

相变储能混凝土的制备与性能

马芹永^{*1, 2}, 白梅¹

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 淮南 232001)

摘 要: 膨胀珍珠岩吸附硬脂酸丁酯后用石灰石粉末改性制成相变储能骨料(PCESA), 用其等体积部分取代砂制备相变储能混凝土。测试相变储能混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度, 通过 SEM 图像分析相变储能混凝土的微观形貌, 用 DSC 测试 PCESA 的相变特征及相变储能混凝土的比热容。试验结果表明: 相变储能混凝土中 PCESA 结构保持完整且其与水泥石的界面过渡区密实, 相对提高了相变储能混凝土的强度; PCESA 具有较好的热物理性能, 添加在混凝土中增强了混凝土的储能能力; 当 PCESA 的掺量为 20vol% 时, 相变储能混凝土具有较好的力学性能和热物理性能, 在建筑结构中使用既可以起到承重的作用又能实现节能的目的。

关键词: 相变储能骨料; 相变储能混凝土; 微观结构; 抗压强度; 劈裂抗拉强度; 比热容

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)03-0676-08

Preparation and properties of phase-changing energy-storing concrete

MA Qinyong^{*1, 2}, BAI Mei¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Butyl stearate was impregnated into pores of expanded perlite, and limestone powder wrapped up it to prepare phase-changing energy-storing aggregates (PCESA). Phase-changing energy-storing concrete was prepared by PCESA replacing some sand. Experiments of compressive strength and splitting tensile strength were carried out for phase-changing energy-storing concrete. The micro-morphology of phase-changing energy-storing concrete was characterized by using SEM images. Both phase transition properties of PCESA and specific heat capacity of phase-changing energy-storing concrete were characterized by DSC technique. The test results show that: The PCESA remain intact in phase-changing energy-storing concrete, and interfacial transition zone (ITZ) is typical attribute of phase-changing energy-storing concrete with good integrity between cement paste and PCESA, which leads to the increase of phase-changing energy-storing concrete strength relatively. The increase of PCESA volume fraction results in a rising of specific heat capacity of phase-changing energy-storing concrete due to the good thermo-physical performance of PCESA. When the content of PCESA is up to 20vol%, the phase-changing energy-storing concrete has a good mechanical and thermo-physical performance, and it is equally amenable to bearing capacity and building energy conservation.

Keywords: phase-changing energy-storing aggregates; phase-changing energy-storing concrete; microstructure; compressive strength; splitting tensile strength; specific heat capacity

随着生活水平的提高, 人们对居住环境的要求也在不断提高, 建筑耗能所占能源消耗比例在大幅

增长, 由此引发了雾霾、全球变暖等一系列的环境问题, 发展绿色建筑已经成为当务之急。2016 年 7

收稿日期: 2017-03-14; 录用日期: 2017-05-12; 网络出版时间: 2017-06-09 17:45

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170609.006>

通讯作者: 马芹永, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型建筑材料 E-mail: qymaah@126.com

引用格式: 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-changing energy-storing concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 676-683 (in Chinese).

月我国发布的《住房城乡建设事业“十三五”规划纲要》提出大力发展绿色建筑材料的要求^[1]。

相变材料(Phase Change Materials, PCMs)可以在近似等温或等温的条件下通过相态转变吸收或释放热量^[2-3], 将相变材料应用到混凝土中可以较好地改善混凝土的热物理性能, 提高建筑物的储能能力, 从而达到建筑节能的效果^[4-6]。相变材料可以分为有机相变材料和无机相变材料, 有机相变材料因其没有过冷和相分离现象, 且相变前后体积变化小, 被广泛地应用在建筑材料中。典型的有机相变材料如硬脂酸丁酯, 因为相变温度在人体舒适的温度范围内, 所以适合用在墙体结构中来调节室内温度, 降低建筑物能耗^[7-8]。由文献^[3]可知, 将相变材料添加到混凝土中主要有三种方法: 浸渍法、多孔材料吸附法和微胶囊法; 多孔材料吸附法因其操作简单、不改变相变材料的相变特征且对混凝土的影响较小而被广泛应用^[9]。张东等^[10]对多种多孔材料与相变材料复合而成的相变储能骨料(PCE-SA)的储能性能和耐久性进行了研究, 发现膨胀珍珠岩适合作为介质制备 PCESA, 但是众多的研究^[3, 5]发现使用多孔材料吸附有机相变材料会有相变材料残留在多孔材料表面, 使 PCESA 与水泥石的粘结变弱, 从而降低相变储能混凝土的强度。

本文用膨胀珍珠岩吸附硬脂酸丁酯, 用石灰石粉末改性制备出 PCESA, 该骨料等体积部分取代 C40 混凝土中的砂, 制得相变储能混凝土。用 SEM 观察膨胀珍珠岩和相变储能混凝土的微观结构; 利用 DSC 表征硬脂酸丁酯及 PCESA 的相变特征和相变储能混凝土的比热容。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

试验采用的相变储能材料为山东贝多倍化工有限公司生产的纯度 99% 以上工业级硬脂酸丁酯; 膨胀珍珠岩为河南鑫富精细膨胀土有限公司生产, 其

粒径为 0.1~1.5 mm, 1 MPa 压力下的体积损失率为 38%; 石灰石粉末为北京康普汇维科技有限公司生产, 化学纯规格, CaCO₃ 含量为 99%; 硅粉为甘肃博成硅业有限公司生产, 含 95% 的 SiO₂, 比表面积为 15 m²·g⁻¹; 水泥为淮南八公山水泥厂生产的 P·O 42.5 级硅酸盐水泥; 砂是淮河中砂, 细度模数为 2.6; 石子是粒径在 5~10 mm 之间的级配碎石; 水为普通自来水。

1.2 试样制备

根据文献^[11]将一定量的液态硬脂酸丁酯与定量的干燥膨胀珍珠岩均匀混合静置 3 h, 对吸附了 150% 的硬脂酸丁酯的膨胀珍珠岩进行表面改性, 用质量为其两倍的石灰石粉末包裹。每次制备 PC-ESA 时, 称取 500 g 的样品放入 150 μm 的方孔筛摇筛机上筛分, 第一批样品筛分 10 min 后停止, 称量筛网上样品质量, 剩余样品从摇筛机开始筛分, 每隔 3 min 称量一次筛网上样品的质量, 直到与第一批筛网上样品的质量相同时停止筛分, 即制备出了 PCESA。

根据图 1 的相变储能混凝土制备流程与表 1 的混凝土配比, 制备相变储能混凝土。图 1 中砂与 PCESA 的搅拌为人工搅拌。其余搅拌均是在功率为 1.5 kW、容积为 3×10⁴ cm³ 和搅拌速度为 35 r·min⁻¹ 的混凝土搅拌机中进行。砂与 PCESA 的均匀拌合物和石子先在混凝土搅拌机中搅拌 30 s, 投入硅粉和水泥搅拌 60 s 后, 加水搅拌 120 s 制备出相变储能混凝土。每次搅拌 4.05×10⁴ cm³ 混凝土, 成型 6 个 150 mm×150 mm×150 mm 的试件, 24 小时后拆模, 标准养护 28 天即得试样。

试验测得 C 组普通混凝土的密度为 2 350.25 kg·m⁻³, PC-05、PC-10、PC-15 和 PC-20 组相变储能混凝土的密度分别为 2 348.68 kg·m⁻³、2 331.38 kg·m⁻³、2 319.28 kg·m⁻³ 和 2 303.84 kg·m⁻³; PCESA 等体积取代混凝土中的砂, 相变储能混凝土

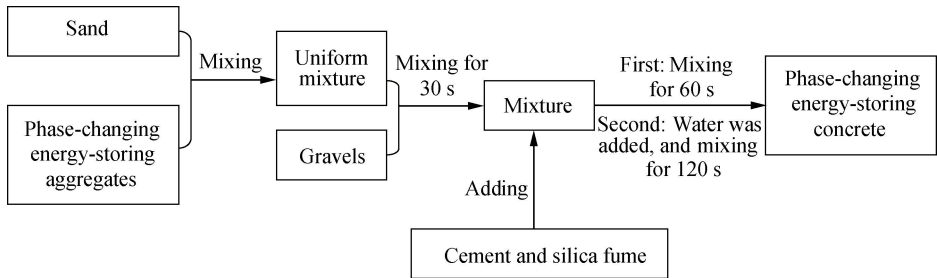


图 1 相变储能混凝土制备流程

Fig. 1 Production process of phase-changing energy-storing concrete

表 1 混凝土配比
Table 1 Mix proportion of concrete

Concrete	Cement/ (kg·m ⁻³)	Silica fume/ (kg·m ⁻³)	Sand/ (kg·m ⁻³)	Gravels/ (kg·m ⁻³)	PCESA/ (kg·m ⁻³)	Water/ (kg·m ⁻³)	Volume fraction of PCESA in sand/%
C	463.69	24.40	583.95	1122.96	0.00	205.00	0
PC-05	463.69	24.40	554.68	1122.96	10.24	205.00	05
PC-10	463.69	24.40	525.49	1122.96	20.48	205.00	10
PC-15	463.69	24.40	496.30	1122.96	30.72	205.00	15
PC-20	463.69	24.40	467.10	1122.96	40.96	205.00	20

Notes: C—Common concrete; PC— Phase-changing energy-storing concrete; PCESA— Phase-changing energy-storing aggregates.

土的密度变化很小。

从相变储能混凝土立方体试样新鲜断面上取表面平整的小块状样品，将该样品放在鼓风烘箱中烘干至恒重，用于 SEM 试验。

为使 DSC 试验可以真实反映相变储能混凝土的热物理性能，其试样的组分及比例要与相变储能混凝土的一致，因此，从相变储能混凝土立方体试块上取边长 30 mm 的立方体，将该立方体在混凝土研钵中研磨成粉末制备出 DSC 试验样品。

1.3 试验方法

根据 GB/T 50081—2002^[12] 进行抗压、劈裂抗拉强度测试。抗压试验加载速率为 15 kN·s⁻¹，劈裂抗拉试验加载速率为 1.5 kN·s⁻¹，试验采用浙江上虞伟英仪器厂生产的 TYE-2000 型压力试验机进行。

将干燥的 SEM 相变储能混凝土试样放在涂有导电胶的金属载物台上表面喷金，然后放入环境扫描电镜(QUANTA 650FEG, 美国 EFI 公司生产)中抽真空，观察其微观结构。

在气流量为 100 mL·min⁻¹ 的 N₂ 气氛条件下，取 9~12 mg 试样，用 DSC(Q2000, 美国 TA 公司

生产)进行材料的热物理性能测试，温度变化速率为 5℃·min⁻¹，从 0℃ 升温到 50℃，消除温度历史影响，再从 50℃ 降温到 -10℃，保持温度 2 min，从 -10℃ 升温到 50℃。

2 结果与分析

2.1 相变储能骨料的性能

图 2 为膨胀珍珠岩的 SEM 图像，颜色较浅的部分为骨架，由骨架分隔出深色部分为孔隙。膨胀珍珠岩的孔隙形状为蜂窝状半圆形，且大多数为敞开的孔，孔径集中在一百微米左右，膨胀珍珠岩的孔隙率较大。从图 2(b)中看出，膨胀珍珠岩的内部存在较多的细小通道，吸附硬脂酸丁酯时这些通道起着毛细管的作用，硬脂酸丁酯顺着通道进入到孔隙中，孔隙壁对硬脂酸丁酯的吸附力使硬脂酸丁酯可以储存在孔隙中不溢出。

图 3 为硬脂酸丁酯和相变储能骨料消除温度历史影响后的 DSC 曲线。从图 3(a)可以看出，硬脂酸丁酯的熔融相变温度为 15.72℃，相变峰值温度为 18.34℃，相变温度范围为 15.72~22.90℃，相变焓为 61.40 J·g⁻¹；凝固相变温度为 17.90℃，相

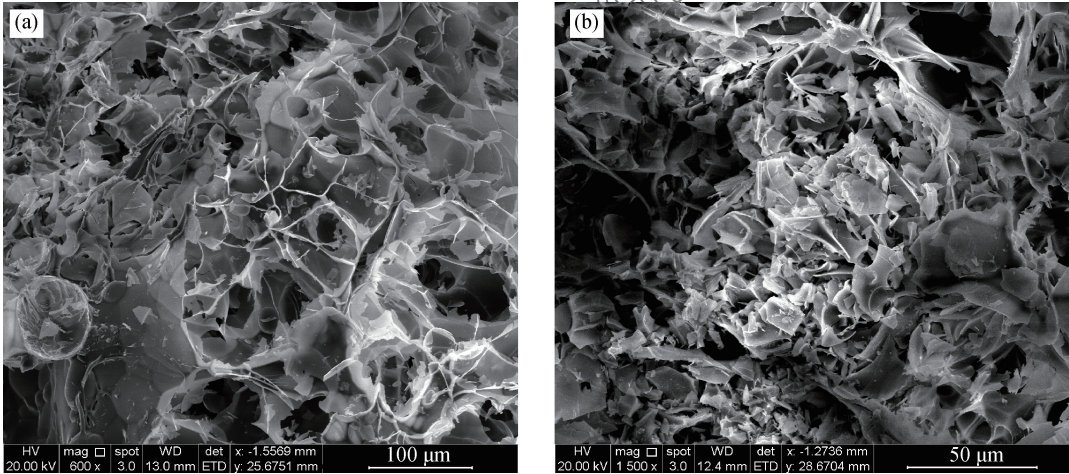


图 2 膨胀珍珠岩 SEM 图像
Fig. 2 SEM images of expanded perlite

变峰值温度为 16.36℃, 相变温度范围为 17.90~8.18℃, 相变焓为 64.40 J·g⁻¹; 图中较小的峰为固-固相变峰, 熔融时的相变焓为 12.10 J·g⁻¹, 凝固时的相变焓为 11.47 J·g⁻¹。由图 3(b)可以看出, PCESA 的熔融相变温度范围为 17.67~27.22℃, 相变峰值温度为 21.58℃, 相变焓为 41.72 J·g⁻¹, 固-固相变焓为 10.15 J·g⁻¹; 凝固相变温度范围为 19.53~9.28℃, 相变峰值温度为 16.08℃, 相变焓为 38.50 J·g⁻¹, 固-固相变焓为 9.20 J·g⁻¹。如果将固-固相变焓与熔融相变焓或凝固相变焓加在一起, 则硬脂酸丁酯在升温时的相变焓为 73.50 J·g⁻¹, 降温时的相变焓为 75.87 J·g⁻¹, PCESA 在升温过程中的相变焓为 51.87 J·g⁻¹, 在降温过程中的相变焓为 47.70 J·g⁻¹。

文献[6, 13-15]指出 PCESA 的相变温度范围会随着相变材料的体积分数增加而变宽, 但是从图 3 可看出, 膨胀珍珠岩的吸附对硬脂酸丁酯的相变温度范围影响较小, 膨胀珍珠岩只吸附了 150% 的硬脂酸丁酯, 没有达到饱和吸附, 硬脂酸丁酯在相变的过程中体积变化不会受到约束, 因此 PCESA

的相变温度范围几乎与硬脂酸丁酯相同。

2.2 相变储能混凝土的微观结构

图 4 为相变储能混凝土的微观形貌图像, 图中致密的部分为水泥石, 疏松多孔的部分为 PCESA, 从图 4(a)看出, PCESA 同砂一样, 可以较好地镶嵌在水泥石中。从图 4(b)和图 4(c)可见, 膨胀珍珠岩作为支撑材料在混凝土中结构保持完好, 硬脂酸丁酯充分容留在孔隙中。因此, 膨胀珍珠岩吸附硬脂酸丁酯并用石灰石粉末改性制备的 PCESA 具有一定的强度且与水泥浆体的适应性较好, 适合在混凝土中添加。

图 5 是水泥石与 PCESA 的界面。水泥石与 PCESA 的结合紧密, 没有裂纹。从图 5(c)看出, 界面过渡区水泥石沿 PCESA 的表面分布, 部分水化产物分布在膨胀珍珠岩表面开放的孔隙中, 增加了水泥石与 PCESA 的咬合力。由图 5(a)~5(c)可知, 界面过渡区的水泥水化完全, 水泥石致密, 放大 5 000 倍时只有细小的孔隙存在。由于吸附了硬脂酸丁酯的膨胀珍珠岩不再吸附水泥浆体中的水分, 使该处水泥石存在自养护作用^[16-17], 水泥水化

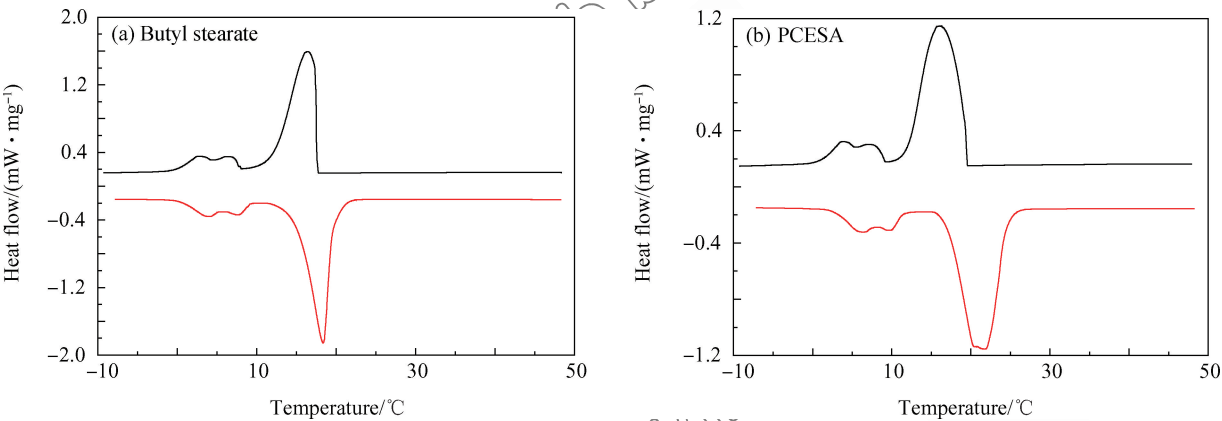


图 3 硬脂酸丁酯与 PCESA 的 DSC 曲线
Fig. 3 DSC curves of butyl stearate and PCESA

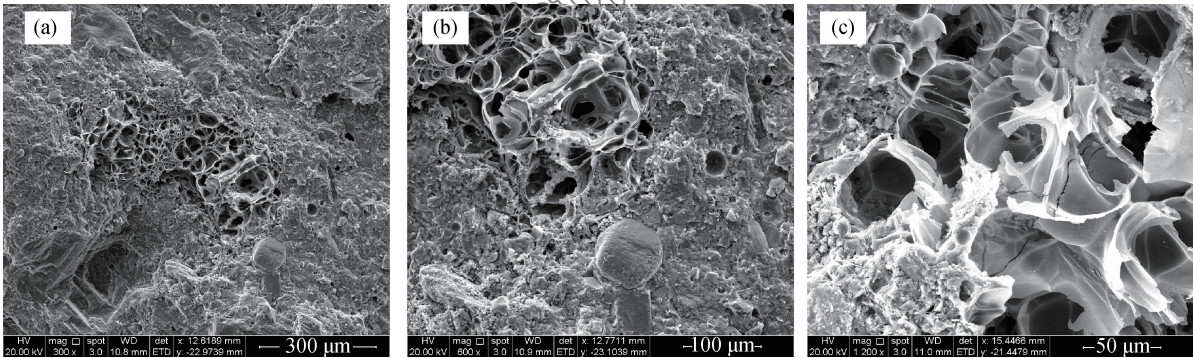


图 4 相变储能混凝土微观形貌
Fig. 4 Micro-morphology of phase-changing energy-storing concrete

充分。此外，细粒的石灰石填充于水泥颗粒与界面的空隙间，并填充于水化产物的晶格间，提高水泥石的密实度，发挥了填充效应。

图 6 为水泥石-PCESA 界面的过渡区。分析水泥石与 PCESA 界面过渡区的水化产物，主要为细小的针状钙矾石 (AFt) 与絮状的水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶，很少有成形的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体，也没有 CaCO_3 颗粒。因为石灰石粉的存在使界面过渡区

中水泥水化过程中 CaCO_3 附近的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 先成核，生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶粒细小，可以增大界面粘结力， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分布在 CaCO_3 的表面，液体离子浓度降低，加速 C_3S 的水化^[18-19]。界面过渡区中 AFt 与 C-S-H 的比表面积大，具有较大的范德华力，提高了界面过渡区中水泥石的强度。

2.3 相变储能混凝土的压拉性能

图 7 为不同 PCESA 掺量的相变储能混凝土的

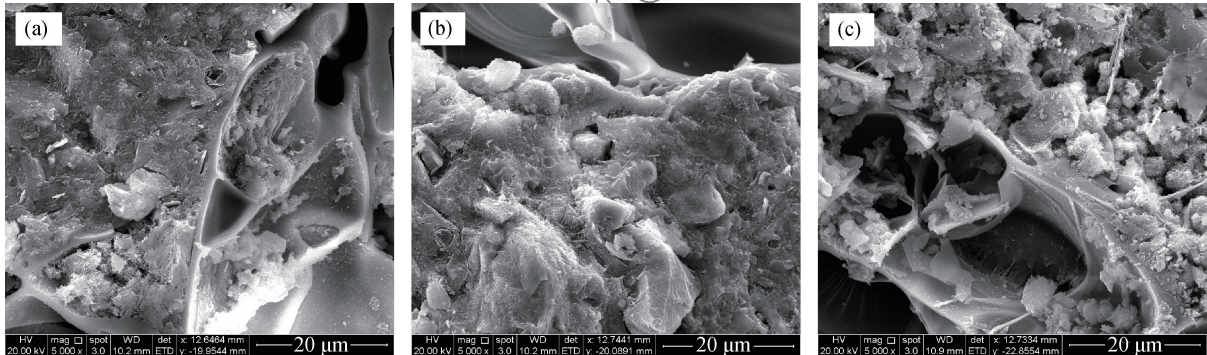


图 5 水泥石-PCESA 界面的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of cement paste-PCESA interface

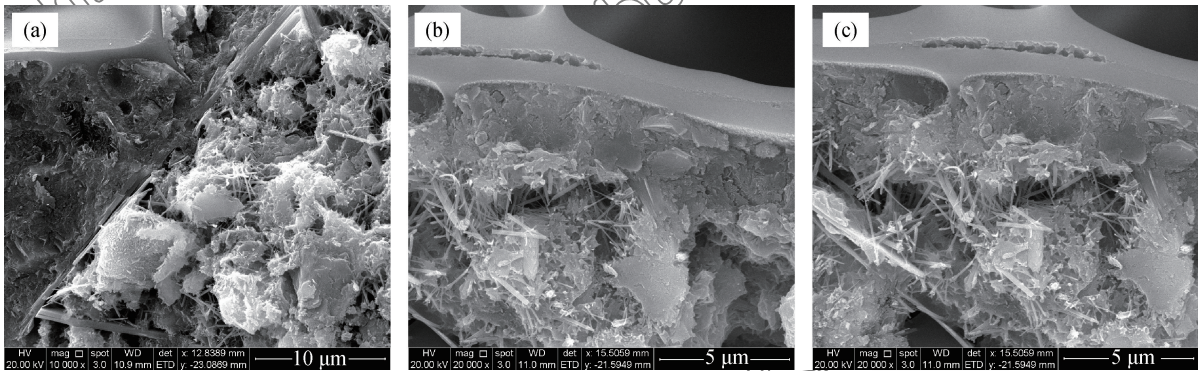


图 6 水泥石-PCESA 界面的过渡区

Fig. 6 Interfacial transition zone (ITZ) images of cement paste-PCESA

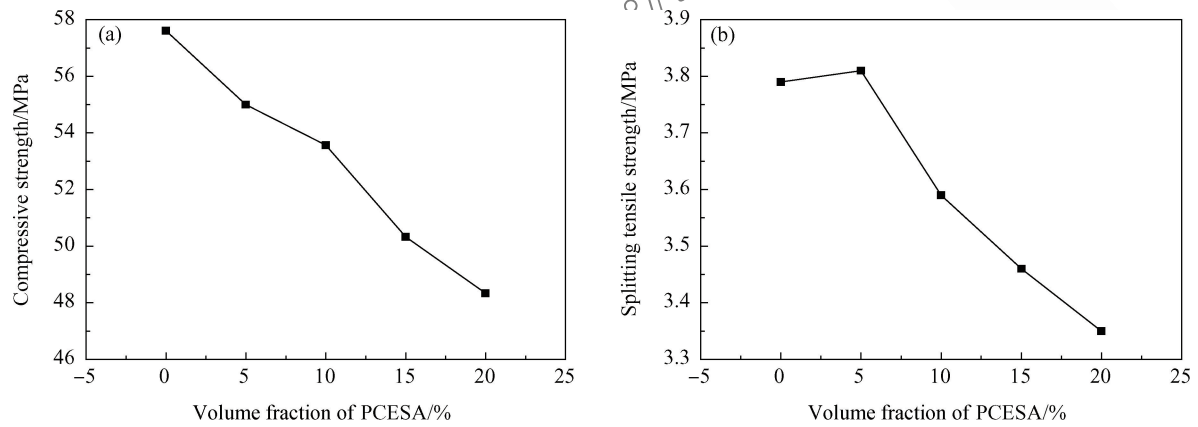


图 7 不同 PCESA 掺量的相变储能混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度

Fig. 7 Compressive strength and splitting tensile strength of phase-changing energy-storing concrete with different PCESA content

抗压强度和劈裂抗拉强度，根据文献[11]的分析可知，PCESA 的掺加降低了混凝土的抗压强度，当 PCESA 的掺量为 20% 时相变储能混凝土的抗压强度为 48.34 MPa，比普通混凝土下降了 16.09%。图 7(b) 为不同 PCESA 掺量的相变储能混凝土的劈裂抗拉强度，随着 PCESA 掺量的增加，劈裂抗拉强度逐渐降低，当 PCESA 的掺量为 20% 时，相变储能混凝土的劈裂抗拉强度为 3.35 MPa，降低了 11.61%，劈裂抗拉强度的损失小于抗压强度的损失。综合分析抗压强度和劈裂抗拉强度，PC-20 的相变储能混凝土仍可以满足 C40 混凝土的设计要求。

2.4 相变储能混凝土的比热容

图 8 为根据相变储能混凝土的 DSC 曲线绘制的相变储能混凝土的比热容曲线。

因为通过 PCESA 间接添加在混凝土中的硬脂酸丁酯较少，所以相变储能混凝土的 DSC 曲线没有随温度的变化表现出明显的相变峰。但从图 8 可以看出，PCESA 的添加提高了混凝土的比热容，

比热容值随 PCESA 掺量的增加而增加。文献[20-21]中相变储能混凝土的比热容随相变储能材料的掺量增加非线性增长，本试验中 PC-15 组相变储能混凝土到 PC-20 组相变储能混凝土的比热容出现了突变。

表 2 为比热容为 25℃ 时，温度在 15~30℃ 之间变化时各组相变储能混凝土的储能能力。不论在升温还是在降温过程中，当 PCESA 的掺量不大于 10% 时，相变储能混凝土的储能能力几乎与普通混凝土的相等；当 PCESA 的掺量为 15% 时，储能能力提高约 17%，当 PCESA 等体积取代混凝土中 20% 的砂时，温度从 15℃ 升高到 30℃ 时相变储能混凝土的储能为 $7.70 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ，温度从 30℃ 降低到 15℃ 时相变储能混凝土的储能为 $7.74 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ，比普通混凝土提高了约 75%。相变储能混凝土储能能力随着 PCESA 掺量的增加而增大，PCESA 掺量的增加使相变储能混凝土中的硬脂酸丁酯量增加，因此相变储能混凝土的储能能力提高。

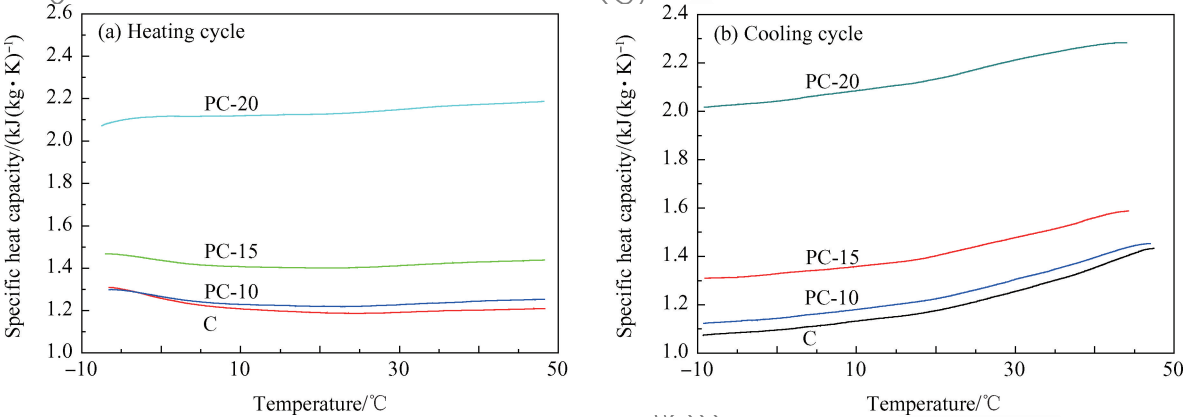


图 8 相变储能混凝土的比热容

Fig. 8 Specific heat capacity of phase-changing energy-storing concrete

表 2 相变储能混凝土的储能性能

Table 2 Energy storage properties of phase-changing energy-storing concrete

Concrete	15—30℃			30—15℃		
	Specific heat capacity/ ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	Energy storage/ ($10^4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	Growth rate of energy storage/%	Specific heat capacity/ ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	Energy storage/ ($10^4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	Growth rate of energy storage/%
C	1.19	4.28	0.00	1.22	4.39	0.00
PC-10	1.22	4.39	2.57	1.26	4.54	3.19
PC-15	1.40	5.04	17.76	1.42	5.11	16.40
PC-20	2.14	7.70	79.91	2.15	7.74	76.31

3 结 论

(1) 膨胀珍珠岩孔隙率大, 孔径分布均匀, 由其吸附硬脂酸丁酯并用石灰石粉末改性制备的相变储能骨料(PCESA)相变特征与硬脂酸丁酯的相似, 适合作为储能材料在建筑材料中使用。

(2) PCESA 添加在混凝土中结构保持完整, 因为改性的石灰石粉末发挥了填充效应和微晶核效应, 所以水泥石可以与其紧密结合, PCESA 与水泥石界面过渡区的水化产物以水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和钙矾石(Aft)为主, 结构密实, 强度较高。

(3) 相变储能混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度均随着 PCESA 掺量的增加而降低, PCESA 的掺量为 20% 时, 相变储能混凝土的抗压强度为 48.34 MPa, 劈裂抗拉强度为 3.35 MPa, 此时的力学性能仍可以满足 C40 混凝土的设计要求。

(4) PCESA 的添加提高了混凝土的比热容, 相变储能混凝土的储能能力随着 PCESA 掺量的增加逐渐增大, 当 PCESA 的掺量为 20vol%、温度在 15~30℃ 之间变化时, 相变储能混凝土的储能能力提高了约 75%, 满足建筑节能材料的要求。

参考文献:

- [1] 仇保兴. 进一步加快绿色建筑发展步伐——中国绿色建筑行动纲要(草案)解读[J]. 城市发展研究, 2011, 18(7): 1-6.
QIU B X. Further accelerating the development of green building: An interpretation of the draft of Chinese green building action program[J]. Urban Studies, 2011, 18(7): 1-6 (in Chinese).
- [2] 宋晓庆, 姜猛进, 李守群, 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, 25(1): 17-22.
SONG X Q, JIANG M J, LI S Q, et al. Preparation and characterization of paraffin/polyvinyl alcohol phase change fibers for energy storage[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 17-22 (in Chinese).
- [3] LING T C, POON C S. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview[J]. Construction and Building Materials, 2013, 46: 55-62.
- [4] KONUKLU Y, OSTRY M, PAKSOY H O, et al. Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications[J]. Energy and Buildings, 2015, 106: 134-155.
- [5] KUZNIK F, DAVID D, JOHANNES K, et al. A review on phase change materials integrated in building walls [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 379-391.

- [6] HAURIE L, SERRANO S, BOSCH M, et al. Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour[J]. Energy and Buildings, 2016, 111: 393-400.
- [7] 施韬, 孙伟, 王倩楠. 凹凸棒土吸附相变储能复合材料制备及其热物理性能表征[J]. 复合材料学报, 2009, 26(5): 143-147.
SHI T, SUN W, WANG Q N. Study on preparation and thermal performance tests of attapulgite-based phase change composites for energy storage[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(5): 143-147 (in Chinese).
- [8] 施韬, 孙伟, 王倩楠. 潜热储能石膏基建筑材料的制备与其储(放)热行为研究[J]. 功能材料, 2015, 40(6): 970-973.
SHI T, SUN W, WANG Q N. Study on preparation and thermal performance tests of latent heat storage gypsums[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 40(6): 970-973 (in Chinese).
- [9] SARI A, KARAIPEKLI A. Preparation, thermal properties and thermal reliability of capric acid/expanded perlite composite for thermal energy storage[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 109(2-3): 459-464.
- [10] 张东, 周剑敏, 吴科如, 等. 颗粒型相变储能复合材料[J]. 复合材料学报, 2004, 21(5): 103-109.
ZHANG D, ZHOU J M, WU K R, et al. Granulated phase changing composite for energy storage[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(5): 103-109 (in Chinese).
- [11] 白梅, 马芹永. 相变储能骨料和硅粉掺量对混凝土抗压强度影响的试验与分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(13): 266-269.
BAI M, MA Q Y. Experiment and analysis on compressive strength of concrete with different contents of phase-changing energy storing aggregate and silica fume[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(13): 266-269 (in Chinese).
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese).
- [13] YAN Q Y, LIANG C, ZHANG L. Experimental study on the thermal storage performance and preparation of paraffin mixtures used in the phase change wall[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2008, 92(11): 1526-1532.
- [14] 陈云深, 陈凯, 沈斌君, 等. 交联定形相变储能材料的研制[J]. 复合材料学报, 2006, 23(3): 67-70.

- CHEN Y S, CHEN K, SHEN B J, et al. Preparation of cross-linked shape-stabilized phase change materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(3): 67-70 (in Chinese).
- [15] 张东, 吴科如. 孔结构对有机相变物质相变行为的调节作用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(9): 1163-1167.
- ZHANG D, WU K R. Tuning effect of porous structure on phase changing behavior of organic phase changing matters[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2004, 32(9): 1163-1167 (in Chinese).
- [16] 董淑慧, 张宝生, 葛勇, 等. 轻骨料-水泥石界面区微观结构特征[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(6): 737-741.
- DONG S H, ZHANG B S, GE Y, et al. Microstructure characteristics of interfacial transition zone (ITZ) between lightweight aggregate and cement paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(6): 737-741 (in Chinese).
- [17] MEHTA P K, MONTEIRO P J M. *Concrete: Microstructure, properties, and materials*[M]. New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- [18] 宋少民, 杨柳, 徐国强. 石灰石粉与低品质粉煤灰复掺对混凝土耐久性能的影响[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(s1): 368-372.
- SONG S M, YANG L, XU G Q. Influence of limestone powder and low-quality fly ash on the durability of concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(s1): 368-372 (in Chinese).
- [19] 陈剑雄, 李鸿芳, 陈寒斌, 等. 掺超细石灰石粉和钛矿渣粉超高强混凝土研究[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(6): 672-676.
- CHEN J X, LI H F, CHEN H B, et al. Study of super high strength concrete containing super-fine limestone power[J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(6): 672-676 (in Chinese).
- [20] LECOMPTE T, BIDEAU P L, GLOUANNEC P, et al. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 94: 52-69.
- [21] LI J L, XUE P, DING W Y, et al. Micro-encapsulated paraffin/high-density polyethylene/wood flour composite as form-stable phase change material for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93(10): 1761-1767.