

DOI: 10.11779/CJGE20220497

前期化学循环作用下石墨烯改性 GMZ 膨润土持水特性

张小小¹, 陈永贵^{*1,2}, 李昆鹏¹, 叶为民^{1,2}, 王琼^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

摘要: 高放射性废物深地质处置中, 缓冲/回填材料在含盐地下水入渗及衰变热耦合作用下, 可能遭受以盐化-淡化过程为主要形式的化学循环作用, 从而影响其持水特性。针对中国首选缓冲/回填材料 GMZ 膨润土, 根据北山预选处置场地下水主要离子为 Na^+ 和 Cl^- , 研究了前期 NaCl 溶液循环作用下石墨烯改性 GMZ 膨润土的持水特性。结果表明, 当吸力低于 150 MPa 时, 随前期化学循环次数增加, 石墨烯改性膨润土的持水性能不断提升, 而干密度对持水性的影响逐渐弱化; 当吸力超过 150 MPa 时, 持水性能受前期化学循环影响不明显。石墨烯改性膨润土的持水曲线具有明显回滞性, 但回滞幅度随前期化学循环次数增加而逐渐衰减。化学循环次数增加使水分滞留土体内部不易排出, 因而进气值和残余饱和度不断增大、过渡段斜率逐渐趋缓。在前期化学循环过程中, 含盐量不断累积, 循环次数越多, 渗透吸力越大, 对持水性能的影响越显著。

关键词: 深地质处置库; 石墨烯改性 GMZ 膨润土; 持水特性; 化学循环作用; 盐化-淡化

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)07-1490-08

作者简介: 张小小(1997—), 女, 江苏靖江人, 硕士研究生, 主要从事非饱和土力学方面的研究工作。E-mail: 1930159@tongji.edu.cn。

Water retention characteristics of graphene-modified GMZ bentonite subjected to preliminary chemical cycles

ZHANG Xiaoxiao¹, CHEN Yonggui^{1,2}, LI Kunpeng¹, YE Weimin^{1,2}, WANG Qiong^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the deep geological repository for high-level radioactive waste, affected by the coupling of saline groundwater infiltration and nuclear decay heat, the buffer/backfill materials may undergo the chemical cycles of salinization and desalination process, which in turn affect their water retention capacity. The GMZ bentonite, the preferred buffer/backfill material in China, is investigated. Beishan in Gansu province, the potential disposal site, is taken as the engineering background, and the NaCl solution is chosen to simulate the chemical environment of in-situ groundwater. The water retention capacity tests considering the preliminary cyclical infiltrations of NaCl solution and distilled water are carried out. The results show that when the suction is below 150 MPa, the increase of the preliminary chemical cycles strengthens the water retention performance of the graphene-modified GMZ bentonite, and weakens the effects of dry density on the water retention capacity. When the suction exceeds 150 MPa, the preliminary chemical cycle scarcely plays a role. In the drying/wetting path, the water retention curve of the graphene-modified GMZ bentonite has obvious hysteresis, and the hysteresis amplitude gradually attenuates with the preliminary chemical cycles. When the preliminary chemical circles increase, the water entry and residual saturation value of the graphene-modified bentonite increase, and the transition zone slope tends to be gentle. The influences of the chemical circles on the water retention capacity of the modified bentonite are related to the accumulation of salt content. With the increasing cycles, the salt content grows, and the influences of osmotic suction are more conspicuous.

Key words: deep geological repository; graphene-modified GMZ bentonite; water retention capacity; chemical cycling; salinization-desalination

0 引言

高放射性废物深地质处置库中, 作为缓冲材料的高压实膨润土承担着延缓地下水入渗、维持围岩稳定、

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(42125701); 国家自然科学基金项目(41977232, 42030714); 中央高校基本科研业务费项目; 土木工程1类高峰学科建设经费项目

收稿日期: 2022-04-25

*通信作者(E-mail: cyg@tongji.edu.cn)

表 1 GMZ 膨润土基本物理化学性质^[20]
Table 1 Basic physic-chemical properties of GMZ bentonite

性质	颗粒质量相 对密度	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	塑限/%	液限/%	pH 值	阳离子交换容量/ (mmol·(100g) ⁻¹)	主要矿物含量
描述	2.66	597	32.4	228.0	8.68~9.86	77.3	蒙脱石(75.4%), 石英(11.7%), 长石(4.3%), 长石英(7.3%)

阻滞核素迁移及传导核衰变热等主要功能^[1-3]。学者们对高压实膨润土的水力、力学、化学等屏障功能开展了广泛研究^[4-6]。为有效传递废物罐中核素的衰变热, 在膨润土中掺入石英砂, 可进一步提高缓冲/回填材料的热传导性能^[7-8]。近年来, 随着纳米技术的发展, 有学者采用石墨烯、碳纳米管、纳米碳纤维等纳米碳材料对膨润土进行改性研究。结果表明, 采用石墨烯改性膨润土不仅有效提高了其热传导能力, 而且显著提升了其化学阻滞性能^[9-15]。因此, 进一步研究石墨烯改性膨润土的水力特性, 对深地质处置库缓冲/回填材料的选择和工程屏障设计具有重要意义。

处置库建成运营后, 缓冲材料将长期处于非饱和状态。随着围岩地下水入渗, 高压实膨润土不断吸水膨胀, 逐渐封闭施工缝隙, 形成工程屏障^[16]。同时, 废物罐中高放射性核素将不断衰变, 释放大量的辐射热^[17], 使得高压实膨润土在地下水入渗与衰变热的耦合影响下, 长期经历干-湿循环作用。另一方面, 处置库围岩地下水化学成分复杂, 盐离子浓度较高, 这些化学成分随着地下水入渗进入高压实膨润土的孔隙中^[18]。在上述干-湿循环作用下, 孔隙水浓度反复波动, 使高压实膨润土长期经历盐化-淡化的化学循环作用, 进而影响膨润土持水性能。然而, 针对前期化学循环作用对膨润土持水特性的研究尚未见报道。

中国高放射性废物深地质处置工作始于 20 世纪 80 年代, 已选定甘肃北山花岗岩体为首座处置库预选场地, 内蒙古高庙子(GMZ)膨润土为首选缓冲/回填材料, 并已启动地下实验室建设。研究表明, 北山预选场围岩地下水主要阳离子为 Na⁺, 占地下水阳离子总量的 62%~85%, 主要阴离子为 Cl⁻, 占地下水阴离子总量的 41%~56%^[19]。为此, 本文采用 NaCl 溶液模拟北山地下水化学条件, 对石墨烯改性 GMZ 膨润土进行盐化-淡化循环作用, 对经历化学作用的石墨烯改性膨润土开展持水性能试验, 并结合微观测试分析其影响机理。本文聚焦于前期化学循环作用对膨润土材料持水性的影响, 研究结果将为中国北山地下试验与处置库建设提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1) 膨润土

本试验所用高庙子(GMZ)膨润土产自内蒙古自治区高庙子乡, 主要矿物成分为蒙脱石(75.4%), 外观呈浅灰白色粉末状。经球磨筛分后的土颗粒最大粒径低于 0.2 mm, 基本物理化学性质如表 1。

(2) 石墨烯

试验所用多层(5~10 层)石墨烯为黑色粉末状, 密度约为 2.25 g/cm³。微观形貌大多呈方形或菱形薄片状, 表面光滑, 形状较规则, 无定向排列。除边缘部分外, 多层厚度基本均匀。

(3) 前期化学循环入渗溶液

结合中国北山处置库预选场区围岩地下水化学成分及可能存在的局部离子浓度高于平均含量的情况, 根据已有研究^[4, 21-22], 试验采用 2.0 mol/L 的 NaCl 溶液与去离子水交互渗入膨润土试样进行前期化学循环作用, 模拟处置库近场地下水浓度的反复变化。试验所用 NaCl 购自国药集团, 为 AR 级分析纯, 通过容量瓶分次配置获得目标浓度的溶液。

(4) 气相法饱和盐溶液

持水试验中采用气相法控制吸力, 20°C 时所用饱和盐溶液与吸力的对应关系见表 2。试验所用的化学试剂均购自国药集团, 为 AR 级分析纯。

表 2 饱和盐溶液及相应吸力^[23]

Table 2 Saturated salt solutions and corresponding suctions

饱和盐溶液	总吸力/MPa
K ₂ SO ₄	4.2
(NH ₄) ₂ SO ₄	24.9
NaCl	38.0
CaCl ₂	150.0
LiCl	309.0

1.2 试样制备

(1) 试样压制

研究表明, 膨润土中掺入 6% 的氧化石墨烯(GO)即可显著提高热传导和化学阻滞性能^[10]。为此, 本文以石墨烯掺量 6% 改性膨润土为研究对象, 通过分步搅拌混合法配制混合土样, 确保试样混合均匀。其中, 石墨烯掺量是指石墨烯颗粒质量占膨润土与石墨烯混合物干质量的百分比。试验前将粉末状混合土样密封于盛放 K₂CO₃饱和盐溶液的干燥皿中, 进行气相法吸力控制直至吸力平衡, 采用烘干法测定含水率, 获得混合土样的初始含水率。

根据粉末状混合土样的初始含水率(10.94%)、

试样尺寸(直径 35 mm, 厚 5 mm)及目标干密度(1.60, 1.70, 1.80 g/cm³), 计算混合土样质量。利用 DDL-200 型数控万能压力机, 采用位移法压制圆饼状试样, 位移速率为 0.5 mm/min, 达到目标位移后静置 60 min, 防止试样回弹, 确保试样压制均匀。压制完成后, 用游标卡尺测量试样厚度, 计算实际干密度, 当与目标干密度的差值不超过 0.05 g/cm³ 时, 则试样压制完成。

为避免试验过程中土体体积膨胀, 使用不锈钢试样环对压实试样进行固定, 顶底盖通过螺杆固定, 装置如图 1 所示。

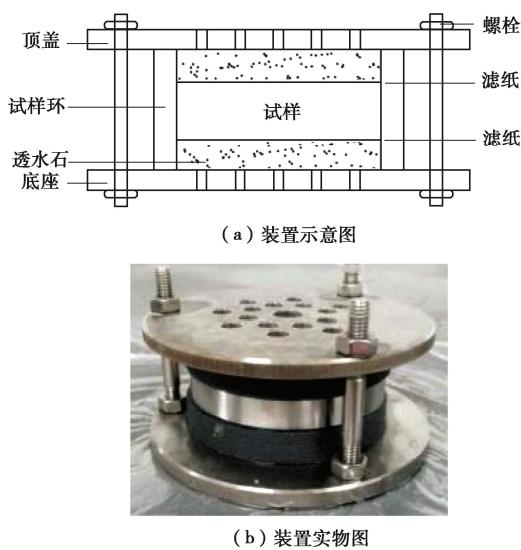


图 1 恒体积试样装置图

Fig. 1 Diagram of sample and apparatus

(2) 前期化学循环作用

试样压制完成后, 即进行盐化-淡化循环过程, 模拟前期化学循环作用。根据 Chen 等研究^[22], 膨润土基缓冲材料经过 3 次盐化-淡化循环作用后, 膨胀力及渗透系数衰变基本稳定, 继续增加化学循环作用, 对其水力性能影响较小。为此, 本试验采用 3 次盐化-淡化循环对试样进行前期化学作用, 化学循环路径见图 2。

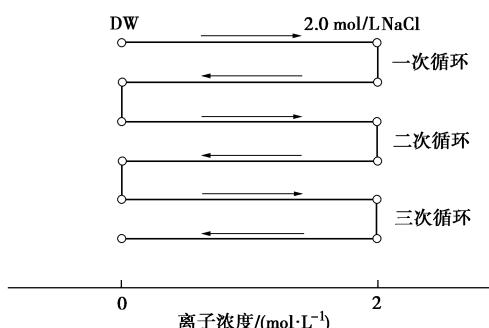


图 2 前期化学循环路径图

Fig. 2 Preliminary chemical cycles for samples

将试样置入恒体积试样环并固定好, 浸入装有体积足够大的目标浓度溶液的密闭容器中, 按图 2 路径

依次进行浸泡饱和, 且定期补充、更换溶液, 确保溶液完全浸没试样且盐浓度恒定。同时, 设置平行试样进行浸泡, 定期测定浸泡试样含水率, 确认试样达到饱和。当试样在目标浓度溶液中达到饱和后, 将容器中的溶液更换为图 2 循环路径下一阶段浓度溶液, 重复上述饱和过程。以此类推, 分别完成 1 次、2 次和 3 次化学循环, 获得持水试验试样。

1.3 持水试验

试样制备完成后, 采用气相法逐级进行吸力控制, 吸力控制路径见图 3, 包括干化和湿化两个过程。

首先, 根据饱和盐溶液与吸力的对应关系(表 2), 将试样置于饱和盐溶液干燥皿中, 定期称重, 当质量不再变化时, 认为达到吸力平衡。然后, 取出试样, 利用 WP4C 冷镜露点仪测定试样的实际吸力, 并采用烘干法测定含水率。

考虑化学循环次数和干密度的影响, 开展了 9 组试验, 具体试验安排见表 3。

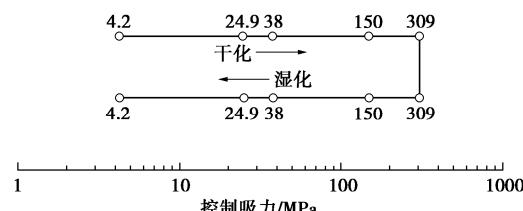


图 3 吸力控制路径图

Fig. 3 Wetting and drying process for suction controlling

表 3 持水特性试验方案

Table 3 Test plans of water retention tests

石墨烯掺量/%	干密度/(g·cm ⁻³)	化学循环次数
	1.50	1, 2, 3
6	1.60	1, 2, 3
	1.70	1, 2, 3

1.4 微观结构测试

针对初始压实状态及化学循环作用后试样进行了微观扫描电镜试验, 仪器为 Hitachi S-4800 扫描电镜仪, 获取试样微观形貌。

2 前期化学循环作用下的持水特性

2.1 持水曲线

不同前期化学循环次数下试样的持水曲线见图 4。由图 4 可知, 前期化学循环作用对石墨烯改性膨润土的持水特性有显著影响。在控制吸力低于 150 MPa 范围时, 试样含水率均随前期化学循环次数增加而升高; 而当吸力高于 150 MPa 时, 含水率受前期化学循环次数的影响不明显。如干密度为 1.50 g/cm³ 试样, 前期经历 1 次、2 次、3 次化学循环作用后, 4.2 MPa 吸力条件对应的含水率分别为 24.92%, 25.83% 和

27.04%, 而 309 MPa 吸力条件对应的含水率分别为 4.09%, 4.36% 和 4.75%, 含水率随化学循环次数的增长幅度不大。

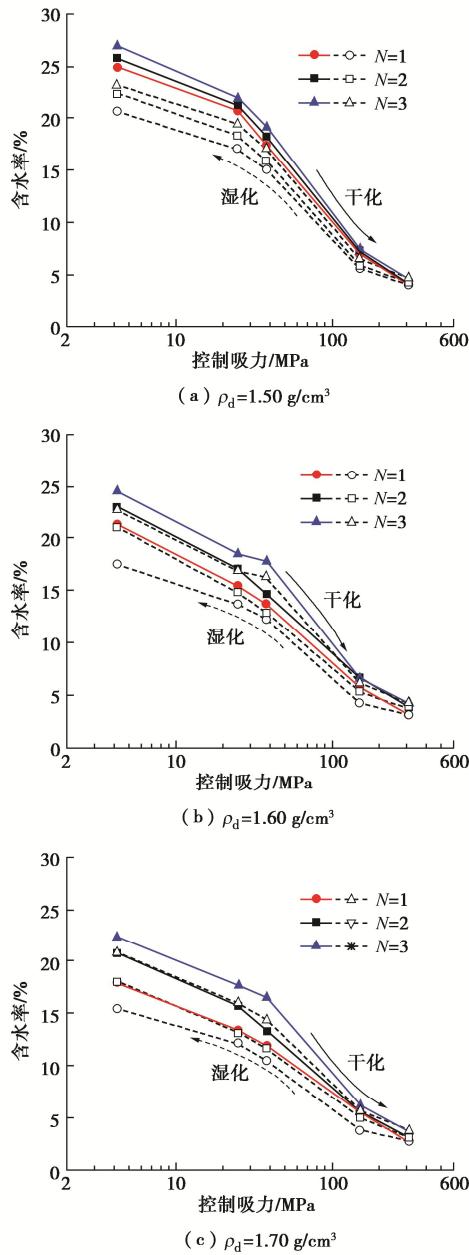


图 4 不同化学循环次数下试样持水曲线

Fig. 4 Water retention curves of graphene-modified GMZ

bentonite under drying and wetting paths

同样地, 前期化学循环次数相同时, 试样含水率随着干密度增加而减小。但是, 随着前期化学循环次数增加, 含水率随干密度增加而减小的幅度逐渐变大。例如, 4.2 MPa 吸力条件下, 前期经历 1 次化学循环时, $1.70 \text{ g}/\text{cm}^3$ 试样含水率比 $1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ 试样含水率低 27.65%; 而前期分别经历 2 次和 3 次化学循环后, $1.70 \text{ g}/\text{cm}^3$ 试样比 $1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ 试样含水率分别降低 19.09% 和 17.05%。由此可见, 干密度对试样持水性能的影响随前期化学循环作用而逐渐减弱。

对湿化路径持水曲线进行分析, 可发现其演化特

性与干化路径下持水特性演化一致。

2.2 回滞特性

从图 4 还可以看出, 干化-湿化路径下持水曲线的回滞特性也会受到前期化学循环作用的影响。为定量描述干化-湿化路径下试样回滞特性, 引入回滞系数^[24], 计算相同吸力条件下的含水率差异:

$$\eta = \frac{w_d - w_w}{w_w} \times 100\% , \quad (1)$$

式中, w_d , w_w 分别为试样在湿化和干化过程中相同吸力对应的含水率。回滞系数越大, 表明回滞现象越明显。

采用式(1)计算图 4 持水曲线对应的回滞系数, 结果见图 5。由图 5 可知, 试样回滞现象随前期化学循环作用逐渐弱化。如干密度为 $1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ 试样在 150 MPa 吸力条件下, 前期经历 1 次、2 次和 3 次化学循环作用后的回滞系数分别为 25.75%, 19.36% 和 11.61%, 回滞性显著减弱。将相同石墨烯掺量、相同干密度的初始压实样持水试验的回滞系数^[25]进行对比, 发现回滞性明显高于经历前期化学循环作用试样的回滞性。

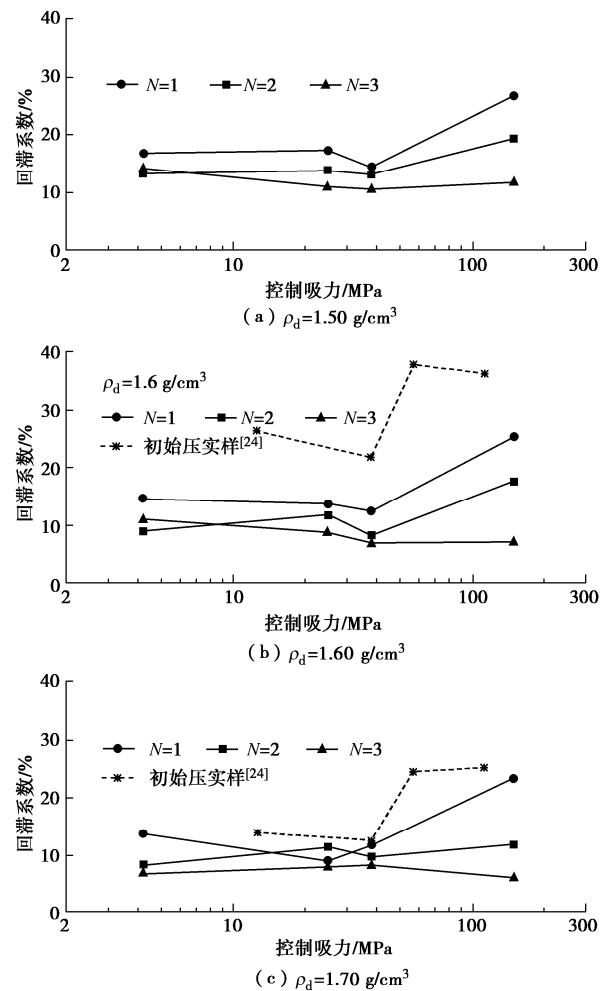


图 5 试样持水曲线的回滞性

Fig. 5 Hysteresis of water retention curve of samples

3 持水曲线拟合

3.1 模型选取及拟合

常用持水曲线模型包括 F-X 模型^[26]、B-C 模型^[27]和 V-G^[28]模型。研究表明, V-G 模型对膨润土基缓冲/回填材料持水性能预测具有良好的适用性^[29-30],为此,本文采用 V-G 模型对石墨烯改性膨润土的持水曲线进行描述:

$$S_r = [1 + (a\psi)^n]^{-m} \quad (2)$$

式中: S_r 为土体饱和度; ψ 为土的吸力 (MPa); a , n , m 均为拟合参数, a 与进气值相关 (MPa^{-1}), n 与土的孔径分布有关, m 与持水曲线整体对称性有关。

根据饱和度与质量含水率关系 $S_r = \frac{w}{w_s}$ 可得

$$w = w_s [1 + (a\psi)^n]^{-m} \quad (3)$$

式中: w 为质量含水率; w_s 为饱和含水率。

考虑到图 4 中试样在湿化和干化路径下的持水曲线具有相似演化规律, 此处仅对试样干化路径持水曲线进行拟合, 结果见图 6。

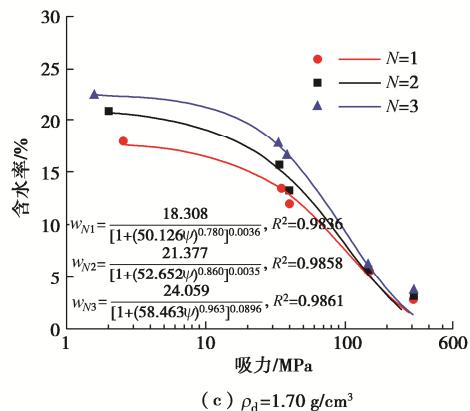
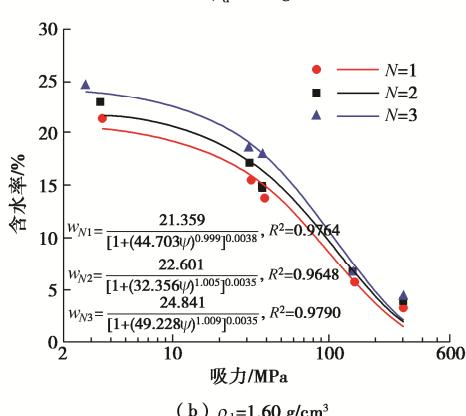
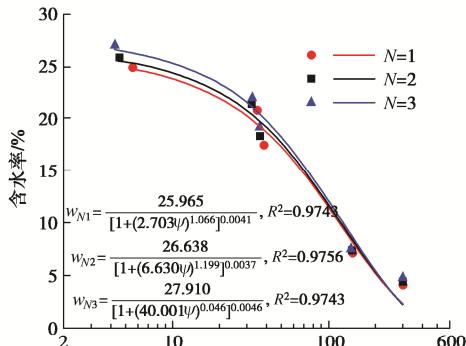


图 6 van Genuchten 模型持水曲线

Fig. 6 Water retention curves fitted by van Genuchten model

3.2 拟合结果分析

通常, 持水曲线按含水率/饱和度随吸力的变化速率分为边界效应段、过渡段和非饱和残余段, 其中进气值、过渡段斜率、饱和残余度为相应的特征参数。

如图 7 所示, 首先对持水曲线过渡段斜率不变的部分进行对数线性拟合, 并将拟合直线延长至与最大饱和度水平线相交, 交点对应吸力值即为干化持水曲线的进气值; 将非饱和残余段拟合直线与过渡段拟合直线相交, 交点对应的饱和度即为残余饱和度。如干密度为 1.60 g/cm^3 试样经历 1 次前期化学循环作用后, 干化持水曲线特征参数见图 7。

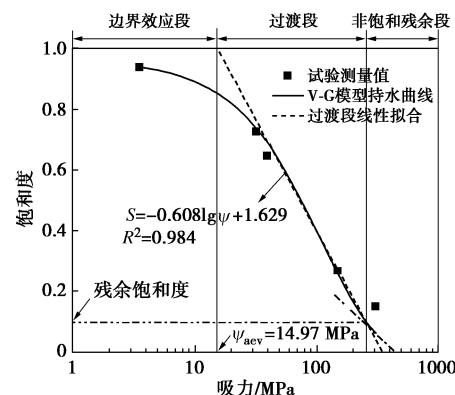


图 7 持水曲线阶段划分

Fig. 7 Division of soil-water characteristic curve stages

同样可获得其它试样持水曲线的特征参数, 结果见表 4。从表 4 可以看出, 试样进气值不仅随着前期化学循环次数增加而逐渐增大, 也随着试样干密度增大而逐渐增大, 表明前期化学循环和增大干密度均使

表 4 试样持水曲线特征参数

Table 4 Characteristic parameters of water retention curve of samples

化学循 环次数	$\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$			$\rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$			$\rho_d = 1.70 \text{ g/cm}^3$		
	进气值	过渡段斜率	残余饱和度	进气值	过渡段斜率	残余饱和度	进气值	过渡段斜率	残余饱和度
1	10.87	-0.7102	0.067	14.97	-0.6578	0.096	18.61	-0.6130	0.132
2	11.81	-0.6806	0.069	15.55	-0.5849	0.095	19.28	-0.5405	0.137
3	12.71	-0.6370	0.076	17.51	-0.5541	0.101	20.31	-0.5072	0.148

得试样孔隙内的水不易排出。同样地, 过渡段均随着前期化学循环次数和干密度增加而变得更加平缓, 表明吸力增大时孔隙水的排出速率逐渐减慢。同时, 试样残余饱和度随着前期化学循环次数和干密度增大而增大, 也证实了更多水分滞留在孔隙中。

4 前期化学循环作用影响的微观机理

试样在经历前期化学循环作用过程中, 伴随着盐分的进入与流失。盐化过程中, 盐分随着溶液入渗而进入土体孔隙, 导致孔隙水含盐量升高; 淡化过程中, 由于孔隙水与自由水含盐量的差异, 部分盐分会随着淡化过程的进行而流失, 残留的盐分则逐渐累积, 如图 8 所示。

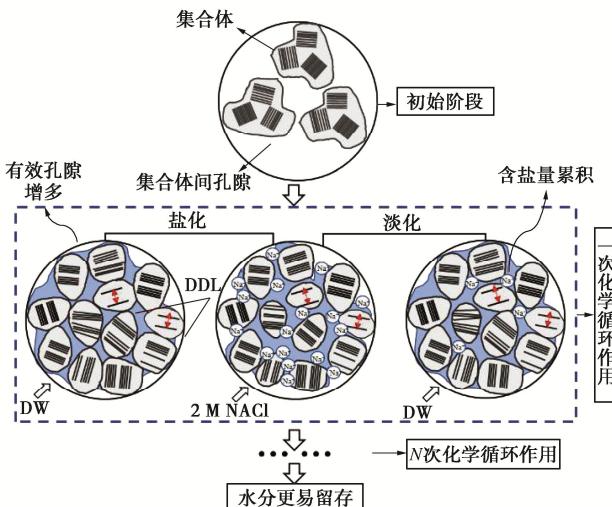


图 8 前期化学循环作用影响机理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of chemical cycle effects

随着前期化学循环次数增多, 试样中的累积盐分越来越多, 导致渗透吸力逐渐升高。实际上, 采用气相法控制土体处于相同总吸力条件时, 渗透吸力升高对应着基质吸力降低, 从而使试样含水率升高, 饱和度增大。

初始压实试样和经历 3 次化学循环作用后干化试样的环境扫描电镜照片见图 9。可以发现, 试样土经历 3 次前期化学循环作用后, 集合体间孔隙中明显出现了留存的盐分, 证实了化学循环作用导致土体孔隙中盐分累积, 进而影响其持水特性。

5 结 论

本文采用 NaCl 溶液模拟北山地下水化学条件, 对石墨烯改性 GMZ 膨润土进行盐化-淡化循环作用, 对经历化学作用的石墨烯改性膨润土开展持水性能试验, 研究前期化学循环作用对持水性能的影响规律,

得到以下 4 点结论。

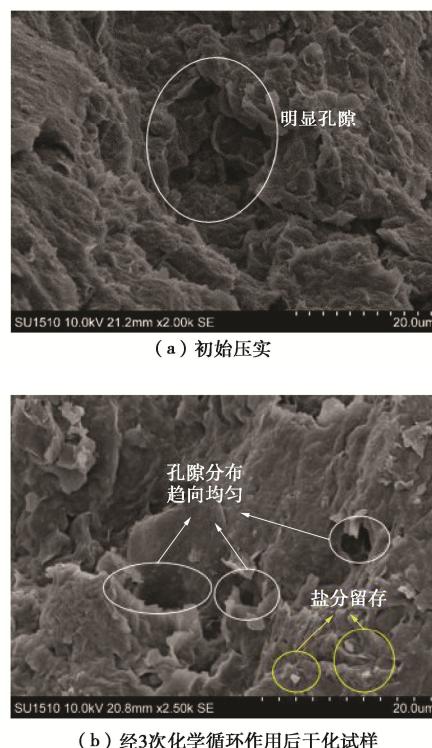


图 9 试样环境扫描电镜照片

Fig. 9 ESEM photos of samples

(1) 当吸力低于 150 MPa 时, 随前期化学循环次数增加, 石墨烯改性膨润土的持水性能不断提升, 而干密度对持水性能的影响逐渐弱化; 当吸力超过 150 MPa 时, 持水性能受前期化学循环影响不明显。

(2) 石墨烯改性膨润土的持水曲线具有明显回滞性, 但回滞性随前期化学循环次数的增加而降低, 回滞性幅度显著衰减。

(3) 随着前期化学循环次数及干密度的增加, 试样进气值、残余饱和度逐渐增大, 试样孔隙内的水不易排出, 更多水分滞留在孔隙中; 而过渡段逐渐趋缓, 吸力增大时孔隙水的排出速率逐渐减慢。

(4) 前期化学循环会导致土体内部含盐量不断累积, 循环次数越多, 渗透吸力越高, 对持水性能的影响愈发显著。

参考文献:

- [1] YE W M, CHEN Y G, CHEN B, et al. Advances on the knowledge of the buffer/backfill properties of heavily-compacted GMZ bentonite[J]. Engineering Geology, 2010, 116(1/2): 12-20.
- [2] 刘樟荣, 崔玉军, 叶为民, 等. 缓冲/回填材料: 膨润土颗粒及其混合物研究进展[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1401-1410. (LIU Zhangrong, CUI Yujun, YE Weimin, et al.)

- Advances in researches on buffer/backfilling materials—bentonite pellets and pellet mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1401-1410. (in Chinese))
- [3] CHEN Z G, TANG C S, SHEN Z T, et al. The geotechnical properties of GMZ buffer/backfill material used in high-level radioactive nuclear waste geological repository: a review[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **76**(7): 270.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] TRIPATHY S, BAG R, THOMAS H R. Enhanced isothermal effect on swelling pressure of compacted MX80 bentonite[C]//Engineering Geology for Society and Territory - Volume 6. Cham: Springer, 2015: 537-539.
- [7] YONG R N, MOHAMED A M O, SHOOSH PASHA I, et al. Hydro-thermal performance of unsaturated bentonite-sand buffer material[J]. Engineering Geology, 1997, **47**(4): 351-365.
- [8] XU L, YE W M, CHEN B, et al. Experimental investigations on thermo-hydro-mechanical properties of compacted GMZ01 bentonite-sand mixture using as buffer materials[J]. Engineering Geology, 2016, **213**: 46-54.
- [9] TAHA M R, TAHA O M E. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, **14**(10): 1190.
- [10] CHEN Y G, LIU X M, MU X, et al. Thermal conductivity of compacted GO-GMZ bentonite used as buffer material for a high-level radioactive waste repository[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, **2018**: 1-11.
- [11] COO J L, SO Z P S, NG C W W. Effect of nanoparticles on the shrinkage properties of clay[J]. Engineering Geology, 2016, **213**: 84-88.
- [12] 汪 茜, 阮 霞, 雷育雄, 等. 膨润土负载纳米铁的改性及对水中 As(V)的吸附[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(4): 65-68, 100. (WANG Qian, RUAN Xia, LEI Yuxiong, et al. Modificaion of nanoscale iron supported on bentonite and its adsorption of As(V)from aqueous solution[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(4): 65-68, 100. (in Chinese))
- [13] TAHA M R, ALSHAREF J M A, AL-MANSOB R A, et al. Effects of nano-carbon reinforcement on the swelling and shrinkage behaviour of soil[J]. Sains Malaysiana, 2018, **47**(1): 195-205.
- [14] 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.
- [15] PASHABAVANDPOURI M A, JAHANGIRI S. Effect of nano silica on swelling, compaction and strength properties of clayey soil stabilized with lime[J]. Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 2015, **5**(7S): 538-548.
- [16] CUI Y J, TANG A M. On the chemo-thermo-hydro-mechanical behaviour of geological and engineered barriers[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, **5**(3): 169-178.
- [17] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Effect of temperature on soil-water characteristics and hysteresis of compacted Gaomiaozi bentonite[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, **16**(5): 821-826.
- [18] HE Y, YE W M, CHEN Y G, et al. Influence of pore fluid concentration on water retention properties of compacted GMZ01 bentonite[J]. Applied Clay Science, 2016, **129**: 131-141.
- [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 Yonghai, YANG Tianxiao, LIU Shufen. 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] YE W M, ZHANG Y W, CHEN B, et al. Investigation on compression behaviour of highly compacted GMZ01 bentonite with suction and temperature control[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, **252**: 11-18.
- [21] CHEN Y G, DONG X X, ZHANG X D, et al. Cyclic thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted Gaomiaozi bentonite[J]. Engineering Geology, 2019, **255**: 37-47.
- [22] 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**: 454-460.
- [23] DELAGE P, MARCIAL D, CUI Y J, et al. Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach[J]. Géotechnique, 2006, **56**(5): 291-304.
- [24] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: Wiley, 1993.
- [25] 刘学敏. 石墨烯改性 GMZ 膨润土持水性与膨胀力试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2019. (LIU Xuemin. Experimental Study on Water Holding Capacity and Swelling Power of GMZ Bentonite Modified by Graphene[D]. Shanghai: Tongji University, 2019. (in Chinese))
- [26] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521-532.
- [27] BROOKS R H. Hydraulic Properties of Porous Media[D].
- Fort Collins, CO, USA: Colorado State University, 1965.
- [28] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892-898.
- [29] 刘樟荣, 叶为民, 崔玉军, 等. 基于微孔填充和毛细管凝聚理论的持水曲线模型[J]. 岩土力学, 2021, **42**(6): 1549-1556. (LIU Zhangrong, YE Weimin, CUI Yujun, et al. Water retention curve model based on micro-pore filling and capillary condensation theories[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(6): 1549-1556. (in Chinese))
- [30] HE Y, YE W M, CHEN Y G, et al. Effects of NaCl solution on the swelling and shrinkage behavior of compacted bentonite under one-dimensional conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, **79**(1): 399-410.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 220 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)