

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1805

接缝密封材料对缓冲砌块屏障封闭性能的影响

王 英^{1,2}, 张虎元¹, 童艳梅¹, 周光平¹

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 室内制备模拟压实砌块, 分别采用膨润土粉末、膨润土泥浆以及微粒膨润土(高密度膨润土颗粒与粉末的混合物)对砌块接缝进行密封, 通过室内模拟渗透试验对砌块的膨胀、渗透性能进行研究, 并借助 X-CT 扫描试验、热传导试验以及微观结构分析对砌块接缝的密封程度进行评价。试验结果表明: 随着水化时长的增加, 砌块核心区膨润土向接缝区孔隙侵入, 接缝区膨胀力快速发展, 导致砌块轴向膨胀应力的发展速度减缓, 产生滞后现象; 接缝密封材料类型对砌块体系的水化进程影响显著, 膨胀应力发展速率存在差异; 接缝的愈合程度与接缝充填材料的初始干密度呈正相关。CT 扫描图像表明: 水化结束后, 密封接缝与砌块已基本“焊接”在一起, 而未进行密封的砌块之间仍然存在间隙, 并未完全封闭。相较于完整试样, 密封接缝区土样的集集体间孔隙尺寸分布范围扩大(3~30 μm), 泥浆密封试样接缝区土样结构疏松, 出现 100~500 μm 的大孔隙, 而干缝试样的接缝区则存在多条体积较大的裂隙状二维孔隙。密封可以显著提高砌块体系的各向膨胀能力, 改善愈合砌块体系的均质性, 密封后的砌块体系抗渗性能以及热传导性能与完整样接近, 接缝的不利影响弱化。综合来看, 采用微粒膨润土对砌块接缝进行密封, 接缝的愈合度最高, 砌块的各项工程性能最佳, 其次为采用膨润土粉末以及膨润土泥浆进行密封的试样, 未进行密封处理的干缝试样愈合效果最差。

关 键 词: 高放废物; 膨润土砌块; 接缝; 密封材料; 膨胀力; 渗透系数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)08-1648-11

Influence of joint sealing material on the sealing performance of the buffer block barrier

WANG Ying^{1,2}, ZHANG Hu-yuan¹, TONG Yan-mei¹, ZHOU Guang-ping¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: An indoor permeability test was conducted to study the sealing performance of joints between the compacted blocks which were backfilled with bentonite powder (P), bentonite particle-powder mixture (P/P) and bentonite slurry (S), respectively. The swelling stress and hydraulic conductivity were monitored during the permeability test. After the test, the homogenization of blocks and sealing degree of joints were evaluated according to the X-CT scanning test, thermal conductivity test and microstructure test. The results show that: with the increase of hydration time, the bentonite in the core area of the block intrudes into the pores of the joint, and the increase rate of swelling stress in the joint zone is higher than that in the axial direction of the block, which leads to the slowing down of the development speed of the axial swelling stress of the block and produces hysteresis. The joint sealing materials have significant influence on the hydration process of the block system, resulting different swelling stress development rates. The sealing degree of the joint is positively correlated with the initial dry density of the joint filling material. The X-CT scanning images show that the sealing joint and the block have been "welded" together after hydration. By contrast, there is still a gap between the blocks with a blank joint, showing a lower sealing degree. The MIP and SEM tests demonstrate that the pore size distribution of inter-aggregates in the joint area lies in the proportion between 3 μm and 30 μm , and a certain number of large pores with a diameter between 100 μm and 500 μm were observed in the joints sealed with bentonite slurry. Some fissure-like 2-dimensional pores appeared in the blank joint according to the SEM picture. Generally, sealing can significantly improve the expansion ability and homogeneity of the block system, and the impermeability and thermal conductivity of the healing block system are close to that of the

收稿日期: 2020-12-03

修回日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(No.41972265)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41972265).

第一作者简介: 王英, 女, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: ywang16@lzu.edu.cn

通讯作者: 张虎元, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事与废弃物处置有关的环境岩土工程方面的研究工作。

E-mail: zhanghuyuan@lzu.edu.cn

intact sample. Joint backfilled with bentonite particle-powder mixture shows a better sealing performance, followed by the joint sealed with bentonite powder and bentonite slurry, and the sealing effect of joint without backfilling is the worst.

Keywords: high-level radioactive waste; bentonite block; joint; sealing materials; swelling pressure; permeability

1 引言

基于深地质处置的多重屏障体系(废物体-废物处置罐-缓冲回填屏障-天然围岩屏障)是高放废物处置的基本设计理念。根据处置库设计概念,缓冲回填屏障主要采用高密度压实膨润土砌块堆筑或高密度膨润土颗粒充填的方式进行施工。尤其对于废物罐放置部位的污染区,可以借助特定的机械设备,将提前压制成形的膨润土砌块按照一定的施工顺序进行堆砌拼装,将废物罐封闭其中,形成完整的密封屏障^[1-2]。这种施工方法机械化程度高,拼装砌块的形状、密度以及施工工艺都可以根据地下硐室的实际情况进行调整优化,施工速度快,过程更灵活。但是,采用砌块拼装施工,砌块与砌块之间,砌块与废物罐之间以及砌块与围岩之间均会产生不同比例和形状的施工间隙。这些施工间隙会导致核心区砌块体系在吸水膨胀过程中的边界条件发生改变,发生不可抑制的不均匀变形,降低缓冲屏障的均质性,影响废物罐以及周边围岩的稳定性,而随着废物体辐射热以及地下水-化学环境的变化,施工间隙的封闭过程进一步减缓^[3-5],加剧了其对缓冲屏障性能的不利影响。

随着各国地下实验室研究工作的不断开展,由于砌块拼装产生的施工接缝问题,受到了研究人员的更多关注。Furuichi 等^[6]开展了室内等比例膨润土砌块水-力-热 (THM) 耦合模拟试验,发现存在接缝的砌块抗剪强度为完整试样的48%~63%。Dueck 等^[7]指出,施工接缝会降低砌块的膨胀性能,增加径向应力与轴向应力之间的各向异性,其中相较于轴向接缝体系,径向接缝体系对砌块的膨胀特性影响更为显著。随着接缝体积占比的增大,砌块的膨胀力不断降低,渗透系数不断增大。当接缝体积与压实膨润土砌块体积的占比超过一定比例时,压实膨润土的膨胀力将不再满足高放缓冲砌块的设计要求^[8-9]。例如,对于 MX-80膨润土系列,当径向接缝体积占砌块体积的16.2%时,砌块轴向膨胀力的最大降幅将超过50%,渗透系数将会降低1~2个量级^[10]。尽管随着水化进程的深入,接缝区在砌块膨胀变形的作用下,膨润土胶体会不断充填接缝区域,但是接缝区会形成一定范围的低密度挤压区,而同时在远离接缝的砌块区域形成拉伸区,接缝区膨润

土出现介于大、小孔之间的中间孔隙结构,接缝区和压实区的密度差异明显,整体的均质性不佳^[11]。许韬等^[12]利用水-力-热 (THM) 模型模拟接缝的类型、数量、宽度以及砌块的拼接形式对缓冲屏障工程性能的影响,结果表明:接缝的存在,导致砌块膨润土的应力增长出现延迟;在相同体积比的情况下,砌块之间的法向接缝对渗流的影响大于砌块与围岩之间的环向接缝;接缝的数目越多,对砌块的水-力特性影响越大。

如上所述,尽管施工接缝会随着膨润土材料的水化膨胀逐渐闭合,但是接缝的存在对于缓冲砌块屏障的水-力特性以及均质性均会产生不可忽视的重要影响。SKB(瑞典核燃料及废物管理公司)提出,使用机械手将膨润土块体进行堆砌,然后以膨润土颗粒填充围岩和砌块之间的空隙^[13],从而削弱施工接缝对缓冲屏障整体性能的影响。在部分 Mock-up 试验中,研究人员也采用了膨润土粉或膨润土颗粒对砌块与容器之间的施工接缝进行回填处置^[14-15],但是仅仅是从封闭接缝的角度进行技术处理,并未针对砌块体系的封闭性能以及接缝的愈合机制进行深入的研究。在国内,张虎元等^[16-17]首次利用微粒膨润土(高密度颗粒膨润土与膨润土粉末的混合物)对砌块与砌块之间的接缝进行密封,并对充填后砌块的渗透性以及热传导性进行研究,结果表明:充填后砌块体系的抗渗性能以及导热性均有改善,接缝密封降低了其不利影响。本文在以上研究的基础上,采用不同类型的接缝密封材料,对密封后砌块体系的膨胀性能、渗透性进行研究,同时借助愈合砌块体系的密度分布、热传导系数分布以及愈合接缝区土体的形貌特征和孔隙结构,对接缝密封材料的密封效果进行评价,试验结果可以为实际处置库建设的材料优化与施工接缝处置提供参考。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验所选用的膨润土材料为高庙子膨润土(简称 GMZ 膨润土),产自我国内蒙古高庙子乡,蒙脱石含量约为 44.4%,塑限为 27.43%,液限为 170%,土粒相对密度为 2.70。所采用的标准石英砂产自甘肃省永登县,砂粒粒径在 0.5~1.0 mm 之间,硅石含量约为 99.45%,土粒相对密度为 2.65。

接缝区密封材料的选择,主要从其膨胀性能(即密封性能)以及施工便利的角度出发进行考虑。本文共选择了3种不同形式的接缝区密封材料,即膨润土粉末(bentonite powder,简称P)、膨润土泥浆(bentonite slurry,简称S)以及微粒膨润土(bentonite particle-powder mixture,简称P/P)作为接缝的密封材料。

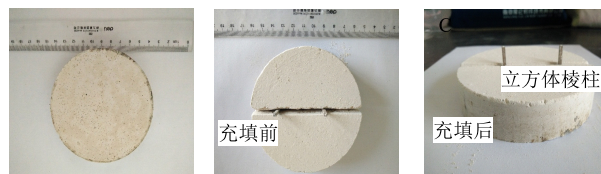
膨润土粉采用原状商品膨润土,天然含水率介于4.3%~7.4%之间。膨润土泥浆采用烘箱干燥后的膨润土干粉进行配置,含水率为100%。微粒膨润土为高密度压实膨润土颗粒与膨润土粉末的混合物,根据文献[16]的研究成果,本试验微粒膨润土采用粒径组合为0.25~0.5 mm,颗粒率 R_g (R_g 定义为膨润土颗粒质量与膨润土粉末质量的比值)为70%的微粒膨润土。

由于接缝的体积有限,充填材料的性状不同时,接缝区的充填密度差异较大,因此,在试验开展之前,需要首先确定接缝充填密度。通过少量多次进行充填,对相同接缝宽度条件下,膨润土粉、膨润土泥浆以及微粒膨润土的最大充填密度进行测定,找到3种材料充填密度的共同范围,并最终确定接缝的充填密度为 (1.2 ± 0.2) g/cm³。

2.2 试样制备

试验采用室内压制的含模拟接缝的圆柱形砌块试样,砌块直径为102 mm,高度为20 mm,接缝宽度为3 mm,沿径向贯通,接缝体积为砌块体积的4.2%。砌块压制干密度为1.63 g/cm³,掺砂率 R_s (R_s 定义为石英砂质量与膨润土质量的比值)为30%,初始含水率为 (10.5 ± 1) %。模拟砌块接缝的制备是在完整圆柱试样制备方法的基础上改进形成的。首先在压制模具底座上放置一个不锈钢钢片

(100 mm×19 mm×3 mm),将配置好的土样均匀分为两份,倒入钢片两侧并划拨均匀,然后放置加载头,压实速率为2 kN/min,待达到试样设计高度后保压5 min,压制结束后脱模并取出钢片,即可形成接缝宽度为3 mm的对开型砌块试样(如图1所示)。



(a) 完整试样 (b) 含接缝试样(俯视图) (c) 含接缝试样(侧视图)

图1 室内压制模拟砌块试样

Fig.1 Compacted blocks with a joint or intact block

2.3 试验总体设计

接缝的愈合过程,与砌块的膨胀应力发展过程以及水化进程关系密切。通过室内渗透试验,对模拟砌块试样在恒体积条件下接缝内部、砌块顶部的膨胀应力以及进出水水量进行监测,分析接缝密封材料类型对砌块-接缝体系水化进程和应力发展过程的影响。渗透试验结束后,借助CT扫描试验、热传导试验以及微观结构分析方法(扫描电镜和压汞试验),从细观以及微观角度对接缝密封材料的密封效果以及接缝的愈合程度进行评价,筛选出最优的接缝密封材料。为了更好地对含充填接缝砌块体系的水化愈合特性进行分析,试验分别增设一组干缝(无充填)砌块(non-backfilled,简称N)和完整砌块(intact,简称I)的试样。具体试验参数及试验结果如表1所示。

表1 模拟砌块试样接缝密封参数表及试验结果
Table 1 Statistical parameter table of simulated specimens

编号	砌块		密封材料	接缝			最终膨胀力		渗透系数 (m·s ⁻¹)	接缝愈合度 /%
	初始干密度 (g·cm ⁻³)	水化后干密度 (g·cm ⁻³)		初始充填密度 (g·cm ⁻³)	初始充填干密度 (g·cm ⁻³)	水化后干密度 (g·cm ⁻³)	P_A /kPa	P_R /kPa		
ST01	1.627	1.485	P	1.23	1.02	1.412	243	282	1.40×10^{-11}	95.07
ST02	1.631	1.532	P/P	1.22	1.21	1.454	256	340	9.69×10^{-12}	94.90
ST03	1.632	1.446	S	1.25	0.63	1.329	165	250	1.19×10^{-11}	91.85
ST04	1.628	1.417	—	0.00	0.00	1.189	192	221	5.15×10^{-11}	83.94
ST05	1.626	1.601	—	—	—	—	385	—	7.16×10^{-12}	98.40

2.4 试验装置与装样

膨胀力试验采用实验室自主设计加工的刚性壁渗透装置进行。如图2所示,刚性壁渗透装置主要由注水设备、刚性壁膨胀仪、数据采集系统以及

出水采集系统4部分组成^[17]。刚性壁内腔直径为 (102 ± 0.2) mm,高度为 (20 ± 0.2) mm。底座两端分别设有进水口,顶盖两端分别设有排气口和排水口。注水设备为美国生产的HM-4160A型柔性壁渗

透仪的注水管路系统, 最大渗透压力为 1.6 MPa, 最大水头高度为 1.2 m, 注水管精度为 0.1 mL。渗出水由量筒采集, 量筒最大量程为 50 mL, 测量精度为 1 mL^[16]。膨胀力数据采集系统由美国 Tekscan 公司生产的薄膜压力传感器及采集仪组成, 传感器为高温型薄膜压力传感器, 感应探头直径为 10 mm, 最大量程为 550 N。

在膨胀力测试开始之前, 通过加压注水的方式检查刚性壁膨胀仪的密封性。检查结束后, 依次将透水石、滤纸放入膨胀仪底座对应位置。通过 4 根固定螺杆将试样环固定于底座上, 放入压制好的试样, 将传感器 PS_J 置于接缝中间, 并采用密封材料对接缝进行填充。为了保证接缝区填料的均匀性, 当接缝区传感器放入接缝区域后, 将接缝区填料按质量均分为两份, 分 3 次填充入传感器两侧, 并采用薄刮片划拨均匀。随后在试样顶部依次放置传感器 PS_T、滤纸以及透水石, 将传感器引线从穿线孔穿出。最后盖上顶盖, 旋紧顶盖上的锁紧螺母, 完成装样并使用密封胶对穿线孔进行密封处理。

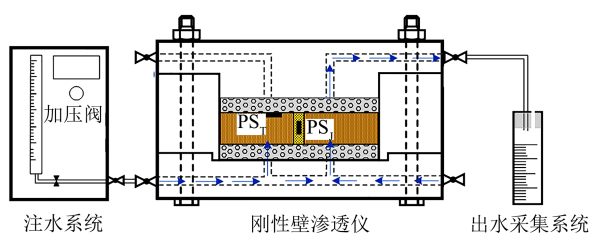


图2 膨胀力试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the swelling test system

2.5 试样饱和方式

考虑到在处置库实际运行期间, 当硐室封闭, 地下水进入硐室内部时, 尽管地下水存在较大的水头, 但是由于硐室内部的空间较大, 在入渗的初期阶段, 地下水可能是以一种漫流的方式进入膨润土缓冲屏障内部, 随着膨润土材料的不断吸水饱和, 内部孔隙不断被封闭, 此时, 地下水的入渗从漫流模式逐渐过渡为压力入渗模式。因此, 本文将渗透试验的水化过程分为毛细饱和阶段和加压渗透两个阶段。采用由下往上的单向注水模式, 渗透液为去离子水。

2.5.1 毛细饱和和渗透阶段

试样首先在毛细饱和模式下进行饱和, 此时注水系统管路与大气连通, 注水水头的初始高度为 1.0 m。当注水系统开始向刚性壁膨胀仪内部注水时, 每隔 30 min 记录一次水头高度。为防止在注水

的初始阶段接缝区充填材料在水头作用下被冲刷带出, 在试验开始时, 暂时先关闭排水阀, 在注水 2 h 之后再打开阀门, 并与出水采集装置相连。出水采集量筒顶部采用硅胶塞进行封闭, 防止渗出水蒸发, 同时在瓶塞顶部设有一直径为 0.3 cm 的细孔, 保持采集量筒与外部的大气连通。

2.5.2 加压饱和和渗透阶段

当试样的吸水量 24 h 变化量小于 0.5 mL 时, 转换饱和方式。首先关闭注水系统的进水阀和渗透装置的出水阀, 然后将注水系统管路与压力罐设备连接, 设定压力水头为 0.1 MPa。试验采用逐级加压注水, 注水压力从 20 kPa 增加至 100 kPa, 每次增压 20 kPa, 停留 2 h。以出水速率 v 作为试验终止的评判标准, 计算式为

$$v = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻 (h) 记录的水头高度 (cm)。

当 $|v_i - v_{i-1}| \leq 0.01$ 时, 认为试样的饱和和渗透过程已经稳定, 结束渗透试验。

2.6 CT 断层扫描试验

CT 断层扫描成像技术可以对材料内部的均质程度、大孔隙结构以及裂缝开展的空间位置进行定位追踪, 寻找材料损伤或愈合的证据, 是一种高效、多层次的检测方式^[18-19]。考虑到膨胀力试验中试样接缝区埋置有传感器, 影响 CT 扫描, 因此, 制备与表 1 相同的平行砌块试样进行饱和 (饱和方式同上), 待渗透试验结束后, 将试样从刚性壁渗透仪中缓慢的推出, 放入定制的有机玻璃模具内, 试样的包封模具内径为 102.5 mm, 高度为 20 mm, 试样表面采用聚乙烯薄膜进行包裹, 防止试样的水分散失。包封结束后立刻进行 CT 断层扫描试验。扫描沿试样轴向进行, 扫描间距为 3 mm (如图 3 所示)。

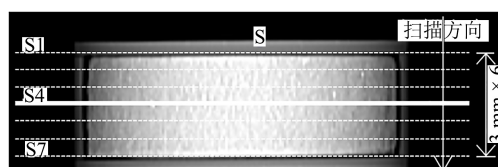


图3 CT扫描方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of the CT scanning method

2.7 热传导试验

CT 断层扫描试验结束后, 测定愈合砌块的热传导系数。热传导试验采用 Hot Disk TPS 2 500 s 型

热常数分析仪,其原理是基于瞬变平面热源法,为材料样品提供固定功率的热源,记录样品本身温度随时间的变化情形,由时间与温度变化的关系即可求得样品的热传导系数。试验采用单面法进行测试。如图 4 所示,测试分别沿垂直于接缝(剖面 1-1)和平行于接缝(剖面 2-2)和两个方向进行,平均选取 5 个测试点,测定热传导系数。

3 试验结果分析

3.1 膨胀力

图 5 为采用不同接缝密封材料的砌块体系膨胀应力随时间的变化情况。从膨胀应力发展的时间过

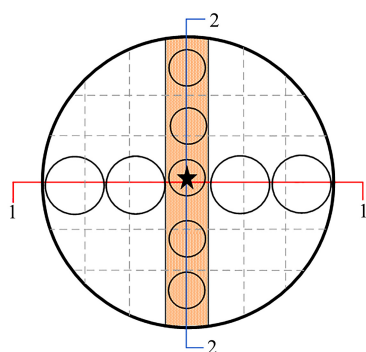
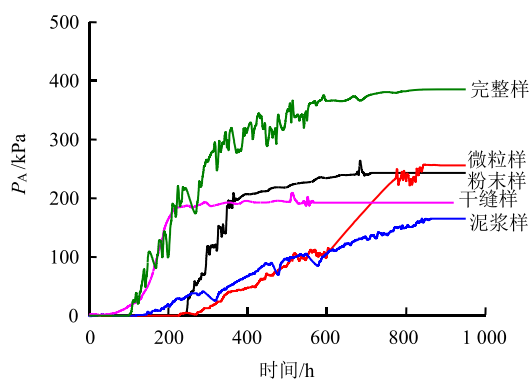
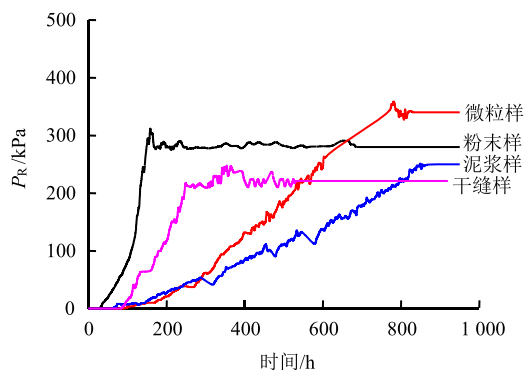


图 4 热传导系数测定方法

Fig.4 Measurement method of thermal conductivity



(a)砌块轴向膨胀应力随时间的变化



(b)接缝区膨胀应力随时间的变化

图 5 砌块膨胀应力随时间的变化

Fig.5 The evolution of swelling stress with time

程来看,对于含有充填接缝的砌块体系,在水化初期,由于接缝区结构疏松,孔隙丰富,两侧砌块膨润土材料吸水后产生径向变形,不断侵入接缝区,利于接缝的愈合。在接缝密封材料和两侧砌块的挤压下,接缝区膨胀应力 P_R 发展较快,并相应地引起砌块顶部轴向膨胀应力 P_A 发展变缓,应力起始时间推后。其中,采用膨润土粉末进行密封的砌块试样轴向应力滞后时长最长,达到 200 h,其次为膨润土微粒密封的试样,为 121 h,泥浆密封样的滞后时长最短,仅为 55 h。未充填干缝试样尽管砌块的径向变形空间更大,但是由于接缝为空缝,水分可以快速通过接缝区域进入砌块顶部,因此,轴向膨胀应力的滞后时长最小。从最终膨胀应力数值来看,接缝区的最终膨胀应力由小到大依次为干缝样、泥浆样、粉末样以及微粒样,与接缝区材料的充填干密度呈正相关。对于存在接缝的砌块试样,最终的轴向膨胀应力均低于完整试样,膨胀应力由小到大依次为泥浆样、干缝样、粉末样、微粒样以及完整样。

对于密封后的砌块体系,接缝区膨胀应力发展与砌块体系膨胀应力的发展是一个联动的过程,不同性状的密封材料对砌块体系的水化进程影响显著,主要体现在膨胀应力发展的速率以及最终膨胀力的数值两个方面。将试样达到最大膨胀应力的 25%、50%以及 90%所用的时长分别定义为初期膨胀应力时长 T_{25} 、半膨胀应力时长 T_{50} 以及主膨胀应力时长 T_{90} ,密封砌块体系各阶段的膨胀应力增长率计算式为

$$\delta_{初} = \frac{P_{25} - P_0}{T_{25} - T_0} \quad (2)$$

式中: $\delta_{初}$ 为初期阶段膨胀应力增长率; P_0 、 P_{25} 分别为试验开始时 T_0 时刻以及初期膨胀应力时长 T_{25} 时刻分别对应的膨胀应力值。各阶段膨胀应力增长率统计结果见表 2。

由数据分析可知,对于微粒充填砌块试样,在水化的初期阶段,微粒膨润土中的膨润土粉末先吸水膨胀,充填膨润土颗粒与粉末之间的大孔隙,而高密度膨润土颗粒的水化速度较慢,因此,接缝区膨胀应力前期发展缓慢,膨胀应力增长率为 0.6 kPa/h。随着高密度颗粒的水化崩解,膨胀应力后期发展速度加快,后期膨胀应力增长率约为 1.6 kPa/h,是初期应力增长率的 2.7 倍。砌块顶部轴向的膨胀应力在前期和中期阶段增长率基本与接缝区同步,在后期阶段随着接缝区密实度的提高,水分进入砌块顶

表 2 各阶段膨胀应力增长率统计分析
Table 2 Statistical analysis of the swelling stress development rate at different stages

充填材料	轴向（砌块区）			径向（接缝区）		
	初期(T_{25})应力增长率 /(kPa · h ⁻¹)	中期(T_{50})应力增长率 /(kPa · h ⁻¹)	后期(T_{90})应力增长率 /(kPa · h ⁻¹)	初期(T_{25})应力增长率 /(kPa · h ⁻¹)	中期(T_{50})应力增长率 /(kPa · h ⁻¹)	后期(T_{90})应力增长率 /(kPa · h ⁻¹)
粉末	0.6	1.8	0.7	1.5	2.5	1.1
微粒	0.8	0.7	1.2	0.6	0.7	1.6
泥浆	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6
干缝	2.9	0.9	0.5	0.9	0.8	0.3

注：由于膨胀应力的检测数据存在一定的波动性，膨胀应力达到对应阶段的时长以应力曲线最后一次达到该值（或相应值范围 ± 0.05 MPa）的时间进行确定。

部的速率减缓，顶部轴向膨胀应力增长率略滞后于接缝区。对于粉末充填试样，接缝充填材料密度介于微粒样和泥浆样之间，但是由于材料单一，水化速度最快，在初期和中期阶段接缝区膨胀应力增长率约是微粒样的 3 倍，但是在水化的后期阶段，应力增长率下降为微粒样的 2/3。同时，由于接缝区愈合速度快，导致水分向上进入砌块的速度减缓，因此，砌块区各阶段膨胀应力增长率明显滞后于接缝区，两向应力的同步程度最差。对于泥浆试样，由于在拌制过程中，泥浆材料的部分膨胀能力已经发挥，接缝区总体膨胀能力有限，砌块各向膨胀应力的增长率最慢。对于含有干缝的砌块体系，在水化初期，空接缝是一条主要的水力通路，因此，前期砌块顶部轴向膨胀应力发展快于接缝区。随着接缝的不断封闭，在中期和后期阶段，接缝区与轴向应力增长率逐渐平衡。

从应力发展的进程来看，采用微粒膨润土进行充填，砌块膨胀性能最佳，后期膨胀力发展较快，但是整体水化速度较慢。采用粉末充填，砌块初期和中期水化速度优势明显，膨胀力略低于微粒膨润土充填的试样。采用膨润土泥浆充填的砌块试样膨胀力以及水化速率方面均无明显优势。

3.2 水力传导系数

对于不同类型的接缝密封材料，砌块水化的进程时间节点亦不同。对于干缝试样，在毛细饱和阶段开始采集到出水，而其余试样则在加压渗透阶段，经过不等长的时间后，试样开始采集到出水。以试样开始采集到出水时的累计吸水量作为计算依据，不同接缝密封方式的砌块计算饱和度介于 105.6%~126.7%。根据 Lloret 等^[20]的研究成果，压实膨润土中较高的计算饱和度（通常大于 100%）可能与黏土矿物中较高的孔隙水密度有关。因此，可以认为，渗透试验开始采集到的出水的时刻试样已经趋于饱和。根据 ASTM D5084^[21]的基本要求，当土样的计算饱和度介于（100 $\pm$ 5）%时，可以采用达西定律计算试样的饱和渗透系数，计算式为

$$k = 2.3 \frac{\alpha L}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (3)$$

式中： k 为试样的饱和渗透系数； α 为注水管的内截面积（cm²）； L 为试样高度（cm）； A 为试样截面积（cm²）； t 为测量记录时刻； h 为注水管路水头高度（cm）。

如图 6 所示，不同接缝密封方式的砌块试样饱和渗透系数在 $5.15 \times 10^{-11} \sim 7.16 \times 10^{-12}$ m/s 之间，从小到大依次为完整样、微粒样、泥浆样、粉末样以及干缝样。其中，微粒样渗透系数与完整样为同一量级。对于粉末样和泥浆样，二者的渗透系数差异较小，但是由于泥浆的含水率更高，在砌块的膨胀挤压过程中更易变形和流动，应力波动明显，并由此导致泥浆样的渗透系数波动较为明显。无充填的干缝试样渗透系数最大，与完整试样几乎相差一个量级。

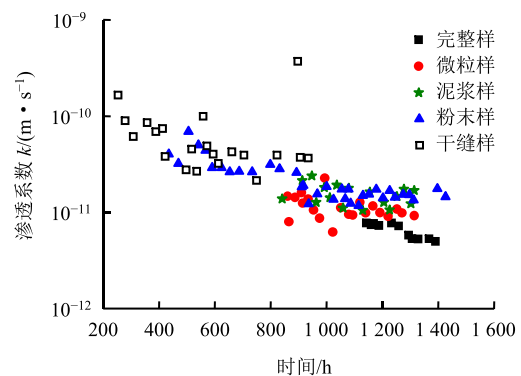


图 6 渗透系数随时间的变化

Fig.6 The evolution of hydraulic conductivity vs. time

从渗透性能的角度来看，对于密封后的砌块体系，如图 7 所示，水力传导系数的变化规律基本符合完整试样渗透系数随砌块最终干密度的变化规律。由此说明：对于含有接缝的砌块体系，其抗渗性能主要还是取决于水化完全后的砌块部分，尽管密封后的接缝区密度相对砌块区域低，但是对整个

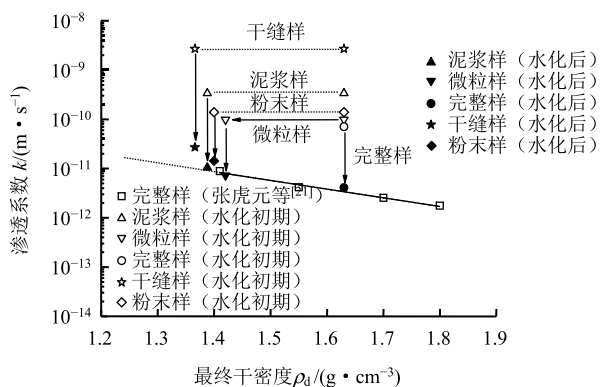


图7 水力传导系数随砌块最终干密度的变化

Fig.7 The variation of hydraulic conductivity vs. final dry density of the block

砌块体系抗渗性能的影响已经可以忽略。而对于未密封的砌块体系,其渗透系数则更接近于接缝区的最终干密度所对应的渗透系数量级,砌块体系的抗渗性能主要取决于接缝区土样的密实程度。

4 接缝的愈合程度分析

4.1 X-CT 断层扫描

选取距离注水端约 1 cm 位置(即图 3 中 S4 断面)进行 CT 断层扫描,图像如图 8 所示。对于未进行密封的干缝试样,饱和后接缝位置仍然存在明显的大空隙,而采用粉末、微粒和泥浆进行密封的砌块试样,接缝与砌块之间“焊接”效果良好。其中,微粒密封试样的部分接缝边界线已无法通过肉眼进行识别。但是不同密封材料的试样接缝区与相

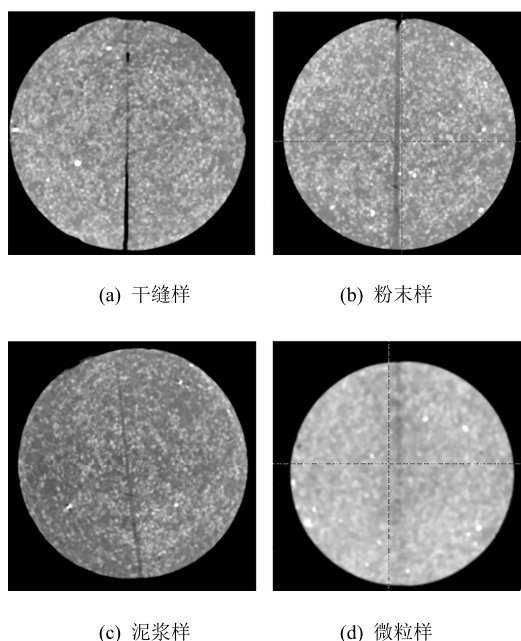


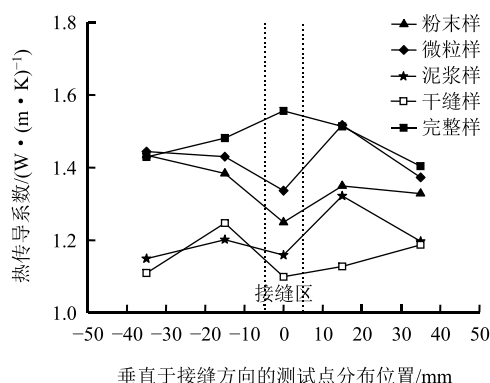
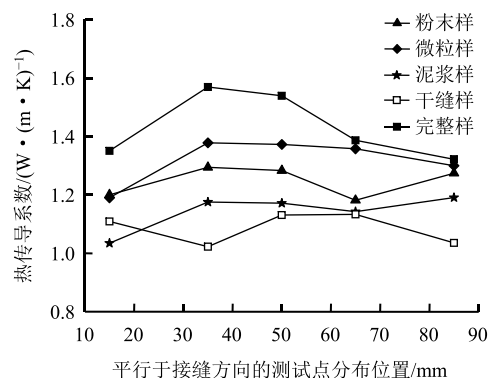
图8 含模拟接缝砌块水化后 CT 扫描图片

Fig.8 The CT scanning section pictures of the blocks

邻砌块区的 CT 图像灰度仍然存在差异,表明密封接缝仍然无法与相邻砌块达到完全的均质化。

4.2 热传导系数分布

热传导性是衡量高放处置库缓冲砌块体系能否满足辐射热向外扩散的重要指标,通过分析接缝区与砌块区的热传导性能差异,可以间接评价接缝的密封效果。图 9 为沿垂直于接缝方向的试样热传导系数分布曲线。由图可知,采用不同密封材料进行处理的砌块试样,接缝愈合带的热传导系数小于或接近两侧砌块区域。砌块平均热传导系数范围为 1.17~1.46 W/(m·K),由高到低依次为完整样、微粒样、粉末样、泥浆样以及干缝样。结果表明:垂直接缝方向接缝区的密实程度仍然与砌块区域存在差距,但是密封后的接缝区域热传导性能与相邻砌块区域的差距缩小,试样的均质性提高,其中,微粒样与完整样的差距最小,而干缝样的差距最大。为了考察接缝内部的愈合均质程度,沿平行于接缝方向进行热传导系数的测定(见图 10)。各接缝处理形式的平均热传导系数范围为 1.08~1.41 W/(m·K),由高到低依次为微粒样、粉末样、泥浆样以及干缝

图9 垂直于接缝方向砌块的热传导系数分布
Fig.9 Thermal conductivity distribution of blocks perpendicular to the joint direction图10 平行于接缝方向砌块的热传导系数分布
Fig.10 Thermal conductivity distribution of blocks parallel to the joint direction

样,与接缝密封材料的充填干密度呈正相关。各测点热传导系数的差异较小,热稳定性基本一致,说明接缝内部密度分布较为均匀。

选取掺砂率 $R_s = 30\%$ 的完整试样以及采用颗粒率 R_g 为 $30\% \sim 90\%$ 的微粒膨润土进行密封的砌块试样,将上述试样的热传导系数与本文含接缝试样的热传导系数进行对比。由图可知,随着含水率增大,缓冲回填材料导热系数逐渐增大;在相同的含水率条件下,热传导系数随干密度呈线性增加。采用不同性状接缝密封材料进行密封的砌块试样的热传导性能均能满足国际原子能机构(IAEA)提出的缓冲回填材料导热系数大于 $0.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 要求,满足处置工程屏障的要求。

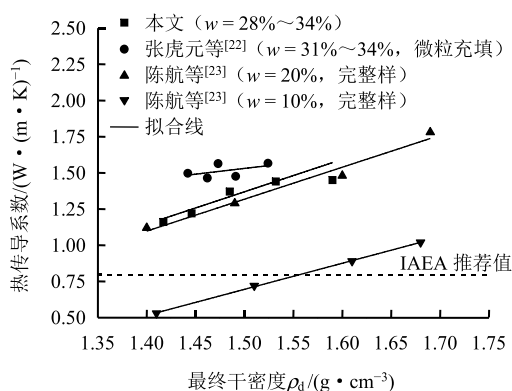


图 11 含接缝砌块热传导系数随砌块最终干密度的变化
Fig.11 Average thermal conductivity vs. final dry density of the block

4.3 接缝区孔隙结构

待热传导系数测定完成后,对饱和砌块试样进行拆解,测定试样不同部位的干密度。同时取愈合后接缝中心区域的土样(图 4 中五角形标识区域),经冷冻干燥处理后,对土样的微观形貌特征和孔径分布进行分析。图 12 为水化愈合后接缝区土体的孔径分布曲线。对于完整砌块试样,土样取自砌块中心区域,孔径分布曲线呈现典型的双峰结构,其中集合体内孔隙孔径分布范围为 $0.04 \sim 0.1 \mu\text{m}$,集合体间孔隙孔径分布范围为 $7 \sim 15 \mu\text{m}$ 。对于密封类砌块试样,土样采集于接缝中心区域。相较于完整试样,接缝区土样的集合体间孔隙孔径分布范围扩大,孔隙体积占比增加。对于不同接缝密封材料的砌块体系,接缝区孔径分布曲线的区别主要集中在集合体内孔隙的范围与占比方面,即反映土样干密度的峰值区间^[24]。与此同时,部分接缝区土样出现平均孔隙直径大于 $300 \mu\text{m}$ 的孔隙,其中膨润土粉末样的

孔径尺寸范围为 $150 \sim 800 \mu\text{m}$,泥浆样的孔径尺寸范围为 $100 \sim 500 \mu\text{m}$,干缝样的孔径尺寸范围为 $200 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 。根据 Lloret 等^[20]的研究成果,当膨润土试样的干密度高于 $1.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时,集合体间大孔隙的直径范围通常小于 $480 \mu\text{m}$ 。但是 Lloret 同时指出,集合体间大孔隙的分布范围以及数目与试样的初始干密度有关,干密度越小,大孔隙的孔径分布范围越广,孔径越大。根据表 1 所示结果,采用膨润土粉末密封后的接缝区最终干密度约为 $1.412 \text{ g}/\text{cm}^3$,因此,其孔径分布曲线中的大孔直径分布范围超出了已有研究结论给出的范围,考虑可能是试样在制备过程中产生的微裂隙造成的。而对于采用膨润土泥浆进行密封的接缝试样,愈合后接缝区的最大干密度为 $1.14 \text{ g}/\text{cm}^3$,孔径分布曲线中大孔隙的分布范围为 $100 \sim 500 \mu\text{m}$ 之间,应当属于集合体间的大孔隙范围。对于干缝试样,由于愈合后接缝区的最大干密度约为 $0.71 \text{ g}/\text{cm}^3$,因此,该部分孔隙是否也是制样过程中产生的微裂隙,需要借助 SEM 扫描电镜的结果才能得出结论。

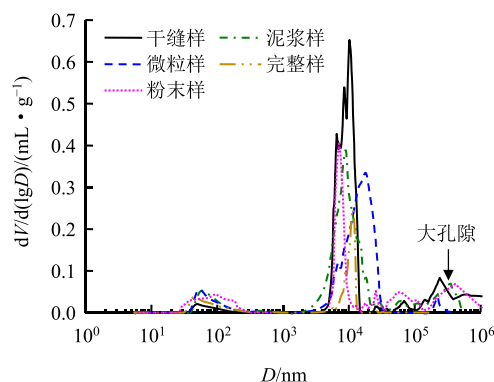


图 12 接缝区土样孔径分布曲线
Fig.12 Pore size distribution of soils in the joint area

取部分平行样本,借助扫描电镜对接缝区土样的孔隙结构进行分析。图 13(a) (放大 500 倍) 为粉末密封接缝区土样的土体形貌,巧合的是,土样可能来自于接缝与砌块的接触区域,SEM 照片可以清晰地看到接缝与砌块的接触界面,砌块区和接缝区土体已基本相互“焊接”在一起。图 13(b) 为局部放大 2 000 倍的电镜照片,采用粉末密封的砌块接缝区存在尺寸较大的集合体颗粒,颗粒呈点-点接触和点-面接触,孔隙丰富。对于采用膨润土微粒进行密封的试样(见图 13(c)、13(d)),接缝区仍然存在一定数目的未水化的高密度膨润土颗粒,相较于粉末样来看,膨润土集合体间的孔隙数目减少,大孔数目降低,土体结构更为密实。采用膨润土泥浆进行

密封的试样 (见图 13(e)、13(f)), 接缝区膨润土的水化程度更高, 出现典型的薄片状层叠体结构, 膨润土集合体之间的大孔数目增多, 孔径尺寸明显增大。而对于未密封的干缝试样, 如图 13(g)、13(h) 所示, 接缝区存在多条体积较大的裂隙状二维孔隙。对于采用膨润土粉末进行密封的试样, SEM 照片中并未发现孔径大于 $300\ \mu\text{m}$ 的大孔隙, 因此, 可以推断孔径分布曲线中出现的大孔应该是由制样过程中产生的微裂隙引起的。而干缝试样的 SEM 照片则明确了孔径分布曲线中的大孔隙, 是来自于土样内部的二维状裂隙。从微细观角度来看, 尽管缓冲砌块之间形成的施工接缝可以随着膨润土材料的水化膨胀而逐渐封闭, 但是从处置库运营的长远角

度来看, 未经密封的接缝愈合程度较低, 仍然是放射性核素以及废物处置罐的腐蚀产物潜在的运移通道, 影响处置库的耐久性和安全性。

综合来看, 采用不同类型接缝密封材料进行密封的砌块, 水化均质程度存在显著差异。砌块体系的膨胀性能、抗渗性能以及热传导性能与水化完全后的砌块以及接缝区的最终干密度密切相关。定义水化完全后接缝区最终干密度与砌块区最终干密度的比值为接缝的愈合度, 对不同类型的膨润土密封材料的密封效果进行评价。如表 1 所示, 接缝区的愈合度由小到大依次为干缝样、泥浆样、粉末样和微粒样, 愈合度分别为 83.94%、91.85%、94.90% 以及 95.07%, 接缝的愈合程度与密封材料的初始干密度呈正相关。总体来看, 采用微粒膨润土密封材料, 可以获得最大充填密度, 愈合后砌块体系的均质化程度最佳, 与完整样的差异最小, 其次是膨润土粉末以及膨润土泥浆试样, 而干缝试样接缝区密度最低, 砌块区的密度降幅最大, 接缝的愈合程度较差。

5 结 论

缓冲砌块接缝的愈合过程, 是整个砌块体系不断均质化的过程, 接缝的设计参数 (与砌块形状以及拼装工艺相关)、处置方法 (与接缝的位置相关) 以及密封材料类型对于接缝的水化愈合均会产生重要影响。本文针对缓冲砌块之间的接缝, 采用膨润土粉末、膨润土泥浆以及微粒膨润土对接缝进行密封, 并对密封后砌块体系的膨胀性能、渗透性能以及接缝的愈合程度进行分析, 主要结论如下:

(1) 采用膨润土材料对砌块接缝进行密封处理可以提高砌块径向以及轴向膨胀性能, 降低施工接缝的不利影响。水化过程中, 砌块膨胀变形优先向接缝区发展, 促进接缝的愈合, 由此导致砌块轴向膨胀应力发展速率滞后于接缝区膨胀应力发展速率。充填干密度相同时, 含接缝砌块膨胀力由低到高依次为泥浆样、粉末样和微粒充填试样, 高于无充填干缝样, 低于完整样。

(2) 采用膨润土材料对砌块接缝进行密封, 水化后接缝区与砌块区土体已基本相互“焊接”在一起。采用膨润土微粒充填的接缝区水化结束后仍然存在一定数目的未水化高密度膨润土颗粒, 土样结构最密实, 粉末样次之, 泥浆样最疏松。接缝区土体集合体间孔径分布范围扩大, 在泥浆样试样中出现孔径大于 $300\ \mu\text{m}$ 的大孔隙。对于未进行充填的干缝试样, 水化结束后砌块与接缝区存在明显的分

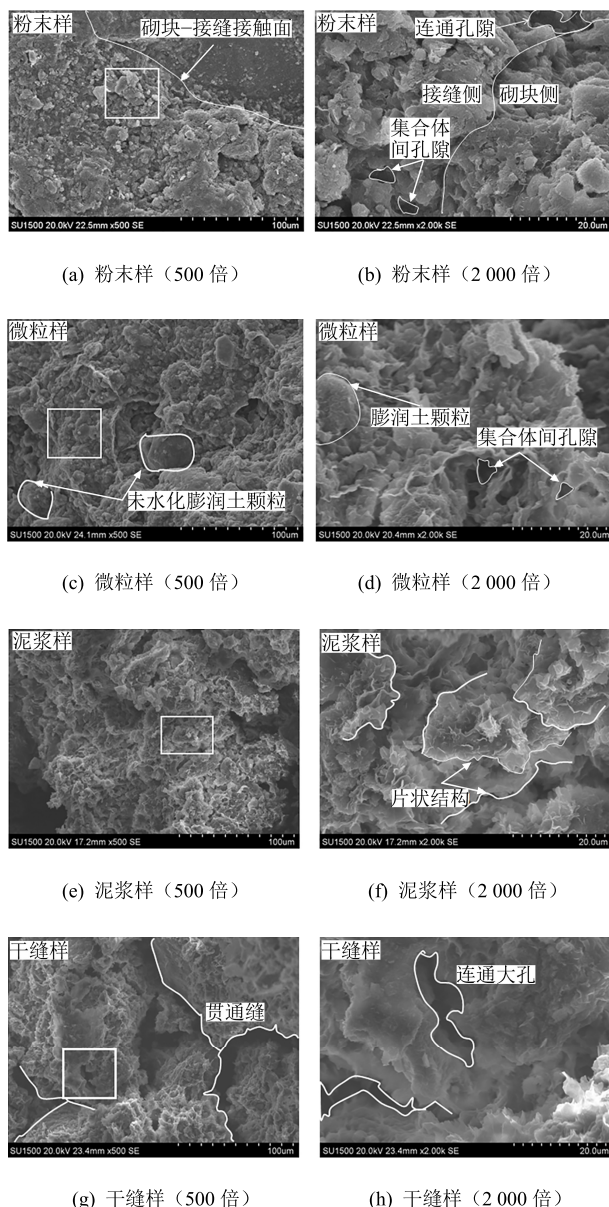


图 13 不同充填材料的接缝区 SEM 对比照片

Fig.13 SEM comparison photos of joint area with different sealing materials

界线, 接缝区存在多条体积较大的裂隙状二维孔隙。

(3) 水化愈合后砌块区的密度降低, 接缝区密度上升, 沿垂直于接缝方向形成具有一定宽度的密度过渡区域。接缝的愈合程度与密封材料的初始干密度呈正相关。采用膨润土微粒对接缝进行密封的砌块试样, 膨胀性能最佳, 砌块渗透系数、热传导系数与完整试样最接近, 处于同一数量级。接缝区土体结构最密实, 愈合程度最高, 整体密封效果最佳。

由于砌块拼装施工会导致缓冲屏障内部产生一定量的施工接缝, 本文只考虑砌块与砌块之间的接缝, 设定的孔隙体积占比相对较小。当同时考虑砌块与周边围岩之间的孔隙时, 整个缓冲屏障的膨胀特性、渗透性能以及最终的均质化程度将会进一步下降。因此, 在后期的研究工作中需要综合考虑不同位置施工接缝的作用, 开展更深一步的试验研究, 从而提出更全面的回填处置方法和密封材料的组合设计。

参 考 文 献

- [1] NEA. Engineered barrier systems and the safety of deep geological repositories, radioactive waste management[R]. Vienna, Austria: Nuclear Energy Agency, 2005.
- [2] CHO W J, LEE J O, CHOI H J. Radionuclide migration through an unsaturated clay buffer under thermal and hydraulic gradients for a nuclear waste repository[J]. **Annals of Nuclear Energy**, 2012, 50: 71-81.
- [3] 谢敬礼, 马利科, 高玉峰, 等. 北山花岗岩岩屑-膨润土混合材料导热性能研究[J]. **岩土力学**, 2018, 39(8): 2823-2828.
XIE Jing-li, MA Li-ke, GAO Yu-feng, et al. Thermal conductivity of mixtures of Beishan bentonite and crushed granite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 2823-2828.
- [4] 秦爱芳, 胡宏亮. 碱性溶液饱和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.
- [5] 高子瑞, 陈涛, 徐永福. 盐溶液对膨润土膨胀性的影响[J]. **岩土力学**, 2018, 39(1): 249-253.
GAO Zi-rui, CHEN Tao, XU Yong-fu. Effect of salt solution on swelling characteristics of bentonite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 249-253.
- [6] FURUICHI M, OKUTSU K, TANAKA T, et al. A study of the sealing concept of high-level radioactive waste repository[J]. **Journal of Geotechnical Engineering of Japan Society of Civil Engineers**, 1998, 594: 21-33.
- [7] DUECK A, GOUDARZI R, BORGESSON L. Buffer homogenization(SKB TR-12-02)[R]. [S. l.]: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011.
- [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 Jian-qin, CAO Yong-chao. Influence of joint on self-sealing behavior of highly compacted bentonite in engineering barrier[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 618-624.
- [9] 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.
- [10] 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): 232-245.
- [11] BIAN X, CUI Y J, LI X Z. Voids effect on the swelling behaviour of compacted bentonite[J]. **Géotechnique**, 2019, 69(7): 593-605.
- [12] 许韬, 白冰, 刘月妙. 含接缝的膨润土砌块缓冲材料愈合过程计算[J]. **工程力学**, 2019, 36(5): 120-129.
XU Tao, BAI Bing, LIU Yue-miao. Computation for self-healing process in unsaturated bentonite buffer material with block joints[J]. **Engineering Mechanics**, 2019, 36(5): 120-129.
- [13] GARCIA-SINERIZ J L, VILLAR M V, REY M, et al. Engineered barrier of bentonite pellets and compacted blocks: state after reaching saturation[J]. **Engineering Geology**, 2015, 192: 33-45.
- [14] MOKNI N, BARNICHON J D, DICK P, et al. Effect of technological macro voids on the performance of compacted bentonite/sand seals for deep geological repositories[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2016, 88: 87-97.
- [15] LIU Y M, MA L, KE D, et al. Design and validation of the THMC China-Mock-Up test on buffer material for HLW disposal[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2014, 6(2): 119-125.
- [16] WANG Ying, ZHANG Hu-yuan, TAN Yu, et al. Sealing

- performance of compacted block joints backfilled with bentonite paste or a particle-powder mixture[J]. **Soils and Foundations**, 2021, 61(2): 496-505.
- [17] 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.
- [18] 郎颖娴, 梁正召, 段东, 等. 基于 CT 试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1204-1212.
- LANG Ying-xian, LIANG Zheng-zhao, DUAN Dong, et al. Three-dimensional parallel numerical simulation of porous rocks based on CT technology and digital image processing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1204-1212.
- [19] 何东进. CT 图像在岩土工程研究中的分析方法[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊 2): 1771-1774.
- HE Dong-jin. Analysis methods of CT image in geotechnical engineering[J]. **Construction Technology**, 2018, 47(Suppl.2): 1771-1774.
- [20] LLORET A, VILLAR M V. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted “FEBEX” bentonite[J]. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**, 2007, 32(8): 701-715.
- [21] ASTM. D5084-03 Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter[S]. West Conshocken, PA: ASTM International, 2003.
- [22] 张虎元, 赵天宇, 卢一亭, 等. 膨胀条件下混合型缓冲回填材料的渗透特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 3149-3156.
- ZHANG Hu-yuan, ZHAO Tian-yu, LU Yi-ting, et al. Permeability of bentonite-sand mixtures as backfill/buffer material in HLW disposal under swelling conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 3149-3156.
- [23] 陈航, 张虎元, 郭永强, 等. 混合型缓冲回填材料导热性能测试与预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 4312-4320.
- CHEN Hang, ZHANG Hu-yuan, GUO Yong-qiang, et al. Measurement and prediction of thermal properties of bentonite-sand mixtures as buffer backfilling materials for high level radioactive waste[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Suppl.2): 4312-4320.
- [24] WANG Q, CUI Y J, TANG A M, et al. Time- and density-dependent microstructure features of compacted bentonite[J]. **Soils and Foundations**, 2014, 54(4): 657-666.