

DOI: 10.11779/CJGE20240203

# 含盐膨润土导热性能的温度效应

周殷康<sup>1</sup>, 阎长虹<sup>\*2</sup>, 郑军<sup>3</sup>, 谢胜华<sup>1</sup>, 项国圣<sup>1</sup>, 刘全威<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 南京大学地球与工程学院, 江苏 南京 210023; 3. 南京地铁集团有限公司, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 含盐膨润土导热性能的温度效应对于核废料深地处置库设计至关重要。通过盐溶液对 MX80 膨润土粉进行盐化调湿处理, 并基于热探针法测试了不同温度下含盐膨润土导热性能, 并分析了不同温度下膨润土相对湿度随盐分特征响应规律。结果表明: 含盐膨润土导热性能的温度效应与无盐膨润土相似, 导热系数都随温度升高而增大, 但温度对含盐膨润土导热性能的强化程度要弱于无盐膨润土; 相同盐分类型下随浓度升高, 含盐膨润土导热性能的温度效应快速弱化; 相同盐分浓度下, 不同盐分类型含盐膨润土导热性能的温度效应不同, 呈现  $\text{CaCl}_2 < \text{NaCl} < \text{KCl}$ 。含盐膨润土导热性能温度效应的演化机理归因于盐分降低了土内相对湿度, 部分抵消了温度通过水汽潜热传输对导热性能的贡献。

**关键词:** 含盐膨润土; 导热性能; 水汽潜热传输; 温度效应; 相对湿度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)08-1767-08

**作者简介:** 周殷康(1988—), 男, 安徽太湖人, 博士, 主要从事岩土体传热相关的试验与模拟工作。E-mail: Zhouyk@ahut.edu.cn。

## Temperature effects of thermal conductivity of salted bentonite

ZHOU Yinkang<sup>1</sup>, YAN Changhong<sup>2</sup>, ZHENG Jun<sup>3</sup>, XIE Shenghua<sup>1</sup>, XIANG Guosheng<sup>1</sup>, LIU Quanwei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Nanjing Metro Group Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The temperature effects of thermal conductivity of salted bentonite are crucial for the design of deep-earth repositories for nuclear waste. MX80 bentonite powder is salinized and humidified by salt solution, the thermal conductivity of salted bentonite is measured at different temperatures based on the thermal probe method, and its relative humidity is also analyzed later. The results show that the temperature effects of thermal conductivity of salted bentonite are similar to those of pure bentonite, and the thermal conductivity increases with temperature, but the increase in the thermal conductivity of salted bentonite is weaker than that of pure bentonite. With the increase in the salt concentration with the same type, the temperature effects of thermal conductivity of salted bentonite are gradually weakened. Under the same salt concentration with different salt types, the temperature effects of thermal conductivity of salted bentonite are different from each other, showing  $\text{CaCl}_2 < \text{NaCl} < \text{KCl}$ . The evolution mechanism of the temperature effects is attributed to that salt reduces the relative humidity in pore gas, partially offsetting the contribution of temperature to thermal conductivity through latent heat transfer.

**Key words:** salted bentonite; thermal conductivity; latent heat transfer; temperature effect; relative humidity

## 0 引言

膨润土是高放射性核废料处置库理想的缓冲回填材料<sup>[1]</sup>, 其导热性能对于处置库内温度场演化和散热

设计具有显著影响<sup>[2]</sup>, 一直以来膨润土导热性能受到学界的广泛关注。国内外学者对压实膨润土导热性能进行了深入广泛地研究, 过去主要侧重于分析三相组

**基金项目:** 安徽省自然科学基金项目 (2108085QD168, 2208085MD98); 安徽省教育厅基金项目 (2023AH051086); 安徽省膨胀土力学与工程研究院开放课题 (AHPZY2023KF03) This work was supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province (2108085QD168, 2208085MD98), the Research Fund of Anhui Provincial Department of Education (2023AH051086), and the Open Subject of Anhui Institute of Expanded Soil Mechanics and Engineering (AHPZY2023KF03).

收稿日期(Received): 2024-03-05

修回日期(Revised): 2024-10-13

接受日期(Accepted): 2024-10-16

网络出版日期(Online): 2024-10-17

\*通信作者 (E-mail: Yanchh@nju.edu.cn)

成和矿物组成对膨润土导热性能的影响<sup>[3-4]</sup>；其中三相组成以含水率和干密度为主要参考指标<sup>[5]</sup>，矿物组成则主要考虑石英、岩屑以及石墨等高导热外掺剂<sup>[6-7]</sup>。近年来，关于膨润土导热特性研究逐渐由关注传统组成类因素转向为考虑处置库运行期间的环境效应，主要是温度和盐分两方面。处置库运行期间，库内储存罐中核废料释放的衰变热会引起膨润土屏障升温<sup>[2]</sup>。同时，现有处置库原位试验发现盐分会随着渗流一起侵入膨润土内部<sup>[8-9]</sup>，并在高温区积聚，如图 1 所示。

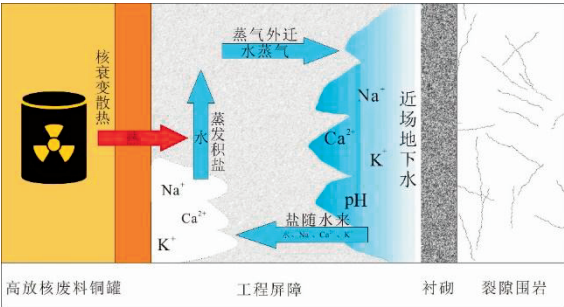


图 1 入渗盐水蒸发外迁导致的盐分积聚

Fig. 1 Salt accumulation due to evaporation and migration of infiltrated salted water

在图 1 中，盐分不断向靠近储存罐的高温方向迁移，则温度越高的区域，相应的膨润土内盐浓度也越大，呈现显著的热-盐强耦合效应。然而，当前膨润土导热性能研究中，侧重于分析温度和盐分对膨润土导热性能的独立影响。例如，徐云山等<sup>[10]</sup>测试了不同温度下 MX80 和 GMZ07 两种膨润土导热特性，选用去离子水制样，不考虑盐分的影响。Siddiqua 等<sup>[11]</sup>采用热针法测试了盐分对膨润土导热性能的影响，并指出盐分会降低孔隙水导热系数<sup>[12]</sup>，进而引起含盐膨润土导热性能下降。然而，其膨润土测试过程中环境恒定为室温，对于温度和盐分的耦合效应也缺乏考虑。

温度和盐分不可避免地影响膨润土导热性能，除了考虑其独立影响外，在理论上温度和盐分对膨润土导热性能也存在确切地关联影响。根据现有非饱和土传热理论，温度对土体导热性能的影响主要取决于内部水汽潜热传输过程<sup>[13-14]</sup>，充足的水汽含量为潜热传输过程的发挥提供保障<sup>[10, 15]</sup>，然而，盐分会降低孔隙水化学势和孔隙气相对湿度<sup>[16]</sup>，不利于水汽潜热传输的发挥，从而抑制温度对膨润土导热性能的贡献。可见，水汽潜热传输为温度和盐分对膨润土导热性能影响的关联提供了路径。然而，目前这方面可参考的相关研究很少，尤其是温度和盐分对膨润土导热性能的关联作用机制缺乏实证分析。

基于此，本文对不同温度下含盐膨润土导热性能开展系统分析，采用热探针法对较宽温度范围（5~

95℃）内不同盐分特征下（浓度和类型）MX80 膨润土导热系数进行测试，查明含盐膨润土导热性能的温度效应。进一步地，对部分试样进行相对湿度测试，并根据水汽潜热传输理论，通过比较相对湿度与导热系数增量之间的关系，揭示含盐膨润土导热性能温度效应的演化机理。本文结果不仅有助于揭示盐分和温度对膨润土导热性能的影响规律和作用机理，也可在实际处置库散热设计及温度场演化中参数取值提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用商用 MX80 膨润土，产于美国 Wyoming 州 Colony 镇，灰白色，主要矿物为蒙脱石，含量 78%，伴生矿物为石英和长石（含量 7.8%和 5%），含有少量方英石。通过试验测试，该膨润土主要物理性质指标如表 1 所示。

表 1 MX80 膨润土基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of MX80 bentonite

相对质量密度	塑限/%	液限/%	塑性指数	自由膨胀率/%
2.76	30	310	280	380

1.2 试样制备

为研究含盐膨润土导热性能的温度效应，开展系列导热测试，测试方案列于表 2。试样含水率和干密度分别设置为 10%，15%，20%，25%和 1.2，1.3，1.4，1.5，1.6 g/cm<sup>3</sup>。导热试验设置温度范围 5~95℃，具体为 5，10，20，30，40，50，60，70，80，90，95℃。盐分特征考虑浓度和类型两方面，参考膨润土渗流和膨胀等水理性质研究<sup>[17]</sup>，采用 NaCl、KCl 和 CaCl<sub>2</sub> 三种典型盐溶液。为模拟高温区盐分的富积，NaCl 溶液最高浓度设定为 5 mol/L，并设定 0，1，3 mol/L 的浓度梯度以揭示盐浓度的影响；KCl 和 CaCl<sub>2</sub> 设置为 3 mol/L，通过与 3 mol/L NaCl 溶液对比反映盐类型影响。同时，为进一步探究含盐膨润土导热性能温度效应的演化机理，需测试不同温度下含盐膨润土相对湿度，设置 20，40，60，80℃四个温度水平，盐分特征与导热测试中一致。

表 2 导热测试方案

Table 2 Measurement schemes for thermal conduction

盐分类型	浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	含水率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
NaCl	0	10/15/20/25	1.2/1.3/1.4/1.5/1.6
	1	10/15/20/25	1.2/1.3/1.4/1.5/1.6
	3	10/15/20/25	1.2/1.3/1.4/1.5/1.6
	5	10/15/20/25	1.2/1.3/1.4/1.5/1.6
KCl	3	25	1.2
CaCl <sub>2</sub>	3	25	1.2

制样前，先将风干膨润土在 105℃下烘干 24 hs，

配置不同浓度的盐溶液, 然后通过溶液喷雾法对干土料进行掺盐调湿, 随后室内焖料 48 h 以上使得膨润土内水盐分布均匀, 最终得到预定含水率和盐分特征的膨润土湿土料备用。基于含盐湿土料和渗透环刀 (内径 61.8 mm, 高 40 mm), 通过静压法 (图 2 (a)) 分两层制备土样。第二次填料前需对下层压实土块进行“刮毛”处理, 据此得到一系列不同含水率、干密度和盐分特征的膨润土试样。

采用小型台钻 (图 2 (b)), 在双孔垫片辅助下, 通过与 SH-3 探针直径 (1.3 mm) 相同的麻花钻头, 在试样中央钻取两个深度 30 mm 间隔 6 mm 测孔, 并用护铜环卡住保鲜膜以保证土样严格密封。然后将涂抹导热硅脂的 SH-3 探针对准测孔, 穿过保鲜膜插入下方土样内, 控制 SH-3 探针尾端塑封块与保鲜膜压紧以防止膨润土升温过程中水分的蒸发外逸 (图 2 (c))。在此基础上, 整体移入恒温恒湿箱中, 温控精度  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  (图 3)。SH-3 探针尾端通过箱体中测试孔引出并与热物性分析仪控制器外接。对于相对湿度测试, 在膨润土试块中间挖取深槽 (深度和直径 20 mm), 然后带环刀整体置入底部封口的钢护筒 (内径 62 mm) 内, 将螺纹式封盖旋入钢护筒内, 在封盖内中心设置螺纹插孔, 将耐压卡套进口旋入土块探槽中, 然后将温湿度探头通过特制卡套尾端 (耐压 10 atm) 插入钢护筒内 (图 2 (d)), 探头尾线通过温控箱测试孔引出。

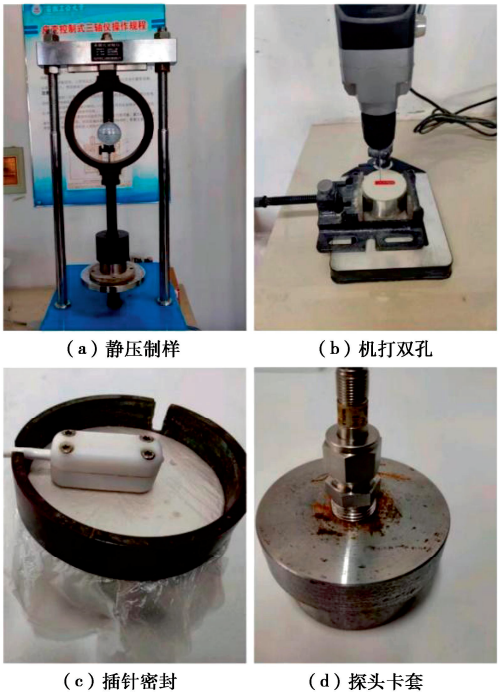


图 2 制样和测试前处理中的典型中间步骤

Fig. 2 Typical intermediate steps during sample preparation and pre-treatment tests

1.3 测试方法

导热测试采用 Meter 公司生产的 KD2-Pro 型热特



图 3 内置样品的恒温恒湿控制箱

Fig. 3 Constant temperature and humidity box within samples 性分析仪 (见图 1), 测试原理是基于瞬态线热源理论。测试过程中预先热平衡检测 30 s, 热平衡合格后加热探针工作 30 s, 然后冷却 60 s, 测试探针收集加热探针热脉冲下土体的温度响应, 并据此计算土样导热系数。该方法的优点主要是测试时间短, 有效避免了加热过长对土内水分分布的不良影响。土样测试前需保持热平衡, 通常需在恒温恒湿箱设置温度点静置 6 h<sup>[18]</sup>, 每个温度点重复测试 3 次, 两次测试间隔以 15 min 为宜, 取多次测量平均值作为该温度点下膨润土实测导热系数。此外, 整个测试过程中, 为避免探针插拔引起的热接触不良, 探针插入后不予拔出, 直至该样品所有温度点下导热测试全部完成为止。

相对湿度测试采用 Vaisala 公司生产的 HMP 110 型温湿度测试仪 (见图 4), 探测范围  $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ , 灵敏度  $\pm 1\%$ 。同样地, 测试前需在预定温度点恒温静置 6 h<sup>[18]</sup>, 并记录各温度下稳定的相对湿度值。



图 4 KD2-Pro 热特性分析仪与 HMP 110 相对湿度测试仪

Fig. 4 KD2-Pro thermal characterization analyzer and HMP 110 relative humidity tester

2 测试结果

2.1 含盐与无盐膨润土导热性能的温度效应比较



图 5 为 20% 含水率不同干密度含盐 (3 mol/L NaCl) 膨润土与无盐膨润土导热性能随温度的变化。无盐膨润土与含盐膨润土导热系数均随温度上升而增加, 特别是温度超过 60℃ 后增幅较大, 具有明显的温度效应。同时, 随着干密度增加, 60℃ 后含盐与无盐膨润土导热系数增幅不断减小, 表明干密度上升会抑制膨润土导热性能的温度效应。

图 5 中不同干密度下含盐与无盐膨润土导热性能初值不同, 直接比较导热系数难以准确量化其温度效应的差异。受文献[19, 20]启发, 以 5℃ 下导热系数为基准, 通过作差明确不同温度下膨润土导热系数增量, 该值越大则温度效应越明显。进一步比较含盐 (3 mol/L NaCl) 与无盐膨润土导热系数增量随温度的变化, 如图 6 所示。

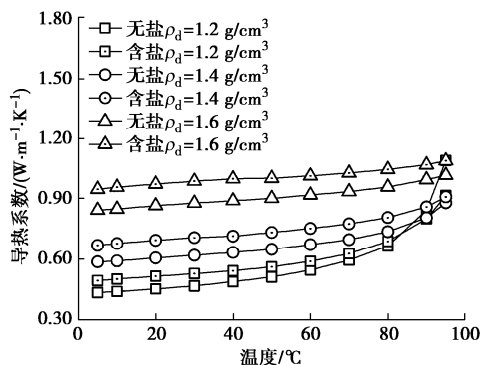


图 5 不同温度含盐与无盐膨润土导热性能 ( $w=20\%$ )

Fig. 5 Thermal conductivities of salted and pure bentonite at different temperatures ( $w=20\%$ )

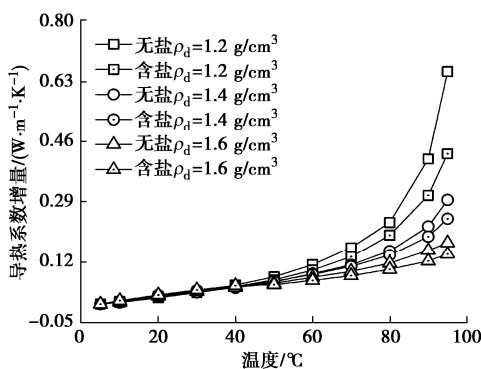


图 6 不同温度含盐与无盐膨润土导热系数增量 ( $w=20\%$ )

Fig. 6 Increase in thermal conductivity of salted and pure bentonite at different temperatures ( $w=20\%$ )

由图 6 可知, 60℃ 之前, 不同温度下含盐与无盐膨润土导热系数增量基本重合; 而 60℃ 后, 不同干密度下含盐与无盐膨润土导热系数增量有较大不同: 不论是否含盐, 低干密度膨润土导热系数增量均大于高干密度导热系数增量; 相同干密度下, 含盐膨润土导热系数增量均低于无盐膨润土导热系数增量, 即 60℃ 后盐分的存在也会抑制膨润土导热性能的温度效应。

图 7, 8 分别为 1.2 g/cm³ 不同含水率含盐 (3 mol/L NaCl) 与无盐膨润土导热性能及其增量随温度的变化。同样地, 含盐与无盐膨润土导热系数均随温度上升而增加, 特别是 60℃ 后增幅显著, 具有明显的温度效应。此外, 60℃ 后不同含水率下含盐与无盐膨润土导热系数增量随温度上升的增幅具有较大差异, 表现为含盐膨润土随温度上升的导热系数增量均小于相同含水率下的无盐膨润土导热系数增量值, 即盐分的存在使得膨润土导热性能的温度效应受到抑制。

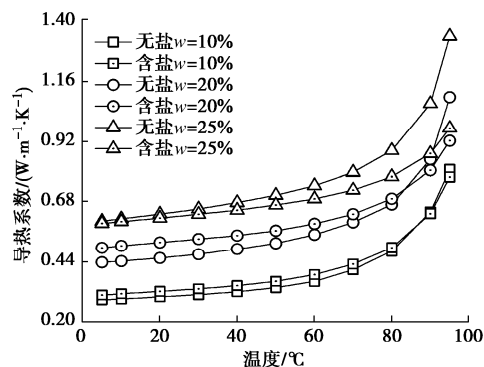


图 7 不同温度含盐与无盐膨润土导热性能 ( $\rho_d=1.2 \text{ g/cm}^3$ )

Fig. 7 Thermal conductivities of salted and pure bentonite at different temperatures ( $\rho_d=1.2 \text{ g/cm}^3$ )

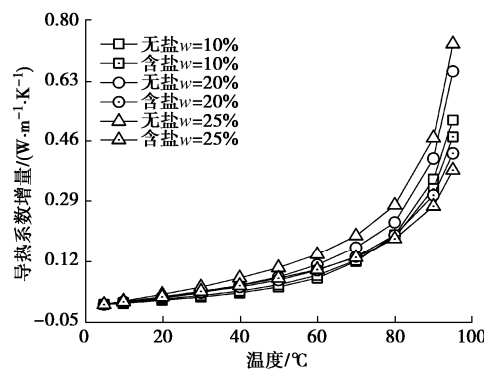


图 8 不同温度含盐与无盐膨润土导热系数增量 ( $\rho_d=1.2 \text{ g/cm}^3$ )

Fig. 8 Increase in thermal conductivity of salted and pure bentonite at different temperatures ( $\rho_d=1.2 \text{ g/cm}^3$ )

## 2.2 盐分特征对膨润土导热性能温度效应的影响

图 9, 10 分别为 25% 含水率, 1.2 g/cm³ 干密度、不同浓度 NaCl 下膨润土导热系数及其增量随温度的变化。不同浓度含盐膨润土导热系数均随温度上升而增大, 特别是 60℃ 后, 具有明显的温度效应。此外, 60℃ 后不同浓度含盐膨润土导热系数增量随温度上升的增幅差异很大, 溶液浓度越高, 含盐膨润土导热系数增量随温度上升的增幅越小, 即膨润土导热性能的温度效应受盐分抑制, 且浓度越高, 抑制程度越大。

图 11 和 12 为 3 mol/L 浓度、25% 含水率、1.2 g/cm³ 干密度但不同溶液类型膨润土导热系数及其增量随温度的变化。不同溶液类型含盐膨润土导热系数及其增



量均随温度上升而增大, 但 60℃后不同溶液类型含盐膨润土随温度上升的增幅不同, 含 KCl 膨润土导热系数及其增量随温度增幅最大, 含 CaCl<sub>2</sub> 膨润土导热系数及其增量增幅最小, 而含 NaCl 膨润土导热系数及其增量增幅居中, 但三者均低于无盐膨润土。

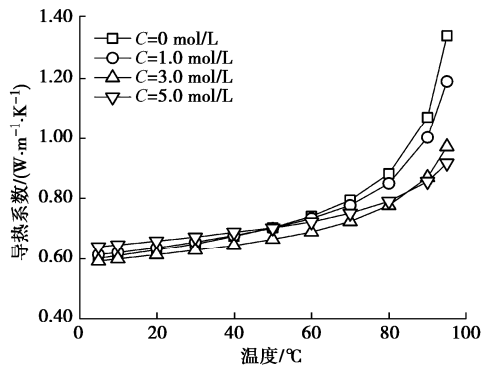


图 9 不同盐浓度膨润土导热系数与温度关系

Fig. 9 Thermal conductivity versus temperature for bentonite with different salt concentrations

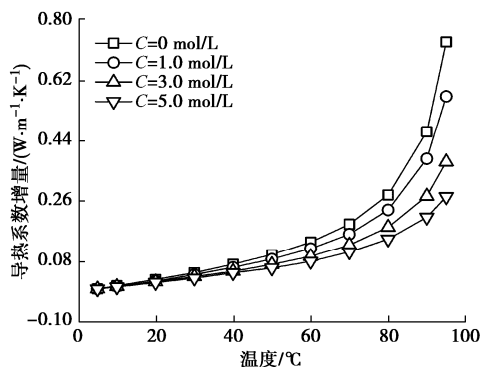


图 10 不同盐浓度膨润土导热系数增量与温度关系

Fig. 10 Increase in thermal conductivity versus temperature for bentonite with different salt concentrations

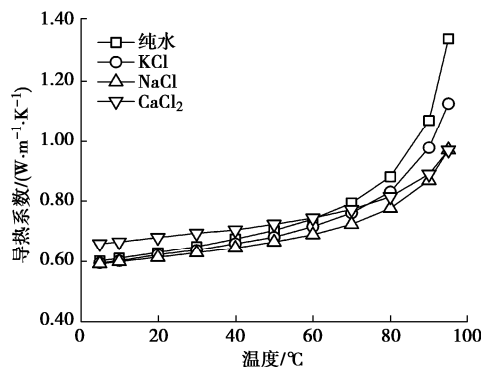


图 11 不同盐类型膨润土导热系数与温度关系

Fig. 11 Thermal conductivity versus temperature for bentonite with different salt types

2.3 不同温度下盐分特征对膨润土相对湿度的影响

图 13 为 25% 含水率、1.2 g/cm<sup>3</sup> 膨润土在不同浓度 NaCl 下相对湿度随温度的变化。不同浓度下膨润土相对湿度均随温度上升而小幅增大。同一温度下，

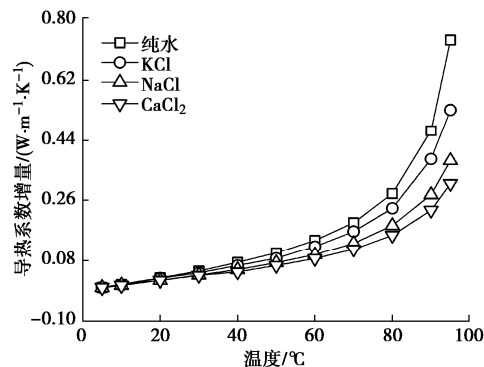


图 12 不同盐类型膨润土导热系数增量与温度关系

Fig. 12 Increase in thermal conductivity versus temperature for bentonite with different salt types

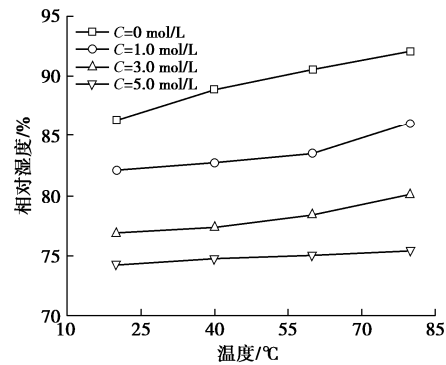


图 13 不同浓度含盐膨润土相对湿度与温度关系

Fig. 13 Relative humidity versus temperature for bentonite with different salt concentrations

相对湿度均随浓度上升而大幅下降。可见，温度会提高膨润土相对湿度，而盐分则反向降低其相对湿度。

图 14 为 3 mol/L 溶液浓度、25% 含水率、1.2 g/cm<sup>3</sup> 膨润土在不同盐类型下相对湿度随温度的变化。由图可知，不同溶液类型下膨润土相对湿度都随温度升高而增大。同时，相同温度下含 NaCl 膨润土相对湿度总是高于 CaCl<sub>2</sub>，且低于含 KCl 膨润土。

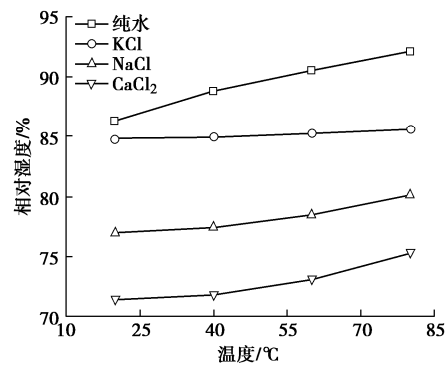


图 14 不同类型含盐膨润土相对湿度与温度关系

Fig. 14 Relative humidity versus temperature for bentonite with different salt types

3 机制分析

关于温度和盐分对膨润土导热性能的耦合影响机

制, 现有研究主要揭示了温度和盐分对土体导热性能的独立影响, 即温度通过增强水汽潜热传输促进土体导热性能<sup>[15]</sup>, 而盐分则通过降低孔隙水导热系数引起土体导热性能劣化<sup>[11]</sup>。尽管如此, 文献[12]测试了不同温度下多种浓度盐溶液导热系数, 发现不同温度下盐溶液导热系数随浓度的劣化程度基本一致, 据此分析则不同温度下含盐膨润土导热性能的劣化程度也应大致相同, 而实测表明不同温度下膨润土导热性能的盐致劣化程度并不一致。因此, 从孔隙水导热性能角度不能合理揭示温度和盐分对膨润土导热性能的影响机制, 两者对水汽潜热传输的耦合影响机制尚未阐明, 特别是盐分对水汽潜热传输的影响机制仍未明晰。

温度对水汽潜热传输的影响机制通常归结于加速了土内水汽迁移, 往往忽略了对水汽含量的影响。由图 13, 14 可知, 膨润土相对湿度随温度上升而增大, 意味着有更多水汽参与潜热传输, 从而进一步增强水汽潜热传输对整体导热性能的贡献。Tang 等<sup>[21]</sup>和 Sun 等<sup>[22]</sup>在研究压实膨润土的持水特性及其温度效应时, 也发现随着温度升高膨润土持水能力下降, 表现为基质吸力减小, 虽然基质吸力和相对湿度在变化趋势上不同, 但本质上是一样的。

关于盐分对土内水汽潜热传输的影响机制, 根据图 8, 10, 12, 以导热系数增量表征水汽潜热传输的贡献, 发现 60℃ 以上温区含盐膨润土内水汽潜热传输受到很大抑制。如前所述, 水汽是潜热传输的中介载体, 其含量直接决定了潜热传输的通量大小和贡献。相对湿度直接反映了土内水汽含量的多少, 根据图 13, 14 结果, 膨润土相对湿度随盐分浓度上升而大幅下降, 且同浓度下含  $\text{CaCl}_2$  膨润土相对湿度降幅最大, 降幅次之的是含  $\text{NaCl}$  膨润土, 含  $\text{KCl}$  膨润土降幅最小。因此, 盐分特征 (浓度和类型) 对水汽潜热传输的影响机制可归结于对相对湿度的削弱, 导致参与潜热传输的水汽含量不足, 抑制了水汽潜热传输的贡献。

针对盐分对膨润土水汽潜热传输的影响机制, 核心是相对湿度与水汽潜热传输贡献之间的对应关系, 其尚未阐明。以导热系数增量表征水汽潜热传输贡献, 基于盐分特征与相对湿度以及导热系数增量之间的对应关系, 以盐分特征为桥梁, 换算相对湿度与导热系数增量之间的对应关系。如图 15 所示。

由图 15 可知, 导热系数增量随相对湿度下降总体上呈下降趋势, 但不同温度下导热系数增量的降幅差异很大: 在 60℃ 以下温区, 导热系数增量的降幅很小, 而 80℃ 时降幅很大, 且两者间具有显著的线性关系。根据不同温区内导热系数增量随相对湿度的差异响应, 反映了不同温度下相对湿度对土内水汽潜热传输的影响机制: 在 60℃ 以上温区相对湿度变化对水汽潜

热传输产生较大影响, 而 60℃ 以下温区相对湿度变化的影响可忽略不计。

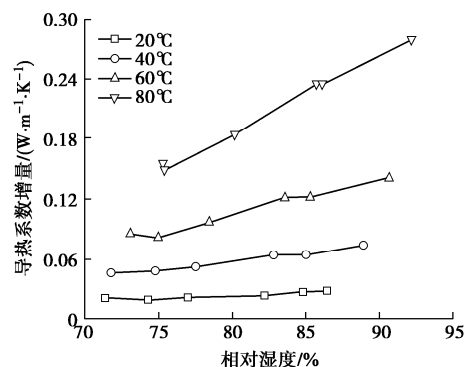


图 15 不同温度含盐膨润土导热系数增量与相对湿度关系

Fig. 15 Increase in thermal conductivity versus relative humidity for salted bentonite at different temperatures

根据温度对土内水汽潜热传输以及盐分对水汽潜热传输的独立影响, 进一步探讨温度与盐分对膨润土导热性能的耦合作用机制。温度上升不仅强化了膨润土内水汽迁移速率, 而且通过增加相对湿度使得更多水汽参与潜热传输, 从而增强整体导热性能; 然而, 盐分的存在则会减小土内相对湿度, 导致参与潜热传输的水汽不足, 进而抑制了水汽潜热传输的贡献, 导致整体导热性能下降, 特别是 60℃ 以上温区尤为明显。温度和盐分通过水汽潜热传输对膨润土导热性能的耦合机制如图 16 所示。

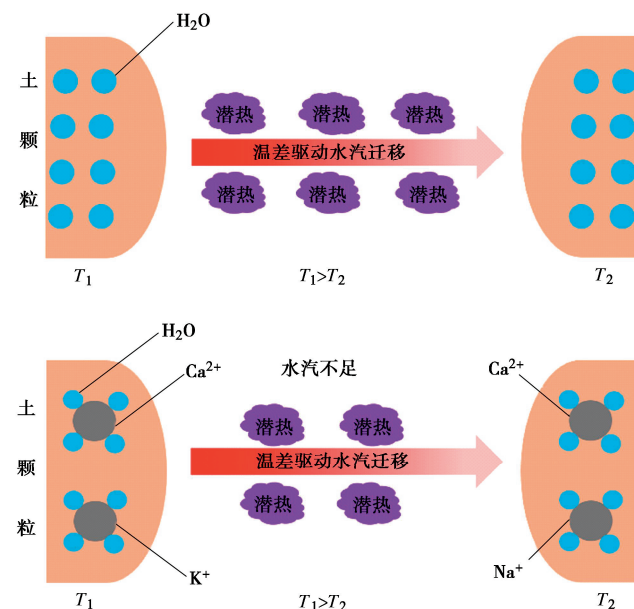


图 16 考虑水汽潜热传输盐致劣化的膨润土导热性能温度效应演化机制示意图

Fig. 16 Schematic of evolution mechanism of temperature effects of thermal conductivity of bentonite considering salt induced degradation in latent heat transfer of vapor

可见, 温度会促进膨润土内水汽潜热传输, 而盐

分会抑制土内水汽潜热传输, 进而引起整体导热性能响应的正负效应。针对含盐膨润土导热性能的温度效应演化机理, 温度通过水汽潜热传输对膨润土导热性能的正向增强效应处于主导地位, 而盐分对水汽潜热传输的负向效应则部分抵消了温度通过增强水汽潜热传输对整体导热性能的正向贡献, 这也是温度和盐分对膨润土导热性能的耦合作用机制。

除揭示温度和盐分对膨润土导热性能的耦合作用机制之外, 本文还开展了一系列膨润土导热试验, 积累了不同温度、盐分特征、含水率和干密度下 2700 多次有效实测膨润土导热数据。基于该大型膨润土导热数据库, 通过最新的机器学习算法可训练出适用于上述复杂耦合特征的膨润土导热预测模型, 这对于实际处置库的安全运行也具有重要意义。

## 4 结 论

含盐膨润土导热性能的温度效应对于处置库内温度场演化和散热设计至关重要, 本文对不同温度下含盐膨润土导热性能开展了系统测试, 并分析了不同温度下含盐膨润土的相对湿度特征, 主要得到以下 2 点结论。

(1) 含盐膨润土导热性能具有明显的温度效应, 但其温度效应普遍低于无盐膨润土。同时, 盐分浓度越大, 膨润土导热性能的温度效应受到的抑制越强, 且同浓度下对温度效应的抑制程度又与盐分类型密切相关。

(2) 分析了膨润土温度、盐分特征与相对湿度以及水汽潜热传输之间的关系, 特别是通过梳理不同温度下相对湿度对水汽潜热传输的影响, 从水汽潜热传输角度揭示了温度与盐分对膨润土导热性能的耦合影响机制。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 周殷康: 系统测试、初稿写作与返修; 阎长虹: 提出问题与确定方案, 研究监督并给予设备支持; 郑军: 方案讨论与审阅修改; 谢胜华: 试验设计、数据处理与审阅修改; 项国圣: 材料支持、数据处理与审阅修改; 刘全威: 试验设计与数据处理。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。Yin-kang Zhou: Performed system testing, drafted the manuscript, and revised the text; Chang-hong Yan: Proposed the research concept, designed the methodology, supervised the study, and provided technical/equipment support; Jun Zheng: Participated in conceptual discussions and critically reviewed/edited the manuscript; Sheng-hua Xie: Designed experiments, analyzed data, and revised the manuscript;

Guo-sheng Xiang: Contributed materials, processed data, and reviewed/edited the manuscript; Quan-wei Liu: Designed experiments and performed data analysis. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

## 参考文献:

- [1] 王 驹. 中国高放废物地质处置 21 世纪进展[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(10): 2072-2082. (WANG Ju. Progress of geological disposal of high-level radioactive waste in China in the 21st century[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(10): 2072-2082. (in Chinese))
- [2] 周祥运, 孙德安, 林宇亮. 基于散热的高放废物处置库废物罐间距研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 2069-2077. (ZHOU Xiangyun, SUN Dean, LIN Yuliang. Canister spacing in a high level radioactive nuclear waste repository based on heat conduction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 2069-2077. (in Chinese))
- [3] 刘月妙, 蔡美峰, 王 驹. 内蒙古高庙子钠基膨润土导热性能研究[C]// 第二届全国岩土与工程学术大会. 武汉, 2006. (LIU Yuemiao, CAI Meifeng, WANG Ju. On the thermal conductivity of GMZ bentonite[C]// Proceedings of the Second Rock and Engineering Conference. Wuhan, 2006. (in Chinese))
- [4] 叶为民, 王 琼, 潘 虹, 等. 高压实高庙子膨润土的热传导性能[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 821-826. (YE Weimin, WANG Qiong, PAN Hong, et al. Thermal conductivity of compacted GMZ01 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 821-826. (in Chinese))
- [5] TANG A M, CUI Y J, LE T T. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites[J]. Applied Clay Science, 2008, **41**(3/4): 181-189.
- [6] 谢敬礼, 马利科, 高玉峰, 等. 北山花岗岩岩屑-膨润土混合材料导热性能研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(8): 2823-2828, 2843. (XIE Jingli, MA Like, GAO Yufeng, et al. Thermal conductivity of mixtures of Beishan bentonite and crushed granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(8): 2823-2828, 2843. (in Chinese))
- [7] JOBMANN M, BUNTEBARTH G. Influence of graphite and quartz addition on the thermo-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste[J]. Applied Clay Science, 2009, **44**(3/4): 206-210.
- [8] VILLAR M V, IGLESIAS R J, GUTIÉRREZ-ÁLVAREZ C, et al. Hydraulic and mechanical properties of compacted bentonite after 18 years in barrier conditions[J]. Applied Clay



- Science, 2018, **160**: 49-57.
- [9] KIM M, KIM G Y, KIM J S, et al. Evaluation of changes in buffer properties from an in situ engineered barrier experiment[J]. Applied Clay Science, 2023, **244**: 107092.
- [10] 徐云山, 孙德安, 曾召田, 等. 膨润土热传导性能的温度效应[J]. 岩土力学, 2020, **41**(1): 39-45, 56. (XU Yunshan, SUN De'an, ZENG Zhaotian, et al. Temperature effect on thermal conductivity of bentonites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(1): 39-45, 56. (in Chinese))
- [11] SIDDIQUA S, TABIATNEJAD B, SIEMENS G. Impact of pore fluid chemistry on the thermal conductivity of bentonite-sand mixture[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **77**(1): 8.
- [12] 李怀科, 刘卫丽. 温度对盐水导热系数影响的实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2017, **34**(5): 54-57. (LI Huaik, LIU Weili. Study on effects of temperature on coefficient of heat conductivity of saltwater[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, **34**(5): 54-57. (in Chinese))
- [13] 刘晨晖, 周 东, 吴 恒. 土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1877-1886. (LIU Chenhui, ZHOU Dong, WU Heng. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1877-1886. (in Chinese))
- [14] 曾召田, 梁 珍, 邵捷昇, 等. 碱-热环境下 MX80 膨润土导热性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(增刊 2): 155-162. (ZENG Zhaotian, LIANG Zhen, SHAO Jiesheng, et al. Experimental study on thermal conductivity of MX80 bentonite in alkali-thermal environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(S2): 155-162. (in Chinese))
- [15] 徐云山, 肖子龙, 孙德安, 等. 土体导热系数温度效应及其预测模型[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(6): 1180-1189. (XU Yunshan, XIAO Zilong, SUN De'an, et al. Temperature effects and prediction model of thermal conductivity of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(6): 1180-1189. (in Chinese))
- [16] 文 伟, 赖远明, 尤哲敏, 等. 基于 Pitzer 离子模型的盐渍非饱和土孔隙相对湿度计算[J]. 岩土力学, 2020, **41**(6): 1944-1952. (WEN Wei, LAI Yuanming, YOU Zhemin, et al. Analysis of pore relative humidity of salinized unsaturated soil based on Pitzer model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(6): 1944-1952. (in Chinese))
- [17] XIANG G S, XU Y F, YU F, et al. Prediction of swelling characteristics of compacted GMZ bentonite in salt solution incorporating ion-exchange reactions[J]. Clays and Clay Minerals, 2019, **67**(2): 163-172.
- [18] YOON S, LEE G J, PARK T J, et al. Thermal conductivity evaluation for bentonite buffer materials under elevated temperature conditions[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, **30**: 101792.
- [19] HIRAIWA Y, KASUBUCHI T. Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5–75°C)[J]. European Journal of Soil Science, 2000, **51**(2): 211-218.
- [20] 徐云山, 曾召田, 孙德安, 等. 高温下含湿土壤水汽潜热效应的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, **37**(4): 593-597. (XU Yunshan, ZENG Zhaotian, SUN De'an, et al. Experimental study on latent heat effect of moist soil at high temperature[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, **37**(4): 593-597. (in Chinese))
- [21] TANG A M, CUI Y-J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(1): 287-296.
- [22] SUN H Q, MAŠÍN D, NAJSER J, et al. Water retention of a bentonite for deep geological radioactive waste repositories: High-temperature experiments and thermodynamic modeling[J]. Engineering Geology, 2020, **269**: 105549.