

DOI: 10.11779/CJGE201805012

钠钾盐梯度循环作用下高压实膨润土膨胀力衰变特性

陈永贵¹, 李全^{1,2}, 贾灵艳¹, 叶为民¹, 崔玉军^{1,3}, 陈宝¹

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 浙江华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310014; 3. 法国国立路桥大学, 巴黎 77455)

摘 要: 高放废物深地质处置库近场环境中, 高压实膨润土将长期遭受含盐地下水的循环化学作用, 导致其膨胀性能不断衰变。针对干密度为 1.7 g/cm^3 的高压实高庙子 (GMZ) 膨润土, 分别开展了 0.5 mol/L 和 1.0 mol/L 两种盐梯度、NaCl-水-KCl 和 NaCl-水不同循环路径下的恒体积膨胀力试验, 探讨盐梯度循环化学作用下其膨胀力的衰变特性。结果表明: 盐梯度循环作用下, 膨润土膨胀力的发展与离子种类、浓度和循环次数等因素有关。盐化阶段膨胀力不断降低, 淡化阶段膨胀力有所提高; 低盐度梯度循环下各阶段的稳定膨胀力均高于高盐度梯度循环时的膨胀力。随着循环次数的增加, 稳定膨胀力逐渐下降, 入渗溶液浓度越高, 降幅越大, 且衰减幅度随着循环次数的增加而减小。KCl 溶液的入渗会引起膨润土发生矿物相变, 膨胀力显著降低; 当 KCl 溶液浓度达到一定值时, 蒙脱石的充分溶解导致膨润土丧失膨胀能力。

关键词: 深地质处置库; 高庙子膨润土; 盐梯度循环作用; 膨胀力; 衰变特性

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)05-0872-08

作者简介: 陈永贵(1976-), 男, 安徽宿松人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境地质和非饱和土力学方面的研究。E-mail: cyg@tongji.edu.cn。

Decay characteristics of swelling pressure of compacted bentonite under salinity gradient cycling

CHEN Yong-gui¹, LI Quan^{1,2}, JIA Ling-yan¹, YE Wei-min¹, CUI Yu-jun^{1,3}, CHEN Bao¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Zhejiang Huadong Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310014; 3. Ecole des Ponts ParisTech, Navier/CERMES, Paris 77455, France)

Abstract: During the long-term operation of a deep geological repository of high-level radioactive waste (HLW), the bentonite barrier is likely to experience the chemical cycling paths of groundwater with various chemical components. In this case, the swelling capacity of bentonite can be reduced to a certain degree. In this work, GMZ bentonite powder is densely compacted to a dry density of 1.7 g/cm^3 to carry out the swelling pressure tests under the constant-volume conditions. The salinization-desalinization effect is investigated by cyclical infiltrations of NaCl solution and distilled water. Furthermore, the cation exchange effect is emphasized by sequential infiltrations of NaCl solution, distilled water and KCl solution. For both infiltration paths, the salt concentrations ($0.5, 1 \text{ mol/L}$) are taken into account. The results show that the swelling pressure characteristics of GMZ bentonite depend on the ion species and salt concentration of infiltration solution as well as the number of chemical cycles. The salinization effect of salt solution results in the decrease in swelling pressure, while the infiltration of distilled water improves the swelling behaviors. The swelling pressure decreases with the salt concentration of infiltration solutions. The stable swelling pressure and its reduced degree gradually decrease against the number of chemical cycles. Under the infiltration of KCl solution, some of the montmorillonite is dissolved, which results in the significant decrease in swelling pressure. No swelling pressure will be measured for GMZ bentonite if the concentration of KCl solution is higher enough.

Key words: deep geological repository; GMZ bentonite; salinity gradient cycling; swelling pressure; decay characteristic

0 引 言

随着技术发展和安全性提高, 核电已成为世界能源供应的三大支柱之一, 由此产生了大量高水平放射性核废物 (简称“高放废物”)。如何安全、有效地处

置高放废物, 已成为困扰核工业全面发展的关键因素。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41422207, 41527801, 41772279);
国防科工局科研课题 (2011 计[1051]号)

收稿日期: 2017-02-09

大量研究表明,深地质处置是最为可行和可靠的方法,即通过开挖竖井和水平巷道,将高放废物封存在距地表数百米深的稳定围岩中,以实现放射性核素与人类生存环境的永久隔离。目前,国际上广泛采用的是多重屏障体系,将装有高放废物固化体的处置罐放置在开挖巷道内,在处置罐与围岩体之间回填缓冲材料,形成有效的水力屏障和化学缓冲屏障系统。高压实膨润土因具有低渗透性、高膨胀性和良好的化学阻滞性能,已被世界各国作为首选的缓冲材料。

处置库封闭后,随着围岩中地下水的入渗,膨润土将不断水化膨胀,在围岩体侧限作用下表现为一定的膨胀力和膨胀变形。膨胀性能的影响因素众多,包括膨润土自身性能(黏土矿物成分、初始干密度)、地下水性质(离子类型、浓度)、环境温度等。实际处置库近场中,一方面,含有一定化学成分的围岩地下水将不断渗入膨润土,引起膨润土孔隙水成分变化;另一方面,在处置库长期运营过程中,混凝土结构物不断衰解将产生大量的高碱性溶液,会引起蒙脱石矿物产生相变,最终导致膨润土膨胀性能不断衰变^[1-4]。目前,许多学者系统研究干密度、初始含水率、温度等因素对膨润土膨胀性能的影响规律^[5-11],而对地下水化学性质的影响研究相对较少。

孔隙水化学对膨润土膨胀性能的影响主要体现在膨胀力和膨胀变形 2 个方面。Herbert 等^[12]分析了盐溶液离子强度对 MX-80 膨润土膨胀力的影响,发现去离子水条件下的膨胀力最大(膨胀力 >4 MPa),低盐度溶液作用下的膨胀力较小(膨胀力 $2\sim 3$ MPa),高盐度溶液作用时的膨胀力最低(膨胀力 <1 MPa)。Castellanos 等^[13]研究了不同应力水平下盐溶液浓度对 FEBEX 膨润土膨胀力的影响,发现低盐度的花岗岩水对膨胀力几乎没有影响,高盐度溶液入渗时膨胀力显著减少,且高应力条件下盐浓度对膨胀力的影响程度减小。Musso 等^[14]、DI Maio^[15]研究发现,钠基膨润土在 NaCl 溶液和水循环过程中,固结和膨胀变形是可逆的,但是在 KCl 溶液和 CaCl_2 溶液与水循环时,膨润土固结和膨胀变形则不可逆。此外,Gajo 等^[16]研究了钠基膨润土在恒定上覆荷载作用下,HCl 溶液、去离子水和 NaOH 溶液循环作用下的体积应变特性。

进一步研究表明,水化作用使废物罐产生腐蚀现象,在罐体周围可以形成高压氢气,这些氢气沿着膨润土孔隙向外释放,促使水分迁移,导致膨润土中含水率波动;同时,在围岩地下水侵入与库内衰变热的共同作用下,高压实膨润土长期遭受干湿循环作用^[17],导致地下水化学浓度反复变化。地下水化学成分及浓度变化的长期循环化学作用,必然使高压实膨润土产生循环化学胀缩变形,对膨润土的高膨胀性能具有很

大的破坏性,导致膨胀性能发生衰变,最终威胁整个处置安全^[18]。由此可见,针对循环化学条件下的膨润土膨胀性能进行研究是极其重要的。

中国 20 世纪 80 年代开始高放废物深地质处置研究工作,已初步选定内蒙古高庙子(GMZ)膨润土作为首选缓冲材料;同时,甘肃北山作为处置库预选场址已启动了地下坑探试验研究。水文地质调查表明,预选区地下水化学类型复杂,阳离子以 Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 为主^[19]。中国学者已经对高压实 GMZ 膨润土的膨胀力开展了大量试验研究和理论分析工作^[20-23];在化学溶液入渗对 GMZ 膨润土膨胀性能影响方面,主要集中于单一溶液条件下的试验研究^[24-26],笔者在以往的研究中分析了化学与力耦合作用对膨胀性能的影响^[27-30],但是针对地下水化学循环作用影响的研究尚未开展。为此,本文根据中国甘肃北山预选处置场地下水主要化学相类型,针对干密度为 1.70 g/cm^3 的高压实 GMZ 膨润土,利用自主开发的膨胀力试验装置,采用恒体积试验法,探讨了 Na-K 盐梯度循环下高压实膨润土的膨胀力演化规律。

1 试验材料与方法

1.1 膨润土

高庙子(GMZ)膨润土产自内蒙古兴和县高庙子地区。图1为GMZ膨润土XRD衍射图,其主要矿物成分为62%蒙脱石、25%石英、6%方石英、6%斜长石和1%铁白云石。图2为GMZ膨润土粒径级配曲线,颗粒粒径均小于 $160\text{ }\mu\text{m}$ 。其他基本性能如下:比重为2.66,pH值为 $8.68\sim 9.86$,液限为276%,塑限为37%,总阳离子交换容量为 $77.30\text{ meq}/100\text{g}$ 。实验室条件下(相对湿度60%,吸力67 MPa,温度 20°C),该膨润土为颗粒状白色粉末,吸湿含水率为9.83%。

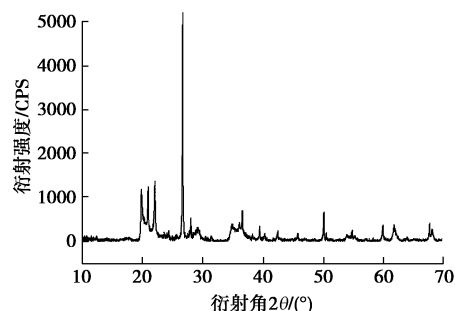


图1 GMZ 膨润土 XRD 衍射图

Fig. 1 XRD diffraction pattern of GMZ bentonite

1.2 试样制备

根据膨润土粉末的初始含水率(9.83%)和目标干密度(1.7 g/cm^3),计算所需膨润土粉末的质量,称取相应质量,倒入压样模具中,采用 CSS-44300 型 300 kN 数控压力机将膨润土粉末压实至直径 50 mm 、厚

为 10 mm 的圆饼状试样。压实过程采用变形控制，竖向压实速率为 0.4 mm/min，当压杆达到预定位置后，保持压杆位置不动，静置 60 min，尽量保证压实试样的均匀性。

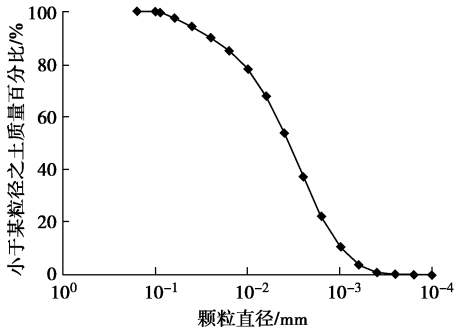
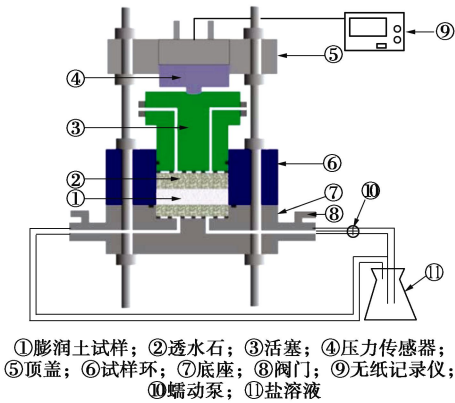


图 2 GMZ 膨润土粒径级配曲线

Fig. 2 Particle-size distribution curve of GMZ bentonite

1.3 试验装置

试验系统见图 3，包括试样固定装置、溶液入渗装置和数据采集系统。其中，试样固定装置包括试样环、顶盖、底板、透水石、活塞和螺栓。试验中，通过试样固定装置使膨润土试样在恒体积条件下均匀水化。溶液入渗装置包括软导管、溶液存储器和蠕动泵。利用蠕动泵将盐溶液通过软导管引入试样下部饱和土样。为测定盐溶液入渗过程中膨润土膨胀力的变化规律，在顶盖中安装一个轴向压力传感器，并将传感器与无纸记录仪相连接，实时监测膨胀力的发展情况。



(a) 结构图



(b) 实物图

图 3 膨胀力试验装置

Fig. 3 Swelling pressure testing apparatus

1.4 试验方案

为模拟处置库近场地下水化学成分和浓度的变化，设计 2 种盐梯度循环路径，见图 4。①用于模拟盐溶液（NaCl 溶液）和蒸馏水（DW）交互循环所引起的盐化-淡化作用；②在此基础上引入另一种盐溶液（KCl 溶液），用于模拟地下水化学成分变化引起的离子交换作用。为考察浓度的影响，NaCl 和 KCl 溶液浓度均为 0.5，1 mol/L。

将压制好的膨润土试样装入膨胀力试验装置，按照图 4 循环路径依次通入盐溶液，溶液入渗过程在高压实膨润土不断水化膨胀，在恒体积条件下产生膨胀力，数据采集系统同步记录膨胀力的变化。试验中，当某一浓度盐溶液入渗后，膨胀力连续 72 h 不发生变化，则认为本阶段的水化膨胀过程已经完成，此时可更换溶液或者蒸馏水继续下一阶段试验，以此类推至试验结束。

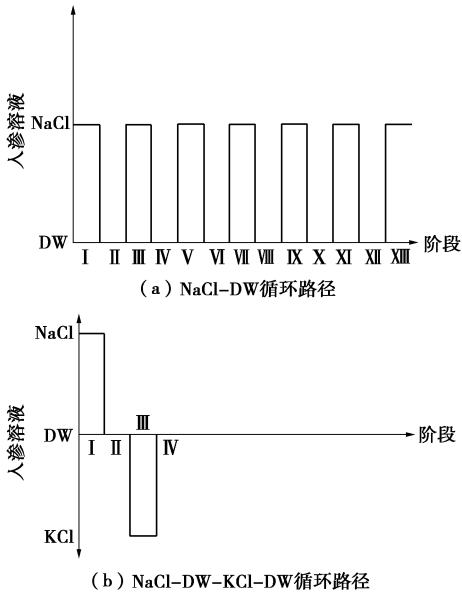


图 4 盐梯度化学循环作用路径

Fig. 4 Chemical cycles experienced by GMZ bentonite

2 试验结果

2.1 NaCl-DW 循环

试验路径图 4 (a)，在 NaCl-DW 盐梯度循环作用下，膨润土膨胀力的变化规律如图 5 所示，各盐化、淡化阶段膨胀力的稳定值见表 1。由图 5 可以看出，第 I 阶段，NaCl 溶液入渗使高压实膨润土逐渐吸水肿化，导致膨胀力不断增加；此后，NaCl 溶液再次入渗均导致试样膨胀力不断减小，而在蒸馏水淡化作用下，试样膨胀力有所增加。从表 2 可以看出，同一浓度条件下，随着循环次数的增加，不同盐化、淡化阶段的稳定膨胀力逐渐减小，且每次循环后膨胀力下降的幅度逐渐减小；相同循环路径及循环次数条件下，盐溶

表 1 路径图 4 (a) 的各阶段膨胀力稳定值

Table 1 Stable swelling pressures at various stages during cycling of NaCl solution and distilled water												
阶段	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0.5 mol/L	2.25	2.73	2.14	2.44	2.09	2.37	2.04	2.32	1.97	2.26	1.91	2.21
1 mol/L	1.66	2.67	1.44	2.16	1.16	1.85	1.06	1.66	1.03	1.65	1.02	1.88

液浓度越高, 试样膨胀力的下降幅度越大。

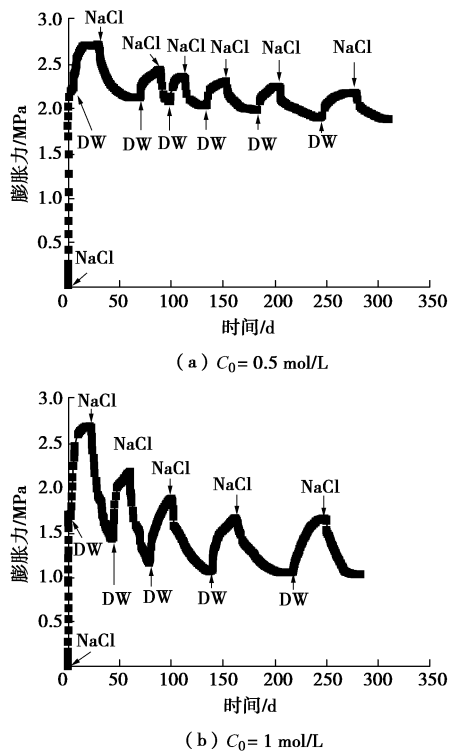


图 5 路径图 4 (a) 的作用下膨润土膨胀力发展曲线

Fig. 5 Change in swelling pressure during cycling of NaCl solution and distilled water

两种盐溶液浓度条件下, 第 I 阶段通入 NaCl 溶液后, 非饱和和高压实膨润土水化膨胀过程中膨胀力的发展曲线见图 6。由图 6 可以看到, 膨润土试样在盐溶液作用下开始水化, 膨胀力快速上升, 表现出明显的“双峰结构”特征, 且“双峰结构”形态与盐溶液浓度有关。低浓度条件下, 双峰结构的第二个峰值要高于第一个峰值, 高浓度则反之。相比 0.5 mol/L 的 NaCl 溶液而言, 1 mol/L NaCl 溶液对试样膨胀力的抑制作用更强, 且试样膨胀达到稳定所需的时间更短。

2.2 NaCl-DW-KCl-DW 循环

试验路径图 4 (b), 在 NaCl-DW-KCl-DW 盐梯度循环作用下, 高压实膨润土膨胀力的发展规律见图 7, 各盐化、淡化阶段膨胀力的稳定值见表 2。由图 7 可以看出, 在 0.5 mol/L 和 1.0 mol/L 两种盐浓度条件下, 当首次通入 NaCl 溶液时, 高压实膨润土试样逐渐吸水饱和, 在不断水化过程中膨胀力迅速增大并达到稳定; 随后注入蒸馏水, 此时试样在浓度梯度作用下继续吸水水化, 膨胀力继续增大, 发展到最大值后稳定; 当注入 KCl 溶液后, 膨润土试样的膨胀力急剧下降,

随后逐渐减小并稳定在某一低值; 当再次注入蒸馏水后, 试验持续 30 d 膨胀力增加也非常小。与路径图 4 (a) 比较可知, 注入 KCl 溶液后, 高压实膨润土试样的膨胀力急剧降低, 并且浓度越高降幅越大; 当 KCl 溶液盐化阶段膨胀力稳定后, 再次注入蒸馏水进行淡化, 膨胀力的增幅非常有限。

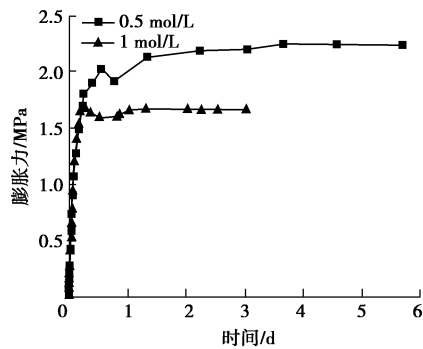


图 6 NaCl 溶液入渗时膨胀力发展曲线

Fig. 6 Evolution of swelling pressure of GMZ bentonite with infiltration of NaCl solution

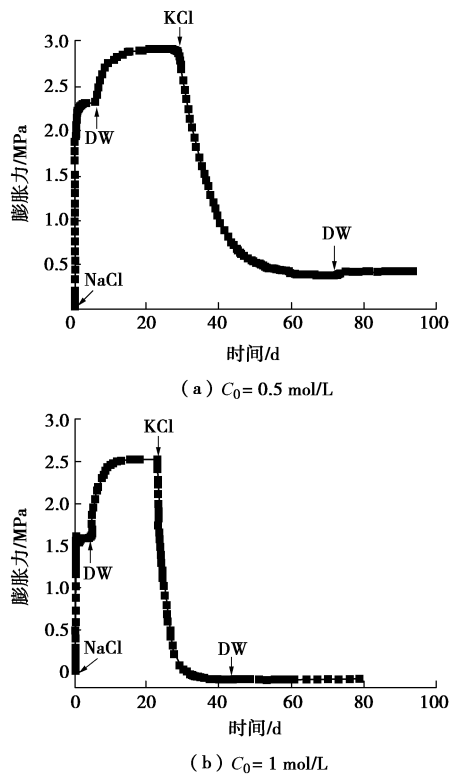


图 7 路径图 4 (b) 的作用下膨润土膨胀力发展曲线

Fig.7 Chang in swelling pressure during cycling of NaCl solution, distilled water and KCl solution

从表 2 可以看出, 两种盐浓度条件下, 第 II 阶段

通入蒸馏水后的膨胀力稳定值均较第 I 阶段通入 NaCl 溶液后有较大程度提高；第 IV 阶段通入蒸馏水后的膨胀力稳定值与第 III 阶段通入 KCl 溶液后的稳定值相比则增加不明显；而第 III 阶段通入 KCl 溶液后的膨胀力稳定值较第 II 阶段大幅度下降。

表 2 路径图 4 (b) 的各阶段膨胀力稳定值

Table 2 Stable swelling pressures at various stages during cycling

of NaCl solution, distilled water and KCl solution		
阶段	0.5 mol/L	1.0 mol/L
I	2.31	1.58
II	2.92	2.53
III	0.37	-0.10
IV	0.41	-0.09

3 分析与讨论

3.1 离子种类对膨胀力的影响

对比路径图 4 (a) 和 (b) 作用下的膨胀力发展规律，可以发现：①路径图 4 (b)，通入 KCl 溶液后，试样膨胀力均急剧下降；甚至在 1.0 mol/L 梯度作用下，膨胀力几乎为零；此后，通入去离子水时，膨胀力只有略微升高。②路径图 4 (a)，通入 NaCl 溶液后，试样膨胀力虽然下降，但下降幅度相较 KCl 要小得多；再次通入去离子水后，膨胀力的上升幅度远远高于路径图 4 (b) 作用时膨胀力的上升幅度。由此可见，盐溶液中的 K⁺与 Na⁺对膨润土膨胀性能的影响机理存在差异。

Kaufhold 等^[31-33]将 36 种不同膨润土分别密封在 NaCl 和 KCl 溶液中，使其在 60℃ 条件下反应，通过对试验前后 XRD 衍射图谱、CEC、吸水量及可溶性硅量的比较，定量分析了膨润土阳离子交换性能、膨胀力损失及矿物相变特征等的变化。结果发现，蒙脱石在 NaCl 溶液中是稳定的，而在 KCl 溶液中出现了蒙脱石的溶解和伊利石的沉淀，且膨胀力损失较大。研究表明，K⁺的直径刚好可以匹配蒙脱石四面体三角腔的尺寸，当 K⁺随溶液入渗接触到蒙脱石矿物时，停留在蒙脱石四面体晶片的三角腔内，被蒙脱石不可逆吸附；伴随着蒙脱石晶层间置换脱水，造成蒙脱石晶体片层坍塌，使得晶层间距离减小，从而导致膨润土的膨胀力急剧下降^[34-35]。

3.2 离子浓度对膨胀力的影响

由表 1, 2 可以发现，相同路径各循环对应阶段，低盐度梯度作用下的膨润土膨胀力均高于高盐度梯度下膨润土的膨胀力。Zhu 等^[36]曾研究了盐溶液浓度对高压实 GMZ 膨润土膨胀力的影响规律，发现随着入渗溶液浓度的增加，试样膨胀力逐渐减小，且双峰结构逐渐消失。根据扩散双电层理论式^[37]：

$$\frac{1}{k} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 RT}{F^2 \sum_{i=n} c_i z_i^2}} \quad , \quad (1)$$

式中，1/k 为双电层厚度 (m)，c_i 为离子浓度，z_i 为化合价，ε₀ 为相对介电常数，F 是法拉第常数 (9.6485 × 10⁴ C/mol)，R 是气体常数 (8.314 J/K mol)。

可知，膨润土的双电层厚度随着入渗溶液浓度的增加而显著减小，由此抑制双电层膨胀，宏观上表现为膨胀力曲线中第二个峰值的减小，双峰结构逐渐演化为单峰结构。这也解释了本试验中，通入低浓度 (0.5 mol/L) 溶液时，双峰结构的第一个膨胀力峰值低于第二个膨胀力峰值；而通入高浓度 (1.0 mol/L) 溶液时，第一个膨胀力峰值高于第二个膨胀力峰值。

3.3 循环化学作用下膨胀力的衰减

基于表 1 中的试验结果，可建立循环路径图 4 (a) 下浓度节点与相应的稳定膨胀力关系曲线，得到膨胀力随盐化-淡化循环次数的衰减规律，结果见图 8。从图 8 可以看出，膨润土膨胀力随着循环次数的增加而不断降低，表现出一定的衰减特性。为了定量表述膨胀力在盐梯度循环化学过程中的衰减特性，分别定义衰变系数 η_pⁱ 和衰变量 δ_pⁱ：

$$\eta_p^i = \frac{P_i - P_{i+1}}{P_i} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

$$\delta_p^i = \frac{P_i - P_{i+1}}{P_1} \times 100\% \quad , \quad (3)$$

式中，P_i 和 P_{i+1} 分别为相邻 2 个循环间盐化下的稳定膨胀力值，P_i 为前一个循环盐化膨胀力值，P_{i+1} 为下一个循环盐化稳定膨胀力值，P₁ 为首次盐化的稳定膨胀力值，i 为循环次数。

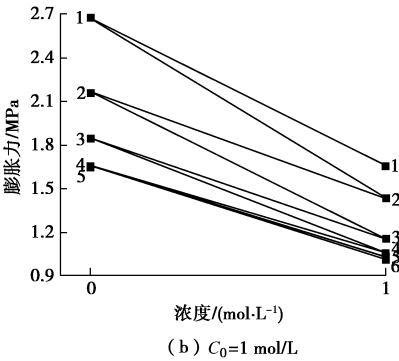
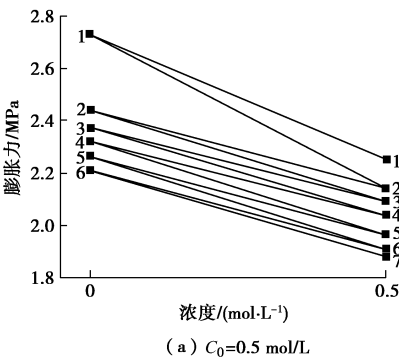


图 8 NaCl-DW 循环作用下膨胀力的衰减规律

Fig. 8 Decrease in swelling pressure during cycling of NaCl solution and distilled water

膨润土膨胀力衰变系数随循环次数的变化规律见图9。由图9可知,一定循环次数(3次)内,膨润土在高盐度梯度循环下的衰变系数远远大于低盐度梯度循环下的衰变系数;但是,随着循环次数的增加,高盐度梯度循环下的衰变系数下降很快,由此导致后期循环对应的衰变系数相对较小。膨润土膨胀力衰变量随循环次数的变化规律见图10。从图10可以看出,相同循环路径条件下,膨润土在高浓度(1.0 mol/L)循环作用下的膨胀力衰变量远大于低浓度(0.5 mol/L)循环作用下的膨胀力衰变量。

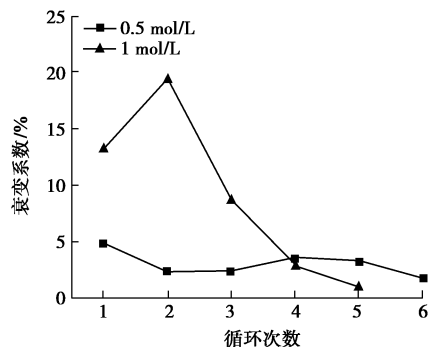


图9 衰变系数与循环次数的关系曲线

Fig. 9 Decay coefficient vs. number of chemical cycles

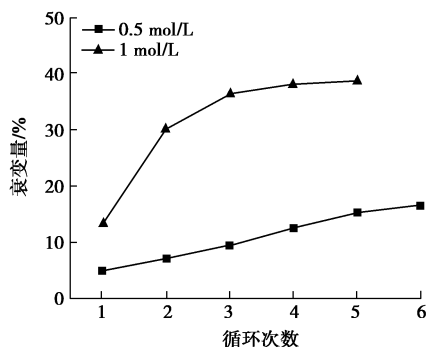


图10 衰变量与循环次数的关系曲线

Fig. 10 Decay ratio vs. number of chemical cycles

从微观角度,膨润土水化过程分为3阶段^[38](图11):第I阶段,晶层间孔隙被水充填,层叠体间孔隙保持干燥;第II阶段,层叠体膨胀并充填层叠体间孔隙,而集合体的膨胀不明显;第III阶段,厚层叠体继续膨胀并裂开成薄层叠体,导致集合体膨胀。其中第I阶段的膨胀是由存在于蒙脱石单元层(TOT)之间的可交换阳离子(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+})的水化作用引起的,称之为晶层膨胀。后两个阶段是由于层叠体间扩散双电层膨胀引起的,称之为双电层膨胀。晶层膨胀和双电层膨胀是膨润土膨胀的两种主要机制^[39]。当可交换阳离子结合的水层厚度达到最大后,水化作用减弱,双电层膨胀变成控制膨胀过程的主要机制^[40]。

当低浓度溶液(0, 0.5 mol/L)入渗时,高压实膨润土开始吸水水化并产生晶层膨胀,晶层膨胀完成之

后,膨胀力发展曲线达到第一个峰值。接着,随着高压实膨润土在恒体积条件下继续水化,集合体结构进一步膨胀并导致土体骨架坍塌,使得厚度较大的层叠体分裂成厚度较薄的层叠体并填充到集合体间孔隙中,此时膨胀力降低。之后,扩散双电层斥力变成主要膨胀机制。对于高压实膨润土,虽然蒙脱石单元之间层间距离狭小,吸附水量较少,可能无法形成扩散双电层^[41],但是在层叠体之间的孔隙内完全可以形成一定规模的扩散双电层,此时膨胀力有一定程度上升。因此,在初始孔隙坍塌之后土体结构发生重组,继而再次膨胀,使得膨胀力增加直至达到第二个稳定峰值。

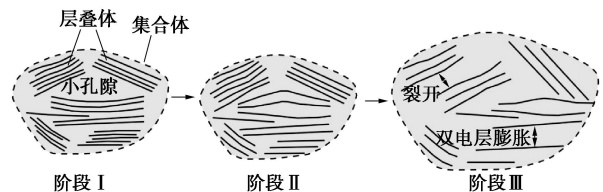


图11 膨润土水化过程中微结构变化图^[20]

Fig. 11 Microstructures of compacted bentonite during constant-volume swelling process

当高浓度溶液(1.0 mol/L)入渗时,晶层膨胀阶段的变化过程与低浓度情况类似。但是,在扩散双电层膨胀阶段,高离子浓度压缩扩散双电层厚度,从而降低粘土颗粒之间的排斥力,导致膨胀力降低。因此,土体骨架坍塌之后,高浓度溶液将抑制扩散双电层膨胀,使得膨胀力基本没有增加。由此可见,高浓度溶液入渗时,膨润土膨胀力主要由晶层膨胀控制,而扩散双电层斥力的贡献较少。此后,随着循环次数的增加,恒体积条件下膨润土中集合体单元包含的层叠体数目以及层叠体厚度都越来越小,层叠体间的双电层斥力也越来越小,进而使得膨润土膨胀力也越来越小,表现出衰减特性。

4 结 论

(1) NaCl 溶液浓度对高压实 GMZ 膨润土的初始膨胀过程有影响。随着 NaCl 溶液浓度增加,最终膨胀力及其稳定所需时间明显减小,且膨胀力发展过程中的双峰结构显著弱化。当入渗溶液浓度达到一定值时,双电层膨胀消失,膨胀力变化曲线演化为单峰形态。

(2) NaCl 溶液与蒸馏水的循环入渗过程中,高压实 GMZ 膨润土的膨胀力稳定值不断变化。NaCl 溶液的盐化作用使膨润土膨胀力减至一定值,随着蒸馏水的入渗,膨胀力有所回升。膨润土膨胀力在盐梯度循环作用下表现出衰减特性,衰减幅度与循环次数和溶液梯度密切相关。

(3) KCl 溶液入渗后, GMZ 膨润土膨胀力的大幅降低, 并且在之后注入蒸馏水的淡化过程中很难恢复, 这主要是由于 K^+ 离子进入蒙脱石矿物晶层, 引起矿物相变, 导致膨胀力损伤较大。由此可见, 在围岩地下水 K^+ 离子含量较高的预选场址中建设高放废物处置库时, 必须充分考虑研究地下水化学成分对工程屏障缓冲性能的影响。

参考文献:

- [1] LIU J, NERETNIEKS I. Physical and chemical stability of the bentonite buffer[R]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2006.
- [2] BERNER U R. Evolution of pore water chemistry during degradation of cement in a radioactive wasterepository environment[J]. Waste Management, 1992, **12**(2/3): 201 - 219.
- [3] SÁNCHEZ L, CUEVAS J, RAM IREZ S, et al. Reaction kinetics of FEBEX bentonite in hyperalkaline conditions resembling the cement-bentonite interface[J]. Applied Clay Science, 2006, **33**(2): 125 - 141.
- [4] NAKAYAMA S, SAKAMOTO Y, YAMAGUCHI T, et al. Dissolution of montmorillonite in compacted bentonite by highly alkaline aqueous solutions and diffusivity of hydroxide ions[J]. Applied Clay Science, 2004, **27**(1/2): 53 - 65.
- [5] THATCHER K E, BOND A E, ROBINSON P, et al. A new hydro-mechanical model for bentonite resaturation applied to the SEALEX experiments[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, DOI: 10.1007/s12665-016-5741-z.
- [6] BALLARINI E, GRAUPNER B, BAUER S. Thermal-hydraulic-mechanical behavior of bentonite and sand-bentonite materials as seal for a nuclear waste repository: numerical simulation of column experiments[J]. Applied Clay Science, 2017, **135**: 289 - 299.
- [7] ZHAO Jing-bo, CHEN Liang, COLLIN F, et al. Numerical modeling of coupled thermal-hydro-mechanical behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test[J]. Engineering Geology, 2016, **214**: 116 - 126.
- [8] NASSER M S, ONAIZI Sagheer A, HUSSEIN I A, et al. Intercalation of ionic liquids into bentonite: Swelling and rheological behaviors[J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, **507**: 141 - 151.
- [9] BENDITO E, PINTADO X. Monitoring of swelling pressure in bentonite[J]. Environmental Geotechnics-Journal, 2016, **3**(5): 334 - 345.
- [10] OMAR M, SHANABLEH A, AL ZAYLAIE M. Modification of the swelling characteristics and phosphorus retention of bentonite clay using alum[J]. Soils and Foundations, 2016, **56**(5): 861 - 868.
- [11] MASSAT L, CUISINIER O, BIHANNIC I, et al. Swelling pressure development and inter-aggregate porosity evolution upon hydration of a compacted swelling clay[J]. Applied Clay Science, 2016, **124**: 197 - 210.
- [12] HERBERT H J, KASBOHM J, SPRENGER H, et al. Swelling pressures of MX-80 bentonite in solutions of different ionic strength[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, **33**: S327 - S342.
- [13] CASTELLANOS E, VILLAR M V, ROMERO E, et al. Chemical impact on the hydro-mechanical behaviour of high-density FEBEX bentonite[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, **33**: S516 - S526.
- [14] MUSSO G, ROMERO Morales E, GENS A, et al. The role of structure in the chemically induced deformations of FEBEX bentonite[J]. Applied Clay Science, 2003, **23**(1/4): 229 - 237.
- [15] DI Maio C. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects[J]. Géotechnique, 1996, **46**(4): 695 - 707.
- [16] GAJO A, LORET B. The mechanics of active clays circulated by salts, acids and bases[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2007, **55**(8): 1762 - 1801.
- [17] YE W M, CUI Y J, QIAN L X, et al. An experimental study of the water transfer through confined compacted GMZ bentonite[J]. Engineering Geology, 2009, **108**(3/4): 169 - 176.
- [18] MUSSO G, ROMERO Morales E, GENS A, et al. The role of structure in the chemically induced deformations of FEBEX bentonite[J]. Applied Clay Science, 2003, **23**(1/4): 229 - 237.
- [19] 郭永海, 杨天笑, 刘淑芬. 高放废物处置库甘肃北山预选区水文地质特征研究[J]. 铀矿地质, 2001, **17**(3): 184 - 189. (GUO Yong-hai, YANG Tian-xiao, LIU Shu-fen. Hydrogeological characteristics of Beishan preselected area, Gansu province for China's high-level radioactive waste repository[J]. Uranium Geology, 2001, **17**(3): 184 - 189. (in Chinese))
- [20] 于响, 孙德安, 孙文静. 干湿循环下高庙子钙基膨润土持水和变形特性[J]. 岩土力学, 2015, **36**(5): 1339 - 1346. (YU Xiang, SUN De-an, SUN Wen-jing. Water-retention and deformation characteristics of Gaomiaozi Ca-bentonite during wetting-drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(5): 1339 - 1346. (in Chinese))
- [21] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土 GMZ001 三

- 向膨胀力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(5): 756 - 763. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(5): 756 - 763. (in Chinese))
- [22] 刘月妙, 王 驹, 曹胜飞, 等. 中国高放废物地质处置缓冲材料大型试验台架和热-水-力-化学耦合性能研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2756 - 2762. (LIU Yue-miao, WANG Ju, CAO Sheng-fei, et al. A large-scale THMC experiment of buffer material for geological disposal of high level radioactive waste in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2756 - 2762. (in Chinese))
- [23] 赖小玲, 叶为民, 刘 毅, 等. 高庙子膨润土膨胀力时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(3): 574 - 579. (LAI Xiao-ling, YE Wei-min, LIU Yi, et al. Experimental investigation on ageing effects on swelling pressure of unsaturated GMZ01 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(3): 574 - 579. (in Chinese))
- [24] 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 Guo-sheng, XU Yong-fu, 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))
- [25] 于海浩, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 孔隙溶液浓度的变化对黏土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(3): 564 - 569. (YU Hai-hao, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, et al. Effects of pore solution concentrations on shear strength of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(3): 564 - 569. (in Chinese))
- [26] 孙德安, 张 龙. 盐溶液饱和和高庙子膨润土膨胀特性及预测[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2790 - 2795. (SUN De-an, ZHANG Long. Swelling characteristics of Gaomiaozhi bentonite saturated by salt solution and their prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2790 - 2795. (in Chinese))
- [27] 陈永贵, 黄润秋, 朱春明, 等. 化学场对膨润土水-力特性影响研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, **42**(3): 398 - 405. (CHEN Yong-gui, HUANG Run-qiu, YE Wei-min, et al. Chemical environment effect on hydro-mechanical behaviour of compacted bentonite[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, **42**(3): 398 - 405. (in Chinese))
- [28] 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, **124-125**: 11 - 20.
- [29] YE W M, HE Y, CHEN Y G, et al. Thermo-chemical effects on the smectite alteration of GMZ bentonite for deep geological repository[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**: 905 - 915.
- [30] CHEN Y G, ZHU C M, YE W M, et al. Swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite under salinization-desalinization cycle conditions[J]. Applied Clay Science, 2015, **114**: 54 - 460.
- [31] KAUFHOLD S, DOHRMANN R. Stability of bentonites in salt solutions/sodium chloride[J]. Applied Clay Science, 2009, **45**(3): 171 - 177.
- [32] KAUFHOLD S, DOHRMANN R. Stability of bentonites in salt solutions II: potassium chloride solution-Initial step of illitization[J]. Applied Clay Science, 2010, **49**(3) 98 - 107.
- [33] KAUFHOLD S, DOHRMANN R. Stability of bentonites in salt solutions III: calcium hydroxide[J]. Applied Clay Science, 2011, **51**(1/2): 300 - 307.
- [34] PUSCH R. The buffer and backfill handbook part 1—definitions, basic relationships, and laboratory methods[R]. Stockholm: SKB Technical Report TR 02-20, 2002.
- [35] PUSCH R. The buffer and backfill handbook part 2 — materials and techniques[R]. Stockholm: SKB Technical Report TR 02-12, 2002.
- [36] 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**(10): 74 - 80.
- [37] LUCKHAM P F, ROSSI S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 1999, **82**(1/3): 43 - 92.
- [38] SUZUKI S, PRAYONGPHAN S, ICHIKAWA Y, et al. In situ observations of the swelling of bentonite aggregates in NaCl solution[J]. Applied Clay Science, 2005, **29**(2): 89 - 98.
- [39] SAVAGE D. The effects of high salinity groundwater on the performance of clay barriers[R]. Stockholm: Engineered Barrier System - Long-term Stability of Buffer and Backfill, Synthesis and Extended, SKI Report Sweden, 2004: 48 - 59.
- [40] BRADBURY M H, BAEYENS B. Porewater chemistry in compacted re-saturated MX-80 bentonite[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, **61**(1): 329 - 338.
- [41] PUSCH R, YONG R N. Microstructure of smectite clays and engineering performance[M]. London and New York: Taylor & Francis US, 2006.