

DOI: 10.11779/CJGE202111005

# 相变材料改良膨胀土冻融性能试验研究及微观机理分析

黄英豪, 陈永, 朱洵, 吴志强, 朱锐, 王硕, 吴敏

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024)

**摘要:** 季冻区膨胀土经历的复杂冻融过程会造成土体冻融性能的劣化。相变材料在相变过程中能够以潜热的形式储存和释放大量能量, 可用于改良土体的冻融性能。以北疆高寒地区渠基膨胀土为研究对象, 室内模拟渠道沿线实际气候条件的冻融循环试验, 选用石蜡基液体相变材料(pPCM)和石蜡基微胶囊相变材料(mPCM), 对经历冻融循环后不同相变材料掺入量的改良膨胀土进行体积变形试验、无侧限抗压强度试验、DSC热循环试验和SEM电镜扫描试验, 结果表明: pPCM 在一定程度提高了土体破坏时的韧性; 在改善渠基土内部温度场, 提升土体的热稳定性方面性能要略优于mPCM。mPCM 可以降低土体的胀缩变形; 有效抑制了土体强度的衰减, 以 8%的掺量最为显著; mPCM 减小了冻融对土体微观孔隙损伤的影响, 宏观上减弱了冻融循环对土体强度的衰减作用。试验研究表明, mPCM 改良膨胀土在抵抗反复冻融循环问题上具有明显的优势, 可为实际工程设计提供参考。

**关键词:** 冻融循环; 膨胀土; 相变材料; 体积变形; 无侧限抗压强度; 差示扫描量热法; 电镜扫描

**中图分类号:** TU411    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-4548(2021)11-1994-09

**作者简介:** 黄英豪(1979—), 男, 山东菏泽人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事环境岩土工程方面科研和技术咨询。E-mail: yhuang@nhri.cn。

## Experimental study and micro-mechanism analysis of freeze-thaw performance of expansive soils improved by phase-change materials

HUANG Ying-hao, CHEN Yong, ZHU Xun, WU Zhi-qiang, ZHU Rui, WANG Shuo, WU Min

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The complex freeze-thaw process experienced by expansive soils in seasonally frozen regions will cause the deterioration of freeze-thaw performance of soils. The phase-change materials can store and release a large amount of energy in the form of latent heat during the phase change process, and can be used to improve the freeze-thaw performance of soils. For the case study of expansive soils in the canal base in high and cold regions of northern Xinjiang, the freeze-thaw cycle tests under the actual climatic conditions along the canal are conducted. The paraffin-based liquid phase-change material (pPCM) and the paraffin-based microcapsule phase-change material (mPCM) are selected. After undergoing freeze-thaw cycles, the modified expansive soils with different blending amounts of phase-change materials are subjected to the volume deformation tests, unconfined compressive strength tests, DSC thermal cycle tests and SEM tests. The results show that the pPCM can improve the toughness of soils under failure to some extent, and it is slightly better than mPCM in improving the internal temperature field of the foundation soils in the canal and improving the thermal stability of the soils. The mPCM can reduce the expansion and contraction deformation of the soils. It effectively inhibits the attenuation of the strength of the soils, and the mixing amount of 8% is the most significant. The mPCM reduces the impact of freeze and thaw on microscopic pore damage of the soils, and macroscopically weakens the attenuation effect of freeze and thaw cycles on soil strength. The tests show that the mPCM-modified expansive soils have obvious advantages in resisting repeated freeze-thaw cycles, which can provide a reference for the design of actual projects.

**Key words:** freeze-thaw cycle; expansive soil; phase-change material; volume deformation; unconfined compressive strength; differential scanning calorimetry; scanning electron microscope

## 0 引言

在中国西北高寒地区, 受极端恶劣气候的影响, 冻胀和融沉是引起土体劣化的根本原因<sup>[1]</sup>。多项研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879166); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201909)

收稿日期: 2021-01-17

表明<sup>[2-4]</sup>, 经过冻融循环后, 土体颗粒之间的结构联接以及排列方式发生了改变, 对土体原有的物理力学性质也会产生影响。因此, 在季节性冻土区开展路基、输水等工程时, 冻融循环作用应首先受到关注。

膨胀土是一种具有裂隙性、强衰减性、强胀缩性的高塑性黏土<sup>[5-6]</sup>。大量工程实践表明, 膨胀土不宜直接用于渠道工程的建设, 需对其进行处理。目前, 为了克服冻融循环作用对膨胀土的劣化影响, 实际工程中主要采用强夯压实<sup>[7]</sup>、添加土工格栅<sup>[8]</sup>和添加纤维<sup>[9]</sup>等; 或者是在膨胀土中掺入石灰<sup>[10]</sup>、粉煤灰<sup>[11]</sup>和水泥<sup>[12]</sup>等化学试剂作为固化剂。综上所述, 目前对膨胀土的处理方法大多为被动式处理, 仍存在一定的局限性, 因此需要探索更加先进、有效的主动式处理技术。相变材料 (Phase change materials, 简称 PCM) 作为一种新型控温材料, 通过固相和液相之间的转化, 可以产生大量的潜热, 能够调控土体内部温度场, 降低其胀缩特性, 进而提高其稳定性, 因具有胀缩性小、环保、无毒、成本低、性能稳定及相变点可控等优势逐渐受到青睐。目前相变材料已广泛应用于太阳能利用<sup>[13]</sup>、建筑隔热保温<sup>[14]</sup>、电池热管理<sup>[15]</sup>等储能控温领域, 在改善混凝土<sup>[16]</sup>、沥青路面<sup>[17]</sup>等的低温抗裂及耐久性方面取得了较多成果。根据上述相变材料在节约能源和改善工程结构内部温度场的作用, 说明相变材料在控制温度正负变化方面具有一定的可行性, 理论上可以改良寒区膨胀土的冻融性能。目前使用相变材料对土体直接进行处理的研究还相对较少, 仅 Mahedi 等<sup>[18]</sup>在此方向初有研究, 因此开展寒区膨胀土相变控温处理试验研究, 可为寒区膨胀土处治技术提供新的依据。

选取北疆某大II型输水渠道沿线膨胀土为研究对象, 膨胀土段工程占渠道总长的 32%, 渠道沿线的年平均地温 3.4℃, 冬季极端低温达 -40.3℃, 夏季平均气温约为 20℃。这些因素共同作用<sup>[19-20]</sup>形成了明显的冻融循环过程, 造成渠基膨胀土变形破坏, 对渠道的稳定性影响严重。通过对 3 种不同掺入量石蜡基液体相变材料(pPCM)、石蜡基微胶囊相变材料(mPCM)改良的膨胀土进行体积变形试验、无侧限抗压强度试验、DSC 热循环和 SEM 电镜扫描试验, 研究了冻融循环作用下改良膨胀土的体积、力学性质和热稳定性的变化规律, 并从微观角度对 PCM 改良膨胀土冻融性能加以分析, 以期明确相变材料对土体冻融性能演化规律的影响。

## 1 试验材料与试样制备

### 1.1 试验材料

#### (1) 膨胀土

本次试验所用土料取自北疆供水总干渠道工程现场, 取样深度在 1.5 m 附近, 呈黄色。通过一系列室内试验得到土料为高液限黏土, 其基本物理性质如表 1 所示, 粒径累积分布曲线见图 1。其中, 土料的不均匀系数为 16, 曲率系数为 1.56, 说明土的级配良好。同时, 土料的自由膨胀率为 86%, 具有中膨胀性。

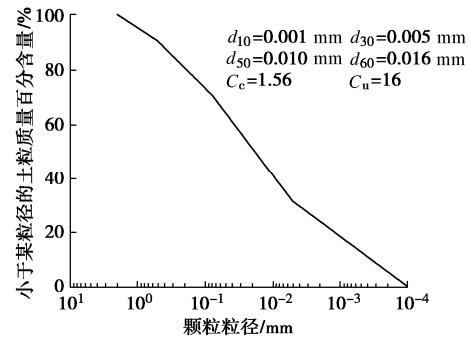


图 1 土料的粒径分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of soils

表 1 膨胀土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of expansive soils

$G_s$	$\rho_{d\max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_{op}/\%$	$w_L/\%$	$w_P/\%$	$I_P$
2.70	1.71	18.4	52.6	18.4	34.2

#### (2) 相变材料

试验所选用的 PCM 为上海某公司生产的商用石蜡基 PCM (包括 pPCM、mPCM 两种不同形式) 见图 2。PCM 外观无色、无味, 相变温度为 4.5℃~5.5℃。在室温下 pPCM 为液态, 热焓值为 258 J/g。mPCM 是由内核材料和外壳材料两部分组成, 其中芯材为 pPCM, 壳材为密胺树脂, 芯壁质量比约为 9:1, 热焓值为 198.1 J/g, mPCM 的物理外观为白色至略偏白色的粉末, 粒径为 8~12 μm。mPCM 在高温下非常稳定, 当加热到 200℃时, 泄漏率小于 1%, 相变过程中的膨胀和收缩也可以忽略不计, 在极高、低温下性能稳定。

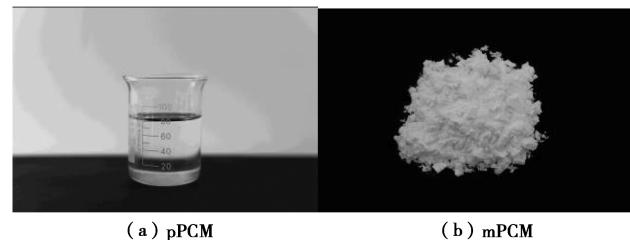


图 2 相变材料

Fig. 2 Phase-change materials

### 1.2 试样制备

首先根据试验目标的掺入比 (按干土重量的 5%, 8% 和 10%) 分别向风干土中添加 mPCM 和 pPCM 并

混合均匀, 然后根据试样预设的含水率用喷雾器向土中均匀地喷洒一定量的蒸馏水, 搅拌均匀后装入密封袋闷料一昼夜, 使水分分布均匀。按照土工试验规范, 采用分层击实法分 3 层制样, 控制所有试样的压实度均为 95%, 含水率均为 18.4%, 试样高度为 80 mm, 直径为 39.1 mm。将制备好的试样用保鲜膜包裹分组编号后, 放入略大于试样的密封袋中待用, 确保试样不与外界接触, 避免水分散失。

## 2 试验方案

### 2.1 冻融循环试验

渠道现场经历的冻融循环过程本身较为复杂, 室内试验中难以完全模拟, 参考文献[21]中的做法, 首先对现场实际边界条件进行概化, 然后根据相似理论确定环境温度的持续时间。图 3 为北疆渠道总干渠段沿线某气象站观测到的 2013 年—2014 年地表温度分布, 由渠道温度变化最终确定室内模拟现场环境温度控制过程如表 2 所示。多项实验结果<sup>[22-23]</sup>表明, 经历大约 7 次冻融循环后, 膨胀土的物理力学性质逐渐趋于稳定, 因此将试样的最终冻融循环次数设计为 7 次。冻融循环试验采用可程式高低温试验装置进行室内模拟试验。

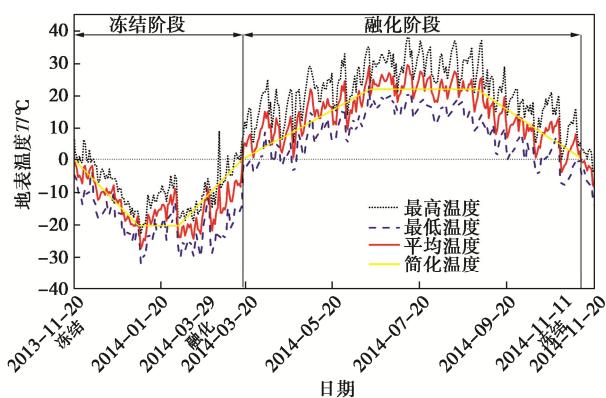


图 3 渠道沿线地表全年气温分布曲线 (2013 年—2014 年)

Fig. 3 Distribution curves of annual temperature of surface along the channel (2013-2014)

表 2 环境温度简化控制过程

Table 2 Simplified control process of ambient temperature

阶段	温度/℃	持续时间/h
冻结阶段	0~ -20	3
	-20~ -20	2
	-20~ 0	3
融化阶段	0~ 22	6
	22~ 22	4
	22~ 0	6

### 2.2 体积变形试验

考虑到冻融循环过程中试样的体积变形具有不均

匀性、微小性<sup>[24]</sup>, 每组设置 5 个平行试样。参考文献[25]中的方法对每个试样分别沿高度的 1/5 处进行 5 次直径测量, 沿上下两端面的垂直方向进行 3 次高度测量, 然后各取平均值根据公式计算出试样的体积。每次试样尺寸测量结束后, 用电子天平对其进行称重, 对冻融循环过程中试样的质量变化情况进行监控, 避免水分的散失和外界补给带来的试验误差。

### 2.3 无侧限抗压强度试验

采用南京土壤仪器厂有限公司生产的无侧限抗压仪进行无侧限抗压强度试验, 以此获取不同含水率下膨胀土试样经历多次冻融循环后的力学指标。分别对经过 0 (初始状态), 1, 3, 7 次冻融循环作用后的试样 (每组设 3 个平行试样) 进行无侧限抗压强度试验, 轴应变达到 20% 时停止剪切试验, 剪切速率为 1 mm/min。

### 2.4 DSC 差示扫描量热法

采用差示扫描量热法(DSC)测试不同相变材料改良土的相变温度和潜热, 试验仪器为冻土工程国家重点实验室的 QL-2000 差示扫描热量仪。冷却和加热速率设置为 5 °C/min, 所测样品重量为 10±2 mg, 采用精度为 10<sup>-4</sup> g 的高精度天平进行试样称取。测试开始时, 从室温降至-20 °C 保持 2 min, 将温度升高至 20 °C, 样品在 20 °C 保持 2 min, 然后再冷却到-20 °C。

### 2.5 SEM 电镜扫描试验

微观试验采用冻土工程国家重点实验室的 Quanta450 电镜扫描仪。对经历不同冻融循环次数的试样中切取体积大小为 8 mm×8 mm×15 mm 的土样, 采用液氮真空冷却干燥法, 最大限度地保证土体的原始孔隙与结构, 然后将其喷好金属镀膜连同基座一并放入扫描电镜样品区, 通过调节试样位置, 在观察区附近聚焦, 选取具有代表性的点进行拍照。分别对不同冻融次数后 PCM 掺量为 0, 5%, 8%, 10% 的改良土进行电镜扫描, 扫描倍数设为 100, 1000, 5000。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试样质量监控

石蜡是一种固—液相变材料, 当石蜡在土体中掺量过高时, 土体中的毛细孔隙无法容纳过量的石蜡, 导致其易从表面渗出。图 4 为试样的质量损失随冻融循环的变化曲线。素膨胀土试样在 7 次冻融循环后质量损失为 0.51%, 除极少数土粒外, 都为水分损失, 这说明此试验方法密封性较为良好。其中试样在冻结时, 水分损失较大, 这主要是因为试样在冻结过程中, 内部水分向外迁移, 表面附着许多冰晶, 有部分冰晶粘到保鲜膜上, 与试样分离, 融化时保鲜膜上的水分

大部分又被试样吸回。由图 4 (a) 可以看出, pPCM 试样的质量损失较大, 7 次冻融循环后, 5%, 8%, 10% 掺量的试样质量损失分别可达 1.14%, 2.32%, 3.15%。这是因为 pPCM 不溶于水且不浸入土, 在融化过程中 pPCM 由固态相变为液态, 受重力差的影响, 部分 pPCM 由试样上部向下部迁移的同时并由四周析出, 而试样融化时保鲜膜上的 pPCM 只有少量被吸回。mPCM 试样的水分损失与素膨胀土试样情况相似, 这说明 mPCM 性能稳定, 具有良好的实际工程应用基础。

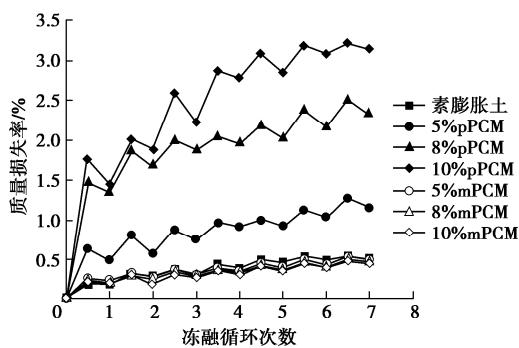


图 4 冻融循环过程中试样质量损失情况

Fig. 4 Quality losses of samples during freeze-thaw cycles

### 3.2 体积变形特征

图 5 为 PCM 不同掺量试样体积在经历冻融循环作用的变化情况, 其中横坐标中的“F”表示试样冻结完成, “T”表示试样融化完成。由图 5 可知, 在整个冻融循环过程中素膨胀土试样的体积整体变化为“冻胀融缩”。当掺入 PCM 后, 在整个冻融循环试验过程中, 5% 的 mPCM 掺量可使体积变化减少约 9%, 8% 的 mPCM 掺量可使体积变化减少约 34%, 随着掺量增大到 10%, 体积变化减少程度增加至约 39%; 对 pPCM 而言, 5% pPCM 使体积变化减少约 7%, 当掺入量增大时, 初次冻融循环过程中 8%, 10% pPCM 会使体积变化分别减少约 21%, 28%, 然而随着冻融循环次数的增加, 由于 pPCM 泄露的原因, 多次冻融循环作用后仅有微小改良体积变化的作用, 这也与 Mahedi 等<sup>[18]</sup>在研究 pPCM 改善黄土冻融性能的情况相似。

在负温条件下, 水相变为冰, 体积会增大 9% 左右, 而膨胀土颗粒在此过程中会因冻结作用失水发生收缩, 融化作用则为逆过程。由于冻结时水的体积增加量大于土颗粒的收缩量, 融化时则恰好与此相反, 因此试样在冻融循环过程中宏观表现为“冻胀融缩”。将 PCM 运用于膨胀土试样中, 在相变过程中以潜热形式储存或释放热量, 能够调控膨胀土试样内部温度场, 降低其胀缩特性, 进而提高土体稳定性。

整个冻融循环试验过程中在减小体积变化方面 mPCM 要比 pPCM 性能优越, 这是因为 PCM 属于有机烃类, 虽然热焓值 pPCM 高于 mPCM, 但 pPCM 不溶于水且不浸入土, 在融化过程中 pPCM 由固态相变为液态, 受重力差的影响, 部分 pPCM 由试样上部向下部迁移的同时并由四周析出, 发生泄露; 而 mPCM 属于固体小颗粒, 在冻融循环过程中化学性能稳定, 能够随温度的正负变化发生相变进行产热、储热, 从而降低试样的体积变化率。

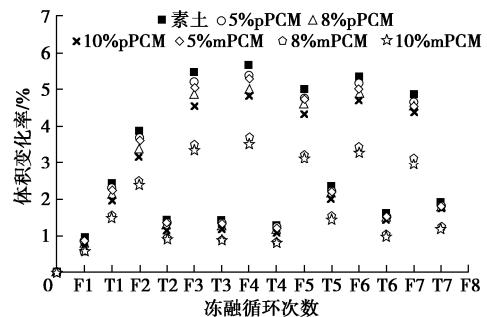


图 5 冻融循环过程中试样体积变化情况

Fig. 5 Change of sample volume during freeze-thaw cycles

### 3.3 力学特性探究

#### (1) 应力 - 应变关系

图 6 为 PCM 改良膨胀土的应力 - 应变曲线 (由于不同掺量之间应力 - 应变曲线形态类似, 限于篇幅, 仅列出 0, 8%PCM 掺量的应力 - 应变关系曲线), 其中 FT 代表冻融循环次数, 本次试验中改良膨胀土的应力 - 应变曲线均表现出应变软化型。由图 6 (a) 可以发现, 冻融循环作用对膨胀土试样的应力 - 应变曲线有着显著影响, 其中以第 1 次循环最为突出。初始状态下, 膨胀土试样的塑性变形历时较长, 当经历冻融循环作用后, 塑性变形历时明显减小, 随着冻融循环次数的增加, 膨胀土的物理力学性质逐渐趋于稳定。由图 6 (b), (c) 可以发现, pPCM 改性膨胀土试样的应力 - 应变曲线峰值后的轴向应力 - 应变曲线平缓下降, 明显不同于 mPCM 骤然垂直下降的趋势, 这表明 pPCM 在一定程度上能提高土体的韧性。究其原因主要是因为 pPCM 不浸入土, 土颗粒之间的孔隙由空气变为 pPCM, 而 pPCM 性能近似胶凝材料, 且在空气和水中都能硬化, 因此延缓了土体的应力软化。由于 mPCM 外壳属于脆性材料, 且 mPCM 的耐压强度很小, 因此加剧了土体的脆性属性。

#### (2) 无侧限抗压强度

对于一般应变软化型土, 取其应力 - 应变曲线峰值对应的应力为无侧限抗压强度。图 7 为冻融循环对不同掺量 PCM 试样的强度影响曲线, 其中参数  $F$  (强度衰减系数) 为每次冻融循环试样无侧限抗压强度与

初始状态试样的无侧限抗压强度之比。可以发现, 初始状态下(0 次循环), 随着 pPCM 含量的升高, 土体的无侧限抗压强度先增大后减小, 这是由于 pPCM 含量较低时 pPCM “胶结”了土颗粒, 组成了一种强度较高的混合物质, 随着含量增加至 10%, pPCM 可能会出现分布比较集中的情况, 在试样内部逐渐形成了一个液体薄弱面, 从而降低了土体强度。而随着 mPCM 含量的升高, 土体无侧限抗压强度逐渐减小, 这是因为 mPCM 的耐压强度远小于膨胀土<sup>[26]</sup>, 掺量越高试样的无侧限抗压强度越低。

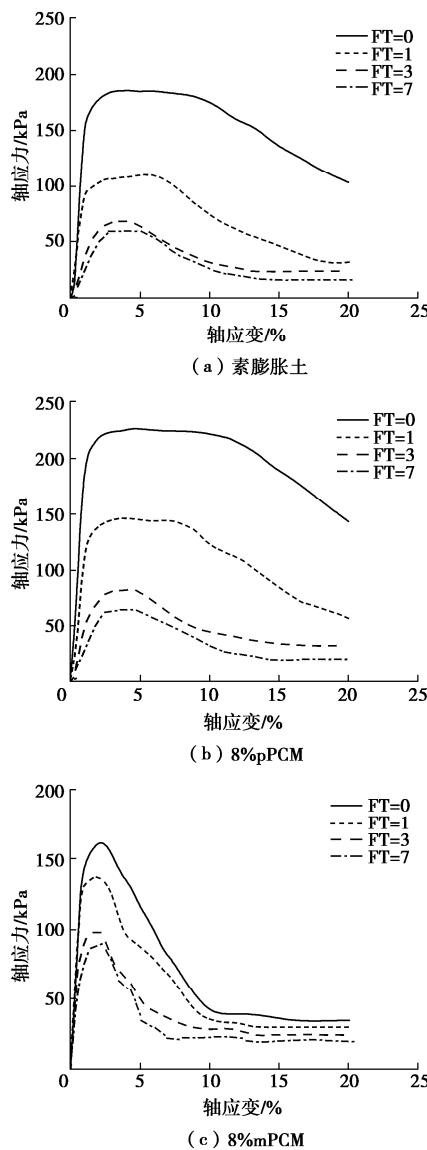


图 6 应力 - 应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain curves

从图 7 中可以看出, 第 1 次冻融循环对素膨胀土土体强度的衰减作用最大, 随着冻融循环次数的增加, 试样强度衰减逐渐减缓, 3 次后趋于稳定。两种 PCM 在改善土体强度衰减方面存在较大差异, 具体表现为: 由图 7 (b) 可知, 5%, 10% pPCM 试样的强度衰减系数均低于素膨胀土试样, 仅 8% 掺量下观察到对土体

强度衰减略有改善; 而 mPCM 对土体强度衰减具有积极作用, 尤其以 8% 掺量最为明显。随着冻融循环次数的增加(图 7 (c), (d)), pPCM 无法改善强度衰减变得更加明显, 而 mPCM 除掺量 10% 外仍然可以表现出积极作用, 这说明较低含量的 mPCM 可以抑制冻融循环作用对土体的强度的衰减。上述现象的出现主要是因为 mPCM 是一种性能稳定的高分子材料<sup>[26]</sup>, 可以在冻融循环过程中以潜热形式储存或释放热量来抵抗外界温度变化对土体的损伤; 而 pPCM 在正、负温周期性变化时很不稳定, 由于泄露的原因未能展现出良好的效果。

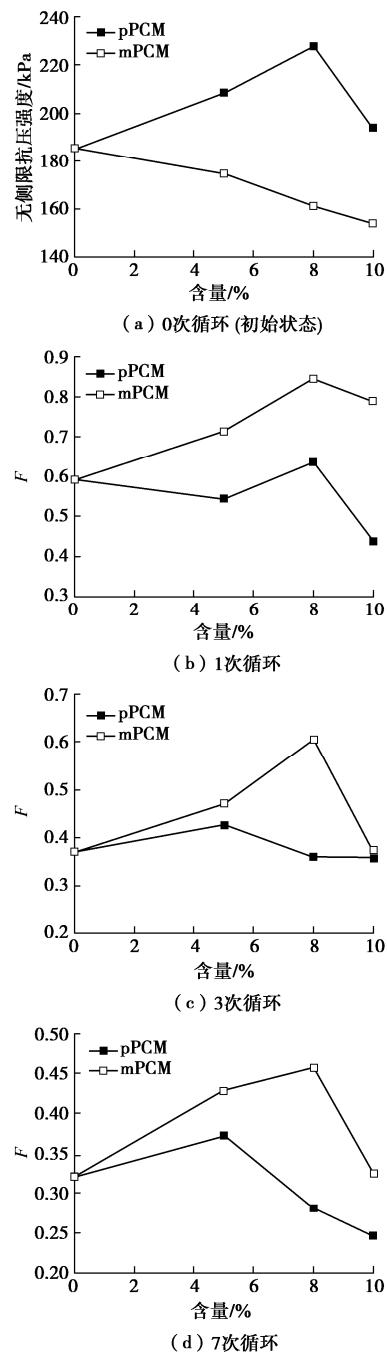


图 7 冻融循环作用对试样强度的影响

Fig. 7 Influences of freeze-thaw cycles on strength of samples

### 3.4 土体微观机理分析

#### (1) 热特性

为了探究素膨胀土试样中除水分外其他物质随温度变化是否会发生热量变化, 将干燥状态下膨胀土试样进行试验, 发现完全干燥的土颗粒在 DSC 试验过程中不发生能量的转换, 因此可认为仅有水发生相变。膨胀土及相变材料改性膨胀土的 DSC 曲线如图 8 所示 (冻结放出的潜热能量较大, 导致试样温度又升高, 所以 DSC 曲线会出现回折现象), 向上峰表示吸热曲线峰, 而向下峰表示放热峰, 曲线峰面积表示相变潜热 (限于篇幅, 仅列出掺比 10% 的试样)。从图 8 中可以看出, pPCM 与 mPCM 的掺入使得膨胀土的相变潜热分别下降了约 13.40%, 10.93%, 这说明 pPCM 与 mPCM 分别在 5.21℃~2.76℃, 4.61℃~1.63℃ 相变释放的热量 “储存” 在土颗粒间, 可能使得有一部分的水未相变为冰。在 DSC 图谱中发现 mPCM 试样的相变潜热要比 pPCM 试样少 5.84 J/g, 这是因为相同质量情况下, mPCM 还有高分子外壳组成。掺入 pPCM 与 mPCM 后, “原始峰” 相变温度起始点由 -7.61℃ 分别变为 -5.97℃, -6.30℃, 这说明 PCM 掺入的土体在冻结和融化过程中均有升温, 同时可以发现, 相变峰的宽度也分别略有增加, 过冷现象也有不同程度的减缓, 这表明在试验温度区间内, PCM 的掺入延迟了冰透镜的形成, 这对于改善渠基土内部温度场, 提升土体热稳定性来说是有益的。

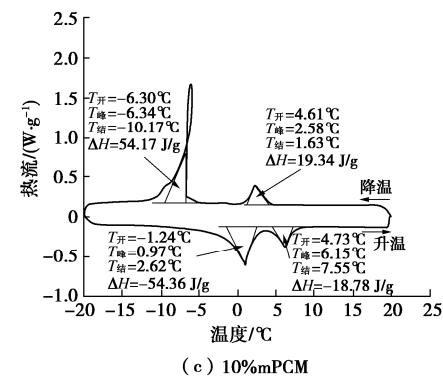
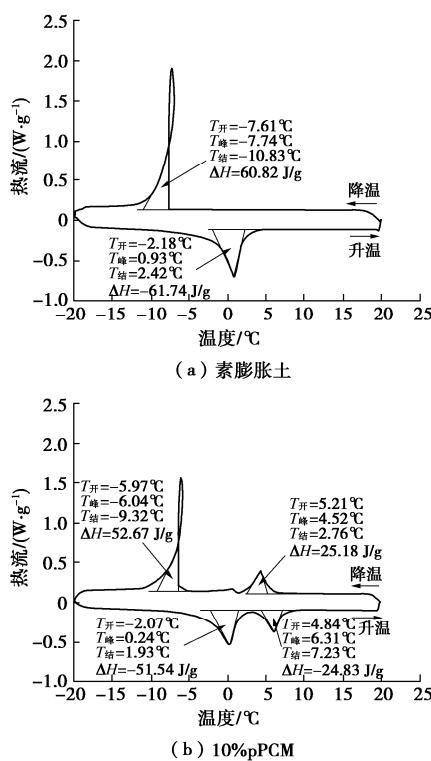


图 8 DSC 特征曲线

Fig. 8 DSC characteristic curves

#### (2) 微观结构分析

选取性能较为稳定的 mPCM 进行微观试验, 图 9 为 100 倍电镜扫描后的图像。可以看出, 初始状态下 (0 次循环) 土颗粒之间胶结联结形成整体, 土样表现为整体性较好, 试样经历 1 次冻融循环后试样孔隙开始发育, 7 次冻融循环后的孔隙明显大于 1 次冻融循环后的孔隙, 且 7 次冻融循环后土体内部形成了明显的贯通裂隙。mPCM 的掺入使得初始状态下裂隙比素土试样略有增加, 而 7 次冻融后的孔隙增加量较素土明显减少, 宏观表现为土体力学强度先减小而后随着冻融循环次数的增加逐渐大于素膨胀土, 这与前文力学分析得到的结论一致。对 mPCM 改良土样局部放大 1000, 5000 倍后得到图 10, 可以看出低含量的 mPCM 主要分布在土体孔隙内, 随着含量的增加 mPCM 开始聚集成团状, 这是使得初始状态下土体力学强度略有下降的重要原因之一。

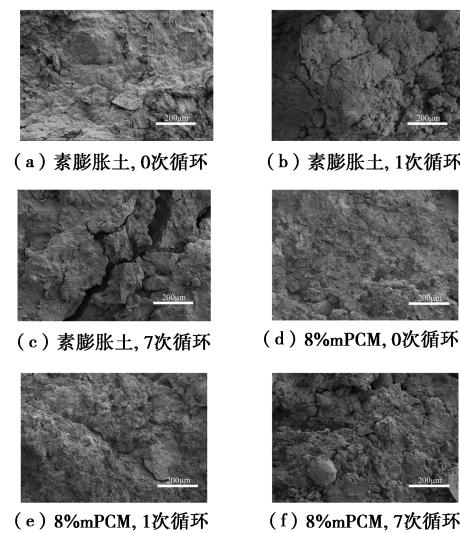


图 9 100 倍下素膨胀土和 8% mPCM 改良土的 SEM 照片

Fig. 9 SEM photos of 100 times plain expansive soils and 8% mPCM-modified soils

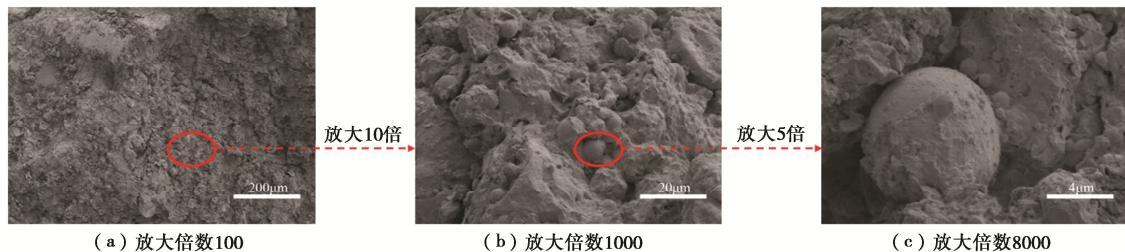


图 10 10% mPCM 改良土微观形态图

Fig. 10 Microscopic morphology photos of 10% mPCM-improved soils

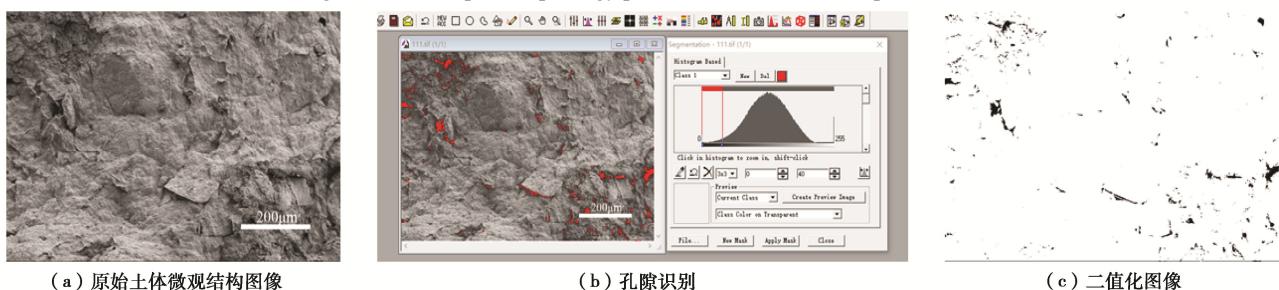


图 11 土体微观参数分析过程

Fig. 11 Analysis process of microscopic parameters of soils

通过图像处理软件 Image-Pro Plus (IPP)对电镜扫描后的图像进行定量分析(图 11), 可以提取土体孔隙相关参数, 例如颗粒的形态、孔隙大小、面积等。参考文献[27]选择合适的阈值对 100 倍下的图像进行二值化处理, 并降噪分割孔隙, 得到了试样不同冻融次数后的面孔隙度(土体某平面上孔隙所占的比例), 如图 12 所示。随着冻融循环次数的增加, 土样内部孔隙率明显增大, 至 7 次循环结束后, 素膨胀土样孔隙度增加了 15.40%, 宏观上表现为冻融循环作用对土体力学性质的劣化影响。掺入 mPCM 后, 随冻融循环次数的增加, 土样内部孔隙率增加速率逐渐减缓, 且掺量越高增加程度越不明显, 至 7 次循环结束后, 土样孔隙度增幅分别减少了 24.61%, 39.61%, 60.79%, 宏观表现为 mPCM 改良了冻融循环作用对土体力学强度的衰减作用, 这也与前文分析得到的数据结果一致。

### (3) PCM 改良机理分析

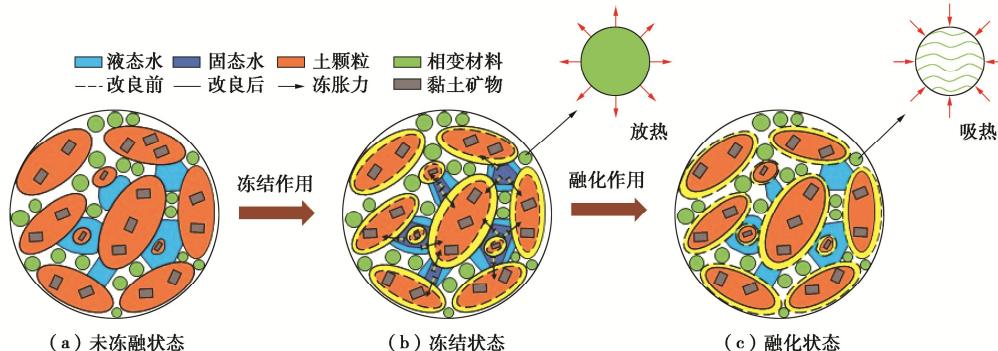


图 13 冻融循环下 mPCM 改良土微观结构演化示意图

Fig. 13 Schematic diagram of microstructural evolution of mPCM-modified soils under freeze-thaw cycles

通过上述试验结果及分析, 概化出冻融环境下 PCM(以 mPCM 为例)改良膨胀土结构损伤的演化过程。如图 13 所示当土体发生冻结时, PCM 相变释放和储存的热量与外界温度变化相抵抗, 延迟了冰透镜的形成, 减少了土颗粒间自由水的迁移和冻结, 减

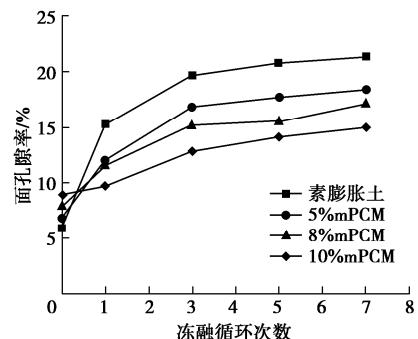


图 12 试样面孔隙度随冻融循环次数的变化

Fig. 12 Variation of porosity of sample surface with number of freeze-thaw cycles

弱了固态水的冻胀力, 因此土粒中的黏土矿物失水减少, 土粒的干缩量减小, 土粒间的孔隙变小; 而当土体发生融化时, 由于冻结时土粒失水较少, 因此土粒中的黏土矿物吸水也减少, 土粒的膨胀率也相应减小, 土粒间的孔隙变化进一步减弱。因此, PCM 伴随着环境温度正负波动, 以潜热形式储存或释放热量, 能够调控膨胀土试样内部温度场, 减少土粒的胀缩和孔隙水的反复冻融, 很大程度上减缓了土体微观结构的疲劳损伤(孔隙粗化、结构疏松等)。

## 4 结 论

本文针对相变材料改良北疆渠基膨胀土冻融性能进行了一系列室内试验研究, 得到 5 点结论。

(1) 在冻融循环过程中, mPCM 明显地降低土体的体积变化, 但随着掺量的增加, 改良效果逐渐减缓; 而 pPCM 对减弱土体胀缩变形作用不明显。

(2) 初始状态下, 土体的无侧限抗压强度随 pPCM 掺量的增加先增大后减小; 而随 mPCM 掺量的增加逐渐减小。随后的冻融循环过程中, mPCM 的掺入减小了土体的强度衰减, 以 8% 的掺量最为显著, 而 pPCM 未展现出良好的改良效果。pPCM 在一定程度上能提高土体的韧性, 而 mPCM 加剧了土体的脆性。

(3) PCM 相变释放和储存的热量与外界温度相抵抗, 延迟了冰透镜的形成, 降低了土体的相变潜热, 使得土体冻结时间有所增加, 过冷现象不再明显, 热稳定性有所提升。

(4) 微观结构表明, 冻融循环作用使土体内部微观孔隙增大, 导致宏观上无侧限抗压强度的衰减。而 mPCM 使得土样内部孔隙率增加速率有所减缓, 减小了冻融对土体孔隙损伤的影响, 宏观上改良了冻融循环作用对土体力学强度的衰减作用。

(5) mPCM 可以显著降低膨胀土的胀缩变形, 抑制土体强度的衰减, 提高土体的热稳定性。直接掺入 pPCM 可能难以提高土体的冻融性能, 因此需要探寻高效利用的掺入方法。此外, 在实际工程中, 建议根据区域气候条件和目标温度, 选择熔点和潜焓合适的 PCM。

## 参考文献:

- [1] 朱 涣, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土力学特性及损伤演化规律研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2019, 38(6): 1233–1241. (ZHU Xun, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Study on the mechanical properties and damage evolution of expansive soils under the coupled cycle of wet-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(6): 1233–1241. (in Chinese))
- [2] LIU J K, CHANG D, YU Q M. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand[J]. Engineering Geology, 2016, 210: 23–32.
- [3] 蔡正银, 朱 涣, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4555–4563. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. The influence of freeze-thaw process on the evolution characteristics of expansive soil cracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4555–4563. (in Chinese))
- [4] ZHOU Z W, MA W, ZHANG S J, et al. Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 146: 9–18.
- [5] 蔡正银, 朱 涣, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1381–1389. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1381–1389. (in Chinese))
- [6] AL-MUKHTAR M, KHATTAB S, ALCOVER J F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil[J]. Engineering Geology, 2012, 139/140: 17–27.
- [7] 谭罗荣. 膨胀土地基强夯处理效果的研究[J]. 岩土力学, 1990, 11(3): 39–46. (TAN Luo-rong. Effect of powerful ramming to foundation of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1990, 11(3): 39–46. (in Chinese))
- [8] 谢永利, 刘新荣, 晏长根, 等. 特殊岩土体工程边坡研究进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9): 93–105. (XIE Yong-li, LIU Xin-rong, YAN Chang-gen, et al. Research progress of special soil and rock engineering slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(9): 93–105. (in Chinese))
- [9] ELIF ORAKOGLU M, LIU J K, NIU F J. Dynamic behavior of fiber-reinforced soil under freeze-thaw cycles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 101: 269–284.
- [10] TOKSÖZ HOZATLIOĞLU D, YILMAZ I. Shallow mixing and column performances of lime, fly ash and gypsum on the stabilization of swelling soils[J]. Engineering Geology, 2021, 280: 105931.
- [11] ZHOU S Q, ZHOU D W, ZHANG Y F, et al. Study on

- physical-mechanical properties and microstructure of expansive soil stabilized with fly ash and lime[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, **2019**: 1 – 15.
- [12] 吴建涛, 姚开想, 杨 帅, 等. 引江济淮工程膨胀土水泥改性剂量研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(增刊 1): 232 – 235. (WU Jian-tao, YAO Kai-xiang, YANG Shuai, et al. Cement amount of modified expansive soils in water diversion project from Yangtze River to Huaihe River[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(S1): 232 – 235. (in Chinese))
- [13] VIGNESWARAN V S, KUMARESAN G, DINAKAR B V, et al. Augmenting the productivity of solar still using multiple PCMs as heat energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, **26**: 101019.
- [14] CHOI S H, PARK J, KO H S, et al. Heat penetration reduction through PCM walls via bubble injections in buildings[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, **221**: 113187.
- [15] JIANG L, ZHANG H Y, LI J W, et al. Thermal performance of a cylindrical battery module impregnated with PCM composite based on thermoelectric cooling[J]. *Energy*, 2019, **188**: 116048.
- [16] BENTZ D P, TURPIN R. Potential applications of phase change materials in concrete technology[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, **29**(7): 527 – 532.
- [17] SAKULICH A R, BENTZ D P. Increasing the service life of bridge decks by incorporating phase-change materials to reduce freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, **24**(8): 1034 – 1042.
- [18] MAHEDI M, CETIN B, CETIN K S. Freeze-thaw performance of phase change material (PCM) incorporated pavement subgrade soil[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, **202**: 449 – 464.
- [19] 谭 娇, 丁建丽, 张钧泳, 等. 1961—2014 年新疆北部地区气温时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2018, **35**(5): 1181 – 1191. (TAN Jiao, DING Jian-li, ZHANG Jun-yong, et al. Spatiotemporal variation of temperature in north Xinjiang during the period of 1961-2014[J]. *Arid Zone Research*, 2018, **35**(5): 1181 – 1191. (in Chinese))
- [20] 马 巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50a 回顾与展望[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(4): 625 – 640. (MA Wei, WANG Da-yan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(4): 625 – 640. (in Chinese))
- [21] 黄英豪, 蔡正银, 朱 锐, 等. 季冻区渠道湿干冻融离心模拟试验设备的研制[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(7): 1181 – 1188. (HUANG Ying-hao, CAI Zheng-yin, ZHU Rui, et al. Development of centrifuge model test equipment for canals in seasonal frozen areas under cyclic action of wetting-drying and freeze-thaw[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(7): 1181 – 1188. (in Chinese))
- [22] 王大雁, 马 巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(23): 4313 – 4319. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai—Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(23): 4313 – 4319. (in Chinese))
- [23] HOTINEANU A, BOUASKER M, ALDAOOD A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, **119**: 151 – 157.
- [24] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(2): 201 – 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(2): 201 – 272. (in Chinese))
- [25] 许 雷, 刘斯宏, 鲁 洋, 等. 冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(增刊 2): 167 – 174. (XU Lei, LIU Si-hong, LU Yang, et al. Physico-mechanical properties of expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(S2): 167 – 174. (in Chinese))
- [26] PILEHVAR S, CAO V D, SZCZOTOK A M, et al. Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymers concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, **173**: 28 – 39.
- [27] 唐朝生, 施 斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(4): 560 – 565. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, WANG Bao-jun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(4): 560 – 565. (in Chinese))