

DOI: 10.11779/CJGE2024S20024

膨润土组合试样的热传导和水分迁移规律试验研究

杨高升^{1,2}, 白冰^{*2}, 陈文轩¹, 毛海涛¹, 刘中华¹, 兰晓玲¹

(1. 山西农业大学城乡建设学院, 山西 太原 030031; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 缓冲材料砌块接缝作为高放废物处置库工程屏障系统中潜在的薄弱部位必须被深入研究。为此, 利用研制的试验装置测定了进水前与进水后两种情况下高庙子(GMZ)膨润土组合试样不同位置处的温度和体积含水量随时间的演化规律, 并根据试验结果得到了组合试样接缝愈合后的热传导系数和水力传导系数。试验结果表明膨润土组合试样内部温度的变化主要受温度边界的影响, 而其内部水分的变化对其影响较小。在短时间内, 加载水力边界条件仅使得靠近水力边界处的土体的体积含水量大幅度增加, 而对其他位置影响较小。由于受到温度边界的影响, 靠近温度边界位置处的土体的体积含水量随时间逐渐降低。愈合后接缝位置的导热性能和渗透性能够满足高放废物处置库工程屏障的要求。

关键词: GMZ 膨润土; 组合试样; 接缝; 热传导系数; 水力传导系数

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)S2-0161-05

作者简介: 杨高升(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: yanggaosheng2022@163.com。

Experimental study on heat conduction and water migration of composite bentonite samples

YANG Gaosheng^{1,2}, BAI Bing², CHEN Wenxuan¹, MAO Haitao¹, LIU Zhonghua¹, LAN Xiaoling¹

(1. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China)

Abstract: The joints of composite blocks of buffer materials as potential weak parts in the engineering barrier system of high-level radioactive waste (HLW) repository must be studied in depth. Therefore, the evolution of temperature and volumetric water content with time at different locations of Gaomiaozi (GMZ) composite bentonite samples before and after simulated water inflow is measured by using the developed experimental devices. According to the experimental results, the thermal conductivity and hydraulic conductivity of the joint location after healing of composite samples are obtained. The experimental results show that the change of the internal temperature of the composite bentonite samples is mainly affected by the temperature boundary, and the change of the internal water has small effects on it. In a short period of time, the loading of hydraulic boundary conditions only makes the volumetric water content of the soil near the hydraulic boundary increase significantly, but has small effects on other locations. Affected by the temperature boundary, the volumetric water content of the soil near the temperature boundary gradually decreases with time. The thermal conductivity and permeability of the joint location after healing can meet the requirements of the engineering barrier of the HLW repository.

Key words: GMZ bentonite; composite sample; joint; thermal conductivity; hydraulic conductivity

0 引言

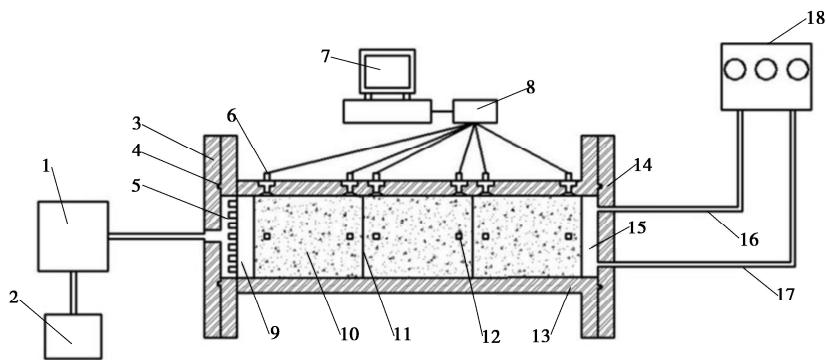
高放废物深地质处置库采用包含人工屏障和天然屏障的多重屏障系统。将高压实的膨润土砌块环绕堆砌在废物罐和地质体之间是目前人工屏障中缓冲材料的最佳选择之一^[1-3]。但是在施工过程中, 废物罐与膨润土砌块、围岩与膨润土砌块, 以及膨润土砌块之间, 不可避免地会留下接缝。并且由于受到放射性核素衰变释热和地下水渗流影响, 缓冲材料会受到热、水、

力等多场耦合作用的影响^[4-6]。虽然高压实的膨润土砌块在地下水的作用下水化膨胀并不断向着接缝区域挤压, 这使得接缝区域逐渐愈合, 但是对于高放废物处

基金项目: 山西省自然科学青年基金项目(202303021212105); 国家自然科学基金项目(52378321); 山西省优秀博士来晋工作奖励资助项目(SXYBKY20174); 山西农业大学博士启动项目(2023BQ05, 2017ZZ12)

收稿日期: 2024-06-21

*通信作者(E-mail: bbai@bjtu.edu.cn)



注: 1-密闭水箱; 2-高压气瓶; 3-水力边界法兰盘; 4-O型橡胶圈; 5-水力边界空腔; 6-传感器导线引出孔; 7-计算机; 8-数据采集仪; 9-透水石; 10-压实膨润土试样; 11-膨润土试样接缝处; 12-温湿度传感器; 13-聚丙烯圆筒; 14-温度边界法兰盘; 15-温度边界空腔; 16-进水管; 17-出水管; 18-恒温水浴循环装置

图 1 热传导和水分迁移参数测定装置示意图

Fig. 1 Experimental devices for determining parameters of heat conduction and water transfer

置库缓冲层的整体性能而言, 接缝区域仍然是潜在的薄弱环节。因此含接缝的缓冲材料在热-水-力耦合 (THM 耦合) 条件下的性能已成为高放废物处置库工程屏障设计与施工中关注的关键问题。

为了研究施工接缝对缓冲材料性能的影响, 已有学者分别从不同的角度对其进行了研究。Hoffmann 等^[7]通过对压实的膨润土颗粒材料进行水化试验研究, 试验结果表明膨润土颗粒材料的饱和渗透性质和膨胀力主要由样品的总干密度控制, 而膨润土颗粒的初始粒度分布对其影响较小。陈宝等^[8]对不同干密度的 GMZ 膨润土试样进行了不同接缝宽度条件下的膨胀力和渗透试验, 结果表明接缝的存在将导致膨润土的膨胀力减小、渗透性增大, 能够引起膨润土内部孔隙大小和数量的变化, 宏观表现为膨润土渗透性增大。王英等^[9]对采用 3 种接缝材料的膨润土土样进行了渗透试验研究, 试验结果表明接缝的愈合程度与密封材料的初始干密度成正比, 采用膨润土微粒密封接缝的土样的愈合程度最高。Jia 等^[10]对不同干密度的 GMZ 膨润土土样在两种接缝宽度的条件下进行了各向异性膨胀力试验研究, 试验结果表明轴向压力随干密度的增长速度比径向压力随干密度的增长速度更快。Meng 等^[11]对含经向接缝的 GMZ 膨润土土样进行了水化试验, 试验结果表明接缝的愈合顺序为自下而上, 与水化路径一致, 在半对数坐标上表现为土样体积与水化时间呈线性关系。然而, 上述研究均可以归纳为水-力两场耦合作用下施工接缝对缓冲材料性能的影响, 并没有考虑放射性核素衰变释热对其产生的影响, 而温度的变化会引起缓冲材料内部水分的迁移, 进而影响接缝的愈合, 故温度变化在含接缝的缓冲材料性能影响的研究中不可忽略。

本文研制了一种适用于非饱和膨润土组合试样的热传导和水分迁移参数测定的室内试验装置, 利用该

试验装置测定了进水前与进水后两种情况下 GMZ 膨润土组合试样不同位置处的温度和体积含水量随时间的演化规律, 并基于试验结果得到了膨润土组合试样接缝位置愈合后的热传导系数和水力传导系数。研究结果将为高放废物处置库工程屏障系统的安全性评估提供参考依据。

1 试验装置

如图 1 所示为所研制的非饱和膨润土组合试样的热传导和水分迁移参数测定试验装置的示意图。试验装置采用绝热防水材料 (聚丙烯材料) 加工成圆筒结构, 圆筒的内径为 100 mm, 筒壁厚 20 mm, 圆筒长为 470 mm。在装样完成后, 将试验装置两端与不锈钢空腔 (温度和水力边界控制腔体) 法兰盘用活动螺栓连接, 其间设置 O 型橡胶圈进行密封。试验过程中, 在右端施加高温边界, 可根据试验要求控制在较高的恒定温度, 高温边界采用恒温水浴循环装置施加, 其能够提供长期的较高的恒定温度, 精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$; 在左端施加水力边界, 采用高压气瓶对密闭水箱加压, 然后通过水管将密闭水箱的去离子水导入水力边界控制腔体内, 从而实现水力边界能够长期稳定的恒压注水。为了保证水力边界控制腔体内的去离子水均匀地渗入膨润土试样, 在水力边界控制腔体与膨润土试样之间设置直径为 100 mm, 厚度为 10 mm 的圆柱形透水石。试样温度和湿度的采集分别采用 PT100 温度传感器和 EC-5 土壤水分传感器。

2 试验方案

本次试验的土样基本物理性质参数见表 1。将 GMZ 膨润土加工成干密度为 1.58 g/cm^3 , 含水率为 15% 的圆柱形试样, 试样直径为 100 mm, 高度分别为 149, 150, 149 mm。将 3 块膨润土试样依次进行拼接,

拼接处设置宽度为 1 mm 的接缝，并采用膨润土粉末填充接缝，进而组成了总长度为 450 mm 的中间含有两条接缝的组合试样。

表 1 GMZ 膨润土土样基本物理性质参数

Table 1 Basic physical property parameters of GMZ bentonite sample

粒径/ μm	蒙脱石含量/%	液限/%	塑限/%	相对质 量密度
<2	74.4	170	27.43	2.66

膨润土组合试样的热传导和水分迁移规律试验测定包括模拟进水前和进水后两种情形。对于进水前的情形，为模拟无外界水流进入的情形，试验装置筒左右端部分别连接 25℃ 和 75℃ 的不透水加热腔体。对于进水后的情形，为模拟外界水流进入处置库后的情况，试样筒右端设置 75℃ 的不透水高温边界，左端设置 25℃ 的恒温透水边界，水压设置为 0.02 MPa（在与试样连接的底板上设置透水小孔以及透水石）。温度和湿度传感器布置位置见图 2。试验过程中，实验室的温度恒定在 25℃。



图 2 试验装置主体及传感器布设

Fig. 2 Main body of experimental devices and placement of sensors

3 结果分析

3.1 温度演化规律

图 3 给出了模拟进水前和进水后两种情形下膨润土组合试样不同位置处的温度随时间的演化规律。根据图 3 可以看出，两种情形下膨润土组合试样不同位置处的温度随时间变化的规律基本相似。即无论是否在左端设置水力边界，由于在试验装置圆筒右端设置温度为 75℃ 的恒定高温边界条件，使得膨润土组合试样不同位置处的温度均有不同幅度的上升，并且不同位置处温度上升的幅度随着其与右端高温边界之间距离的增加而逐渐减小。两种情形下不同位置处的温度增幅随着其与右端高温边界之间距离的变化规律如图 4 所示。根据图 4 可以发现距离右端高温边界较近的

位置 A 与 B 处的温度增幅基本相同，距离左端水力边界由近及远的位置 F 处、E 处、D 处和 C 处，模拟进水后情形下的温度增幅明显高于模拟进水前情形下的温度增幅。这主要是因为膨润土组合试样在左端水力边界的作用下逐渐吸水，使得膨润土组合试样的热传导系数逐渐增大所致^[3, 12]。

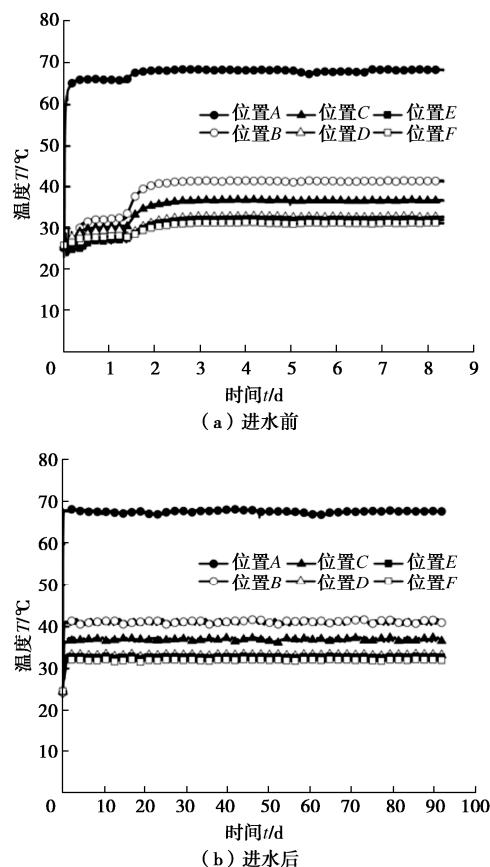


图 3 膨润土组合试样不同位置处的温度随时间的变化

Fig. 3 Variation of temperature at different locations of composite bentonite samples with time

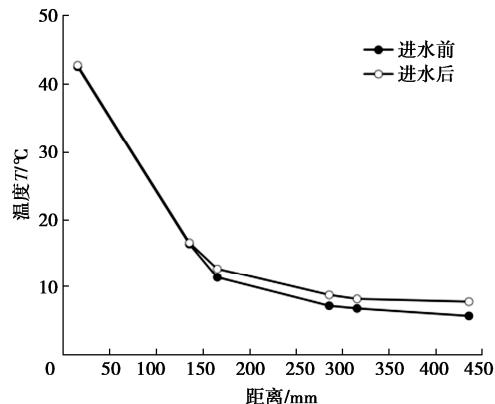


图 4 膨润土组合试样不同位置处的温度增幅

Fig. 4 Temperature increase at different locations of composite bentonite samples

3.2 水分演化规律

图 5 给出了模拟进水前和进水后两种情形下膨润土

组合试样不同位置处的体积含水量随时间的演化规律。由图 5 可以看出, 是否在试验装置圆筒左端加载水力边界对膨润土组合试样靠近水力边界位置处的体积含水量的影响非常明显。模拟进水前情形的试验, 即左端未设置水力边界时, 由于右端高温边界的存在, 膨润土组合试样内部的水分会在温度梯度的作用下由高温处向低温处迁移(图 5(a))。在模拟进水后情形的试验中, 即左端设置水力边界时, 试验结束后距离左端水力边界由近及远的位置 F 处、E 处、D 处、C 处以及 A 处的体积含水量均有较为明显的增加, 并且位置 F 处已经趋于饱和状态, 而距离左端水力边界最远的位置 A 处的体积含水量随着时间的变化逐渐减小(图 5(b))。这主要是因为干密度较高的膨润土试样的渗透性很小, 由左端水力边界注入的去离子水未能渗透至位置 A 处, 并且位置 A 处距离右端高温边界较近, 其内部的水分在温度梯度的作用下沿土体孔隙向温度低的水力边界方向迁移, 故短时间内位置 A 处的体积含水量随时间逐渐降低。

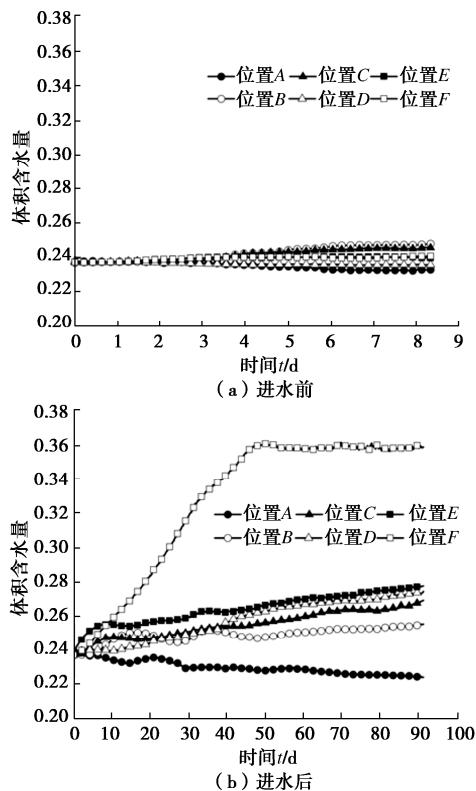


图 5 膨润土组合试样不同位置处的水分随时间的变化

Fig. 5 Variation of water content at different locations of composite bentonite samples with time

3.3 接缝位置的热传导系数

根据上述试验结果可以进一步计算膨润土组合试样接缝处的热传导系数。热传导系数的计算公式如下:

$$\lambda = \frac{Qd}{At\Delta T} \quad (1)$$

式中: λ 为热传导系数($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); d 为膨润土组合试样接缝间的厚度(m), 本文指位置 B 与 C、D 与 E 之间的距离, 为 0.03 m ; A 为土样横截面积(m^2), t 为时间(s), ΔT 为位置 B 与 C、D 与 E 之间的温度差(K); Q 为热能($\text{W}\cdot\text{s}$), 可以表示为

$$Q = cm\Delta T \quad (2)$$

式中: c 为膨润土试样的比热容($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), m 为质量(kg)。

计算得到进水前与进水后两种情形下膨润土组合试样接缝处的热传导系数如表 2 所示。根据表 2 可以看出, 相对于模拟进水前情形的试验, 在左端加载水力边界后, 试验结束时膨润土组合试样接缝位置处的体积含水量明显增加(图 5(b)), 与其对应的接缝位置处的热传导系数也相应增大, 这与前人得到的结论相同^[12]。膨润土组合试样接缝处愈合后的热传导系数能够满足 IAEA 提出的大于 $0.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的要求^[12-13], 可以达到处置库工程屏障的导热性能要求。

表 2 两种情形下接缝位置的热传导系数

Table 2 Thermal conductivities at joints in two cases

试验类型	位置	$\Delta T/\text{K}$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
进水前	BC 接缝	277.95	1.173
	DE 接缝	273.75	1.159
进水后	BC 接缝	276.95	1.236
	DE 接缝	273.85	1.305

3.4 接缝位置的水力传导系数

在模拟进水后情形的试验中, 通过左端的水力边界对膨润土组合试样进行恒压注水, 因此可以采用常水头法计算膨润土组合试样接缝位置处的水力传导系数 K :

$$K = \frac{qd}{A\Delta Ht} \quad (3)$$

式中: q 为时间 t 内渗出的水量(cm^3), ΔH 为水位差(cm)。

计算得到模拟进水后情形下膨润土组合试样的接缝处的水力传导系数如表 3 所示。根据表 3 可知膨润土组合试样接缝处愈合后的水力传导系数与前人所测的完整土样的水力传导系数大致相同, 满足高放废物处置库工程屏障的低渗透性要求^[14-15]。

表 3 进水后情形下接缝位置的水力传导系数

Table 3 Hydraulic conductivities at joint, after simulated water inflow

试验类型	位置	q/cm^3	$K/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
进水后	BC 接缝	4.477	1.084×10^{-10}
	DE 接缝	8.718	2.112×10^{-10}

4 结论

采用研制的试验装置开展完成了模拟进水前与进

水后两种情形下膨润土组合试样的热传导和水分迁移特性的室内试验, 通过对分析两种情形下的试验结果, 得到以下 3 点结论。

(1) 两种情形下膨润土组合试样不同位置处的温度随时间变化的规律基本相似。膨润土组合试样内部温度的变化主要受温度边界的影响, 而其内部水分的变化对其影响较小。

(2) 由于高压实的膨润土试样的渗透性很小, 在短时间内加载水力边界条件仅使得靠近水力边界处的膨润土组合试样的体积含水量大幅度增加, 而对其他位置处影响较小。受到温度边界的影响, 靠近温度边界位置处的土体水分在温度梯度的作用下沿孔隙向水力边界方向迁移, 故短时间内体积含水量随时间逐渐降低。

(3) 根据试验结果计算得到了膨润土组合试样接缝位置愈合后的热传导系数和水力传导系数, 计算结果表明接缝愈合后的热传导系数和水力传导系数能够满足高放废物处置库工程屏障的导热性能和低渗透性要求。

参考文献:

- [1] ZHANG F, YE W M, WANG Q, et al. Effective stress incorporating osmotic suction and volume change behavior of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(7): 1925-1934.
- [2] DONG X X, CHEN Y G, YE W M, et al. Modeling of water retention behavior of densely compacted Gaomiaozi bentonite based on pore structure evolution[J]. *Engineering Geology*, 2023, **313**: 106977.
- [3] YANG G S, BAI B, MAO H T, et al. Study on coupled heat-water-vapor transfer in buffer material based on SPH method[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, **54**: 104019.
- [4] ZHAO J B, 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.
- [5] MENG Y H, WANG Q, SU W, et al. Effect of sample thickness on the self-sealing and hydration cracking of compacted bentonite[J]. *Engineering Geology*, 2022, **307**: 106792.
- [6] ZENG Z X, CUI Y J, TALANDIER J. Long-term effect of water chemistry on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted claystone/bentonite mixture with technological gaps[J]. *Engineering Geology*, 2021, **295**: 106432.
- [7] HOFFMANN C, ALONSO E E, ROMERO E. Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2007, **32**(8/9/10/11/12/13/14): 832-849.
- [8] 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. 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. (in Chinese))
- [9] 王英, 张虎元, 童艳梅, 等. 接缝密封材料对缓冲砌块屏障封闭性能的影响[J]. *岩土力学*, 2021, **42**(6): 1648-1658. (WANG Ying, ZHANG Huyuan, TONG Yanmei, et al. Influence of joint sealing material on the sealing performance of the buffer block barrier[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(6): 1648-1658. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] MENG Y H, WANG Q, SU W, et al. On the evolution of hydration cracks of compacted bentonite under different boundary conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, **407**: 133387.
- [12] 叶为民, 王琼, 潘虹, 等. 高压实高庙子膨润土的热传导性能[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(6): 821-826. (YE Weimin, WANG Qiong, PAN Hong, et al. Thermal conductivity of compacted GMZ01 bentonite[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(6): 821-826. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] NIU W J, YE W M, SONG X Y. Unsaturated permeability of Gaomiaozi bentonite under partially free-swelling conditions[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(5): 1095-1124.

(编校: 孙振远)