

DOI:

不同温度下环向接缝中膨润土膨胀性能试验研究

闫旭升^{1,2}, 王琼^{*1,2}, 苏薇^{1,2}, 叶为民^{1,2}, 张丰收^{1,2}, 刘宜春^{1,2}

(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)

摘要: 为研究环向施工接缝中温度对膨润土膨胀性能及其微观结构演化的影响, 在不同温度条件下对环向施工接缝中压实膨润土开展膨胀力试验, 并在接缝封闭后进行含水率、干密度和孔隙结构测试, 分析膨胀性能与微观结构演化的联系。结果表明: 膨胀力时程曲线呈现单峰型, 先增至峰值后下降并最终趋于稳定。膨润土膨胀过程动力学平衡由结合水膜增厚、层叠体裂解、孔隙坍塌和扩散双层增厚所形成的“楔”力主导, 导致膨润土从竖向侧限到恒体积的受力状态演化。在高温条件下, 试样内部含水率梯度增大、干密度梯度减小的趋势更加明显。随着温度升高, 蒙脱石膨胀系数和水分子扩散系数增加, 加速了蒙脱石水化膨胀, 更多孔隙被膨胀后的蒙脱石占据。较高温度下, 水分子进入蒙脱石层间, 促进了水化反应、层叠体裂解和孔隙坍塌, 进而降低了总孔隙比并增强了膨润土膨胀性能。

关键词: 压实膨润土; 温度; 施工接缝; 膨胀力; 孔隙结构; 水化膨胀

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号:

作者简介: 闫旭升 (1997—), 男, 博士研究生, 主要从事土体多场耦合理论与屏障性能方面的研究工作。E-mail: yanxusheng@tongji.edu.cn。

Experimental study on swelling properties of compacted bentonite in an annular technological void under different temperatures

YAN Xusheng^{1,2}, WANG Qiong^{1,2}, SU Wei^{1,2}, YE Weimin^{1,2}, ZHANG Fengshou^{1,2}, LIU Yichun^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate the swelling properties and microstructure evolution of compacted bentonite in an annular technological void under different temperatures, swelling pressure test was conducted on compacted bentonite in an annular technological void. After technological void was closed, water content, dry density and microstructures was determined respectively. Results showed that the swelling pressure time-history curve shows a single-peak pattern, initially rising to the peak before falling and stabilizing. The dynamic equilibrium of the “wedge” force, formed by the thickening of bound water film, laminar cleavage, pore collapse and thickening of diffusion double layers, dominated the force states from the vertical lateral limit to the constant volume. Higher temperatures intensified the increase water content and decrease dry density from the interior to the exterior. The swelling behavior was enhanced by the increase in montmorillonite expansive coefficient and water molecule diffusive coefficient with temperature, leading to more inter-assemblage pores being occupied by the swollen matrix. At higher temperatures, more water molecules entered the interlayers, causing higher hydration reactions, lamellar cleavage, and pore collapse, which reduced the total void ratio and enhanced the swelling properties.

Key words: compacted bentonite; temperature; technological void; swelling pressure; pore structure; hydration expansion

0 引言

高放废物深地质处置库是基于天然屏障(围岩)和工程屏障构成的多重屏障体系^[1], 被认为是处理放射性废料的**最佳方式**。我国在甘肃玉门市建立了如图1所示的高放废物深地质处置地下实验室。堆砌在围岩和废物罐体之间的膨润土**块体**在地下水影响下会逐渐充填封闭废物罐体、膨润土块体和围岩之间留存的施工接缝, 抵抗原位围岩应力、防止废物罐体倾斜损

坏、阻滞放射性核素迁移、保障工程屏障完整性及与人类生存环境永久隔离^[2]。因此, 压实膨润土的膨胀性能需满足: 1) 能够充填并封闭周围施工接缝; 2) 对废物罐体和围岩不会产生破坏^[3]。事实上, 压实膨润

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172298, 42002289); 国家重点研发计划项目课题(2019YFC1509900); 中央高校基本科研业务费项目(22120230229); 中国博士后科学基金面上项目(2022M722428)。

收稿日期: 2024-9-22

***通信作者** (E-mail: qiong.wang@tongji.edu.cn)

土的膨胀性能不但受控于近场水环境和自身多尺度微观结构,而且长期处于高放废物衰变热消散引起的温度场中,导致其膨胀性能和屏障能力不断变化,最终影响施工接缝封闭所形成密闭环境的有效性^[4]。由此可见,明确温度影响下膨润土的膨胀性能,特别是施工接缝封闭过程中膨胀力及其微观结构变化,对膨润土屏障功能的设计和实现意义深远。

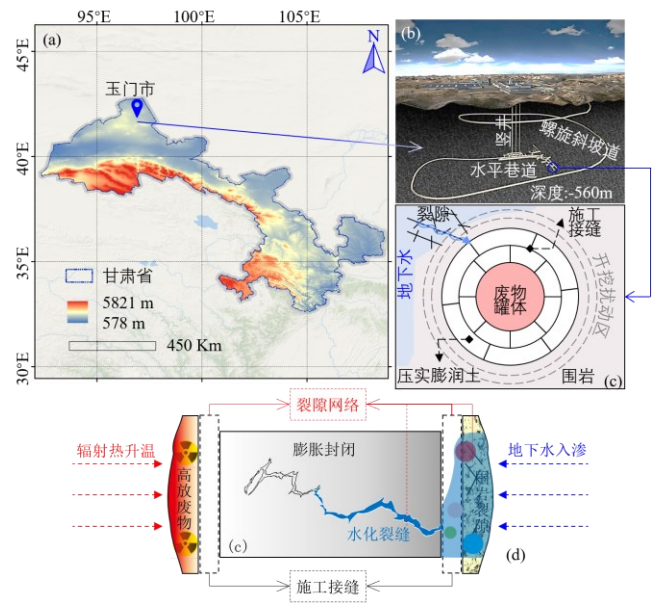


图 1 高放废物深地质处置概念图及近场环境^[3]

Fig. 1 Schematics and field environments for deep geological repositories of high-level nuclear wastes^[3]

目前国内外学者对膨润土膨胀力展开的大量研究主要集中于最终膨胀力的大小^[1,2]。近年来,研究人员普遍意识到,在恒体积条件下膨胀力先快速增加至峰值,然后降低并最终趋于稳定^[4]。Ruan 等^[5]根据 Kunigel-V1、Volclay 和 Kunibond 三种压实膨润土膨胀力时程曲线划分了峰值 (P_{peak})、谷值 (P_{valley})、次峰值 ($P_{re-peak}$) 和平衡值 (P_{eq}) 四个参数,发现其随温度增加而增大,结合蒙脱石水化机理确定了膨胀力时程曲线的增长段、跌落-增长段和稳定段,最终将温度对膨胀力的影响归结为层间膨胀、粒间膨胀、自由水膨胀和矿物热膨胀之间的相互竞争。Ye 等^[4]研究发现,温度会强化膨润土屏障材料的水合作用,而施工接缝则增加了膨胀空间,从而削弱了膨胀力^[6]。针对钙基膨润土的试验结果则表明温度增加导致膨胀力降低^[7]。Villar^[8]在调查 FEBEX 膨润土膨胀力演化时发现,升温导致 FEBEX 膨润土膨胀力降低的同时提升了渗透性能。Push^[9]指出温度影响了膨润土的膨胀变形机制,Na 基膨润土的膨胀变形能力被增强,二价膨润土则减小。Karnland 等^[10]分析了温度效应下膨润土的吸湿行为并总结了膨胀屈服机制。Wang 等^[11]则在膨润土水化开裂观测试验中发现,饱和后试样含水率

和干密度存在明显的空间分布不均。当膨润土在施工接缝中完全膨胀后,Zeng 等^[12]在分区采样进行压汞测试后发现,大-中-小三种孔隙在时间和空间位置上存在明显的梯度差异。随水化时间增加,大孔隙逐渐减少,越靠近接缝区则对应孔隙比增加。陈等^[13]通过调整压力传感器接触状态模拟了竖向施工接缝条件,证实了在施工接缝存在时,试样从水化开始到最终稳定对应了受力状态从相对的自由膨胀过渡到各向等压状态。综上所述,虽然前人对膨润土膨胀性能已经展开了诸多研究,但较少考虑温度和施工接缝对膨胀性能的影响。现场废物罐体内核素衰变引起的放热,堆砌法必然产生的施工接缝,这些使得温度对压实膨润土封闭周围施工接缝过程中膨胀性能的影响不容忽视。

本文针对高庙子膨润土在不同温度下的膨胀行为展开研究,待试验中设定的环向施工接缝封闭后,探究膨胀力时程曲线演化与含水率、干密度和孔隙结构梯度变化间的联系,厘清温度对环向施工接缝中压实膨润土膨胀性能的影响,从膨润土水化行为、楔力演化、孔隙结构、受力状态和蒙脱石膨胀系数等角度阐明膨胀性能的温度效应及微观机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用高庙子膨润土是我国高放废物处置库的首选材料。膨润土呈灰白色,其矿物组成和基本性质见表 1 和试验前将膨润土粉末密封在盛有饱和 K_2CO_3 溶液的玻璃器当中进行气相法吸力控制直至吸力平衡。随后采用烘干法获得稳定的初始含水率。根据初始含水率 (10.05%)、目标干密度 (1.7 g/cm^3) 和目标尺寸 (直径 60.6 mm, 高度 10 mm),称量膨润土质量。然后,采用位移控制法来压制圆饼状试样,压实速率为 0.1 mm/min ,压杆到预定位置后静置 1 小时,可有效抑制卸荷回弹并降低对试验结果的影响。上述压样过程可用如下公式描述^[14]:

$$m = v\rho(1 + w) \tag{1}$$

式中, m 、 v 、 ρ 、 w 分别为制备一个圆饼状高压实膨润土所需要的粉末状膨润土质量 (g)、体积 (cm^3)、密度 (cm^3/g) 和含水率 (%)。

表 2,结果显示黏土矿物主要为蒙脱石,具有显著的膨胀性、高液限和塑性指数,较大的比表面积和较高的阳离子交换容量。大于 1 的碱性系数表明试验材料属于钠基膨润土。图 2 的粒径分布显示,经过研磨筛分后的土颗粒最大粒径小于 0.2 mm。

表 1 高庙子膨润土矿物组成

Table 1 Mineral composition of Gaomiaozhi bentonite

| 矿物类型 | 石英 | 方英石 | 长石 | 方解石 | 高岭石 | 蒙脱石 |
|------|----|-----|----|-----|-----|-----|
|------|----|-----|----|-----|-----|-----|

| | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|-------|
| 质量占比/% | 11.7 | 7.30 | 4.30 | 0.50 | 0.80 | 75.40 |
|--------|------|------|------|------|------|-------|

试验前将膨润土粉末密封在盛有饱和 K_2CO_3 溶液的玻璃器当中进行气相法吸力控制直至吸力平衡。随后采用烘干法获得稳定的初始含水率。根据初始含水率 (10.05 %)、目标干密度 (1.7 g/cm^3) 和目标尺寸 (直径 60.6 mm, 高度 10 mm), 称量膨润土质量。然后, 采用位移控制法来压制圆饼状试样, 压实速率为 0.1 mm/min , 压杆到预定位置后静置 1 小时, 可有效抑制卸荷回弹并降低对试验结果的影响。上述压样过程可用如下公式描述^[14]:

$$m = v\rho(1 + w) \quad (1)$$

式中, m 、 v 、 ρ 、 w 分别为制备一个圆饼状高压实膨润土所需要的粉末状膨润土质量 (g)、体积 (cm^3)、密度 (cm^3/g) 和含水率 (%)。

表 2 高庙子膨润土物性参数

Table 2 Physical indexes of Gaomiaozi bentonite

| 土粒相对密度 G_s | 液限 $w_L/\%$ | 塑限 $w_P/\%$ | 塑性指数 I_P | 比表面积 $S/(m^2/g)$ | 碱性系数 | 离子交换容量/(meq/g) | | | |
|--------------|-------------|-------------|------------|------------------|------|----------------|--------|-----------|-----------|
| | | | | | | K^+ | Na^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} |
| 2.66 | 313 | 38 | 275 | 570 | 1.14 | 0.55 | 37.52 | 23.18 | 10.17 |

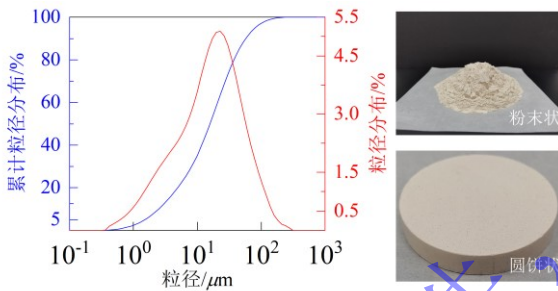


图 2 高庙子膨润土粒径分布

Fig. 2 Grain-size distribution curves of GMZ bentonite

1.2 试验装置

采用竖向膨胀力监测装置量测温控条件下压实膨润土试样在水化过程中的竖向膨胀力变化。如图 3 所示, 试验装置主要包括底座、试样仓 (内径 70 mm、高度 10 mm)、活塞、压力传感器、无纸记录仪和温度控制器。试验前对试验装置进行标定, 以确保精确记录膨胀力, 标定方法见本课题组文献^[4]。

将透水石和滤纸依次平铺在底座上, 借助密封圈保证试样仓与底座密封, 将试样放置在试样仓内, 并借助定位钢环将试样调整到试样仓中心, 施工接缝占比 k 可借助试样与试样仓的相对位置关系来描述^[15]:

$$k = (1 - \frac{V_s}{V_c}) \times 100\% \quad (2)$$

$$V = Sh = \frac{\pi D^2}{4} h \quad (3)$$

式中, V_s 和 V_c 分别为试验中试样的体积和试样仓的体积, 按照如下公式(3)计算; S 为试样仓/试样的横截面积; h 为试样仓/试样的高度; D 为试样仓/试样的直径。最终计算得到的 25% 接缝占比能够充分揭示施工接缝对于自封闭过程中膨胀性能的影响。随后, 连接控制精度在 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 Yudian AI-207 温度控制系统, 加热垫与底座紧密贴敷, 加热线圈紧密缠绕在试样仓侧壁, 以模拟处置库温度场 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $80 \text{ }^\circ\text{C}$), 试样仓内温度场的标定方法详见本课题组文献^[4,16]。

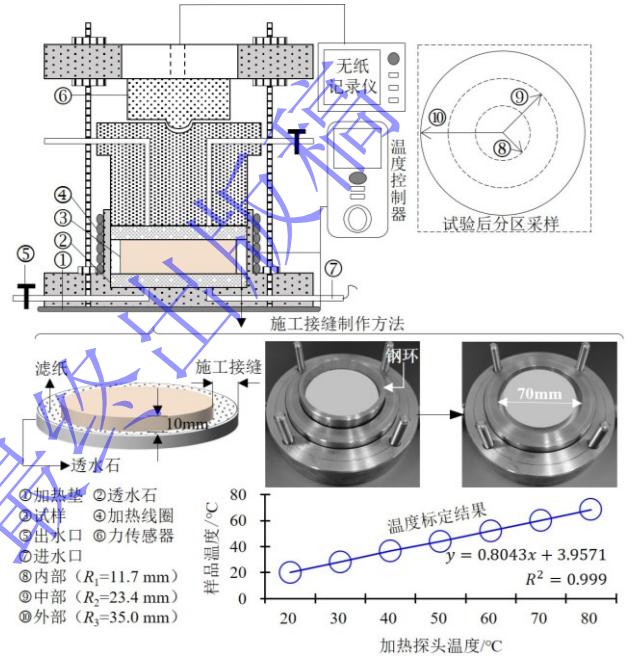


图 3 竖向膨胀力监测与施工接缝制作

Fig. 3 Schematic diagram of vertical swelling pressure monitoring and technological void fabrication

随后, 将滤纸、透水石、密封圈和活塞依次放入试样顶部, 通过螺杆将竖向压力传感器固定并保证传感器探头与活塞预压接触。当试样水化膨胀时, 竖向压力传感器能快速捕捉到膨胀力数据, 并用无纸记录仪记录膨胀力变化, 直至膨胀力在连续 24 小时内变化量小于 0.1 kPa ^[1]。

1.3 试验方法

首先, 打开底座两侧进出水阀门, 将进水阀导管放入盛有去离子水的烧杯中, 同时借助洗耳球从出水口吸气。待稳定且无气泡从出水口逸出时, 将出水口导管放入另一个盛有去离子水的烧杯中, 并保持两个烧杯水位高度一致且略高于试样顶面, 以确保施工接缝完全充水。待膨胀力稳定后, 将试样从试验仓中推出, 按照图 3 所示方法进行分圈层采样。根据《土工试验方法标准 GB/T 50123 - 2019》给出的建议, 借助烘干法和体积置换法分别获取试样的含水率 (w) 和干密度 (ρ_d) 分布特征。

$$w = \left(\frac{m_0}{m_d} - 1 \right) \times 100\% \quad (4)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1+w} = \frac{m_L \rho_L}{m_0 - m_L} \quad (5)$$

式中, m_0 为试样湿质量, m_d 为试样干质量。 ρ_w 为试样湿密度。 m_L 为试样在液体中的质量。 ρ_L 为体积置换法中所用液体的密度。同时, 假设土体的孔隙为近似圆柱形通道, 借助 Washburn 方程将压汞试验中的注入压力换算成孔径:

$$d = \frac{-4\sigma \cos \theta}{P} \quad (6)$$

式中, d 为孔隙直径。 σ 为汞的表面张力 (0.485N/m)。 θ 为汞与孔壁的接触角 (140°)。 P 为压汞法中施加给汞的压力。根据 Juang 等^[17]提出的孔径密度分布方程来做孔径分析, 以获得试样中的孔隙分布情况:

$$f(\lg d_i) = \frac{\Delta V_i}{\Delta(\lg d)} \quad (7)$$

式中, ΔV_i 为某一压力下注入的汞的体积; d_i 为某一压力所对应的孔隙体积的直径; i 为某一压力区间。

2 试验结果与讨论

2.1 膨胀力时程曲线

图 4a 表明随着去离子水逐渐渗入, 竖向膨胀力在较短时间内快速增加至峰值, 随后逐渐降低并趋于稳定。总的来看, 半对数坐标系中的膨胀力时程曲线呈现出单峰型特征, 依次出现膨胀力峰值 (P_{\max}) 和稳定的膨胀力终值 (P_{final})。据此可将膨胀力时程曲线分为增长阶段 (I)、衰减阶段 (II) 和稳定阶段 (III)。这与 Kunigel V1 膨润土^[18]和 MX-80 膨润土^[6]膨胀力演化规律类似。其次, 第 II 阶段明显的膨胀力衰减现象也在 Zeng et al^[6]的研究中被观察到, 他将其归结为施工接缝所提供的有限膨胀空间诱发膨胀材料迁移扩散最终导致卸荷。不同温度下膨胀力时程曲线呈现出一致的规律, 且温度越高膨胀力越大。

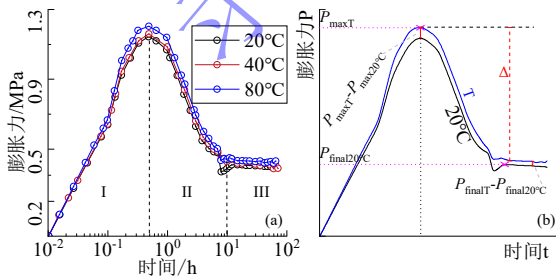


图 4 不同温度条件下试样膨胀力时程曲线

Fig. 4 Time histories of swelling pressure for specimens treated by different temperatures

2.2 峰值特征及其变化率

为了表征温度影响下膨胀力演化特征, 根据 P_{\max} 和 P_{final} 定义了 P_{50} 和 P_{90} (见图 4)。 P_{50} 为膨胀力增大至 50 % P_{\max} 时对应的膨胀力。 P_{90} 为膨胀力增大至 90 % P_{\max} 时对应的膨胀力。同时, 记录膨胀力对应时间, 记作 t 。按照如下公式计算得到试样达到对应膨胀力 P 的速度 V' 。

$$V' = \frac{P}{t} \quad (8)$$

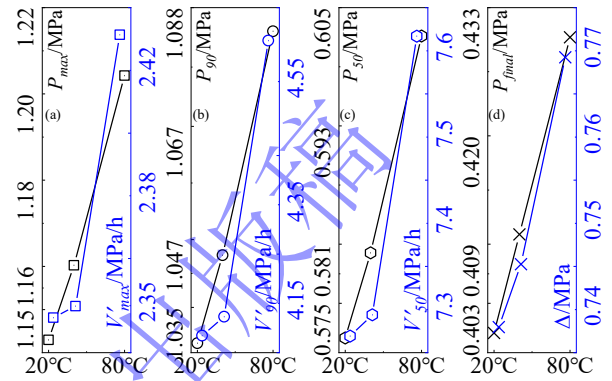


图 5 膨胀力特征阶段与温度之间的关系

Fig.5 Relationship between classical phase of swelling pressure and temperature

计算结果如图 5 所示, 其中 V'_{\max} 、 V'_{90} 和 V'_{50} 分别是膨胀力抵达 P_{\max} 、 P_{90} 和 P_{50} 时的速度。 $\Delta = P_{\max} - P_{\text{final}}$ 。结果表明, 在膨胀力增长阶段 (I), 随着温度增加, P_{\max} 、 P_{90} 、 P_{50} 和 V'_{\max} 、 V'_{90} 、 V'_{50} 均增大, 这表明温度促进了膨胀力增长。在膨胀力衰减阶段 (II), 随着温度增加, P_{final} 和 Δ 均增大, 这表明衰减阶段的膨胀力依然服从温度越高膨胀力越大的规律。结果表明在处置库缓冲层机械缓冲能力设计中应当将温度的影响纳入考量来搭建预期的水-热条件下符合废物金属罐体需求的膨润土屏障机械缓冲力。

为了定量评价温度影响下膨胀力的变化特征, 本文定义了如图 4b 所示的四个参数, α_1 、 α_2 、 β 和 γ 。

(1) 温度影响下 P_{\max} 和 P_{final} 的增长率 α_1 、 α_2 , 用于描述试验过程中温度对 P_{\max} 和 P_{final} 的促进作用。

$$\alpha_1 = \frac{P_{\max T} - P_{\max 20^\circ\text{C}}}{P_{\max 20^\circ\text{C}}} \quad (9)$$

$$\alpha_2 = \frac{P_{\text{final} T} - P_{\text{final} 20^\circ\text{C}}}{P_{\text{final} 20^\circ\text{C}}} \quad (10)$$

式中, P_{\max} 为某温度 T 下的峰值膨胀力; $P_{\max 20^\circ\text{C}}$ 为 20°C 条件下的峰值膨胀力。

(2) 时间序列下膨胀力的衰减率 β , 用于描述不同温度下相对于 P_{\max} 的 P_{final} 衰减程度。

$$\beta = \frac{P_{\max} - P_{\text{final}}}{P_{\max}} \quad (11)$$

(3) 温度影响下膨胀力的衰减率 γ ，用于描述试验过程中温度对膨胀力衰减程度的影响。

$$\gamma = \frac{P_{\max T} - P_{\text{final}T}}{P_{\max 20^\circ\text{C}} - P_{\text{final}20^\circ\text{C}}} \quad (12)$$

如图 6 中的计算结果表明，当温度增大时，逐渐增加的 α_1 、 α_2 表明温度对膨胀力的促进作用增强。随温度增加逐渐降低的 β 也证明了以上说法。相对于 20℃ 条件下膨胀力衰减率而言，80℃ 和 40℃ 下较低的 γ 证实了高温下较强的膨胀力维持能力。对于服役周期在一万年的处置库而言，维持围岩-膨润土-废物金属罐体所组成重屏障系统间良好的机械缓冲能力，需要充分考虑温度影响下膨胀力的演化特征。

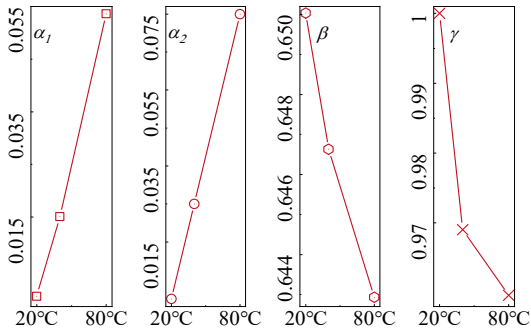


图 6 膨胀力变化率与温度之间的关系

Fig.6 Relationship between varies ratio of swelling pressure and temperature

2.3 含水率与干密度

图 7a 中含水率重分布结果表明，靠近施工接缝区域的外部试样含水率较高，随后依次是中部和内部。可将其归结为去离子水在压实膨润土吸力梯度作用下从施工接缝依次进入外、中和内部三个圈层所导致的。随着温度增加，含水率增大，这表明温度能加快水分迁移并提升试样储水能力。从含水率增量来看，在同一给定初始含水率条件下（10.05%），越靠近施工接缝的试样，含水率增量越大。

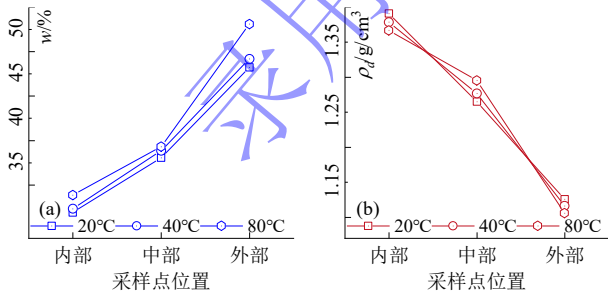


图 7 含水率和干密度分布特征

Fig. 7 Water content and dry density profiles for specimens

图 7b 显示的干密度梯度重分布规律表明：随着到试样中心距离减小，干密度逐渐增大。随着温度升高，试验内部和外部区域的干密度逐渐降低。然而，中部采样点则呈现出相反的结果，即干密度随着温度

增加而增大。这一异常变化被归结为环状水化裂缝的影响[11]。与其他区域相比，充水裂缝两侧的压实膨润土发生水化膨胀并充填挤压裂缝，这导致裂缝区（位于中部采样区）干密度增大。总体而言，相较于 1.7 g/cm³ 的初始干密度而言，越靠近施工接缝区的试样干密度削减量越大，这与该区域含水率的显著增加密切相关，表明该区域水化程度较高。

2.4 孔径演化特征

图 8 展示了 20℃ 下不同采样位置处和内部采样点对应的 20℃、40℃ 和 80℃ 的压汞试验结果。一般将高压实膨润土中孔径大于 150 nm 的孔隙称为集合体间孔隙（大孔， e_M ），小于 150 nm 的孔隙称为集合体内孔隙（小孔， e_m ）。本研究中，水化膨胀后的膨润土孔径分布曲线呈双峰特征，集合体间孔隙主要集中在 1000 nm 附近，集合体内孔隙则集中在 20 nm 附近。受限于压汞仪的探测范围，孔径小于 7 nm 的孔隙并未测出。因此，对孔径小于 150 nm 部分做线性拟合，并延伸至最小孔径 1 nm 处，以估算包含未测孔径的总孔隙比 e_t 。据孔隙比间数学关系（ $e_t = e_M + e_m$ ），获得不同温度和采样点处的孔隙比，结果如图 9 所示。

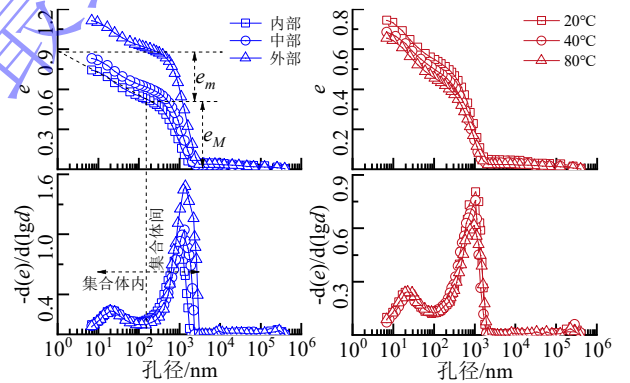


图 8 膨润土微观孔隙分布

Fig. 8 Pore distribution of hydrated bentonite

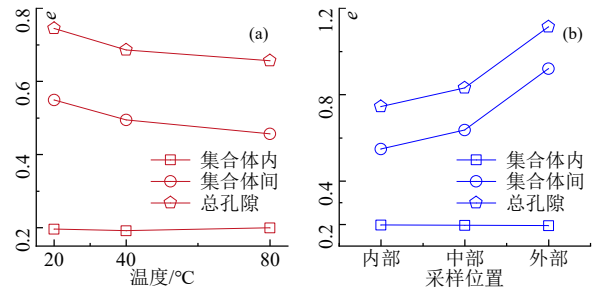


图 9 孔隙比演化特征

Fig. 9 Evolutional features of void ratio for hydrated bentonite

随着温度升高，在 20-600 nm 和大于 2000 nm 的孔径范围内孔隙比未见明显变化，而在 600-2000 nm 孔径范围内，孔隙比逐渐降低，类似变化在图 8 中也可以观察到。不同的是，越靠近施工接缝区，孔径范

围在 1000-2000 nm 间的孔隙比逐渐增加。值得关注的是, 20 °C 条件和外部采样点处的汞累计注入曲线和孔径分布曲线始终处于上方, 表明温度和采样位置对孔隙结构的影响显著。此外, 集合体内孔隙比在不同温度和不同采样点处始终保持稳定, 这与升温过程中广西南宁膨胀土的压汞测试结果一致^[19]。温度增大且采样位置接近试样中心时, 集合体间孔隙比逐渐降低, 总孔隙比相应降低。这是由于温度升高导致集合体间孔隙逐渐向小孔隙转变, 大孔被挤压, 内部自由水被排出, 从而较高的含水率被发现 (图 7a)。与此同时, 施工接缝所带来的新增膨胀空间将被水化膨润土充填, 最终的表现随着到试样中心距离的增加, 孔隙比逐渐增大。

3 温度影响机理分析

3.1 膨润土水化机理

作为处置库工程屏障的重要缓冲材料, 膨润土扮演着封闭施工接缝以阻滞地下水渗流和提供可靠机械缓冲能力的关键作用。研究表明, 膨润土的主要矿物成分为蒙脱石, 其具有 2:1 型晶层结构, 由两层硅氧四面体夹一层铝氧八面体组成 (TOT 结构)^[11]。在水化膨胀并封闭施工接缝时, 膨润土微结构演化过程如图 10 所示: 首先, 晶层间孔隙被水充填, 而层叠体间孔隙保持干燥; 随后, 层叠体膨胀并充填层叠体间孔隙; 之后, 较厚的层叠体持续膨胀并裂解为较薄的层叠体, 最终导致集合体显著膨胀。膨润土的膨胀可分为两类机制: 晶层膨胀和双电层膨胀。晶层膨胀由单元层之间可交换阳离子 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 水化作用引起。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, 双电层膨胀成为主要膨胀机制。双电层膨胀由层叠体间扩散双层膨胀引起并导致层叠体裂解。随后, 历经水化膨胀的膨润土基质充填在处置库施工接缝当中, 多重屏障系统形成整体密封环境。

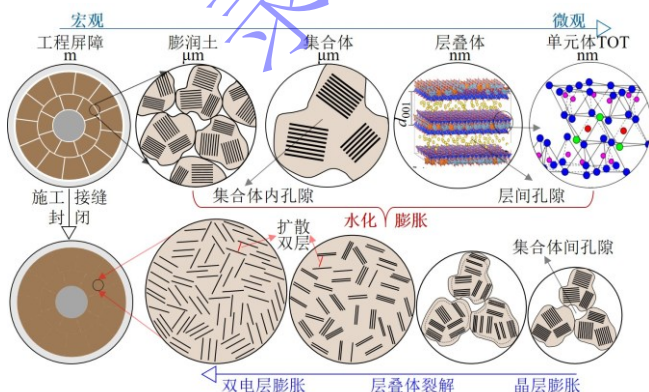


图 10 膨润土封闭施工接缝过程中微结构变化示意图^[2]

Fig. 10 Microstructure evolution of bentonite for sealed

technological void^[2]

当去离子水入渗时, 膨润土开始吸水并产生晶层膨胀, 膨胀力随之上升至峰值。随后, 高压实膨润土持续水化, 导致集合体进一步膨胀并引发土体骨架坍塌。厚度较大的层叠体分裂成为厚度较小的层叠体并充填至集合体孔隙中。此时, 因膨胀材料缺乏导致膨胀力降低。随后, 扩散双电层排斥力成为主要膨胀机制。在层叠体间孔隙内, 扩散双电层所诱发的膨胀变形使得膨胀力不再削弱, 最终维持在一个稳定值^[20]。上述过程中, 温度对集合体膨胀和水分迁移产生影响, 从而导致整个膨胀变形过程和膨胀力演化发生改变, 详细的分析与讨论将在下一节展开。

3.2 施工接缝封闭与“楔”力演化

施工接缝使得试验初期试样处于竖向侧限状态 (竖向限制, 试样向施工接缝区内膨胀, 图 11)。在吸力梯度作用下, 试样从施工接缝中不断吸水并向外膨胀充填接缝区域。最外圈层试样吸收了较多的水分进而诱发了不均匀变形, 甚至剥离试样主体而脱落, 导致施工接缝阻塞并封闭, 这在自封闭观测试验中已被证实^[1]。随着更多水分被吸收, 试样产生了更大程度和更大范围的膨胀变形, 导致施工接缝很快被充填。随后, 试验进入恒体积阶段 (竖向限制, 水平环向施工接缝区已封闭)。试样受到竖向侧限和水平向钢环双重限制, 在水化溶液和温度影响下持续变形膨胀和微结构调整, 直至试验结束。此外, 最外侧膨润土在试验初期受施工接缝区充足水分的影响会产生胶体结构, 并充填在接缝当中。这种胶体结构会降低膨润土颗粒间热阻, 从而提高温度传递效率, 最终影响试样内部和中部 (相较于外部与水接触较晚) 岩土性能^[21], 导致含水量、干密度和孔隙结构在不同温度和不同采样圈层间存在明显差异。在处置库服役期间, 这些施工接缝封闭所导致的差异性将长久地存在并受温度控制, 最终对膨润土缓冲层的屏障作用造成不良影响。因此, 在膨润土块体堆砌形成缓冲屏障过程中, 可通过设置合理的施工接缝使服役过程中含水率、干密度和孔隙结构差异性维持在可接受的范围内。

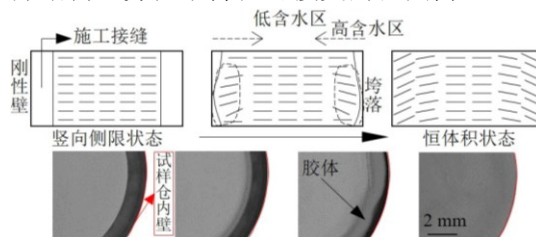


图 11 试验过程中试样变形示意图

Fig. 11 Schematic diagram of specimen deformation during tests

膨润土宏观变形行为对核废料处置库中施工接缝的封闭效果和多重屏障系统的建立具有重要意义。高

压实膨润土吸水膨胀导致试验初期竖向膨胀力快速增加。一方面，晶层膨胀促进了上述膨胀过程。另一方面，膨润土在水化后向施工接缝区的迁移引发了“卸荷”效应，从而削弱了膨胀力。叶为民^[1]指出，膨胀力的演化可归因于晶层间结合水膜和层叠体间扩散双电层的增厚过程受到约束，导致晶层间和层叠体间形成的“楔”力积累。然而，层叠体裂解和集合体间孔隙坍塌会减少“楔”力的积累。在试样周围的环向施工接缝作用下，膨润土的膨胀空间得以扩大，从而进一步促进了层叠体的裂解和孔隙的坍塌，削弱了“楔”力的积累。随着施工接缝逐步封闭，“楔”力的削弱作用逐渐减小，膨润土的膨胀力最终趋于稳定。总体而言，膨润土的持续水化膨胀所导致的“楔”力累积和施工接缝对膨胀力的削减作用共同导致膨胀力在长期作用下趋于稳定。温度作用则主要体现在影响微观尺度蒙脱石水化行为，从而对宏观尺度施工接缝充填和膨胀力演化造成影响。

3.3 蒙脱石膨胀与水分迁移

作为一种低渗透性介质，膨润土吸力梯度始终存在，水分迁移、层叠体裂解和集合体间孔隙坍塌在试样不同圈层处发生并依附于温度。温度对膨润土膨胀性能的影响主要体现在蒙脱石膨胀系数 K 的变化，并随温度升高而增大^[22]。在借助 Gouy-Chapman 的 DDL 理论计算 K 时发现其随温度线性增加^[9]：

$$K = 0.017T_c + 6.486 \quad (13)$$

式中， T_c 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。进一步证实，膨胀力 P 随温度增加呈现指数增长^[22]：

$$P = \left[\frac{1}{K\alpha} \left(\frac{G_s}{\rho_d} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{D-3}} \quad (14)$$

式中， α 为膨润土中蒙脱石体积占比； ρ_d 为试样干密度； D 为膨润土的表面分形维数 2.65^[23]，不受试验温度影响。本次研究当中，随温度增加峰值膨胀力和稳定膨胀力逐渐增大的现象也证实了以上结果（见图 5）。

此外，上述膨胀行为与蒙脱石 TOT 结构中 d_{001} 大小密切相关。图 12a 显示 d_{001} 随温度增加呈现线性增大趋势。这主要是由于高温下 d_{001} 间水分子振动变得强烈，从而对相邻晶格造成推动反力而将其推开，导致更充分的水化发生^[24]。同时，这也必然会对孔隙水迁移扩散行为造成影响。当前常用扩散系数 (D' , m^2/s) 来描述多孔介质中的扩散行为，其由二维 Einstein 方程来确定：

$$D' = \frac{1}{4} \frac{d}{dt} \langle r(t)^2 \rangle \quad (15)$$

式中， $r(t)^2$ 为颗粒的均方位移，由如下公式计算获得：

$$r(t) = R(t) - R(0) \quad (16)$$

式中， $R(t)$ 为在 t 时刻的颗粒位置。 $R(0)$ 为初始时刻的颗粒位置。Zheng 等^[24]将以上方程用于压实膨润土孔隙水扩散行为温度依赖性的分子动力学求解当中，结果表明： D' 与温度之间呈现线性正相关。当试样水化状态较低时，温度对 D' 的影响可被忽略。将蒙特卡洛方法 (Monte Carlo) 耦合分子动力学模拟获得的水分迁移轨迹表明^[25,26]，相较于低温状态而言，高温下的水分子迁移轨迹图面积更大更复杂^[26]，这说明高温能够促进膨润土中水分的迁移和扩散。

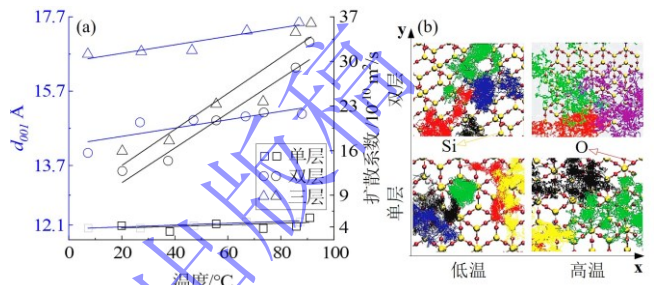


图 12 不同温度条件下的 d_{001} 与扩散系数（同一颜色代表同一离子/分子运动轨迹）^[24-26]

Fig. 12 d_{001} and diffusion coefficients of water at different temperatures (one color represents on type ions/molecules)^[24-26]

当外界水分充足时，较高温度下水分子更易进入膨润土层间区域，导致膨胀量增加^[27]。这是由于温度升高促使水分子的扩散系数增大，从而加快了水分迁移（图 12b），进而增强了试样的渗透性，诱发了更深层次的水化膨胀，促进了层叠体的裂解和大孔隙的坍塌。裂解后的层叠体再次吸水膨胀并充填周围孔隙，最终导致总孔隙比降低。试验结束后，试样含水率、干密度和孔隙比等呈现出梯度变化规律，这表明宏观层面稳定的膨胀力并不完全反映微观层面岩土性质的均匀性。因此，更长时间尺度下的膨胀性能演化和岩土参数的均匀性变化应进一步关注。

4 结论

本文模拟了压实膨润土块体在高放废物深地质处置库服役期间的温度环境，设置了环向施工接缝，开展了温度控制下的膨胀力试验。通过分析施工接缝闭合后试样含水率、干密度和孔隙结构演化，系统研究了温度对环向施工接缝中膨润土屏障材料膨胀性能的影响，主要结论如下：

(1) 膨胀力时程曲线呈现单峰型演化，首先增加至峰值，随后下降并逐渐稳定。施工接缝的存在加剧了膨胀力衰减阶段。随着温度升高，膨胀力增长阶段膨胀力峰值和增长率逐步增大，而衰减阶段膨胀力衰减率逐渐减小，表明温度对膨胀力具有促进作用。

(2)吸力梯度影响下,去离子水从施工接缝进入试样,促使试样水化膨胀并逐渐向中心扩散,同时引发膨胀材料向外迁移/封闭施工接缝。结合水膜增厚、层叠体裂解、孔隙坍塌和扩散双层增厚等因素共同作用,形成了“楔”力动态平衡,主导了膨润土从竖向侧限到恒体积的受力状态演化。

(3)施工接缝封闭后,高温条件下试样内部和外部的含水率及干密度梯度变化更加显著。高温下水分子扩散系数增大,促进水分子从施工接缝区沿径向向试样中心迁移,增强了试样的渗透性,并与增大的蒙脱石膨胀系数一起提高了试样水化程度。

(4)高温下增大的蒙脱石膨胀系数和水分子扩散系数一方面增强了蒙脱石的水化膨胀行为,更多孔隙被膨胀后的蒙脱石占据。另一方面,水分子迁移更加便利,更多水分子进入到蒙脱石层间,促进了水化反应、晶层裂解与孔隙坍塌,最终导致试样总孔隙比降低,膨胀力增大。

参考文献:

- [1] 叶为民,刘樟荣,崔玉军,等.膨润土膨胀力时程曲线的形态特征及其模拟[J].岩土工程学报,2020,42(1):29-36. (YE Weimin, LIU Zhangrong, CUI Yujun, et al. Features and modelling of time-evolution curves of swelling pressure of bentonite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 29-36. (in Chinese))
- [2] WANG Q, YAN X, SU W, et al. Site water salinity effect on the hydro-mechanical behavior of compacted GMZ bentonite with technological void[J]. Acta Geotechnica, 2024.
- [3] 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):399-408. (LI Kunpeng, CHENG Yonggui, YE Weimin, et al. Advances in studies on pore structure of highly compacted bentonite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 399-408. (in Chinese))
- [4] 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.
- [5] RUAN K, WANG H, KOMINE H, et al. Experimental study for temperature effect on swelling pressures during saturation of bentonites[J]. Soils and Foundations, 2022, 62(6): 101245.
- [6] ZENG Z, CUI Y J, ZHANG F, et al. Effect of technological voids on swelling behaviour of compacted bentonite-claystone mixture[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(12): 1881-1892.
- [7] BAG R, RABBANI A. Effect of temperature on swelling pressure and compressibility characteristics of soil[J]. Applied Clay Science, 2017, 136: 1-7.
- [8] 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.
- [9] 项国圣,葛磊,胡志杰,等.温度影响膨润土-砂混合物的膨胀性能研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(4): 1134-1141, 1148. (XIANG Guosheng, GE Lei, HU Zhijie, et al. Effect of Temperature on Swelling Characteristics of Bentonite-Sand Mixtures [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(4): 1134-1148. (in Chinese))
- [10] KARNLAND O, OLSSON S, NILSSON U, 等. Experimentally determined swelling pressures and geochemical interactions of compacted Wyoming bentonite with highly alkaline solutions[J]. Clay in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement - Part 1, 2007, 32(1): 275-286.
- [11] WANG Q, YAN X, DONG Y, et al. Effect of Beishan groundwater salinity on the self-sealing performance of compacted GMZ bentonite[J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(17): 391.
- [12] ZENG Z, CUI Y J, CONIL N, et al. Effects of technological voids and hydration time on the hydro-mechanical behaviour of compacted bentonite/claystone mixture[J]. Géotechnique, 2022, 72(1): 34-47.
- [13] 陈宝,陈建琴,曹永超.接缝对高压实膨润土工程屏障自封闭性能的影响[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3): 618-624. (CHEN Bao, CHEN Jianqin, CAO Yongchao, et al. Influence of joint on self-sealing behaviour of highly compacted bentonite in engineering barrier[J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 2012, 31(3): 618-624. (in Chinese))
- [14] 刘俊新,唐伟,李军润,等.高温及碱性条件对高庙子钠基膨润土膨胀力的影响[J].岩土力学,2021,42(8): 2160-2172, 2184. (LIU Junxin, TANG Wei, LI Junrun, et al. An experimental research on swelling pressure of GMZ Na-bentonite submitted to the strong alkali-heat environment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2160-2172. (in Chinese))
- [15] WANG Q, MENG Y, SU W, et al. Analyzing of the hydration crack evolution in compacted GMZ bentonite with consideration of technological void ratio[J]. Construction and Building Materials, 2022, 323: 126399.

- [16] SU W, WANG Q, LUO X long, et al. Laboratory investigation on the membrane behaviour of highly compacted GMZ bentonite under isothermal conditions[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, **18**(9): 4821-4833.
- [17] JUANG C H, HOLTZ R D. A probabilistic permeability model and the pore size density function[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1986, **10**(5): 543-553.
- [18] WANG H, RUAN K, HARASAKI S, et al. Effects of specimen thickness on apparent swelling pressure evolution of compacted bentonite[J]. *Soils and Foundations*, 2022, **62**(1): 101099.
- [19] 曾召田, 崔哲旗, 孙德安, 等. 南宁膨胀土持水性能的温度效应及微观机制[J]. *岩土力学*, 2023, **44**(8): 2177-2185. (ZENG Zhaotian, CUI Zheqi, SUN Dean, et al. Temperature effect on water retention capacity of Nanning expansive soil and its microscopic mechanism [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, **43**(8): 3507-3519. (in Chinese))
- [20] 陈永贵, 李全, 贾灵艳, 等. 钠钾盐梯度循环作用下高压实膨润土膨胀力衰变特性[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(5): 872-879. (CHENG Yonggui, LI Quan, JIA Lingyan, et al. Decay characteristics of swelling pressure of compacted bentonite under salinity gradient cycling [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(5): 872-879. (in Chinese))
- [21] TOMIOKA S, KOZAKI T, TAKAMATSU H, et al. Analysis of microstructural images of dry and water-saturated compacted bentonite samples observed with X-ray micro CT[J]. *Applied Clay Science*, 2010, **47**(1): 65-71.
- [22] 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, LU 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))
- [23] 徐永福, 项国圣, 褚飞飞, 等. 膨润土膨胀变形的分形模型[J]. *工程地质学报*, 2014, **22**(5): 785-791. (XU Yongfu, XIANG Guosheng, CHU Feifei, et al. Fractal model for swelling deformation of bentonite [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, **22**(5): 785-791. (in Chinese))
- [24] ZHENG Y, ZAOUI A. Temperature effects on the diffusion of water and monovalent counterions in the hydrated montmorillonite[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2013, **392**(23): 5994-6001.
- [25] MAKAREMI M, JORDAN K D, GUTHRIE G D, et al. Multiphase monte carlo and molecular dynamics simulations of water and CO₂ intercalation in montmorillonite and beidellite[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2015, **119**(27): 15112-15124.
- [26] MALIKOVA N, MARRY V, DUFRÊCHE J F, et al. Temperature effect in a montmorillonite clay at low hydration—microscopic simulation[J]. *Molecular Physics*, 2004, **102**(18): 1965-1977.
- [27] DEVINEAU K, BIHANNIC I, MICHOT L, et al. In situ neutron diffraction analysis of the influence of geometric confinement on crystalline swelling of montmorillonite[J]. *Applied Clay Science*, 2006, **31**(1): 76-84.