

文章编号: 1000-7598 (2009) 07-2126-07

核废物地质处置中热-水-应力耦合 对迁移影响的三维有限元模拟

张玉军

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 将所建立的热-水-应力-迁移耦合模型及开发的有限元程序, 由二维分析拓展到三维分析, 并从方法论研究的角度, 以一个简单的核废物地质处置模型为算例, 进行热-水-应力-迁移耦合过程的三维数值模拟, 考察了近场的温度、饱和度、核素浓度、孔隙水压力、位移、正应力、流速等的分布与变化, 认为计算结果符合规律, 得出了若干结论: 为了精确地模拟放射性核素迁移, 就必须将温度场、渗流场、应力场和核素浓度场进行耦合分析; 核废物埋存若干年后将在处置孔壁附近产生较高的压应力; 缓冲层内各点的核素浓度达到相对稳定的时间要比温度和饱和度达到相对稳定的时间长得多。

关 键 词: 岩石力学; 核废物; 地质处置; 热-水-应力-迁移耦合; 三维模型; 有限元分析

中图分类号: TU 45; O 242

文献标识码: A

3D finite element simulation for influence of thermo-hydro-mechanical coupling on migration in geological disposal of nuclear waste

ZHANG Yu-jun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: A 2D model for coupling thermo-hydro-mechanical-migration and the relevant FEM code made by author is extended to 3D. From the viewpoint of methodology study, a 3D numerical simulation for the coupled thermo-hydro-mechanical-migratory processes in a simple model of geological disposal of nuclear waste, which is taken for example, is carried out. The distributions and changes of the temperature, saturation, nuclide concentration, pore pressure, displacement, normal stress and flow velocity in the near field are investigated. It is considered that the computation results are in keeping with the regular pattern. Finally, some conclusions are drawn: in order to simulate the migration of radioactive nuclide accurately, it is necessary to analyze temperature field, seepage field, stress field and nuclide concentration field by coupled method; higher compressive stresses will appear in the neighborhood of disposal pit wall after several decades from the embedment of nuclear waste; in buffer layer the period during which nuclide concentration reaches relative stabilization is much longer than those during which temperature and saturation reach relative stabilization respectively.

Key words: rock mechanics; nuclear waste; geological disposal; thermo-hydro-mechanical-migratory coupling; 3D model; finite element analysis

1 引 言

在高放射性核废物地质处置的研究中, 对可能发生的核素泄漏、迁移进行分析和模拟, 从而在处置库的选址、设计和建造中采取相应的对策一直是十分重要的研究课题。在这方面, 国内外已有若干研究成果, 如 E. Sonnenthal 等^[1]针对美国尤卡山坑

道规模试验 (DST), 使用著名的 TOUGHREACT 软件, 对处置库围岩中的热-水-化学耦合过程进行了数值模拟, 其中包括热、水和汽流的耦合, 液相和气相物种的输运, 动态和平衡态水-岩反应, 矿物溶解和沉淀对岩体孔隙率、渗透性和毛细管压力的影响等。梁冰等^[2]以双重介质理论为基础, 充分考虑了地下水变密度对核素浓度分布的影响, 建立了

收稿日期: 2008-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50578171)。

作者简介: 张玉军, 男, 1956 年生, 研究员, 工学博士, 主要从事于岩石力学与工程方面的研究。E-mail: YJzhang@whrsm.ac.cn

孔隙-裂隙介质中核素随地下水迁移的耦合数值模型，其中相对密度项使地下水流控制方程具有非线性性，并模拟了核素泄漏对地下水污染的动态过程，但这些研究工作尚未考虑与应力或与热-应力的相互作用，还不能很好地反映出处置库环境的流体-温度-力学-化学耦合过程。

地中放射性核素的浓度与地下水的流速和所处介质的扩散-弥散系数（亦是地下水流速的函数）有关，若要求解核素的迁移，就必须知道地下水的流速。然而，在高放射性核废物地质处置的热-水-应力-化学耦合过程中，地下水的流速与温度场和应力场有密切的关系，在核素迁移的研究中应该认真考虑，但目前该项研究中还很少涉及温度场和应力场的影响^[3-5]。鉴于此，笔者^[6-8]曾引入渗透迁移方程，将所开发的饱和-非饱和孔隙介质中热-水-应力耦合弹塑性模型及其二维有限元程序进行了扩展和改进，使其可以同步地对温度场、渗流场、应力场和放射性核素浓度场的变化进行解析。虽然，在不少情况下可将核废物地质处置中发生的耦合现象简化为平面问题来处理，但实质是三维问题。随着笔者在本领域研究的深入，将开发的有限元程序由二维分析拓展到三维分析，并从方法论研究的角度，以一个假想的核废料处置库为算例，进行热-水-应力-迁移耦合过程的数值模拟，考察近场的温度、饱和度、孔隙水压力、位移、正应力、流速、核素浓度等的分布与变化，从而对程序的正确性和分析结果作出评价。

2 热-水-应力-迁移耦合模型

根据有关的理论^[9-10]，笔者已推得了求解平面问题的主要的控制方程^[6]，现将其扩展应用于三维分析，有如下的算式。

2.1 控制方程式

增量型的应力平衡方程为

$$\int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D}_T \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{m} \left[s_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h-z) \cdot \gamma_w^2 D_s \frac{\partial h}{\partial t} \right] d\Omega + \int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D}_T \mathbf{m} A \frac{\partial h}{\partial t} \frac{1}{3} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D}_T \frac{\mathbf{m}}{3k_s} \left[s_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} + (h-z) \gamma_w^2 D_s \frac{\partial h}{\partial t} \right] d\Omega - \int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D}_T \mathbf{m} \frac{\beta_s}{3} \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中： \mathbf{D}_T 为 6×6 的弹塑性模量矩阵； $d\boldsymbol{\varepsilon}$ 为总应变

增量， $d\boldsymbol{\varepsilon} = [d\varepsilon_x \ d\varepsilon_y \ d\varepsilon_z \ d\gamma_{xy} \ d\gamma_{yz} \ d\gamma_{xz}]^T$ ； \mathbf{m} 为法向应力单位列阵， $\mathbf{m} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ； s_w 为饱和度； γ_w 为水的重度； h 为全水头； z 为位置水头； D_s 为湿气容量（moisture capacity）， $D_s = \partial s_w / \partial p_w$ ； p_w 为孔隙水压力； A 为膨胀力计算项， $A = k_s^{k-1} F_{wmax} / (k_e \phi) d\theta / d\psi$ ； k 为经验常数； K_e 为孔隙介质的体积模量； ϕ 为孔隙度； F_{wmax} 为最大膨胀应力，由试验确定； θ 为体积含水率； $\psi = h - z$ ； K_s 为固相的体积模量； β_s 为固相的热膨胀系数； dT 为温度增量； $d\mathbf{f} = \{df_x \ df_y \ df_z\}^T$ 为外荷载增量。

水连续性方程为

$$-\nabla^T \left\{ \frac{\mathbf{K} \mathbf{r}_w \gamma_w}{\mu_w} \nabla h \right\} + s_w \left(\mathbf{m}^T - \frac{\mathbf{m}^T \mathbf{D}_T}{3k_s} \right) \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} + \gamma_w \left\{ D_s \phi + \frac{\phi s_w}{k_w} + s_w \left(\frac{1-\phi}{k_s} - \frac{1}{(3k_s)^2} \mathbf{m}^T \mathbf{D}_T \mathbf{m} \right) \right\} [s_w + (h-z) \gamma_w D_s] \frac{\partial h}{\partial t} - \left\{ \phi s_w \beta_w + s_w [(1-\phi) \beta_s - \frac{\mathbf{m}^T \mathbf{D}_T \mathbf{m} \beta_s}{3k_s}] \right\} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^T \mathbf{D}_t \nabla T = 0 \quad (2)$$

式中： $\mathbf{K} = [K_x \ K_y \ K_z]$ 为固有渗透系数矩阵； \mathbf{r}_w 为比渗透系数矩阵，是 s_w 的函数； μ_w 为水的黏滞系数； k_w 为水的压缩模量； β_w 为水的热膨胀系数； \mathbf{D}_t 为温度梯度水分扩散系数。

能量守恒方程为

$$-\nabla^T \lambda \nabla T + \phi s_w \rho_w C_w (\nabla^T T) \mathbf{V}^a + \left[(1-\phi) C_s T \frac{\rho_s}{K_s} + \phi C_w T \frac{\rho_w}{K_w} \right] (s_w + D_s \gamma_w (h-z)) \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} - \{ (1-\phi) \cdot C_s T \rho_s \beta_s + \phi C_w T \rho_w \beta_w - [(1-\phi) \rho_s C_s + \phi \rho_w C_w] \} \frac{\partial T}{\partial t} + L \nabla^T \left\{ D_{\theta v} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \nabla (h-z) \right\} = 0 \quad (3)$$

式中： C_w 、 C_s 分别为水及岩土介质的比热； $\rho_w C_w$ 、 $\rho_s C_s$ 分别为水及岩土介质的体积比热； λ 为岩土介质的导热系数矩阵； $\mathbf{V}^a = [V_x^a \ V_y^a \ V_z^a]$ 为水流的表现速度； θ 为体积含水率； L 为水蒸汽的潜热，其计算式^[11]为

$$L = 4 \ 200.0(597.1 - 0.573T) \quad (4)$$

$D_{\theta v}$ 为水蒸汽扩散系数，其取为日本核燃料循环开发机构（JNC）模型^[12]，则

$$D_{\theta v} = \frac{a_1(\theta - \theta_s)}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_s)} \quad (5)$$

式中： θ_s 为最大体积含水率； a_1 、 b_1 为温度的线性函数。

根据参考文献[10]，渗透迁移方程为

$$R\theta\rho\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta\rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \theta\rho V_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - R\theta\rho\chi c - Q_c \quad (6)$$

式中： R 为阻滞系数， $R = V/V^* = (1 + \rho_d K_d / \theta)$ ； V 为地下水流表观速度； V^* 为放射性核素输运速度； ρ_d 为岩土介质的干密度； K_d 为对饱和土的分配系数； θ 为体积含水率； ρ 为流体密度； D_{ij} 为扩散张量分量； c 为溶质浓度； V_i 为地下水表观流速矢量分量； χ 为衰减常数； Q_c 为源汇项。

而扩散张量可表示为

$$D_{ij} = \alpha_T |V| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) V_i V_j / |V| + \alpha_m \tau \delta_{ij} \quad (7)$$

式中： α_T 为横向弥散度； α_L 为纵向弥散度； $|V|$ 为表观流速的绝对值； α_m 为分子扩散系数； τ 为孔隙曲折率； δ_{ij} 为克罗内克符号。

2.2 弹塑性分析

进行弹塑性计算时可以使用 3 种屈服函数^[9]，即摩尔-库仑准则、修正的剑桥黏土准则和 $p-q-\theta$ 临界状态准则。

3 核废料地质处置模型

目前国外所设计的核废物地质处置概念库一般是由竖井、联络坑道、主坑道和处置坑道群等组成^[13]，而处置孔沿坑道纵向按一定的间距垂直地分布在洞室的底板下。玻璃固化体贮存罐被放置于处置孔内后，贮存罐与岩壁之间的空隙要用缓冲材料充填密实，且相关的坑道也要用回填材料加以封堵。在一个处置单元中由里向外依次是玻璃固化体、包装容器、缓冲层和围岩，它们起着阻滞放射性核素外泄及迁移的 4 重屏障的作用。根据上述核废物地质处置的概念，从方法论研究的角度，笔者采用了一个简单的计算模型，见图 1，该模型的尺寸（长×宽×高）为 10 m×10 m×20 m，其内部缓冲材料的尺寸（长×宽×高）为 4 m×4 m×4 m。核废物贮存罐位于模型的中心。由于对称性，取沿垂向剖开的 1/4 模型作为分析域，对应的有限元网格见图 2，其中有 4 891 个节点，4 000 个 8 节点等参数单元。

假定核废物贮存罐的埋深为 500 m，水头从地表向下为线性分布，岩体中的初始温度为 20.0 °C。取边界条件为：顶、底面水头及温度固定，其余面

为绝热及不透水面，4 个垂直面及底面的法线方向位移约束，而顶面是位移自由的，其上并作用有上部岩体自重转化的节点荷载。

缓冲材料符合 JNC 模型，其与非饱和计算有关的一些物性值设定如下：

①膨胀应力 F_w (MPa)，与饱和度 s_w 呈现函数关系，回归曲线为

$$F_w = F_{w \max} s_w^2 \quad (8)$$

而 $F_{w \max} = 0.35$ MPa。

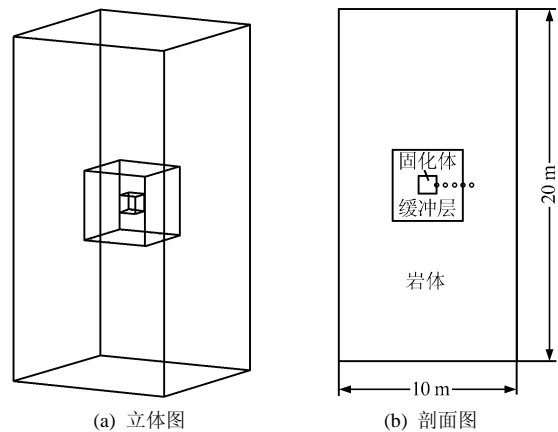


图 1 核废物地质处置模型
Fig.1 Model of geological disposal for nuclear waste

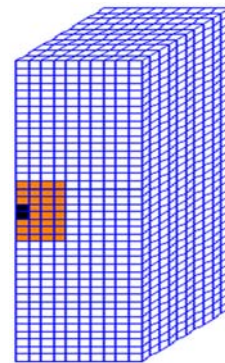


图 2 三维有限元网格
Fig.2 3D FEM mesh

②比渗透系数 r_w ，与饱和度 s_w 的函数关系为

$$r_w = S_w^t \quad (9)$$

式中： t 为经验常数，本文取 2.0。

③水分特性曲线，用 Van Genuchten 模型描述，如下式：

$$\frac{s_w - s_{wr}}{s_{ws} - s_{wr}} = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad (10)$$

式中： s_{ws} 、 s_{wr} 分别为最大和最小饱和度，其值为

1.0 和 0.0; α 、 n 和 m 为材料参数, 其值依次为 $5.2 \times 10^{-4}/m$ 、1.7 和 $1-1/n$ 。

④水蒸汽扩散系数 $D_{\theta v}$ (cm^2/s) 为

$$D_{\theta v} = \frac{(2.99 \times 10^{-8} T - 3.78 \times 10^{-7})_i (\theta - \theta_s)}{(\theta + 2.49 \times 10^{-3})(-2.49 \times 10^{-3} - \theta_s)} \quad (11)$$

⑤温度梯度水分扩散系数 D_t ($\text{m}^2/\text{s} \cdot ^\circ\text{C}$) 为

$$D_t = D_{t0} \exp\left(\alpha_T \frac{T - T_0}{T_0}\right) \quad (12)$$

式中: $D_{T0} = 7.0 \times 10^{-12}$, $\alpha_T = 0.0$, $T_0 = 30.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

⑥湿气容量 D_s 为

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial \phi_w} = \frac{1}{\phi_w} \alpha (n-1) (\theta_s - \theta_t) s_e^{1/m} (1 - s_e^{1/m})^m \quad (13)$$

$$s_e = (1 + |\alpha \psi|^m)^{-m}, (\alpha > 0) \quad (14)$$

假设由于某种原因核废料贮存罐在埋置时有所损坏, 之后以恒定的浓度及速率均匀地向近场泄漏放射性核素。以此时为计算起点, 假设域内温度为 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ (均匀分布), 玻璃固化体为源项, 释放强度 $Q_c = 3.75 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^3 \cdot \text{s}$, 参考文献[10], 假定与某种放射性核素的渗透迁移有关, 且在计算中不变的参数为: 孔隙曲折率 $\tau = 0.4$, 纵向弥散度 $\alpha_L = 1.0 \text{ m}$, 横向弥散度 $\alpha_T = \alpha_L/10$, 分子扩散系数 $\alpha_m = 2.0 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{s}$, 岩体和缓冲层的分配系数 K_d 为 58.3 mL/g 和 100.0 mL/g , 衰减常数 $\chi = \ln 2 / T_{\text{half}}$, 其中 T_{half} 为放射性核素的半衰期, 取为 $10\,000$ 年。

岩体、缓冲材料及玻璃固化体(含贮存罐)的主要计算参数见表 1。岩体是饱和介质, 缓冲材料的初始饱和度为 0.5。假定贮存罐、缓冲材料是同时刻一并埋置完毕, 暂不考虑伴随开挖发生的围岩中应力重分布和水压变化。核废物以 500 W 的不变功率释放热量, 时间经历了 640 年。由于本文的重点是定性考察核废物地质处置模型近场的三维热-水-应力-迁移耦合过程, 弹性分析已可说明问题, 故暂不考虑岩体塑性的影响。

4 有限元数值分析

图 1(b)为图 2 有限元网格的正面, 上面标注了

5 个计算结果输出点的位置, 其中 2422 点位于贮存罐的外缘, 2423 点和 2424 点位于缓冲层的内部, 2425 点位于缓冲层和处置孔壁的交界处, 2426 点位于围岩中。图 3 为上述 5 个点的温度随时间变化曲线, 可见各点的温度开始阶段快速上升, 离贮存罐越近的点其温度越高, 在前 7 年温度增加最明显, 之后温度增长缓慢, 到 30 年时 5 个点的温度依次为 $72.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ (2422 点)、 $49.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ (2423 点)、 $33.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ (2424 点)、 $24.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ (2425 点)、 $23.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ (2426 点)。

图 4 为上述 5 个点的饱和度随时间的变化曲线。从图中得见, 由于 2426 点位于围岩中, 该点饱和度始终保持为 1.0; 2425 点位于缓冲层和处置孔壁的交界处, 该点得到地下水的快速浸润, 其在约 0.88 年时饱和度达到了 1.0, 而位于缓冲层内部的 3 个点的饱和度开始均有所下降。究其原因: 一是在开始阶段, 热-水-应力耦合现象强烈, 缓冲材料受到围岩的挤压作用后其含水率减少(特别是在离围岩较近之处, 如 2424 点)。二是在开始阶段缓冲层中, 距离贮存罐近的部位的温度升高较快, 温度梯度引起了水分扩散(向外), 而水力梯度产生的水分迁移(向内)尚未到达该部位, 使得该部位的干燥程度不断增加。一定时间后随着地下水分的到达和浸润作用的增强, 缓冲层中各点的含水率才逐渐变大, 各点的饱和度达到 1.0 的时间依次为: 115.7 年(2422 点)、102.6 年(2423 点)、88.3 年(2424 点)。

图 5 为上述 5 个点的核素浓度随时间的变化曲线, 从图中看到, 由于 2422 点位于贮存罐的外缘, 初期阶段该点的核素浓度快速上升, 到 41.7 年时达到一个峰值, 其为 0.704 mol/m^3 , 之后有所下降, 到 115.7 年时变为 0.62 mol/m^3 , 然后重新上升。其原因在于: 开始时贮存罐周围的缓冲材料处于非饱和状态, 水分输运困难, 而扩散张量也与流速成正比(式(7)), 故核素聚集在贮存罐周边难以向外扩散。由图 4 可知, 在 40~110 年的时间内, 贮存罐周围缓冲材料的吸水饱和和明显加快, 因而流速和扩散张量均增大, 核素迁移变得相对容易, 故降低了贮存罐周边(2422 点)的核素浓度。当时间大于 115 年之后, 由于整个缓冲层已处于饱和状态, 2422

表 1 主要计算参数

Table 1 Main computation parameters

介质	重度 ρ /(kN/m^3)	孔隙率 ϕ	渗透系数 k /(m/s)	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ	比热 C /($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}/^\circ\text{C}$)	热膨胀系数 β / $^\circ\text{C}^{-1}$	导热系数 λ /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}/^\circ\text{C}$)
岩石	25.0	0.1	1.0×10^{-8}	3.7×10^3	0.25	1.0	1.0×10^{-6}	3.0
缓冲材料	18.0	0.5	1.0×10^{-10}	3.0×10^1	0.30	0.4	2.0×10^{-5}	0.8
固化体	27.0	0.0	1.0×10^{-20}	5.8×10^3	0.23	0.7	1.0×10^{-6}	55.0

点与其他各点的水头差值很小，流速也因而减慢，故贮存罐周边的核素浓度又再次升高。到640年时，5个点的核素浓度依次为 0.72 mol/m^3 (2422点)、 0.19 mol/m^3 (2423点)、 0.08 mol/m^3 (2424点)、 0.05 mol/m^3 (2425点)、 0.01 mol/m^3 (2426点)。

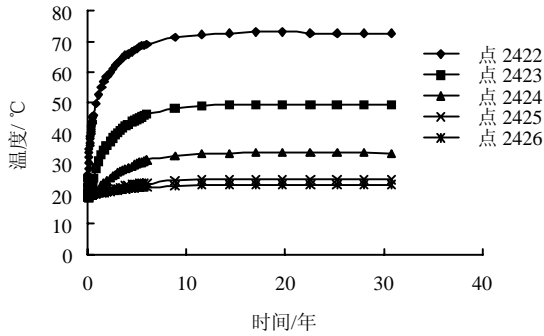


图3 温度-时间曲线
Fig.3 Temperature-time curves

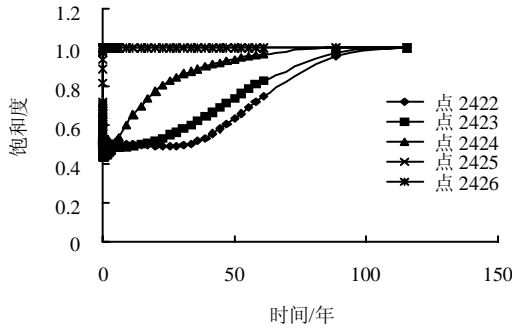


图4 饱和度-时间曲线
Fig.4 Saturation-time curves

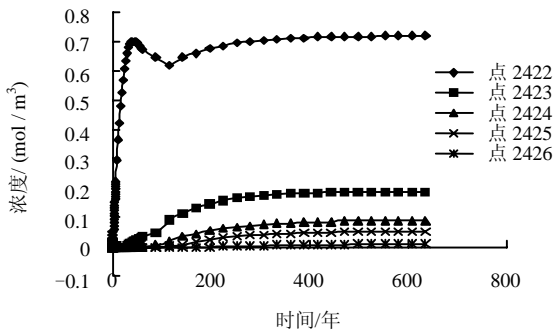


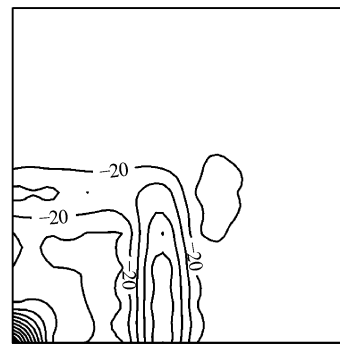
图5 浓度-时间曲线
Fig.5 Concentration-time curves

现考察一下计算终了(640年)时在图2高度1/2的水平剖面上的正应力、位移、流速、孔隙水压力、温度及的分布及变化情况。

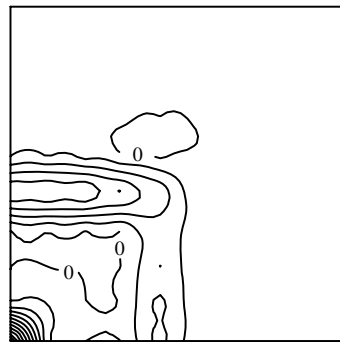
水平剖面上正应力 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 的等值线见图6。从图6可以看到，应力分布集中的区域位于缓冲层和处置孔壁交界两侧附近，该面上岩体最大的 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 值依次为 -51.5 、 -51.5 MPa 和 -54.1 MPa (均为压性)。在前表面上缓冲层和处置

孔壁交界处的水平正应力 σ_x 随时间的变化曲线见图7。从图中看出，开始时该处正应力为拉性，其值为 10.31 MPa ，但很快转变为压性，并随时间增大，在60年时其值上升到 -41.6 MPa 。

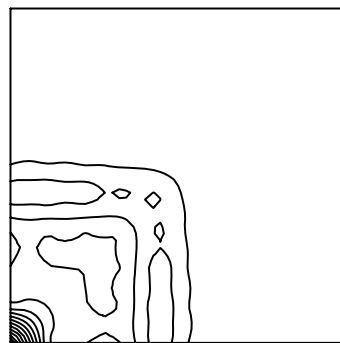
水平剖面上的位移矢量、流速矢量分别见图8和图9。由图可知，缓冲层中的位移较大，处置孔壁处的最大位移矢量的绝对值为 2.0 cm ，而岩体中因核废料的放热形成对流效应，水分从缓冲层上部的岩体中流入缓冲层内，又从缓冲层的中、下部流向岩体，该面上最大流速矢量的绝对值为 $2.38 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ，且位于缓冲层内。



(a) σ_x 等值线



(b) σ_y 等值线



(c) σ_z 等值线

图6 640年时水平剖面上正应力等值线
(单位: MPa)

Fig.6 Contours of normal stresses in horizontal cross section at 640 years (unit: MPa)

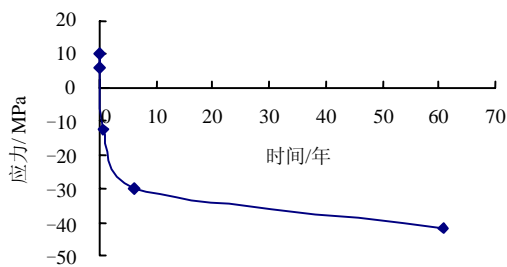


图 7 前表面上缓冲层和处置孔壁交界处的水平正应力 σ_x 随时间变化曲线

Fig.7 Curve of change of horizontal normal stress σ_x at boundary between buffer and disposal hole wall in front surface with time

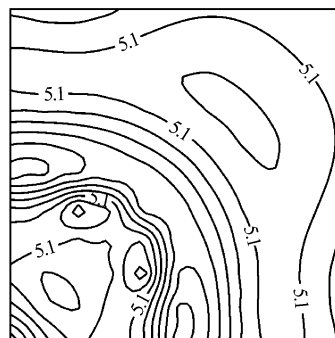


图 10 640 年时水平剖面上孔隙水压力等值线 (单位: MPa)

Fig.10 Pore pressure contours in horizontal cross-section at 640 years (unit: MPa)

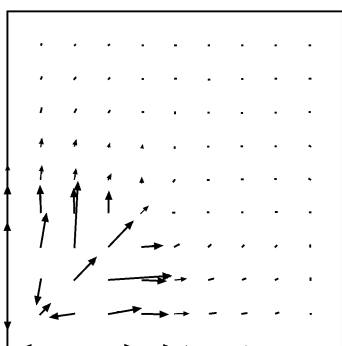


图 8 640 年时水平剖面上位移矢量

Fig.8 Displacement vectors in horizontal cross-section at 640 years

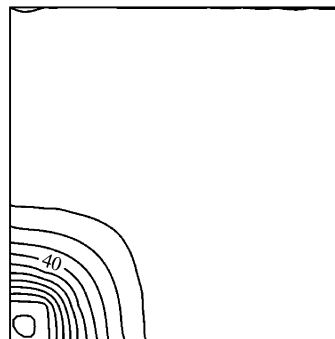


图 11 640 年时水平剖面上温度等值线 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.11 Temperature contours in horizontal cross-section at 640 years (unit: $^{\circ}\text{C}$)

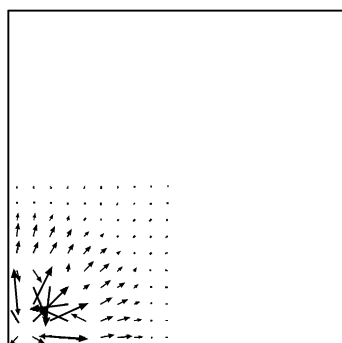


图 9 640 年时水平剖面上流速矢量

Fig.9 Flow velocity vectors in horizontal cross-section at 640 years



图 12 640 年时水平剖面上浓度等值线 (单位: mol/m^3)

Fig.12 Concentration contours in horizontal cross section at 640 years (unit: mol/m^3)

水平剖面上的孔隙水压力等值线、温度等值线和核素浓度等值线见图 10~12, 由图可知, 孔隙水压力和温度变化明显的区域主要是在缓冲层内, 此时岩体和缓冲层均为饱和状态, 孔隙水压力约为 5.1 MPa, 最大温度值为 73.0 $^{\circ}\text{C}$, 最大核素浓度为 3.83 mol/m^3 (贮存罐)。

5 结 论

通过上述分析, 可以得出以下结论:

(1) 地下水的对流、分子扩散和机械弥散会导致放射性核素在岩土介质中的迁移, 而吸附滞留和核素衰变将对核素迁移起阻碍作用, 对流、扩散和阻滞等作用与地下水的运动有密切的联系。在核废物地质处置的特殊条件下, 地下水运动又与岩土体

应力场和温度场相互影响、共同作用。为了精确地模拟放射性核素迁移就必须将温度场、渗流场、应力场和核素浓度场耦合分析。

(2) 核废物的释放热量使得处置模型近场的温度不断升高,但在时间上呈现前快后慢的趋势,约 20 年后,时缓冲层中的温度基本不再增加。在热-水-应力耦合的作用下,缓冲层中的孔隙水压力由负值转为正值,对应的饱和度也逐渐变大,到约 110 年时缓冲层中各点的饱和度均已达到了 1.0。近场的变形及应力状态也随时间发生变化,特别是若干年后,在处置孔壁附近产生了较高的压应力。

(3) 开始阶段,泄漏的核素主要集聚在贮存罐周边,形成较高的浓度,随着缓冲层饱和度的增加,水分流动加快,因而核素从贮存罐周边向缓冲层及围岩中的迁移变得相对容易。在本文特定的条件下,缓冲层内各点的核素浓度达到相对稳定的时间,要比温度和饱和度达到相对稳定的时间长得多。

(4) 在耦合的热-水-应力-迁移过程中,岩土介质的干密度、分配系数、横向和纵向的弥散度、分子扩散系数、处置孔隙曲折率、核素衰减常数等以及处置库的建造、运行过程都会对核素迁移产生影响,需要在后续的研究中深入分析。

参 考 文 献

- [1] SONNENTHAL E, ITO A, SPYCHER N, et al. Approaches to modeling coupled thermal, hydrological, and chemical processes in the drift scale heater test at yucca mountain[J]. *Int J. Rock Mech Min. Sci.*, 2005, 42(5-6): 698-719
- [2] 梁冰, 刘磊, 薛强, 等. 核素渗漏对地下水污染的数值仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(2): 261-263.
LIANG Bing, LIU Lei, XUE Qiang, et al. Study on numerical simulation of nuclides leakage for groundwater pollution[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(2): 261-263.
- [3] 刘德军, 范显华, 章英杰, 等. ^{99}Tc 在模拟地质条件下的迁移行为研究概况[J]. *核科学与工程*, 2004, 24(1): 6-11.
LIU De-jun, FAN Xian-hua, ZHANG Ying-jie, et al. Survey of ^{99}Tc migrating action in simulated geological conditions[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2004, 24(1):6-11
- [4] 姚军, 苏锡光, 龙会遵, 等. ^{237}Np 在膨润土中表观扩散系数的测定[J]. *核化学与放射化学*, 2003, 25(4): 190-203.
- YAO Jun, SU Xi-guang, LONG Hui-zun, et al. Determination of diffusion coefficients of ^{237}Np in bentonite[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2003, 25(4): 190-203.
- [5] 任立宏, 苏锡光, 龙会遵. 钚在膨润土中的吸附与扩散的研究[C]//王驹, 范显华, 徐国庆, 等: 中国高放废物地质处置十年进展. 北京: 原子能出版社, 2004: 173-179.
- [6] 张玉军. 核废料地质处置近场热-水-应力-迁移耦合二维有限元分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(10): 313-318.
ZHANG Yu-jun. 2D FEM analysis for coupled thermo-hydro-mechanical-migratory process in near field of geological disposal of nuclear waste[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(10): 313-318.
- [7] 张玉军. 考虑溶质浓度影响的热-水-应力-迁移耦合模型及数值模拟[J]. *岩土力学*, 2008, 29(1): 212-224.
ZHANG Yu-jun. Model and numerical simulation for coupled thermo-hydro-mechanical-migratory processes considering influence of solute concentration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 212-224.
- [8] 张玉军. 热-水-应力耦合条件下三项因素对核素迁移影响的有限元分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(10): 2599-2605.
ZHANG Yu-jun. Finite element analysis of effects of three factors on nuclide migration under condition of coupling thermo-hydro-mechanical[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10): 2599-2605.
- [9] LEIWS R W, SCHREFLER B A. The finite element method in the deformation and consolidation of porous media[M]. New York: John Wiley, 1987.
- [10] NISHIGAKI Makoto. Density dependent transport analysis: saturated-unsaturated porous media——3 dimensional Eulerian-Lagrangian method[R]. Japan: Okayama University, 2001.
- [11] OHNISHI Y, KOBAYASHI A, KURIKAMI H. User's Guide of THAMES[R]. Japan: Faculty of Engineering, Kyoto University, 2003.
- [12] CHIJIMATSU M, FUJITA T, KURIKAMI H, et al. Subtask BMT1-B: Implication of THM coupling on the near-field of a nuclear waste repository in a homogeneous rock mass[R]. DECOVALES III-Task3-Bench Mark Test 1(BMT1) Japan: Hazama Corporation, 2002: 1-43.
- [13] 操上广志, 地盘における热水应力连成现象のモデル化に関する研究[博士学位论文 D]. 日本: 京都大学, 2003.