

冻融作用下粉煤灰 - 相变材料对砂土的力学性能影响

唐少容^{1,2,3*}, 李昊天¹

¹宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

²宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川

³旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川

收稿日期: 2023年6月3日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

相变材料(PCM)具有储存潜热的特性, 在相变的过程吸收释放大量潜热, 有助于改善土体温度场, 缓解土体的冻胀损害。以宁夏地区西干渠渠基土为研究对象, 研究冻融循环作用下相变材料和粉煤灰复合相变材料对土体物理、力学性质的影响, 对冻融循环后不同掺入量的渠基改良土进行质量损失试验、体积变化试验、SEM扫描电镜试验、无侧限抗压强度试验。结果表明粉煤灰复合PCM的加入较纯PCM土减少了质量损失和体积冻胀, 同时提升了土体强度。

关键词

冻融循环, 相变材料, 粉煤灰, 冻胀

Study on Freeze-Thaw Properties of Modified Sand Using Fly Ash Shaped Phase Change Materials

Shaorong Tang^{1,2,3*}, Haotian Li¹

¹College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

²Ningxia Research Center of Technology on Water-Saving Irrigation and Water Resources Regulation, Yinchuan Ningxia

³Engineering Research Center for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture on Arid Regions, Yinchuan Ningxia

Received: Jun. 3rd, 2023; accepted: Jun. 23rd, 2023; published: Jun. 30th, 2023

*通讯作者。

Abstract

Phase change materials (PCM) have the characteristics of storing latent heat, absorbing and releasing a large amount of latent heat in the process of phase change, which is helpful to improve the temperature field of soil and alleviate frost heave damage of soil. Taking the foundation soil of the Xiganqu canal in Ningxia area as the research object, the effects of phase change materials and fly ash shaped phase change materials on the physical and mechanical properties of soil under freeze-thaw cycle were studied, and mass loss test, volume change test, SEM scanning electron microscopy test and DSC differential heat scanning test were carried out on the improved soil of canal foundation with different dosages after freeze-thaw cycle. The results showed that the addition of cinder shaping PCM reduced the mass loss and volume frost heaving compared with pure PCM soil, and the enthalpy value increased.

Keywords

Freeze-Thaw Cycle, Phase Change Materials, Fly Ash, Frost Heave

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国北方地区, 季节性冻土广布, 冻土中的水在冬季冻结, 夏季融化, 土体会经历数次冻融作用, 在循环过程中, 土中微观结构发生变化, 对土体结构损伤巨大[1] [2] [3], 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。诸多研究表明, 在土体中掺入改良剂有利于提高土体的冻融性能[4] [5] [6]。改良方法大多利用加入的改良材料的化学性能, 通过生成强度较高的新物质, 增强颗粒间的胶结连接力, 以提高土体的强度和稳定性。但是目前的冻胀防治措施是预防性的被动措施, 不能从根本上消除冻害, 因此需要探索更加主动的处理方法。相变材料(PCM)作为一种新型控温材料, 通过物相之间的转化, 可以产生大量的潜热, 能够调控温度场, 在太阳能、建筑隔热、路面沥青保温方面广泛运用[7], 然而在土体抗冻胀方面研究较少, 孙斌祥[8]等人将微胶囊相变材料加入路基粗颗粒土中, 结果表明相变材料能延缓粗粒土的温度变化, 相变材料能抑制粗粒土冻胀的发展; 郑永杰[9]等对比了液体石蜡 PCM 和微胶囊相变材料对黄土物理力学性质的影响; 黄英豪[10]等人将 2 种不同的 PCM 加入土体中, 指出了相变材料的热特性和改良机理。这些研究都证明了相变材料在控制温度变化、改良土体的冻融性能方面具有可观的潜力和可行性。但目前使用 PCM 对土体进行处理的研究还相对较少, 因此使用粉煤灰复合相变材料对土体进行改良的试验研究对土体抗冻融有着积极作用。选取宁夏地区西干渠渠基土, 分别加入 3 种不同含量改良剂粉煤灰、PCM 进行冻融循环试验、质量体积变化试验、无侧限抗压强度试验、以及 SEM 电镜试验。探究冻融循环下定新相变材料的力学性质、体积变化、以及微观结构变化规律。

2. 试验材料与试样制备

2.1. 试验材料

2.1.1. 土样

取自宁夏西干渠银川段渠基, 呈黄褐色, 基本物理性质如表 1 所示。

Table 1. Basic physical properties of soil**表 1.** 土的基本物理性质

天然含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
11.5	1.86	14.1	21.6	15.5	6.1

2.1.2. 相变材料

考虑到当地渠道的平均气温, 选取相变温度为 4.5℃~5.5℃ 的石蜡基固-液相变材料(PCM), 如图 1(a) 所示。在室温下呈液态, 无色无味, 低于相变温度时为乳白色固体。热焓值为 158 J/g。

2.1.3. 粉煤灰

如图 1(b), 粉煤灰来自宁夏本地某火力发电厂, 级别为二级, 主要成分如表 2 所示。

**Figure 1.** Test materials: (a) Paraffin based phase change materials; (b) Fly ash**图 1.** 试验材料: (a) 石蜡基相变材料; (b) 粉煤灰**Table 2.** Main chemical components of fly ash**表 2.** 粉煤灰的主要化学成分

名称	成分	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
粉煤灰	质量百分比(%)	1.387	2.18	33.65	48.93	1.04	1.71	4.09	1.14	5.31

2.2. 试样制备

Table 3. Sample preparation**表 3.** 试样制备

组别	编号	PCM 质量(%)	粉煤灰质量(%)	细砂质量(%)
素土	S ₀	0	0	100
	P ₅ S	5	0	95
	P ₁₀ S	10	0	90
PCM 改良土(PS)	P ₈ S	8	0	92
	P ₁₀ S	10	0	90
	F ₅ A	0	5	95
粉煤灰改良土(FA)	F ₈ A	0	8	92
	F ₁₀ A	0	10	90
	FP ₅ S	5	8	87
粉煤灰-PCM 改良土(FPS)	FP ₈ S	8	8	84
	FP ₁₀ S	10	8	82

粉煤灰颗粒含有大量孔隙, 孔隙率一般在 50% 和 60% 之间, 比表面积较大, 其表面是疏松多孔的结构, 所以粉煤灰具备成为理想基体材料的潜质并且粉煤灰作为工业废料, 价格低廉, 如能利用, 将产生可观的社会经济效应。本研究通过将熔化的相变材料吸附到粉煤灰中来得到复合相变材料。

按表 3 向风干土中分别添加 PCM、粉煤灰等材料并搅拌混合均匀, 按土样的干重向土中均匀地喷洒一定量的水, 控制土样含水率均为 14%, 采用分层击实法分 5 层制样, 控制土样高度为 80 mm, 直径为 39.1 mm, 压实度均为 95%, 将制备好的土样用保鲜膜包裹分组编号后, 放入养护皿中待用。

3. 试验方案

3.1. 冻融循环试验

试件养护完成后放入冷冻箱内, 冻结、融化温度分别设置为 -20°C 和 20°C , 时间均为 12 h。

3.2. 质量及体积变化试验

用游标卡尺测量冻融后土样的直径和高度。对每个土样沿高度方向取五个不同进行直径测量, 沿上下端面相垂直的方向进行 3 次高度测量, 取其平均值作为土样的高度。尺寸测量结束后, 用天平称重, 以分析冻融循环过程中土样的质量变化。

3.3. 无侧限抗压强度试验

分别对经过 0、1、3、7、9 次冻融循环作用后的试样进行无侧限抗压强度试验, 剪切速率为 1 mm/min。

3.4. SEM 电镜扫描试验

对九次冻融后的土样进行电镜扫描, 扫描倍数设为 500 倍。以观察改良土在冻融循环前后的微观结构变化, 研究改良剂的改良机理。

4. 试验结果与分析

4.1. 质量损失

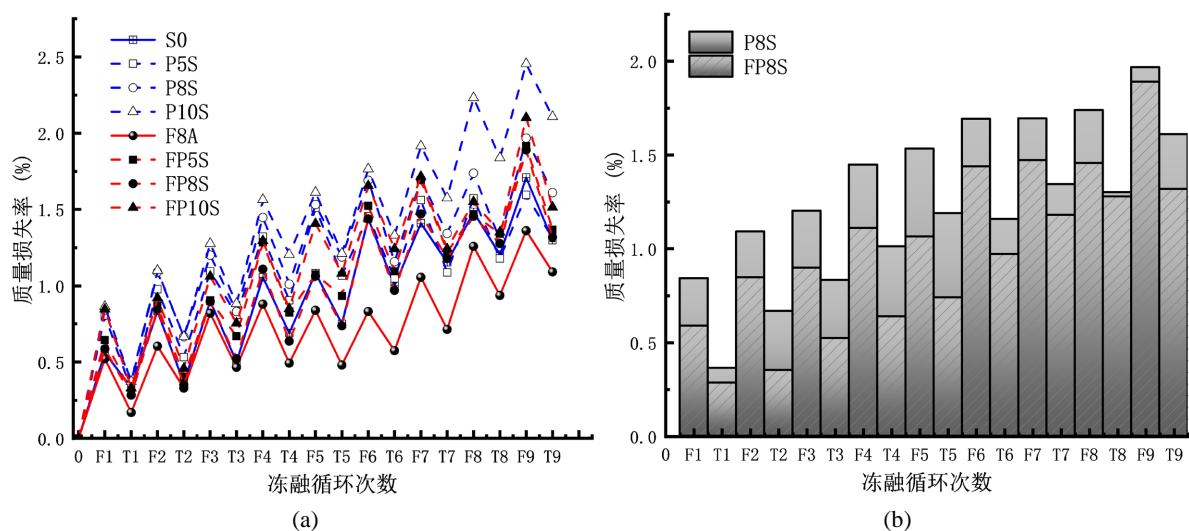
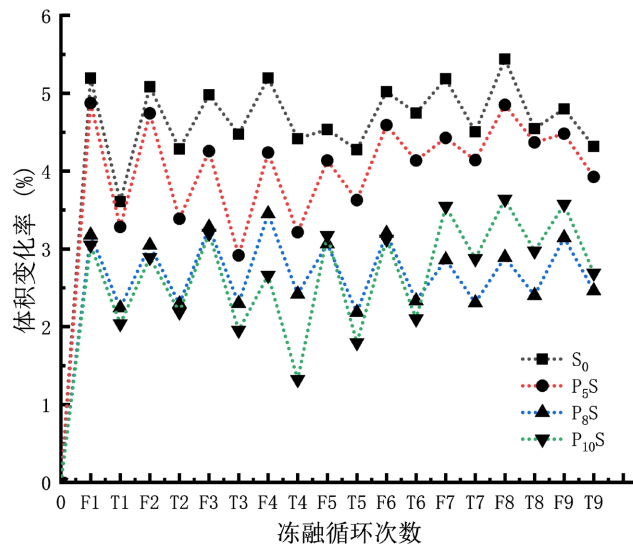


Figure 2. Mass loss rate of soil samples under freeze-thaw cycles: (a) Mass loss rate of soil samples under freeze-thaw cycles; (b) Quality loss comparison

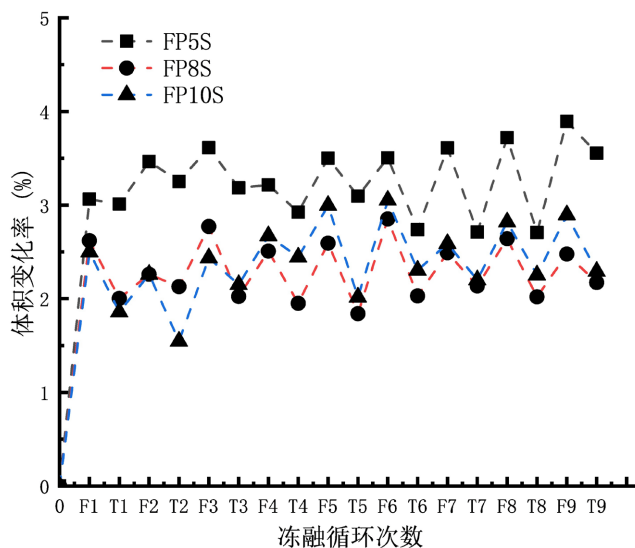
图 2. 土样冻融循环下质量损失率: (a) 土样冻融循环下质量损失率; (b) 质量损失对比

图 2(a)为素土与改良土在不同冻融循环次数下的质量损失率, 横坐标中的 F 表示冻结, T 表示融化。所有土样的质量损失在冻结过程中较大, 在融化时较少, 是由于在冻结期, 土中水相变为冰晶, 部分冰晶连带土粒粘在保鲜膜上产生质量损失; 而在融化期, 冰变成水, 但不能完全被土吸收, 也会造成一定的质量损失。P₅S、P₈S、P₁₀S 在经历 9 次冻融循环后质量损失分别达到了 1.32%、1.61% 和 2.1%, 而素土为 1.3%。质量损失随着 PCM 含量的增加而增加, 这是因为除了土中冰水相变造成的质量损失, PCM 既不溶于水也不能浸入土粒, 而土体孔隙空间有限, 导致无法容纳的 PCM 从土体表面渗出, 也造成一定的质量损失。FP₅S、FP₈S、FP₁₀S 在经历 9 次冻融循环后质量损失分别达到了 1.31%、1.37% 和 1.52%, 略低于 PS。这是因为 PCM 被吸附在粉煤灰孔隙之间, 减少了质量损失, 但由于孔隙数目有限, 过量的 PCM 无法完全被粉煤灰颗粒的微小孔隙容纳, 图 2(b)为 P₈S 和 FP₈S 冻融循环后的质量损失对比, 9 次循环结束后, FP₈S 质量损失比 P₈S 降低了 19%, 粉煤灰有效缓解了土样的质量损失及 PCM 泄露。

4.2. 体积变化特征



(a)



(b)

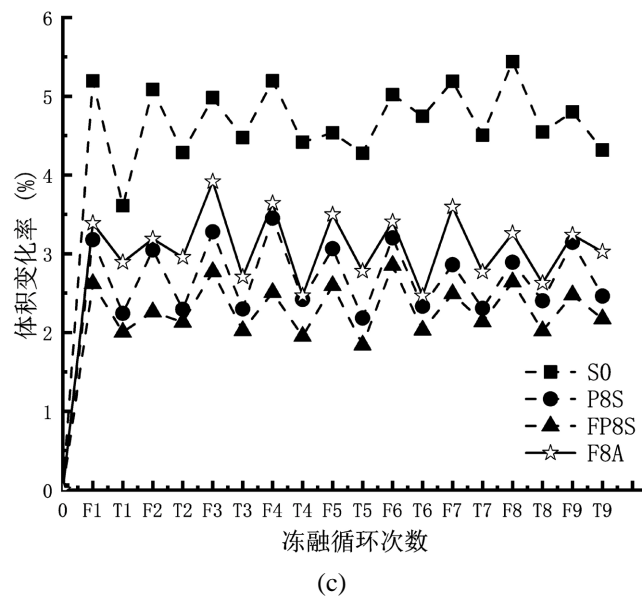


Figure 3. Sample volume change rate: (a) PCM improved soil with different freeze-thaw volume change rates; (b) FPS volume change rate; (c) Comparison of sample volume change rate

图 3. 试样体积变化率: (a) PCM 改良土不同冻融体积变化率; (b) FPS 体积变化率; (c) 试样体积变化率对比

图 3(a)是 PS 经过冻融循环后的体积变化率, 可以发现, 土样均呈“冻胀融缩”特征。循环过程中素土体积变化率最大, 不同含量的 PCM 均可抑制土体冻胀, P₈S 体积变化率最小, 循环结束后仅有 2.3%, PCM 含量为 10% 时, 前 6 次冻融循环中土体体积变化与 8% 含量时没有明显差别, 但 6 次冻融循环以后, 土的体积变化率反而增大, 甚至超过了 8% 含量 PCM 的情况, 这是由于随着冻融循环次数的增加, 土样间颗粒联结力减小、裂缝发育, 较高含量的 PCM 泄露较为严重, 影响了其抑制土体冻胀的能力。

图 3(c)表明, FPS 的体积变化小于 PS。9 次循环结束后, FP₈S、P₈S、S 冻胀率分别为 2.1% 和 2.36% 和 5.2%, FP₈S 冻胀率较素土降低了 59.6%, 粉煤灰的加入使得 PCM 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吸放热, 从而降低土样的体积变化率。由于粉煤灰内部孔隙数量有限, 使用粉煤灰对 PCM 的吸附存在最佳值, 过高的 PCM 含量可能会出现吸附不充分的情况, 因此当粉煤灰含量一定时, FP₈S 的抗冻融变形效果较好。

4.3. 力学特性

图 4 为土样经历冻融循环后的无侧限抗压强度。未经冻融循环的 S₀、P₅S、P₈S、P₁₀S 强度分别为 178.8、190.3、242.8、199.8 kpa, 可见 PCM 起到了一定的胶结作用, 使土样强度增加, 而当 PCM 含量超过 8% 后, 由于 PCM 的泄露, 土样的强度增加幅度降低。而 FP₅S、FP₈S、FP₁₀S 的强度分别为 232.13、210.23、189.34 kpa, 这是因为加入粉煤灰后, PCM 较好的吸附在孔隙之间, 结构较为稳定, 土样强度逐渐增大。第一次循环后土体强度均大幅下降, 素土强度下降了约 40%。随着循环次数的增加, 强度衰减趋于平缓。由于 PCM 较小的泄露问题, 冻融期间土样内部裂缝发育加剧, 水分得以进入, 使改良土的无侧限抗压强度均减小。加入粉煤灰后, 土体强度的衰减状况比仅加入 PCM 有所好转, 以 PCM 含量为 8% 为例, 9 次循环后, FPS 强度较 PS 提高了约一倍, 表明粉煤灰对保证土体在冻融循环作用下的强度是有效的, 这是因为粉煤灰能够与土中的矿物成分发生离子交换反应、团聚效应及胶凝作用, 并在土中产生了大量的胶结物质, 提高了土的强度。

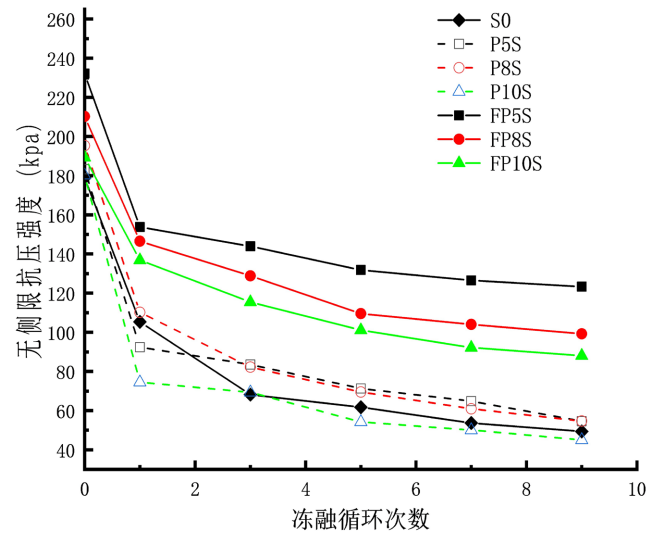


Figure 4. Unconfined compressive strength of specimens under freeze-thaw cycles
图 4. 冻融循环下试样的无侧限抗压强度

4.4. SEM 电镜分析

图 5(a)可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 土样孔隙中冰晶的生长导致土颗粒受到挤压, 土体出现“抱团”现象, 破坏了原有整体的均匀的黏聚性, 增加了土体内贯穿的孔隙和裂隙, 宏观表现为土体强度降低。

通过图 5(b)可以发现 PCM 土颗粒多呈片层状结构, 单元体与单元体之间以面-面接触为主, 兼有面-边接触等多种接触形式, 冻融后裂隙发育明显, 孔隙多且大。随着土中水不停的相变以及 PCM 的泄露, 颗粒间孔隙中部分不平整的内壁得到消磨, 最终变得光滑。通过图 5(c)可以发现由于粉煤灰疏松多孔的特性, PCM 被吸附于小孔隙之间, 孔隙被胶结填充, 土体内部孔隙减少, 形成的许多微细孔隙使孔隙通道变得狭小, 阻碍了流体的流通形成, 从而抑制了土体的胀缩特性。

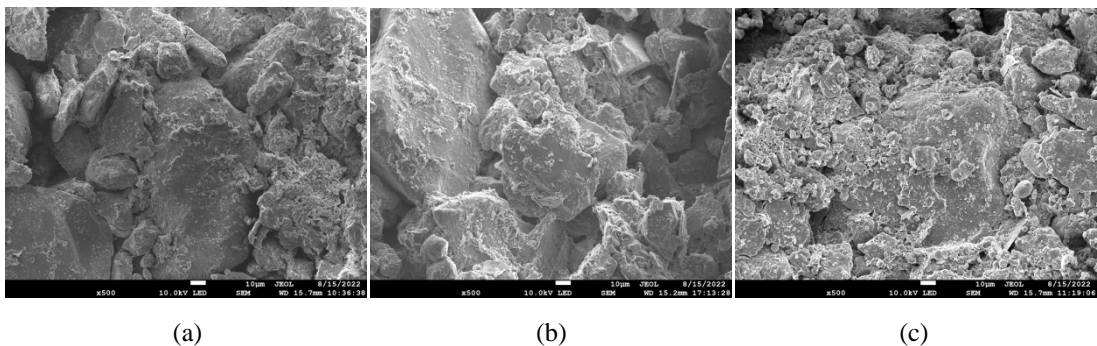


Figure 5. SEM photos of the sample after 9 cycles: (a) 9 cycles of plain soil; (b) 8% PCM 9 cycles; (c) FP8S 9 cycles
图 5. 9 次循环后试样 SEM 照片: (a) 素土 9 次循环; (b) 8% PCM 9 次循环; (c) FP₈S 9 次循环

4.5. 结论

本文使用相变材料对宁夏地区渠基土进行 2 种不同改良方式进行改良, 进行一系列的试验, 得到以下结论:

1) 在冻融循环过程中, PCM 改良土能够明显地降低土体的体积变化, 但发现较大的质量损失, 改

良效果因泄露问题逐渐减缓; 而经过粉煤灰改良后的 PCM, 质量损失明显减小, 对 PCM 性能发挥有积极作用。

2) 冻融循环过程中, 粉煤灰 - PCM 的掺入减小了土体的强度衰减, 以 8% PCM 的含量最为显著, 而纯 PCM 未展现出良好的改良效果。

3) 微观结构分析表明, 冻融循环造成的土体内部空隙增大, 是强度衰减的内在原因, PCM 的加入减缓了空隙增大的速度, 但随着循环次数增加以及泄露问题, 内部层状结构发育, 影响土体强度; 加入粉煤灰后, 内部层状结构以及孔隙数量明显减少, 宏观上增强了土体的强度。

参考文献

- [1] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(z2): 2690-2694.
- [2] 赵贵涛, 韩仲, 邹维列, 王协群. 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1139-1146.
- [3] 张英, 邴慧. 基于压汞法的冻融循环对土体孔隙特征影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 169-174.
- [4] 谈云志, 吴翩, 付伟, 万智, 张华, 张振华. 改良粉土强度的冻融循环效应与微观机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2827-2834.
- [5] 任帅, 任翔. 基于纳米 SiO₂ 改良的橡胶冻黏土性能试验研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(6): 31-35.
- [6] 张向东, 任昆. 煤渣改良土的抗冻能力及损伤特性研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 764-772.
- [7] Marani, A. and Nehdi, M.L. (2019) Integrating Phase Change Materials in Construction Materials: Critical Review. *Construction and Building Materials*, **217**, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.064>
- [8] 孙斌祥, 陈加集, 潘建光. 掺微胶囊相变材料粗粒土的冻胀试验研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1): 178-185.
- [9] 郑永杰, 张翥, 雒志利, 高阳, 王永宝, 袁海鸿. 冻融循环下相变材料改良黄土路基物理力学特性研究[J]. 公路, 2022, 67(8): 36-43.
- [10] 黄英豪, 陈永, 朱洵, 吴志强, 朱锐, 王硕, 吴敏. 相变材料改良膨胀土冻融性能试验研究及微观机理分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 1994-2002.