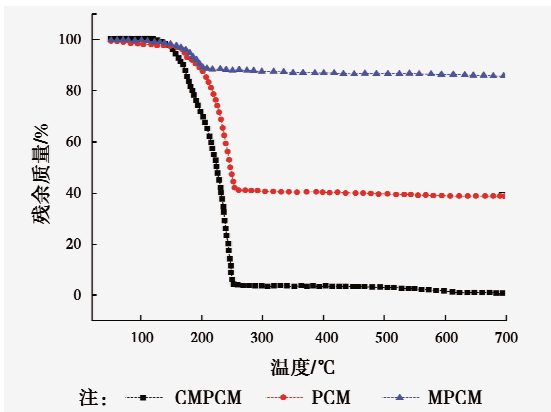


图 4 PCM, MPCM, CMPCM 材料的 TGA 曲线
Fig. 4 TGA curve of PCM, MPCM and CMPCM

降解温度均高于 PCM 材料,说明二氧化硅外壳可以有效保护 PCM 芯材,并且可以有效提高材料的着火点。

表 2 热重分析法(TGA)测得的 PCM、MPCM 和 CMPCM 相关特性

Table 2 TGA data of PCM, MPCM and CMPCM

样品	温度/°C	700 °C时烧焦残渣含量/%
PCM	130	0
MPCM	175	38
CMPCM	175	88

2.3 湿性能

材料的传湿系数表明了材料传湿速率的大小,湿缓冲值表明了相对湿度变化过程中材料单位时间内吸湿量的大小^[22]。为了评价材料的吸湿性能,特别是材料的湿缓冲性能,分别实验测量确定了 CMPCM、石膏、木材和硅藻土实验样品的传湿系数和湿缓冲值,并绘制了 CMPCM 材料的吸附脱附曲线。

2.3.1 传湿系数 由于热湿传递的相似性,在多孔建筑材料中的湿传递可以类比于热传递,湿度的扩散率可以类比为热量的传导率。当室内相对湿度发生变化时,较高的传湿系数能使调湿材料迅速开始调湿作用,但吸湿量大的材料传湿系数通常较小,意味着材料需要较长时间来吸收空气中的水蒸气,无法迅速对室内环境进行调湿。例如,饱和硅藻土的吸湿量可以达到其质量的 10%^[19],但其传湿系数较小,不是理想的调湿材料。传湿系数的计算式见式(2)。

$$\lambda = \frac{\partial x}{\partial RH} \cdot q_m \quad (2)$$

式中: λ 为传湿系数,kg/m s; q_m 为单位时间单位面积内的蒸发量,kg; RH 为相对湿度; x 为材料厚

度,m。

实验样品的传湿系数通过正杯蒸发法测量,把面积为 3 cm×3 cm 的砖形实验样品放置在烧杯口并完全盖住烧杯,让水蒸气从实验样品的内部传导至外部。使用饱和 NaCl 溶液把烧杯内部湿度控制在 75%,烧杯外部的相对湿度恒定在 52%,湿度的测量误差在±2%。

表 3 为 CMPCM 和硅藻土材料的传湿系数值。CMPCM 材料的传湿系数为 5×10^{-8} kg/(ms%RH),远高于其他 3 种材料,是因为添加的 MPCM 微胶囊结构增大了 CMPCM 的孔隙率,更加细密的多孔结构有助于水蒸气在材料内部的传递,因此,具有更大的传湿系数。

表 3 CMPCM、石膏、木材、硅藻土材料的传湿系数
Table 3 Moisture transfer coefficient of CMPCM, gypsum, wood and diatomite

样品	传湿系数/ (10^{-8} kg · ms ⁻¹)	样品	传湿系数/ (10^{-8} kg · ms ⁻¹)
CMPCM	5.00	石膏	1.54
木材	0.79	硅藻土	2.75

2.3.2 湿缓冲值 湿缓冲值是指材料随着空气湿度变化,在单位时间内单位面积吸收或蒸发的水蒸气量,一般用 MBV(kg/m² · %RH)表示,它是描述材料吸放湿量性能的一个重要衡量指标。在相对湿度发生变化的环境中,湿缓冲值可以按照式(3)计算。

$$MBV = \frac{G}{\Delta RH \cdot A \cdot 100} \quad (3)$$

式中:MBV 为湿缓冲值,g/m² %RH; G 为材料的吸湿量,g; A 为材料与空气进行吸湿作用的接触面积,m²; ΔRH 为高湿度和低湿度之间的差值,RH。

图 5 为双瓶法测量湿缓冲值示意图,其中,左瓶装饱和氯化钾溶液,使瓶内湿度恒定在 88%;右

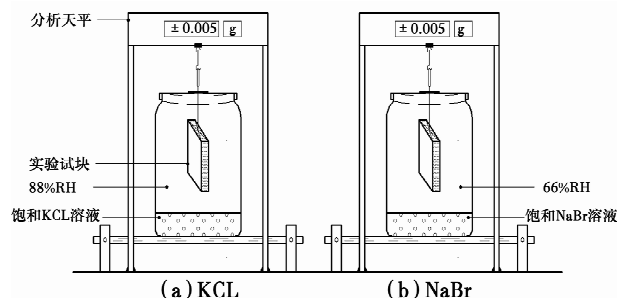


图 5 装有饱和盐溶液的实验瓶

Fig. 5. Photos of bottles containing saturated salt solution

瓶装饱和氯化钠溶液,使瓶内湿度恒定在 62%。先把实验样品悬挂在装有饱和氯化钾溶液且湿度为 88% 的瓶子中 8 h,然后用同样的方法悬挂在装有氯化钠溶液湿度为 66% 的瓶子中 16 h,如此在两瓶交替放置并持续 6 d,其间通过分析天平来测量和记录相应实验样品的质量变化。

图 6 为实验样品 CMPCM、石膏、木材和硅藻土的质量变化曲线。表 4 为 4 种材料相应的湿缓冲值。可以看出,CMPCM 材料的湿缓冲值的大小为 $1.57 \text{ g/m}^2 \% \text{RH}$,远高于其他 3 种实验材料。常用 5 个等级来评价湿缓冲值的大小,理想的湿缓冲值大小介于 $1 \sim 2 \text{ g/m}^2 \% \text{RH}$ 之间,一般的湿缓冲值大小介于 $0.5 \sim 1 \text{ g/m}^2 \% \text{RH}$ 之间,较差的湿缓冲值大小介于 $0.2 \sim 0.5 \text{ g/m}^2 \% \text{RH}$ 之间。可知 CMPCM 材料拥有理想的湿缓冲值,而其他 3 种实验材料的湿缓冲值均位于较差的湿缓冲值 $0.2 \sim 0.5 \text{ g/m}^2 \% \text{RH}$ 之间,为不理想的湿缓冲材料。CMPCM 材料中的 MPCM 微胶囊结构增大了复合材料的孔隙率,拥有更加细密的微孔洞结构的 CMPCM 材料在单位时间内比纯硅藻土材料能够吸取更多水蒸气,因

此,CMPCM 材料拥有更大的湿缓冲值。

表 4 CMPCM、石膏、木材、硅藻土材料的湿缓冲值

Table 4 MBV of CMPCM, gypsum, wood and diatomite

样品	湿缓冲值/ ($\text{g/m}^2 \% \text{RH}$)	样品	湿缓冲值/ ($\text{g/m}^2 \% \text{RH}$)
CMPCM	1.57	石膏	0.26
木材	0.40	硅藻土	0.33

3 结论

1) 相比于相变材料,相变微胶囊材料和复合相变调湿材料拥有更低的熔点、更高的凝固点和更小的过冷度。这些特性使他们能在升温环境中更低的温度条件下熔化吸热,降温环境中更高的温度条件下凝固放热,作为建筑调湿材料而言他们拥有更大的温度调控范围,使得相变微胶囊结构材料能够更好地适用于建筑节能领域。

2) 相变微胶囊材料和复合相变调湿材料的最大质量降解温度均高于相变材料,说明二氧化硅外壳既可以有效防止正在相变的相变材料发生外泄,起到环保和重复利用的作用;又可以有效保护作为芯材的相变材料,有效提高材料的着火点。另外,相变材料的蓄热能力最强,相变微胶囊材料次之,复合相变调湿材料蓄热能力最差,是由于硅藻土不具备相变能力,缺少的吸放热过程,导致含有硅藻土的复合相变调湿材料的潜热小于相变微胶囊材料和相变材料,即相变材料的含量正比于相变微胶囊材料和复合相变调湿材料的蓄热能力。

3) 相变微胶囊材料的传湿系数和湿缓冲值均远高于石膏、硅藻土和木材。因为相变微胶囊材料中的微胶囊结构增大了复合相变调湿材料的孔隙率,更加细密的多孔结构有助于水蒸气在材料内部的传递,因此,添加了相变微胶囊材料的复合相变调湿材料也同样具有更大的传湿系数;而复合相变调湿材料中的微胶囊结构增大了复合材料的孔隙率,拥有更加细密的微孔洞结构的复合相变调湿材料在单位时间内比纯硅藻土材料能够吸取更多的水蒸气,因此,复合相变调湿材料拥有更大的湿缓冲值。

复合调湿材料同时具备了相变材料和调湿材料的特性,无论是热性能还是湿性能,都要比单纯的相变材料或调湿材料更好。

参考文献:

- [1] QIN M H, BELARBI R, ALLARD F. Simulation of whole building coupled hydrothermal-air flow transfer in different climates [J]. Energy Conversion and Management, 2011,

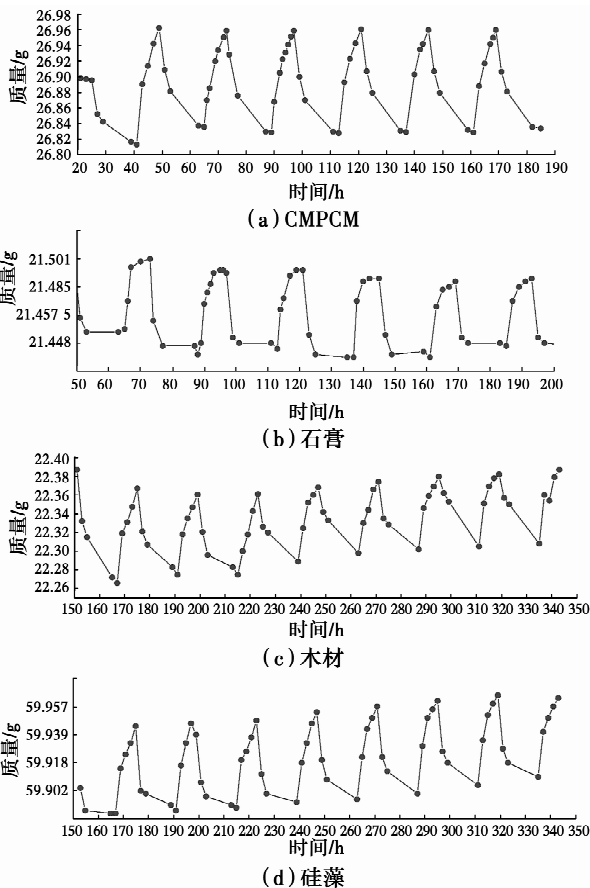


图 6 CMPCM、石膏、木材和硅藻土的质量变化曲线

Fig. 6 Mass change curve of the CMPCM, gypsum, wood, diatomite

- 52:1470-1478.
- [2] HASEGAWA T, IWASAKI S, SHILBUTANI Y, et al. Preparation of superior humidity-control materials from kenaf [J]. *Journal of Porous Materials*, 2009, 16(2): 129-134.
- [3] MARCHAND R D, KOHN S C L, MORRIS J C. Delivering energy efficiency and carbon reduction schemes in England: lessons from Green Deal Pioneer Places[J]. *Energy Policy*, 2015, 84:96-106.
- [4] MORIARTY P, HONNERY D. What is the global potential for renewable energy [J]. *Building and Environment*, 2012, 16:244-252.
- [5] RESCH G, HELD A, FABER T, et al. Potentials and prospects for renewable energies at global scale [J]. *Energy Policy*, 2008, 36:4048-4056.
- [6] RAFIDIARISON H, REMOND R, MOUGEL E. Dataset for validating 1-D heat and mass transfer models within building walls with hygroscopic materials [J]. *Building and Environment*, 2015, 89:356-368.
- [7] LELIEVRE D, COLINART T, GLOUANNEC P. Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: experimental and numerical analyses [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 84:617-627.
- [8] AL-SAADY S N, ZHA Z. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21: 659-673.
- [9] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16: 2118-2132.
- [10] CHEN Z, CHI L. Humidity sensors: A review of materials and mechanisms [J]. *Sensor Letters*, 2005, 3(4): 274-295.
- [11] BAETENS R, JELLE B P, GUSTAVSEN A. Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42: 1361-1368.
- [12] KARKRI M, LACHHEB M, ALBOUCHI F, et al. Thermal properties of smart microencapsulated paraffin/plaster composites for the thermal regulation of buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 88:183-192.
- [13] 方萍, 吴懿, 龚光彩. 多孔矿物调湿材料的微观结构与其吸湿性能[J]. *材料导报*, 2009, (Sup1):475-477.
FANG P, WU Y, GONG G C. Microstructure and sorption properties of porous mineral materials [J]. *Materials Review*, 2009, (Sup1):475-477. (in Chinese)
- [14] 吴懿. 调湿材料性能及其评价方法的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
WU Y. Research on the performance and evaluation methodology of hygroscopic materials [D]. Changsa: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [15] 孟多, 王立久. 脂肪酸/无机纳米颗粒基定形相变材料的制备与热性能[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(1):91.
MENG D, WANG L J. Preparation and thermal properties of fatty acid/inorganic nano-particle form-stable phase change material [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(1):91. (in Chinese)
- [16] 尚建丽, 王思, 董莉. PAR/POL/SOD复合微胶囊的制备及热湿性能研究[J]. *功能材料*, 2013, 44(8):1141.
SHANG J L, WANG S, DONG L. Prepared of PAR/POL/SOD composite- wall microencapsulated and research of energy storage and humidity-control performance [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(8): 1141. (in Chinese)
- [17] 张浩, 黄新杰, 宗志芳, 等. 细粒径 SiO₂ 基棕榈醇-棕榈酸-月桂酸微胶囊相变调湿材料的制备与性能[J]. *材料研究学报*, 2016(6):418-426.
ZHANG H, HUANG X J, ZONG Z F, et al. Preparation and properties of SiO₂ based hexadecanol-Palmitic acid-lauric acid microencapsulated phase change and humidity controlling materials with fine particle size [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2016(6): 418-426. (in Chinese)
- [18] CHEN Z, CAO L, FANG G, et al. Synthesis and characterization of microencapsulated paraffin microcapsules as shape-stabilized thermal energy storage materials [J]. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2013, 17:112-123.
- [19] CHEN Z, SU D, QIN M H, et al. Preparation and characteristics of composite phase change material (CPCM) with SiO₂ and diatomite as endothermal-hydroscopic material [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 86:1-6.
- [20] FANG G Y, CHEN Z, LI H. Synthesis and properties of microencapsulated paraffin composites with SiO₂ shell as thermal energy storage materials [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 163:154-159.
- [21] 孔伟, 杜玉成, 卜仓友, 等. 硅藻土基调湿材料的制备与性能研究[J]. *非金属矿*, 2011(1):57-59, 62.
KONG W, DU Y C, BU C Y, et al. Study on preparation and performance of diatomite-based humidity controlling materials [J]. *Non-Metallic Mines*, 2011(1):57-59, 62. (in Chinese)
- [22] 黄子硕, 于航, 张美玲. 建筑调湿材料吸放湿速度变化规律[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014(2):310-314.
HUANG Z S, YU H, ZHANG M L. Humidity-control materials and their humidity absorption and desorption rate variation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2014(2):310-314.