

DOI: 10.11779/CJGE20240803

# 温控盐溶液入渗的 GMZ 膨润土膨胀变形研究

叶为民<sup>1,2</sup>, 邵长跃<sup>1</sup>, 王 琼<sup>1,2</sup>, 陈永贵<sup>1,2</sup>, 陈 亮<sup>3</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘 要:** 开展考虑温度影响的盐溶液入渗膨润土膨胀变形特性研究, 对于高放废物深地质处置库的设计与安全运营具有重要意义。以高庙子膨润土为研究对象, 开展了不同温度条件下 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 溶液饱和的一维膨胀变形试验, 分析了温度和盐溶液浓度对膨胀变形的影响; 结合压汞试验和扫描电镜试验, 揭示了温度和盐溶液对膨胀变形影响的微观机理。结果表明: 温度和盐溶液浓度升高, 达到最大膨胀应变时间缩短, 最大膨胀应变减小。盐溶液浓度升高, 扩散双电层厚度减小, 渗透吸力和有效应力增大; 同时, 温度升高, 集合体间孔隙收缩和晶格收缩, 抑制扩散双层膨胀, 导致集合体间孔隙的孔径密度降低, 集合体间孔隙在水化过程中被填充堵塞, 试样膨胀性能减小。在此基础上, 建立了考虑温度影响的盐溶液入渗膨胀变形时程曲线模型。

**关键词:** 高庙子膨润土; 膨胀变形; 盐溶液; 温度; 微观结构; 模型

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)11-2237-09

**作者简介:** 叶为民(1963—), 男, 安徽枞阳人, 博士, 教授, 主要从事环境地质、非饱和土工程地质研究与教学工作。

E-mail: ye\_tju@tongji.edu.cn。

## Study on swelling deformation of GMZ bentonite infiltrated with salt solutions considering temperature effects

YE Weimin<sup>1,2</sup>, SHAO Changyue<sup>1</sup>, WANG Qiong<sup>1,2</sup>, CHEN Yonggui<sup>1,2</sup>, CHEN Liang<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Beijing Research Institute of Uranium

Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Investigation on swelling deformation of bentonite infiltrated with salt solutions considering temperature effects is of great significance for design and safely operation of deep geological repositories for disposal of high-level radioactive wastes. In this study, one dimensional deformation tests are performed on GMZ bentonite specimens with infiltration of NaCl and CaCl<sub>2</sub> solutions at different temperatures. Coupled temperature and salt solution effects on the swelling deformation properties are investigated. Meanwhile, MIP tests and SEM tests are performed to find out the micro-mechanism of the effects of temperature and salt solution on swelling deformation. Results indicate that the time to reach the maximum swelling strain is reduced and the maximum swelling strain decreases with increasing temperature and concentrations. In high concentration of salt solutions, the thickness of the diffuse double layers decreases, the osmotic suction and effective stress increase; meanwhile, the increase of temperature causes the shrinkage of inter-aggregate pores and the lattice contraction, and also inhibits the expansion of the diffuse double layers. As a result, the pore density of inter-aggregate pores decreases, the inter-aggregate pores are filled and blocked during the hydration process, and the swelling capacity of bentonite decreases. Finally, a model for the time-evolution curve of swelling deformation considering temperature and concentration of salt solution is proposed.

**Key words:** GMZ bentonite; swelling deformation; salt solution; temperature; micro-structure; model

## 0 引 言

膨润土因具有低渗透性、高膨胀性和强吸附性等

特点, 被认为是高放废物深地质处置库工程屏障的首选缓冲材料<sup>[1]</sup>。根据处置库建设与运营要求, 压实膨润土应具有足够高的膨胀能力, 可以有效密封废物罐

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42030714) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42030714).

收稿日期(Received): 2024-08-08

修回日期(Revised): 2025-01-07

接受日期(Accepted): 2025-01-08

网络出版日期(Online): 2025-01-09

与膨润土砌块之间、砌块与砌块之间,以及砌块与围岩之间的施工接缝<sup>[2]</sup>,形成与发挥工程屏障功能。然而,这一屏障性能的形成与发挥过程,将不可避免地遭受到库内核废物衰变热、入渗地下水所含的盐分等共同作用<sup>[3-4]</sup>。开展考虑温度影响的盐溶液入渗膨润土膨胀性能研究,对于处置库的设计与长期性能评价,具有重要的理论与工程实践意义。

膨润土中的蒙脱石吸水会发生晶层膨胀和渗透膨胀<sup>[5]</sup>,前者由层间阳离子的水化作用引起,后者由蒙脱石层间和入渗溶液之间的离子浓度差异引起<sup>[6]</sup>。研究表明,干密度越大,压实膨润土的膨胀变形量越大;但上覆荷载越大,膨胀量则减小<sup>[7]</sup>。此外,盐溶液能显著降低压实膨润土的膨胀能力<sup>[8]</sup>。随着入渗的 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 溶液浓度增大,膨润土的最大膨胀变形量减小<sup>[9]</sup>。KCl 溶液饱和入渗试验表明,高庙子膨润土在达到最大膨胀变形后会出现体积塌缩现象<sup>[10]</sup>。这是由于 K<sup>+</sup>可进入蒙脱石硅氧四面体空腔产生 K<sup>+</sup>联结效应,大幅降低膨胀性能<sup>[4]</sup>。同时,处置库模拟地下水环境下,压实膨润土的膨胀能力降低<sup>[11]</sup>。

针对温度影响的膨胀特性研究表明,温度升高会削弱压实膨润土的膨胀性能<sup>[12-13]</sup>;但部分试验却给出了相反的结果<sup>[14-15]</sup>。进一步分析发现,温度对膨胀特性的影响可能与应力水平有关。低应力水平时,膨胀变形随温度升高而增大,而高应力水平时,趋势则相反<sup>[16]</sup>。基于温控高压实高庙子膨润土最大膨胀应变研究, Ye 等<sup>[17]</sup>发现随着温度升高,最大膨胀应变降低,原因是晶层膨胀是高压实膨润土的主要膨胀形式,温度升高导致晶层间脱水,使得蒙脱石吸水能力降低。

需要指出的是,目前的研究均是单一温度或盐溶液作用的压实膨润土膨胀变形特征,而温度和盐溶液共同作用下的膨胀性能研究鲜有报道。本文开展了温度影响下不同类型和浓度盐溶液入渗的压实高庙子膨润土的一维膨胀变形试验,分析了温度和盐溶液影响的压实膨润土的膨胀变形特性,结合压汞和扫描电镜试验,揭示了微观变形机理。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

高庙子(GMZ)膨润土产自内蒙古自治区兴和县高庙子乡,已被选为中国高放废物深地质处置库的缓冲/回填材料。本文试验所用 GMZ 钠基膨润土的基本参数<sup>[18]</sup>:  $G_s=2.66$ , 液限=276%, 塑限=37%, 主要矿物为蒙脱石(70.0%), 石英(23.1%)、长石(4.4%)和片沸石(2.6%)等。

### 1.2 试验装置

本文采用的一维膨胀变形试验装置,如图 1 所示。

主要包括温控样室、千分表、加载架、蠕动泵和温度控制系统等。温控样室包括底座,容纳直径 50 mm、高 10 mm 试样的圆柱形中空样筒,两块透水石,活塞和顶盖等。样筒内、外壁之间的环形腔室用于存储控温热水,结合样筒外侧的加热带,可实现精度为 0.1℃ 的温度控制。温度传感器用于量测水浴温度,试验开始前,需要进行温度校准与标定。精度为 0.001 mm 的千分表记录水化过程中试样的垂直变形。

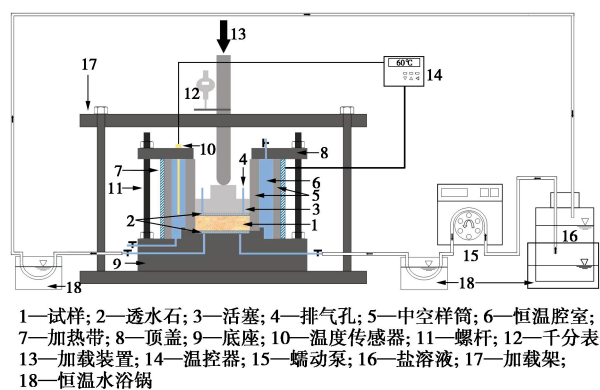


图 1 一维膨胀变形试验装置

Fig. 1 One-dimensional swelling deformation experimental device

### 1.3 试样制备

首先,将膨润土粉末放置在含有饱和 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液(吸力为 113 MPa)的密闭容器中进行吸力平衡,并采用烘干法测得吸力平衡后粉末的初始含水率(8.79%)。然后,按照直径 50 mm、高 10 mm 和干密度 1.70 g/cm<sup>3</sup> 的目标值,称取相应质量的膨润土粉末,倒入样室;再采用 DDL-200 型电子万能试验机,以 0.5 mm/min 的恒定加载速率,将粉末静压成均匀的圆饼状试样。待压实至目标尺寸后,维持最大压力(约 43 kN) 60 min,以减少卸载后试样的回弹变形,增加试样的均匀性。

现场勘查表明,中国首座处置库场址——甘肃省北山地区区内地下水阳离子主要为 Na<sup>+</sup>和 Ca<sup>2+</sup><sup>[19]</sup>,因此本文试验采用 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 溶液。

### 1.4 试验步骤

先在试验装置底座上放置透水石和滤纸,并将样室连同其中的压实试样放置于透水石之上;再在试样顶端放置滤纸、透水石和活塞,采用螺杆将样室固定后安装在加载架上(图 1);施加 0.05 MPa 的恒定垂向应力,记录垂向变形并待变形稳定后,利用温度控制系统将试验温度调节至设计值,记录试样变形并待变形稳定后,使用蠕动泵以 3.50 mL/min 的速度,通过底座注入去离子水(DW)或盐溶液(NaCl 和 CaCl<sub>2</sub>)以饱和试样,同时采用千分表记录试样的垂向变形。当 24 h 内的垂向变形量小于试样初始高度的 0.01 % 时,认为当前条件下的水化膨胀试验结束。

试验结束后, 立即拆解试验装置并将试样从样筒中推出, 切成小块并迅速放入液氮中冷冻干燥, 抽真空后开展压汞试验和扫描电镜试验, 测定微观孔隙结构。

根据表 1 中的试验方案, 重复上述步骤, 直至所有浓度和温度条件下的膨胀变形与微观结构试验结束。至此, 本文研究的所有试验结束。

表 1 试验方案

Table 1 Test program

溶液	浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	温度/°C
去离子水	0	20 <sup>M, S</sup> , 40, 60, 80 <sup>M, S</sup>
NaCl	0.1	20, 40, 60, 80
	0.5	20 <sup>M</sup> , 40, 60, 80 <sup>M</sup>
	1.0	20 <sup>M, S</sup> , 40, 60, 80 <sup>M</sup>
CaCl <sub>2</sub>	0.1	20, 40, 60, 80
	0.5	20, 40, 60, 80
	1.0	20, 40, 60, 80

注: M 为压汞试验; S 为扫描电镜试验。

2 试验结果

为定量表征试样的膨胀性能, 这里定义膨胀应变为试样垂向变形量与试样初始高度之比:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为试样的膨胀应变 (%);  $\Delta H$  为垂向变形量 (mm);  $H_0$  为初始高度 (mm)。

2.1 膨胀变形时程演化

实测不同温度条件下, NaCl 溶液入渗的压实膨润土膨胀变形时程曲线, 如图 2 所示。沿时间对数轴, 根据膨胀变形时程曲线的切线交点 A 和 B, 可以将水化膨胀划分为初始膨胀, 主膨胀和次膨胀 3 个阶段<sup>[11, 15]</sup> (图 2 (a))。

根据图 2 (b) 结果可以看出, 主膨胀阶段发展相对较快, 主要与基质吸力耗散速率有关<sup>[20]</sup>; 而次膨胀阶段发展十分缓慢, 主要受盐分运移和吸附-解吸附反应控制<sup>[20-21]</sup>。同时, 去离子水水化时, 温度从 20 增加到 80 °C, 主膨胀阶段持续时间从 14292 min 减小到 2210 min; 20 °C 条件下, NaCl 溶液浓度从 0 增加至 1.0 mol/L, 主膨胀阶段持续时间从 14292 min 减小到 1506 min。这表明, 随着温度和盐溶液浓度的增大, 主膨胀阶段的膨胀进程加速, 使膨胀变形更快达到稳定。这可能是由于温度升高降低了水的运动黏度, 提高了水分子迁移速率, 促进了水与膨润土中黏土颗粒间的相互作用<sup>[4]</sup>; 另一方面, 双电层厚度随盐溶液浓度的增加而减小, 导致有效孔隙通道显著扩大<sup>[22]</sup>, 膨润土的渗透性明显提高<sup>[5]</sup>, 主膨胀进程加快。

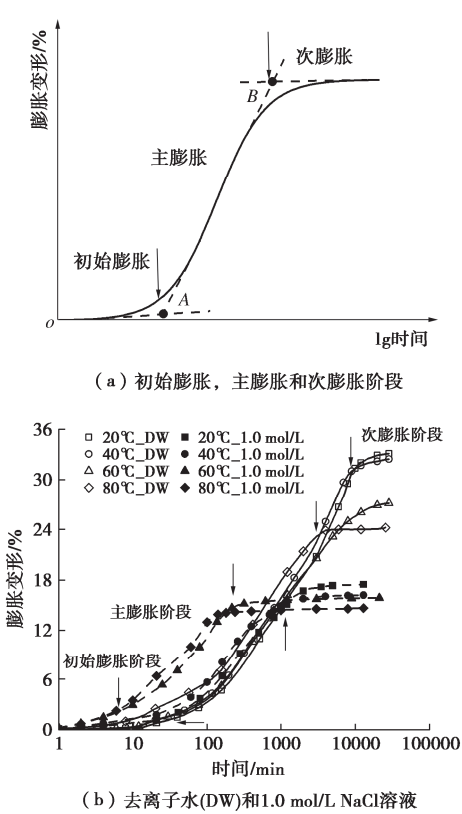


图 2 不同温度和盐溶液浓度的膨胀应变随时间演化曲线

Fig. 2 Evolutions of swelling strain with time for specimens hydrated with salt solutions at temperatures

Chen 等<sup>[23]</sup>利用主膨胀系数和次膨胀系数表征膨胀变形速率, 以更精确地描述压实膨润土的膨胀过程。

$$C_{ps} = \frac{\Delta H_p / H_0}{\Delta \lg t_p} \quad (2)$$

$$C_{ss} = \frac{\Delta H_s / H_0}{\Delta \lg t_s} \quad (3)$$

式中:  $C_{ps}$  和  $C_{ss}$  分别为主膨胀系数和次膨胀系数;  $\Delta H_p$ ,  $\Delta H_s$  分别为主膨胀阶段和次膨胀阶段的膨胀变形量 (mm);  $H_0$  为试样初始高度 (mm)。其中

$$\Delta \lg t_p = \Delta \lg t_{p1} - \Delta \lg t_{p2} \quad (4)$$

$$\Delta \lg t_s = \Delta \lg t_{s1} - \Delta \lg t_{s2} \quad (5)$$

式中:  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$  分别为主膨胀阶段的开始和结束时间 (min);  $t_{s1}$ ,  $t_{s2}$  分别为次膨胀阶段的开始和结束时间 (min)。

根据式 (2), (3), 计算得到的温度和盐浓度对  $C_{ps}$  和  $C_{ss}$  的影响, 如图 3, 4 所示。图 3 结果表明, 在一定盐浓度条件下, 主膨胀系数  $C_{ps}$  随温度的升高而降低; 同时, 在一定温度条件下, 主膨胀系数  $C_{ps}$  随盐浓度的升高而减小, 这点似乎与前述结论“高温和高盐溶液浓度可加速主膨胀过程”相悖。实际上, 温度和盐浓度一方面抑制主膨胀变形的发展 ( $\Delta H_p/H_0$  变小), 另一方面又加速了主膨胀进程 ( $\Delta \lg t_p$  变小),



最终导致随温度和盐浓度的升高，主膨胀系数  $C_{ps}$  降低。因此，高温和高盐溶液浓度均可抑制压实膨润土的主膨胀过程。图 4 结果表明，温度和盐溶液浓度增大，次膨胀系数  $C_{ss}$  降低；但与主膨胀系数（0.07~0.14）相比，次膨胀系数（0.008~0.04）较小，说明次膨胀变形在总膨胀变形中所占比例很小，大部分膨胀均在主膨胀阶段完成。总体来讲，较高的温度和盐溶液浓度，均抑制了压实膨润土的膨胀变形。

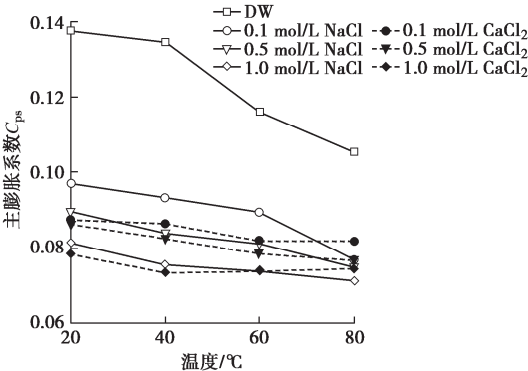


图 3 主膨胀系数随温度和盐溶液浓度变化关系

Fig. 3 Evolutions of primary swelling coefficient with temperature and salt solution concentrations

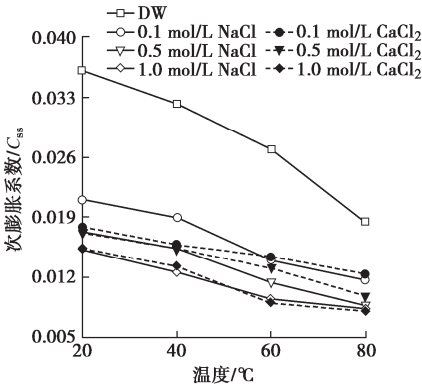


图 4 次膨胀系数随温度和盐溶液浓度变化关系

Fig. 4 Evolutions of secondary swelling coefficient with temperature and salt solution concentrations

2.2 最终膨胀变形

不同温度情况下，最大膨胀应变随盐浓度变化情况，如图 5 所示。结果表明，给定温度时，随着盐浓度的增加，试样的最大膨胀应变先快速降低，然后再缓慢下降；盐溶液浓度对最大膨胀应变的影响与温度有关，20℃ 条件下，NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 溶液浓度从 0 增大到 1.0 mol/L，最大膨胀应变分别降低了 47.1%和 49.1%；而在 80℃ 情况下，最大膨胀应变分别降低了 39.5%，37.1%，说明温度升高抑制了盐溶液对压实膨润土膨胀性能的弱化作用。

图 5 结果还表明，在 20~60℃ 时，相比于 NaCl 溶液饱和试样，CaCl<sub>2</sub> 溶液饱和试样的最大膨胀应变

更小。这是由于，高庙子膨润土为钠基膨润土，当 CaCl<sub>2</sub> 溶液与钠基膨润土接触时，溶液中的 Ca<sup>2+</sup>将取代钠基膨润土中的 Na<sup>+</sup>，部分钠基膨润土将转化为钙基膨润土。研究表明，自由膨胀条件下，当 Na<sup>+</sup>在膨润土颗粒表面水合时，蒙脱石晶层之间可以吸收 3~4 层水分子，而存在 Ca<sup>2+</sup>时，晶层间只能吸收 2~3 层水分子<sup>[24-25]</sup>。因此，钠基膨润土的晶层膨胀所产生的体积增量，常大于钙基膨润土。在双电层膨胀阶段，双电层厚度随阳离子价态的增加而减小，故钠基膨润土双电层的厚度大于钙基膨润土。因此，与 NaCl 溶液饱和试样相比，CaCl<sub>2</sub> 溶液饱和试样具有更小的膨胀能力。然而，在 80℃ 试验条件下呈现相反的趋势。这可能是由于 Ca<sup>2+</sup>对水分子的吸附能力比 Na<sup>+</sup>更强<sup>[26]</sup>。因此，相比于 Ca<sup>2+</sup>，高温下 Na<sup>+</sup>更易失去水分子，其晶格收缩作用使最大膨胀应变降低的更加显著。

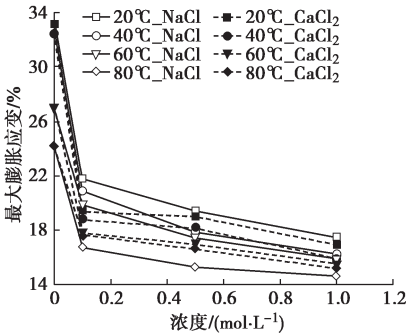


图 5 最大膨胀应变随盐溶液浓度变化关系

Fig. 5 Evolutions of maximum swelling strain with concentration of salt solutions

不同浓度盐溶液入渗下，最大膨胀应变随温度变化，如图 6 所示。

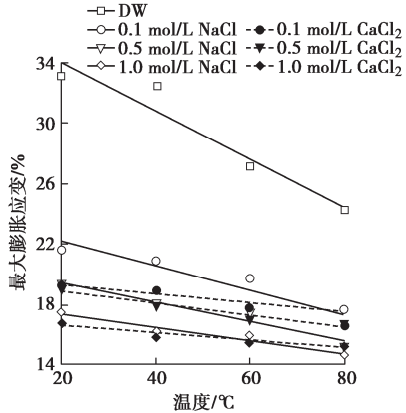


图 6 最大膨胀应变随温度变化关系

Fig. 6 Evolutions of maximum swelling strain with temperature

由图 6 可知，不同溶液浓度入渗时，最大膨胀应变随温度的增大而线性减小，如表 2 所示。由表可知，随着溶液浓度增加， $\epsilon_{max}-T$  的斜率逐渐减小。这表明，



温度对最大膨胀应变影响与溶液浓度有关, NaCl 溶液入渗时, 低浓度情况下, 加热引起膨胀应变显著降低; 而高浓度时, 随着温度升高, 最大膨胀应变的降低幅度较小; CaCl<sub>2</sub> 溶液入渗时, 呈现类似现象。但相较于 CaCl<sub>2</sub> 溶液, NaCl 溶液水化时, 试样  $\varepsilon_{\max}$ - $T$  的斜率更大, 表明 NaCl 溶液入渗时, 最大膨胀应变随温度升高而降低的速度更快。

表 2 最大膨胀应变随温度变化关系			
Table 2 Evolutions of maximum swelling strain with temperature			
溶液	浓度/ (mol·L <sup>-1</sup> )	公式	R <sup>2</sup>
去离子水	0	$\varepsilon_{\max} = -1.60 \times 10^{-1} T + 37.21$	0.93
	0.1	$\varepsilon_{\max} = -8.03 \times 10^{-2} T + 23.77$	0.91
NaCl	0.5	$\varepsilon_{\max} = -6.27 \times 10^{-2} T + 20.63$	0.94
	1.0	$\varepsilon_{\max} = -4.41 \times 10^{-2} T + 18.28$	0.96
CaCl <sub>2</sub>	0.1	$\varepsilon_{\max} = -2.93 \times 10^{-2} T + 19.89$	0.90
	0.5	$\varepsilon_{\max} = -4.05 \times 10^{-2} T + 19.74$	0.96
	1.0	$\varepsilon_{\max} = -2.58 \times 10^{-2} T + 17.18$	0.91

3 分析与讨论

3.1 盐溶液对孔隙结构的影响

给定温度条件下, 不同浓度盐溶液水化试样与初始压实试样的孔径分布曲线, 如图 7 所示。可以看出, 孔径分布曲线均为双峰形态, 峰值孔径分别为 1~2 μm 和 20~30 nm。

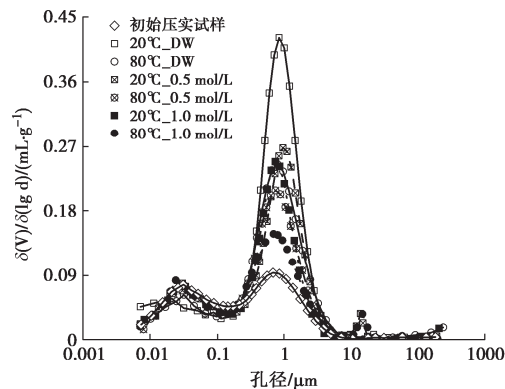


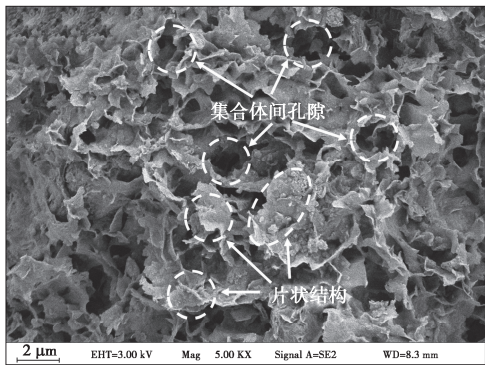
图 7 不同温度和盐溶液浓度的孔径分布曲线 (NaCl 溶液)

Fig. 7 Pore size distribution curves for compacted specimens hydrated with different salt solution concentrations under varying temperatures (NaCl solution)

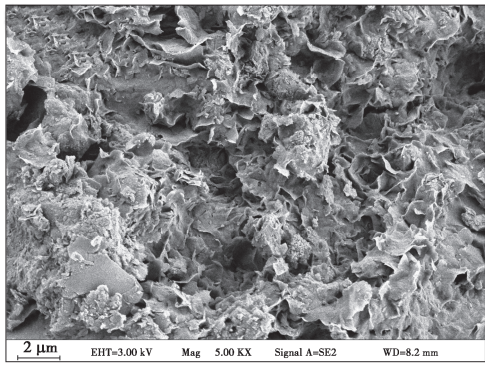
通常情况下, 针对双峰结构的 MIP 孔径分布曲线, 以两峰之间的谷值孔径 (约为 150 nm) 为界, 将孔径大于 150 nm 的孔隙定义为集合体间孔隙, 小于 150 nm 的称为集合体内孔隙<sup>[11, 27]</sup>。由图 7 可知, 集合体间孔隙的孔径主要集中在 0.15~10 μm。给定温度情况下, 盐溶液浓度增大, 集合体间孔隙的峰值孔径密度降低。但不同盐溶液浓度情况下, 集合体内孔隙的孔径分布曲线之间无明显差异, 说明溶液浓度对集合体内孔隙影响不大。

20℃ 条件下, 经 NaCl 溶液水化后试样的扫描电镜图片如图 8 所示。由图 8 (a) 可以看出, 20 ℃ 条件下, 去离子水水化后, 集合体之间无明显接触边界, 黏连成片, 整体结构趋于均一化<sup>[28]</sup>。同时, 集合体间存在大量孔隙, 孔径 0.15~10 μm, 优势孔径约为 1 μm (图 7); 集合体表面存在羽翼状胶体, 孔隙周围存在大量的片状结构, 轮廓清晰, 表面光滑<sup>[29]</sup>。

NaCl 溶液水化时, 随着浓度增大, 集合体表面更加粗糙, 集合体间孔隙被大量填充堵塞, 孔隙数量骤减, 集合体与集合体联结更为紧密 (图 8 (b))。总之, 溶液浓度增大降低了集合体间孔隙数量, 最终膨胀变形变小。



(a) 去离子水



(b) 1.0 mol/L NaCl溶液

图 8 不同浓度盐溶液水化后试样的扫描电镜图片 (20℃)

Fig. 8 SEM images of specimen hydrated with different concentrations of solution at 20℃

图 7, 8 结果表明, 盐溶液对膨胀变形的抑制作用主要与集合体间孔隙数量减少有关。原因可能是, 压实膨润土的膨胀来源于晶层膨胀和渗透膨胀<sup>[5]</sup>。前者由层间阳离子的水化作用引起, 后者由晶层间和入渗溶液之间的离子浓度差引起, 形成扩散双电层<sup>[6]</sup>。溶液离子浓度的增大, 一方面, 扩散双电层厚度减小<sup>[11]</sup>, 薄层叠体之间的排斥力降低, 从而集合体与集合体间更加黏连, 集合体间孔隙数量减少, 膨胀性能降低; 另一方面, 试样内部的渗透吸力和有效应力增大<sup>[30]</sup>, 集合体间孔隙被压缩, 集合体间孔隙数量减少, 膨胀变形减小。

3.2 温度对孔隙结构的影响

如图 7 所示, 对于给定的盐溶液浓度, 随着温度升高, 集合体间孔隙的峰值孔径密度显著减小, 集合体间孔隙数量降低; 但不同温度条件下, 集合体内孔隙的孔径分布曲线之间无明显差异, 说明温度对集合体内孔隙影响不大。

80℃ 条件下, 去离子水水化后试样的扫描电镜图片如图 9 所示。可以看出, 当温度升至 80℃ 时, 部分集合体间孔隙被羽翼状水化胶体所填充, 集合体间孔隙数量明显减少, 但集合体间孔隙的孔径范围和优势孔径大小变化不大。这与压汞试验结果一致, 即集合体间孔隙的孔径密度随温度升高而降低。

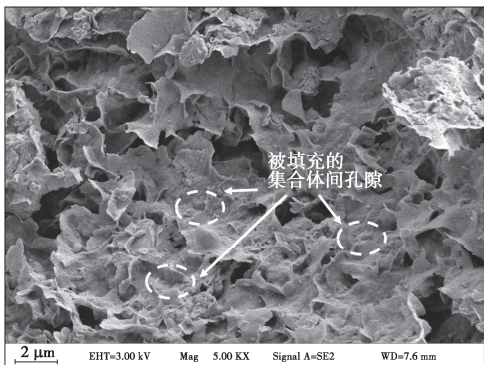


图 9 80℃ 条件下去离子水水化试样的扫描电镜图片

Fig. 9 SEM images of specimens hydrated with deionized water at 80 °C

图 7, 9 中结果表明, 较高温度情况下, 水化过程中, 大量集合体间孔隙消失, 最终膨胀变形较小。究其原因可能是, 随温度升高, 一方面, 自由水和部分弱结合水更易脱离土体, 试样持水性能减弱<sup>[27]</sup>, 并伴随集合体间孔隙失水收缩, 集合体间孔隙数量降低, 膨胀性能减弱; 另一方面, 由范特霍夫 (Van't Hoff) 方程可知, 渗透吸力随温度增大而增大, 从而扩散双电层膨胀受到抑制, 导致膨胀变形减小。此外, 温度升高可致晶层间脱水 (晶格收缩)<sup>[4]</sup>。Dai 等<sup>[31]</sup>通过分子动力学模拟研究表明, 升高温度降低了晶层间水分子的有序度, 使水分子更像“气体”, 有利于晶层间水分子的逸散。总之, 高温促进了晶层间脱水 (晶格收缩), 膨胀性能降低。

3.3 膨胀变形时程曲线模型

根据压实膨润土的膨胀变形特征, Komine 等<sup>[32]</sup>采用双曲函数近似描述其时程曲线:

$$\varepsilon = \frac{t}{a + bt} \quad (6)$$

式中:  $t$  为饱和试样所经历的时间 (min);  $\varepsilon$  为试样的膨胀应变 (%);  $a, b$  为双曲函数的形状参数。

式 (6) 可改写为

$$\frac{t}{\varepsilon} = a + bt \quad (7)$$

根据式 (7),  $a, b$  可由  $(t/\varepsilon)-t$  曲线的截距与斜率求取。前人研究表明,  $a, b$  与盐溶液类型和浓度、上覆荷载等因素相关<sup>[23, 33]</sup>。

本文中, 不同温度条件下, 求取的  $a, b$  随盐溶液浓度变化规律, 如图 10, 11 所示。可以看出: 给定温度条件下, 随盐溶液浓度增大, 参数  $a$  降低, 参数  $b$  增大; 给定浓度条件下, 随着温度升高, 参数  $a$  降低, 参数  $b$  增大。

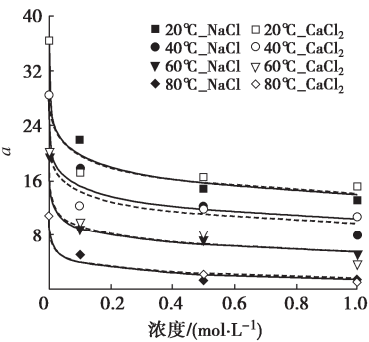


图 10 不同温度条件下参数  $a$  随浓度变化关系

Fig. 10 Evolutions of parameter  $a$  with concentration at different temperatures

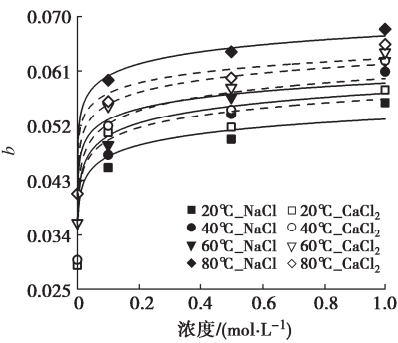


图 11 不同温度条件下参数  $b$  随浓度变化关系

Fig. 11 Evolutions of parameter  $b$  with concentration at different temperatures

由图 10, 11 曲线可得, 给定温度条件下, 参数  $a, b$  与浓度关系可由经验方程表示为

$$a = A_1 \ln(c + D_1) + B_1 \quad (8)$$

$$b = A_2 \ln(c + D_2) + B_2 \quad (9)$$

式中:  $c$  为盐溶液浓度 (mol/L);  $A_1, B_1, A_2, B_2$  均为拟合参数; 令  $D_1=D_2=1.0 \times 10^{-4}$ , 以避免  $c=0$  时产生数值误差。

将图 10, 11 中 20, 40, 60℃ 的结果, 带入式 (8), (9), 得到参数  $A_1, B_1, A_2$  和  $B_2$  与温度的拟合关系, 如表 3 所示。

表 3 参数  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$ ,  $B_2$  随温度变化关系  
Table 3 Evolutions of parameters  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$  and  $B_2$  with temperature

溶液类型	拟合关系	$R^2$
NaCl	$A_1=2.45\times10^{-2}T-3.00$	0.99
	$A_2=-1.62\times10^{-6}T+2.87\times10^{-3}$	0.91
	$B_1=-2.11\times10^{-1}T+18.40$	0.99
	$B_2=1.50\times10^{-4}T+5.06\times10^{-2}$	0.94
CaCl <sub>2</sub>	$A_1=1.82\times10^{-2}T-2.73$	0.99
	$A_2=-2.79\times10^{-6}T+3.16\times10^{-3}$	0.93
	$B_1=-2.17\times10^{-1}T+18.47$	0.99
	$B_2=1.43\times10^{-4}T+5.38\times10^{-2}$	0.98

至此, 将式 (8), (9) 代入式 (7), 再根据表 3, 可得考虑温度影响的 NaCl 溶液入渗的压实膨润土膨胀变形时程曲线方程,

$$t/\varepsilon = (2.45 \times 10^{-2} T - 3.00) \ln(c + 1.0 \times 10^{-4}) - 2.11 \times 10^{-1} T + 18.40 + [(-1.62 \times 10^{-6} T + 2.87 \times 10^{-3}) \cdot \ln(c + 1.0 \times 10^{-4}) + 1.50 \times 10^{-4} T + 5.06 \times 10^{-2}] t \quad (10)$$

同样, 考虑温度影响的 CaCl<sub>2</sub> 溶液入渗的压实膨润土膨胀变形时程曲线方程,

$$t/\varepsilon = (1.82 \times 10^{-2} T - 2.73) \ln(c + 1.0 \times 10^{-4}) - 2.17 \times 10^{-1} T + 18.47 + [(-2.79 \times 10^{-6} T + 3.16 \times 10^{-3}) \cdot \ln(c + 1.0 \times 10^{-4}) + 1.43 \times 10^{-4} T + 5.38 \times 10^{-2}] t \quad (11)$$

采用式 (10), (11), 求取 80℃ 条件下, 不同浓度盐溶液入渗的膨胀变形时程曲线, 并与实测值对比见图 12。

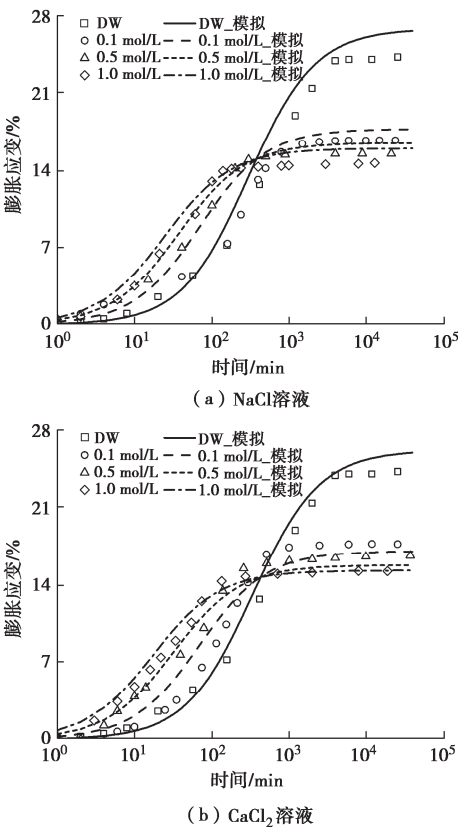


图 12 不同盐溶液入渗的膨胀变形时程曲线 (80℃)

Fig.12 Comparisons of measured and simulated swelling evolution curves for specimens infiltrated with salt solutions at 80℃

从图 12 可以看出, 计算时程曲线与实测结果拟合度较高, 表明式 (10), (11) 可以很好地描述温度和盐溶液共同影响的压实膨润土膨胀过程。

4 结 论

(1) 膨胀变形大部分在主膨胀阶段完成, 高温和高盐溶液浓度可加速主膨胀进程, 使膨胀变形过程更快达到稳定; 主膨胀系数  $C_{ps}$  和次膨胀系数  $C_{ss}$  均随温度和浓度的增大而降低。给定温度条件下, 随着浓度增加, 最大膨胀应变先迅速降低, 再缓慢下降; 给定盐浓度条件下, 随着温度升高, 最大膨胀应变线性减小。

(2) 不同温度条件下, 经不同浓度盐溶液水化后的试样, 孔径分布曲线均为双峰形态。随着温度和盐溶液浓度增大, 集合体间孔隙的峰值孔径密度减小; 但是, 温度和盐溶液浓度对集合体内孔隙基本无影响。扫描电镜试验结果进一步表明, 在高温和高盐溶液浓度条件下, 集合体间孔隙易被羽翼状水化胶体所填充, 导致大量的集合体间孔隙在水化过程中消失, 最终膨胀变形减小。

(3) 在一定温度条件下, 随着离子浓度增加, 扩散双电层厚度减小, 渗透吸力和有效应力增大, 导致膨润土膨胀性能降低。随着温度升高, 持水能力降低引起集合体间孔隙收缩与晶格收缩, 同时, 扩散双电层膨胀受抑制, 膨润土膨胀性能降低。

(4) 建立了考虑温度和盐溶液浓度影响的膨胀变形时程曲线模型, 验证结果表明, 该模型能很好地描述不同温度和盐溶液浓度下压实膨润土的膨胀变形随时间演化过程。

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: 叶为民和邵长跃参与实验设计; 邵长跃完成实验操作; 叶为民, 邵长跃, 王琼, 陈永贵, 陈亮参与论文的写作和修改; 所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by YE Weimin and SHAO Changyue. The experimental operation was completed by SHAO Changyue. The manuscript was drafted and revised by YE Weimin, SHAO Changyue, WANG Qiong, CHEN Yonggui and CHEN Liang. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

[1] 叶为民, 黄 伟, 陈 宝, 等. 双电层理论与高庙子膨润土的体变特征[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1899-1903. (YE



- Weimin, HUANG Wei, CHEN Bao, et al. Diffuse double layer theory and volume change behavior of densely compacted Gaomiaozi bentonite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(7): 1899-1903. (in Chinese))
- [2] 张虎元, 王学文, 刘平, 等. 缓冲回填材料砌块接缝密封及愈合研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(增刊 2): 3605-3614. (ZHANG Huyuan, WANG Xuewen, LIU Ping, et al. Study on joint sealing and healing of buffer backfill material block[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(S2): 3605-3614. (in Chinese))
- [3] 项国圣, 徐永福, 陈涛, 等. 盐溶液中膨润土膨胀变形的分形模型[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(1): 75-80. (XIANG Guosheng, XU Yongfu, CHEN Tao, et al. Fractal model for swelling deformation of bentonite in salt solution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(1): 75-80. (in Chinese))
- [4] 刘晓燕, 刘路路, 蔡国军, 等. 温度和盐/碱作用下膨润土-砂-石墨缓冲材料膨胀力性能演化[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(12): 2463-2471. (LIU Xiaoyan, LIU Lulu, CAI Guojun, et al. Evolution of swelling pressure properties of bentonite-sand-graphite buffer materials under action of temperature and salt/alkali[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(12): 2463-2471. (in Chinese))
- [5] ZHU C M, YE W M, CHEN Y G, et al. Influence of salt solutions on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Engineering Geology*, 2013, **166**: 74-80.
- [6] LAIRD D A. Influence of layer charge on swelling of smectites[J]. *Applied Clay Science*, 2006, **34**(1/2/3/4): 74-87.
- [7] XIANG G S, YE W M, XU Y F, et al. Swelling deformation of Na-bentonite in solutions containing different cations[J]. *Engineering Geology*, 2020, **277**: 105757.
- [8] 于海文, 马田田, 韦昌富, 等. 阳离子交换量和盐溶液浓度对膨润土膨胀变形的影响[J]. *岩土力学*, 2023, **44**(9): 2603-2610. (YU Haiwen, MA Tiantian, WEI Changfu, et al. Effects of cation exchange capacity and salt solution concentration on swelling deformation of bentonite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, **44**(9): 2603-2610. (in Chinese))
- [9] RAO S M, SHIVANANDA P. Role of osmotic suction in swelling of salt-amended clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, **42**(1): 307-315.
- [10] HE Y, YE W M, CHEN Y G, et al. Effects of K<sup>+</sup> solutions on swelling behavior of compacted GMZ bentonite[J]. *Engineering Geology*, 2019, **249**: 241-248.
- [11] 陈永贵, 刘聪, 马婧, 等. 盐碱演化环境下高压实 GMZ 膨润土膨胀变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(4): 690-698. (CHEN Yonggui, LIU Cong, MA Jing, et al. Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite with saline-alkali evolution solutions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(4): 690-698. (in Chinese))
- [12] ROMERO E, VILLAR M V, LLORET A. Thermo-hydro-mechanical behaviour of two heavily overconsolidated clays[J]. *Engineering Geology*, 2005, **81**(3): 255-268.
- [13] ZHANG J R, SUN D A, YU H H, et al. Swelling of unsaturated GMZ07 bentonite at different temperatures[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, **79**(2): 959-969.
- [14] CUI S L, WANG J D, HUANG S, et al. Coupled effects of saline solutions and temperature on the swelling deformation property of GMZ bentonite-sand mixtures[J]. *Soils and Foundations*, 2019, **59**(5): 1417-1427.
- [15] 项国圣, 吕立勇, 葛磊, 等. 温度对 GMZ 膨润土的膨胀性能影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(1): 77-84. (XIANG Guosheng, LÜ Liyong, GE Lei, et al. Effects of temperature on swelling characteristics of GMZ bentonite[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(1): 77-84. (in Chinese))
- [16] VILLAR M V, GÓMEZ-ESPINA R, LLORET A. Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, **2**(1): 71-78.
- [17] YE W M, WANG Y, WANG Q, et al. Stress-dependent temperature effect on the swelling behavior of compacted GMZ bentonite[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, **79**(7): 3897-3907.
- [18] 叶为民, 许利波, 王琼, 等. 考虑侧壁摩阻的围岩裂隙中膨润土-砂混合物侵入过程及其模型[J]. *岩土工程学报*, 2022, **44**(4): 613-621. (YE Weimin, XU Libo, WANG Qiong, et al. Intrusion process of bentonite-sand mixture and its model in rock fissures with consideration of lateral wall friction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(4): 613-621. (in Chinese))
- [19] 郭永海, 王驹, 吕川河, 等. 高放废物处置库甘肃北山野马泉预选区地下水化学特征及水-岩作用模拟[J]. *地学前缘*, 2005, **12**(增刊1): 117-123. (GUO Yonghai, WANG Ju, LÜ Chuanhe, et al. Chemical characteristics of groundwater

- and simulation of water-rock interaction in Yemaquan pre-selection area of Beishan, Gansu Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, **12**(S1): 117-123. (in Chinese))
- [20] RAO S M, THYAGARAJ T, THOMAS H R. Swelling of compacted clay under osmotic gradients[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(10): 707-713.
- [21] YE W M, ZHANG F, CHEN B, et al. Effects of salt solutions on the hydro-mechanical behavior of compacted GMZ01 Bentonite[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72**(7): 2621-2630.
- [22] 廖饶平, 陈永贵, 刘 聪, 等. 高压实膨润土与孔隙溶液物理作用机制研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2024, **46**(12): 2465-2475. (LIAO Raoping, CHEN Yonggui, LIU Cong, et al. Advances in physical interaction mechanism between highly compacted bentonite and pore solution[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, **46**(12): 2465-2475. (in Chinese))
- [23] CHEN Y G, ZHU C M, YE W M, et al. Effects of solution concentration and vertical stress on the swelling behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2016, **124**: 11-20.
- [24] DAI W J, CHEN Y G, LI Y C, et al. A macroscopic model for predicating stepwise crystalline swelling of montmorillonite [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, **171**: 106350.
- [25] VILLAR M V, GÓMEZ-ESPINA R, GUTIÉRREZ-NEBOT L. Basal spacings of smectite in compacted bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2012, **65**: 95-105.
- [26] WANG Y J, YIN Z Y, HICHER P Y, et al. Hysteresis at low humidity on vapor sorption isotherm of Ca-montmorillonite: The key role of interlayer cations[J]. *Applied Clay Science*, 2025, **263**: 107628.
- [27] LIU Z R, YE W M, CUI Y J, et al. Temperature effects on water retention behaviour and structural evolution of GMZ bentonite pellet mixtures[J]. *Applied Clay Science*, 2022, **222**: 106492.
- [28] 刘丽娜. 热-高碱作用下压实膨润土膨胀力劣化及结构性损伤研究[D]. 上海: 同济大学, 2020. (LIU Lina. Swelling Pressure Deterioration of Compacted Bentonite and its Structural Damage induced by Heat combined with Hyperalkaline Conditions[D]. Shanghai: Tongji University, 2020. (in Chinese))
- [29] 姚传芹, 韦昌富, 马田田, 等. 孔隙溶液对膨胀土力学性质影响[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(增刊 2): 116-122. (YAO Chuanqin, WEI Changfu, MA Tian Tian, et al. Influence of pore solution on mechanical property of expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(S2): 116-122. (in Chinese))
- [30] ZHANG F, YE W M, WANG Q, et al. Effective stress incorporating osmotic suction and volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(7): 1925-1934.
- [31] DAI W J, CHEN Y G, YE W M, et al. Thermal and saline effects on the swelling deformation of montmorillonite: a molecular dynamics study[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, **83**(1): 11.
- [32] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**(4): 478-490.
- [33] SUN H Q, SCARINGI G, MAŠÍN D, et al. An experimental investigation on the swelling behavior of compacted B75 bentonite[J]. *Engineering Geology*, 2022, **296**: 106452.