

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0236

高压实膨润土砌块接缝组合 热-水-力耦合效应试验装置研制及应用

郑维翰¹, 李涛¹, 冯硕¹, 高玉峰², 刘月妙²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要: 评估高放废物地下处置库缓冲材料的阻滞性能需要了解热-水-力 (THM) 耦合条件下高压实膨润土砌块与拼装接缝组合体的性能。为此, 研制了一台膨润土砌块及接缝 THM 耦合特性试验仪, 该装置由模型试验箱、砌块与接缝、温度控制、水力控制、数据测量与采集共 5 个系统构成。采用两块高庙子 (GMZ) 膨润土砌块和一条填有砂和膨润土颗粒的接缝制作砌块-接缝组合试样, 在 90 °C 的热边界和 0.1 MPa 的水力边界条件下进行了为期 266 d 的试验以检测试验装置设计的可行性。基于温度、体积含水率和膨胀力实测数据, 获得了试样内部热、水和力三场的时空演化过程及规律。根据试样内部的干密度变化规律, 建立了新的接缝愈合度定义式, 并利用接缝变形观测数据计算了接缝愈合度。通过对接缝厚度与温度、体积含水率和膨胀力之间的关系进行回归分析, 建立了相应的回归关系式。试验结果表明, 该试验仪可用于核废物深地质处置缓冲材料的室内物理模拟试验。

关键词: 高放废物处置; 膨润土砌块; 接缝; 热-水-力耦合; 模型试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 10-2908-11

Development and application of a testing apparatus to investigate coupled thermo-hydro-mechanical (THM) responses of densely compacted bentonite block and joint combination

ZHENG Wei-han¹, LI Tao¹, FENG Shuo¹, GAO Yu-feng², LIU Yue-miao²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: To evaluate the retardation capability of buffer materials in an underground repository for high-level radioactive waste, it is necessary to understand the performance of densely compacted bentonite block and joint combination under coupled thermo-hydro-mechanical (THM) condition. For this purpose, a testing apparatus for coupled THM responses of combined bentonite blocks and joints is developed. It consists of five parts, including the model test box, the combined block-joint sample, the temperature control system, the hydraulic control system, and the data measurement and acquisition system. Two compacted blocks composed of the Gaomiaozi (GMZ) bentonite and one joint filled with sand and bentonite powder were used to make the composite sample. To examine the feasibility of the design of this apparatus, the test was carried out under a thermal boundary condition of 90 °C and a hydraulic boundary condition of 0.1 MPa for 266 days. Based on test data of temperature, volumetric moisture content and expansive force, the coupled THM responses and their spatiotemporal evolution rules were obtained. A new definition formula of joint-healing-degree was proposed on basis of variation of dry density in test sample. The joint-healing-degree was calculated through the measured change in joint thickness during the test. Regression analysis was conducted according to the relationship between the change in joint thickness and the coupled THM responses including temperature, volume moisture content and expansive force, and the regression formula was accordingly set up. It has shown that this apparatus can be used in the indoor physical simulation test of buffer materials for deep nuclear waste disposal.

Keywords: high-level radioactive waste disposal; bentonite block; joint; THM coupling; model test

收稿日期: 2021-02-07

修回日期: 2021-06-26

基金项目: 国家国防科技工业局研究项目。

This work was supported by the Research Project of State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense.

第一作者简介: 郑维翰, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: 18115061@bjtu.edu.cn

通讯作者: 李涛, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程、环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: taoli@bjtu.edu.cn

1 引言

在高放废物处置库中,一般采用膨润土作为缓冲回填材料填充在核废物罐与围岩之间的工程屏障,以阻止地下水的侵入和阻滞核素向外迁移^[1]。目前我国已确定内蒙古高庙子(GMZ)膨润土作为处置库的缓冲回填材料^[2]。缓冲回填材料的主要部分为高压实膨润土砌块,在砌块的拼装组合过程中会形成不同的接缝^[3](见图 1),包括径向接缝、环向接缝和层间接缝。这些接缝在处置过程中会成为地下水的优势渗流通道,影响缓冲材料的阻滞性能,进而影响处置库的安全性^[1,4]。

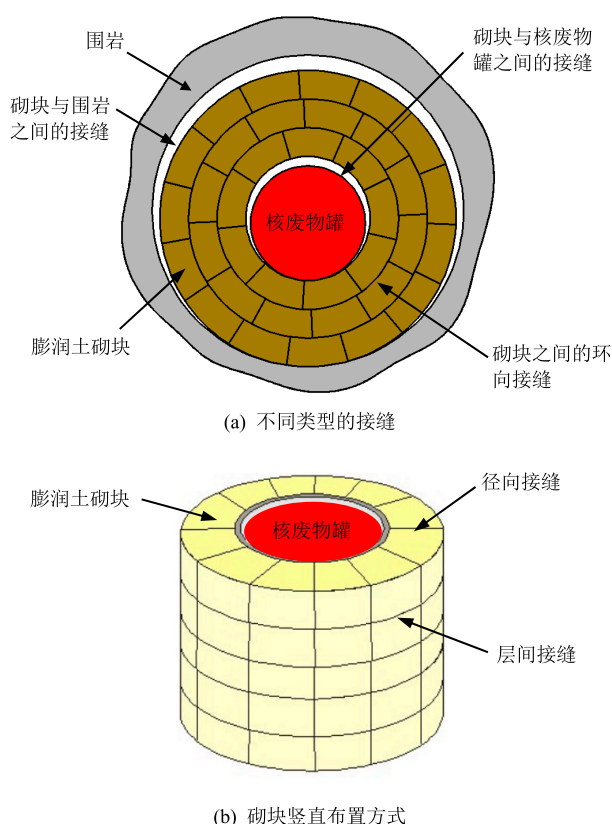


图 1 缓冲回填材料中砌块和接缝组合方式
Fig.1 Combination of joints and blocks in buffer backfill materials

目前,对缓冲回填材料中的接缝有不同处理方法。对砌块与核废物罐间的接缝有:①不填充,靠砌块水化膨胀填充接缝;②填充膨润土颗粒。对膨润土砌块间的接缝有:①不填充;②填充膨润土颗粒、泥浆或粉末。对砌块与围岩间的接缝有:①不填充;②填充膨润土颗粒;③填充混凝土^[5-9]。

当处置库关闭后,由于放射性废物释热、围岩渗水和膨润土膨胀,缓冲回填材料将受到热、水、力三场(THM)的耦合作用。根据不同处置时间段,

接缝材料会遇到 3 种工况:①在处置初期,地下水尚未渗入,接缝受热后出现失水收缩(热-力耦合);②此后地下水逐渐渗入,接缝在地下水入渗、废物罐升温 and 砌块膨胀挤压影响下,受到复杂的 THM 耦合作用;③处置后期,废物罐温度降低,接缝主要受到水-力耦合作用。其中,THM 耦合作用对砌块接缝组合性能的影响最为重要和复杂,因此需要对此影响进行研究。

国内外对缓冲回填材料受到的 THM 耦合作用已开展了较多的试验研究^[7-8,10-15]。陈宝等^[16]采用自制的多功能膨胀-渗透仪,对不同接缝宽度的试样进行水化试验,发现接缝的存在会改变试样的渗透系数和膨胀力。Chen 等^[17]对黏土岩和 MX-80 膨润土间接缝中水的渗透阻力进行研究,发现膨润土的水化膨胀使接缝中渗透阻力明显增大。Jia 等^[3]在 GMZ 膨润土砌块中设置了两种接缝,测试了试样的膨胀力。张虎元等^[18-20]对砌块间的接缝材料的选择进行了试验研究,结果表明接缝材料干密度对试样的渗透性能影响显著;同时接缝的存在会影响砌块膨胀力的演化,另外地下水中的盐分也会影响接缝的愈合效果。吴树高等^[21]总结了缓冲材料膨润土组合砌块界面特性及其阻隔性能的研究现状。总的来说,目前国内外对砌块和围岩间接缝的研究较多,砌块接缝组合体的大型台架试验也较为常见,但关于砌块接缝组合性能的研究还很少,未见有 THM 耦合条件下砌块接缝组合性能的试验装置。

由于砌块接缝组合 THM 耦合性能的复杂性,采用室内试验进行研究必不可少。为此,本文首先研制了一套可用于研究 THM 耦合条件下膨润土砌块接缝组合特性的试验装置。然后,采用该装置测试不同加热和水力边界条件下,GMZ 高压实砌块和接缝组合试样的温度、体积含水率、膨胀力和接缝变形。最后,根据试验结果分析其时空演化规律与接缝愈合效应。该研究结果不仅为后续开展相关方面的研究提供了新的技术手段,而且亦有助于认识 THM 耦合作用下膨润土砌块接缝组合的特性。

2 试验装置研制

2.1 研发目标和总体设计

本文研发目标为研发一台可用于研究高压实膨润土砌块接缝组合 THM 耦合特性及接缝愈合效应的室内试验装置。为此,试验中需要测定砌块接缝组合体内的主要物理量包括温度、体积含水率、膨胀力和接缝变形。

由于缓冲材料中径向接缝为地下水渗入的优势



图 5 后 L 形板和传感器引线连接插口

Fig.5 The back L-shape plate and the collection sockets for sensor lead wires

2.3.3 温度控制系统

温度控制系统由模温机、输油管和加热端板构成，加热端板内部铺设铜管。控制模温机产生恒温热油不断循环流入和流出加热端板，可在组合试样一侧形成恒温边界。模温机的控制精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为减少环境温度变化影响，试验箱放置在保温封闭箱内，箱内温度由空调机控制在 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

2.3.4 水力控制系统

水力控制系统由高压气瓶、水箱和调压阀构成。高压气瓶为水箱中的水提供压力，高压水通过管路与注水端板连接，通过调压阀为组合试样提供定水头边界，最大注水压力为 1.0 MPa 。

2.3.5 数据测量与采集系统

数据测量与采集系统由传感器、接缝愈合观测条、数据采集仪和计算机构成，试验时所有传感器的实时数据由系统自动采集。温度测量采用 Pt100 铂电阻温度传感器，土壤水分传感器为 EC-5，膨胀力测量用应变式土压力传感器。试验前对所有传感器均按照厂家提供的测量方法和参数进行了标定。

接缝愈合观测条为直径 1.0 mm 的刚性彩色碳纤维棒，成对布设在接缝上下两面（见图 6），共布设 18 对，水平间距为 10 mm 。图 6 中的编号针对垂直成对的观测条，试验时采用游标卡尺测量每对观测条垂直间距的变化。

2.4 试验装置功能及可扩展性

图 7 所示为课题组研制完成具有创新性的膨润土砌块及接缝 THM 耦合特性试验仪。该试验装置可用于研究高压实膨润土砌块接缝组合试样的 THM 耦合效应和接缝愈合效应。装置的部分系统还可进行改进，以提升或扩展设备功能，比如：

（1）改善模型试验箱和水力控制系统的防水密封性能，将注水压力提高到 5 MPa ，以模拟更大的处置深度。

（2）在模型试验箱纵向内壁增加隔热板，减少箱体散热，在试样内实现更理想的一维热传导。

（3）采用摄影测量技术代替手工测量接缝变形，提高测量精度和减少观测口打开时间。

（4）采用体积更小的传感器测量接缝温度、湿度和压力，更好地研究接缝愈合机制及效应。

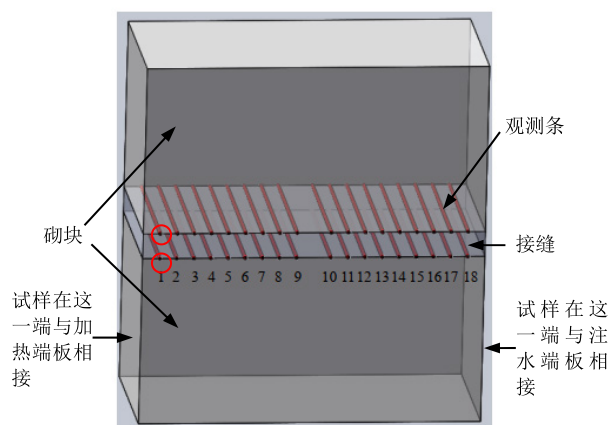


图 6 接缝厚度变形观测条布置图

Fig.6 Layout of the mark-stick for measuring change in joint thickness

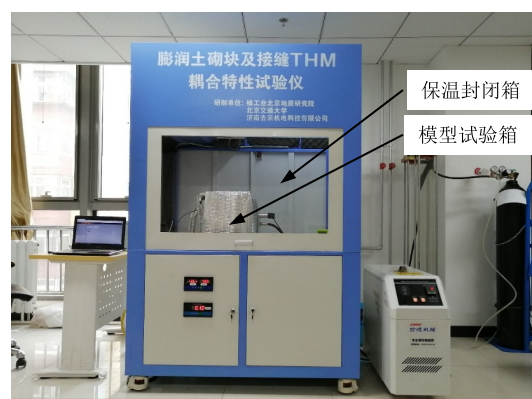


图 7 膨润土砌块及接缝 THM 耦合特性试验仪

Fig.7 Experimental instrument for THM coupling characteristics of bentonite block and joint

3 砌块接缝组合 THM 耦合试验方法

3.1 膨润土砌块及接缝材料制备

3.1.1 膨润土砌块

试验采用的膨润土编号为 GMZ24-200，其性质与早期常用的 GMZ-01 略有不同。砌块压制方法如下：将含水率为 14% 的膨润土粉末放在特制模具中，采用自制 $1\ 000\text{ t}$ 级砌块专用压机将粉末以恒定压制速率压制成一块长 575 mm 、宽 505 mm 、厚度 100 mm 的长方体，干密度控制在 1.70 g/cm^3 。

试验前首先根据试样设计尺寸，对长方体压制块进行手工切割和平整修理，然后按照传感器设计

位置钻刻出安装传感器的孔洞。完工后的膨润土砌块试样如图 8 所示。



图 8 试验用高压实膨润土砌块试样

Fig.8 Compacted bentonite block sample for test

3.1.2 接缝材料

根据文献[20]的研究, 接缝材料采用含砂率为 30% 的膨润土粉末和石英砂的混合物, 装样时逐层手工压实至设计厚度。

砌块和接缝材料的基本组成和参数见表 1 和表 2。按照体积加权平均计算可得砌块接缝组合试样的平均干密度为 1.66 g/cm^3 。

表 1 接缝材料基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of joint materials

类型	粒径 /mm	蒙脱石含量 /%	塑限 /%	液限 /%	颗粒相 对密度
膨润土	< 0.075	45.9~54.0	27.43	170	2.66
石英砂	0.5~1.0	—	—	—	2.65

表 2 砌块和接缝材料初始参数

Table 2 Initial parameters of block and joint materials

类型	干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	体积含水率 /%	固有渗透率 / m^2
砌块	1.70	23.80	2.50×10^{-20}
接缝	1.08	10.61	3.95×10^{-16}

如图 1(b)所示, 缓冲材料中砌块间存在 3 种接缝类型。本次试验的模拟对象为径向接缝和层间接缝, 其特点为热传导和渗水方向与接缝长度方向一致。试验时, 模型箱的放置方式不会影响温度场的分布; 对于渗流场, 重力虽然会有所影响, 但这种影响远小于所施加的水头压力; 对于应力场, 试样重量与膨润土试样的膨胀力相比可以忽略不计。因此, 为方便试验, 采用了砌块上下放置的方式。

3.2 传感器布设

为了监控砌块接缝组合内部热、水、力三场的

变化, 其内部温度、土壤水分和土压力传感器的布置和编号见图 9。所有传感器均布设在砌块接缝组合试样的中部纵向剖面。

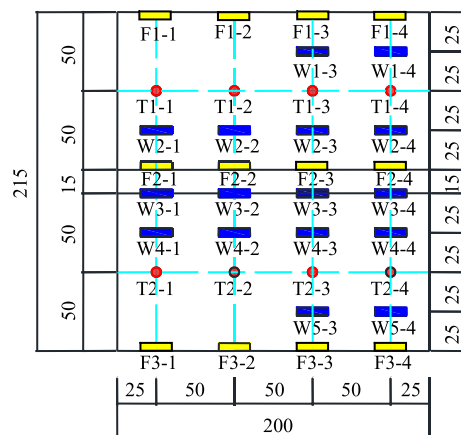


图 9 砌块接缝组合传感器布置图 (单位: mm)

Fig.9 Layout of sensors in bentonite block and joint (unit: mm)

3.3 试验过程及控制

3.3.1 温升过程与温度控制

试验开始首先设定温度为 60°C , 启动模温机预加热试样。2 d 后, 待各个温度传感器的测量值达到稳定, 再将温度提高到 90°C 后保持不变。

图 10 给出了 100 d 之前的试验加温时程曲线。从图中可见, 由于试验箱边界散热, 加热端板实际温度虽然只能达到 80°C , 但比较稳定。

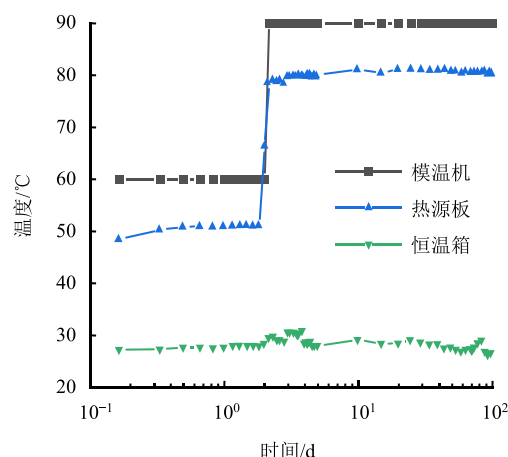


图 10 试验加热时程曲线

Fig.10 Time-history curves of heating during test

3.3.2 注水与水压控制

加温 4 d 后, 开始对试验箱注水, 初始注水压力为 0.07 MPa 。随后发现部分土壤水分传感器读数

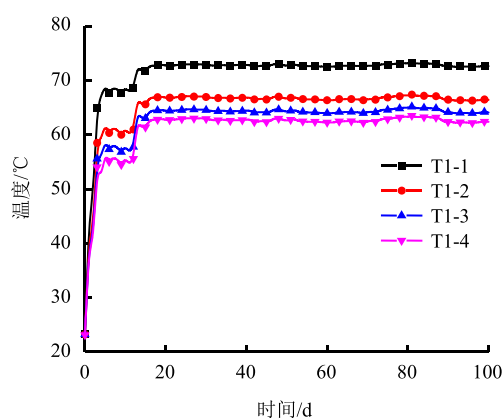
快速升高, 猜测是防水衬垫有渗漏, 少量水沿着试验箱内壁与试样之间的缝隙进入砌块。为此, 将注水压力降低为 0.01 MPa, 让该处砌块水化膨胀, 封堵缝隙。至 11 d 后, 各土壤水分传感器达到稳定。此后, 将水压升高并维持在 0.1 MPa。

4 砌块接缝组合 THM 耦合效应

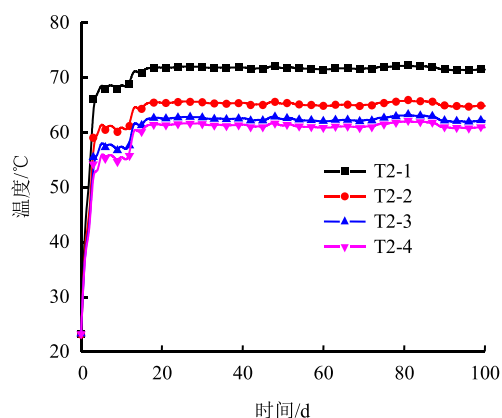
由于受到疫情影响, 试验受到干扰, 本文主要给出 100 d 之前的试验结果。

4.1 温度演化与分布

图 11 为 8 个温度传感器的监测结果。从图中可见, 各监测点的温度随热源的温升变化基本稳定, 与热源的温度变化一致。试验开始后 13 d 内, 温度迅速上升, 此后随着时间增长, 温度基本稳定。



(a) 温度传感器 T1-1~T1-4



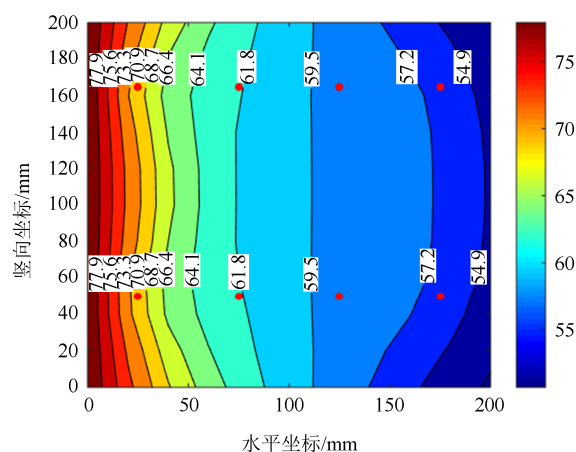
(b) 温度传感器 T2-1~T2-4

图 11 温度随时间的变化

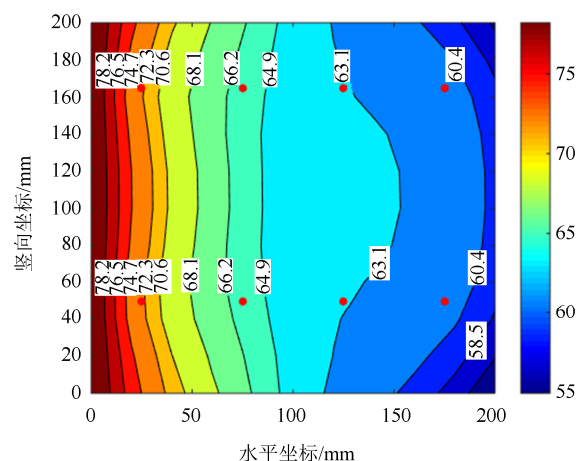
Fig.11 Variations of temperature with time

图 12 为采用实测数据绘制的加温至 5 d 和 100 d 时试样中部纵剖面的温度场。从图中可见, 试样加热端和注水端温差显著, 温度分布在 50~80 °C 的范围, 温度分布明显受到了注水的影响。另外, 温度分布上下大致对称, 热传导基本呈一维形式, 满

足试验装置的设计要求。



(a) 5 d 时试样温度分布图



(b) 100 d 时试样温度分布图

图 12 5 d 和 100 d 时试样的温度分布图 (单位: °C)

Fig.12 Temperature distribution of the sample on the 5th day and the 100th day (unit: °C)

4.2 体积含水率演化与分布

图 13 为砌块 A 中和接缝下边缘水分传感器的监测结果。在试验前期, 膨润土迅速吸水导致各点体积含水率 ($W = V_w / V$, V_w 和 V 分别为土中水和土的总体积) 逐渐升高, 但随着时间增长, 增长变缓或趋于稳定。到 100 d 时, 在图 13(a)、13(c)中, W1-4、W3-3 和 W3-4 处的 W 趋于稳定, 不再增长; 而 W1-3、W3-1 和 W3-2 处的 W 还在缓慢增长, 说明该处的膨润土还在吸水。但是, 在图 13(b)中, W 的变化与上述规律略有不同, 推测是受到了接缝渗水的影响。此外, 离注水端近的 W 明显高于离注水端远的, 如图 13(a)中的 W1-4 和 W1-3, 图 13(b)中的 W2-4 和 W2-1。而图 13(c)所示为接缝边缘传感器所测, 由于接缝材料的渗透性远大于砌块, 故接缝处 W 明显高于砌块内部。

砌块 B 内部 W 的变化与砌块 A 的大致相同, 限于篇幅, 不再赘述。

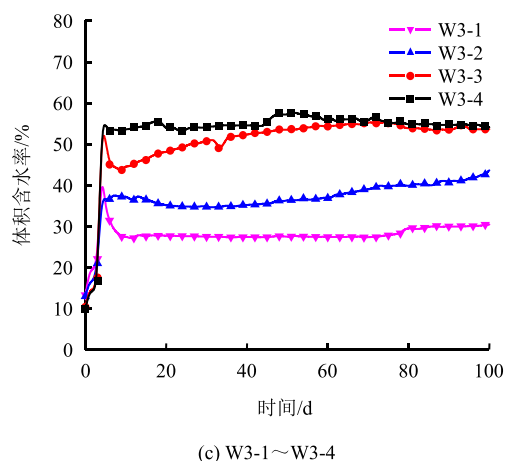
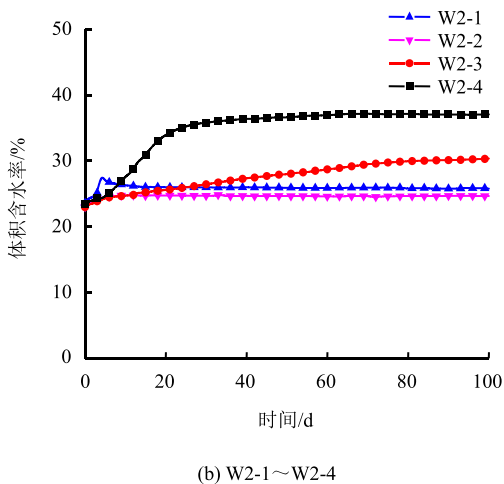
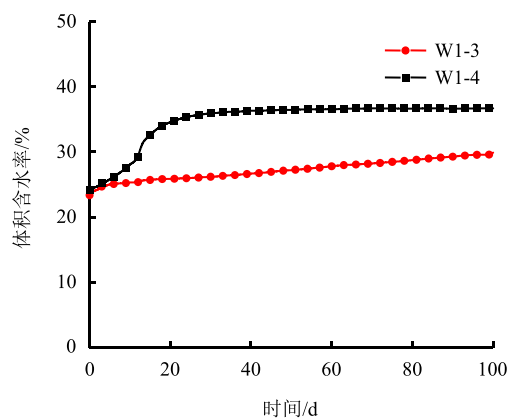


图 13 体积含水率随时间的变化
Fig.13 Variation of volume water content with time

图 14 给出了试验至 20、40、80、100 d 时试样内部 W 的分布。从图中可见, 随着时间的增长, 水不断向加热端方向渗透。由于接缝材料的渗透性大于砌块的, 因此水沿接缝的渗透要明显快于砌块内部。

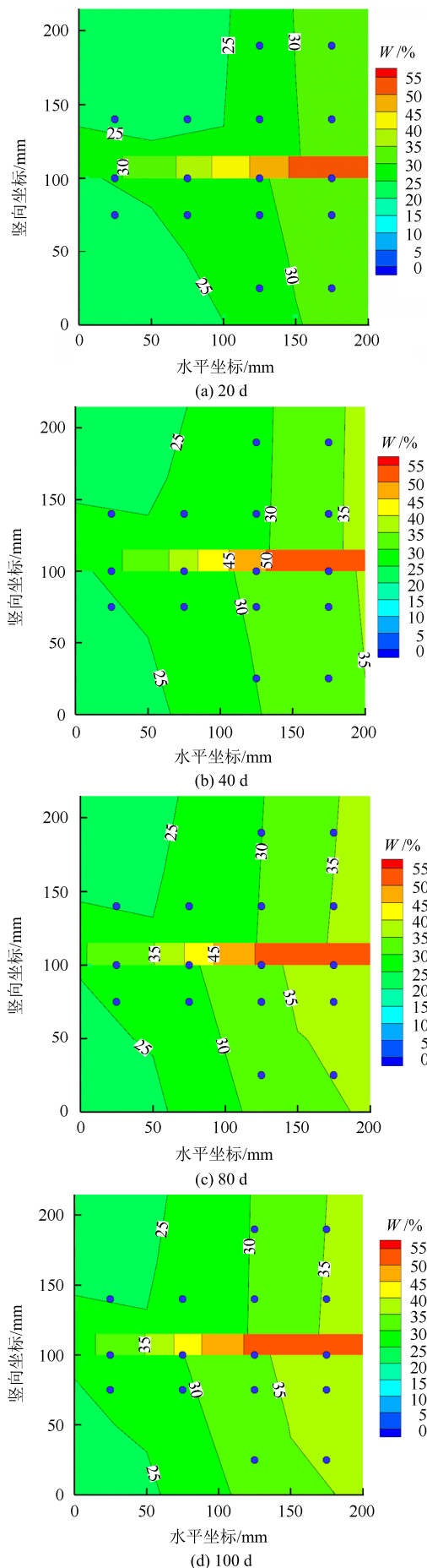


图 14 试样内部 W 分布随时间变化图
Fig.14 Distribution of W in sample at different times

以上试验结果总体上与文献[23]中完成的中型缓冲材料 THM 耦合台架试验的结果一致,说明本文的试验结果的合理性。

4.3 膨胀力演化与分布

砌块接缝组合试样上下边界和接缝处竖向压力的时程变化如图 15 所示。由于 4 d 之前没有给试验箱加水,各土压力传感器没有监测到膨胀力。开始加水后,试样吸水膨胀,土中的竖向膨胀力随着时

间持续增长,最大值达到 1.48 MPa。此外,膨胀力增长的速率随着传感器与注水端距离的增加而降低,这充分反映出试样内部水-力之间的耦合效应。

图 16 为试验至 20、40、80、100 d 时试样内部竖向膨胀力的分布。从图中可见,随着时间的增长,试样吸水膨胀量增大,导致试样的膨胀力逐渐升高。试样内部膨胀压力呈右端大、左端小的分布,这与水的渗透方向一致。另外,接缝渗透性大的影响主

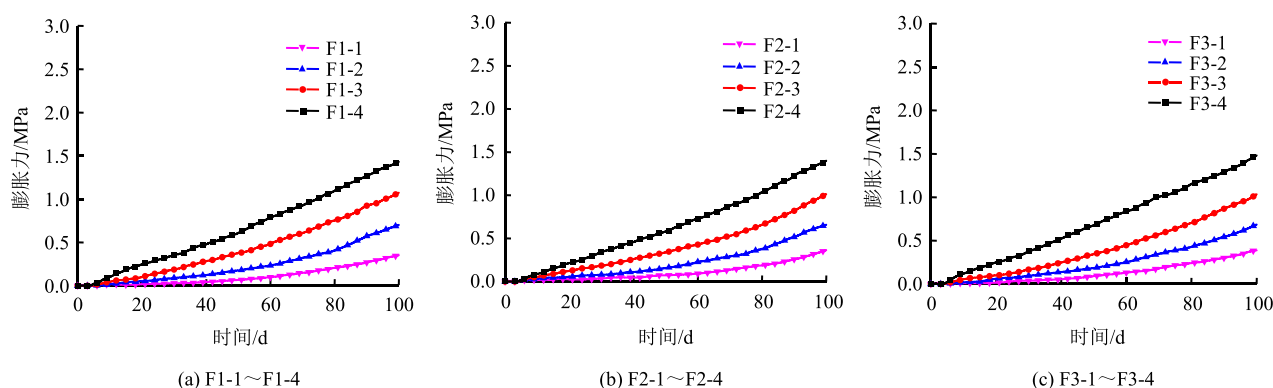


图 15 试样内部膨胀压力时程图

Fig.15 Expansive pressure as a function of time in the sample

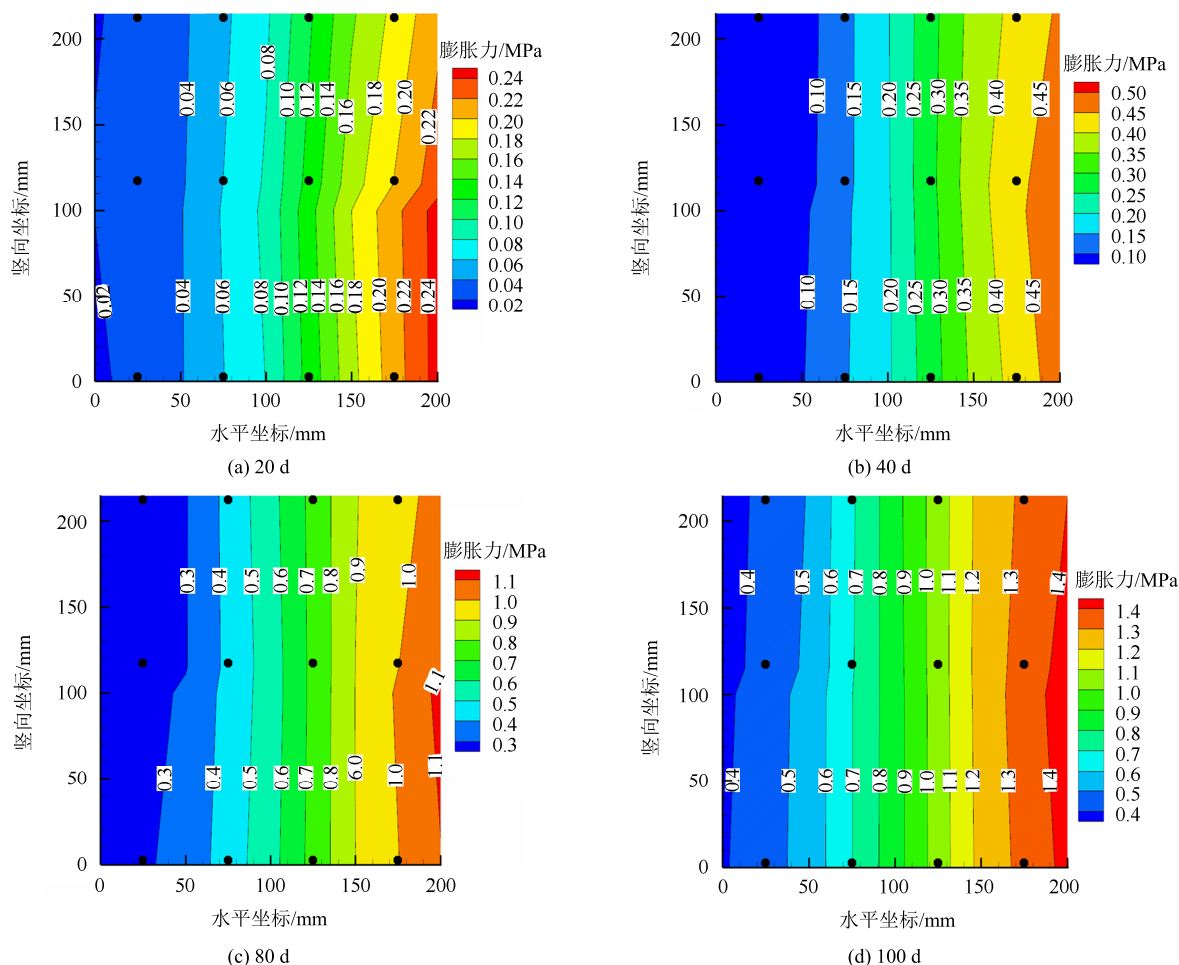


图 16 试样内竖向膨胀力分布随时间变化图

Fig.16 Distributions of vertical expansive pressure in sample at different times

要出现在注水端附近。

4.4 接缝愈合变形及规律

图 17 为试验过程中测得的 18 对观测条竖向间距变化情况。由于疫情影响, 试验 15~266 d 之间的测量数据缺失。从图中可见, 试验至 266 d 时, 18 号观测点接缝愈合变形最大, 比初始值减小了 4.07 mm; 6 号观测点的最小, 仅比初始值减小了 0.86 mm。总体上, 随着时间的推移, 由于靠右侧的砌块逐渐水化膨胀, 膨胀变形也逐渐增大, 形成接缝愈合从右向左减小的趋势。在张虎元等^[18-20]的试验结果中, 也观测到了接缝区域土体密实度提高, 干密度增大的愈合现象。

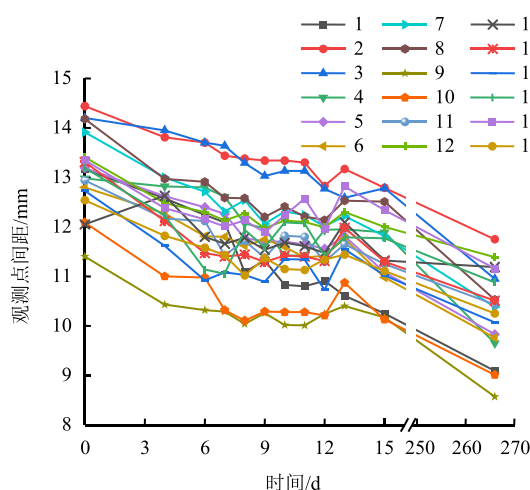


图 17 接缝观测点竖向间距随时间的变化

Fig.17 Variation of vertical spacing between the pairing mark sticks with time

接缝厚度 D (mm) 的改变与 THM 耦合影响有关。由于从理论上建立 D 的计算公式极为复杂, 为方便应用, 假设 D 与温度 T ($^{\circ}\text{C}$)、体积含水率 W (%) 和膨胀力 F (MPa) 之间存在的关系式为

$$D = A_1 + A_2 T + A_3 W + A_4 F \quad (1)$$

如图 9 所示, 试样内有 4 个纵断面布置了热、水和力传感器, 利用这 4 个断面不同时间的监测数据与厚度变化值, 采用多元回归分析方法进行拟合, 得到拟合系数 $A_1 = 11.029$, $A_2 = -0.054 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$; $A_3 = 0.175 \text{ mm}/\%$, $A_4 = -2.126 \text{ mm}/\text{MPa}$, 确定系数 $R^2 = 0.7131$ 。回归方程 (1) 可用于估算 THM 耦合作用下膨润土砌块间接缝厚度的变化。

为了量化描述接缝的愈合变形程度, 根据接缝材料的密度变化, 定义接缝愈合度 n_p 为

$$n_p = \frac{(\rho_d)_t - (\rho_d)_{f0}}{(\bar{\rho}_d)_{kf} - (\rho_d)_{f0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $(\rho_d)_t$ 为试验开始后, 观测点处接缝材料的干密度; $(\rho_d)_{f0}$ 为试验开始前的干密度; $(\bar{\rho}_d)_{kf}$ 为砌块接缝组合试样的平均干密度。

根据式 (2), 图 18 给出试验至 266 d 时 18 个接缝观测点的愈合度。由图可知, 所有观测点的接缝都出现了一定程度的愈合, 平均愈合度为 51.6%。总体上看, 各点的愈合度沿注水端方向有不断上涨的趋势, 这与砌块吸水膨胀的趋势一致。其中, 18 号观测点离注水端板最近, 愈合度最高, 为 83.4%; 而 1 号观测点距离最远, 愈合度仅有 41.6%。不过, 一些观测点处的愈合度数值跳跃、规律性较差, 分析其原因有: ①砌块为手工加工, 初始不平整; ②接缝是手工填实, 初始密度不均匀; ③接缝材料中石英砂和膨润土混合不均匀。

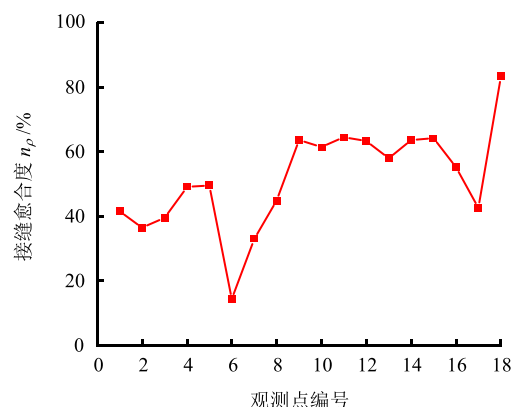


图 18 266 d 时观测点接缝愈合度

Fig.18 Healing degree of observation points at the 266th day

5 结 论

(1) 研制了国内外首台膨润土砌块及接缝 THM 耦合特性试验仪, 其主要功能为: 在沿接缝方向有热传导和渗流耦合条件下, 通过测量两砌块夹平面单接缝组合试样的温度、体积含水率、膨胀力和接缝变形, 研究高压实膨润土砌块接缝组合的 THM 耦合性能和接缝的愈合效应。该装置可用于高放废物处置库缓冲材料的室内物理模拟试验。

(2) 试验仪由模型试验箱、砌块与接缝系统、温度控制、水力控制和数据测量与采集系统组成; 恒温热源的最高温度为 90°C , 最大注水压力为 1.0 MPa ; 砌块厚度可根据需要设置, 接缝厚度建议不超过 20 mm 。采用 GMZ 膨润土压制砌块、砂和膨润土颗粒作为填充材料制备砌块接缝组合试样, 设置了 THM 耦合条件, 测定了试样内部热、水和力三场的时空演化过程及规律。初步的试验结果表

明, 该装置实现了预期的研制目标。

(3) 考虑 THM 耦合作用和基于接缝材料的密度变化, 建议了新的接缝愈合度定义式, 其中考虑了接缝材料的初始干密度和砌块接缝组合的平均干密度。根据实测数据, 本次试验至 266 d 时, 接缝出现明显愈合, 平均愈合度为 51.6%, 最大愈合度达到 83.4%。计算结果表明, 所建议的接缝愈合度定义是合理的。

(4) 基于试验数据的多元回归分析, 提出了砌块拼装接缝厚度变化与温度、体积含水率和膨胀力之间的拟合关系式, 用于估算 THM 耦合作用下 GMZ 膨润土砌块间接缝厚度的变化。根据对试验条件和拟合数据的分析, 该公式的适用条件: 温度为 20~80 °C, 体积含水率为 24~36%, 膨胀力为 0~1.5 MPa, 接缝厚度为 10~15 mm。

本文成果不仅为研究高压实膨润土的 THM 耦合性能提供了新的试验工具, 而且还有助于分析高放废物处置库缓冲材料砌块组合的性能。

参 考 文 献

- [1] 崔玉军, 陈宝. 高放核废物地质处置中工程屏障研究新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 842-847.
CUI Yu-jun, CHEN Bao. Recent advances in research on engineered barrier for geological disposal of high-level radioactive nuclear waste[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(4): 842-847.
- [2] 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): 541-543.
LIU Yue-miao, CHEN Zhang-ru. Bentonite from Gaomiaozi, Inner Mongolia as an ideal buffer/backfilling material in handling highly radioactive wastes: a feasibility study[J]. **Acta Mineralogica Sinica**, 2001, 21(3): 541-543.
- [3] JIA L Y, CHEN Y G, YE W M, et al. Effects of a simulated gap on anisotropic swelling pressure of compacted GMZ bentonite[J]. **Engineering Geology**, 2019, 248: 155-163.
- [4] VILLAR M V, GARCÍA-SIÑERIZERIZ J L, BÁRCENA I, et al. State of the bentonite barrier after five years operation of an in situ test simulating a high level radioactive waste repository[J]. **Engineering Geology**, 2005, 80(3): 175-198.
- [5] BEL J, DEBOCK C, GIOVANNINI A. Alternative deep repository designs for disposal of very high level waste in Belgium[C]//Proceedings of the Waste Management 2004 Conference. Tucson, AZ: [s. n.], 2004.
- [6] JUVANKOSKI M. Buffer design 2012[R]. Eurajoki: Posiva Oy, 2013.
- [7] ZHAO J, CHEN L, 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] HUERTAS F, FARINA P, FARIAS J, et al. FEBEX full-scale engineered barriers experiment, updated final report 1994-2004[R]. Madrid: ENRESA, 2006.
- [9] FUJITA T, SHIMIZU K. Repository design and engineering technology for HLW disposal[R]. Inaraki: Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2001.
- [10] LEE J O, PARK J H, CHO W J. Engineering-scale test on the thermal-hydro-mechanical behaviors in the clay barrier of a HLW repository[J]. **Annals of Nuclear Energy**, 2008, 35(8): 1386-1396.
- [11] PACOVSKÝ J, SVOBODA J, ZAPLETAL L. Saturation development in the bentonite barrier of the Mock-Up-CZ geotechnical experiment[J]. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, 2007, 32(8): 767-779.
- [12] VAN HUMBEECK H, VERSTRICHT J, LI X L, et al. The OPHELIE mock-up final report[R]. Belgium: European Underground Research Infrastructure for Disposal of Nuclear Waste in a Clay Environment, 2009.
- [13] CHIJIMATSU M, FUJITA T, SUGITA Y, et al. Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(1): 67-78.
- [14] 徐云山, 孙德安, 曾召田, 等. 膨润土热传导性能的温
度效应[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 39-45, 56.
XU Yun-shan, SUN De-an, ZENG Zhao-tian, et al. Temperature effect on thermal conductivity of bentonites[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(1): 39-45, 56.
- [15] 秦爱芳, 胡宏亮. 碱性溶液饱和高庙子钙基膨润土膨胀特性及预测[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 1): 123-131.
QIN Ai-fang, HU Hong-liang. Swelling characteristics of Gaomiaozi Ca-bentonite saturated in alkaline solution and

- prediction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl.1): 123-131.
- [16] 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 Jian-qin, CAO Yong-chao. Influence of joint on self-sealing behaviour of highly compacted bentonite in engineering barrier[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 618-624.
- [17] CHEN Y G, CUI Y J, TANG A M. A preliminary study on hydraulic resistance of bentonite/host-rock seal interface[J]. **Géotechnique**, 2014, 12(64): 997-1002.
- [18] 张虎元, 朱飞, 王赵明. 地下水含盐量抑制缓冲砌块接缝的愈合效果[J]. **岩石力学与工程学报**, 2020, 39(增刊 1): 2892-2901.
- ZHANG Hu-yuan, ZHU Fei, WANG Zhao-ming. Inhibition of groundwater salt content on the healing of HLW buffer block joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(Suppl. 1): 2892-2901.
- [19] 张虎元, 王英, 马国梁, 等. 膨润土粉密封条件下缓冲砌块接缝的膨胀应力发展研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2018, 37(9): 2200-2208.
- ZHANG Hu-yuan, WANG Ying, MA Guo-liang, et al. Stress development in compacted block joints backfilled with bentonite powder in HLW barrier[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(9): 2200-2208.
- [20] 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 Hu-yuan, WANG Xue-wen, LIU Ping, et al. Sealing and healing of compacted bentonite block joints in HLW disposal[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl. 2): 3605-3614.
- [21] 吴树高, 李涛. 缓冲材料膨润土组合砌块界面特性及其阻隔性能研究现状[C]//第六届废物地下处置学术研讨会论文集. 北京: 中国原子能出版社, 2016.
- WU Shu-gao, LI Tao. Current status of the interface features and barrier properties of bentonite blocks as buffer materials[C]//Proceedings of the Sixth Symposium on Underground Waste Disposal. Beijing: Atomic Energy Press, 2016.
- [22] CHEN L, LIU Y M, WANG J, et al. Investigation of the thermal-hydro-mechanical (THM) behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test[J]. **Engineering Geology**, 2014, 172: 57-68.
- [23] 曹胜飞, 刘月妙, 谢敬礼, 等. 缓冲材料热-水-力耦合模型试验研究[J]. **地下空间与工程学报**, 2020, 16(4): 1123-1129.
- CAO Sheng-fei, LIU Yue-miao, XIE Jing-li, et al. Study on thermo-hydro-mechanical coupling behaviors of buffer material[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2020, 16(4): 1123-1129.