

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.015

高放废物处置库非饱和多场耦合数值模拟与参数分析

侯会明¹,胡大伟²,赵晓华¹,祝志文¹,杜 威¹

(1. 汕头大学工学院,广东 汕头 515063;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学和工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071)

摘要:为对高放废物处置库进行安全评估,建立了岩土材料饱和-非饱和的渗流-温度-应力 (THM) 多场耦合数值模型,对处置库(处置容器、缓冲材料和围岩)进行非饱和 THM 多场耦合数值模拟。基于 COMSOL Multiphysics 软件平台,以北山花岗岩高放废物处置库和内蒙古高庙子膨润土为研究对象,对高放废物处置库进行长达 500 a 的数值模拟,对比分析耦合与非耦合的模拟结果,并对渗透率、导热系数和地下水深度等参数进行敏感性分析。结果表明:耦合模拟的温度比非耦合模拟的温度低 13℃;地下潜水面由 0 m 上升到 1000 m 的时候,缓冲材料完全饱和的时间由 703 a 下降到了 28 a;围岩的固有渗透率下降 5 个数量级时,缓冲材料的饱和时间由 28 a 上升到了 250 a;各个物理场相互耦合,共同影响处置库的长期稳定性。

关键词:高放废物;处置库;安全评估;多场耦合;非饱和;参数敏感性分析

中图分类号:TL942 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)05-0111-07

Unsaturated multifield-coupled numerical simulation and parametric analysis for geological repository of high-level radioactive waste

HOU Huiming¹, HU Dawei², ZHAO Xiaohua¹, ZHU Zhiwen¹, DU Wei¹

(1. College of Engineering, Shantou 515063, Shantou University, China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to evaluate the safety of the repository (disposal container, buffer material and surrounding rock), an unsaturated Thermo-Hydro-Mechanical (THM) fully coupled numerical model was built to conduct the unsaturated multifield-coupled numerical simulation. Based on the Comsol Multiphysics platform, the high-level radioactive waste repository was simulated for 500 years, with the basis of experimental data from the candidate area of the Beishan high-level radioactive waste repository in China and the Gaomiaozhi bentonite. Results of the coupled simulations were compared with those of uncoupled simulations, and the parametric sensitivities of permeability, heat transfer coefficient and underground water depth were analyzed. The results show that temperature in coupled simulation is 13 degrees Celsius higher than that in uncoupled simulation. When the water table rises from 0 m to 1,000 m, the time it takes to fully saturate the buffer material will fall from 703 to 28 years. The saturation time of the buffer material will increase from 28 years to 250 years when the permeability of the surrounding rock decreases by five orders of magnitude. Each physical field is coupled to each other, which affects the long-term stability of the repository.

Key words: high-level radioactive waste; repository; safety evaluation; multifield coupling; unsaturated; parametric sensitivity analysis

高放废物地质处置过程中,有多个屏障系统(处置容器、缓冲材料和围岩)对核废料进行隔离,以保护环境不受核辐射的影响。处置库近场的温度演化以及缓冲材料饱和度的演化规律,影响处置库的安全性能。由于处置库的结构和所处环境的复杂性,在研究处置库的温度和饱和度的演化规律时,只有对处置库进行非饱和渗流-温度-应力 (thermo-hydro-mechanical, THM) 多场耦合数值分析,研究各个参数对多场耦合的影响

基金项目: 江西省自然科学基金(20202BABL214052);汕头大学科研启动经费资助项目(NTF21046)

作者简介: 侯会明(1989—),男,讲师,博士,主要从事地下工程多场耦合研究。E-mail:hmhou@stu.edu.cn

引用本文: 侯会明,胡大伟,赵晓华,等. 高放废物处置库非饱和多场耦合数值模拟与参数分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):111-117.

HOU Huiming, HU Dawei, ZHAO Xiaohua, et al. Unsaturated multifield-coupled numerical simulation and parametric analysis for geological repository of high-level radioactive waste[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5): 111-117.

规律,才能准确评估处置库屏障系统的安全性能^[1]。

目前,高放废物处置库 THM 多场耦合问题已成为国内外学者的研究热点^[2-6]。侯会明等^[7]考虑围岩的开挖损伤效应,对处置库围岩进行了 THM 多场耦合模拟。陈益峰等^[8]基于细观力学方法建立了脆性岩石在热-力耦合作用下的各向异性损伤模型和有效热传导模型。潘鹏志等^[9]利用元胞自动机研究了 THM 耦合作用下开挖损伤区的应力应变的演化过程。谢敬礼等^[10]研究了北山花岗岩岩屑-膨润土混合材料不同含水率、不同密度的试样的导热性能。高玉峰等^[11]对不同压实干密度的高庙子膨润土进行了不同加载气压围压条件下的气体渗透试验。鲁文玥等^[12]研究了高庙子钠基膨润土膨胀性能与干密度、有效蒙脱石含量的关系。Zhang 等^[13]研究了 Callovo-Oxfordian 泥岩在不同温度和含水量下的力学性质。Nguyen-tuan 等^[14]对 THM 多场耦合本构方程进行了参数敏感性分析,分析了本构参数的误差对模拟结果的影响。Hu 等^[15]建立了 THM 多场耦合模型,基于有限体积法研究了核废料处置库中卤水迁移规律。Favero 等^[16]试验研究了 Opalinus 泥岩在温度和应力耦合作用下的体积变化性质和渗透率变化规律。Crisci 等^[17]试验研究了瑞士浅层 Opalinus 泥岩的水-力耦合特性。

综上所述,目前研究多集中在单一屏障系统的多场耦合问题,或者多屏障系统短期多场耦合效应,并且多集中在对饱和岩土材料的研究,对高放废物处置库多屏障系统(储物罐、缓冲材料和围岩)非饱和 THM 多场耦合大时间尺度数值模拟尚不够完善。因此,本文以我国北山花岗岩高放废物处置库和内蒙古高庙子膨润土为研究对象,建立饱和-非饱和 THM 多场耦合数值模型,利用 COMSOL Multiphysics 对单个竖直处置坑进行数值模拟,研究处置库近场 500 a 内温度、饱和度的演化过程,并对模型参数(围岩渗透率、缓冲材料导热系数和地下水深度)进行敏感性分析,分析各个参数对处置库温度和饱和度演化的影响,以期能为我国高放废物处置库的选址、设计和安全评估提供参考。

1 非饱和 THM 多场耦合模型

1.1 数学模型及参数确定

非饱和 THM 多场耦合模型中非饱和和多孔介质材料为多相系统,包括:气相、液相和固相,气相和液相流体填充固相孔隙,并在孔隙中流动。孔隙中的气相压力等于大气压,并保持常值,所以忽略气相的流动。根据局部热平衡假设,非饱和 THM 多场耦合问题被归纳为 3 个守恒方程(孔隙水的质量守恒方程、多孔介质的能量守恒方程和动量守恒方程)和一系列的本构方程。3 个守恒方程及参数取值见文献[18-22]。

非饱和 THM 多场耦合偏微分方程组的较强非线性导致其计算量大、收敛比较困难,因此本文只选择一个处置坑,并将其考虑为一个轴对称模型(图 1)。假定处置库的处置深度为 1 000 m,单个处置坑所占的面积是在废物罐体表面温度不超过 100℃的限制下通过热分析得到。由于高放废物处置库在水平方向是对称的,所以本文设定处置坑水平外边界为绝热、不透水边界。图 1 模型假设地温梯度为 3℃/100 m,处置库地表的温度为 15℃,模型的深度为 1 200 m,所以模型底部的温度是 51℃,处置库的温度是 45℃。模型底部的边界条件为保持 51℃不变,且不透水;顶部保持 15℃不变,且保持一个标准大气压不变。对于力学边界条件,模型顶部为自由面,右侧边界和左侧边界设定为滚轴支撑。

a. 缓冲材料中孔隙水的持留曲线。孔隙水饱和度 S_l 与孔隙水压力 P 的函数关系^[23]、比持水量 C_m 、相对渗透率 k_r 分别为

$$\frac{S_l - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{\left[1 + \left|\alpha\left(\frac{P}{\rho_l g}\right)\right|^n\right]^m} & P < 0 \\ 1 & P \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

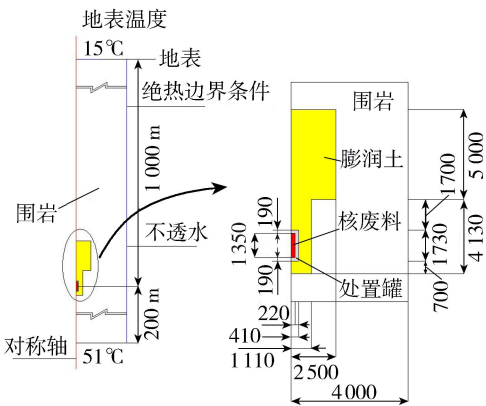


图 1 高放废物地质处置库轴对称几何模型(单位:mm)

Fig.1 Axisymmetric geometric model of high-level waste geological repository (unit: mm)

$$C_m = \frac{\partial S_l}{\partial \left(\frac{P}{\rho_l g}\right)} = \begin{cases} \frac{\alpha m}{1-m}(\theta_s - \theta_r) \left(\frac{S_l - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}} \left[1 - \left(\frac{S_l - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}}\right]^m & P < 0 \\ 0 & P \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$k_r = \begin{cases} \left(\frac{S_l - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^l \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{S_l - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}}\right]^m\right\}^2 & P < 0 \\ 1 & P \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_r 为剩余水的体积分数; θ_s 是孔隙水饱和时的体积分数; α 为材料参数; ρ_l 为水的密度; g 为重力加速度; m 和 n 为常数,且满足 $m=1-1/n$ 。 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 、 l 为材料参数,由试验获得^[22],本文取 $\theta_s=0.403$ 、 $\theta_r=0$ 、 $\alpha=8.0\times10^{-3}\text{ m}^{-1}$ 、 $n=1.6$ 、 $l=0.5$ 。

b. 水的热输运系数。水蒸气的热扩散系数 D_{Tv} 与孔隙水的饱和度 S_l 有关,由试验结果通过参数拟合得到函数关系^[18]为

$$D_{Tv} = \begin{cases} D_{Tvb} & 0.3 \leq S_l \leq 0.7 \\ D_{Tvb} \left(\frac{1-S_l}{0.3}\right) & S_l > 0.7 \\ D_{Tvb} \left(\frac{S_l}{0.3}\right) & S_l < 0.3 \end{cases} \quad (4)$$

式中 D_{Tvb} 为基本扩散系数,取值为 $1.0\times10^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

c. 热性质。等效热容 $(\rho c)_{ls}$ 为

$$(\rho c)_{ls} = \varphi S_l \rho_l c_l + (1 - \varphi) \rho_s c_s \quad (5)$$

式中: c 为缓冲材料的等效比热容; ρ 为缓冲材料的等效密度; φ 为孔隙率; c_l 为水的比热容,取值为 $4200\text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; c_s 为干燥缓冲材料的比热容,取值 $900\text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; ρ_s 为固体基质的密度。

缓冲材料的孔隙率为 0.403,初始饱和度为 0.270,导热系数与饱和度的关系由试验确定(表 1)。固体废料、处置容器、缓冲材料、围岩的杨氏模量分别为 82 GPa、200 GPa、500 MPa 和 37 GPa,泊松比分别为 0.3、0.3、0.3 和 0.25,密度分别为 $2.8\text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $7.8\text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $1.4\text{ g}/\text{cm}^3$ 和 $2.67\text{ g}/\text{cm}^3$,固有渗透率分别为 $1.0\times10^{-30}\text{ m}^2$ 、 $1.0\times10^{-30}\text{ m}^2$ 、 $4.0\times10^{-20}\text{ m}^2$ 和 $1.0\times10^{-15}\text{ m}^2$,热膨胀系数分别为 $1.0\times10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $1.64\times10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $1.0\times10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $1.0\times10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。固体废料、处置容器、围岩的导热系数分别为 $1.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $53\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $2.8\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,热容分别为 $0.96\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 、 $0.46\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 、 $1.0\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

1.2 模拟工况

影响缓冲材料饱和过程和处置库近场温度演化的主要因素有:处置库潜水面深度、围岩的固有渗透率以及膨润土的密度和导热系数。我国高放废物处置库围岩为北山花岗岩,存在大量层理和节理裂隙,由试验可得岩体的平均固有渗透率为 $1.0\times10^{-15}\text{ m}^2$,花岗岩岩石的固有渗透率为 $1.0\times10^{-20}\text{ m}^2$ 。所以选取围岩的固有渗透率为 $1.0\times10^{-15}\text{ m}^2$ (案例 1)作为一个标准案例,选择 $1.0\times10^{-18}\text{ m}^2$ (案例 2-1)和 $1.0\times10^{-20}\text{ m}^2$ (案例 2-2)讨论围岩的固有渗透率对处置库屏障系统 THM 多场耦合演化的影响。基于钱丽鑫^[22]的研究成果,分别选取膨润土的干密度为 $1.4\text{ g}/\text{cm}^3$ (案例 1)、 $1.6\text{ g}/\text{cm}^3$ (案例 3-1)和 $1.8\text{ g}/\text{cm}^3$ (案例 3-2)来讨论导热系数对处置库近场屏障系统 THM 耦合演化的影响(表 1)。假定的 3 种地下潜水面深度分别为:潜水面和地平面平行(案例 1)、潜水面的深度为 500 m(案例 4-2)、潜水面和处置库水平(案例 4-1)。

图 2(a)中,点(1)~(7)在模拟结果输出线上,点(1)为废物罐的中心,点(2)为缓冲材料和废物罐的界面点,点(3)为缓冲层的中心点,点(4)在缓冲层和围岩交界面上,点(5)和点(6)分别距离缓冲层 0.05 m 和 1 m,点(7)为模型的最外点。结果输出线是一条水平线,将废物罐在水平方向平均分为两半。点(8)、点(9)

表 1 缓冲材料导热系数

Table 1 Heat transfer coefficient of buffer material

干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和度	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)
1.4	0.270	0.57
	0.465	0.83
	0.616	0.97
	1.000	1.19
1.6	0.270	0.80
	0.465	1.10
	0.616	1.30
	1.000	1.51
1.8	0.270	1.02
	0.470	1.43
	1.000	2.00

在模型的对称轴上,分别为废物罐的底面点、顶面点,点(10)是缓冲层和处置巷道回填层的边界点。图2(b)中,点(a)(b)(j)(k)(m)在模型对称轴上,点(a)位于缓冲层的中心,点(b)是废物罐的底面中心点,点(j)是废物罐的顶面中心点,点(k)是缓冲层的中点,点(m)是巷道的中心点,点(c)(e)(h)是废物罐的侧面点,点(c)是废物罐的底面点,点(e)是废物罐的中间点,点(h)是废物罐的顶面点。点(i)(f)(d)是缓冲层的中心点,并且在同一竖直线上。点(i)和点(h)齐平,点(d)和点(c)齐平,点(e)和点(f)齐平。点(h)在结果输出线上,并且位于围岩和缓冲层的交界面上。

2 模拟结果与分析

2.1 非耦合热学分析

经过论证^[24],各国学者一致认为在处置库运行和关闭后废物罐体的表面温度不超过100℃时,能够保证高放废物处置库屏障系统的物理化学性质稳定。所以本文首先以非耦合的温度场对处置库进行分析,不断重复计算,发现保持废物罐表面点(2)的温度等于100℃时,单个处置库的半径为4 m,即单个处置库所占的面积为50 m²。

2.2 耦合分析结果

2.2.1 标准案例(案例1)分析

由图3可见,第10年的时候缓冲层完全饱和,靠近废物容器附近缓冲材料的饱和度先降低后增加,这与试验结果以及国外自编软件的模拟结果^[19, 25]趋势相同。

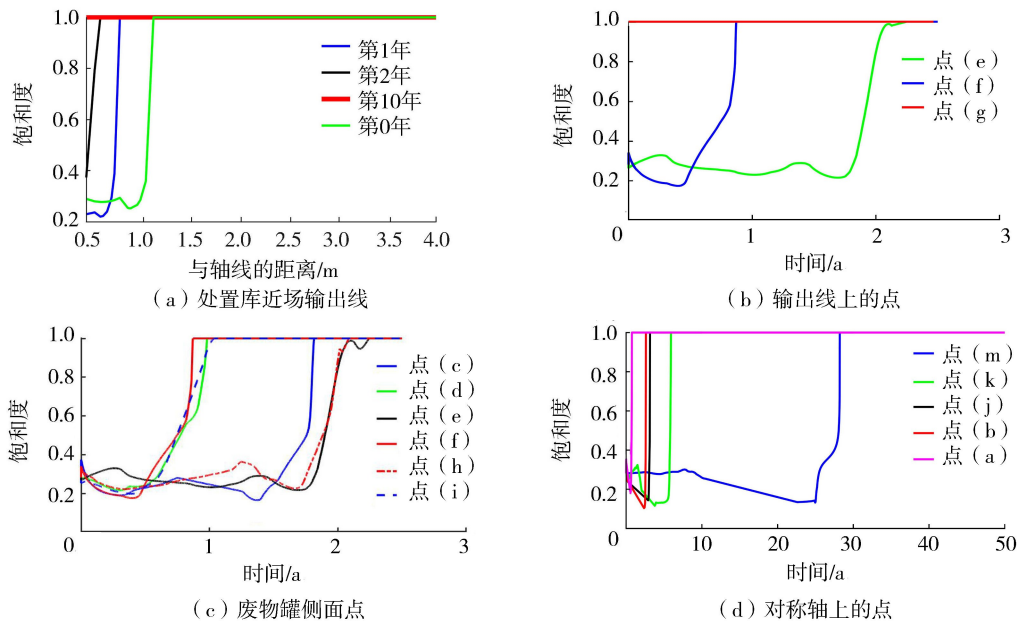


图3 案例1工程屏障系统(EBS)安置后饱和度演化曲线

Fig. 3 Evolution curves of saturation after installation of engineering barrier in Case 1

由图4可以看出各点的温度均未超过100℃,距离废物罐越近的点温度越高。由图5可知,非耦合情况比耦合情况下模拟的温度高,在非耦合情况下缓冲材料的饱和度一直保持为初始饱和度不变,多场耦合模拟时缓冲材料的饱和度不断增加,导致导热系数也不断增加,所以多场耦合情况下模拟的温度会低一些。通过模拟发现,用非耦合的方法模拟的处置库的温度偏高,对于处置库的设计偏于保守。

2.2.2 参数敏感性分析

a. 围岩的渗透率(案例2-1和案例2-2)。由图6(a)可知,围岩的固有渗透率对缓冲材料温度的演化有

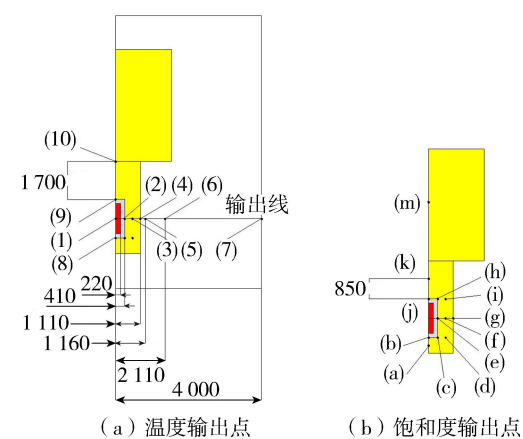


图2 THM耦合模拟结果输出点说明(单位:mm)

Fig. 2 Output point specification for coupled THM analysis results (unit: mm)

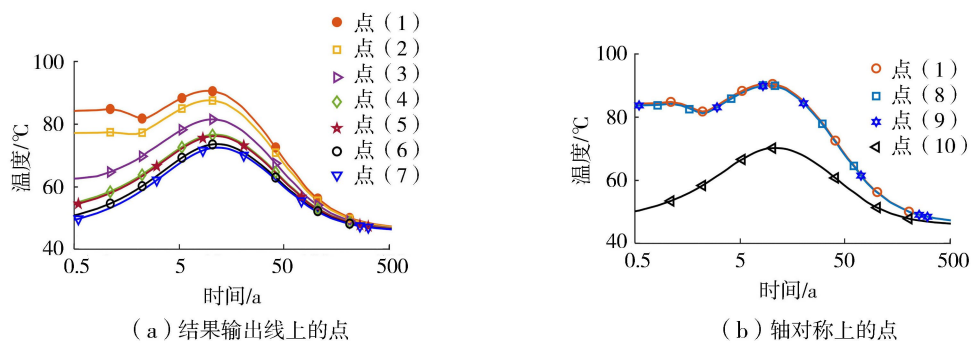


图 4 案例 1 各点温度演化

Fig.4 Evolution of temperature at various points in Case 1

影响。在温度未达到峰值之前,围岩的固有渗透率越低,缓冲材料的温度越高,这是由于围岩的渗透率越低缓冲材料达到饱和的时间越长,缓冲材料内的含水量越低,导热系数越低造成的。虽然在峰值前 3 个案例的温度有所差别,但是 3 个案例的峰值温度区别不大,并且在峰值后期温度逐渐趋于相同。这是因为随着时间的演化,缓冲材料逐渐饱和,3 个案例中缓冲材料的导热系数差异逐渐消失,所以温度的差异也逐渐消失。由图 6(b)可知,案例 1、案例 2-1 和案例 2-2 中点(e)的饱和时间分别为 2.25 a、2.86 a 和 10.17 a。由此可见,当围岩的固有渗透率减小时,围岩中的孔隙水向缓冲层渗透的速度减缓,导致缓冲材料的饱和时间增加,当围岩的固有渗透率由 $1\times10^{-15}\text{ m}^2$ 降低到 $1\times10^{-18}\text{ m}^2$ 时,缓冲材料的饱和时间增加的并不多,但是当围岩的固有渗透率降低到 $1\times10^{-20}\text{ m}^2$ 时,缓冲材料的饱和时间大大地增加。由图 6(c)可知,案例 1、案例 2-1 和案例 2-2 中点(m)的饱和时间分别为 28.2 a、32.6 a 和 250 a。

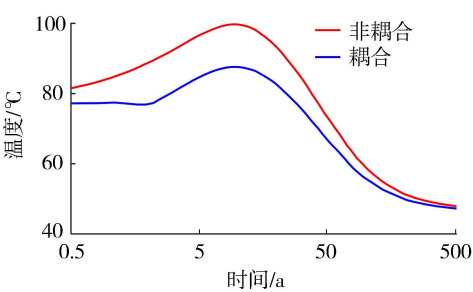


图 5 案例 1 点(2)温度耦合与非耦合对比

Fig.5 Comparison of temperature in coupled and uncoupled simulations at point (2) in Case 1

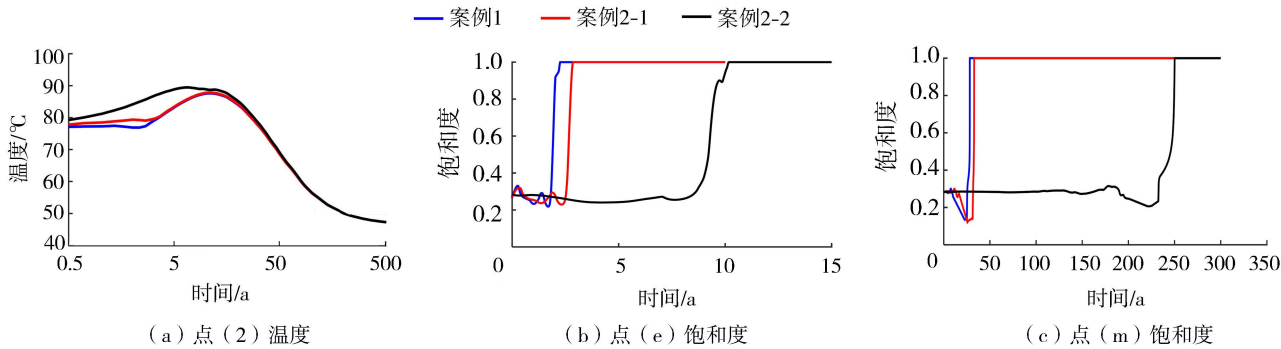


图 6 案例 1、案例 2-1 和案例 2-2 的温度和饱和度对比

Fig.6 Comparison of temperature and saturation of Case1, Case2-1 and Case2-2

b. 缓冲材料的导热系数(案例 3-1 和案例 3-2)。由图 7(a)可知,案例 1 的温度最高,其次是案例 3-1,最低的是案例 3-2,由此可知缓冲材料的温度随着导热系数的增加而降低。导热系数不但影响峰值前的温度,同时对缓冲材料峰值温度以及峰值后的温度都有影响。由图 7(b)(c)可知,导热系数对点(e)和点(m)的饱和度演化影响不大。

c. 围岩的孔隙水压力(案例 4-1 和案例 4-2)。案例 1、案例 4-2 和案例 4-1 的围岩孔隙水压力水头分别为 1000 m、500 m 和 0 m。由图 8(a)可知围岩的孔隙水压力越大,点(2)的温度越低。这是因为围岩的孔隙水压力越大,缓冲材料饱和的越快,缓冲材料的导热系数越大,所以处置库近场屏障系统的温度就越低。由图 8(b)(c)可知,孔隙水的压力越低,缓冲材料的饱和时间越长。3 个案例点(e)的饱和时间分别为 2.25 a、3.84 a

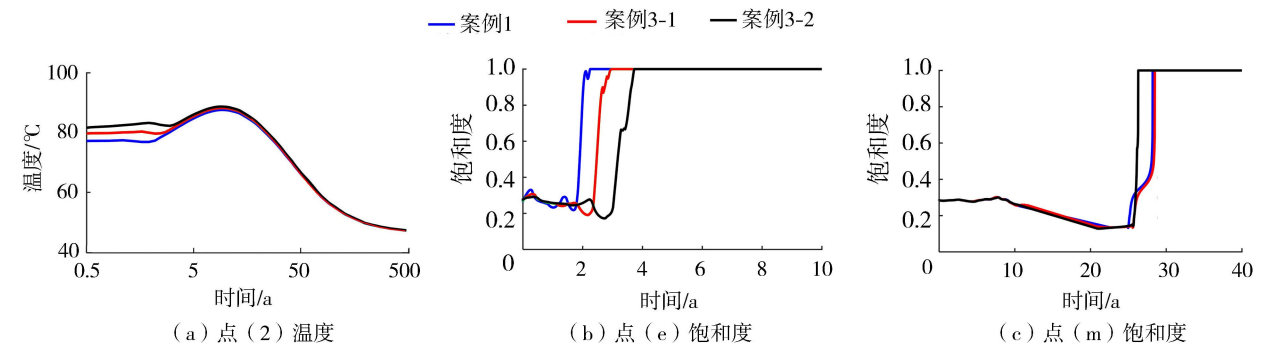


图7 案例1、案例3-1和案例3-2的温度和饱和度对比

Fig. 7 Comparison of temperature and saturation of Case1, Case3-1 and Case3-2

和56.19 a,点(m)的饱和时间分别为28.22 a、58.88 a和703.29 a。当孔隙水压力水头由1 000 m降低到500 m时,点(e)(m)的饱和时间增加的量不是很多,但是当孔隙水压力降低到0 m时,点(e)(m)的饱和时间增加到了原来的25倍,点(m)的饱和时间高达700多年。由此可见围岩孔隙水的压力水头对缓冲材料的饱和时间影响很大。

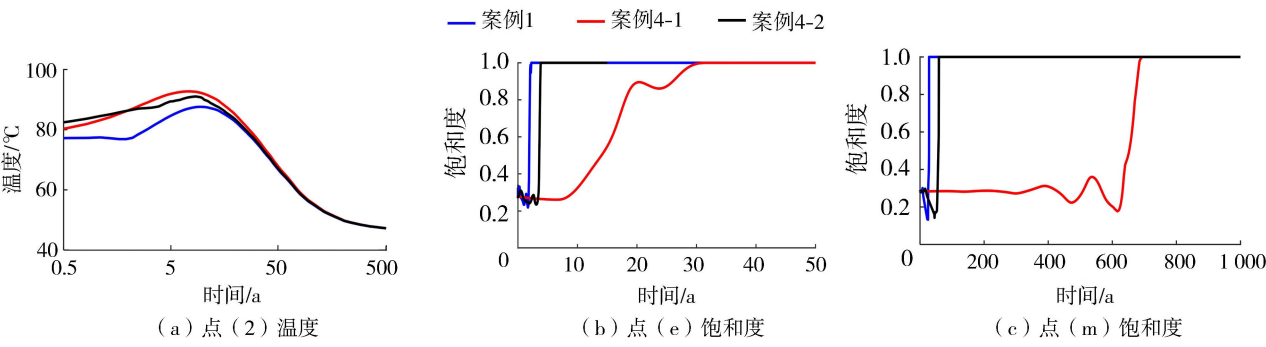


图8 案例1、案例4-1和案例4-2的温度和饱和度对比

Fig. 8 Comparison of temperature and saturation of Case1, Case4-1 and Case4-2

由模拟结果可知在进行高放废物处置库设计时,如本文中工况,单个处置库占地面积大于50 m²时,处置库近场的温度小于100℃,这样可以确保处置库安全。

3 结 论

- a. 缓冲材料的导热系数对高放废物处置库的温度演化起着决定影响。导热系数降低20%会导致温度升高8℃。
- b. 围岩的固有渗透率对缓冲材料的饱和时间影响很大。固有渗透率降低5个数量级时缓冲材料的饱和时间由25 a增加到了250 a。
- c. 高放废物处置库地下水潜水面的深度,对处置库缓冲层的饱和过程影响巨大。当潜水面由0 m上升到1 000 m的时候,缓冲材料完全饱和的时间由703 a降低到28 a。
- d. 由非耦合温度场模拟的高放废物处置库近场屏障系统的温度比由THM多场耦合模拟的结果低13℃。

参考文献:

[1] 张玉军.核废料处置概念库工程屏障中热-水-应力耦合过程数值分析[J].工程力学,2007,24(5):186-192. (ZHANG Yujun. Numerical analysis for coupled thermo-hydro-mechanical processes in engineered barrier of conceptual nuclear waste repository[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(5): 186-192. (in Chinese))

[2] 张玉军.核废料地质处置概念库HM耦合和THM耦合过程的二维离散元分析与比较[J].工程力学,2008,25(4):218-223. (ZHANG Yujun. Analysis and comparison of coupled HM and THM processes by 2D distinct element method in a conceptual nuclear waste repository[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 218-223. (in Chinese))

- [3] 陈卫忠,马永尚,于洪丹,等. 泥岩核废料处置库温度-渗流-应力耦合参数敏感性分析[J]. 岩土力学,2018,39(2):407-416. (CHEN Weizhong, MA Yongshang, YU Hongdan, et al. Parameter sensitivity analysis for thermo-hydro-mechanical coupling model of clay tunnel for radioactive waste disposal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2):407-416. (in Chinese))
- [4] 刘学艳,项彦勇. 米尺度裂隙岩体模型水流-传热试验的数值模拟分析[J]. 岩土力学,2012,33(1):287-294. (LIU Xueyan, XIANG Yanyong. Numerical modeling of water flow and heat transfer in a meter-scale physical model of fractured rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1):287-294. (in Chinese))
- [5] 刘月妙,王驹,曹胜飞,等. 中国高放废物地质处置缓冲材料大型试验台架和热-水-力-化学耦合性能研究[J]. 岩土力学,2013,34(10):2756-2762. (LIU Yuemiao, WANG Ju, CAO Shengfei, et al. A large-scale THMC experiment of buffer material for geological disposal of high level radioactive waste in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10):2756-2762. (in Chinese))
- [6] 张强林,王媛,曹国利,等. 效裂隙岩体 THM 耦合并行有限元程序开发[J]. 长江科学院院报,2009,26(10):58-61. (ZHANG Qianglin, WANG Yuan, CAO Guoli, et al. THM coupling parallel finite element program development for equivalent fractured rock mass [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(10):58-61. (in Chinese))
- [7] 侯会明,胡大伟,周辉,等. 考虑开挖损伤的高放废物地质处置库温度-渗流-应力耦合数值模拟方法[J]. 岩土力学,2020,41(3):1056-1064. (HOU Huiming, HU Dawei, ZHOU Hui, et al. Thermo-hydro-mechanical coupling numerical simulation method for high-level waste geological repository considering excavation damage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3):1056-1064. (in Chinese))
- [8] 陈益峰,李典庆,荣冠,等. 脆性岩石损伤与热传导特性的细观力学模型[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(10):1959-1969. (CHEN Yifeng, LI Dianqing, RONG Guan, et al. A micromechanical model for damage and thermal conductivity of brittle rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10):1959-1969. (in Chinese))
- [9] 潘鹏志,冯夏庭,周辉. 开挖损伤区近场模型 THM 耦合过程的 BMT 模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(12):2532-2540. (PAN Pengzhi, FENG Xiating, ZHOU Hui. BMT simulation of coupled THM processes by near field model in excavation damage zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12):2532-2540. (in Chinese))
- [10] 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 Jingli, MA Like, GAO Yufeng, et al. Thermal conductivity of mixtures of Beishan bentonite and crushed granite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8):2823-2828. (in Chinese))
- [11] 高玉峰,刘月妙,谢敬礼,等. 高放废物处置库缓冲材料气体渗透特性研究[J]. 中国矿业,2018,27(5):158-163. (GAO Yufeng, LIU Yuemiao, XIE Jingli, et al. The gas permeability of buffer material for high-level radioactive waste disposal [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(5):158-163. (in Chinese))
- [12] 鲁文玥,刘月妙,谢敬礼,等. 高庙子钠基膨润土的膨胀性能研究[J]. 中国矿业,2020,29(3):177-182. (LU Wenyue, LIU Yuemiao, XIE Jingli, et al. Swelling of different Gaomiaozhi sodium-based bentonites [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(3):177-182. (in Chinese))
- [13] ZHANG F, HU D W, XIE S Y, et al. Influences of temperature and water content on mechanical property of argillite [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2014, 18(2):173-189.
- [14] NGUYEN-TUAN L, LAHMER L, DATCHEVA M, et al. Global and local sensitivity analyses for coupled thermo-hydro-mechanical problems [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017, 41(5):707-720.
- [15] HU M, RUTQVIST J. Fully Coupled Hydro-Thermal-Mechanical Modeling of Brine Migration in Salt for Heat-Generating Nuclear Waste [C]//Poromechanics VI: Proceedings of the Sixth Biot Conference on Poromechanics. New York: Amer Soc Civil Engineers, 2017.
- [16] FAVERO V, FERRARI A, LALOUI L. Thermo-mechanical volume change behaviour of Opalinus Clay [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 90:15-25.
- [17] CRISCI E, FERRARI A, GIGER S B, et al. Hydro-mechanical behaviour of shallow Opalinus Clay shale [J]. Engineering Geology, 2019, 251:214-227.
- [18] BORGESESSON L, CHIJIMATSU M, FUJIA T, et al. Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite based buffer material by laboratory tests and numerical back analyses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2001, 38(1):95-104.
- [19] RUTQVIST J, BORGESESSON L, CHIJIMATSU M, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine-comparison of field results to predictions of four finite element codes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2001, 38(1):129-142.

[13] 孟斌,吴宏鑫.一类飞行器姿态动力学特征建模研究[J].中国科学,2010,40(8):898-903. (MENG Bin,WU Hongxin. On characteristic modeling of a class of flight vehicles' attitude dynamics[J]. Science in China,2010,40(8):898-903. (in Chinese))

[14] 吴宏鑫,王颖.非线性系统的特征建模方法[C]//第二十一届中国控制会议论文集.杭州:浙江大学出版社,2002.

[15] 吴宏鑫,王颖,解永春.非线性系统的特征建模与控制方法[J].控制工程,2002(6):1-7. (WU Hongxin,WANG Ying,XIE Yongchun. Characteristic modeling of nonlinear system and control method[J]. Control Engineering,2002(6):1-7. (in Chinese))

[16] 张虎,李正熙,童朝南.基于递推最小二乘算法的感应电动机参数离线辨识[J].中国电机工程学报,2011,31(18):79-86. (ZHANG Hu,LI Zhengxi,TONG Chaonan. Off-line parameter identification of induction motor based on recursive least-squares algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(18):79-86. (in Chinese))

[17] 鞠平.电力系统建模理论与方法[M].北京:科学出版社,2010.

[18] 徐佳琪,吕晖.基于PSASP的36节点电力系统暂态稳定分析[J].电子制作,2021(17):39-42. (XU Jiaqi,LYU Hui. Transient stability analysis of 36-node power system based on PSASP[J]. Electronic Production,2021(17):39-42. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-26 编辑:胡新宇)

(上接第117页)

[20] International Formulation Committee. A formulation of the thermodynamic properties of ordinary water substances[M]. Dusseldorf :IFC Secretariat,1967.

[21] PHILIP J R,DE VRIES D A. Moisture movement in porous material under temperature gradients[J]. Eos,Transactions American Geophysical Unio,1957,38(2):222-232.

[22] 钱丽鑫.高放废物深地质处置库缓冲材料-高庙子膨润土基本特性研究[D].上海:同济大学,2007.

[23] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892-898.

[24] JAEA. H17:Development and Management of the Technical Knowledge Base for the Geological Disposal of HLW[R]. Ibaraki: Japan Atomic Energy Agency,2005.

[25] RUTQVIST J,ZHENG L,CHEN F. Modeling of coupled thermo-hydro-mechanical processes with links to geochemistry associated with bentonite-backfilled repository tunnels in clay formations [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2014,1(47):167-186.

(收稿日期:2021-09-07 编辑:刘晓艳)

(上接第130页)

[11] MOSTAFA A,MOHAMMAD F H,MAHDI M,et al. Mechanical characterisation of jointed rock-like material with non-persistent rough joints subjected to uniaxial compression[J]. Engineering Geology,2019,260:105224.

[12] BAN Y,XIE Q,FU X,et al. Shear failure mechanism and acoustic emission characteristics of jointed rock-like specimens[J]. Sains Malaysiana,2021,50(2):287-300.

[13] 盛金昌,高鹏,王珂,等.渗流侵蚀作用对岩石裂隙剪切特性的影响试验[J].水利水电科技进展,2021,41(2):42-48. (SHENG Jinchang,GAO Peng,WANG Ke,et al. Experiments of seepage erosion influence on shear characteristics of rock fracture[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(2):42-48. (in Chinese))

[14] SHARAFISAF A M,SHEN L. Experimental investigation of dynamic fracture patterns of 3D printed rock-like material under impact with digital image correlation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2020,53(7):3589-3607.

[15] 林豆,徐卫亚,王环玲,等.渗流作用下柱状节理岩体强度特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):151-155. (LIN Dou,XU Weiya,WANG Huanling,et al. Experimental study on strength characteristics of columnar jointed rock mass under the seepage[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(2):151-155. (in Chinese))

[16] CAO R H,CAO P,LIN H,et al. Failure characteristics of jointed rock-like material containing multi-joints under a compressive-shear test:Experimental and numerical analyses[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering,2018,18(3):784-798.

[17] 段国勇.特定角度组合节理岩体卸荷力学特性试验研究[D].宜昌:三峡大学,2015.

[18] 柏俊磊.非贯通节理岩体各向异性力学特性试验研究[D].宜昌:三峡大学,2014.

(收稿日期:2021-10-24 编辑:刘晓艳)