

DOI:10.11918/202409082

# 膨润土水化裂缝演化过程的三维表征与量化

蒙榆鸿<sup>1</sup>, 王琼<sup>1,2</sup>, 苏薇<sup>1</sup>, 叶为民<sup>1,2</sup>, 陈永贵<sup>1,2</sup>

(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:** 为揭示高放废物深地质处置中膨润土在接缝自封闭阶段的水化开裂现象及其裂缝网络的时空演化规律, 在径向接缝条件下针对压实膨润土开展了水化实验, 并利用微焦点计算机断层扫描技术对不同水化时间下的膨润土进行了无损检测, 基于三维重建图像对水化裂缝网络进行了定性和定量表征。结果表明: 水化裂缝伴随着膨润土的膨胀变形经历了从起裂、扩展到闭合的完整演化过程; 对水化裂缝的形态及几何参数进行统计后发现, 其弗雷特直径和球形度分别集中分布在 0.1 ~ 0.2 mm 和 0.6 ~ 0.8 之间, 可见水化裂缝网络由大量孤立的点状裂隙和少量连通的片状裂缝构成, 虽然前者的数量超过 95%, 但后者的体积和表面积占比却达到了 80% 以上; 在关于水化时间的对数坐标下, 试样体积和接缝体积的线性变化表明膨润土的膨胀变形速率在水化过程中逐渐减缓, 而膨胀速率、开裂速率和闭合速率在双对数坐标中随时间的线性递减以及膨胀速率始终高于开裂和闭合速率的特性则进一步揭示了膨胀变形与裂缝演化的内在联系, 即膨胀变形既是水化开裂发生的前提, 也是裂缝闭合的必要条件。通过对膨润土进行三维表征和定量分析, 揭示了其水化裂缝的演化规律及发生机制, 为缓冲/回填材料的设计和优化提供了参考依据。

**关键词:** 膨润土; 水化裂缝; 施工接缝; 自封闭过程; 微焦点计算机断层扫描

**中图分类号:** X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)11-0012-10

## Three-dimensional characterization and quantification of hydration-induced cracking process of bentonite

MENG Yuhong<sup>1</sup>, WANG Qiong<sup>1,2</sup>, SU Wei<sup>1</sup>, YE Weimin<sup>1,2</sup>, CHEN Yonggui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education (Tongji University), Shanghai 200092, China;  
2. United Research Center for Urban Environment and Sustainable Development of the Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To elucidate the hydration-induced cracking phenomenon and the spatiotemporal evolution of crack network in bentonite during the self-sealing process of technological voids in deep geological repository of high-level radioactive wastes, a hydration test was conducted on the compacted bentonite with a radial technological void. Microfocus X-ray computed tomography was utilized for detecting the bentonite non-destructively at different hydration time. Qualitative and quantitative characterizations of the crack network were performed after the three-dimensional reconstruction. The results demonstrate that the bentonite sample experienced an evolvement from crack initiation and propagation to crack closure. Statistical analysis of morphological and geometric parameters revealed that Feret diameter and sphericity were respectively distributed within the ranges of 0.1–0.2 mm and 0.6–0.8, indicating that the crack network was composed of a large number of dotted cracks in isolation (>95%) and a small number of flaky cracks of interconnection. Notably, the latter accounted for over 80% of the total volume and surface area. The linear relation between the logarithm of hydration time and both the sample and technological void volume suggested that the expansive deformation of bentonite gradually slowed down in the hydration process. Furthermore, the linear relations of swelling rate, cracking rate and closing rate versus time in double logarithmic coordinates, as well as the persistent dominance of swelling rate over cracking and closure rates, reflected an intrinsic connection between expansion deformation and crack evolution. Specifically, the expansive deformation served as both a prerequisite for cracking and a necessary condition for crack closure. Through three-dimensional characterization and quantitative analysis, this study revealed the evolutionary regularity and underlying mechanism of hydration-induced cracks, thereby providing critical references for the design and optimization of the buffer/backfill materials.

**Keywords:** bentonite; hydration cracking; technological void; self-sealing process; microfocus X-ray computed tomography

收稿日期: 2024-09-30; 录用日期: 2024-11-05; 网络首发日期: 2025-07-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250711.1544.004>

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

作者简介: 蒙榆鸿(1997—), 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

深地质处置是国际公认的永久安全的高水平放射性废物处置方法。根据处置库的设计概念,高放废物将被封存在地下 500~1 000 m 之间、由处置容器、缓冲/回填材料和围岩依次构成的多重屏障系统中<sup>[1-2]</sup>。膨润土因具有高膨胀性、低渗透性、强核素吸附性以及良好的导热性被认为是理想的缓冲/回填材料,可起到阻滞地下水渗流、防止核素迁移以及传递核衰变热等作用<sup>[3-6]</sup>。在施工过程中,经过预压成型的膨润土在砌筑到围岩和处置容器之间时,将不可避免地形成施工接缝<sup>[7]</sup>,其与巷道的体积比一般在 20% 以内<sup>[8-16]</sup>;投入运营后,随着地下水向库内入渗,压实膨润土通过吸水逐渐膨胀并填充接缝以完成自封闭,最终形成完整的工程屏障<sup>[17-19]</sup>。

近年来,相关研究主要集中在自封闭行为对膨润土水力性能的影响方面<sup>[20-22]</sup>。非饱和膨润土受到水化后,其微观结构在土-水相互作用下发生变化,集合体内孔隙和集合体间孔隙不断扩大,在宏观上表现出显著的体积膨胀。而膨胀变形受到水化路径的影响,靠近进水口的膨润土总是先发生膨胀变形,从而形成了含水率和干密度随着与进水口距离的增加而逐渐减小和增大的分布规律,进一步引起了水力性能的各向异性<sup>[23-25]</sup>;与此同时,干密度的整体降低导致了膨胀力的大幅下降和渗透系数的指数增长,十分不利于屏障功能的实现<sup>[26-28]</sup>。另一方面,自封闭过程中不均匀的膨胀变形容易造成土体开裂,使工程屏障发生结构性破坏。研究表明水化裂缝的产生需要满足 3 个必要条件,即具有变形空间,具有变形能力以及具有限制变形或者导致不均匀变形的因素<sup>[29]</sup>。另有研究指出压实膨润土的开裂程度受到制备方法、几何形状、接缝占比以及边界条件等诸多因素的影响<sup>[30-33]</sup>。但值得注意的是目前对膨润土水化开裂现象的研究多局限在试样表面,鲜少考虑膨润土内部完整的裂缝网络在三维空间中的演化。

在本研究中,为了探究压实膨润土在自封闭过程中的水化开裂行为,应用无损检测技术实现了膨润土内部裂缝网络的三维重建,采用定性定量相结合的研究方法探讨了水化对接缝自封闭行为以及膨润土开裂行为的作用,基于实验结果分析了膨胀变形与裂缝演化的时变性以及两者之间的相互联系。

## 1 实验

### 1.1 实验材料与试样制备

本研究使用的高庙子膨润土是一种产自我国内蒙古地区的天然钠基膨润土,具有丰富的储量和优良的性质被确定为高放废物深地质处置的缓冲/

回填材料。通过 X 射线衍射物相分析(图 1)确定了高庙子膨润土的主要矿物成分包括蒙脱石(51.94%)、石英(25%)、长石(17%)、方石英(5%)以及少量的高岭石(1.06%)。其中,占据主导地位的蒙脱石赋予了高庙子膨润土良好的膨胀性能和吸附特性,经测定,其自由膨胀率为 150%,阳离子交换容量(CEC)为 681.40 mmol/kg。

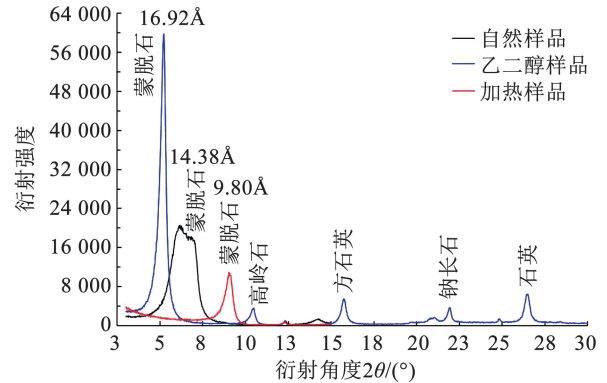


图 1 高庙子膨润土的 X 射线衍射谱图

Fig. 1 XRD patterns of GMZ bentonite

制备试样前,将膨润土粉末放置在盛有饱和碳酸钾溶液的干燥器中进行吸力平衡,在 20 °C 的室温下,通过蒸汽迁移使膨润土的相对湿度与环境达成一致。最终,通过气相平衡法将膨润土平衡到相对湿度为 43%,吸力为 113 MPa,含水量为 9.95% 的初始状态。为制备出目标干密度为 1.70 g/cm<sup>3</sup>、目标直径和高度分别为 64.60 mm 和 50 mm 的试样,制样时采用了一套圆柱形的刚性模具,根据初始含水率计算并称取出一定质量的膨润土,倒入模具并搅拌均匀后,利用万能电子试验机以 0.1 mm/min 的位移速率进行静力压实,达到目标位移后静置两小时以减少回弹变形,最后将成型的压实膨润土以相同的速率推出模具。需要注意的是在实际操作时,如果试样的长径比超过 0.4,压实过程产生的摩擦会导致试样呈现出一定程度的不均匀。在本实验中,目标试样的长径比经计算为 0.77,为确保其均匀性,选择采用分层压实法来进行试样制备。具体方法是将试样分成 3 层进行逐层压实,各层高度分别为 20、20、10 mm,为保证紧密连接,一次压实后须用小刀对其表面进行划刻后再继续下一层压实。最终获得的膨润土试样经量测和称重计算出其实际干密度为 1.70 g/cm<sup>3</sup>、直径为 64.59 mm、高度为 49.96 mm。

### 1.2 实验方法与实验装置

本研究采用了如图 2(a)所示的恒体积装置对压实膨润土试样进行水化实验,其主体结构由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制成,该高分子聚合材料具有密度低、透光率高的特点,同时其较高的机械强度

足以承受膨润土水化产生的膨胀力。装置内部的圆形腔室直径为 70 mm、高度为 50 mm,用以容纳制备好的膨润土试样,由于二者的直径差,试样在半径方向上自然形成了一圈宽度约为 2.70 mm 的均匀接缝,通过计算得出腔室容积与试样体积之差即接缝体积在初始状态下的值,约为 28 593.67 mm<sup>3</sup>。为了

避免水化过程中膨胀产物堵塞装置,在试样与顶部排气孔以及底部进水口的透水石之间分别垫上一层滤纸。完成安装后,将去离子水通入实验装置并使水位始终保持在与试样底部齐平的位置,在吸力梯度的作用下,膨润土不断吸水发生膨胀并填充径向接缝,整个水化实验的持续时间设置为 45 d。

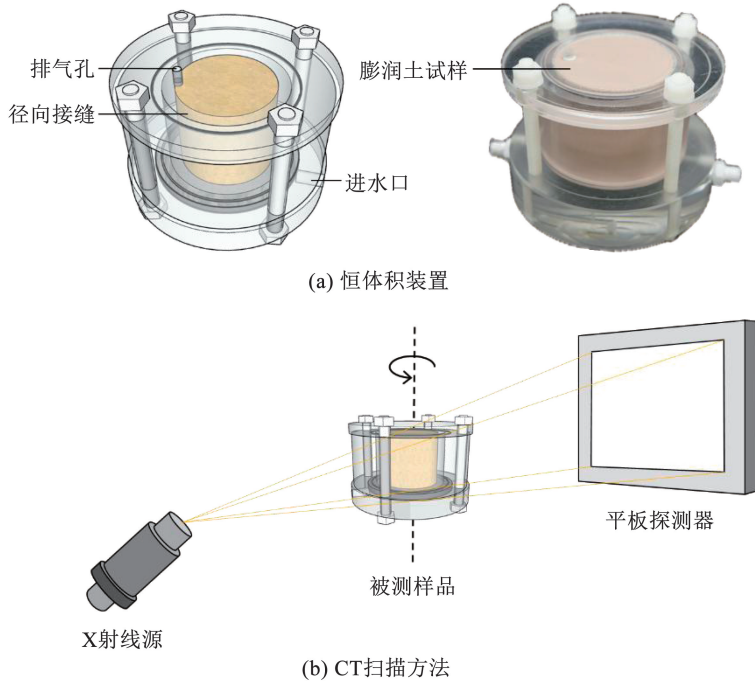


图 2 水化实验装置与 CT 扫描方法

Fig. 2 Hydration testing apparatus and CT scanning method

本研究借助微焦点 X 射线计算机断层扫描 ( $\mu$ CT) 技术来实现水化过程中膨润土内部结构的无损检测。其基本原理是基于不同物质间的密度和衰减系数的区别,利用 X 射线穿透被测物体时产生的能量损失差异来对物质结构进行区分和识别。具体的扫描方法如图 2(b) 所示,为了维持水化环境、降低扰动影响,将膨润土试样和恒体积装置一起放置在载物台上,通过旋转载物台,发射出的 X 射线可对试样进行全方位的扫描,生成的投影数据被另一侧的平板探测器接收,完成数据获取。恒体积装置的 PMMA 材料密度为 1.15 g/cm<sup>3</sup>,而膨润土试样的初始密度为 1.86 g/cm<sup>3</sup>,经水化后预计将增大到 1.92 g/cm<sup>3</sup>,二者之间的密度差足以保证 CT 扫描的识别精度。实验所使用的 CT 设备为 GE-Phoenix V l tome lx S,工作电压为 190 kV,工作电流为 210  $\mu$ A,配备的高功率纳米焦点 X 射线源以及高动态温度稳定型 DXR 数字图像探测器可实现高精度检测、快速数据采集和实时成像。在进行扫描时,载物台以 0.24° 的步长旋转一周(360°),共计可获得 1 500 个

投影切片,每次扫描约耗时 30 min,测量精度可达 40  $\mu$ m。扫描完成后,对原始投影数据组成的矩阵进行数学变换,通过多种复杂算法求解出衰减系数的分布规律并对试样内部的结构信息进行识别。然后将投影切片按顺序排列堆叠以完成试样的三维重建,所获得的三维重建结果可以从任意角度、任意位置进行可视化输出。在整个水化过程中一共对膨润土试样进行了 6 次扫描,第一次和最后一次分别在实验开始时(即 0 h)和结束时(即 1 080 h),其间共进行 4 次扫描,考虑到膨胀变形速率具有随着时间的增加逐渐减小的变化规律,将扫描时间依次选择在水化后的第 3.5 小时、第 7 小时、第 25 小时以及第 101 小时。

## 2 实验结果

### 2.1 水化裂缝的三维可视化

在完成多次 CT 扫描并实现三维重建和可视化之后,可对不同时间不同角度下的膨润土试样进行形态特征观测。图 3 和图 4 分别列出了试样在垂直

X 轴和 Y 轴方向上的竖直截面随水化时间的演化。在初始状态下(即 0 h), 试样在 20 mm 和 40 mm 的高度位置隐约可见两条分界线, 与试样制备时的分层界面一致。在经历了 3.5 h 的水化后, 试样底部发生了明显的膨胀, 边缘形成弯曲裂缝, 同时产生了数条垂直向上的裂缝并在延伸到第一个分层面后汇集成一条水平向裂缝。7 h 后观察到裂缝进一步变宽且在分层面边缘生成新的裂缝。在 25 h 时, 试样

底部的宽度膨胀到 70 mm, 与此同时上方的裂缝继续扩展。在 101 h 后, 位于试样下部的裂缝大范围地闭合, 而上部出现了一条延伸到试样表面的裂缝。最终在 1 080 h 时, 结束水化的试样在整个高度范围内的直径都扩大到了 70 mm, 裂缝几乎消失, 同时分界线也变得难以分辨。上述膨润土的接缝自封闭过程说明持续的水化作用在前期引起了膨润土开裂, 而在后期却促进了裂缝的闭合和膨润土的均一化。

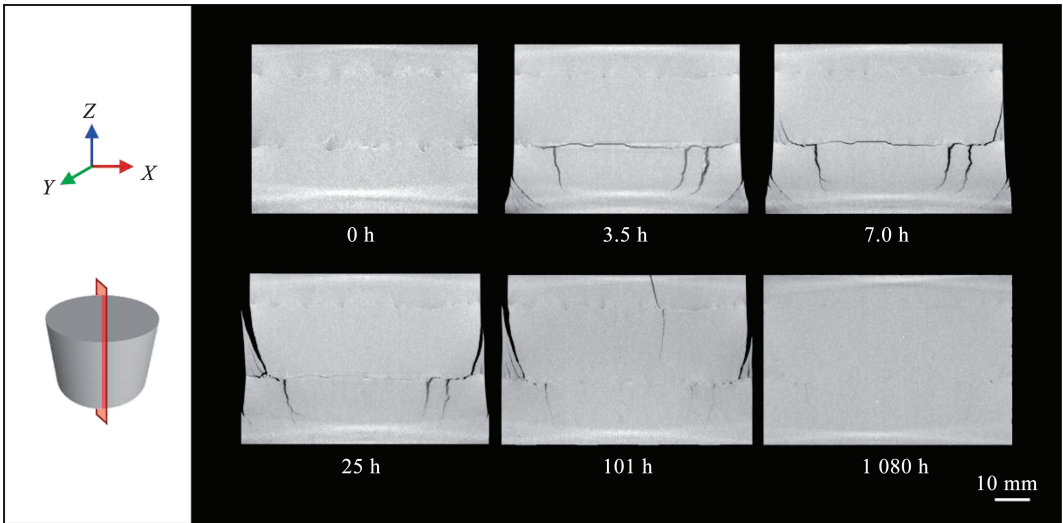


图 3 不同水化时间后的膨润土试样垂直于 X 轴方向的截面

Fig. 3 Sections of bentonite sample perpendicular to X-axis at different hydration time

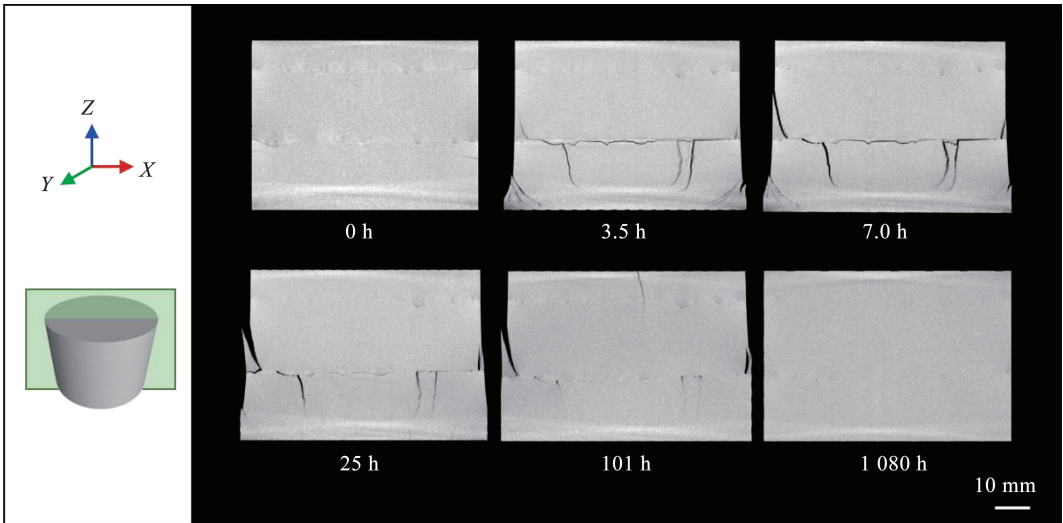


图 4 不同水化时间后的膨润土试样垂直于 Y 轴方向的截面

Fig. 4 Sections of bentonite sample perpendicular to Y-axis at different hydration time

如图 5 所示, 垂直于 Z 轴的水平截面在初始状态下呈现出完整的圆形, 但在水化 3.5 h 后边缘处就出现了环形裂缝, 7 h 后裂缝的数量进一步增加, 在第 25 小时和第 101 小时, 裂缝之间彼此相连, 宽

度逐渐增加, 裂缝面积和试样面积都明显扩大, 最终在水化 1 080 h 后, 接缝封闭, 裂缝闭合, 横截面直径增大到 70 mm。

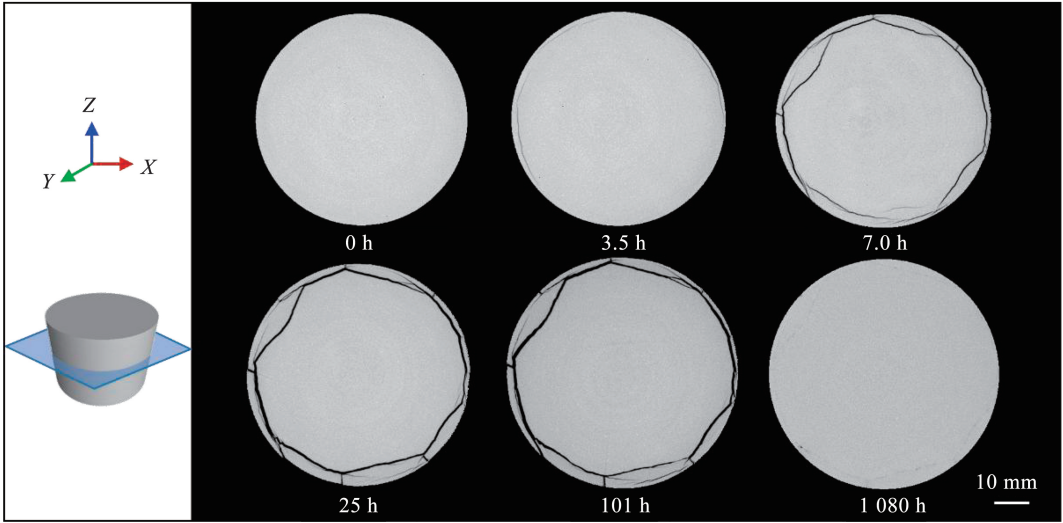


图 5 不同水化时间后的膨润土试样垂直于 Z 轴方向的截面

Fig. 5 Sections of bentonite sample perpendicular to Z-axis at different hydration time

为了更加全面地观测压实膨润土的水化开裂过程,提取出试样内部的水化裂缝并以三维图像的形式呈现,如图 6 所示。试样在初始状态下处于致密完整的压实状态,无裂缝存在。在水化 3.5 h 后,底部边缘出现了大量的小体积裂隙以及数条垂直发育的片状裂缝,与此同时,位于 20 mm 高度处的横向裂缝几乎覆盖了整个截面,其形成显然与分层压实法有关,分层位置的随机划痕作为试样的内部缺陷,更容易引起应力集中,导致裂纹沿着层面朝水平方向扩展。随着水化进行到第 7 小时,大部分裂缝的

形态结构保持不变,新生裂缝沿边缘呈片状向上发育。在第 25 小时,试样底部和分层界面处的裂缝基本消失,只剩下沿垂直方向发展的裂缝,显然,裂缝的闭合可归因于相邻位置的膨润土的水化膨胀,靠近进水口的底部裂缝总是最先被填充,而界面处的水平裂缝比其下伏的垂直裂缝先闭合则说明了其具有较强的连通性,利于水分迁移。水化 101 h 后,试样上部又生成两条贯通表面的裂缝,同时其他裂缝进一步发生闭合。最终在水化结束时,试样内部仍散布着少量未闭合的裂隙点,互不连通。

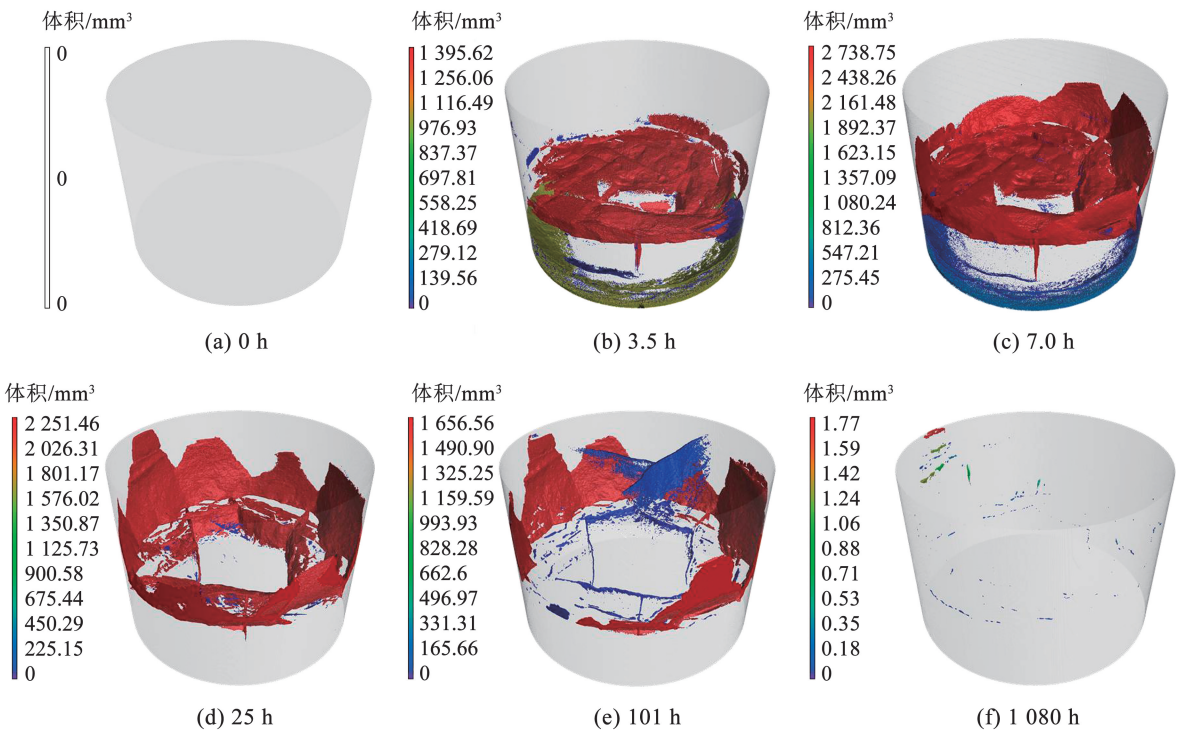


图 6 水化裂缝在三维空间中的演化过程

Fig. 6 Three-dimensional evolution of hydration cracks

## 2.2 裂缝网络的参数统计

为了定量研究水化裂缝网络的结构特征和分布特征以及它们随时间的发展规律, 引入了易量化的形态学参数对裂缝进行统计分析。通过测量裂缝在不同方向上的投影轮廓, 得到的边界平行线之间的最长距离和最短距离分别代表了最大弗雷特直径和最小弗雷特直径, 利用弗雷特直径可对裂缝进行形态分析, 用以描述裂缝的不规则形状。图 7 分别绘制了不同水化时间下的最大和最小弗雷特直径的概率分布曲线。显然, 膨润土在经历不同水化时间后

形成的裂缝的最大弗雷特直径主要集中在 0.1 ~ 0.2 mm 之间, 少量分布在大于 0.2 mm 的范围内。同时, 最小弗雷特直径在不同时间下几乎呈现出一致的单峰分布, 同样集中分布在 0.1 ~ 0.2 mm 之间。最大和最小弗雷特直径相似的分布规律说明绝大部分水化裂缝在各方向上具有相近的边界距离, 因此其形貌特征可能呈现为相对规则的球形, 而另一部分裂缝的最大弗雷特直径远大于最小弗雷特直径, 说明这些裂缝在不同方向上的边界距离相差较大, 倾向于呈现出条状或片状结构。

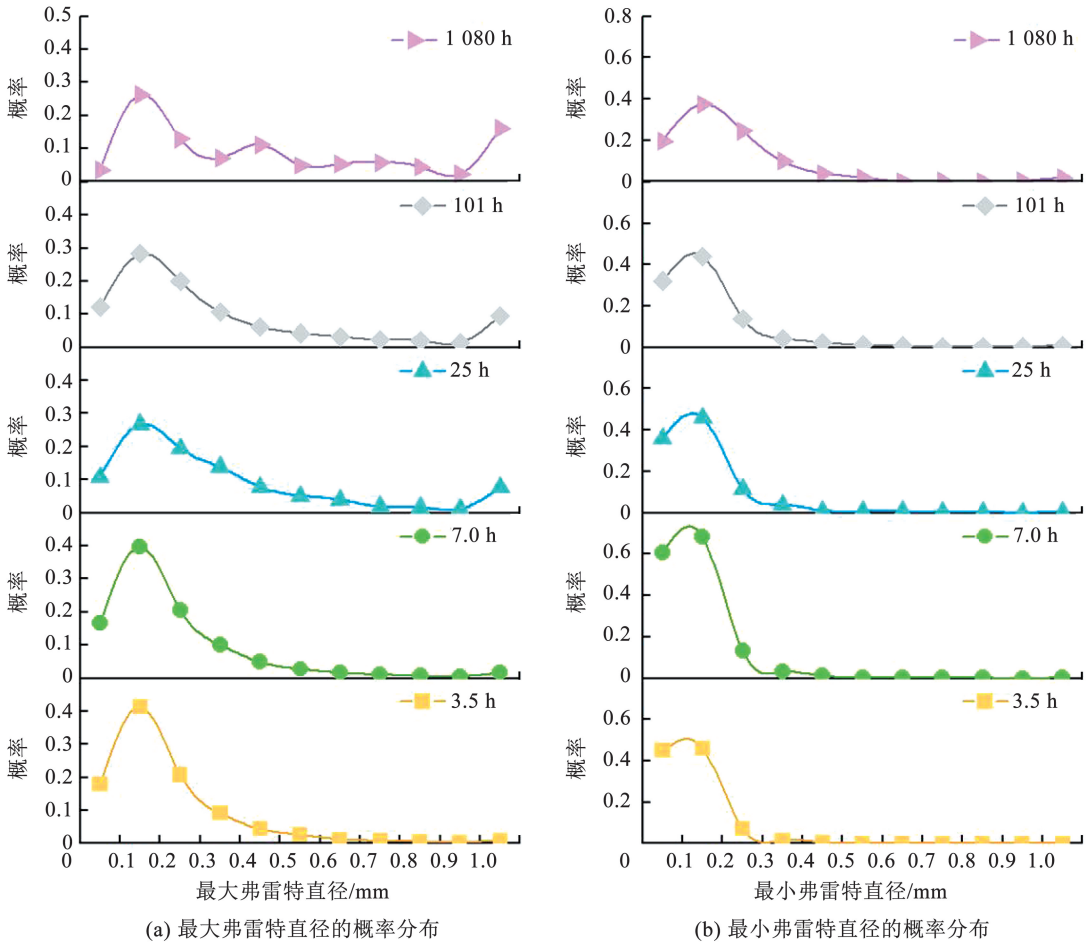


图 7 水化裂缝的最大弗雷特直径与最小弗雷特直径分布

Fig. 7 Distributions of maximum and minimum Feret diameters of hydration cracks

考虑到弗雷特直径只能粗略地描述出裂缝的几何尺寸, 为了实现更加精确的量化分析, 进一步引入了球形度这一参数来表征水化裂缝的形貌, 同时也可对弗雷特直径的分析结果进行验证。球形度可以通过计算与裂缝相同体积的球体的表面积与裂缝实际的表面积之比得到, 具体的计算公式为

$$S = 4\pi \left( \frac{3V_c}{4\pi} \right)^{\frac{2}{3}} / S_c \quad (1)$$

式中:  $S$  为球形度;  $V_c$  为裂缝的体积,  $\text{mm}^3$ ;  $S_c$  为表面积,  $\text{mm}^2$ 。球形度越接近于 1, 则水化裂缝的形态特征越接近于球体。根据计算结果, 将水化裂缝的球形度概率分布绘制于图 8, 可见, 从 3.5 h 到 1 080 h 的不同水化时间下的裂缝球形度均近似地服从正态分布, 而中位数存在于 0.6 ~ 0.8 之间, 该结果证明了膨润土中的大部分裂缝球形度较高, 具有较为规则的球状形貌特征。

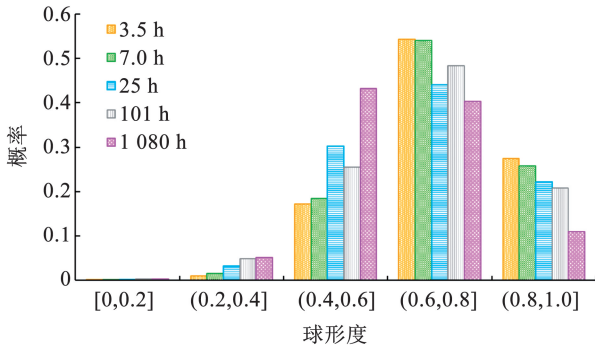


图 8 水化裂缝的球形度分布

Fig. 8 Sphericity distribution of hydration cracks

表 1 水化裂缝体积和表面积的概率统计

Tab. 1 Probability statistics of volume and surface area of hydration cracks

水化时间/h	体积/mm <sup>3</sup>	体积分布概率/%	总体积/mm <sup>3</sup>	体积占比/%	表面积/mm <sup>2</sup>	分布概率/%	总表面积/mm <sup>3</sup>	表面积占比/%
3.5	0 ~ <1	99.95	27.24	1.08	0 ~ <1	99.22	1 881.23	5.25
	1 ~ <100	0.04	69.30	2.74	1 ~ <100	0.76	559.56	1.56
	100 ~ 10 000	0.01	2 435.41	96.19	100 ~ 100 000	0.03	33 398.54	93.19
7	0 ~ <1	99.97	92.80	2.72	0 ~ <1	98.53	2 946.93	7.54
	1 ~ <100	0.02	30.30	0.89	1 ~ <100	1.46	1 555.96	3.98
	100 ~ 10 000	0.01	3 284.00	79.25	100 ~ 100 000	0.02	34 555.20	88.47
25	0 ~ <1	99.94	12.52	0.55	0 ~ <1	94.98	177.62	1.09
	1 ~ <100	0	0	0	1 ~ <100	4.96	266.60	1.64
	100 ~ 10 000	0.06	2 251.46	99.45	100 ~ 100 000	0.06	15 816.59	97.27
101	0 ~ <1	99.45	29.72	1.62	0 ~ <1	93.08	304.44	2.34
	1 ~ <100	0.51	144.35	7.89	1 ~ <100	6.74	958.31	7.38
	100 ~ 10 000	0.04	1 656.56	90.49	100 ~ 100 000	0.18	11 722.69	90.28
1 080	0 ~ <1	98.90	6.26	59.45	0 ~ <1	98.90	49.79	20.94
	1 ~ <100	1.10	4.27	40.55	1 ~ <100	1.10	188.00	79.06
	100 ~ 10 000	0	0	0	100 ~ 100 000	0	0	0

### 3 分析与讨论

为了探究水化作用对接缝自封闭行为以及膨润土开裂行为的影响,绘制出了裂缝体积、试样体积以及接缝体积随水化时间的变化规律,如图 9 所示。试样体积随时间单调递增且增加速率先快后慢,逐渐趋于稳定;与之相反,接缝体积随着时间的增加逐渐降低,同时降低速率逐渐减缓。然而,裂缝体积则呈现出先增后减的单峰变化规律,对应了图 6 中定性观察到的水化裂缝从起裂到扩展再到消失的全过程。为了进一步地对水化裂缝的发育程度进行评估,可通过下式计算出膨润土的开裂率:

$$R = \frac{V_c}{V_s} \times 100\% \quad (2)$$

其中: $R$  为开裂率; $V_c$  为水化裂缝的体积,  $\text{mm}^3$ ;  $V_s$  为膨润土试样的体积,  $\text{mm}^3$ 。

如表 1 所示,对各水化时间下的裂缝体积和裂缝表面积进行统计后发现,绝大多数水化裂缝的体积小于  $1 \text{ mm}^3$ ,表面积小于  $1 \text{ mm}^2$ ,虽然这类裂缝的数量占比达到了 95% 以上,但它们对裂缝网络总体积和总表面积的贡献不足 5%;而其余裂缝虽然数量少但却具有相当大的体积和表面积,对总量的贡献超过了 80%。结合上述针对裂缝形态特征的分析可知,压实膨润土在水化开裂后主要形成了大量孤立的点状裂隙以及少量连通性较强的片状裂缝,这与图 6 中的观察到的定性结果相互印证。

从图 9 可以看出开裂率的变化规律几乎与裂缝体积一致,在经历 7 h 的水化后达到峰值,此时水化裂缝所占试样的体积比接近 2%。

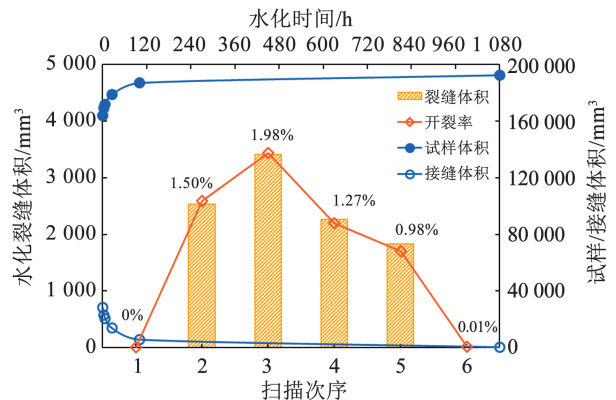


图 9 裂缝体积、试样体积及接缝体积随水化时间的变化关系

Fig. 9 Relations of crack, sample and tech-void volumes versus hydration time

另外,在图 10 的半对数坐标中绘制出了试样体积和接缝体积随水化时间的变化,显然二者与时间呈现出明显的线性相关,存在如下函数关系:

$$V_s = 4\ 212.65 \ln t + 164\ 610.12 \quad (3)$$

$$V_v = -4\ 212.65 \ln t + 27\ 812.27 \quad (4)$$

式中: $V_s$ 和 $V_v$ 分别为试样和接缝的体积, $\text{mm}^3$ ;  $t$ 为水化时间,h。通过计算,相关系数高达 0.97,这说明膨润土的水化膨胀和接缝的自封闭都具有很强的时间依赖性。当水化作用于非饱和膨润土时,后者发生单向的膨胀变形且膨胀效率随时间逐渐降低,这是由于膨润土内不断增加的含水率和饱和度造成了吸力梯度降低。根据上述函数关系可对任意时刻的试样体积进行预测,从而实现对接缝自封闭程度的评估。

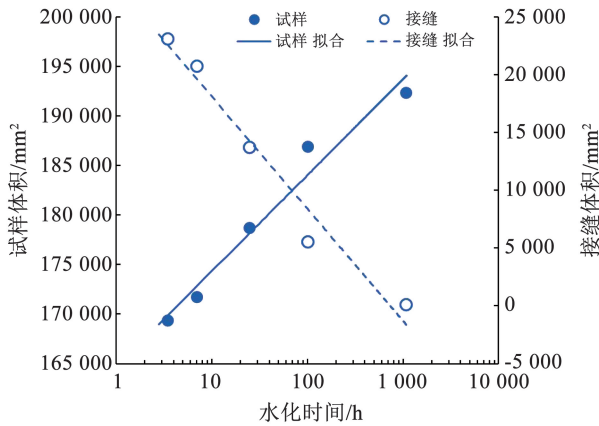


图 10 试样体积和接缝体积与水化时间的相关性

Fig. 10 Correlations between sample volume/tech-void volume and hydration time

为了厘清膨胀变形与水化开裂之间的作用机制,根据实测数据计算出了试样的膨胀速率以及水化裂缝的开裂速率和闭合速率,并将其随时间的变化绘制于图 11 中。显然,在双对数坐标下,膨胀速率在水化周期内表现出线性下降的变化趋势;另一组相似的线性关系表明水化裂缝的演化速率也随时间呈现出单调递减性。速率与时间之间的函数关系分别为

$$v_s = \exp(8.64 - 0.95 \ln t) \quad (5)$$

$$v_c = \exp(7.58 - 1.07 \ln t) \quad (6)$$

其中: $v_s$ 为膨润土试样的膨胀速率, $\text{mm}^3/\text{h}$ ;  $v_c$ 为水化裂缝的演化速率, $\text{mm}^3/\text{h}$ ;  $t$ 为水化时间,h。

由图 11 可知,膨胀速率始终大于开裂速率,说明膨润土在受到水化时,膨胀和变形的发生总是先于裂缝的萌生和扩展。这表明水化开裂现象是由土体膨胀变形引起的破坏,当膨润土因受到水化在短时间含水率和饱和度快速增加而发生剧烈膨胀时,产生的变形量明显高于附近未水化的膨润土,随

着累积变形逐渐增大,拉应力最终会超过抗拉强度从而发生拉伸破坏。因此,膨润土的开裂顺序总是与水化路径一致。另外,和接缝自封闭机制相似,水化裂缝的闭合也依赖于周围膨润土的膨胀填充,这解释了水化裂缝的闭合速率也始终小于膨润土膨胀速率的原因。由此可见,含有接缝的膨润土试样在经历自封闭的同时也包含着裂缝发展和裂缝闭合两个阶段,膨润土在水化作用下的膨胀变形既是开裂现象发生的前提,也是裂缝闭合的必要条件。

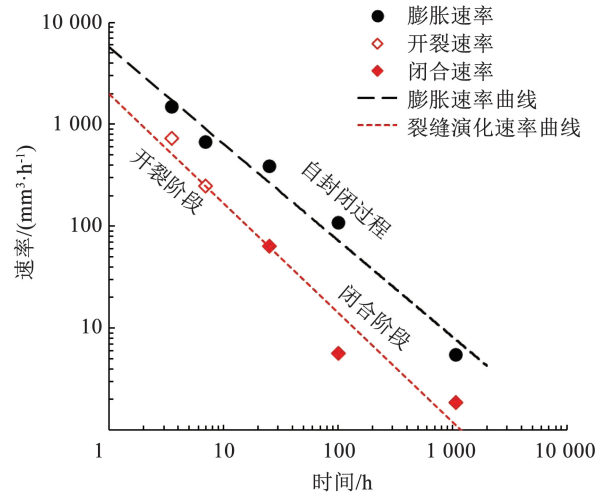


图 11 膨胀速率、开裂速率及闭合速率与时间的变化关系  
Fig. 11 Variation of swelling rate, cracking rate and closing rate with time

## 4 结 论

通过进行压实膨润土试样的水化实验,利用 $\mu\text{CT}$ 技术实现了接缝自封闭过程中膨润土内部结构的无损检测和三维重建,完成了水化裂缝网络的表征和量化研究。重点研究了膨润土和水化裂缝的演化过程以及膨胀变形与水化开裂间的内在联系,结合定性定量分析,得到了以下几点结论:

1) 在水化作用下,持续膨胀的膨润土试样和不断缩小的径向接缝标志着自封闭的渐进过程,与此同时,在试样内部,因拉应力超过抗拉强度而形成的水化裂缝经历了从萌生到扩展再到闭合的全过程,因此,膨润土的接缝自封闭过程可分为开裂和闭合两个阶段。

2) 水化裂缝的弗雷特直径、球形度等形态参数以及体积、表面积等几何参数的统计结果表明,95%以上的裂缝呈现出弗雷特直径差异小、球形度高、体积和表面积小的特征,而其余裂缝虽然具有弗雷特直径差异大、球形度低的特点,但对裂缝总体积及总表面积贡献超过了 80%,由此可知水化裂缝网络主要由大量孤立的点状裂隙和少量联通性较强的片状裂缝构成。

3) 膨润土试样在接缝自封闭过程中的膨胀变形具有明显的时变性, 在半对数坐标中表现为试样体积及接缝体积与时间的线性关系。另外, 膨胀速率、开裂速率以及闭合速率在双对数坐标下呈现出随时间单调递减的函数关系, 对比分析相应的时程曲线可知, 膨胀变形既是水化开裂现象发生的前提, 也是裂缝闭合的必要条件。

本研究为探索膨润土的水化开裂机制提供了实验依据, 同时也为工程屏障的可靠性预测奠定了基础。考虑到实际工程中对高放废物安全处置的要求, 该研究工作也可在深地质处置库的设计和施工阶段提供一定的参考, 有助于研究人员对缓冲/回填料进行优化, 进而降低运营过程中的水化裂缝发生率。

## 参考文献

[1] 王驹, 陈伟明, 苏锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801  
WANG Ju, CHEN Weiming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(4): 801. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2006.04.015

[2] 王驹, 苏锐, 陈亮, 等. 论我国高放废物地质处置地下实验室发展战略[J]. 中国核电, 2018, 11(1): 109  
WANG Ju, SU Rui, CHEN Liang, et al. The development strategy of the underground research laboratory for geological disposal of high level radioactive waste in China[J]. China Nuclear Power, 2018, 11(1): 109. DOI:10.12058/zghd.2018.01.109

[3] 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(3): 541  
LIU Yuemiao, CHEN Zhangu. Bentonite from Gaomiaozi Inner Mongolia as an ideal buffer/backfilling material in handling highly radioactive wastes—a feasibility study[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001(3): 541. DOI:10.16461/j.cnki.1000-4734.2001.03.066

[4] 温志坚. 中国高放废物深地质处置的缓冲材料选择及其基本性能[J]. 岩土矿物学杂志, 2005, 24(6): 583  
WEN Zhijian. Selection and basic properties of China's buffer materials for high level radioactive waste repository [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(6): 583. DOI:10.3969/j.issn.1000-6524.2005.06.017

[5] 温志坚. 中国高放废物处置库缓冲材料物理性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 794  
WEN Zhijian. Physical property of China's buffer material for high-level radioactive waste repositories [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 794. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2006.04.014

[6] 王驹. 高放废物深地质处置: 回顾与展望[J]. 铀矿地质, 2009, 25(2): 71  
WANG Ju. Geological disposal of high level radioactive waste in China: review and prospect[J]. Uranium Geology, 2009, 25(2): 71. DOI:10.3969/j.issn.1000-0658.2009.02.002

[7] 陈永贵, 贾灵艳, 叶为民, 等. 施工接缝对缓冲材料水-力特性影响研究进展[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 138  
CHEN Yonggui, JIA Lingyan, YE Weimin, et al. Advances in hydro-mechanical behaviors of buffer materials under effect of technological gaps[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 138. DOI:10.11779/CJGE201701012

[8] ANDRA. Synthesis-evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation [R]. Chatenay-Malabry: ANDRA, 2005

[9] MARTIN P L, BARCALA J M, HUERTAS F. Large-scale and long-term coupled thermo-hydro-mechanic experiments with bentonite: the FEBEX mock-up test [J]. Journal of Iberian Geology, 2006, 32(2): 259

[10] ÅBERG A. Effects of water inflow on the buffer—an experimental study: SKB Rapport R-09-29 [R]. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2009

[11] BARNICHON J D, DELERUYELLE F. Sealing experiments at the Toumemire URL[Z]. Paris: EuroSafe, 2009

[12] JUVANKOSKI M. Description of basic design for buffer: working report 2009-131 [R]. Eurajoki: Engineering Materials Science, 2010

[13] 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. DOI:10.1016/j.enggeo.2014.01.008

[14] ZHAO J B, CHEN L, COLLIN F, et al. Numerical modeling of coupled thermal-hydromechanical behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test[J]. Engineering Geology, 2016, 214(30): 116

[15] MARTIKAINEN J, SCHATZ T. Initial buffer and backfill wetting: pellet-filling component[R]. Eurajoki: Posiva OY, 2018

[16] YANG G S, LIU Y M, GAO Y F, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical process in buffer material and self-healing effects with joints [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(9): 2905. DOI:10.1007/s11771-021-4815-6

[17] MARTIN P L, BARCALA J M, HUERTAS F. Large-scale and long-term coupled thermo-hydro-mechanic experiments with bentonite: the FEBEX mock-up test [J]. Journal of Iberian Geology, 2006, 32(2): 259

[18] 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. DOI:10.1016/j.enggeo.2010.06.002

[19] 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

[20] VILLAR M V. Thermo-hydro-mechanical characterisation performed at CIEMAT in the context of the prototype project [R]. Madrid: CIEMAT, 2005

[21] WANG Q, CUI Y J, TANG A M, et al. Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration [J]. Engineering Geology, 2013, 164, 67. DOI:10.1016/j.enggeo.2013.06.013

[22] 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 & Mining Sciences*, 2016, 88: 87
- [23] GENS A, VALLEJÁN B, SÁNCHEZ M, et al. Hydromechanical behaviour of a heterogeneous compacted soil: experimental observations and modelling[J]. *Géotechnique*, 2011, 61(5): 367
- [24] SABA S, DELAGE P, LENOIR N, et al. Further insight into the microstructure of compacted bentonite-sand mixture[J]. *Engineering Geology*, 2014, 168: 141. DOI:10.1016/j.enggeo.2013.11.007
- [25] BIAN X, CUI Y J, LI X Z. Voids effect on the swelling behaviour of compacted bentonite[J]. *Géotechnique*, 2019, 69(7): 593. DOI:10.1680/jgeot.17.p.283
- [26] VILLAR M V, LLORET A. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2008, 39(1/2): 38. DOI:10.1016/j.clay.2007.04.007
- [27] KOMINE H. Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites[J]. *Engineering Geology*, 2004, 71(3/4): 265. DOI:10.1016/S0013-7952(3)00140-6
- [28] KOMINE H. Predicting hydraulic conductivity of sand bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes [J]. *Engineering Geology*, 2010, 114, 123. DOI:10.1016/j.enggeo.2010.04.009
- [29] WANG Q, MENG Y H, SU W, et al. Cracking and sealing behavior of the compacted bentonite upon technological voids filling [J]. *Engineering Geology*, 2021, 292: 106244. DOI:10.1016/j.enggeo.2021.106244
- [30] WANG Q, MENG Y H, 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. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126399
- [31] 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. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106792
- [32] MENG Y H, WANG Q, SU W, et al. Experimental evidence on the cracking and sealing mechanisms of compacted bentonite by using microfocus X-ray computed tomography [J]. *Engineering Geology*, 2023, 322: 107153. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107153
- [33] 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. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.133387

## (上接第 11 页)

- [22] LIU B, TANG Y, JI Y, et al. A deep reinforcement learning approach for ramp metering based on traffic video data[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 1
- [23] TREIBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. *Physical Review E*, 2000, 62(2): 1805
- [24] MILANÉS V, SHLADOVER S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 48: 285
- [25] ERDMANN J. SUMO's lane-changing model[C]//BEHRISCH M, WEBER M. *Modeling Mobility with Open Data*; 2nd SUMO Conference. Berlin: Springer, 2015: 105
- [26] 梁国华, 石权, 李瑞, 等. 高速公路合流区主要参数对自动驾驶车辆的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(9): 62
- LIANG Guohua, SHI Quan, LI Rui, et al. Impact of main parameters of merging area in highway on autonomous vehicles[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(9): 62
- [27] 丁婉婷. 智能网联汽车高速公路自主性换道决策模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2017
- DING Wanting. *Research of discretionary lane change model for connected and autonomous vehicles on expressway* [D]. Nanjing: Southeast University, 2017
- [28] 孙玲, 张静, 周瀛, 等. 车路协同环境下自动驾驶专用车道入口区域设计[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(增刊1): 122
- SUN Ling, ZHANG Jing, ZHOU Ying, et al. Design of entrance area of automatic driving special lane in vehicle-infrastructure collaborative environment[J]. *Highway Traffic Technology*, 2020, 37(Sup.1): 122
- [29] HUA X, YU W, WANG W, et al. Influence of lane policies on freeway traffic mixed with manual and connected and autonomous vehicles[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 2020: 1
- [30] 姚志洪, 郝慧君, 巫雪梅, 等. 考虑自动驾驶的混合交通路段阻抗函数[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2021, 19(4): 1
- YAO Zhihong, HAO Huijun, WU Xuemei, et al. Cost function of mixed traffic flow with autonomous driving [J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2021, 19(4): 1