

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.119



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



建筑能量桩用三元复合相变混凝土的制备及其性能

宫玉辉¹, 张鹏¹, 魏敏², 李治辉¹, 唐雨孜¹, 于佳林¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛西海岸新区交通运输局, 山东 青岛 266427)

摘要:针对当前相变混凝土存在的部分缺陷与不足,将癸酸-月桂酸-棕榈酸复合相变材料掺入混凝土中制备相变混凝土。开展真空吸附试验,并对多孔骨料采用两种封装方式进行封装定型,对不同封装方式下的相变混凝土粗骨料以及不同配比的相变混凝土进行抗压强度试验和导热性能试验;判断不同封装方式在多次相变循环下的变化,对两种不同封装方式的相变混凝土粗骨料和不同配比的相变混凝土进行相变循环试验。结果表明,相变混凝土在经过 100 次相变循环后,相变粗骨料掺量为 10%、20%、30% 时,水泥净浆法封装的抗压强度损失率比环氧树脂+水泥粉法封装的分别低 0.69%、0.44%、1.09%,水泥净浆法封装更能满足能量桩长期运行下桩身混凝土的需求;当相变粗骨料掺量为 20% 时,相变混凝土的抗压强度、导热性能、相变循环稳定性较好,适用范围更广。

关键词:能量桩;相变材料;相变混凝土;传热性能;力学性能

中图分类号: TU528.59 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)03-0185-11

Preparation and performance of ternary composite phase change concrete for building energy piles

GONG Yuhui¹, ZHANG Peng¹, WEI Min², LI Zhihui¹, TANG Yuzi¹, YU Jialin¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, P. R. China;
2. Qingdao West Coast New Area Transportation Bureau, Qingdao 266427, Shandong, P. R. China)

Abstract: In light of the defects and deficiencies in conventional phase change concrete, a novel composite phase change material (PCM) comprising decanoic acid-lauric acid-palmitic acid was incorporated into concrete to prepare phase change concrete. Therefore, the vacuum adsorption test was conducted, and the porous matrix material was encapsulated by two kinds of encapsulation method. The compressive strength test and thermal conductivity test were carried out on PCM concrete coarse aggregates and PCM concrete with different mix proportions under different encapsulation methods. The changes of different encapsulation methods under multiple phase change cycles were evaluated, and phase change cycle tests were conducted on the coarse aggregate of phase change concrete with two different encapsulation methodologies and the phase change

收稿日期: 2024-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(42177167)

作者简介: 宫玉辉(1998-),男,主要从事建筑能量桩研究,E-mail:466198966@qq.com。

张鹏(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zhangpchn@qut.edu.cn。

Received: 2024-08-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 42177167)

Author brief: GONG Yuhui (1998-), main research interest: building energy piles, E-mail: 466198966@qq.com.

ZHANG Peng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhangpchn@qut.edu.cn.

concrete with different proportions. The results show that after 100 phase change cycles, the compressive strength loss rate of cement slurry encapsulation is 0.69%, 0.44% and 1.09% lower than that of epoxy resin + cement powder encapsulation when the content of phase change coarse aggregate is 10%, 20% and 30%, respectively. Therefore, the compressive strength loss rate of PCM encapsulated by the cement paste method can better meet the needs of pile concrete under long-term operation of energy piles. When the content of phase change coarse aggregate is 20%, the compressive strength, thermal conductivity and cyclic stability of phase change concrete are better, and the application range is wider.

Keywords: energy pile; phase change materials; phase change concrete; heat transfer performance; mechanical properties

建筑运行导致的能源消耗引起了学者们对热能存储的关注,热能存储主要分为显热蓄热、化学蓄热和潜热蓄热^[1-4],而相变混凝土是利用其自身的相变材料进行潜热蓄热,这一过程可以有效减少建筑运行阶段产生的能源消耗与碳排放^[5-6]。相变材料(PCM)是指当温度不变时材料的状态会发生变化,且在这一过程中会吸收或者释放热量的材料^[7-8]。PCM可以对热量进行储存或对温度进行调节,将其应用于建筑材料中,可以利用其储能作用,维持建筑物内温度稳定,满足人体对建筑物的舒适性要求,减少能源消耗^[9-12]。将相变材料加入混凝土中,制备成相变混凝土,可以应用于建筑的不同领域,但相变材料的特殊性能以及掺入方式均会对混凝土产生不同的影响。由于相变材料的相变温度单一,难以满足实际工程对不同温度的要求。针对此类问题,部分学者将多种相变材料按比例混合,以获得相变温度满足实际应用要求、相变潜热较高且热稳定性良好的多元相变材料^[13]。

吴智敏等^[14]将相变微胶囊与多孔调湿材料混合,制备出一种兼具调温调湿功能的新型复合相变材料。蒋才永等^[15]以泡沫混凝土为载体,采用相变微胶囊法封装固相变材料,制备新型相变混凝土,用于建筑保温隔墙板。刘江等^[16]通过数值模拟软件研究了相变蓄热通风技术在西安地区的应用,得出其最佳的应用环境。Zhu等^[17]通过在混凝土板中掺入微胶囊相变材料,提出了一种检测不同环境温度对相变混凝土热物性能影响的方法。但单一的相变材料由于相变温度单一,很难满足建筑领域对相变温度多样化的需要,为此,众多学者对该问题进行了研究。有的学者采用将相变材料与其他材料混合的方法,制备出相变温度可调节的复合相变材料,在一定程度上解决了相变材料的相变温度单一、应用范围较小的问题,如Zhang等^[18]将明矾与熔点改进剂Ala用物理混合方法制备熔融温度可调的相变材料,并通过试验验证其热稳定性;Ye等^[19]通过真空吸附方法将聚乙二醇吸附在3种不同的多

孔基体材料中;Wang等^[20]采用珊瑚砂与聚乙二醇制备出的复合相变混凝土具有良好的热循环性能,但也导致混凝土强度出现较大幅度降低。Huang等^[21]通过从粉煤灰中提取空心微珠,并以石蜡为芯材制备复合相变微胶囊,用其代替砂子,加入混凝土中,显著提高了混凝土的热性能,但也导致了混凝土抗压强度降低了20%。还有学者采用将两种或多种相变材料按照一定比例配制混合的方法来制备满足应用要求的多元复合相变材料。李志等^[22]将肉豆蔻醇、肉豆蔻酸和月桂酸加热熔融,并用硅藻土为基体材料进行定型封装,制备适用于建筑围护结构的储热混凝土粗骨料;舒钊^[23]将月桂酸、肉豆蔻酸和硬脂酸熔融混合,并通过膨胀石墨和硅藻土制备复合相变材料,将其制备成相变石膏板,应用于建筑墙体中,但仍存在抗压强度较低的问题,无法得到广泛应用。还有学者通过制备新型相变混凝土来提高相变混凝土的性能,Christen等^[24]通过在3D打印混凝土中加入PCM制备出3D打印相变混凝土,其热能存储良好且对环境影响较小,但应用范围较小。

针对相变材料相变温度单一、热稳定性差和相变潜热低以及掺入混凝土后抗压强度降低等问题,笔者以相变材料癸酸、月桂酸、棕榈酸为原料,通过熔融混合的方式制备三元复合相变材料。采用多孔基体吸附的方法将其吸入到粉煤灰-煤矸石质多孔陶粒轻骨料内部孔隙中,定型封装后即成为相变混凝土粗骨料。用其制备性能优良、耐久性较好、蓄热量高的相变储能混凝土,并将其应用于建筑能量桩中,提高其对能源的利用效率,实现能量桩对建筑温度的调节。

1 试验

1.1 试验材料与仪器

3种相变材料分别为:癸酸,白色结晶状固体;月桂酸,别名十二酸,白色颗粒状固体;棕榈酸,白色颗粒状固体,均为上海麦克林生化科技股份有限

公司生产,相关参数如表1所示。多孔基体材料选用自制粉煤灰-煤矸石质多孔陶粒轻骨料,呈灰色球形,粒径6~12 mm,内部存在大量微小孔隙。

表1 相变材料参数

Table 1 Parameters of phase change materials

名称	分子式	相变温度/℃	相变潜热/(J/g)
癩酸	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	31.3	136.0
月桂酸	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	43.1	150.5
棕榈酸	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	62.3	186.0

制备相变混凝土的其他材料:水泥,海螺牌P·O42.5硅酸盐水泥;砂子,细度模数2.7的天然河砂;碎石,粒径5~20 mm且含泥量低于1.5%;石墨粉,粒径10 μm;粉煤灰,二级粉煤灰;煤矸石;硬脂酸(上海麦克林生化科技股份有限公司);硼砂;矿渣粉,S95级高炉矿渣;减水剂,综合型聚羧酸高

性能减水剂。

试验中用到的主要设备仪器:电热恒温干燥箱(101-00B型)(绍兴市上虞天宇塑料仪器厂);中药制丸机;节能箱式电炉(天津中环SX-B01123);圆盘造粒机(建琨机械);水泥砂浆搅拌机;冷藏箱;真空泵(FY-1C-N)(浙江飞越机电有限公司);数显恒温水浴锅;美国TA DSC25差示扫描量热仪;美国FEI Nova nanoSEM 450热场发射扫描电子显微镜;电磁力搅拌器;振动台;微机控制电液伺服压力试验机;双板导热分析仪;混凝土搅拌机。

1.2 试验配合比设计

试验相变混凝土强度设计等级为C35,配合比设计根据规范《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[25]来确定,经过多次试验修改优化,最终确定混凝土的配合比如表2所示。

表2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix proportions

编号	封装方式	配合比/(kg/m ³)								
		水泥	水	砂子	石子	相变粗骨料	矿渣	粉煤灰	石墨	减水剂
S	无	464.3	195	656	1 166.0	0	46.4	46.4	9.28	5.66
A1		464.3	195	656	1 049.4	116.6	46.4	46.4	9.28	5.66
A2	水泥净浆封装	464.3	195	656	932.8	233.2	46.4	46.4	9.28	5.66
A3		464.3	195	656	816.2	349.8	46.4	46.4	9.28	5.66
B1	环氧树脂+	464.3	195	656	1 049.4	116.6	46.4	46.4	9.28	5.66
B2	水泥粉封装	464.3	195	656	932.8	233.2	46.4	46.4	9.28	5.66
B3		464.3	195	656	816.2	349.8	46.4	46.4	9.28	5.66

在配合比设计中,S组为未掺入相变材料的普通混凝土,A、B组为将两种不同封装方式的相变混凝土粗骨料按照一定比例掺入制备的相变混凝土。其中A组代表由水泥净浆法封装,B组代表由环氧树脂+水泥粉法封装。相变混凝土粗骨料代替等质量的混凝土石子,质量替代比例分别为10%、20%、30%,编号分别为A/B1、A/B2、A/B3。由于多孔陶粒轻骨料内部存在大量孔隙且质量轻,在建筑中常用作保温隔热材料^[26],将其加入到混凝土中会降低混凝土的导热性能,进而影响能量桩的换热效率。因此,通过加入价格低廉且性质稳定、不易与其他物质发生化学反应的导热材料(如石墨粉、铁粉等),提高混凝土的导热性能。试验采用的材料是石墨粉,导热系数为129 W/(m·K)。由文献^[27]可知,石墨粉的掺入会降低混凝土的抗压强度。这是因为当混凝土受到外力时,石墨粉会在其内部进行滑移甚至直接被破坏,且石墨粉是常用的润滑材料,与水泥之间的黏结性较差。将二者共同掺入混凝土中会导致混凝土内部密实度降低,从而降低抗压强度。因此,石墨掺量建议控制在20%以下,

为保证混凝土的导热性能,将石墨粉掺量设置为粉煤灰用量的20%。

1.3 试验步骤与试验方法

1.3.1 相变混凝土粗骨料制备

按照癩酸:月桂酸:棕榈酸为5:3:2(质量比)称量样品,倒入烧杯中,用玻璃棒搅拌,进行初步混合。然后置于80℃恒温水浴环境下,采用电磁力搅拌器以500 r/min的转速搅拌2 h,得到三元复合相变材料^[28]。

由于复合相变材料自身的特性,如果将其作为外加剂直接加入混凝土中,在温度变化时会产生固-液相变,容易导致材料的泄漏和失效,影响混凝土的强度和桩基稳定性,进而影响上部建筑的稳定性与安全性。因此,选用多孔基体材料吸附复合相变材料,从而制备相变混凝土粗骨料,要求基体材料具有较多内部孔隙,从而具有良好的吸附性,且不与复合相变材料发生化学变化。

以固废材料粉煤灰、煤矸石为主要原料,混合硬脂酸、硼砂,参考杨艳茹等^[29]的配比制备粉煤灰-煤矸石多孔轻骨料,经多次试验调整后,确定粉煤

灰:煤矸石:硬脂酸:硼砂(质量比)为 50:16:30:4, 按比例称量后倒入水泥砂浆搅拌机中搅拌均匀。在搅拌好的干料中加入其质量 30% 的去离子水,再放入制丸机中造粒,筛选出 6~12 mm 的多孔骨料,室温干燥 72 h。最后放入箱式电炉中,升温至 1 120 °C,烧结并保温 30 min,自然冷却后即 为粉煤灰-煤矸石质多孔陶粒轻骨料(以下简称多孔骨料),如图 1 所示。按照规范《轻集料及其试验方法 第 2 部分:轻集料试验方法》(GB/T 17431.2—2010)^[30]检测其堆积密度、筒压强度、1 h 吸水率,如表 3 所示。



图 1 粉煤灰-煤矸石质多孔陶粒轻骨料

Fig. 1 Fly ash-coal gangue porous ceramsite light aggregate

表 3 多孔骨料材料性能

Table 3 Properties of porous aggregates

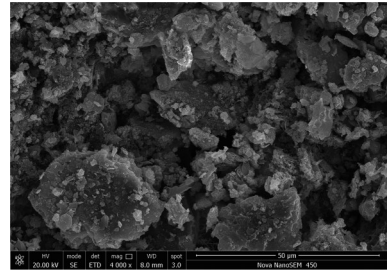
粒径/mm	筒压强度/MPa	堆积密度/(kg/m ³)	1 h 吸水率/%
6~12	3.9	990	10.1

采用 SEM 扫描电镜观察可知(图 2),多孔骨料内部具有大量蜂窝状孔隙,且具有密度小、质量轻、材料环保、不易与相变材料发生反应、与混凝土结合后强度较高等优点,适用于吸附相变材料。因此,采用此多孔骨料作为基体材料。

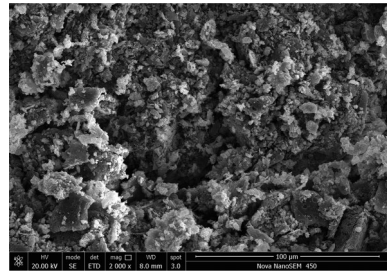
采用真空吸附法对复合相变材料进行吸附,主要步骤为:先取适量多孔骨料置于烘箱中,在 105 °C 下烘干。称取 100 g 烘干的多孔骨料,置于抽滤瓶中,再将配制好的复合相变溶液倒入抽滤瓶,直至溶液表面全部没过多孔骨料。盖上橡皮塞,然后将抽滤瓶置于恒温水浴锅中,使用橡胶软管,一端连接抽滤瓶支管,另一端连接真空泵,保持吸附环境为真空状态,吸附完成后的多孔骨料即为相变骨料。

吸附相变材料后,对其进行 SEM 微观扫描电镜试验,如图 3 所示。通过对比观察图 2、图 3 可以发现,由于复合相变材料的填充,多孔骨料内部的蜂窝状细小孔隙基本消失。

吸附完成后的相变骨料如图 4(a)所示,如果直接将其掺入混凝土中,在温度变化过程中会导致相变材料泄露,影响混凝土强度。为防止泄露,采用水泥净浆和环氧树脂分别对相变骨料进行封装,以



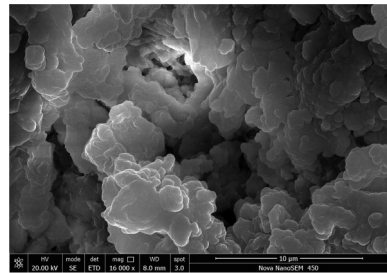
(a) 放大 4 000 倍



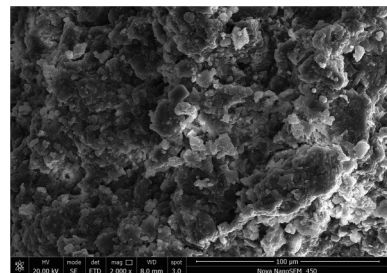
(b) 放大 2 000 倍

图 2 多孔骨料内部的 SEM 图

Fig. 2 Internal SEM images of porous aggregates



(a) 放大 16 000 倍



(b) 放大 2 000 倍

图 3 吸附相变材料后多孔骨料的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of porous aggregates after absorbing phase change materials

比选出封装效果最好的方法。水泥净浆法封装的主要步骤为:制备水灰比为 0.45 的水泥净浆,将相变骨料放到圆盘造粒机中,再倒入水泥净浆,造粒机圆盘转动使水泥净浆均匀地涂抹到相变骨料表面。静置 24 h,待表面水泥完全凝固后,再将相变骨料放入清水中养护 48 h,然后捞出晾干,使相变骨料表面形成一层坚硬的水泥保护壳,以提高相变骨料强度且有效防止复合相变材料的泄露,如图 4(b)所示。

环氧树脂+水泥粉法封装主要步骤为:首先将环氧树脂与固化剂按1:1的比例混合,然后放入烘箱中,于40℃加热30 min,制成半液态的环氧树脂胶结液。倒入吸附完成后的相变骨料并搅拌均匀,使环氧树脂凝胶将相变骨料表面充分包裹,再用漏勺将包裹好的相变骨料捞出,平铺在桌面上。由于环氧树脂本身黏性较大,所以封装后容易导致材料发生团聚现象,无法分开,如果强行分开会导致相变骨料表面形成的环氧树脂薄膜被撕开,无法形成有效的封装,导致其内部的相变材料泄漏。因此,按照文献[31]中的方法,使用环氧树脂封装完成后,将其放入水泥粉中,通过搅拌使其形成分散的结构,再用筛子筛掉多余的水泥粉,静置24 h,直至表面环氧树脂胶完全硬化,如图4(c)所示。相比水泥净浆法,该方法无需养护,更节省时间。

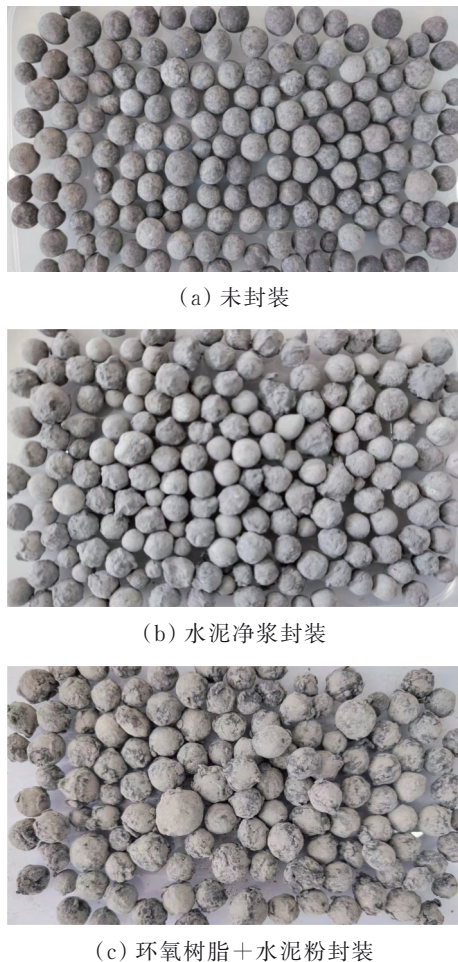


图4 封装前后相变骨料

Fig. 4 Phase change aggregates before and after encapsulation

1.3.2 复合相变材料的DSC测试分析

通过差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)使用TA DSC25差示扫描量热仪对制备好的复合相变材料进行测试,升温范围为0~80℃,升温速率为5℃/min,测试气氛为氮气环

境,得到复合相变材料的相变温度为17.69℃,相变潜热为139.62 J/g,如图5所示。该复合相变材料应用场景为冬季工况下运行的建筑能量桩,结合青岛市冬季温度情况,相变温度以15~20℃为宜。因此,该复合相变材料相变温度符合能量桩运行要求,且相变潜热较高,适用于建筑能量桩。

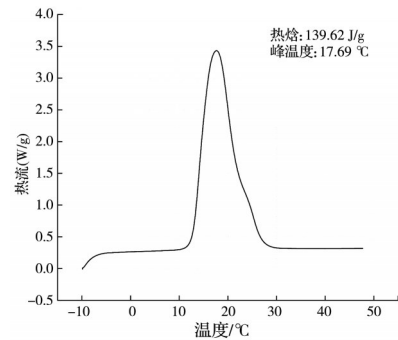


图5 复合相变材料的DSC测试曲线

Fig. 5 DSC test curve of composite phase change materials

1.3.3 相变循环耐久性试验

在能量桩的应用过程中需要对桩身混凝土施加温度荷载,其中的复合相变材料会进行频繁的相变循环。因此,为避免相变骨料内部的相变材料泄漏,需要保证封装后的相变骨料在经过冷热循环荷载后表面不出现裂缝且内部材料泄漏量最低。对两种封装方法制备的相变混凝土粗骨料进行相变循环试验,每种封装方法的相变骨料各称取100 g,于40℃烘箱中快速加热、于5℃冷藏箱缓慢冷却,加热时间为1 h,冷却时间为3 h,以上过程为一个相变循环。经过100次冷热相变循环后,观察相变骨料表面的裂缝情况,并计算复合相变材料的渗漏率,以选择较优异的封装方式。

将掺入相变骨料的混凝土试块进行同样的相变循环试验,先将养护好的试块放入烘箱中,升温至40℃,2 h后取出并迅速移入5℃冷藏箱中,缓慢降温4 h后,再放入40℃烘箱中加热2 h,以上过程为一个相变循环。此过程为模拟能量桩在运行过程中的蓄、取热过程,观察100次相变循环后的试块外观,并对其进行抗压强度测试。

2 试验结果与分析

2.1 最佳吸附环境的确定

首先确定多孔骨料吸附相变材料的最佳温度,分别取5份100 g多孔骨料,于105℃干燥6 h后,分别采用30、35、40、45、50℃水浴加热120 min,同时采用真空泵进行真空吸附,不同温度下相变材料的吸附率如图6所示。

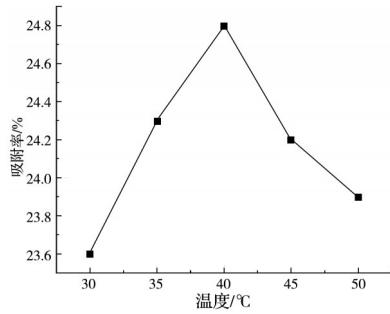


图 6 不同温度下相变材料的吸附率

Fig. 6 Adsorption rates of phase change materials at different temperatures

由图 6 可知,温度为 40 °C 时多孔骨料对相变材料的吸附率最高,最终确定最佳吸附温度为 40 °C。

分别取 5 份 100 g 等质量多孔骨料,采用同样的方法进行真空吸附,吸附温度均为 40 °C,吸附时间分别为 60、90、120、150、180 min,不同时间下相变材料的吸附率如图 7 所示。

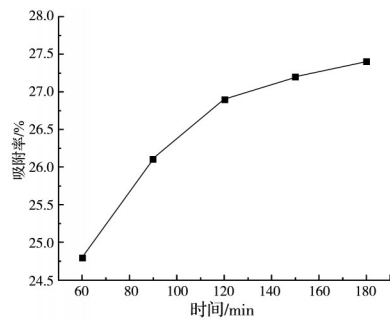


图 7 不同时间下相变材料的吸附率

Fig. 7 Adsorption rates of phase change materials at different times

由图 7 可知,当温度为 40 °C 时,多孔骨料对相变材料的吸附率随着时间的增长而不断升高,在 120 min 前升高幅度较大,120 min 后吸附率上涨幅度逐渐放缓。考虑到时间及效率因素,将吸附时间确定为 150 min。

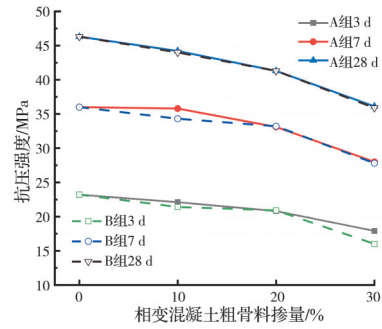
最终确定最佳吸附环境为水浴加热 40 °C,最佳吸附时间为 150 min。

2.2 相变混凝土的抗压强度和导热性能

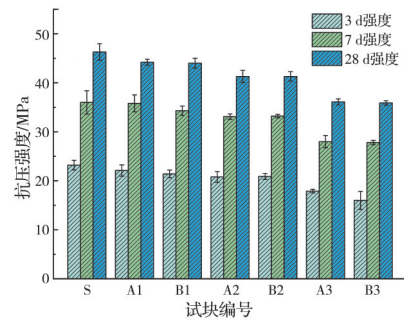
2.2.1 抗压强度

对相变混凝土进行抗压强度试验,按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[32]进行。制备 100 mm×100 mm×100 mm 立方体相变混凝土抗压试块,分别养护 3、7、28 d 后,使用微机控制电液伺服压力试验机进行抗压强度试验。每组配比采用 3 个试块进行强度试验,取平均值,各组混凝土抗压强度变化如图 8 所示。

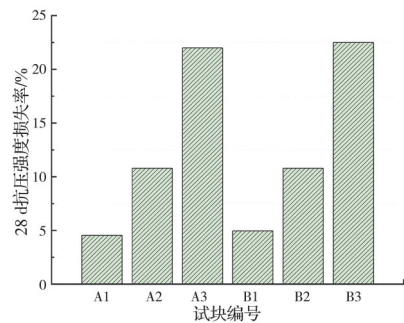
由图 8(a)可知,随着相变混凝土粗骨料掺量的增加,A 组和 B 组混凝土试块各龄期抗压强度均呈



(a) 两组试块抗压强度随相变粗骨料掺量的变化



(b) 各组试块抗压强度对比



(c) 各组试块抗压强度损失率

图 8 各组混凝土抗压强度的变化

Fig. 8 Changes in the compressive strength of each group of concrete

下降趋势。由图 8 可知,当相变粗骨料掺加比例为 10% 时,A、B 组相变混凝土 28 d 抗压强度分别为 44.2、44.0 MPa,与 S 组普通混凝土相比,抗压强度损失率分别为 4.54% 和 4.96%;当掺加比例为 20% 时,A、B 组相变混凝土 28 d 抗压强度均为 41.3 MPa,相比 S 组,抗压强度损失率均为 10.8%;当掺量达到 30% 时,A、B 组相变混凝土 28 d 抗压强度仅为 36.1、35.9 MPa,相比 S 组,抗压强度损失率分别达 22% 和 22.5%,相比前两组,抗压强度降幅显著增大。这主要是由于相变粗骨料替代了部分混凝土石子,而石子的强度远高于相变粗骨料,且相变粗骨料的圆球形结构与混凝土内部其他材料黏结较差,受外部压力作用后内部易产生相对滑移。因此,随着相变粗骨料掺量的增大,混凝土强度降幅就越大。

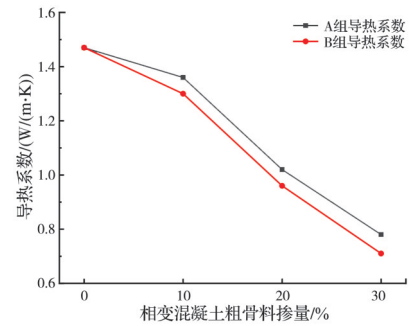
由图8可知,A组与B组相变混凝土各龄期抗压强度差距较小,当相变粗骨料掺量相同时,两组28 d抗压强度最大值之间的差值仅为0.2 MPa,证明两种不同封装方式对混凝土抗压强度基本无显著影响。A、B组相变混凝土存在较小强度差距的主要原因可能是水泥净浆封装的相变粗骨料水泥外壳相比于环氧树脂更容易与混凝土内部材料黏结,增强了相变混凝土内部的稳定性。

由图8可知,龄期为28 d的各组混凝土试块中,抗压强度最低的是B3组,为35.9 MPa。依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[33]对建筑桩基混凝土的强度要求,桩身混凝土的强度等级不应低于C30,因此,上述相变混凝土配比的力学性能均符合规范对能量桩桩身混凝土强度的基本要求。

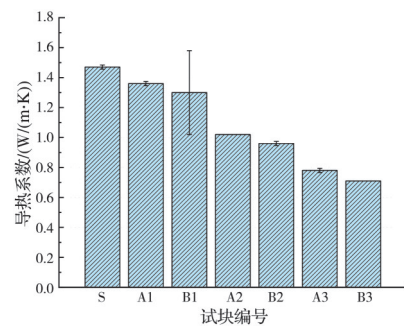
2.2.2 导热性能

制备相变混凝土导热试块,养护28 d后进行混凝土导热性能试验,试验采用双板导热分析仪进行。根据《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》(GB/T 10294—2008)^[34]规范,使用两块尺寸为300 mm×300 mm×30 mm相同配比的混凝土板进行4次试验,取平均值。冷面板温度设置为15℃,热面板温度设置为35℃,通过测量试块由热面板到冷面板传递的热量,再根据试块的厚度与传热面积,可以计算得到其导热系数,各组试块的导热系数如图9所示。

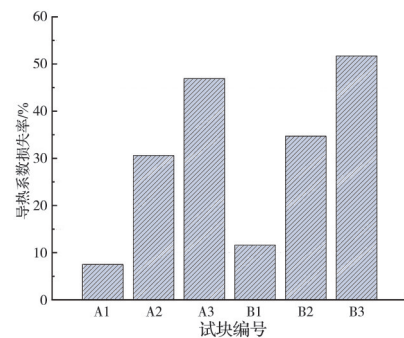
由图9(a)可知,与S组普通混凝土相比,随着相变混凝土粗骨料掺量的增加,A、B组相变混凝土的导热系数不断降低。当相变粗骨料掺量分别达到10%、20%、30%时,A、B组相变混凝土导热系数损失率分别达7.5%、30.6%、46.9%和11.6%、34.7%、51.7%,且当掺量为20%时,A、B组导热系数分别降低30.6%和34.7%,相较S组,出现明显下降。说明随着相变粗骨料掺量的增加,相变混凝土内部密度降低,孔隙率增大,且粗骨料内部存在大量孔隙,提高了相变混凝土的保温性能,导致导热性能下降;而当陶粒掺量为10%时,A、B组相变混凝土导热系数下降幅度较小,主要是由于相变粗骨料掺加比例较低且加入了导热增强材料石墨粉,在一定程度上提高了相变混凝土的导热系数;而当相变粗骨料掺量为30%时,A、B组导热系数损失率均达50%左右,但相较20%的掺量时,下降幅度降低。这主要是由于试验所采用相变粗骨料中多孔骨料粒径为6~12 mm,略小于碎石的粒径5~20 mm,且多孔骨料密度较小,相同质量下体积较大。相变粗骨料填充了混凝土内部的部分孔隙,使得相变混凝土导热系数的降低幅度减小。



(a) 两组试块导热系数随相变粗骨料掺量的变化



(b) 各组混凝土试块导热系数对比



(c) A、B组混凝土试块导热系数损失率

图9 各组混凝土试块导热系数的变化

Fig. 9 Changes in thermal conductivity of each group of concrete test blocks

由图9(b)、(c)可知,在相变混凝土粗骨料掺量相同的情况下,相较B组试块,A组试块导热系数均略高,当相变粗骨料掺量为30%时,导热系数差值最大,为0.07 W/(m·K)。这主要是由于水泥的导热性能略好于环氧树脂,随着相变粗骨料掺量的增加,封装方式导致的导热性能差异逐渐显著,但差值相对较小,并未出现明显差异。

2.3 相变循环耐久性试验分析

2.3.1 相变混凝土粗骨料

分别进行10、20、50、100次相变循环试验,观察相变混凝土粗骨料表面渗漏情况,测量循环后相变粗骨料质量,并计算相变粗骨料相变循环前后的质量差,从而得出复合相变材料的渗漏率,试验结果见表4。图10为不同封装方式的相变粗骨料相变循

环前与相变循环 100 次后的对比。由图 10 可知,经过 100 次相变循环后,图 10(a)中未封装的相变粗骨料表面已有部分相变材料泄漏流出,并随着温度降低在表面形成白色凝结物;图 10(b)中水泥净浆法封装的相变粗骨料表面与相变循环前相比未出现明显差异,表面没有出现明显裂缝;图 10(c)中环氧树脂+水泥粉封装的相变粗骨料随相变循环次数的增加有部分骨料表面逐渐出现了轻微裂缝。

表 4 多次相变循环后相变骨料的质量变化

Table 4 Mass changes of phase change aggregates after multiple phase change cycles

循环次数	未封装		环氧树脂+水泥粉封装		水泥净浆封装	
	剩余质量/g	渗漏率/%	剩余质量/g	渗漏率/%	剩余质量/g	渗漏率/%
0	100	0	100	0	100	0
10	99.45	0.55	99.94	0.06	100	0
20	98.6	1.4	99.62	0.38	99.42	0.58
50	96.38	3.62	99.25	0.75	98.55	1.45
100	84.3	15.7	98.59	1.41	97.5	2.5

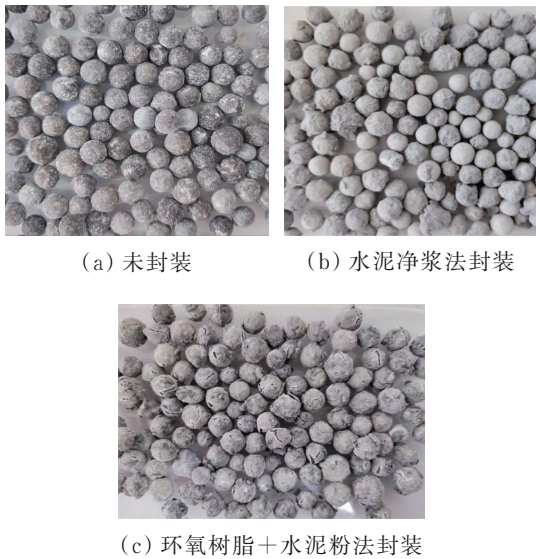


图 10 不同封装方式下相变粗骨料相变循环前后对比
Fig. 10 Comparison of phase change coarse aggregates before and after phase change cycles under different encapsulation methods

依据表 4 绘制多次相变循环后不同封装方式下相变粗骨料的质量变化曲线,如图 11 所示。由表 4 和图 11 可知,在进行 100 次相变循环后,未封装的相变粗骨料渗漏率达 15.7%,水泥净浆法的渗漏率为 2.5%,而环氧树脂+水泥粉法封装的渗漏率仅 1.41%。由此可见,环氧树脂+水泥粉法对复合相变材料的泄漏保护性最好。但随着相变循环次数的增加,部分骨料表面出现轻微裂缝,可能会影响能量桩运行期间的承载性能和稳定性,需进一步试

验验证。

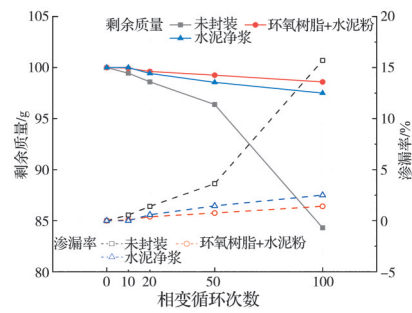


图 11 多次相变循环后不同封装方式下相变粗骨料的质量变化
Fig. 11 Mass changes of phase change coarse aggregates with different encapsulation methods after multiple phase change cycles

2.3.2 相变混凝土

分别进行 30、60、100 次相变循环,观察相变混凝土表面是否出现裂缝及明显损伤。图 12 为相变循环前后混凝土试块的对比,经过 100 次相变循环后,混凝土表面未出现明显损伤及裂缝,与相变循环前无明显差异。这是由于该相变混凝土强度较高,相变循环未在混凝土表面产生明显破坏。

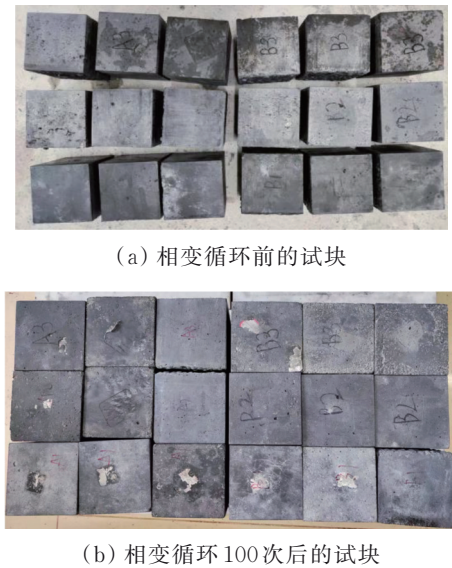


图 12 相变循环前后试块的对比
Fig. 12 Comparison of test blocks before and after phase change cycles

对相变循环 30、60、100 次后的相变混凝土试块进行抗压强度试验,结果如图 13 所示。

由图 13(a)可知,随着相变循环次数的增加,A、B 组抗压强度均开始加速下降,且随着相变粗骨料掺量的增加,下降幅度明显增大。这是因为随着相变循环次数的增加,复合相变材料在相变混凝土内部出现不同程度的泄漏,对相变混凝土强度造成一定的影响。

由图 13(b)可知,在相变粗骨料掺量相同的情

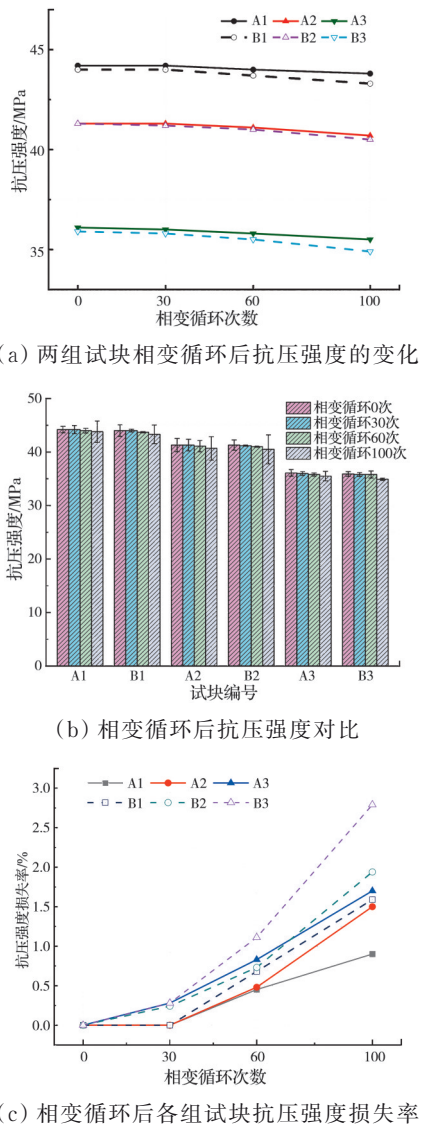


图13 相变循环后各组试块抗压强度的变化

Fig. 13 Compressive strength changes of each group of test blocks after phase change cycles

况下,经过100次相变循环后,A组相变混凝土试块的抗压强度要明显优于B组,最大差值接近1 MPa。这主要是由于经过多次相变循环后,B组中环氧树脂+水泥粉法封装的相变粗骨料表面出现裂缝,从而影响相变混凝土内部的稳定性,进而降低抗压强度。

由图13(c)可知,与相变循环前相比,经过100次相变循环后,A、B组抗压强度损失率分别为0.9%、1.5%、1.7%和1.59%、1.94%、2.79%,相变混凝土的抗压强度下降幅度均较小,表明制备的相变混凝土具有较好的相变循环耐久性。经过多次相变循环后,抗压强度最低的B3组试块力学性能依旧能满足能量桩桩身混凝土C30的强度要求。为最大程度保证能量桩上部建筑的稳定性与安全性,且复合相变材料掺量尽可能地多,最终选择采用A2

组配比进行相变混凝土的制备。

3 结论

1)最适宜多孔骨料吸附癸酸-月桂酸-棕榈酸三元复合相变材料的水浴温度为40℃,吸附时间不应低于120 min,建议在150 min左右,最高吸附率为27.5%。另外,可根据试验情况适当延长吸附时间,以保证相变材料的吸附率。

2)通过DSC测试,得出癸酸-月桂酸-棕榈酸复合相变材料的相变温度为17.69℃,相变潜热为139.62 J/g,相变潜热较高且符合能量桩冬季工况下的温度运行要求。

3)通过对相变混凝土进行抗压强度试验发现,随着两种不同封装方式下相变混凝土粗骨料掺量的逐渐增加,混凝土抗压强度和导热系数均出现明显下降,且掺量越大下降幅度越大。考虑能量桩换热及承载能力的需求,相变混凝土中相变粗骨料掺量应控制在20%以内。

4)环氧树脂+水泥粉法和水泥净浆法封装均能有效降低复合相变材料的渗漏率,前者试验效率更高,且更方便实施,但其在相变循环过程中易产生裂缝,在相变混凝土相变循环试验中抗压强度损失率要高于水泥净浆法封装的相变混凝土;另外,环氧树脂价格更高,且会对环境和人体造成损害,相较而言,水泥造成的直接危害要低很多。因此,综合考虑安全性与经济性,最终选择水泥净浆法封装的相变混凝土粗骨料。

5)在进行100次相变循环试验后,相变混凝土各组试块均表现出良好的相变循环耐久性。在考虑相变材料掺量最大且保证桩基稳定性和耐久性的情况下,优先选用水泥净浆法封装的相变混凝土粗骨料。但该混凝土在应用场景及性能等方面还存在不足,需进一步研究。

参考文献

- [1] Safari A, Saidur R, Sulaiman F A, et al. A review on supercooling of phase change materials in thermal energy storage systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 905-919.
- [2] Nazir H, Batool M, Bolivar-Osorio F J, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: a review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 491-523.
- [3] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 318-345.

- [4] Zhang X D, Du D W, Wu Y J, et al. Theoretical and analytical solution on vacuum preloading consolidation of landfill sludge treated by freeze-thaw and chemical preconditioning [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(1): 221-238.
- [5] Li Y F, Zhao C, Lu Q Q. Preparation of phase change concrete using environmentally friendly materials and its performance study [J]. *Journal of Renewable Materials*, 2023, 11(5): 2417-2431.
- [6] Li J, Peng Z A, Zhang H, et al. Study on the heat transfer of a concrete wall outfitted with phase change materials[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 51: 103520.
- [7] 何天白, 胡汉杰. 功能高分子与新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 178-191.
He T B, Hu H J. *Functional polymers and new materials* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 178-191. (in Chinese)
- [8] Sarier N, Onder E. The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics [J]. *Thermochimica Acta*, 2007, 452(2): 149-160.
- [9] Lecompte T, Le Bideau P, Glouannec P, et al. Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 94: 52-60.
- [10] D'Alessandro A, Pisello A L, Fabiani C, et al. Multifunctional smart concretes with novel phase change materials: mechanical and thermo-energy investigation[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1448-1461.
- [11] Kim H B, Mae M, Choi Y, et al. Experimental analysis of thermal performance in buildings with shape-stabilized phase change materials[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 152: 524-533.
- [12] Bao X H, Tian Y Y, Yuan L, et al. Development of high performance PCM cement composites for passive solar buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 194: 33-45.
- [13] 周建庭, 聂志新, 郭增伟, 等. 相变混凝土的制备与性能研究综述[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(5): 588-595.
Zhou J T, Nie Z X, Guo Z W, et al. Review on preparation and properties of phase change concrete[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(5): 588-595. (in Chinese)
- [14] 吴智敏, 陈智, 秦孟昊. 复合相变调湿材料的制备与热湿性能[J]. *土木建筑与环境工程*, 2018, 40(4): 13-19.
Wu Z M, Chen Z, Qin M H. Preparation and heat-moisture properties of phase change hygroscopic materials[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2018, 40(4): 13-19. (in Chinese)
- [15] 蒋才永, 叶家天, 陈于文, 等. 建筑用新型相变储能泡沫混凝土保温隔墙板材料的性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2024, 37(2): 112-117.
Jiang C Y, Ye J T, Chen Y W, et al. Study on properties of new phase change energy storage foam concrete thermal insulation partition board materials for buildings [J]. *New Building Materials*, 2024, 51(2): 112-117. (in Chinese)
- [16] 刘江, 杨柳, 刘衍, 等. 西安办公建筑相变蓄热通风技术的季节适宜性研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 150-159.
Liu J, Yang L, Liu Y, et al. Study on seasonal suitability of phase change heat storage coupled with night ventilation in an office building in Xi'an[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 150-159. (in Chinese)
- [17] Zhu L, Sang G C, Dang F N, et al. A novel measurement method of thermal performances for an improved thermal storage concrete with microencapsulated phase change materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124583.
- [18] Zhang S L, Chen F F, Pan W Q, et al. Development of heat transfer enhancement of a novel composite phase change material with adjustable phase change temperature[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 210: 110457.
- [19] Ye P, Liu Z B, Jin C L, et al. Preparation and characterization of novel phase-change concrete based on different porous phase-change aggregates: comprehensive comparison of various phase change composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 439: 137366.
- [20] Wang Y T, Liu Z B, Jin C L, et al. Experimental study on the preparation and physical thermal performance of coral sand-based phase change material concrete composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 389: 131631.
- [21] Huang W, Zhang J W, Wang J L, et al. Performance analysis of paraffin microcapsules and phase change concrete based on microporous cenospheres[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 409: 134030.
- [22] 李志, 池津吉, 朱宏志, 等. 建筑围护结构用三元复合相变材料的制备及性能评价[J]. *制冷与空调*, 2022, 36(1): 26-33.
Li Z, Chi J J, Zhu H Z, et al. Preparation, encapsulation and performance evaluation of ternary phase change materials for building envelope[J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2022, 36(1): 26-33. (in Chinese)
- [23] 舒钊. 导热增强型定型脂肪酸复合相变材料在蓄热石膏板中的性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
Shu Z. Study on the properties of thermal conductivity

- enhanced shaped fatty acid composite phase change material in thermal storage gypsum board[D]. Shanghai: Donghua University, 2022. (in Chinese)
- [24] Christen H, van Zijl G, de Villiers W. Improving building thermal comfort through passive design: An experimental analysis of phase change material 3D printed concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 392: 136247.
- [25] JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. JGJ 55—2011 Specification for mix proportion design of ordinary concrete[S].(in Chinese)
- [26] 李辛庚, 闫风洁, 岳雪涛, 等. 陶粒混凝土的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3407-3452. Li X G, Yan F J, Yue X T, et al. Research progress on ceramsite concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(11): 3407-3418, 3452. (in Chinese)
- [27] 汤场. 相变混凝土能源桩的设计与热力特性研究[D]. 浙江宁波: 宁波大学, 2021. Tang Y. Study on design and thermal characteristics of phase change concrete energy pile[D]. Ningbo, Zhejiang: Ningbo University, 2021. (in Chinese)
- [28] 孟新, 张焕芝, 赵梓名, 等. 三元脂肪酸/膨胀石墨复合相变材料的制备、包覆定形及热性能[J]. 高等学校化学学报, 2012, 33(3): 526-530. Meng X, Zhang H Z, Zhao Z M, et al. Preparation, encapsulation and thermal properties of fatty acid/expanded graphite composites as shape-stabilized phase change materials[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2012, 33(3): 526-530. (in Chinese)
- [29] 杨艳茹, 麻永林, 王军. 粉煤灰-煤矸石质多孔骨料的制备研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(5): 96-99. Yang Y R, Ma Y L, Wang J. Preparation of porous ceramsite with fly ash-coal gangue[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(5): 96-99. (in Chinese)
- [30] GB/T 17431.2—2010 轻集料及其试验方法 第2部分: 轻集料试验方法[S]. GB/T 17431.2—2010 Lightweight aggregates and its test methods - Part 2: Test methods for lightweight aggregates[S]. (in Chinese)
- [31] 孟则羽. 三元复合相变储能砂浆的制备与实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022. Meng Z Y. Preparation and experimental study of ternary composite phase change energy storage mortar[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022. (in Chinese)
- [32] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S]. (in Chinese)
- [33] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. (in Chinese)
- [34] GB/T 10294—2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法[S]. GB/T 10294—2008 Thermal insulation-determination of steady-state thermal resistance and related properties: guarded hot plate apparatus[S]. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)