

基于微孔漂珠的相变微胶囊制备及其对砂浆力学和热性能影响

张家玮 黄玮 黄大建 李旭辉 马建虎 郑永

Preparation of phase change microcapsules based on microporous fly-ash cenosphere and its effect on the mechanical and thermal properties of mortar

ZHANG Jiawei, HUANG Wei, HUANG Dajian, LI Xuhui, MA Jianhu, ZHENG Yong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221027.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高温相变石蜡-脲醛树脂微胶囊的制备及表征

Preparation and characterization of high temperature phase change paraffin microcapsules with urea-formaldehyde resin shell materials

复合材料学报. 2017, 34(2): 284–290 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160523.005>

多壁碳纳米管/硬脂酸-十八醇@脲醛树脂微胶囊的制备及表征

Preparation and characterization of MWCNTs/stearic acid-octadecyl alcohol@urea formaldehyde resin phase change microencapsules

复合材料学报. 2019, 36(3): 730–738 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180911.006>

硫铝酸盐水泥基复合相变储能砂浆的制备及其性能

Preparation and properties of sulphoaluminate cement-based composite phase change storage mortar

复合材料学报. 2018, 35(8): 2124–2131 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170925.001>

高石蜡掺量相变水泥基复合材料的性能

Properties of phase change cementitious composites with high content paraffin

复合材料学报. 2018, 35(4): 980–988 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171201.001>

不同乳化剂作用下三聚氰胺-甲醛@正十八烷微胶囊相变复合材料微观形貌和热性能

Effect of different emulsifier on the micro-structure and thermal properties of melamine-formaldehyde@n-octadecane micro-encapsulated phase change composites

复合材料学报. 2017, 34(3): 661–667 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160523.025>

聚乙二醇改性相变微胶囊-木粉/高密度聚乙烯复合材料的制备与热性能

Preparation and thermal properties of WF/HDPE composites filled with microcapsules modified by polyethylene glycol

复合材料学报. 2017, 34(6): 1185–1190 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160919.005>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20221027.002

基于微孔漂珠的相变微胶囊制备及其对砂浆力学和热性能影响



分享本文

张家玮¹, 黄玮¹, 黄大建², 李旭辉¹, 马建虎¹, 郑永³

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 材料科学与工程学院, 兰州 730070;
3. 甘肃第三建设集团有限公司, 兰州 730030)

摘要: 为研究基于微孔漂珠的相变微胶囊对砂浆性能的影响, 采用真空吸附法, 以石蜡为芯材, 粉煤灰微孔漂珠为壁材制备复合相变微胶囊, 通过等体积代砂法将其加入砂浆中制成相变微胶囊储能砂浆。采用 SEM 分析复合相变微胶囊的微观形貌, 通过 DSC 和 TG 表征复合相变微胶囊的热性能, 并在此基础上研究复合相变微胶囊的引入对砂浆力学强度及温控性能的影响。结果表明: 制备的复合相变微胶囊具有良好的分散性、致密的表面及优异的循环稳定性; 复合相变微胶囊的引入使砂浆具备一定的温控性能, 当相变微胶囊掺量为 30% 时, 储能砂浆相比基准砂浆峰值温度最高下降 2.58℃, 峰值温度出现时间延迟 90 min; 由于漂珠具有良好的力学性能, 储能砂浆的强度随微胶囊掺量增加虽有所下降, 但仍满足规范要求。微胶囊储能砂浆具有良好的力学性能和优异的温控能力, 可应用在建筑中实现控温节能的目的。

关键词: 相变材料; 相变储能砂浆; 微胶囊; 粉煤灰漂珠; 微观结构; 力学性能; 热性能; 温控性能

中图分类号: TU528; TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)08-4703-17

Preparation of phase change microcapsules based on microporous fly-ash cenosphere
and its effect on the mechanical and thermal properties of mortar

ZHANG Jiawei¹, HUANG Wei¹, HUANG Dajian², LI Xuhui¹, MA Jianhu¹, ZHENG Yong³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. Gansu Third Construction Group CO., LTD., Lanzhou 730030, China)

Abstract: To investigate the effect of phase change microcapsules on the properties of mortar, we reported the high-performance composite phase change microcapsules using the vacuum adsorption method, where fly-ash cenosphere microporous served as a supporting skeleton and paraffin as a latent heat storage unit. The preparation phase change microcapsules were added to the mortar in equal volume sand substitution method to prepare energy storage mortars. The micro-morphology of the composite phase change microcapsules was analyzed by SEM image, and the thermal properties of the composite phase change microcapsules were characterized by DSC and TG. The influence of the introduction of the composite phase change microcapsules on the mechanical strength and temperature control performance of the mortar was studied. The test results show that the prepared composite phase change microcapsules have good dispersion ability, dense surface, and excellent cycle stability. In addition, introducing composite phase change microcapsules gives the mortar a certain temperature control performance.

收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2022-09-26; 录用日期: 2022-10-02; 网络首发时间: 2022-10-28 10:47:13
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221027.002>
基金项目: 国家自然科学基金 (52068043); 甘肃省建设科技攻关项目 (JKR2021-07); 甘肃省教育厅: 优秀研究生“创新之星”项目 (2022 CXZX-602); 兰州市人才创新创业项目 (2018-RC-57; 2019-RC-78)
National Natural Science Foundation of China (52068043); Gansu Province Construction Science and Technology Project (JKR2021-07); Gansu Provincial Department of Education: Excellent Graduate Student' Innovation Star' Project (2022 CXZX-602); Lanzhou Talent Innovation and Entrepreneur Ship Project (2018-RC-57; 2019-RC-78)
通信作者: 张家玮, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为 FRP 加固混凝土耐久性、绿色节能建筑 E-mail: zhangjd@mail.lzjtu.cn
引用格式: 张家玮, 黄玮, 黄大建, 等. 基于微孔漂珠的相变微胶囊制备及其对砂浆力学和热性能影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4703-4719.
ZHANG Jiawei, HUANG Wei, HUANG Dajian, et al. Preparation of phase change microcapsules based on microporous fly-ash cenosphere and its effect on the mechanical and thermal properties of mortar[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4703-4719(in Chinese).

Compared with the blank mortar, the peak temperature of the energy storage mortar with the phase change microcapsules content of 30% decreased by 2.58℃, and the appearance time of the peak temperature was also delayed by 90 min. The mechanical strength of the energy storage mortar decreases slightly with the increase of the microcapsules content, but still meets the standard requirements. The energy storage mortar developed in this study has better mechanical properties and excellent temperature-regulating ability, and it is equally amenable to temperature regulation and building energy conservation.

Keywords: phase change materials; phase change energy storage mortar; microcapsules; fly-ash cenosphere; microstructure; mechanical property; thermal performance; temperature control performance

绿色节能可持续是目前建筑材料发展的主要方向，据中国建筑节能协会发布的《中国建筑能耗研究报告(2020)》数据，全国建筑全过程碳排放总量为 49.97 亿吨，占碳排放总量的 49.97%^[1-2]。2022 年 3 月 1 日，住房和城乡建设部印发《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》，提出大力发展绿色低碳建筑^[3]。为遏制建筑能耗进一步增长，寻找一种提高建筑能源效率、减少建筑能源消耗和 CO₂ 排放的绿色建筑材料至关重要。

相变材料 (Phase change materials, PCM) 可通过相态变化，将热能以潜热的方式进行存储或释放。相变材料与砂浆、混凝土等建筑材料结合，可有效改善建筑材料热性能，从而减少建筑物室温波动和能源消耗，提高舒适度^[4-7]。目前，将相变材料引入建筑材料的方法主要有直接浸泡法、多孔骨料吸附法和封装法，但传统方法存在 PCM 易泄露、与建筑材料直接接触和材料强度下降大等缺点^[8-10]。而微胶囊封装法由于采用粒径小于 1 mm 的壳体对相变材料进行封装，可有效减少相变材料的泄露，且其因良好的相容性和较强的热传导性而被广泛应用^[11-14]。于文艳等^[15]采用正十八烷/密胺树脂微胶囊相变材料制备储能砂浆并测试其性能，发现储能砂浆具有良好的相变特性和热稳定性，并且储能调温能力明显。李进等^[16]等采用小颗粒陶粒封装石蜡制备石蜡微胶囊，发现高温下微胶囊不泄露，且石蜡微胶囊能降低砂浆导热系数和水化温度。大量研究发现，加入相变微胶囊后，建筑材料热性能得到一定的提高，但提高幅度有限^[17-18]。同时，微胶囊制备复杂，加入建筑材料后力学性能下降过大^[19-21]。

针对目前相变微胶囊存在的问题，本文采用三步法筛选出粉煤灰微孔漂珠，通过真空吸附法制备相变微胶囊，并通过等体积代砂法掺入水泥砂浆，制备相变微胶囊储能砂浆。使用 SEM 对相变微胶囊微观形貌进行观察；对不同相变微胶囊掺量的储能砂浆进行抗压和抗折强度测试；利用

DSC 和 TG 对相变微胶囊和相变微胶囊储能砂浆进行表征，并测试砂浆的比热容；在室外搭建试验箱，测试相变微胶囊储能砂浆温控性能。进而对相变微胶囊制备及其对砂浆性能影响进行系统的研究。

1 材料与方法

1.1 原材料

1.1.1 相变材料

采用广州中佳新材料科技公司生产的工业级相变石蜡作为微胶囊芯材，石蜡相变温度 20℃，比热容 2.0 J·(g·K)⁻¹，导热系数 0.2 W·(m·K)⁻¹，密度 0.88 g·mL⁻¹。图 1 为石蜡升/降温过程的 DSC 曲线。可以看出，石蜡起始融化温度 18.06℃，峰值温度 (T_m)22.19℃，相变潜热 (ΔH_m)181.80 J·g⁻¹。起始凝固温度 19.21℃，峰值温度 (T_c)16.65℃，相变潜热 (ΔH_c)178.90 J·g⁻¹。

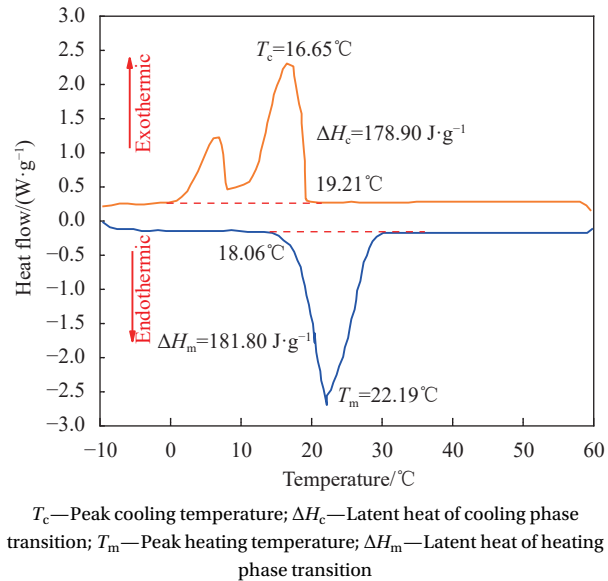


图 1 石蜡 DSC 曲线
Fig. 1 DSC curves of paraffin

1.1.2 漂珠

采用粉煤灰微孔漂珠作为微胶囊壁材，粉煤灰漂珠 (图 2) 由河南义翔新材料有限公司提供，粒径 0.15~0.45 mm，筒压强度 1 250 kPa，体积漂



图2 粉煤灰漂珠

Fig. 2 Fly-ash cenosphere

浮率 96.40%。漂珠化学成分由 XRD 测定 (表 1、图 3), 主要为 SiO₂(58.9%) 和 Al₂O₃(27.6%), 这与

砂和水泥中的成分相似, 即粉煤灰漂珠与砂浆具有良好的相容性。

为保证相变微胶囊不发生泄露, 采用 SiO₂ 溶胶和 Ca(OH)₂ 粉末对相变微胶囊进行封装。SiO₂ 溶胶采用郑州祥之达化工有限公司生产的 30% 含量的碱性硅溶胶。Ca(OH)₂ 采用甘肃奋力达有限公司提供的分析纯 Ca(OH)₂ 粉末。

1.1.3 水泥和砂

水泥采用甘肃省永登县祁连山水泥集团有限公司生产的 P·O 42.5 R 级普通硅酸盐水泥, 根据国家标准 GB/T 17671—2021^[22], 测得 3 天、28 天抗压强度分别为 24.8 MPa 和 52.5 MPa。

细集料采用细度模数为 3.0 的永登中砂, 表观密度 1 640 kg·m⁻³, 所使用中砂根据 GB/T 14684—2022^[23] 进行测定。

表 1 漂珠化学成分

Table 1 Chemical constituents of fly-ash cenosphere

									wt%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	Other	
58.9	27.6	5.5	3.1	1.6	1.2	0.9	0.6	0.6	

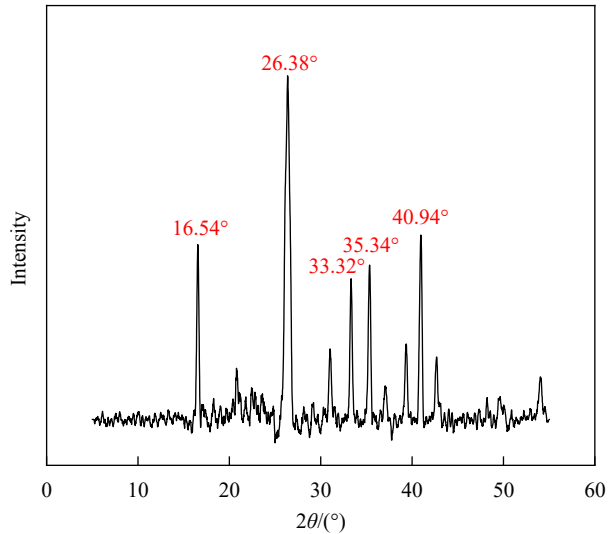


图3 粉煤灰漂珠 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of fly-ash cenosphere

1.2 微孔漂珠筛选

粉煤灰漂珠中含有完整、微孔、大孔、破碎的漂珠^[24], 其中微孔漂珠性质稳定, 可直接用于吸附相变材料。采用“三步法”从粉煤灰漂珠原料中筛选表面具有大量微孔的微孔漂珠 (图 4)。

具体步骤: (1) 将漂珠原料加水浸泡, 充分搅

拌后静置 24 h, 通过浮力使不同形态的漂珠分层, 上层为微孔漂珠和完整漂珠、下层为杂质、破碎漂珠及大孔漂珠; (2) 将水选后的上层漂珠放入 105℃ 烘箱烘干 24 h, 取出后加入藤原二级真空泵中抽真空, 真空度达到 -0.75 MPa 时关闭真空泵, 利用负压加载蒸馏水至淹没漂珠, 振荡后打开阀门使真空度为 0, 并静置 4 h; (3) 静置后漂珠分上下两层, 上层为未加载水的完整漂珠, 下层为加载水的微孔漂珠。取下层微孔漂珠放入 105℃ 烘箱烘干 24 h, 取出后即作为囊壁的微孔漂珠。

1.3 相变微胶囊制备

利用真空吸附的方法, 将相变石蜡通过漂珠壁上小孔加载至微孔漂珠内部, 制备成相变微胶囊 (图 5)。为保证漂珠对相变材料的吸附能力, 避免高温时石蜡从孔壁泄露流失, 影响相变微胶囊储能效果。使用和漂珠成分相同的 SiO₂ 溶胶进行封装, 并采用 Ca(OH)₂ 粉末吸附多余 SiO₂。

主要步骤: (1) 烘干后的微孔漂珠放入真空釜抽真空至真空度 -0.75 MPa, 打开阀门, 真空加载石蜡至淹没漂珠; (2) 振荡真空釜, 继续抽真空至真空度 -0.75 MPa, 打开阀门, 使空气进入真空釜, 静置 10 min; (3) 取出真空加载石蜡的微孔漂珠,

放入 30% 浓度 SiO_2 溶胶中浸泡 24 h 后加入少量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉末搅拌均匀，自然风干后即为基于

微孔漂珠的相变微胶囊。图 6 为相变微胶囊示意图。可见，封装后微胶囊没有相变材料浸出现象。

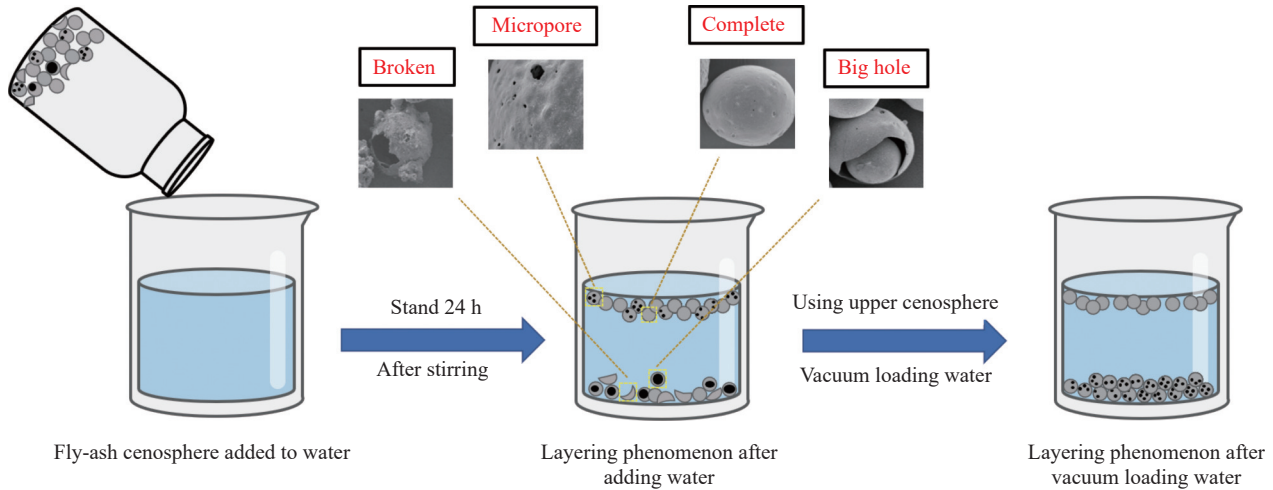


图 4 “三步法”筛选微孔漂珠
Fig. 4 'Three-step method' to prepare fly-ash micropore cenosphere

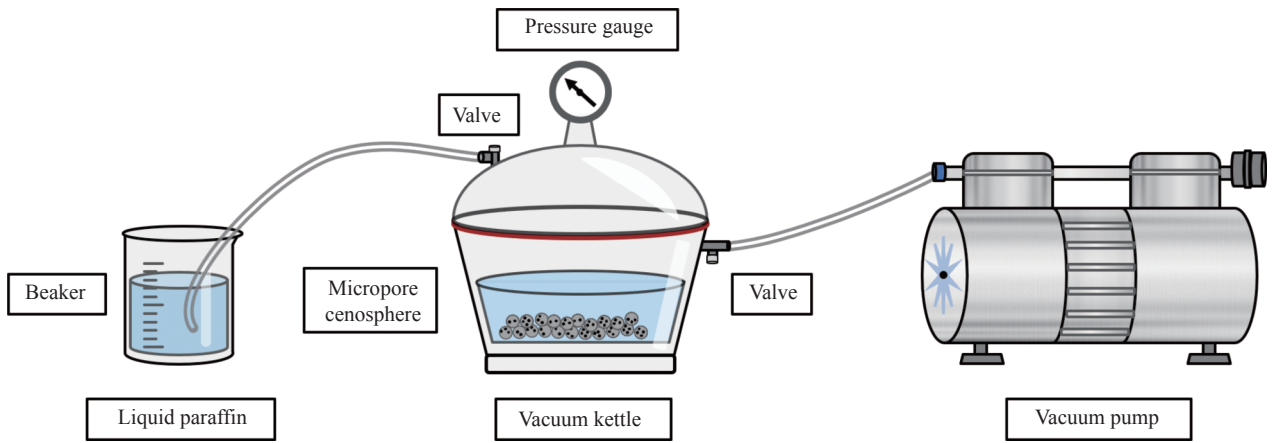


图 5 真空吸附法制备相变微胶囊
Fig. 5 Preparation of phase change microcapsules by vacuum adsorption

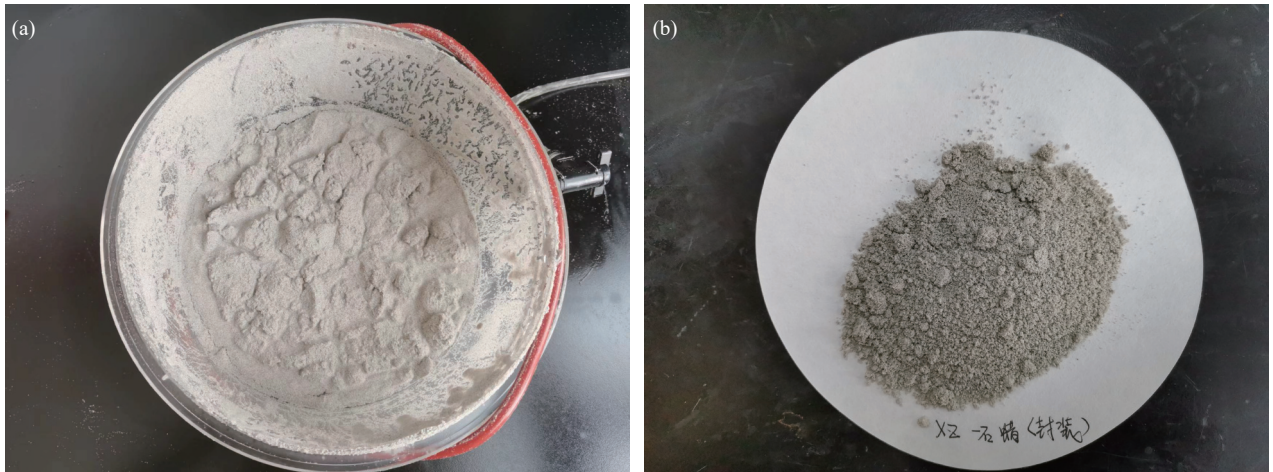


图 6 相变微胶囊示意图: (a) 未封装; (b) 封装后
Fig. 6 Phase change microcapsule diagram: (a) Unpackaged; (b) Encapsulated

制备出相变微胶囊后，测定微孔漂珠对石蜡的负载率(表 2)。可以看出，微孔漂珠对石蜡的负载率为 78.52%，石蜡质量占相变微胶囊质量的 43.9%。

表 2 微孔漂珠对石蜡的负载率
Table 2 Paraffin adsorption rate of microporous cenosphere

Microporous cenosphere quality/g	Quality of phase change microcapsules after adsorption of paraffin wax/g			Average value/g	Paraffin loading rate/%
20.00	35.72	35.82	35.57	35.70	78.52

1.4 相变微胶囊储能砂浆制备

采用“等体积代砂法”制备相变微胶囊储能砂浆(图 7)，等体积代砂法是将制备的相变微胶囊按照等体积代替部分中砂的方式添加至砂浆中，砂浆的配合比见表 3。相变微胶囊的体积分别为砂体积的 0%、10%、15%、25% 和 30%，编号 SJ-P0 为未添加相变微胶囊的基准砂浆试件，编号 SJ-P10 为相变微胶囊代替 10% 体积制备成的砂浆试件，其他编号以此类推。

采用 40 mm×40 mm×160 mm、70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的铸铁砂浆模具及 400 mm×400 mm×40 mm 定制模具。将制备完成的砂浆添入模具内，并通过振捣台振捣平整。室温静置

24 h 后脱模，置于 20℃，湿度 90% 的 HBY-40 型水泥混凝土恒温恒湿标准养护箱，分别养护 7 天和 28 天。40 mm×40 mm×160 mm 试件用于砂浆抗折试验，70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 试件用于砂浆抗压试验，400 mm×400 mm×40 mm 试件用于砂浆温控性能试验。

1.5 试验测试

采用 JSM-6701 F 型扫描电子显微镜 (SEM) 对漂珠原料、微孔漂珠和相变微胶囊的微观形貌进行观察；采用耐驰 DSC-214 差示扫描量热仪 (DSC) 在氮气保护环境下，以每分钟升温 (降温)5℃ 的速率在-10℃~60℃ 温度范围内，分析相变材料及相变微胶囊的相变温度、相变潜热；采用耐驰

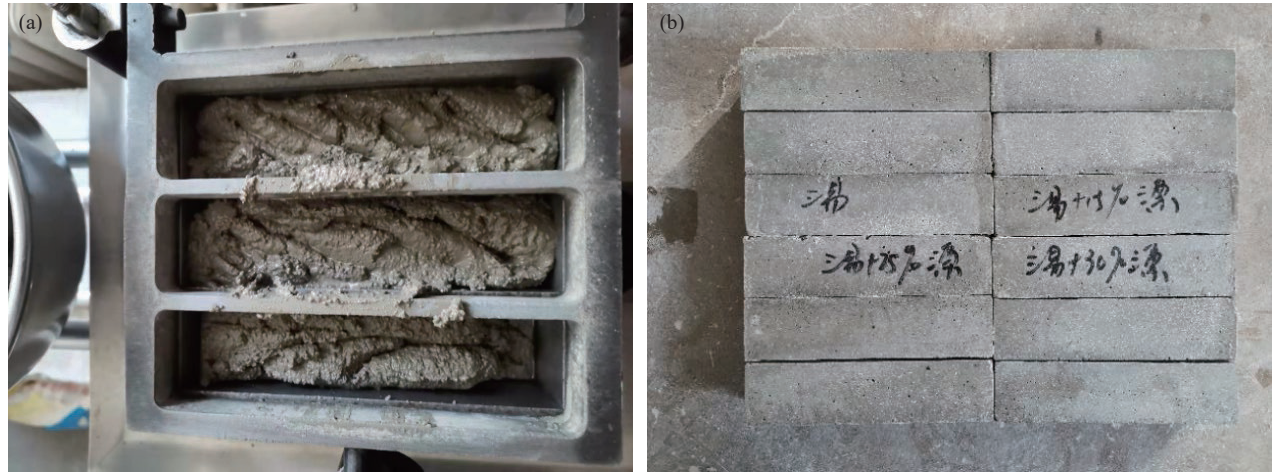


图 7 相变微胶囊储能砂浆制备
Fig. 7 Preparation diagram of phase change microcapsule energy storage mortar

表 3 砂浆配合比
Table 3 Mix proportion of mortar

Sample number	Cement/(kg·m ⁻³)	Water/(kg·m ⁻³)	Medium sand/(kg·m ⁻³)	Phase change microcapsule/(kg·m ⁻³)
SJ-P0	450	225	1 350.0	0
SJ-P10	450	225	1 215.0	42.6
SJ-P15	450	225	1 147.5	63.9
SJ-P25	450	225	1 012.5	106.5
SJ-P30	450	225	945.0	127.8

STA-449 热重分析仪 (TG) 在氮气保护下, 以每分钟升温 (降温)5℃ 的速率在室温~500℃ 温度范围内, 分析相变微胶囊的热稳定性; 采用将相变微胶囊放入 30℃ 的水浴锅中加热 30 min 取出, 再放入冰箱中冷冻 30 min 的方式进行一次相变循环, 经过 0、30、60、90、120 次相变循环后测定其质量和相变潜热的变化情况, 得出相变微胶囊的相变循环稳定性; 采用建仪 TYE-300 水泥抗折抗压试验机测试砂浆试件的抗折和抗压强度, 强度测试参照规范 JGJ/T 70—2009^[25]; 采用蓝宝石法, 利用耐驰 DSC-214 差示扫描量热仪在氮气保护环境下, 以每分钟升温 (降温)5℃ 的速率在-10~100℃ 温度范围内, 分别测试空坩埚、蓝宝石标样和待测试样, 得出相变微胶囊储能砂浆比热容。

图 8 为基准砂浆及 30% 掺量相变微胶囊储能砂浆温控性能试验箱^[26-27], 试验箱外部尺寸 400 mm×400 mm×400 mm, 2021-10-07~2021-10-12 放置于室外环境进行测试。如图 9 所示, 试验箱



图 8 基准砂浆和 30% 掺量相变微胶囊储能砂浆温控性能试验箱
Fig. 8 Reference mortar temperature control performance test box and the 30% phase change microcapsule energy storage mortar temperature control performance test box

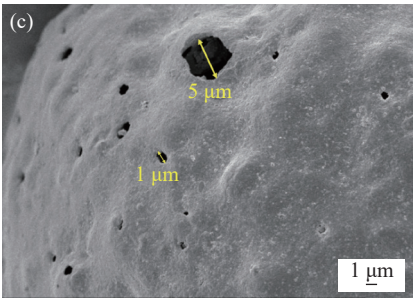
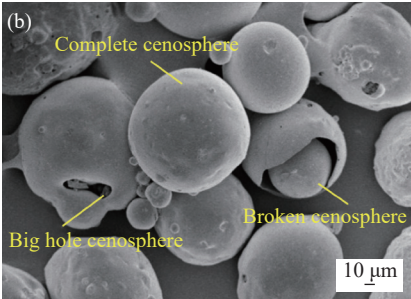
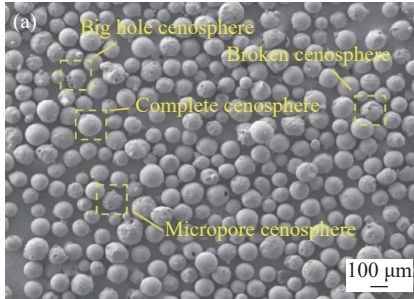


图 10 SEM 图像: ((a), (b)) 粉煤灰漂珠; (c) 微孔漂珠
Fig. 10 SEM images: ((a), (b)) Fly-ash cenosphere; (c) Microporous cenosphere

室内中心及室外布置 PT100 型温度传感器和托普瑞 TP2305 V2 型湿度传感器, 室外布置 TBQ-2 太阳总辐射仪, 采用托普瑞 TP700 多路数据记录仪对温湿度和太阳辐射数据进行间隔 10 min 的记录。

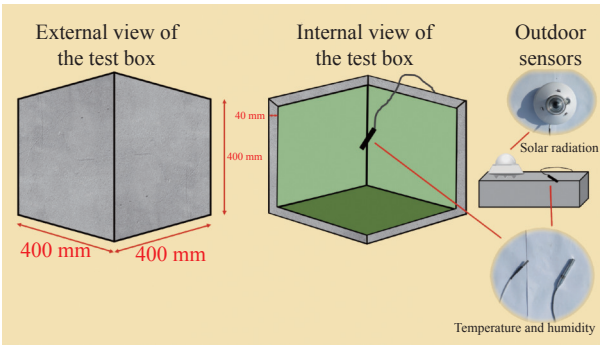


图 9 温控性能试验箱尺寸及传感器分布
Fig. 9 Temperature control performance test box size and sensor distribution

2 结果与分析

2.1 微观形貌

图 10 为粉煤灰漂珠原料 SEM 图像。从图 10(a)、图 10(b) 可以观察到, 粉煤灰漂珠外观为纯净的不透明状的光滑球体, 粒径大小约 0.15~0.45 mm 且分布较均匀。漂珠中包含完整、微孔、大孔和破碎的漂珠, 完整漂珠粒径较小, 呈现规整的球形颗粒形状, 表面较光滑、颜色较浅。微孔漂珠粒径略大于完整漂珠, 表面含有微小孔隙, 可为吸附相变材料提供通道。大孔和破碎漂珠的孔径和开口较大, 没有形成完整的密闭空间, 不能吸附相变材料。

图 10(c) 为微孔漂珠 SEM 图像。可以观察到, 微孔漂珠为不透明球体, 表面分布着大小不一、数量不等且贯通的孔隙通道, 孔隙直径为 1~5 μm, 孔隙直径较小, 不影响整个微孔漂珠完整性, 相变材料可通过孔隙进入漂珠内部中空腔体, 且微

孔存在毛细孔力和表面张力，可限制相变材料由孔隙泄露。

图 11 为石蜡微胶囊 SEM 图像。从图 11(a) 可以观察到，微孔漂珠对石蜡进行真空吸附后，其本身结构不发生变化，仍为较规整的球体。相变微胶囊颗粒之间没有形成团簇现象，分散性良好，表面大部分微孔已经消失，说明微孔漂珠吸附了

大量的相变材料。从图 11(b) 可以观察到，封装后的相变微胶囊分散性良好，没有明显的团聚现象。从图 11(c) 可以观察到，相变微胶囊经过封装之后，表面已经观察不到孔隙通道的存在，封装后其表面形成一层致密且均匀的涂层，涂层上的 SiO₂ 在掺入砂浆后与 Ca(OH)₂ 反应生成 C-S-H 凝胶，增加微胶囊和砂浆的粘结性。

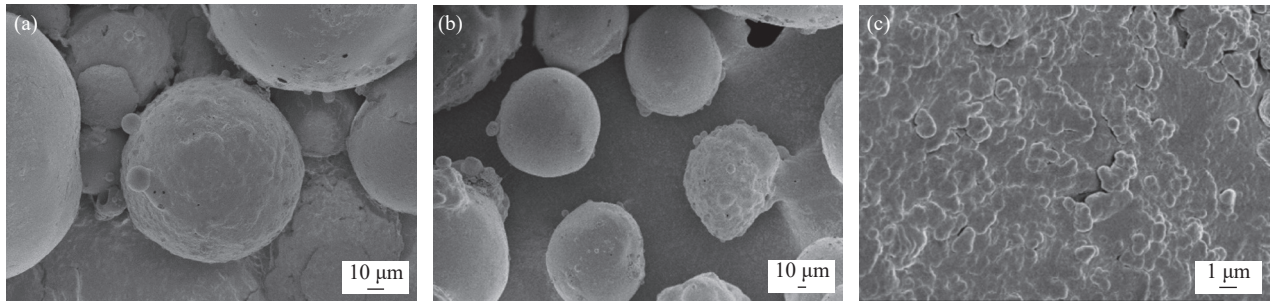


图 11 SEM 图像：(a) 未封装石蜡微胶囊；((b), (c)) 已封装石蜡微胶囊

Fig. 11 SEM images: (a) Unpackaged paraffin microcapsules; ((b), (c)) Encapsulated paraffin microcapsules

2.2 力学性能

2.2.1 砂浆抗折强度

图 12 为砂浆抗折试验图。由图 12(a)、图 12(b) 可见，基准砂浆试件破坏断面与加载方向呈 3% 的倾斜角度，断面较平整；相变微胶囊储砂浆试件破坏断面与加载方向呈 5% 倾斜角度，断面不平整且较粗糙。但不论何种掺量的相变储能微胶囊砂浆试件，均未发现相变微胶囊颗粒从砂浆表面脱落的现象。结合图 11(b) 相变微胶囊 SEM 图像，可以看出，相变微胶囊在抗折试件表面分散均匀，与水泥砂浆基体界面结合状况良好。

图 13 为不同相变微胶囊掺量的砂浆 7 天、28 天抗折强度。基准砂浆的 7 天、28 天抗折强度分别为 6.6 MPa、8.0 MPa，相变微胶囊储能砂浆相变微胶囊替代率为 10%、15%、25%、30% 时，7

天抗折强度分别为 6.3 MPa、5.9 MPa、5.3 MPa、5.0 MPa，分别降低 4.5%、10.6%、19.7%、24.2%。28 天抗折强度分别为 7.8 MPa、7.6 MPa、7.3 MPa、7.2 MPa，分别降低 2.5%、5%、8.8%、10%。可以看出，相变微胶囊的掺量对砂浆抗折强度会产生一定影响，随着相变微胶囊掺量的增加，砂浆试件 7 天、28 天的抗折强度均呈下降趋势，且掺量对砂浆早期强度的形成影响较大。

2.2.2 砂浆抗压强度

图 14 为砂浆抗压试验图。基准砂浆和相变微胶囊储能砂浆试件受压后的破坏形态没有出现较大的差异性，均形成上下对称的“四角锥体”破坏截面。从剥落的试件中并未发现单个的相变微胶囊颗粒，与抗折试件类似的，可以观察到相变微胶囊较均匀的分散在砂浆受压试件破坏截面上，与砂浆基体界面结合良好。

图 15 为砂浆 7 天、28 天抗压强度曲线。可以看出，抗压强度与抗折强度均随相变微胶囊掺量的增加而下降。基准砂浆的 7 天、28 天抗压强度分别为 35.1 MPa、51.8 MPa，当相变微胶囊储能砂浆中相变微胶囊替代率为 10%、15%、25%、30% 时，对应的砂浆 7 天抗压强度分别为 31.9 MPa、29.5 MPa、25.3 MPa、23.9 MPa，分别下降 12.84%、19.67%、30.60%、34.97%；28 天的抗压强度分别为 48.8 MPa、46.2 MPa、43.7 MPa、42.1 MPa，分别下降 6.15%、10.86%、15.78%、



图 12 砂浆试件抗折试验图：(a) 基准砂浆试件破坏断面；(b) 相变微胶囊储能砂浆试件破坏断面

Fig. 12 Flexural test mortar specimen diagram: (a) Reference mortar specimen failure section; (b) Phase change microcapsule energy storage mortar specimen failure section

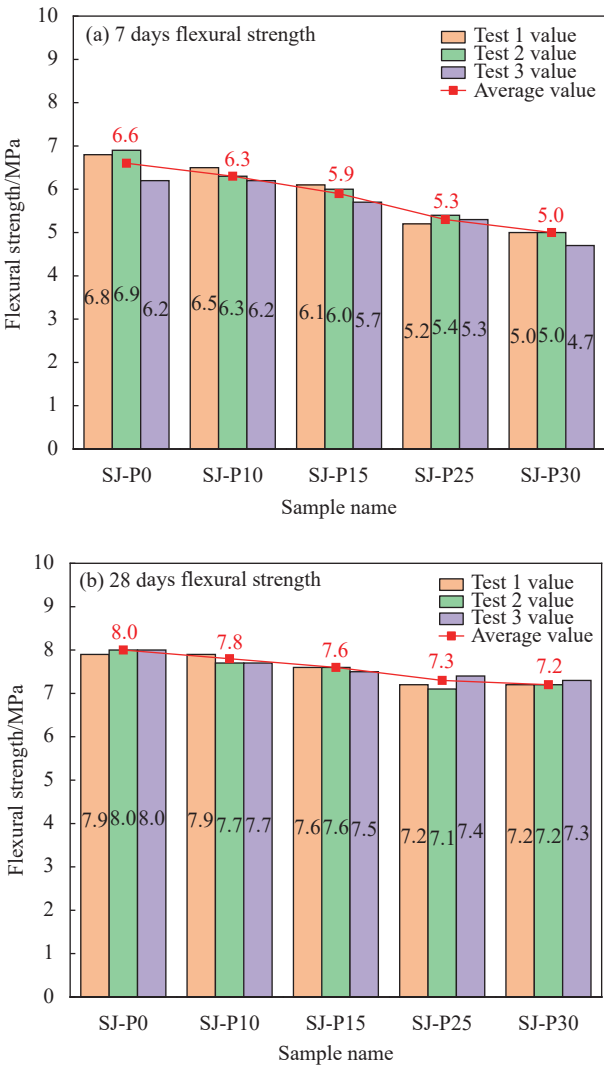


图 13 砂浆抗折强度: (a) 7 天; (b) 28 天

Fig. 13 Mortar flexural strength: (a) 7 days; (b) 28 days

19.78%。基准砂浆和相变微胶囊储能砂浆 28 天抗压强度最小差值为 3 MPa，此时相变微胶囊掺量 10%。最大差值为 9.7 MPa，此时相变微胶囊掺量 30%。

在相同测试条件下，砂浆的抗折强度和抗压强度均随微胶囊的掺量增大而减小，最低强度均出现在 30% 掺量时。7 天抗折和抗压强度最大差值分别为 1.6 MPa、8 MPa，分别降低 24.2%、34.97%，28 天抗折和抗压强度最大差值分别为 0.8 MPa、6.7 MPa，分别降低 10%、19.78%。值得注意的是，在 30% 微胶囊掺量的范围内，本文相变微胶囊储能砂浆最高强度的下降幅度，低于同类研究中复合相变材料最大掺量下储能砂浆的强度下降幅度^[15,28-30]。

强度降低主要有以下几个原因。相变微胶囊

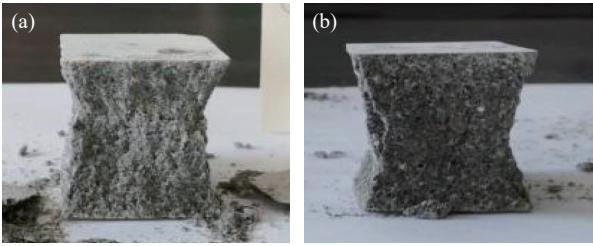


图 14 砂浆试件抗压试验图: (a) 基准砂浆试件; (b) 相变微胶囊储能砂浆试件

Fig. 14 Compressive test of mortar specimen diagram: (a) Benchmark mortar specimen; (b) Phase change microcapsule energy storage mortar specimen

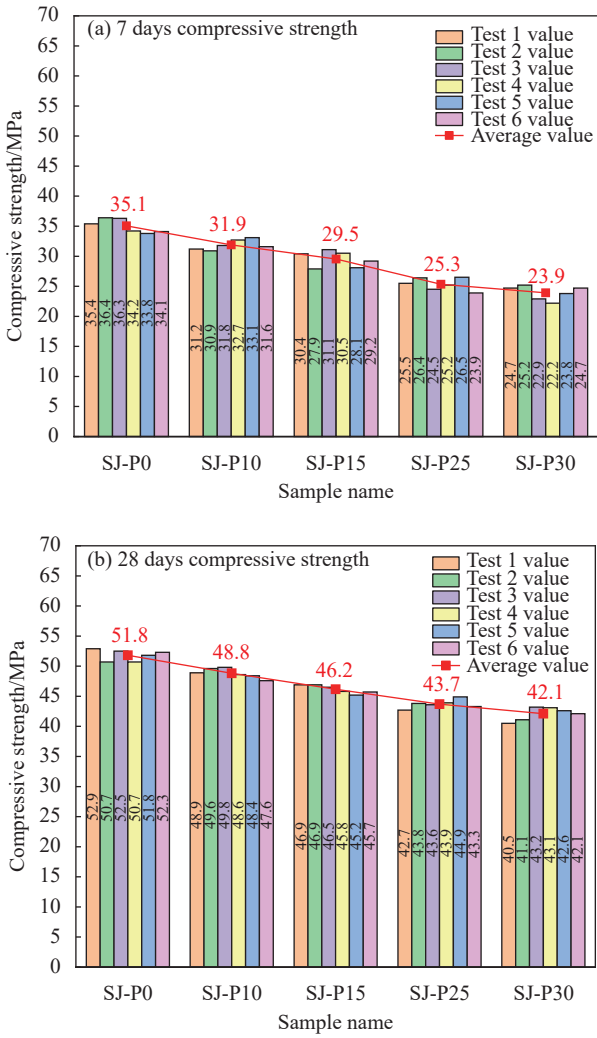


图 15 砂浆抗压强度: (a) 7 天; (b) 28 天

Fig. 15 Mortar compressive strength: (a) 7 days; (b) 28 days

的强度取决于微孔漂珠的力学强度，但微孔漂珠强度低于中砂的强度，随着中砂被替代量的增加，砂浆试件强度损失逐渐增加，相变微胶囊储能砂浆强度降低；其次，相变微胶囊体积密度远小于中砂的体积密度，细集料密度越低，填充和骨架

作用越差，砂浆强度越低；同时，在微孔漂珠真空吸附相变材料、制备相变微胶囊储能砂浆及砂浆振捣成型的过程中，相变微胶囊可能会破裂，导致内部的相变材料泄露，泄露的相变材料会隔绝水泥和水接触，延缓水泥水化反应，同时破坏细集料与水泥浆体之间的界面粘结力，使砂浆早期强度下降幅度大于后期强度，这与之前的研究结果有着相似性^[24,29,31-33]。

规范 GB/T 50574—2010^[34] 规定，普通砌筑砂浆强度应大于 5 MPa，内墙抹灰砂浆强度应大于 5 MPa，外墙抹灰砂浆在采暖地区应大于 10 MPa，非采暖地区应大于 7.5 MPa。相变微胶囊储能砂浆抗压强度最小值出现在 SJ-P30 掺量中，抗压强度为 42.1 MPa，远大于 GB/T 50574—2010^[34] 中规定的最小值，因此本文中出现的不同掺量相变微胶囊储能砂浆完全满足规范规定的砌筑和抹灰砂浆的强度要求。

2.2.3 砂浆韧性

图 16 为砂浆压折强度比。可以看出，随着相比微胶囊掺量的增加，砂浆的 7 天、28 天龄期的压折比均呈现出逐渐降低的趋势。基准砂浆的 7 天、28 天压折比为 5.30、6.50；相变微胶囊储能砂浆试块相变微胶囊替代率为 10%、15%、25%、30% 时，7 天的压折比分别为 5.10、5.00、4.80、4.60，相对于基准砂浆的压折比分别减小了 8.77%、10.22%、13.65%、14.23%；28 天的压折比分别为 6.30、6.10、6.00、5.80，相对于基准砂浆的压折比分别降低了 3.45%、5.58%、6.77%、9.77%。

根据 Griffith 断裂力学原理^[35-36]，相变储能砂浆压折比越高，砂浆的脆性越大。这表明随着相变微胶囊的掺入，砂浆的脆性逐渐降低，韧性得到显著改善，这与图 12 和图 14 中砂浆抗折和抗压试验中破坏时的现象一致。

2.3 热工性能

2.3.1 相变微胶囊循环稳定性

表 4 为相变循环后微胶囊的质量和潜热，图 17 为相变循环后质量及潜热损失率。由表 4 及图 17

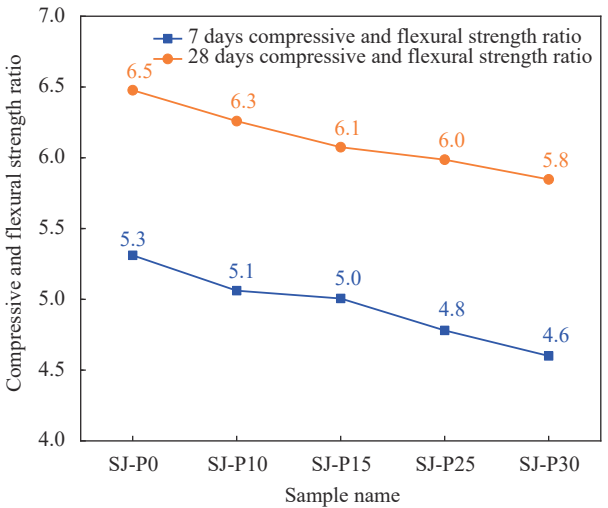


图 16 砂浆压折强度比

Fig. 16 Mortar compressive strength and flexural strength ratio

可以看出，随着相变循环次数的增加，相变微胶囊的质量损失均逐渐增大。经过 0、30、60、90、120 次的相变循环后，相变微胶囊的质量分别为 20.00 g、19.89 g、19.85 g、19.82 g、19.81 g，质量损失率为 0.55%、0.75%、0.90%、0.95%。这表明经历相变循环后，相变微胶囊质量稳定性较好，质量损失较小。随着相变循环次数的增加，相变微胶囊的相变潜热逐渐减小；经过 0、30、60、90、120 次相变循环后，相变微胶囊的潜热分别为 60.08 J·g⁻¹、59.77 J·g⁻¹、59.62 J·g⁻¹、59.56 J·g⁻¹、59.55 J·g⁻¹，潜热损失率为 0.52%、0.77%、0.87%、0.88%，这表明经历相变循环后，相变微胶囊潜热稳定性较好，相变微胶囊潜热损失较小。由相变微胶囊相变循环后的质量和潜热可以看出，制备的相变微胶囊均具有良好的相变循环稳定性，能够满足建筑耐久的要求。

2.3.2 利用 TG 分析相变微胶囊热稳定性

图 18 为石蜡和相变微胶囊在 20~500℃ 温度范围内的热重曲线。由图 18(a) 可以看出，温度升高至 150℃ 左右时，石蜡开始失重分解，温度在 150~221.1℃ 之间为石蜡的缓慢失重阶段，石蜡中少量的挥发性杂质受热分解。温度在 221.1~259.3℃

表 4 微胶囊相变循环后质量及潜热

Description of sample	Phase change cycle times				
	0	30	60	90	120
Latent heat of phase change/(J·g ⁻¹)	60.08	59.77	59.62	59.56	59.55
Quality loss/g	20.00	19.89	19.85	19.82	19.81

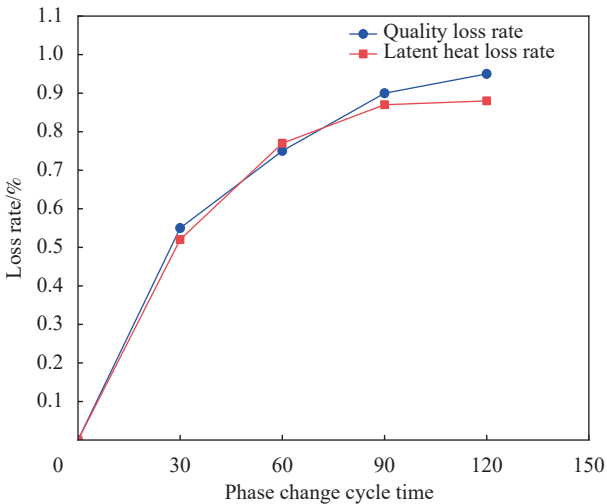


图 17 微胶囊相变循环后质量及潜热损失率

Fig. 17 Quality and latent heat loss rate of phase change microcapsule after phase change cycle

为石蜡的快速失重阶段，259.3℃ 时石蜡的失重率达到最大值接近 100%。温度在 260~500℃ 之间为石蜡的终止失重阶段，质量损失率趋于平稳，500℃ 时的质量损失率为 100.04%，石蜡失重完全。由图 18(b) 可以看出，相变微胶囊在 40~150℃ 时，开始第一阶段失重，在此阶段质量损失约为 6%，这是封装材料的分解挥发所致。温度在 206~247.9℃ 时，相变微胶囊开始快速失重，在此期间质量损失 45.07%，这主要是石蜡的分解和挥发。当温度升至 406.7℃ 时，相变微胶囊开始第三次失重阶段，在此期间质量损失为 14.44%，主要为漂珠的部分成分受热分解所致，温度达到 500℃，进入终止失重阶段，最终残留质量为 34.49%。

这表明，在温度低于 150℃ 时相变微胶囊几乎不会发生失重行为。温度高于 150℃ 时，相变微胶囊发生第一阶段的失重行为，即为快速失重阶段，质量损失主要为石蜡的分解挥发所致。温度超过 400℃ 时发生第二阶段的失重行为，质量损失主要为漂珠的部分成分受热分解。由此可知，相变微胶囊在温度低于 150℃ 环境中具有良好的热稳定性，几乎不会出现质量损失的现象，满足建筑节能的需求。

2.3.3 相变储能砂浆比热容

图 19 为不同相变微胶囊掺量的砂浆比热容数据。可以看出，随着相变微胶囊的掺量的增加，相变微胶囊储能砂浆的比热容也随之增大。当掺量为 0%、10%、15%、25%、30% 时，相变微胶囊储能砂浆的比热容分别为 0.54 J·(g·K)⁻¹、0.76 J·(g·K)⁻¹、

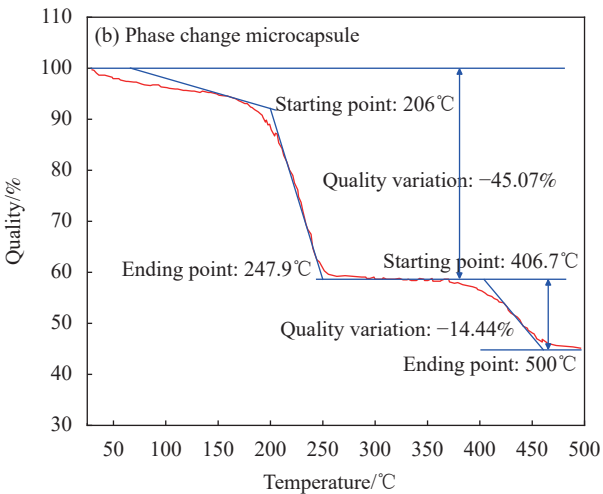
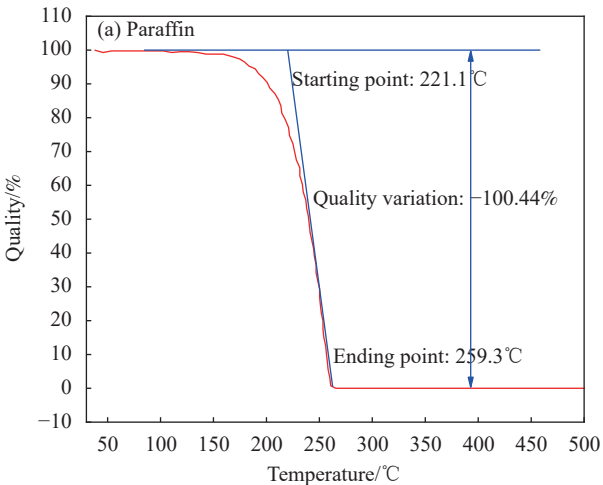


图 18 TG 曲线: (a) 石蜡; (b) 相变微胶囊

Fig. 18 TG curves: (a) Paraffin; (b) Phase change microcapsules

0.83 J·(g·K)⁻¹、0.95 J·(g·K)⁻¹、1.04 J·(g·K)⁻¹，相对于基准砂浆分别提高了 40.74%、53.70%、75.93%、92.59%。这表明相变微胶囊的掺入能够显著提高砂浆的比热容，增强砂浆的热能储存能力，改善砂浆的蓄热、放热性能。

相变微胶囊中的石蜡具有较高的比热容，因此砂浆中相变微胶囊掺量越多，石蜡含量越高，相变过程中吸收的热量也越多，即相变储能砂浆比热容越大。其次，相变微胶囊的体积密度 (532.5 kg·m⁻³) 远小于中砂的体积密度 (1 640 kg·m⁻³)，掺入砂浆后会引入砂浆体积密度的降低，当体积不变时，比热容与密度成反比，因此随着相变微胶囊掺量增加，体积密度减小，比热容随之增大。

2.3.4 利用 DSC 分析相变储能砂浆热稳定性

图 20(a) 和图 20(b) 分别为基准砂浆 (SJ-P0) 和 30% 相变微胶囊掺量的砂浆 (SJ-P30) DSC 曲线。从

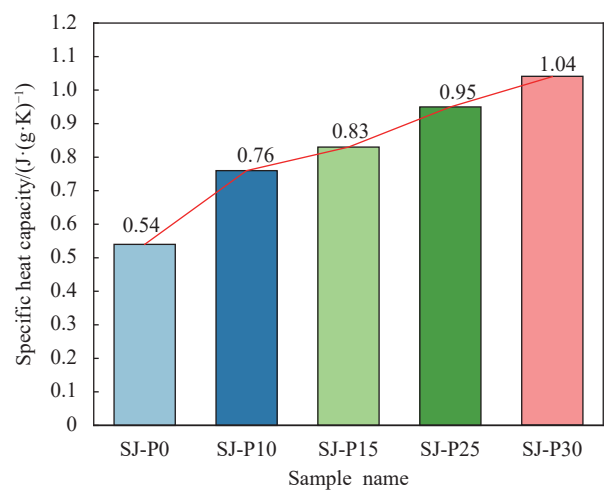


图 19 不同相变微胶囊掺量砂浆比热容

Fig. 19 Specific heat capacity of mortar of different dosage of phase change microcapsules

图 20(a) 可以看出基准砂浆在升温和降温过程中的热流变化曲线是一条近似光滑的曲线，没有出现明显的吸/放热特征峰，表明基准砂浆不具有蓄热调温的能力。由图 20(b) 可以看出，相变储能砂浆 SJ-P30 在升/降温过程中出现明显的吸/放热峰，即存在潜热相变的过程。SJ-P30 降温过程的起始凝固温度 18.86℃，峰值温度为 16.84℃，相变潜热为 18.74 J·g⁻¹；升温过程中起始融化温度 20.19℃，峰值温度为 23.19℃，相变潜热为 19.18 J·g⁻¹。表 5、表 6 为相变微胶囊储能砂浆降/升温 DSC 测试的结果。相变微胶囊掺量为 10%、15%、25%、30% 的储能砂浆在降温过程相变潜热分别为 5.39 J·g⁻¹、8.19 J·g⁻¹、14.45 J·g⁻¹、18.74 J·g⁻¹，在升温过程中相变潜热分别为 6.67 J·g⁻¹、9.42 J·g⁻¹、15.81 J·g⁻¹、19.18 J·g⁻¹。可以看出，随着相变微胶囊掺量的增加，相变微胶囊储能砂浆的相变潜热呈现逐渐增大的趋势。相变潜热最大时分别为 19.18 J·g⁻¹ 和 18.74 J·g⁻¹，此时相变微胶囊掺量为 30%。这说明在砂浆中加入相变微胶囊，可以增加砂浆的储能能力，并且相变微胶囊掺量越高，相变潜热越大，储能能力越强。

由图 20(c) 可以看出，相变微胶囊储能砂浆的起始融化温度比相变微胶囊高，且峰值温度也比相变微胶囊高。这是由于石蜡发生相变的过程是在微孔漂珠内部进行的，其受到漂珠壳体的包裹而不能自由流动，相变微胶囊颗粒被水泥浆体包裹导致热流的传递先经过砂浆受热后将热量传递给漂珠壳体，壳体受热后才能将热量传递给石蜡，

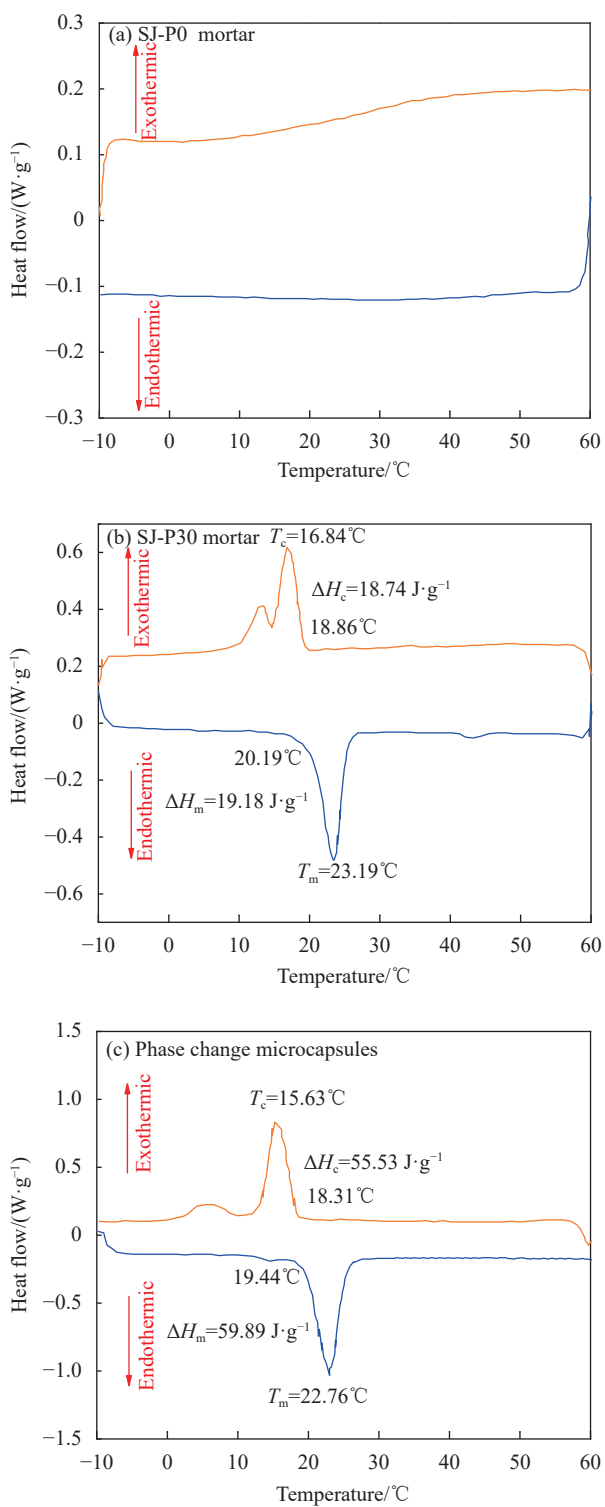


图 20 DSC 曲线：(a) SJ-P0 砂浆；(b) SJ-P30 砂浆；(c) 相变微胶囊
Fig. 20 DSC curves: (a) SJ-P0 mortar; (b) SJ-P30 mortar; (c) Phase change microcapsules

热量的传递过程延长使传热行为得到了弱化，因此相变储能砂浆的相变温度升高；而降温过程与之相反，导致相变微胶囊储能砂浆相变凝固温度低于相变微胶囊的起始凝固温度。同时，储能砂

表 5 相变微胶囊储能砂浆降温过程 DSC 测试结果

Table 5 DSC test results of cooling process of phase change microcapsule energy storage mortar

Sample number	Initial solidification temperature/℃	Phase transition peak temperature/℃	Phase change latent heat/(J·g ⁻¹)
SJ-10	18.44	16.69	5.39
SJ-15	18.39	16.75	8.19
SJ-25	18.97	16.80	14.45
SJ-30	18.86	16.84	18.74

表 6 相变微胶囊储能砂浆升温过程 DSC 测试结果

Table 6 DSC test results of heating process of phase change microcapsule energy storage mortar

Sample number	Initial melting temperature/℃	Phase transition peak temperature/℃	Phase change latent heat/(J·g ⁻¹)
SJ-10	19.69	22.64	6.67
SJ-15	19.77	22.73	9.42
SJ-25	20.32	23.27	15.81
SJ-30	20.19	23.19	19.18

浆潜热低于相变微胶囊潜热，这是由相变微胶囊掺量决定的，掺量越多，同一体积砂浆中所含的微胶囊越多，相变潜热越大。由图 20(c) 和图 1 可以看出，相变微胶囊起始融化温度比石蜡高，并且峰值温度也比石蜡高，这是由于热量是漂珠壳体传递给石蜡的，热量传递过程比石蜡直接受热长，因此相变微胶囊相变温度高于石蜡；相反的，降温过程中由于微胶囊中的石蜡要经过漂珠外壳传递热量，因此相变微胶囊起始凝固温度比石蜡低。

2.4 温控性能

图 21 为 2021-10-07 至 2021-10-12 室外环境的太阳辐射、温度及湿度变化。可以看出，太阳辐射强度与太阳照射角度和时间相关。开始日出后太阳辐射量从 0 开始增长，在每日下午 13:00 左右达到峰值，随后逐步下降，在日落后 18:30 左右降为 0。且太阳辐射与天气情况相关，晴天太阳辐射值最高可达 826.2 W·m⁻²(2021-10-10, 12:50)。阴天太阳辐射值最高仅有 162.45 W·m⁻²(2021-10-09, 09:50)。

室外环境湿度受太阳辐射强度影响较大，当日天气晴朗，太阳辐射强度高，环境湿度下降明显，峰值低；当日天气多云或阴，太阳辐射强度低，环境湿度上升，峰值高。如 2021-10-10 太阳辐射强度峰值为 826.2 W·m⁻²，当日环境湿度受太阳辐射强度影响波动较大，最低峰值湿度为 42.5%，与太阳辐射强度峰值出现时间相同；2021-10-09 太阳辐射强度峰值为 162.45 W·m⁻²，比 2021-10-10 低 663.75 W·m⁻²，当日环境湿度波动较小，维持在 53% 上下，最低峰值为 52.6%，相较 2021-

10-10 高 10.1%。即当日太阳辐射量会影响环境温度和湿度，且与温度正相关，与湿度负相关。

图 22 和表 7 为 2021-10-07 至 2021-10-12 室外环境、SJ-P0 和 SJ-P30 试验箱温度数据。可知，两试验箱温度均随环境温度变化，且两试验箱峰值温度和峰值温度出现时间均滞后于环境温度。与 SJ-P0 试验箱相比，SJ-P30 试验箱在升温过程中经过 20℃ 后发生相变吸热，对环境中的热能进行潜热储能，最高峰值温度比没有相变作用的 SJ-P0 试验箱低，峰值高温出现时间较晚；SJ-P30 试验箱在降温过程中经过 20℃ 后发生相变放热，对砂浆中的热能进行潜热释能，最低峰值温度比 SJ-P0 试验箱高，峰值低温出现时间也较晚。

特别的，2021-10-09 全天为阴天，气温低于 20℃。由于前一日(2021-10-08)砂浆板在升温过程中温度超过 20℃，其进行了潜热储能，2021-10-09 凌晨温度低于 20℃ 后，储存在砂浆板中的潜热开始释放。在降温过程中，SJ-P30 试验箱没有发生相变作用，但由于释放潜热的原因，其温度高于 SJ-P0 试验箱和环境温度。SJ-P0 试验箱没有发生相变，但其温度也高于环境温度，这是由于 SJ-P0 试验箱砂浆板具有一定的导热系数，其对环境温度也能起到减缓作用，具有一定的热惰性。

图 23 为 2021-10-07 至 2021-10-12 室外环境、SJ-P0 和 SJ-P30 试验箱湿度曲线。结合图 21 可知，环境湿度会随气温和太阳辐射变化，当日太阳辐射值高，峰值温度高，峰值湿度低。当日太阳辐射低，峰值温度低，峰值湿度高。在晴朗天气下，两试验箱湿度数值和变化趋势基本接近，SJ-P30 试验箱湿度整体略高于 SJ-P0 试验箱，并且与室

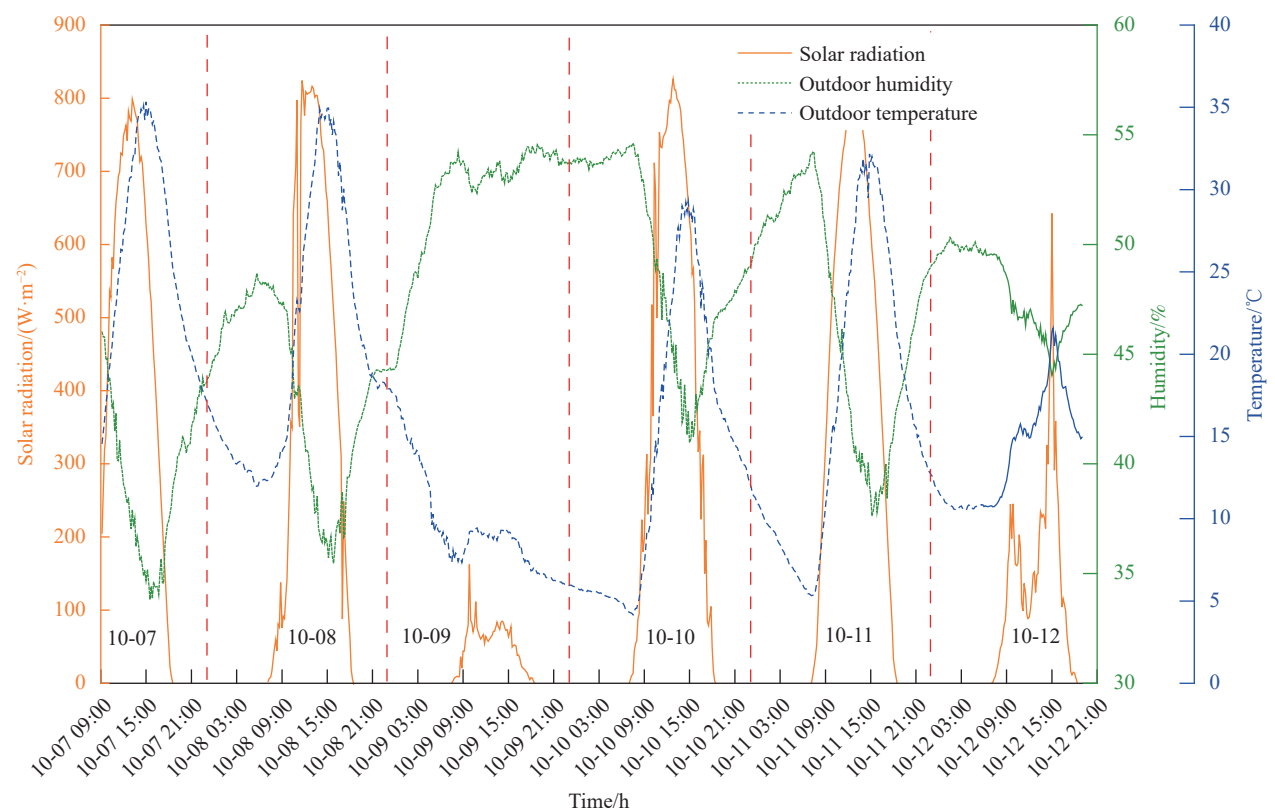


图 21 室外温度、湿度及太阳辐射

Fig. 21 Outdoor ambient temperature, humidity and solar radiation intensity

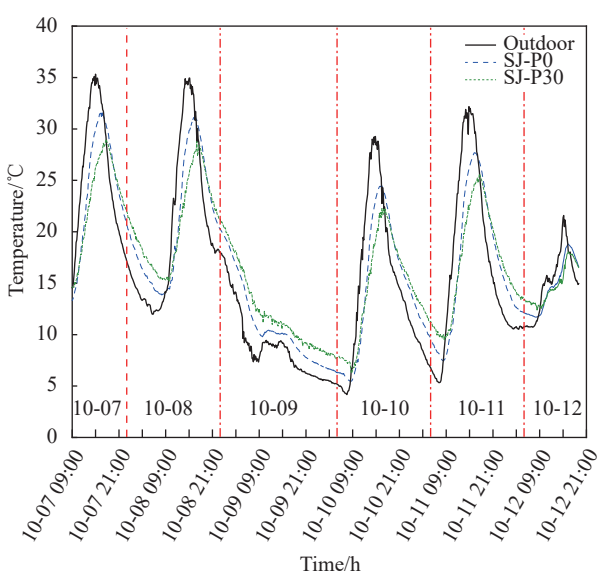


图 22 室外温度、SJ-P0 和 SJ-P30 试验箱内温度

Fig. 22 Temperature of outdoor ambient, SJ-P0 and SJ-P30 test box

外环境湿度趋势相同，但峰值有一定的滞后性。在阴天，两试验箱湿度变化趋势相同，均具有较大的波动性，出现了多个波峰和波谷。

两试验箱湿度变化，是由于砂和漂珠主要成

分为硅和铝，水分子可与 Si/Al 骨架形成氢键，使砂和漂珠对水分子具有较强的吸收能力。同时，砂浆板存在大量的毛细孔，会形成毛细通道效应，环境中的水分会沿着毛细孔在试验箱内部形成液滴^[37-39]。晴朗天气温度高，液滴蒸发快，试验箱内部湿度受环境影响较大，与环境湿度基本同步；阴天气温低，但试验箱内部温度比环境温度高(图 22)，因此内部液滴也存在蒸发，湿度波动较大。砂的粒径大于粉煤灰漂珠的粒径，粒径越小，比表面积越大，吸湿性越强，这是 SJ-P30 试验箱湿度整体略高于 SJ-P0 试验箱的原因。总的来说，试验箱湿度取决当日太阳辐射强度和天气，与砂浆板的类型关系很小。

图 24 为 2021-10-07，09:00 至 2021-10-08，13:00 温度变化曲线。两试验箱温度总体变化趋势和环境温度相同，均呈先升高后降低的趋势。但由于相变微胶囊存在的原因，SJ-P30 试验箱温度峰值和峰值出现时间相较环境温度和 SJ-P0 试验箱存在一定的滞后性。10-07 室外环境、SJ-P0 试验箱、SJ-P30 试验箱的峰值高温分别为 35.33℃、31.57℃、29.00℃，SJ-P30 试验箱相较于室外环境和 SJ-P0

表 7 2021-10-07~2021-10-12 试验箱峰值温度和峰值时间差

Table 7 2021-10-07~2021-10-12 test box peak temperature and peak time difference

Date	Peak high temperature difference value/℃	Time difference of peak high temperature/min	Peak low temperature difference value/℃	Time difference of peak low temperature/min
10-07-10-08	-2.58	60	1.37	90
10-08-10-09	-2.38	40	0.82	10
10-09-10-10	-2.16	30	2.21	20
10-10-10-11	-2.09	70	0.68	10
10-11-10-12	-2.09	70	0.68	10

Note: Peak temperature and peak time difference are SJ-P30 test box minus SJ-P0 test box.

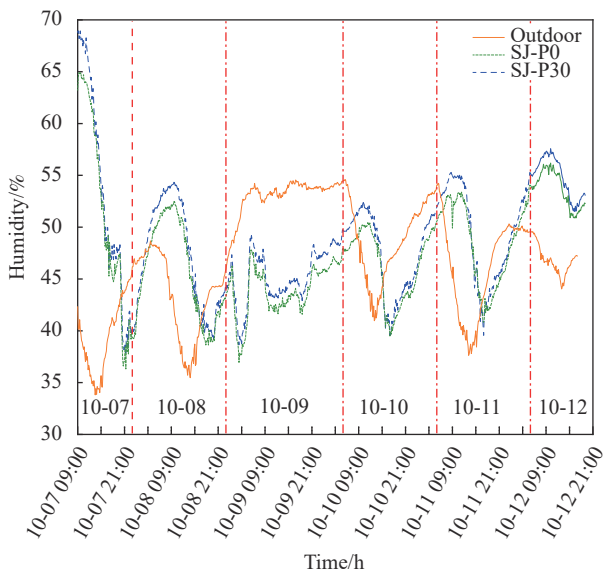


图 23 室外湿度、SJ-P0 和 SJ-P30 试验箱内湿度

Fig. 23 Humidity of outdoor ambient, SJ-P0 and SJ-P30 test box

试验箱温度分别下降 6.34℃ 和 2.58℃。这表明由于相变微胶囊的存在，砂浆板热惰性增加，可以进行相变潜热储能，多余的热能以潜热的形式存储于微胶囊中，因此 SJ-P30 试验箱峰值高温远低于 SJ-P0 试验箱。10-08 室外环境、SJ-P0 试验箱、SJ-P30 试验箱的峰值低温分别为 12.01℃、13.85℃、15.22℃，SJ-P30 试验箱相较于室外环境和 SJ-P0 试验箱温度分别上升 3.25℃ 和 1.37℃。这表明由于相变微胶囊的存在，相变微胶囊发生相变进行释热，以潜热形式储存在微胶囊中的热能逐步释放到试验箱中，因此 SJ-P30 试验箱峰值低温远高于 SJ-P0 试验箱，这进一步验证了相变微胶囊储能砂浆的储热和调温能力。

SJ-P30 试验箱相较于室外环境和 SJ-P0 试验箱，峰值高温出现时间分别晚 156 min 和 60 min，峰值低温出现时间分别晚 240 min 和 90 min。同时，SJ-P30 试验箱温度波动仅为 13.78℃，远低于室外环境和 SJ-P0 试验箱的 23.32℃ 和 17.72℃。这表明

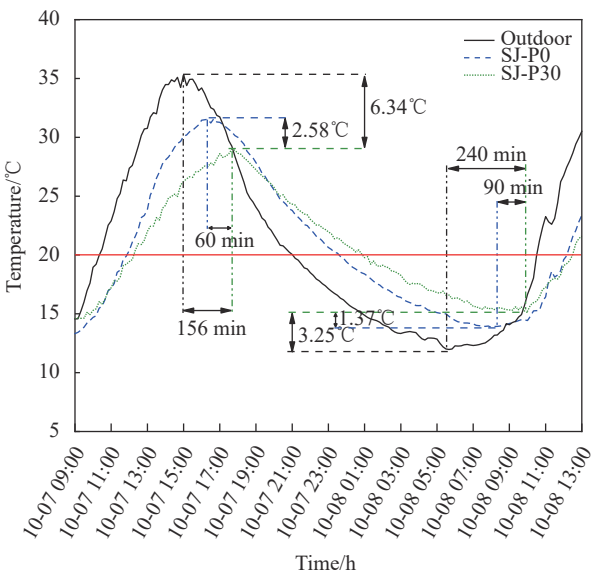


图 24 不同时段室外温度、SJ-P0 和 SJ-P30 试验箱内温度

Fig. 24 Temperature of outdoor, SJ-P0 and SJ-P30 test box in different time period

相变微胶囊储能砂浆由于相变潜热的存在，能够在升温 and 降温过程中将热能存储和释放，减缓温度变化幅度和峰值温度出现时间。综上所述，加入相变微胶囊的砂浆，具有明显的热惰性和良好的储能控温能力，能够降低峰值温度并减缓峰值温度出现时间。

3 结论

(1) 相变微胶囊为粒径 0.15~0.45 mm 的光滑球体，囊壁为粉煤灰微孔漂珠，主要成分 SiO₂ 和 Al₂O₃，这与建筑用砂和水泥的成分一致，可作为细集料掺入砂浆。相变微胶囊经封装后表面微孔基本消失，相变循环及热稳定性试验中相变材料基本没有泄露，可应用在建筑材料中。

(2) 砂浆强度随相变微胶囊的掺量增加而降低。相变微胶囊掺量为 30% 时，砂浆 28 天抗压强度 42.1 MPa，抗折强度 7.2 MPa，相比基准砂浆分别

下降 6.7 MPa(19.78%) 和 0.8 MPa(10%), 此时强度满足规范要求的砌筑和抹灰砂浆强度要求。

(3) 增加相变微胶囊掺量会使砂浆储热能力提高, 储热能力随着掺量的增加而增大。相变微胶囊掺量在 10%~30% 时, 相变潜热为 6.67~19.18 J·g⁻¹, 比热容为 0.76~1.04 J·(g·K)⁻¹, 储能能力相比基准砂浆提高 41%~90%, 适宜作为储能材料使用于建筑中。

(4) 温控试验结果表明, 30% 微胶囊掺量的砂浆试验箱峰值高温低于基准试验箱, 最大差值为 2.58℃; 峰值低温高于基准试验箱, 最大差值为 2.21℃。峰值高温和低温出现时间均晚于基准砂浆试验箱, 最大差值分别为 70 min 和 90 min。两试验箱湿度相差不大, 取决当日太阳辐射强度和天气, 与砂浆类型关系很小。由于相变微胶囊的掺入, 储能砂浆能够平缓温度变化幅度, 调节温度峰值, 延缓温度峰值出现时间, 具有良好的储能控温能力。

参考文献:

[1] CAO X, DAI X, LIU J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 128: 198-213.

[2] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告(2020)成果发布[EB/OL]. (2020-12-31). [2022-08-11]. <https://www.cabee.org/site/content/24021.html>. China Association of Building Energy Efficiency. Results of China building energy consumption research report (2020)[EB/OL]. (2020-12-31). [2022-08-11]. <https://www.cabee.org/site/content/24021.html>(in Chinese).

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划的通知[EB/OL]. (2022-03-11). [2022-08-11]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/12/content_5678698.htm. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China on the issuance of 14th Five-Year' building energy efficiency and green building development plan notice[EB/OL]. (2022-03-11). [2022-08-11]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/12/content_5678698.htm(in Chinese).

[4] 宋晓庆, 姜猛进, 叶光斗, 等. 石蜡/聚乙烯醇相变储能纤维的制备与表征[J]. *复合材料学报*, 2008(1): 17-22. SONG Xiaoqing, JIANG Mengjin, YE Guangdou, et al. Preparation and characterization of paraffin/polyvinyl alcohol phase change energy storage fiber[J]. *Acta Materiae*

Compositae Sinica, 2008(1): 17-22(in Chinese).

[5] SOUAYFANE F, FARDOUN F, BIWOLE P H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 129: 396-431.

[6] 陈颖, 姜庆辉, 辛集武, 等. 相变储能材料及其应用研究进展[J]. *材料工程*, 2019, 47(7): 1-10. CHEN Ying, JIANG Qinghui, XIN Jiwu, et al. Research progress in phase change energy storage materials and their applications[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(7): 1-10(in Chinese).

[7] AKEIBER H, NEJAT P, MAJID M Z A, et al. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 1470-1497.

[8] 尚建丽, 李乔明, 王争军. 微胶囊相变储能石膏基建筑材料制备及性能研究[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(12): 2140-2144. SHANG Jianli, LI Qiaoming, WANG Zhengjun. Preparation and properties of gypsum-based building materials for microcapsule phase change energy storage[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2012, 33(12): 2140-2144(in Chinese).

[9] HADJIEVA M, STOYKOV R, FILIPOVA T. Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage[J]. *Renewable Energy*, 2000, 19(1-2): 111-115.

[10] 倪海洋, 朱孝钦, 胡劲, 等. 相变材料在建筑节能中的研究及应用[J]. *材料导报*, 2014, 28(21): 100-104. NI Haiyang, ZHU Xiaoqin, HU Jin, et al. Research and application of phase change materials in building energy efficiency[J]. *Materials Reports*, 2014, 28(21): 100-104(in Chinese).

[11] BROOKS A L, FANG Y, SHEN Z, et al. Enabling high-strength cement-based materials for thermal energy storage via fly-ash cenosphere encapsulated phase change materials[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 120: 104033.

[12] TYAGI V V, KAUSHIK S C, TYAGI S K, et al. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2): 1373-1391.

[13] 詹建, 邹得球, 李乐园, 等. 高温相变石蜡-脲醛树脂微胶囊的制备及表征[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(2): 284-290. ZHAN Jian, ZOU Deqiu, LI Yueyuan, et al. Preparation and characterization of high-temperature phase change paraffin-urea-formaldehyde resin microcapsules[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(2): 284-290(in Chinese).

[14] CHANDEL S S, AGARWAL T. Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 581-596.

- [15] 于文艳, 孟琦, 童浩然. 微胶囊相变材料对砂浆力学和热性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 215-220.
YU Wenyan, MENG Qi, TONG Haoran. Effect of microencapsulated phase change materials on mechanical and thermal properties of mortar[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2): 215-220(in Chinese).
- [16] 李进, 陈佩圆, 马海彬, 等. 石蜡胶囊的制备及其对砂浆热导和力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 1051-1055, 1063.
LI Jin, CHEN Peiyuan, MA Haibin, et al. Preparation of paraffin capsules and their effects on thermal conductivity and mechanical properties of mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(3): 1051-1055, 1063(in Chinese).
- [17] 马芹永, 白梅. 相变储能混凝土的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 676-683.
MA Qinyong, BAI Mei. Preparation and properties of phase change energy storage concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 676-683(in Chinese).
- [18] SINGH R P K, SHUKLA S K, GUPTA N K. Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53: 101884.
- [19] HUNGER M, ENTROP A G, MANDILARAS I, et al. The behavior of self-compacting concrete containing microencapsulated phase change materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(10): 731-743.
- [20] GIRO-PALOMA J, MARTÍNEZ M, CABEZA L F, et al. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1059-1075.
- [21] 徐恩涛. 相变储能砂浆的制备及性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
XU Entao. Preparation and properties of phase change energy storage mortar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011(in Chinese).
- [22] 国家市场监督管理总局. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation. Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [23] 国家市场监督管理总局. 建筑用砂: GB/T 14684—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
State Administration for Market Regulation. Sand for construction: GB/T 14684—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022(in Chinese).
- [24] LIU F, WANG J, QIAN X. Integrating phase change materials into concrete through microencapsulation using cenospheres[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 80: 317-325.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard of test method for basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009(in Chinese).
- [26] MENG E, YU H, ZHOU B. Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 212-225.
- [27] SONG H, YUM W S, SIM S, et al. Proposed specific heat capacity model for a concrete wall containing phase change material (PCM) under field experiment conditions[J]. Construction and Building Materials, 2022, 336: 127381.
- [28] KHERADMAND M, ABDOLLAHNEJAD Z, PACHECO-TORGAL F. Alkali-activated cement-based binder mortars containing phase change materials (PCMs): Mechanical properties and cost analysis[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24(8): 1068-1090.
- [29] AGUAYO M, DAS S, MAROLI A, et al. The influence of microencapsulated phase change material (PCM) characteristics on the microstructure and strength of cementitious composites: Experiments and finite element simulations[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73: 29-41.
- [30] ILLAMPAS R, RIGOPOULOS I, IOANNOU I. Influence of microencapsulated phase change materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: 102328.
- [31] BROOKS A L, ZHOU H, HANNA D. Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 316-328.
- [32] MEMON S A, CUI H, LO T Y, et al. Development of structural-functional integrated concrete with macro-encapsulated PCM for thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2015, 150: 245-257.
- [33] ZHOU H, BROOKS A L. Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres[J]. Construction and Building Materials, 2019, 198: 512-526.
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 墙体材料应用统一技术规范

范: GB/T 50574—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Uniform technical code for wall materials used in buildings: GB/T 50574—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010(in Chinese).

[35] TAN W, MARTÍNEZ-PAÑEDA E. Phase field fracture predictions of microscopic bridging behaviour of composite materials[J]. Composite Structures, 2022: 286 : 115242.

[36] ANTOLOVICH S D, SAXENA A, GERBERICH W W. Fracture mechanics –An interpretive technical history[J]. [Mechanics Research Communications](#), 2018, 91: 46-86.

[37] VAKALOVA T V, REVVA I B. Use of zeolite rocks for ceramic bricks based on brick clays and clay loams with high drying sensitivity[J]. [Construction and Building Materials](#), 2020, 255: 119324.

[38] WANG X, LEI Y, CHEN Z, et al. Sepiolite-zeolite powder doped with capric acid phase change microcapsules for temperature-humidity control[J]. [Journal of Colloid and Interface Science](#), 2021, 595: 25-34.

[39] 田国华. 相变储能建筑墙体传热特性及能耗影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.

TIAN Guohua. Research on the heat transfer characteristics and energy consumption of phase change energy storage building walls[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018(in Chinese).