

DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.01.008

冻融过程中煤渣-相变材料对粉砂土 温度分布的影响

唐少容^{1,2,3}, 刘锦豪¹, 李昊天¹, 殷磊¹, 李娟^{1,2,3}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 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 750021; 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 750021)

摘要: 为了研究相变材料(phase change material, PCM)在冻融过程中对渠道土体温度场的影响和作用机理, 分别利用石蜡基 PCM 和煤渣, 制备石蜡基 PCM 改良土和煤渣-石蜡基 PCM 改良土, 开展相变材料改良土体的单向冻融试验, 分析土柱各层温度随着时间的变化。结果表明: 改良土各土层间温度梯度减小, 升降温速率减缓; 冻结结束后, 粉砂土土柱整体土层已降至 0℃以下, 石蜡基 PCM 改良土土柱距离柱顶约 16 cm 范围内的土层温度低于 0℃, 煤渣-石蜡基 PCM 改良土土柱距离柱顶约 8 cm 范围内的土层温度低于 0℃, 土柱顶端达到 0℃的时间依次约为 13, 16, 19 h。石蜡基 PCM 具有延缓土体冻融时间的作用, 尤其是利用煤渣进行二次改良后, 煤渣大量吸附石蜡基 PCM, 延迟作用更加明显; 加入石蜡基 PCM 后, 外部温度剧烈变化对土层的影响降低, 土体温度场被调整得更均匀。

关键词: 冻融; 相变材料; 煤渣; 改良土; 土体温度

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A

输水渠道承担着保障宁夏各灌区农业生产的重要任务。除北部盐渍土和南部湿陷性黄土外, 宁夏大部分地区渠道基土的粉土含量较高。由于地处季节性冻土地区, 渠道基土对冻胀较为敏感, 在反复冻融循环作用下, 土体内部微观结构发生改变^[1], 强度减小, 进而导致上部结构稳定性降低, 渠道混凝土衬砌体出现开裂、滑塌等破坏现象, 严重影响灌区的输水效率。掺入改良剂是提高土体抗冻融能力的常用方法^[2-3], 这类方法大多利用改良材料的化学性能生成新物质, 增强颗粒间的胶结连接力, 以提高土体强度。然而, 土体冻融首先源于土中热量分布不平衡以及水汽迁移, 上述改良方法并不能延缓土体因温度剧烈变化引起的冰水相变。相变材料(phase change material, PCM)是一种新型控温材料, 其在相转化过程中产生的潜热能可及时响应环境温度变化, 缓解热量在时空上需求的不平衡。PCM 已在建

筑保温节能、路面融冰融雪等领域得到广泛应用^[4-6], 但在土体抗冻融方面的应用还相对较少。黄英豪^[7]等利用石蜡相变材料对膨胀土进行了改良。Kravchenko 等^[8-9]认为微胶囊相变材料对土壤具有解冻作用。Mahedi 等^[10]分别向未处理及经粉煤灰处理的土中加入不同质量分数的石蜡基相变材料, 结果表明, PCM 的加入显著缩短了冻融期, 降低了冻胀率。孙斌祥等^[11]将不同掺量的微胶囊相变材料加入路基粗颗粒土中, 发现相变材料能延缓粗粒土的温度变化, 降低最大冻结深度, 并能减弱水分迁移能力, 缓解土体冻胀。郑永杰等^[12]对比研究了液态 PCM 和微胶囊 PCM 两种相变材料对黄土最大干密度、最优含水率等物理性质的影响。这些研究均表明相变材料能够有效控制土体温度变化和改良土体冻融特性。此外, 张向东等^[13]认为煤渣可以提高改良土的抗冻能力。已有研究指出, 液态 PCM

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2024AAC03126, 2025AAC030199); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

作者简介: 唐少容(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事旱区水工结构与岩土工程方面的科研与教学工作(tangsrong@126.com)。

引用格式: 唐少容, 刘锦豪, 李昊天, 等. 冻融过程中煤渣-相变材料对粉砂土温度分布的影响[J]. 西北工程技术学报(中英文), 2026, 25(1): 58-62.

容易泄露^[7-9]。为了减少 PCM 泄露并提高其对土体的改良效率,结合宁夏火力发电厂煤渣的多孔特性和固废再利用需求,本文在渠道粉砂土中分别加入相变材料和煤渣,制备成石蜡基 PCM 改良土和煤渣-石蜡基 PCM 改良土,并开展单向冻融试验,对比改良土的冻融过程温度场分布,揭示石蜡基 PCM 调控季节性冻土温度场的机理。本研究对于石蜡基 PCM 用于季节性冻土地区土体改良具有重要的理论意义,并为煤渣与石蜡基 PCM 相结合的渠道抗冻融设计提供科学依据。

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/%
11.5	1.86	14.1	21.6	15.5

表 2 土的颗粒级配

粒径/mm	<0.075 mm	0.075~0.1 mm	0.10~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	>2 mm
质量分数/%	10.68	7.28	24.14	22.24	7.26	10.12	18.28

(2)考虑到当地渠道基土平均温度和延缓土体冻融的目的,选取杭州某公司生产的相变温度为 4.5~5.5℃的石蜡基 PCM,其外观如图 1 所示。该材料在室温下呈液态,无色无味;当温度低于相变温度时,变为乳白色固体。其热焓值为 158 J/g。所用煤渣来自宁夏银川市某火力发电厂,主要成分为 SiO₂和 Al₂O₃,质量分数分别为 60.33%和 23.93%。



图 1 石蜡基相变材料

1.2 试验装置

土样及设备如图 2 所示。制备土柱的试样筒为圆柱形有机玻璃筒(无顶、有底,筒内径为 8 cm,高为 25 cm)。利用 D-500 低温试验箱对土体进行温度控制,用 PT-100 温度传感器测量土温。5 个直径 9 mm 的小孔分别位于有机玻璃筒的 0, 4, 8, 12, 16, 20 cm 高度处,用于插入温度传感器。采用分层击实法分 5 层制样,击实一层后将传感器掩埋在土柱中心处,小心压实后,继续安装下一个热传感器。控制土样高度为 20 cm,直径为 8 cm,压实度均为 90%。将装好土样的玻璃筒两侧及底部用保温材料包裹以保证土体单向冻融。每组试验均设 3 个平行

1 材料与方 法

1.1 试验材料

(1)土体取自宁夏西干渠银川段渠基,取样深度在 1.0 m 附近。土体呈黄褐色,其基本物理性质如表 1 所示。通过筛析法对原状试样土壤进行分析,得到各粒径分布如表 2 所示。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[14],确定该渠基土为粉砂土;依据《水工建筑物抗冰冻设计标准》(GB/T 50662—2011)^[15],将该土划分为冻胀性土。

土柱。采用三线连接法将热传感器连接到 JM3816 测试系统上,记录时间间隔定为 30 min,连续测量 24 h,获取土柱各高度的温度随着时间的变化规律。依据当地气温,选取 -20℃为试验冻结温度,将装有土样的玻璃筒单向冻结 24 h,然后,调整试验箱目标温度为 20℃,进行融化过程,时长 24 h。



图 2 土样及设备

1.3 试验内容

本文设计了两种改良土:一种是石蜡基 PCM 改良土(以下简称为“PS”),在土体中掺入占干土质量 8% 的石蜡基 PCM;第二种是煤渣-石蜡基 PCM 改良土(以下简称为“CPS”),在土中同时掺入石蜡基 PCM 和煤渣,为满足石蜡基 PCM 吸附率和保证土体强度,煤渣掺量为干土质量的 10%,石蜡基 PCM 掺量为干土质量的 8%。向风干土中分别添加石蜡基 PCM、煤渣并搅拌混合均匀,均匀地喷洒一定量的水,控制土样含水率均为 14%,搅拌均匀后装入密封袋闷料 24 h,使水分分布均匀,并以粉砂土(以下简称为“S”)作为对照组进行对比研究。

3 冻结过程中的土柱温度变化

在土样冻结过程中,分别于 0,4,8,12,24 h 测得的温度变化曲线如图 3 所示。图 3 中 20 cm 处为土柱顶部,0 cm 处为土柱底部。土柱初始温度均为 20 °C。试验采用自上而下的单向冻结,因此降温从顶层开始,各个高度的温度开始不同程度地下降,土层之间形成温差。从相邻土层的温度曲线密集程度来看,土层上部的温差大,下部温差略小。对比图 3a、图 3b 和图 3c 可知,PS、CPS 试样各土层间的温度梯度均比 S 试样的温度梯度小。这表明掺入石蜡基 PCM 后,外部温度剧烈变化对土层的影响差异降低,土体温度场被调整得更为均匀。所有土样

降温初期速率快,4 h 后降温速率逐渐减小。各土样温度降幅随着距冷端的距离增加而减缓。冻结结束后,S、PS、CPS 土柱 20 cm 高度处温度分别为 -4.4,-2.1,-1.23 °C,说明土柱顶端均已降至 0 °C 以下;S、PS、CPS 土柱的底部(即 0 cm 高度处)温度分别为 -2.1,0.1,1.1 °C。由图 3a、图 3b 和图 3c 可知,S 土柱各高度处温度均已降至 0 °C 以下,PS 土柱的底部刚刚达到 0 °C,CPS 土柱的底部尚未冻结。同时,若以 0 °C 为土体冻结温度,S、PS、CPS 土柱高度为 20 cm 处的起始冻结时间分别约为 13,16,19 h,可见石蜡基 PCM 具有延缓土体冻结时间的作用,尤其是利用煤渣进行二次改良后,煤渣大量吸附石蜡基 PCM,延迟作用更加明显。

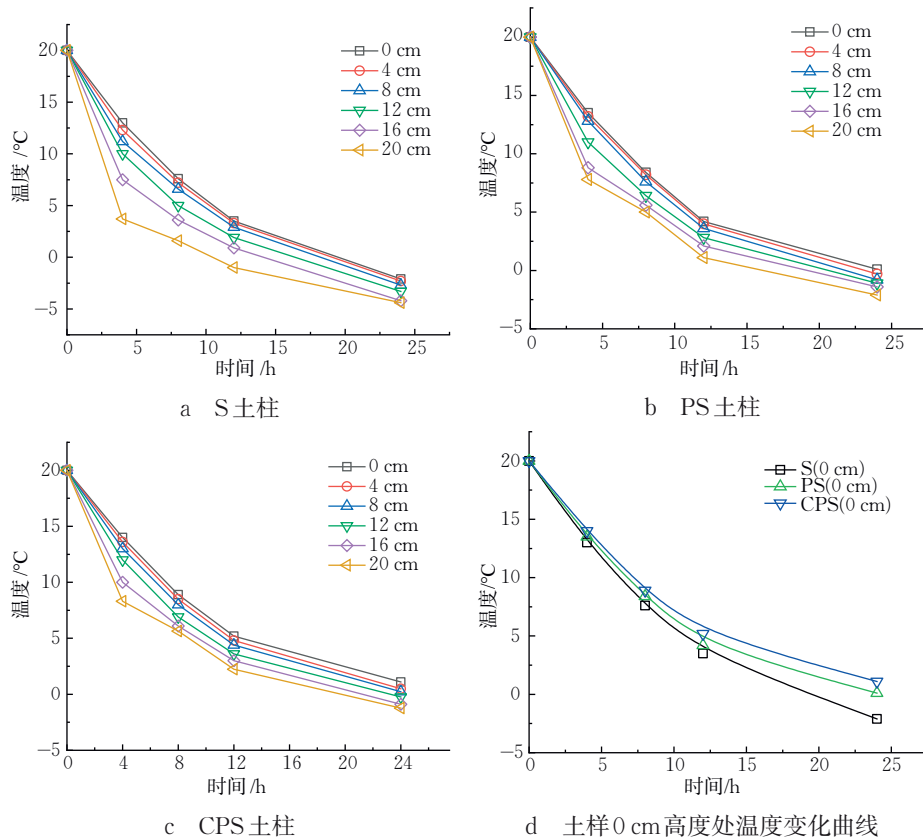


图 3 土柱冻结过程中的温度-时间变化曲线

4 融化过程中的土柱温度变化

相变材料不仅能在环境温度降低时释放储存的潜热,还能在环境温度升高时吸收热量,从而平衡土体温度场。图 4 为 3 种土柱融化过程中的温度-时间变化曲线。由图 4 可知,与冻结过程类似,各土柱升温速率均呈现先快后慢的趋势,且越靠近顶端的土层温度上升越快。图 4a 中,S 土柱各土层在前 12 h 内以较大速率不断升温,尤其前 4 h 内

温度上升显著,顶层温度变化幅度较大。相比之下,图 4b 和图 4c 中 PS 和 CPS 土柱的各土层温度变化更为复杂。在融化过程的第 4~8 小时,升温速率发生突变,此时土温恰好处于石蜡基 PCM 材料相变区间附近,相变过程导致土体温度场发生了调整。PS 和 CPS 土柱的温度变化趋势相似,但 CPS 土柱各层温度略高。这归因于煤渣对石蜡基 PCM 的吸附作用提高了石蜡基 PCM 相变潜热的利用率。由图 4d 可知:在冻结过程中,S 土柱顶

层温度最低,PS 土柱次之,CPS 土柱最高;各土柱降至 0°C 的时间和土层高度存在差异,S 土柱先降至 0°C ,PS 和 CPS 土柱后降至 0°C 。改良土温度的第一次突变发生在 $3\sim 8^{\circ}\text{C}$,说明在此温度区间内,石蜡基 PCM 的相变影响了温度曲线;在融化过程中,S 土柱快速升温,几乎与 PS,CPS 土柱同步升至 0°C ,随后其土层温度一直略高于 PS 和 CPS 土柱,说明石蜡基 PCM 由固态向液态转变时吸收潜热,抑制了土体温度的剧烈波

动。从全过程温度曲线(图 4d)来看,煤渣-石蜡基 PCM 改良土(CPS)温度波动最小,最低温出现在顶层,仅距离柱顶约 8 cm 范围内的土层温度低于 0°C ,其余各层均保持在 0°C 以上(图 4c)。PCM 改良土(PS)因石蜡基 PCM 的泄露,距离柱顶约 16 cm 范围内的土层温度低于 0°C ,效果略差。粉砂土(S)对温度变化最为敏感,整体较早进入负温区且升温迅速,冻融性能缺乏稳定性,这给上部结构安全构成隐患。

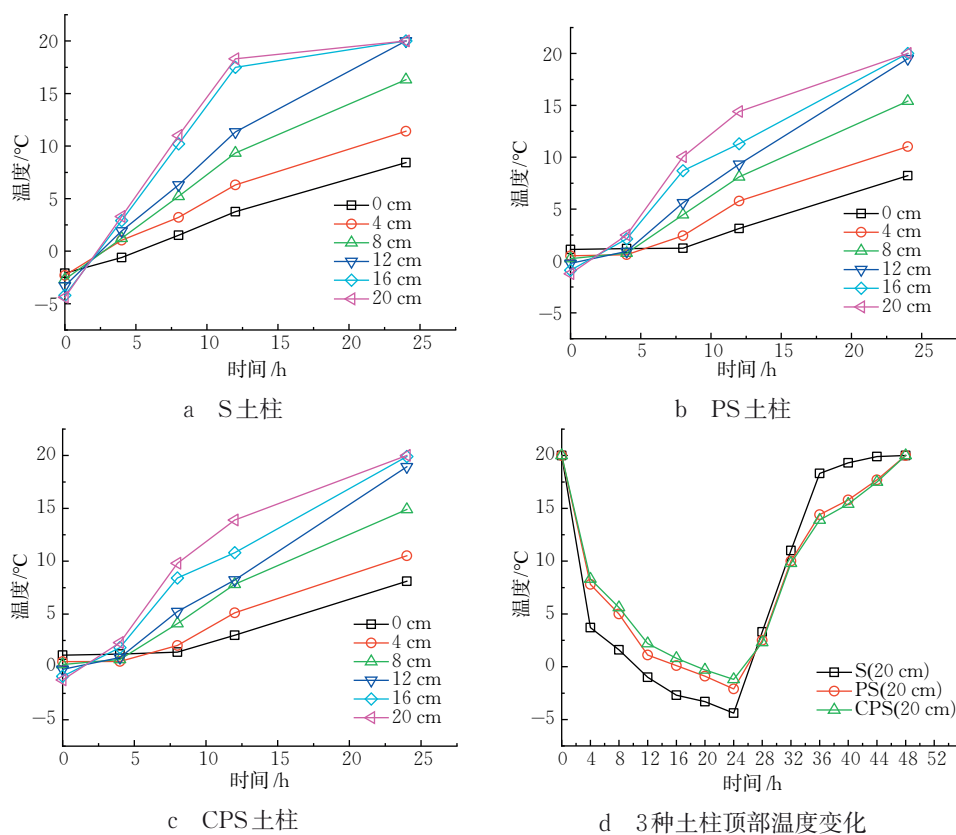


图 4 土柱融化过程中的温度-时间变化曲线

5 结论

本文对粉砂土(S)、石蜡基 PCM 改良土(PS)和煤渣-石蜡基 PCM 改良土(CPS)进行单向冻融试验,分析不同时刻和位置的土体温度,探究了相变材料改良土体冻融温度场的变化过程与机理,得到以下结论。

(1)在冻结过程中,PS 和 CPS 土柱各土层间的温度梯度均比 S 土柱小,说明加入石蜡基 PCM 后,外部温度剧烈变化对土层影响降低,土体温度场更为均匀。

(2)冻结结束后,S 土柱各高度处温度均低于 0°C ,PS 土柱距离柱顶约 16 cm 范围内温度低于 0°C ,CPS 土柱距离柱顶约 8 cm 范围内温度低于

0°C 。S,PS,CPS 土柱顶端达到 0°C 的时间分别约为 13,16,19 h,表明石蜡基 PCM 具有延缓土体冻结时间的作用,尤其是利用煤渣进行二次改良后,煤渣大量吸附石蜡基 PCM,延迟作用更加明显。

(3)在冻结和融化过程中,S 土样降温、升温的速度均大于 CS 和 CPS 土样,且在相变温度附近,S 土样升降温速率变化大,说明石蜡基 PCM 从固态到液态的相变吸收潜热,可以平衡土体剧烈温度变化。

(4)煤渣吸附性强,能大量吸附石蜡基 PCM 材料,减少其泄露。CPS 土样在冻融过程中的温度场变化比 PS 土样更平稳,土柱内各土层间的温度梯度更小,有利于提高季节性冻土地区渠基土体的冻融性能。

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(增刊 2): 2690-2694.
- [2] 谈云志, 吴翩, 付伟, 等. 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.
- [3] 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.
- [4] Aguayo M, Das S, Castro C, et al. Porous inclusions as hosts for phase change materials in cementitious composites: Characterization, thermal performance, and analytical models[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134: 574-584.
- [5] Farid M M, Khudhair A M, Ali K Razack S, et al. A review on phase change energy storage: Materials and applications [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9/10): 1597-1615.
- [6] Marani A, Nehdi M L. Integrating phase change materials in construction materials: Critical review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 36-49.
- [7] 黄英豪, 陈永, 朱洵, 等. 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.
- [8] Kravchenko E, Liu J K, Chang D, et al. Study of the thermal field of a mixture of soil and PCM materials with simulation of the warming effect during a phase change[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120818.
- [9] Kravchenko E, Liu J K, Li X. Numerical modeling of the thermal performance of soil containing microencapsulated PCM[J]. Construction and Building Materials, 2021, 298: 123865.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 郑永杰, 张脩, 雒志利, 等. 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.
- [13] 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.
- [14] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水工建筑物抗冰冻设计标准: GB/T 50662—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

Experimental Study on Temperature Distribution of Silty Sand Improved by Cinder and Phase Change Material During Freeze-Thaw Process

TANG Shaorong^{1,2,3}, LIU Jinhao¹, LI Haotian¹, YIN Lei¹, LI Juan^{1,2,3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering and Technology Research Center of Water-Saving Irrigation and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan 750021, China; 3. Ministry of Education Engineering Research Center of Efficient Use of Water Resources in Arid Modern Agriculture, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to study the influence and mechanism of phase change material (PCM) on the temperature field of channel soil during the freeze-thaw process, paraffin-based PCM and cinder were used to prepare paraffin-based PCM modified soil (PMS) and cinder-paraffin-based PCM modified soil (CPMS). One-way freeze-thaw tests were conducted on the modified soils to analyze the temperature variation of the soil column over time. The results show that the temperature gradient between different layers of the modified soils decreases, and the rate of temperature change slows down. After the freezing process, the entire silty sand column reaches a temperature below 0 °C. The temperature of the soil layer within about 16cm from the top of the PMS column drops below 0 °C, while for the CPMS column, this occurs within approximately 8 cm from the top. The times taken for the top of the soil columns to reach 0 °C are about 13, 16 and 19 h for plain soil, PMS, and CPMS, respectively. The paraffin-based PCM effectively extends the duration of the freeze-thaw cycle in the soil, and this effect is significantly enhanced after incorporating cinder, which adsorbs a large amount of the PCM. Additionally, the influence of drastic changes in external temperature on the soil layers is mitigated, resulting in a more uniform temperature field within the soil.

Keywords: freeze-thaw; phase change material; cinder; modified soil; soil temperature

(责任编辑 王德平)