

DOI:10.11918/202310040

温度影响的吸力循环过程 GMZ 膨润土持水特征

潘东玥¹, 王琼^{1,2}, 苏薇¹, 叶为民^{1,2}, 汪洋¹

(1. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092;

2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092)

摘要: 为揭示核废料深地质处置库多重屏障系统运营过程中膨润土持水性能随水-热耦合作用的周期性变化规律, 通过温控气相平衡法和 PEG 渗析法进行了一系列单次吸力循环及多次吸力循环试验, 研究了在自由膨胀条件下吸力循环和温度对膨润土持水性的影响。基于试验所得数据对膨润土持水曲线预测模型 Van Genuchten 模型进行了修正及验证。研究结果显示: 单次吸力循环试验中, 膨润土在脱湿路径下的含水率始终高于吸湿路径, 表现出回滞现象; 随着温度的升高, 膨润土的持水能力及回滞现象均呈减弱趋势; 而随着吸力或循环次数的增加, 回滞现象和温度对持水能力的影响均减弱; 在多次循环试验中, 每次循环中试样均可累积含水率, 但多次脱湿-吸湿循环相比于多次吸湿-脱湿循环表现出更强的累积能力, 且每次循环含水率的累积随温度升高或循环次数增加而减少。修正后的 Van Genuchten 模型同时考虑了温度效应和吸湿或脱湿路径的影响, 并且该模型预测结果与试验数据误差在 5% 以内, 证实了其可靠性。

关键词: 膨润土; 土水特征曲线; Van Genuchten 模型; 吸力循环; 温度效应

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)11-0036-09

Temperature affected water retention characteristics of GMZ bentonite during suction cycle

PAN Dongyue¹, WANG Qiong^{1,2}, SU Wei¹, YE Weimin^{1,2}, WANG Yang¹

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

2. United Research Center for Urban Environment and Sustainable Development, the Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: To reveal the periodic changes in the water retention capacity of bentonite caused by the coupling of hydraulic and temperature during the operation of the multiple barrier system in the nuclear waste deep geological disposal repository, this work conducted a series of single/multiple suction cycle tests with temperature-controlled vapor equilibrium method and PEG dialysis method. The effects of the suction cycle and temperature on the water retention capacity of bentonite under free swelling conditions were investigated. Based on the test data, the Van Genuchten model for predicting the water retention curve of bentonite was modified and validated. Results show that in the single suction tests, the water content upon the drying path was always higher than that upon the wetting path, exhibiting hysteresis. As the temperature rising, the water retention capacity and hysteresis showed a decreasing trend. As the suction or cycle increasing, the hysteresis and thermal effect on water retention both decreased. In the multiple suction cycle tests, accumulation of water content was observed in each cycle. However, the multiple drying-wetting cycle accumulated more water content. As cycle increasing, the accumulation of water in each cycle decreased. The modified Van Genuchten model takes into account both temperature effects and the influence of suction paths. The predicted results have an error of less than 5% compared to the test result, which confirms the reliability of the modified model.

Keywords: bentonite; water retention characteristic curve; Van Genuchten model; suction cycle; temperature effect

基于多重屏障系统的深地质处置是国际公认处置高水平放射性废物的可靠方法。膨润土由于其低渗透性、高膨胀性、强核素吸附能力以及良好的热传

导性, 被众多国家选作处置库工程屏障缓冲/回填材料^[1-4]。处置库长期运营过程中, 在库外地下水位波动和库内高放核废物衰变放热的共同影响下, 高

收稿日期: 2023-10-18; 录用日期: 2023-12-04; 网络首发日期: 2024-04-23

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240423.1037.004>

基金项目: 国家自然科学基金(42172298, 42002289, 41907231); 中央高校基本科研业务费(22120230229)

作者简介: 潘东玥(1992—), 女, 博士研究生; 王琼(1982—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 王琼, qiong.wang@tongji.edu.cn

压实膨润土将经历温度和吸力的耦合周期性变化。这种周期性的变化在引起土体含水率变化的同时还伴随着土体体积的膨胀/收缩变形,从而使得屏障系统存在破坏的风险,影响处置库长期稳定性^[5-6]。

国内外学者针对高压实膨润土含水率随吸力变化规律开展了广泛的研究,结果表明膨润土试样在吸力变化过程中,土水相互作用随着含水率变化发生改变,导致膨润土土体孔隙大小及结构发生改变,进而在宏观上表现为体积产生膨胀或收缩^[7-8];而土体孔隙结构及土水相互作用形式的变化,反过来又会影响膨润土的持水性能,且在不同的吸力范围影响机制不同。在低吸力范围,试样的持水性主要受毛细作用的影响;而在高吸力范围内,土中的自由水大量减少,毛细作用逐渐减弱,土颗粒的吸附作用占主导地位^[9]。在吸力循环过程中,由于层叠体的分裂以及集合体的崩解与聚合是不可逆过程,因此经过一次脱湿路径与吸湿路径的循环后,膨润土会产生不可逆的塑性变形,孔隙结构的改变会导致含水率存在明显的回滞现象。然而随着循环次数增多,膨润土体积变化逐渐进入弹性阶段,含水率回滞现象也随之减弱^[10-11]。

相同吸力条件下,温度对膨润土含水率也存在明显影响。大量试验结果表明,随着温度升高,压实膨润土的持水能力降低^[12],该现象的机理是土体中毛细作用或表面张力因温度升高而减弱。对相同含水率条件下膨润土吸力与温度的关系研究显示,随着温度升高,具有相同含水率的土样吸力减小。此外还发现温度引起的吸力变化量要大于温度升高过程中表面张力减小引起的吸力变化量^[13]。因此认为温度变化过程中不仅会引起土中毛细作用或表面张力减弱,还发生了其他削弱膨润土持水性的效应,例如土体结构的不可逆变形。另有研究者指出在高吸力和低吸力范围下,温度对试样含水率的影响机理是不同的^[14]。然而,上述试验中均未考虑到温湿度耦合变化对试样含水率的影响,尤其是干湿循环过程中温度对试样含水率及回滞特性的影响相关研究甚少。

本研究中,为了探究吸力循环过程中高压实膨润土含水量随吸力和温度的变化规律,在自由膨胀条件下进行了一系列温度控制的干湿循环试验。通过对试样吸力变化及平衡过程膨润土试样含水率的监测,获得了膨润土含水率变化的规律,并分析了吸力路径和温度的影响机理。基于试验结果对拓展的 Van Genuchten 模型进行了修正,分别给出了吸湿路径和脱湿路径下考虑温度的土水特征曲线修正公式,并用试验所得数据对修正后的公式进行了校验。

1 试验

1.1 试验材料及试样制备

本研究采用中国高水平放射性废物深地质处置库首选缓冲/回填材料——高庙子膨润土(GMZ)。天然条件下 GMZ 膨润土呈浅灰白色粉末状,其主要矿物成分为蒙脱石(质量分数 72.3%)、石英(15.5%)、方石英(6.9%)、长石(5.1%)。相对体积质量为 2.66, pH 为 8.68 ~ 9.86, 总比表面积为 706 m²/g, 阳离子交换量为 77.30 cmol/kg。

试样制备过程如下:首先在室温(20 ℃)条件下,将天然膨润土粉末放入底部装有 K₂CO₃ 过饱和溶液的干燥器中,通过气相法平衡吸力至 113 MPa,其原理是利用给定温度条件下,特定盐溶液上方蒸汽具有确定的相对湿度,经过长期水分交换可以使膨润土达到确定的吸力。本文用于不同温度下的过饱和盐溶液对应的吸力值采用 Tang 等(2005)^[12]的标定结果,见表 1。利用烘干法测得该状态下膨润土粉末对应的含水率约为 11.51%。试验中使用的试样为长方体试样,其目标干密度为 1.70 g/cm³,预设高度为 10 mm、长宽均为 30 mm。根据体积-密度法计算并称取相应质量的膨润土粉末置入底部垫有滤纸的不锈钢立方体模具中,并将之搅拌均匀。随后使用数控万能试验机沿试样高度方向以 0.5 mm/min 的位移速率进行压实。当试样被压实至目标高度后仍需静置 1 h,以防止试样从模具推出后产生回弹变形并保证试样的均匀性。最后将试样以 0.5 mm/min 的位移速率推出模具。每个制得的试样都需测量尺寸并称量以计算其实际的初始干密度。

表 1 不同温度下各饱和盐溶液对应吸力

Tab. 1 Suction of salt solution at different temperatures

过饱和盐溶液	吸力/MPa		
	20 ℃	40 ℃	60 ℃
LiCl ₂ 溶液	309.0	319.0	340.0
MgCl ₂ 溶液	150.0	162.4	187.7
K ₂ CO ₃ 溶液	113.0	122.0	144.8
Mg(NO ₃) ₂ 溶液	82.0	103.1	139.0
NaCl 溶液	38.0	40.6	44.2
KCl 溶液	21.0	27.8	33.4
K ₂ SO ₄ 溶液	4.2	5.1	5.5

1.2 试验装置

本试验采用可以同时控制温度和吸力的无侧限膨胀变形试验装置,如图 1 所示。本文含水率测定试验的吸力路径控制方法分高、低吸力两种情况,高

吸力控制 (≥ 4.2 MPa) 采用温控气相平衡法, 如图 1(a) 所示, 低吸力控制 (≤ 4.2 MPa) 采用温控 PEG 溶液渗析法, 如图 1(b) 所示。

1.3 试验方法

本文针对不同温度、不同吸力及吸力路径, 共设置了 9 组试验, 各组试验吸力路径如图 2 所示。

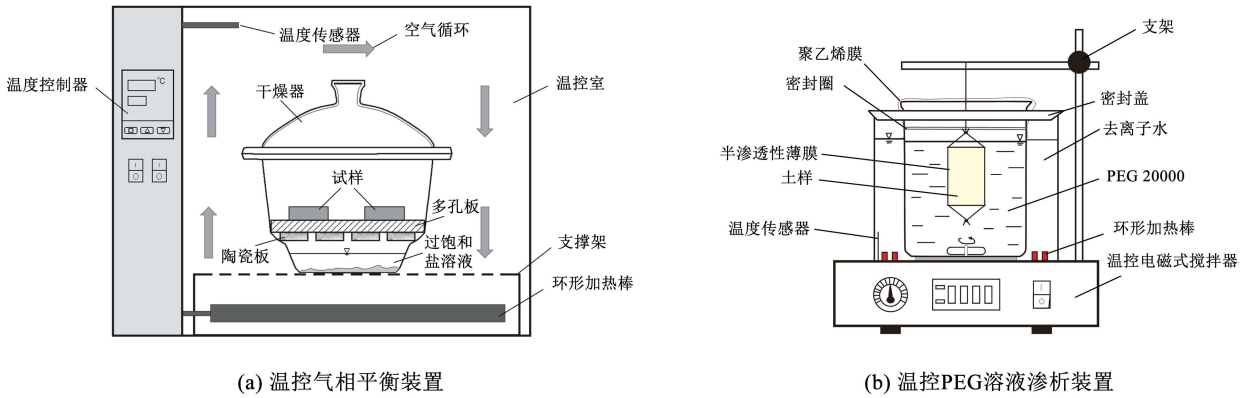
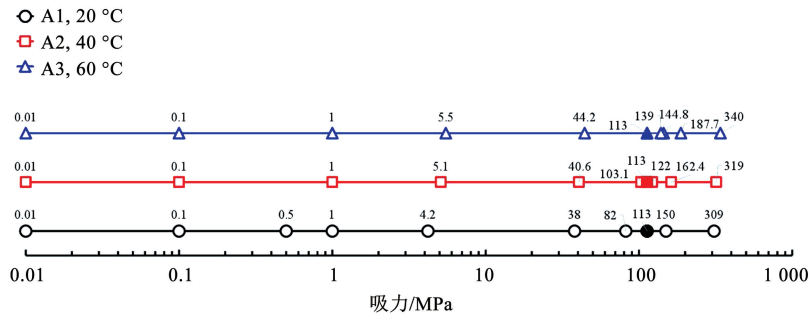
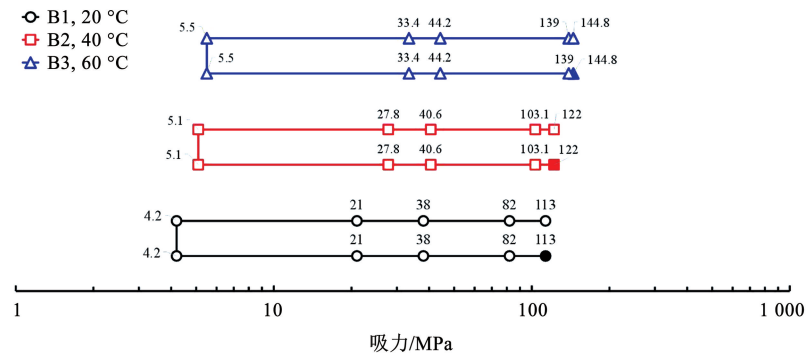


图 1 无侧限膨胀变形试验装置

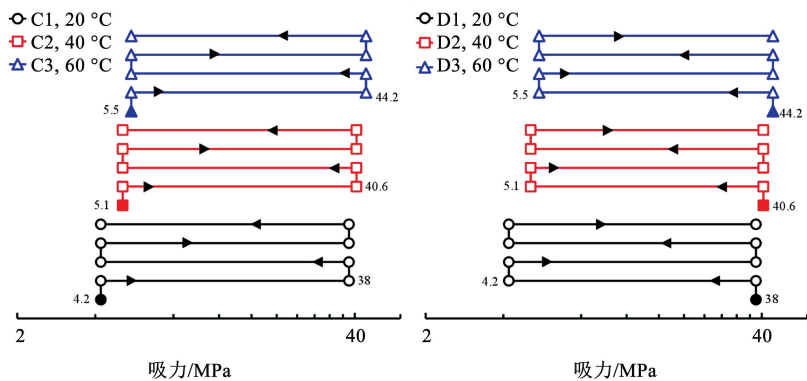
Fig. 1 Unconfined swelling deformation device



(a) 土水特征测试路径



(b) 一次循环



(c) 三次循环(干-湿/湿-干)

图 2 各温度下吸力路径

Fig. 2 Suction path at different temperatures

高吸力 (≥ 4.2 MPa) 平衡采用温控气相平衡法, 如图 1(a) 所示。通过饱和盐溶液法控制试样吸力(表 1)。在此过程中, 无法保证不同温度条件下、控制吸力值完全相同。故本文在各温度下将吸力控制在相近范围内。步骤如下: 1) 试样制备完成后, 放置于底部装满过饱和盐溶液的干燥器内的多孔玻璃板上; 2) 放置试样后, 在干燥器的玻璃盖沿涂抹凡士林, 盖上玻璃盖并确保气密性; 3) 将干燥器放入温度控制室内, 通过外设的温度控制器设置目标温度, 精度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$, 打开温控室内的空气循环系统; 4) 每隔一定时间, 使用电子秤(精度 0.000 1 g) 称量试样质量并记录, 当质量变化小于 0.01% 原始质量/d, 便认为试样含水率稳定, 可进行下一级吸力平衡, 并重复以上操作。

低吸力 (≤ 4.2 MPa) 平衡采用 PEG 渗析法, 如图 1(b) 所示。即通过孔隙水和 PEG 溶液中的浓度差使半透膜中土样与溶液进行水分子相互交换, 以此达到控制试样吸力的目的。试验采用 Spectrum 的 12-14KD 型半透膜的阻隔分子 (MWCO) 大小为 14 000, 渗透系数为 5×10^{-9} m/s。PEG 溶液浓度通过便捷式折射计直接测定 Brix 指数来获取。Brix 指数 B_r 与吸力 s (MPa) 之间的关系式为

$$B_r = \frac{90}{\sqrt{\frac{11}{s} + 1}} \quad (1)$$

具体步骤如下: 1) 将半透膜放入温水中浸泡半个小时以上, 消除半透膜保护层对试验的影响; 2) 将若干切成质量为 10 g 的土样放入浸泡后的半透膜中, 并用细线系紧半透膜两端; 3) 用聚乙烯薄膜和密封圈密封烧杯, 防止 PEG 溶液由于水分的蒸发而浓度变大; 4) 将烧杯放置于温控磁力搅拌器内, 通过水浴加热法控制环境温度 (20 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$), 并打开底部的磁力搅拌装置, 确保受热均匀, 同时加速吸力平衡; 5) 每隔一定的时间, 取出一个试样, 拆开半透膜, 利用烘干法测定试样的含水率; 6) 当试样在相邻两次测定间含水率变化小于 0.01%, 认为试样含水率稳定。

2 试验结果

2.1 温度影响的持水曲线

不同温度条件下获得的高压实膨润土持水曲线如图 3 所示。由图 3 可见, 在相同吸力条件下, 温度较高的试样具有更低的含水率, 即持水能力变弱, 曲线向下移动; 且在较低吸力范围 (< 100 MPa) 内这一现象更为明显。当吸力大于 100 MPa 时, 不同温

度下的持水曲线近似重合, 表明该吸力范围内温度对试样持水性能的影响微弱。

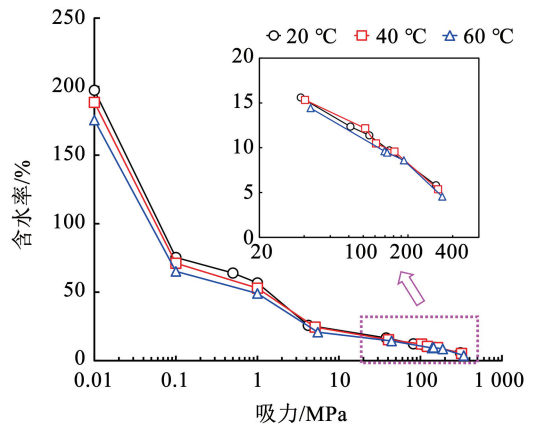


图 3 温度影响的无侧限高压实膨润土水特征曲线

Fig. 3 Soil water retention characteristic curves of unconfined compacted bentonite under different temperatures

2.2 温度影响的干湿循环过程含水率变化

图 4 绘制了干湿循环过程中试样含水率时程曲线。在吸力平衡过程中, 含水率首先经历迅速增加(吸湿路径)或减少(脱湿路径)的过程, 随后变化速率降低并趋于稳定。温度升高, 相同吸力下试样的含水率降低, 说明温度的升高对样品的持水能力具有一定的抑制作用。比较不同温度条件下试样达到吸力平衡的时间(图 5), 可以发现每级吸力下试样的平衡时间均随温度的升高而缩短, 说明无论是吸湿还是脱湿路径, 温度升高均会促进样品与环境之间的水分交换, 使试样更快达到吸力平衡。

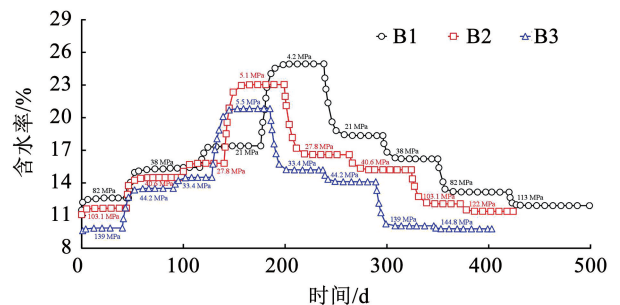


图 4 不同温度下吸力循环过程中含水率时程曲线

Fig. 4 Evolution of water content over time during suction cycle under different temperatures

每一级吸力到达平衡后试样的最终含水率如图 6 所示。同一吸力下, 吸湿路径上试样的含水率低于脱湿路径, 这一差异在较低吸力更为显著, 吸湿曲线与脱湿曲线因含水率差异形成回滞环, 回滞现象说明吸湿过程中部分吸收的水分滞留在土体内未能因脱湿而排出。

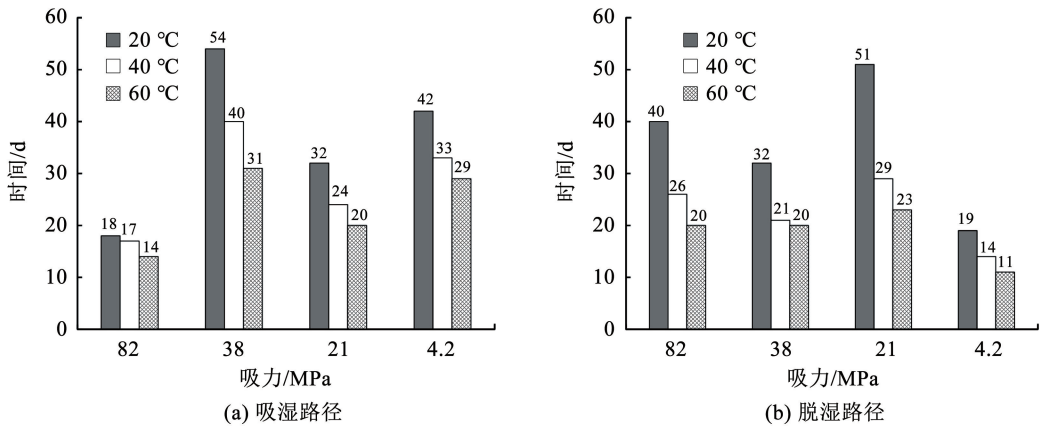


图 5 吸湿/脱湿路径下每个阶段含水率达到平衡所需时间
Fig. 5 Time of suction equilibrium at each stage

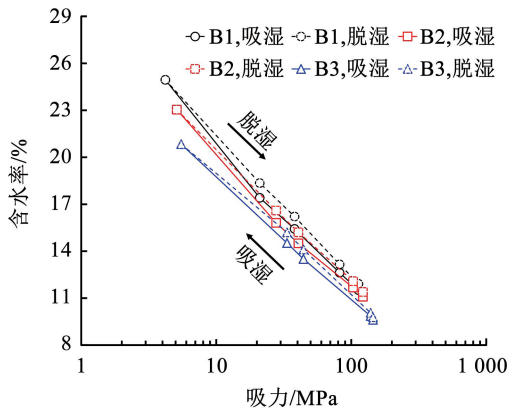


图 6 温度影响下吸湿/脱湿路径含水率变化

Fig. 6 Water content evolution of different wetting-drying cycle paths under different temperatures

引入回滞系数 η 的概念以定量研究试样干湿循环过程中回滞特性及温度和吸力对其影响^[14-15]。即对于确定的吸力点,有

$$\eta = \frac{\omega_d - \omega_w}{\omega_w} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ω_d 、 ω_w 分别为吸湿曲线与脱湿曲线上相同吸力点所对应的含水量。

根据式(2)可知回滞系数 η 越大,回滞特性越明显。图 6 中回滞环所对应的回滞系数在不同温度下随吸力变化如图 7 所示。由图 7 可见,相同温度条件下, η 随吸力的增大而减小,即吸力增大,高压实膨润土的回滞性减弱。相同吸力条件下,较高温度下的试样具有较低的回滞系数 η ,表明温度升高使得膨润土的回滞行为减弱。

2.3 温度影响下多次干湿循环过程含水率变化规律

图 8 反映了不同温度条件下试样在经历 3 个吸湿-脱湿循环或 3 个脱湿-吸湿循环过程中含水率的变化情况。结果显示,各温度条件下不同吸力循

环路径下均发生含水率的累积,且经历脱湿-吸湿循环的试样最终累积的含水率高于经历吸湿-脱湿循环的试样。各试样在每级吸力平衡后的含水率则绘制于图 9。由图观察到不同吸力循环路径下温度较高的试样含水率均较小,这说明温度升高削弱了压实膨润土在吸力循环过程中的持水能力。此外,所有试样在每个循环结束后的含水率均高于上一个循环,即每个循环过程都存在含水率的累积。

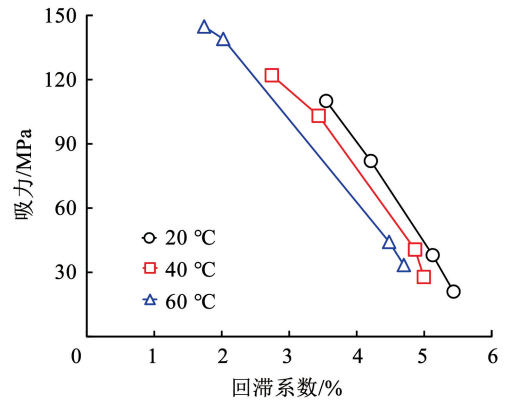


图 7 温度影响的回滞系数

Fig. 7 Hysteresis coefficient affected by temperature

多次干湿循环试验中各试样经历每次循环后的回滞系数 η 绘制于图 10。在两种循环路径下,回滞系数均随着循环次数的增加而减小;相同循环路径下,回滞系数随温度的升高而减小。即随着循环次数的增加或温度的升高,含水率的累积能力均减弱。此外,还可发现相同温度条件下,脱湿-吸湿路径试样的回滞系数均小于吸湿-脱湿路径,这与单次循环过程中观察到的高吸力(干)时的回滞性弱于低吸力(湿)时的现象一致。

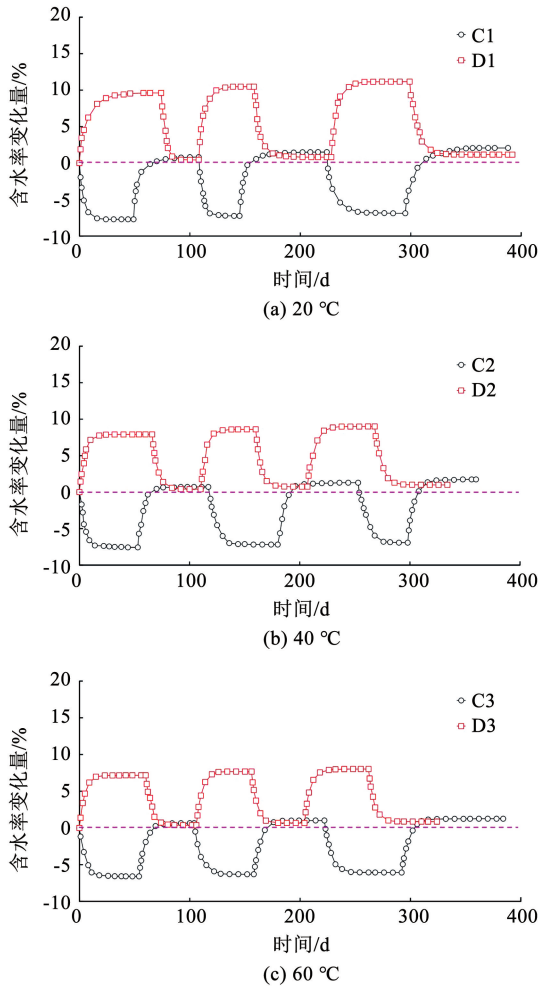


图 8 吸力循环过程中含水率随时间变化曲线

Fig. 8 Evolution of water content over time during suction cycles

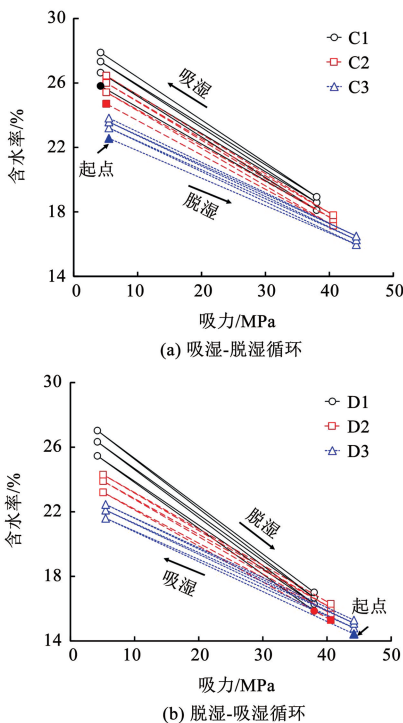


图 9 温度影响下不同循环路径对含水率的影响

Fig. 9 The influence of different suction cycle paths on water content under different temperatures

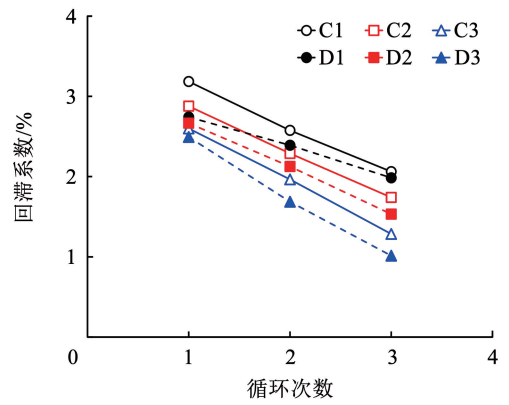


图 10 温度影响下不同循环次数下的回滞系数

Fig. 10 The relationship between hysteresis coefficient and cycle numbers under different temperatures

3 讨论

3.1 温度对持水特征的影响机制

研究表明,温度升高引起蒙脱石晶格内阳离子水合厚度减小,集合体内吸附水转变为集合体间的自由水进入大孔隙^[12-13]。较低吸力下由于大孔隙在一定吸力下持水能力一定,因升温转化而进入大孔隙的自由水难以在大孔隙滞留而被排出,导致膨润土含水量降低(图 3)。此外温度升高导致孔隙中自由水的黏滞系数降低,自由水的流动性增强更易排出孔隙,也是膨润土含水量降低的原因之一^[16-18]。处于高吸力状态的试样,对应其持水曲线的残余含水率阶段,此时土体内几乎不存在自由水,结合水含量也极为有限,温度升高后能够转变的自由水极少,因此图 3 中观察到温度在高吸力阶段对试样持水性能的影响并不明显^[19]。

3.2 吸力路径对干湿循环过程含水率变化的影响规律

单次干湿循环过程中,自由水进出晶层间孔隙与集合体内孔隙(小孔隙)比进入集合体间孔隙(大孔隙)困难。因此吸湿过程中进入小孔隙中的自由水,在脱湿过程中产生滞留,未能完全排出^[20]。同时,文献[22-23]指出,膨润土在吸湿过程中大量水分子进入晶层之间,层叠体会发生不可逆的分裂,这一现象在土体吸力低于 38 MPa 时更加显著,由此使得大孔隙增多,在脱湿路径下能够容纳更多的孔隙水。因此试样在脱湿路径的含水率要高于吸湿路径(图 6)。高吸力条件时,土体中水分大多以结合水的形式存在,而回滞现象主要由自由水导致,因此回滞现象并不明显^[21](图 7)。同样,多次循环试验中,由于每次吸湿过程均有不可逆的层叠体分裂,产生的额外的孔隙,使得试样经历三次干湿循环的含水率逐次增加(图 9)。虽然多次脱湿-吸湿循环试

验中先脱湿再吸湿,但由于其吸湿过程吸力低于 38 MPa,累积的额外孔隙较为显著,因此最终循环过程仍表现为含水率的累积。但随着干湿循环次数增加,层叠体分裂趋近于完全,膨润土累积的不可逆的体积膨胀逐渐减少,最后进入弹性状态^[24-27]。因此随着循环次数的增加,每次循环累积的含水率增量都会减少,表现为回滞系数的减小(图 10)。此外,多次脱湿-吸湿循环试验由于初始吸力较低,累积的孔隙都处于充满水的状态,而由于初始吸力较高,多次吸湿-脱湿循环试验累积的孔隙中仅较小的孔隙充满水。因此多次脱湿-吸湿循环试验最终累积的含水率高于多次吸湿-脱湿循环试验(图 8)。

3.3 温度影响的干湿循环过程含水率变化机制

温度升高一方面减少了膨润土体内结合水的含量,使得相同吸力下可以交换的水分减少^[12];另一方面温度升高减小了水的黏滞性^[28],加快了水分子的运动。从而导致温度升高加快了吸力平衡的进程(图 5)。温度升高减少了膨润土试样体内结合水的

含量使得试样中孔隙通道的连通性增强,因此在脱湿路径中能排出更多的水分。并且温度升高使得膨润土与水分子结合能力减弱,减弱了层叠体的分裂,从而减少了吸湿过程中不可逆体积膨胀量。上述两个原因使得温度升高,回滞系数 η 降低,膨润土的回滞行为为减弱^[29](图 7、10)。

3.4 考虑温度影响的土水特征模型

为了进行水-热耦合分析,需要建立考虑温度的土水特征模型。参考 Jacinto^[30] 拓展的 Van Genuchten 模型^[31]对试验所得 B1、B2、B3 的吸湿和脱湿路径分别进行拟合。公式如下:

$$\frac{\omega - \alpha}{\beta - \alpha} = \frac{1}{[1 + (m \times S)^n]^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (3)$$

式中: ω 为某一吸力下的含水率; S 为土体吸力,MPa; α 、 β 、 m 、 n 均为拟合参数。

对于不同温度下试样吸湿和脱湿路径下得到的拟合曲线如图 11 所示,拟合参数及相关系数见表 2。

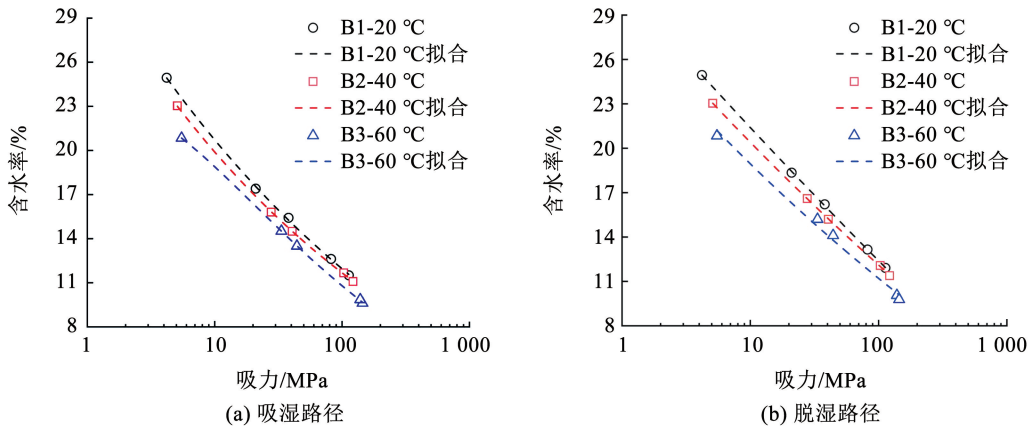


图 11 试验实测值及拟合曲线

Fig. 11 Measured values and fitting curves

表 2 模型拟合参数及相关系数

Tab. 2 Fitting parameters and correlation coefficient

吸力路径	试样编号	α	β	m	n	R^2
吸湿路径	B1	-8.338	79.646	121.647	1.156	1
	B2	-4.781	81.364	121.937	1.176	1
	B3	1.023	83.747	123.055	1.203	0.979
脱湿路径	B1	-123.58	51.168	81.985	1.028	1
	B2	-46.462	51.867	81.561	1.058	1
	B3	-26.607	51.872	83.435	1.081	0.993

从表 2 可以发现,温度升高, β 、 m 、 n 参数数值变化不大,而拟合参数 α 值受温度影响变化明显,将各个温度下参数 α 的值绘制于图 12 中,并进行拟合。

图 12 表明拟合参数 α 与温度在吸湿和脱湿路径下的关系分别为

$$\alpha = 0.004t^2 - 0.037t - 9.030 \text{ (吸湿路径)} \quad (4)$$

$$\alpha = -0.072t^2 - 8.151t - 257.961 \text{ (脱湿路径)} \quad (5)$$

式中: α 为拟合参数; t 为摄氏温度,℃。

将拟合获得的参数分别代入模型中,修正后的考虑温度影响的膨润土土水特征模型为

$$\frac{\omega - \alpha}{81.56 - \alpha} = \frac{1}{[1 + (122.21 \times S)^{1.18}]^{1 - \frac{1}{1.18}}} \text{ (吸湿路径)} \quad (6)$$

$$\frac{\omega - \alpha}{51.66 - \alpha} = \frac{1}{[1 + (82.32 \times S)^{1.06}]^{1 - \frac{1}{1.06}}} \text{ (脱湿路径)} \quad (7)$$

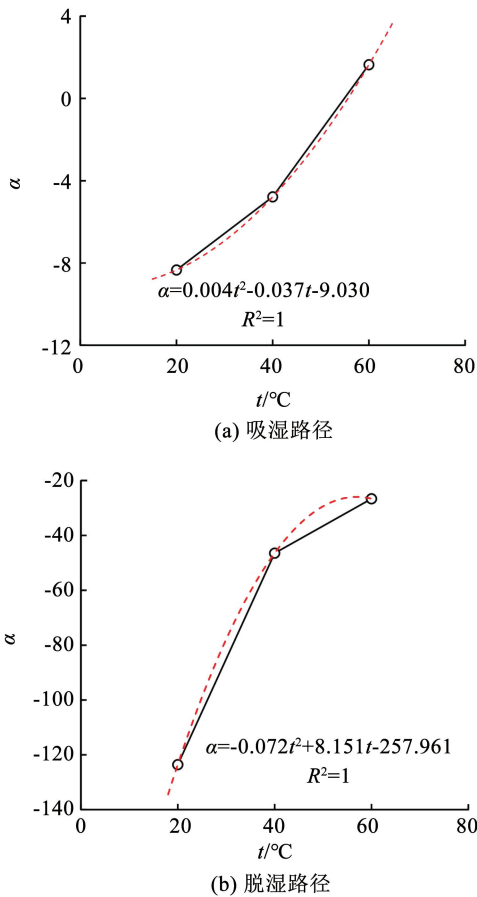


图 12 膨润土土水特征模型拟合参数 α 随温度 t 变化及其拟合曲线

Fig. 12 The fitting relationship between α and temperature

为了进一步验证该土水特征模型的可靠性,对 D1、D2、D3 试验中试样的第一个干湿循环路径的含水率进行预测,并与试验中得到的实际含水率进行对比,结果如图 13 所示。

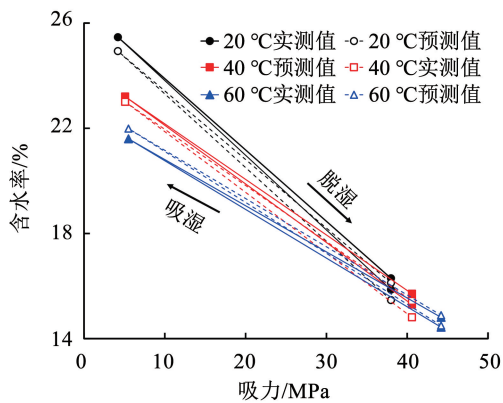


图 13 试样湿-干循环过程中实测值与预测值对比

Fig. 13 Comparison of measured and predicted water content during the wetting-drying cycle of the sample

由表 3 对比发现,修正后的模型预测值和实测值的误差均小于 5%,可以很好地预测不同吸力路径及不同温度下压实膨润土试样的含水率,同时可以明显地表征出吸力湿-干循环过程中的回滞现象。

表 3 试样干湿循环过程中实测值与预测值对比及误差
Tab. 3 Comparison and error between measured and predicted water content during the dry wet cycle of the sample

温度/°C	吸力/MPa	含水率实测值/%	含水率预测值/%	相对误差/%
20	38.0	15.859	15.463	2.494
	4.2	25.465	24.932	2.094
	38.0	16.294	16.116	1.087
40	40.6	15.295	14.810	3.177
	5.1	23.204	23.003	0.868
	40.6	15.703	15.431	1.730
60	44.2	14.434	14.497	0.438
	5.5	21.600	21.986	1.787
	44.2	14.809	14.889	0.543

4 结 论

本研究以压实膨润土为研究对象,在自由膨胀条件下进行了一系列温度控制的干湿循环试验。对试验过程中高压实膨润土试样的含水率变化进行了监测,得出以下主要结论:

1) 试验过程中观察到在任何吸力路径下,温度都会削弱膨润土的持水性能力。这一削弱作用在小于 100 MPa 的较低吸力范围更为明显,当含水率在 100 MPa 以上的残余含水率阶段,这一作用不显著。

2) 在单次循环或多次循环中,均可以观察到膨润土含水率的回滞现象。引入回滞系数 η 进行定量分析,回滞现象随吸力增大或温度升高而减弱。对多次循环中含水率回滞现象的观察发现,循环次数越多,回滞现象越弱。此外还观察到试样在吸湿-脱湿路径的三次循环中的回滞系数小于脱湿-吸湿路径。

3) 利用单次干湿循环过程中的含水率-吸力数据对 Van Genuchten 模型进行了修正。在吸湿和脱湿路径下分别给出了考虑温度的膨润土土水特征曲线修正公式。采用多次干湿循环试验中初次循环的数据对修正后的公式进行验证的结果表明,该公式能够可靠地预测不同吸力路径及不同温度下压实膨润土试样的含水率。

参考文献

[1] PUSCH R. Highly compacted sodium bentonite for isolating rock-deposited radioactive waste products [J]. Nuclear Technology, 1979, 45(2): 153. DOI: 10.13182/NT79-A32305

[2] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 478. DOI: 10.1139/t94-057

[3] CUI Y J, TANG A M, LOISEAU C, et al. Determining the unsaturated hydraulic conductivity of a compacted sand-bentonite mixture under constant-volume and free-swell conditions [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, 33: S462. DOI:

- 10.1016/j.pce.2008.10.017
- [4] 刘月妙, 陈璋如. 内蒙古高庙子膨润土作为高放废物处置库回填材料的可行性[J]. 矿物学报, 2001, 21(3): 3
LIU Yuemiao, CHEN Zhangru. Bentonite from Gaomiaozhi, Inner Mongolia as an ideal buffer/backfilling material in handling highly radioactive wastes—a feasibility study[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21(3): 3. DOI: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2001.03.066
- [5] WANG Q, TANG A M, CUI Y J, et al. The effects of technological voids on the hydro-mechanical behaviour of compacted bentonite-sand mixture[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(2): 232. DOI: 10.1016/j.sandf.2013.02.004
- [6] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Temperature effects on the swelling pressure and saturated hydraulic conductivity of the compacted GMZ01 bentonite [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68: 281. DOI: 10.1007/s12665-012-1738-4
- [7] 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
YE Weimin, HUANG Hongwei, CHEN Bao, et al. Diffuse double layer theory and volume change behavior of densely compacted Gaomiaozhi bentonite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1899. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.07.025
- [8] 叶为民, 钱丽鑫, 陈宝, 等. 高压实高庙子膨润土的微观结构特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 31
YE Weimin, QIAN Lixin, CHEN Bao, et al. Characteristics of micro-structure of densely compacted Gaomiaozhi bentonite [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(1): 31
- [9] ALONSO E E, PEREIRA J M, VAUNAT J, et al. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils [J]. Géotechnique, 2010, 60(12): 913. DOI: 10.1680/geot.8.P.002
- [10] 孙德安, 张俊然, 吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1839
SUN Dean, ZHANG Junran, LÜ Haibo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1839. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.07.005
- [11] SAMINGAN A S. An experimental study on hydro-mechanical characteristics of compacted bentonite-sand mixtures [D]. Weimar, Germany: Bauhaus-Universität Weimar, 2005
- [12] 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. DOI: 10.1139/t04-082
- [13] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Temperature effects on water retention and water permeability of an unsaturated clay [M]// Unsaturated Soils for Asia. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000: 433
- [14] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Effect of temperature on soil-water characteristics and hysteresis of compacted Gaomiaozhi bentonite[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(5): 821. DOI: 10.1007/s11771-009-0136-x
- [15] YE W M, BORRELL N C, ZHU J Y, et al. Advances on the investigation of the hydraulic behavior of compacted GMZ bentonite [J]. Engineering Geology, 2014, 169: 41. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.11.003
- [16] HOPMANS J W, DANE J H. Temperature dependence of soil hydraulic properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(1): 4. DOI: 10.2136/sssaj1986.03615995005000010001x
- [17] CONSTANTZ J, MURPHY F. The temperature dependence of ponded infiltration under isothermal conditions [J]. Journal of Hydrology, 1991, 122(1/2/3/4): 119. DOI: 10.1016/0022-1694(91)90175-H
- [18] 郑文忠, 黄文宣, 王英, 等. 高温对黏土砖砌体抗压强度影响研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 192
ZHENG Wenzhong, HUANG Wenxuan, WANG Ying, et al. Influence of high temperature on compressive strength of clay brick masonry: a literature review [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(11): 192. DOI: 10.11918/201907084
- [19] AL-MUKHTAR M, QI Y, ALCOVER J F, et al. Oedometric and water-retention behavior of highly compacted unsaturated smectites [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 675. DOI: 10.1139/99-035
- [20] NOWAMOOZ H, JAHANGIR E, MASROURI F, et al. Effective stress in swelling soils during wetting drying cycles[J]. Engineering Geology, 2016, 210: 33. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.05.021
- [21] ROMERO E, VAUNAT J. Retention curves of deformable clays [M]// Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000: 99
- [22] SAIYOURI N, TESSIER D, HICHER P Y. Experimental study of swelling in unsaturated compacted clays[J]. Clay Minerals, 2004, 39(4): 469. DOI: 10.1180/0009855043940148
- [23] ZHU Y H, YE W M, WANG Q, et al. Anisotropic volume change behaviour of uniaxial compacted GMZ bentonite under free swelling condition [J]. Engineering Geology, 2020, 278: 105821. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105821
- [24] ROBINET J C, RAHBAOUI A, PLAS F, et al. A constitutive thermomechanical model for saturated clays [J]. Engineering Geology, 1996, 41(1/2/3/4): 145. DOI: 10.1016/0013-7952(95)00049-6
- [25] DENG Y F, TANG A M, CUI Y J, et al. Laboratory hydro-mechanical characterization of boom clay at Essen and Mol [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2011, 36(17/18): 1878. DOI: 10.1016/j.pce.2011.10.002
- [26] 刘平, 谢文鹏, 徐崇轩, 等. 蒙脱石膨胀特性及水化机理分子模拟研究[J]. 世界核地质科学, 2023, 40(增刊1): 598
LIU Ping, XIE Wenpeng, XU Chongxuan, et al. Molecular simulation of the expansion characteristics and hydration mechanism of montmorillonite[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(Sup.1): 598. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0636.2023.S1.017
- [27] 于泽溪, 李育超, 陈冠年. 钠质膨润土渗透性与膨胀性及可塑性的相关性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 97
YU Zexi, LI Yuchao, CHEN Guannian. Correlation between permeability, swelling, and plasticity of sodium bentonite [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(11): 97. DOI: 10.11918/201907039
- [28] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite [J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1/2/3/4): 337. DOI: 10.1016/j.clay.2003.12.026
- [29] 李昆鹏, 陈永贵, 叶为民, 等. 高压实膨润土孔隙结构特征研究进展[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 399
LI Kunpeng, CHEN Yonggui, YE Weimin, et al. Advances in studies on pore structure of highly compacted bentonite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 399. DOI: 10.11779/CJGE202203001
- [30] JACINTO A C, VILLAR M V, GOMEZ-ESPINA R, et al. Adaptation of the Van Genuchten expression to the effects of temperature and density for compacted bentonites [J]. Applied Clay Science, 2009, 42(3/4): 575. DOI: 10.1016/j.clay.2008.04.001
- [31] GENUCHTEN V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x