

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.03.007

# 相变微胶囊对砂浆物理力学性能的影响

欧志华<sup>1, 2</sup>, 肖毅<sup>1</sup>, 曹晖<sup>1</sup>, 蓝凡媛<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 相变储能砂浆有利于房屋建筑室内环境的温度稳定, 对建筑节能具有重要意义。对相变微胶囊掺量变化与砂浆的流动度、表观密度、抗折强度和抗压强度变化的关系进行了研究。研究表明, 随着相变微胶囊掺量的增加, 砂浆的流动度减小, 表观密度、抗折强度和抗压强度均呈现出先增大后减小的变化趋势。相变微胶囊取代石英砂的最佳质量分数为 10%, 此时, 砂浆的抗压强度较不掺相变微胶囊的砂浆增加了 37.1%。

**关键词:** 相变微胶囊; 砂浆; 流动度; 表观密度; 抗折强度; 抗压强度

**中图分类号:** TU599

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2018)03-0037-05

## Influence of Phase Change Micro-Capsule on the Physical Mechanical Properties of Mortar

OU Zhihua<sup>1, 2</sup>, XIAO Yi<sup>1</sup>, CAO Hui<sup>1</sup>, LAN Fanyuan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

**Abstract:** Phase change energy storage mortar helps to stabilize the temperature of the indoor environment, which is of great significance to the realization of building energy conservation. A study has been made of the relationship between the content of phase change micro-capsules and the fluidity, apparent density, flexural strength and compressive strength of the mortar. The results show that with the increase of phase change micro-capsule dosage, the fluidity of the mortar decreases, and the apparent density, flexural strength and compressive strength all undergo an initial increase and a subsequent decrease. The optimum mass fraction of the phase change micro-capsule to replace the quartz sand is 10%, at which point, the compressive strength of the mortar increases by 37.1%, compared with that of the mortar without the phase change micro-capsule.

**Keywords:** phase change micro-capsule; mortar; fluidity; apparent density; flexural strength; compressive strength

## 1 研究背景

建筑节能是我国节能减排工作的重要内容。建筑

能耗中, 有 20%~50% 是通过建筑物外围护结构传热所产生<sup>[1]</sup>。对于外围护结构, 目前国内外主要是通过

收稿日期: 2018-01-21

基金项目: 湖南省建设厅科技计划基金资助项目(C10108), 湖南省建筑节能与环境控制关键技术协同创新中心资助项目

作者简介: 欧志华(1975-), 男, 湖南常宁人, 湖南工业大学高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为高性能水泥基材料, E-mail: zhihou@163.com

通信作者: 曹晖(1974-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学讲师, 硕士, 主要研究方向为土木工程材料, E-mail: 296992028@qq.com

提高其保温性能来减少建筑能耗,如各种外墙外保温系统,即通过“阻热”的方式减少建筑能耗。随着建筑节能要求和内涵的提高,如果房屋具有足够的“储热”能力,能将夏季晚上凉爽空气的冷量和冬季白天温暖空气的热量储存起来,保持室内空气温度稳定,将减少用电负荷;或者在用电低谷时,将空调或供暖设备产生的冷量或热量“储存”起来,再在用电高峰时段释放,从而减少用电高峰时段的用电量,有利于供电低谷平衡。可见,房屋的“储热”能力对建筑节能非常重要。

相变储能材料(phase change material, PCM)是指在相变过程中会吸收或释放大热量,而温度近似恒温的材料。将合适相变温度(通常为20~30℃)的相变储能材料与建筑材料复合起来,制得相变储能建筑材料,可大大提高房屋建筑的储热能力<sup>[2-3]</sup>,甚至实现“恒温建筑”。

相变储能材料可以和建筑物的梁、板、柱等结构材料复合,也可以与砂浆、涂料等功能材料复合。相对于结构材料,内墙或外墙内表面的砂浆等功能材料离室内更近,与相变材料复合更容易调节室内环境,且不影响结构安全。因此,相变储能砂浆成为相变储能建筑材料的一个重要研究方向<sup>[4-11]</sup>。

用于建筑材料中的相变储能材料的种类很多,包括有机相变材料、无机相变材料和复合相变材料3大类<sup>[2]</sup>。相变储能材料与建筑材料的复合方式包括直接加入法、浸渗法和封装法,其中封装法又包括吸附封装法和微胶囊封装法两种<sup>[2]</sup>。从已有研究看,相变储能砂浆所使用的相变材料主要是石蜡<sup>[4-8]</sup>,也有使用月桂酸<sup>[9]</sup>或其他脂肪酸的<sup>[10-11]</sup>。封装方式主要是采用膨胀珍珠岩吸附封装<sup>[4-6, 9-10]</sup>,或者采用微胶囊封装<sup>[7, 11]</sup>,也有将相变材料不做任何封装直接拌入砂浆的<sup>[8]</sup>。考虑到石蜡的相变温度范围为20~30℃,且具有相变潜热较高、价格较低、融化蒸气压力较低、化学稳定性较好、自成核、无相分离、无腐蚀性、几乎无过冷现象等优点<sup>[4]</sup>,以及微胶囊封装具有传热速度快和耐久性好等优点<sup>[3]</sup>,本文拟研究相变微胶囊(phase change microcapsule, PCM)材料对抹灰砂浆物理力学性能的影响,以期能为相变储能砂浆的制

备提供参考依据。

## 2 原材料与试验方法

### 2.1 原材料

水泥,规格为P·O 42.5,湖南恒宇建材有限公司生产。石英砂,包括粗石英砂(20~40目)和细石英砂(>40~70目)2个规格,湖南大明工业砂采选有限公司生产。纤维素醚(cellulose ethers, CE),型号为C9115,赫克力士-天普化工有限公司生产。可再分散乳胶粉(redispersible polymer powders, RPP),型号为5044N,瓦克聚合物有限公司生产。相变微胶囊,MPCM24型,恬蓝新材料科技(上海)有限公司生产。

纤维素醚为粉末状,在砂浆中主要起保水和增稠作用。可再分散乳胶粉为粉末状,可增加砂浆的拉伸强度和黏结强度。相变微胶囊为粉末状,由有机相变材料+有机囊壁组成,其性能参数如表1所示,由其扫描电镜图(图1)可知,相变微胶囊粉末近似为圆形,颗粒大小不一。

表1 相变微胶囊的性能参数

参数	堆积密度/(kg·L <sup>-1</sup> )	平均粒径/μm	熔点/℃
取值	0.694	50	24~26
参数	储能容量/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	比热容/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
取值	108	1.6	0.25

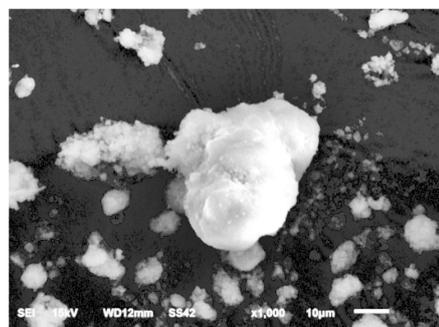


图1 相变微胶囊的SEM图

Fig. 1 SEM image of phase change micro-capsule

### 2.2 试样的原材料配合比

试验用相变储能砂浆试样的原材料配合比如表2所示。

表2 相变储能砂浆试样的原材料配合比

试样编号	水泥	石英砂		纤维素醚	可再分散乳胶粉	相变微胶囊	干粉总量	用水量
		20~40目	>40~70目					
N1	370.0	392.6	220.9	0.5	16.0	0	1 000.0	195.0
N2	370.0	373.0	209.8	0.5	16.0	30.7	1 000.0	195.0
N3	370.0	353.4	198.8	0.5	16.0	61.4	1 000.0	195.0
N4	370.0	333.7	187.7	0.5	16.0	92.0	1 000.0	195.0
N5	370.0	314.1	176.7	0.5	16.0	122.7	1 000.0	195.0

每组配合比中,所有干粉的质量总和为1kg,水泥、纤维素醚、可再分散乳胶粉和用水量保持不变。N1中石英砂的总质量为613.5g,其中>40~70目的细石英砂占石英砂总质量的36%<sup>[12]</sup>;N2~N5中,相变微胶囊分别取代石英砂总质量的5%,10%,15%和20%,而>40~70目的细石英砂占石英砂总质量的比例保持36%不变。

### 2.3 试验方法

根据表2中的不同配比,分别按下述方法制备砂浆试样,并测量其相关的性能指标。

#### 2.3.1 砂浆流动度的测定

首先,把水加入搅拌桶中,再加入水泥、纤维素醚、可分散乳胶粉和相变微胶囊,并低速搅拌30s。然后,将20~40目的粗石英砂和>40~70目的细石英砂依次加入搅拌桶中,并高速搅拌30s。停止搅拌90s后,用刮具将叶片和桶壁的砂浆刮入桶中间,再高速搅拌60s。最后,根据GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》<sup>[13]</sup>,采用跳桌法测定所制得砂浆试样的流动度。

#### 2.3.2 抗折强度和抗压强度的测定

将所有干粉按比例称量好,在封口袋中混合均匀,再在行星式水泥胶砂搅拌机中倒入规定质量的水,将粉料缓慢加入水中,按照GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》<sup>[14]</sup>规定的方法搅拌砂浆,并成型,即制得40mm×40mm×160mm的棱柱体。在温度为(20±3)℃,相对湿度不小于90%的环境中养护1d后脱模,再继续养护至28d龄期后,采用无锡新路达公司制造的TYA-300B型微机控制恒加载抗折抗压试验机,测定样品的抗折强度和抗压强度。其中,抗折强度以中心荷载法测定,即将试件的一个侧面放在试验机的支撑圆柱上,试件长轴垂直于支撑圆柱,然后以55N/s的速率进行加载,直至试件折断。抗压强度的测定在折断后的半截棱柱体的侧面上进行,测定过程中半截棱柱体的中心与压力机的中心重合,并以2500N/s的速率均匀地加荷,直至试件被破坏。

#### 2.3.3 硬化水泥浆表观密度的测定

将养护28d后的棱柱体试样取出、抹干,然后用天平称出其质量 $m$ ;由试样成型规格可得试样的体积 $V=256\text{ cm}^3$ ;再由 $\rho=m/V$ 即可计算出硬化水泥浆的表观密度。

## 3 试验结果与分析

相变微胶囊掺量对砂浆流动性、表观密度、抗折强度和抗压强度的影响如图2所示。

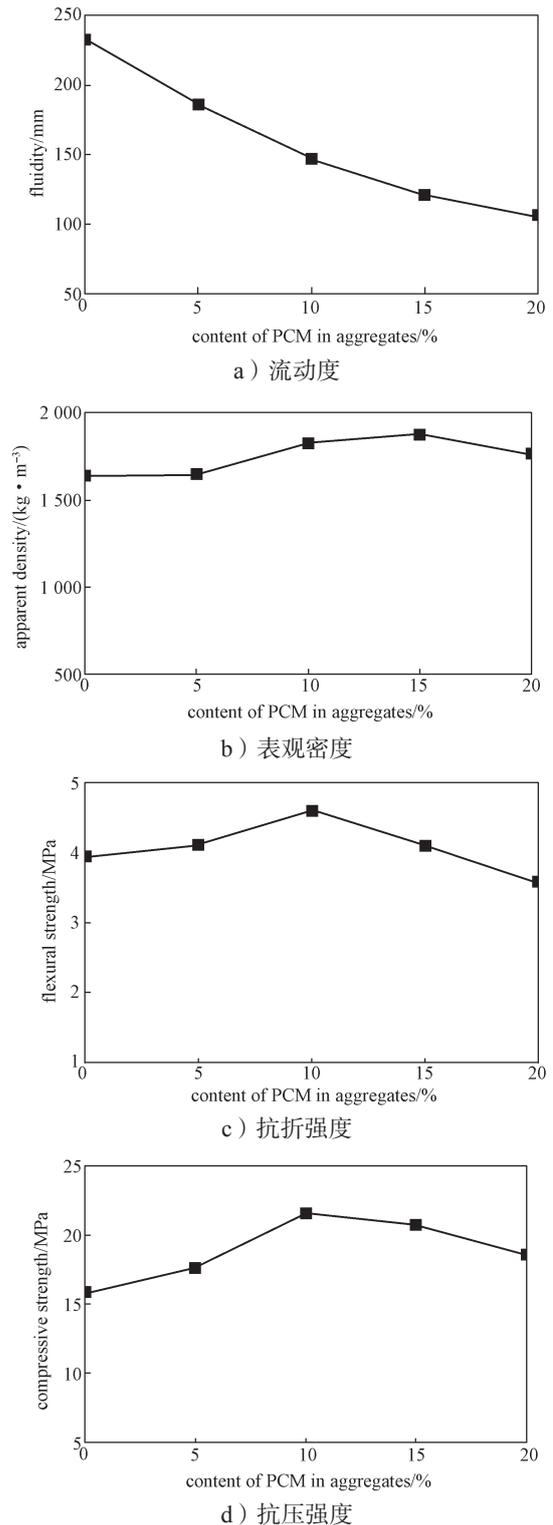


图2 相变微胶囊掺量对砂浆物理力学性能的影响  
Fig. 2 Influence of phase change microcapsule content on the physical mechanical properties of mortar

由图2a可知,随着相变微胶囊掺量的增加,砂浆的流动度减小。不掺相变微胶囊时,砂浆的流动度为233.5mm;当相变微胶囊的掺量为20%时,砂浆的流动度降低到105.5mm,和易性变得非常差。

由图2b可知,随着相变微胶囊掺量的增加,砂

浆的表观密度先增大后减小。不掺相变微胶囊时, 砂浆的表观密度为  $1\ 639.3\ \text{kg/m}^3$ ; 相变微胶囊的掺量增加到 15% 时, 砂浆的表观密度增大到最大值  $1\ 877.7\ \text{kg/m}^3$ , 较不掺相变微胶囊的砂浆约增大了 14.5%; 随着相变微胶囊掺量的继续增加, 砂浆的表观密度开始下降; 当相变微胶囊的掺量为 20% 时, 砂浆的表观密度降低到  $1\ 762.9\ \text{kg/m}^3$ 。

由图 2c 可以得知, 随着相变微胶囊掺量的增加, 砂浆的抗折强度先增大后减小。不掺相变微胶囊时, 砂浆的抗折强度为 3.93 MPa; 相变微胶囊掺量增加到 10% 时, 砂浆的抗折强度增大到最大值 4.60 MPa, 较不掺相变微胶囊的砂浆约增大了 17.0%; 随着相变微胶囊掺量的继续增加, 砂浆抗折强度开始下降; 相变微胶囊掺量为 20% 时, 砂浆的抗折强度降低到 3.57 MPa, 较不掺相变微胶囊的砂浆约下降了 9.2%。

由图 2d 可知, 随着相变微胶囊掺量的增加, 砂浆的抗压强度同样是先增大后减小。不掺相变微胶囊时, 砂浆的抗压强度为 15.75 MPa; 相变微胶囊的掺量增加到 10% 时, 砂浆的抗压强度增大到最大值 21.60 MPa, 较不掺相变微胶囊的砂浆约增大了 37.1%, 增加非常显著; 随着相变微胶囊掺量的继续增加, 砂浆的抗压强度开始下降; 相变微胶囊的掺量为 20% 时, 砂浆的抗压强度降低到 18.57 MPa。

由上述研究结果可知, 相变微胶囊粉末取代石英砂的质量为 10% 左右比较合适。

在本文的试验研究中, 是以等质量的相变微胶囊取代石英砂。由于相变微胶囊的堆积密度不到石英砂堆积密度的一半, 掺入相变微胶囊的体积是被取代的石英砂体积的 2 倍以上; 再加上相变微胶囊的颗粒比石英砂颗粒细, 其表面积明显高于后者, 需要包裹其表面的水泥浆显著增加。此外, 相变微胶囊具有一定的吸水性。因此, 随着相变微胶囊掺量的增加, 砂浆的流动性明显下降。

相变微胶囊颗粒比  $>40\sim 70$  目的石英砂更细, 能够填充在石英砂颗粒的空隙中。因此, 适当掺量的相变微胶囊可以增加砂浆的密实度, 提高砂浆的表观密度、抗折强度和抗压强度。砂浆的强度随相变微胶囊掺量的增加而增加还有如下 2 个原因: 1) 相变微胶囊的吸水性相当于降低了砂浆的水灰比; 2) 相变微胶囊吸水起到了内养护剂的作用。但是, 随着相变微胶囊掺量的继续增加, 砂浆的流动性下降非常明显, 砂浆已经不能很好地密实(肉眼可以观察到), 缺陷增加。因此, 砂浆的表观密度、抗折强度和抗压强度开始下降。

## 4 结论

本文研究了相变微胶囊掺量变化对抹灰砂浆的物理性能和力学性能的影响, 可得如下结论:

1) 随着相变微胶囊掺量的增加, 砂浆的流动度减小。相变微胶囊的掺量为 15%~20% 时, 砂浆的流动度很小, 和易性非常差。

2) 随着相变微胶囊掺量的增加, 砂浆的表观密度、抗折强度和抗压强度先增大后减小。当相变微胶囊的掺量超过 15% 后, 砂浆的表观密度开始下降; 当相变微胶囊的掺量超过 10% 后, 砂浆的抗折强度和抗压强度开始下降; 相变微胶囊的掺量为 10% 时, 砂浆的抗压强度较不掺相变微胶囊时增加了 37.1%, 增加非常显著。

综合考虑砂浆的和易性和力学性能, 相变微胶囊取代石英砂的最佳质量分数为 10%。

### 参考文献:

- [1] 欧志华, 郭俊明. 浅谈我国建筑节能 50% 设计标准的含义 [J]. 建筑节能, 2007, 35(12): 60-62.  
OU Zhihua, GUO Junming. A Brief Introduction to the Implication of the Design Standard of 50% Energy Efficiency of Building in China [J]. Building Energy Efficiency, 2007, 35(12): 60-62.
- [2] 马保国, 金磊, 蹇守卫. 相变-保温复合结构的温度-时间响应研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(12): 1-4.  
MA Baoguo, JIN Lei, JIAN Shouwei. Research on Temperature-to-Time Response of Phase Change Material & Insulation Material Composite Configuration [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(12): 1-4.
- [3] 沈澄, 徐玲玲, 李文浩. 相变储能材料在建筑节能领域的研究进展 [J]. 材料导报, 2015, 29(3): 100-104.  
SHEN Cheng, XU Lingling, LI Wenhao. Research Progress of Phase Change Materials in Energy-Efficient Buildings [J]. Materials Review, 2015, 29(3): 100-104.
- [4] 汪振双, 胡敏. 复合相变储能砂浆的制备及其性能研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(2): 315-321.  
WANG Zhenshuang, HU Min. Research on Preparation and Property of Phase Change Mortar [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(2): 315-321.
- [5] 汪振双, 赵宁. 相变储能砂浆的制备及其性能 [J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2014, 26(4): 311-315.  
WANG Zhenshuang, ZHAO Ning. Preparation and

- Properties of Phase Change Energy Storage Mortar[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2014, 26(4): 311-315.
- [6] 陈金平, 杨权明, 胡良强, 等. 膨胀珍珠岩-石蜡相变储能砂浆的力学性能研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2016(2): 34-36, 38.  
CHEN Jinping, YANG Quanming, HU Liangqiang, et al. Research on Mechanical Properties of Expanded Perlite Paraffin Phase Change Mortar[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2016(2): 34-36, 38.
- [7] 陈伟, 朱才岳. 微胶囊相变砂浆制备及性能研究[J]. 长春工业大学学报, 2015, 36(1): 77-80.  
CHEN Wei, ZHU Caiyue. Preparation of Microcapsule Phase Change Material Mortar[J]. Journal of Changchun University of Technology, 2015, 36(1): 77-80.
- [8] 史巍, 侯景鹏. 石蜡相变储能砂浆应用性能研究[J]. 新型建筑材料, 2012(8): 19-21.  
SHI Wei, HOU Jingpeng. Study on Application Properties of PCM Mortars with Paraffin[J]. New Building Materials, 2012(8): 19-21.
- [9] 刘杰胜, 张娟, 冯彪, 等. 相变储能保温砂浆的制备、性能与应用研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2014, 33(3): 84-86.  
LIU Jiasheng, ZHANG Juan, FENG Biao, et al. Study on the Preparation and Application of Phase Change Energy-Storage Mortar[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2014, 33(3): 84-86.
- [10] 钱利姣, 张雄, 宋钦. 相变珍珠岩工艺研究和相变砂浆控温模拟[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(7): 987-993.  
QIAN Lijiao, ZHANG Xiong, SONG Qin. Process Research of Phase Change Perlite and Simulation of Phase Change Mortar's Temperature Control[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(7): 987-993.
- [11] 赵冰, 徐雪丽, 宋伟. 相变干混保温砂浆的配制及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(2): 575-580.  
ZHAO Bing, XU Xueli, SONG Wei. Preparation and Performance Study of Phase Change Dry-Mixed Mortar Material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(2): 575-580.
- [12] 黄春华, 姜彬, 欧志华, 等. 原材料对聚合物防水砂浆性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(2): 478-484.  
HUANG Chunhua, JIANG Bin, OU Zhihua, et al. Influence of Materials on the Properties of Polymer Modified Cement Mortars for Waterproofing[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(2): 478-484.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 水泥胶砂流动度测定方法: GB/T 2419—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-3.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test Method for Fluidity of Cement Mortar: GB/T 2419—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-3.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 7-9.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Method of Testing Cements-Determination of Strength: GB/T 17671—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999: 7-9.

(责任编辑: 邓光辉)