

高放废物处置中的 THM 耦合理论及分析

卢应发^{1,2}, 吴延春², 罗先启¹, 崔玉军³

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点试验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074;
3. *Laboratory of Soil and Rock Mechanics, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Blaise Pascal 77455 Marne La Vallée Cedex 2, France*)

摘要: 高放废物处置研究是非常重要和必要的, 其处置形式的选择是处置安全的重要因素之一, 相应处置结构的物理力学特性研究是决定高放废物处置形式的重要依据。在介绍高放废物处置形式的基础上, 提出高放废物处置的相关研究课题, 紧接着阐述高放废物处置中 THM 耦合理论, 膨润土的土水特征曲线不仅相关于外部施加应力、蒸汽压力、水压力, 而且也相关于温度; 在考虑气体在压力作用下的传播、气体在水中的溶解和气体的凝固等影响下, 建立气体和液体中的水量守恒方程; 在考虑敏感热流和潜热流影响下, 建立能量守恒方程; 将所有的方程写成有限元和有限差分计算格式; 最后编制一维计算程序。计算结果对在花岗岩体中决定高放废物储存洞室之间间距具有借鉴作用。

关键词: 高放废物处置; 处置形式; 物理力学特性; THM 耦合理论; 有限元计算; 洞室间距

中图分类号: X 771

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增2 - 3939 - 07

THM COUPLING THEORY AND ANALYSES OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

LU Yingfa^{1,2}, WU Yanchun², LUO Xianqi¹, CUI Yujun³

(1. *Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China*; 2. *School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*; 3. *Laboratory of Soil and Rock Mechanics, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Blaise Pascal 77455 Marne La Vallée Cedex 2, France*)

Abstract: The research of high-level radioactive waste disposal is very necessary and important; and the determination of high-level radioactive waste disposal scheme is of importance for high-level radioactive waste repository safety. The high-level radioactive waste disposal structure is based on the physico-mechanical properties of rock mass and expansive soil. Based on the high-level radioactive waste disposal types, the relative research projects are proposed; and the THM coupling theories are introduced. The soil-water characteristics curve of bentonite depends on not only external loaded force, vapor pressure and hydraulic pressure, but also on the temperature in the high-level radioactive waste disposal. The conservation equation of water quantity in the gas and liquid states is established by considering the propagation of gas under pressure gradient, the solution of gas in the water, the condensation of gas in the water, etc.. The energy conservation equation is obtained by considering the influences of sensitive thermal flow and potential thermal flow. The schemes of finite element and finite difference are deduced. Finally, the one-dimensional code and calculation are performed. The numerical result is

收稿日期: 2007 - 03 - 07; **修回日期:** 2007 - 06 - 01

基金项目: 国防科工委“膨润土化学 - 渗流 - 力学耦合特性及应用研究”项目(科工计[2007]838号); 国家自然科学基金资助项目(50779030)

作者简介: 卢应发(1964 -), 男, 博士, 1986年毕业于西安交通大学工程力学系应用力学专业, 现任教授、博士生导师、楚天学者, 主要从事岩土力学及路基工程方面的教学与研究工作。E-mail: Lu64@mail.hust.edu.cn

valuable for the determination of chamber distance of high-level radioactive waste disposal shaft.

Key words: high-level radioactive waste disposal; disposal type; physico-mechanical properties; THM coupling theories; finite element calculation; chamber distance

1 引言

随着经济的高速发展,能源需求越来越大,水电、火电、风能、太阳能等应用得到了长足的发展。在我国,随着经济的快速发展,核电将得到较大的发展,从而会产生更多的高放废物。高放废物一般深埋于地表以下 500~800 m 区域,位于岩体(泥岩、花岗岩或盐岩)之中,且在高放废物金属罐与岩体之间设置特殊的膨润土体。

开展岩土力学、水力学和化学与高放废物处置物之间的研究是处置技术基础理论研究的需要。岩土介质具有多相介质(固、液、气等)的结构特性和明显的非均质性、非连续性、各向异性、流变及非饱和渗流等特性。这些物理力学特性本身就具有复杂多样性,它们在不同的工程条件(如高应力、高温、水的物理化学作用、腐蚀等)下又会发生显著的变化,并反过来对环境产生影响,目前,人们在此方面的研究尚未取得明显的进展。另外,在高放废物处置技术中,岩石、土、水、气、离子、化学物和处置物之间是相互作用的,处置物对周围生物圈和地下环境会产生影响;特别是在高放废物处置中,高温、高压、水、气和离子浓度等还会影响岩体长期稳定性;为此,从推动岩土力学学科发展的需要,必须加深对复杂岩土体、液体和离子浓度及温度等对岩土体影响的研究,并在此基础上发展相适应的分析理论和数值方法。

高放废物处置是我国能源开发、垃圾处理等可持续发展的需要。高放废物处置中存在岩土力学、水力学、饱和及非饱和渗流、化学、膨润土力学和气体特征等研究方向。随着研究的深入、能源开发和工程建设的发展,人们愈来愈认识到许多工程活动、工程环境的变化、污染物对岩土介质侵蚀、岩土工程技术的实施等将引起岩土力学性质的改变。高放废物处置中岩土体、水、气等相互作用的机制,目前还不清楚,亟需进一步研究,其研究成果对于国家的大型能源及环境项目建设和可持续发展具有很高的理论价值和指导意义。

2 高放废物处置形式及相关科学研究课题

自 20 世纪 70 年代以来,法国、西班牙、比利时、瑞士、美国、瑞典、日本、德国、加拿大、中国等科研工作者^[1~19]一直研究高放废物处置中的相关问题。高放废物处置课题与核物理、金属学、岩土力学、水力学、化学、植物学等相关。欧洲通过 30 多年的现场和室内研究,取得了一些研究成果,也建立了 10 多个现场大型实验室,其中具有代表性的 5 个地下实验室为: Tournemire(法国)、Mol(比利时)、Bure(法国)、Mont-Terri(瑞士)、Stripa(瑞典)。这些实验室主要进行现场岩体、膨润土、温度、力学、流变和渗透等试验,当然也进行其他一些地下试验(如地下贮存气等)。

现有高放废物处置方案主要有:金属容器-膨润土-岩体系统、金属容器-混凝土-不锈钢-岩体系统、美国尤卡山形式的处置方式。多数学者认为第一种方案较安全,其高放废物处置库实施方案是首先开挖竖井式至 500 或 800 m 深的岩体中,在竖井中开挖水平平洞,将高放废物金属罐放置于 500~800 m 的水平平洞中,或 500~800 m 的竖井之中。法国拟在 BURE 进行大型现场试验。高放废物处置竖井或水平平洞由盛装高放废物的金属容器、防护高放废物外渗的隔离层(膨润土)和岩体所组成,其金属容器(C)、膨润土块(BB)和现场岩体(RM)组成如图 1 所示。

针对如上的高放废物处置结构,整个高放废物处置科研课题可划分成如下几个方面:

- (1) 针对高放废物的基本特征(温度特征、放射性特征等)的研究;
- (2) 针对金属容器的力学、温度特性、腐蚀特征、化学特征以及与膨润土块相互作用的力学和渗流特性的研究;
- (3) 针对膨润土块以及膨润土块之间的物理、化学、温度和力学特性、渗流特征和流变特性的研究;

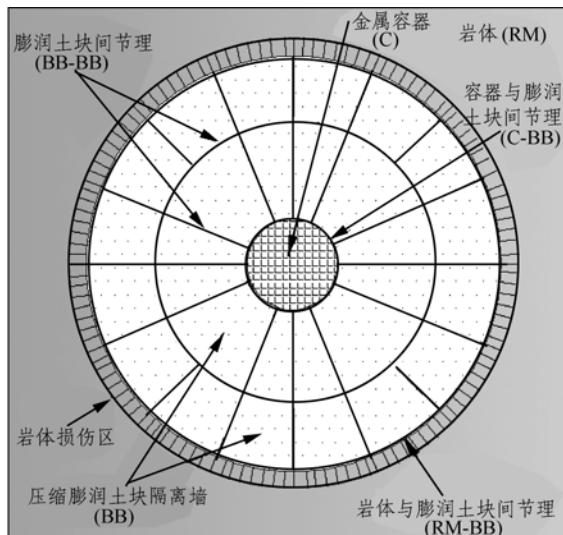


图 1 一种典型的高放废物处置布置图

Fig.1 A typical scheme of high-level radioactive waste disposal

(4) 针对膨润土块和岩体之间的节理特性, 它包括能量传递、质量传递、力和位移传递、以及离子浓度传递等的研究;

(5) 针对岩体损伤区的物理、力学、化学、流变、渗流和温度等特征的研究;

(6) 针对洞室周围岩体的物理、力学、化学、流变、渗流和温度等特征的研究;

(7) 针对整个工作区域和处置区域环境条件的研究。

高放废物和金属容器的基本特征主要与核物理和金属物理力学等特征有关, 这里不加以介绍。以下主要介绍膨润土、岩体和工作区域环境的近期研究成果。

对于膨润土的研究, 主要集中于几种膨润土(英国的 Bentonite MX80、法国的 FoCa7、日本的 Kunigel VI、中国的高庙子膨润土)的研究。Bentonite MX80 含有钠和钙离子, FoCa7 主要富含钙离子, Kunigel VI 主要富含钠离子。目前对这几种土的主要物理、化学、离子浓度、密度特征与力学特性以及渗流特征已有较清楚的认识, 但是对于其温度特征、流变特征、膨润土块之间的特性和对核素吸附作用等还有待进一步研究。

对于岩体的选择, 目前主要集中对 3 种岩体介质进行研究: 黏土岩、盐岩和坚硬的花岗岩。许多学者对其性质进行了研究, 建立了各种模型, 如:

(1) 考虑水力影响的弹塑性模型。(2) 考虑水力和裂

纹张开影响的弹塑性损伤模型。(3) 各向异性损伤模型, 并考虑在张应力作用下, 岩体产生的不可逆变形的影响。(4) 考虑裂纹张开度与渗流之间的关系和物理、化学影响的弹塑性损伤模型。(5) 流变、弹塑性损伤模型等。但在高温、高压、不同离子浓度和气压下, 考虑流变影响的弹塑性损伤模型等相关领域的研究还不足。

对于膨润土和岩体之间的相互作用, 也相应地建立了一些模型, 但对于考虑不同离子浓度、高温、高压和流变等影响下的相应理论, 还有待进一步深入研究。对于工作区域和高放废物处置区域环境条件的研究, 基本结论是注入气体压力尽量等于大气压。

3 高放废物处置中的 THM 理论

建立高放废物储存中的基本理论, 首先必须考虑平衡方程。在考虑体积力和液体压力情况下, 其平衡方程为

$$(\sigma_{ij} - \delta_{ij}P_j) + P_i + b_i = 0 \quad (1)$$

在小变形情况下, 相应的增量本构方程为

$$d(\sigma_{ij} - \delta_{ij}P_j) = Dd\varepsilon - Fd(P_g - P_w) - CdT \quad (2)$$

与温度相关的饱和度状态方程为

$$S_r = 1 - [a_s + b_s(\sigma - P_g)] \{1 - \exp[c_s(P_g - P_w)]\} \cdot \exp[d_s(T - T_0)] \quad (3)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量; P_g 为气压力; P_w 为水压力; D 为刚度矩阵; T 为温度; F 为与刚度及饱和度等相关的系数; C 为热传导系数, 与饱和度等有关; S_r 为饱和度; a_s, b_s, c_s, d_s 均为常数。

另外必须建立湿度移动方程, 建立湿度移动方程主要以水的质量守恒和能量守恒为依据, 也即是水-气交换过程中的水量守恒方程, 气体中的水量守恒方程, 以及能量守恒方程。在建立方程过程中, 必须考虑蒸汽耗散、溶解等过程。

液体和气体中湿度移动的水量守恒方程

$$\begin{aligned} nS_r\beta_r \frac{\partial T}{\partial t} + nS_r\beta_p \frac{\partial P_w}{\partial t} + (P_w - P_v)n \frac{\partial S_r}{\partial t} + [S_rP_w + P_v(1 - S_r)] \frac{\partial n}{\partial t} + n(1 - S_r) \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \\ \text{div}(\rho_w D_w \nabla Z) + \text{div}(\rho_w D_r \nabla T) + \\ \text{div}[\rho_w D_p \nabla (P_w - P_g)] + Q_w \end{aligned} \quad (4)$$

气体中的水量守恒方程为

$$\begin{aligned} & \rho_g [1 - S_r (1 - H)] \frac{\partial n}{\partial t} + n [1 - S_r (1 - H)] \frac{\partial \rho_g}{\partial t} - \\ & (1 - H) n \rho_g \frac{\partial S_r}{\partial t} = \text{div}[(K_g \rho_g \beta_{pg} + H \rho_g D_{wg} - \rho_w D_{Tv}) \nabla T + \\ & \text{div}[(K_g \rho_g / \gamma_g - H \rho_g D_{pw} + \rho_w D_{pv}) \nabla P_g] + \\ & \text{div}[(H \rho_g D_{pw} - \rho_w D_{pv}) \nabla P_g] + \text{div}[(K_g \rho_g + H \rho_g D_w \nabla Z] \end{aligned} \quad (5)$$

能量守恒方程为

$$\begin{aligned} & C_T \frac{\partial T}{\partial t} + (T - T_0) \frac{\partial C_T}{\partial t} + (1 - S_r) \rho_v h_{fg} \frac{\partial n}{\partial t} - \\ & n \rho_v h_{fg} \frac{\partial S_r}{\partial t} + n (1 - S_r) h_{fg} \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \text{div}[\lambda(\theta) \nabla T] - \\ & C_{pw} \rho_w \text{div}\{-D_{Tv} \nabla T - D_{pv} \nabla (P_w - P_g)\} (T - T_0) - \\ & C_{pv} \rho_w \text{div}\{-D_{Tv} \nabla T - D_{pv} \nabla (P_w - P_g)\} (T - T_0) - \\ & C_{pg} \text{div}\{-\rho_g K_g \beta_{pg} \nabla T - \rho_g K_g (\nabla \rho_g / \gamma_g + \nabla Z)\} (T - T_0) - \\ & \rho_w h_{fg} \text{div}\{-D_{Tv} \nabla T - D_{pv} \nabla (P_w - P_g)\} - \\ & h_{fg} \text{div}\{-\rho_v K_g \beta_{pg} \nabla T - \rho_v K_g (\nabla P_g / \gamma_g + \nabla Z)\} \end{aligned} \quad (6)$$

式(4)~(6)中: n 为孔隙率, D_{Tv} 为温度蒸汽耗散系数, D_{0v} 为等温蒸汽耗散系数, D_{tw} 为温度液体耗散系数, D_{0w} 为等温液体耗散系数, D_w 为重力耗散, D_T 为热湿耗散, D_0 为等温湿度耗散, D_p 为等压湿度耗散, Q_w 为在液体和气体之间湿度传递蒸发率, $\beta_p = \partial \rho_w / \partial P_w$, $\beta_T = \partial \rho_w / \partial T$, ρ_s 为固体密度, ρ_w 为水的密度, ρ_v 为蒸汽密度, ρ_g 为气体密度, Z 为相对水头高程, V_g 为气体速度, Q_g 为气体流量, K_g 为气体渗流系数, γ_g 为气体比重, λ_v 为蒸汽热传导系数, λ_a 为空气热传导系数, λ_w 为水热传导系数, h_{fg} 为土中水蒸发潜热系数, C_{ps} 为固体比热, C_{pw} 为液体比热, C_{pv} 为蒸汽比热, C_{pg} 为气体比热, T_0 为参考初始温度。

上述方程考虑了高放废物处置中, 气体、液体、等温、等压、重力、热湿等耗散过程均被加以考虑。对于气体和液体中的湿度和水量守恒方程, 考虑了气体在压力作用下的传播, 气体在水中的溶解和气体的凝固等影响。对于能量守恒方程, 对敏感热流和潜热流也进行了分析和研究。

将上述方程写成有限元形式, 并在时间域加以离散, 用以计算高放废物处置中, 洞室周边位移随时间变化的特征。其有限元基本形式如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{C}_T & \mathbf{C}_w & \mathbf{C}_g \\ \mathbf{C}_{Tu} & \mathbf{C}_{TT} + \beta \Delta t \mathbf{K}_{TT} & \mathbf{C}_{Tw} + \beta \Delta t \mathbf{K}_{Tw} & \mathbf{C}_{Tg} + \beta \Delta t \mathbf{K}_{Tg} \\ \mathbf{C}_{wu} & -\mathbf{C}_{wT} + \beta \Delta t \mathbf{K}_{wT} & -\mathbf{C}_{ww} + \beta \Delta t \mathbf{K}_{ww} & -\mathbf{C}_{wg} \\ \mathbf{C}_{gu} & \mathbf{C}_{gT} + \beta \Delta t \mathbf{K}_{gT} & \mathbf{C}_{gw} + \beta \Delta t \mathbf{K}_{gw} & \mathbf{C}_{gg} + \beta \Delta t \mathbf{K}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta T \\ \Delta P_w \\ \Delta P_g \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \Delta F_\sigma \\ \beta \Delta t \Delta F_T \\ \beta \Delta t \Delta F_w \\ -\beta \Delta t \Delta F_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_{T0} - \mathbf{K}_{TT} T_0 - \mathbf{K}_{Tw} P_{w0} - \mathbf{K}_{Tg} P_{g0} \\ F_{w0} - \mathbf{K}_{wT} T_0 - \mathbf{K}_{ww} P_{w0} \\ F_{g0} - \mathbf{K}_{gT} T_0 - \mathbf{K}_{gw} P_{w0} - \mathbf{K}_{gg} P_{g0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega$$

$$\mathbf{C}_T = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{C}_w = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{F} \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{F}_\sigma = \int_{\Gamma} \mathbf{N}^T \boldsymbol{\sigma} \mathbf{B} d\Gamma$$

$$\mathbf{D}_{3u} = \mathbf{m}^T \mathbf{I} \mathbf{V} + \mathbf{g}_1 \mathbf{V} \mathbf{D}$$

$$\mathbf{C}_{TT} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{D}_{3T} \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{D}_{3T} = (\mathbf{g}_3 - \mathbf{C} \mathbf{g}_1) \mathbf{V} + \mathbf{V} \mathbf{I}$$

$$\mathbf{C}_{Tw} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{D}_{3w} \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{D}_{3w} = (\mathbf{g}_1 \mathbf{F} - \mathbf{g}_2) \mathbf{V}$$

$$\mathbf{C}_{Tg} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{D}_{3pg} \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{D}_{3pg} = (\mathbf{g}_2 - \mathbf{F} \mathbf{g}_1) \mathbf{V}$$

$$\mathbf{K}_{TT} = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N})^T [\lambda + \mathbf{f}_{xl} (T - T_0) + \rho_w D_{Tv} h_{fg} +$$

$$\rho_v K_g \beta_{pg} h_{fg}] \nabla \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{f}_{xl} = \rho_w \mathbf{C}_w D_{Tw} + \rho_v \mathbf{C}_v D_{Tv} + \rho_g K_g \beta_{pg} C_{pg}$$

$$\mathbf{K}_{Tw} = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N})^T [(\rho_w \mathbf{C}_w D_{pw} + \rho_v \mathbf{C}_v D_{pv}) (T - T_0) +$$

$$\rho_w D_{pv} h_{fg}] \nabla \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{K}_{Tg} = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N})^T [\rho_g \mathbf{C}_g K_g (T - T_0) + \rho_v K_g h_{fg}] \nabla \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{F}_T = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N})^T [\rho_w \mathbf{C}_w (T - T_0) K_0] \nabla Z d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}^T q_h d\Gamma$$

$$\mathbf{C}_{wu} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T (\mathbf{A} \mathbf{m}^T + \mathbf{B}' \mathbf{g}_1 \mathbf{D}) \mathbf{B} d\Omega$$

$$\mathbf{C}_{wT} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T [\mathbf{E} + \mathbf{B}' (\mathbf{g}_3 - \mathbf{g}_1 \mathbf{C}) + n S_r \beta_T] \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{C}_{ww} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T [\mathbf{B}' (\mathbf{g}_1 \mathbf{F} - \mathbf{g}_2) + n S_r \beta_p] \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{C}_{wg} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T [\mathbf{B}' (\mathbf{g}_2 - \mathbf{g}_1 \mathbf{F})] \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{K}_{wT} = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N})^T \mathbf{D}_{TT} \nabla \mathbf{N} d\Omega$$

$$\mathbf{D}_{TT} = \rho_w (D_{Tv} + D_{Tw})$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_{ww} &= \int_{\Omega} (\nabla N)^T D_p \nabla N d\Omega \\
 D_p &= \rho_w (D_{pv} + D_{pw}) \\
 \mathbf{F}_w &= - \int_{\Omega} (\nabla N)^T K_{\theta} \nabla N d\Omega - \int_{\Gamma} N^T q_w d\Gamma - \int_{\Gamma} N^T q_v d\Gamma \\
 K_{\theta} &= \rho_w D_w \\
 \mathbf{C}_{gu} &= \int_{\Omega} N^T \mathbf{D}_{2u} \mathbf{B} d\Omega \\
 \mathbf{D}_{2u} &= \mathbf{m}^T \rho_g [1 - S_r (1 - H)] + [\alpha_{S_r} + (1 - H) n \rho_g] \mathbf{g}_1 \mathbf{D} \\
 \mathbf{C}_{gT} &= \int_{\Omega} N^T \{ n [1 - S_r (1 - H)] \alpha_T + (g_3 - g_1 \mathbf{C}) \cdot \\
 &\quad [\alpha_{S_r} - (1 - H) n \rho_g] \} N d\Omega \\
 \mathbf{C}_{gw} &= \int_{\Omega} N^T \{ (g_1 \mathbf{F} - g_2) [\alpha_{S_r} - (1 - H) n \rho_g] \} N d\Omega \\
 \mathbf{C}_{gg} &= \int_{\Omega} N^T \{ n [1 - S_r (1 - H)] \alpha_p + (g_2 - g_1 \mathbf{F}) \cdot \\
 &\quad [\alpha_{S_r} - (1 - H) n \rho_g] \} N d\Omega \\
 \mathbf{K}_{gg} &= \int_{\Omega} (\nabla N)^T \left(- \frac{K_g \rho_g}{\gamma_g} \beta_{pg} - H \rho_a D_{Tw} + \rho_w D_{Tv} \right) \nabla N d\Omega \\
 \mathbf{K}_{gw} &= - \int_{\Omega} (\nabla N)^T (\rho_w D_{pv} - H \rho_g D_{pw}) \nabla N d\Omega \\
 \mathbf{K}_{gg} &= \int_{\Omega} (\nabla N)^T \left(- \frac{K_g}{\gamma_g} \rho_g \right) \nabla N d\Omega \\
 \mathbf{F}_g &= - \int_{\Omega} (\nabla N)^T (H \rho_a K_{\theta} + \rho_g K_g) \nabla Z d\Omega + \\
 &\quad \int_{\Gamma} N^T q_v d\Gamma - \int_{\Gamma} N^T q_g d\Gamma \\
 \mathbf{F} &= \mathbf{D} \mathbf{D}_s^{-1}, \quad \mathbf{D}_s^{-1} = \beta_s \mathbf{m}, \quad \beta_s = \frac{1}{1 + e} \frac{\partial e}{\partial (P_g - P_w)} \\
 \mathbf{C} &= \mathbf{D} \mathbf{D}_t^{-1}, \quad \mathbf{D}_t^{-1} = \beta_t \mathbf{m}, \quad \beta_t = \frac{1}{1 + e} \frac{\partial e}{\partial T} \\
 g_1 &= \frac{\partial S_r}{\partial (\sigma - P_g)}, \quad g_2 = \frac{\partial S_r}{\partial (P_g - P_w)}, \quad g_3 = \frac{\partial S_r}{\partial T} \\
 \alpha_t &= \frac{\rho_g}{T + 273}, \quad \alpha_p = \frac{1 - HS_r / (1 - S_r)}{R_g (T + 273)} \\
 \alpha_{S_r} &= \frac{P_g + P_{atm}}{R_g (T + 273)} \frac{H}{(1 - S_r)^2} \\
 A &= \rho_w S_r + \rho_v (1 - S_r) + n S_r (1 - S_r) A_n \\
 B' &= n (\rho_w - \rho_v) + n^2 (1 - S_r) A_n \\
 E &= n (1 - S_r) (\rho_v - A_{\rho 0} - 4 \cdot 975.9 n S_r A_n)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \beta_T &= \left. \frac{\partial \rho_w}{\partial T} \right|_{P_w = \text{const}}, \quad \beta_P = \left. \frac{\partial \rho_w}{\partial P_w} \right|_{T = \text{const}} \\
 \rho_w &= \rho_{w0} (1 + \beta_P P_w + \beta_T T) \\
 I &= S_r \rho_w C_{pw} - \rho_s C_{ps} + (1 - S_r) (\rho_v C_{pv} + \\
 &\quad \rho_g C_{pg}) + A_n S_r n (1 - S_r) C_{pv} \\
 II &= n \rho_w C_{pw} - n (\rho_v C_{pv} + \rho_g C_{pg}) + A_n n^2 (1 - S_r) C_{pv} \\
 III &= (A_0 \rho_v - 4 \cdot 975.9 n S_r A_n) n (1 - S_r) C_{pv} \\
 IV &= I (T - T_0) + (1 - S_r) \rho_v h_{fg} + n (1 - S_r) h_{fg} A_n S_r \\
 V &= II (T - T_0) + n \rho_v h_{fg} + n^2 (1 - S_r) h_{fg} A_n \\
 VI &= C_T + III (T - T_0) + (A_0 \rho_v - \\
 &\quad 4 \cdot 975.9 n S_r A_n) n (1 - S_r) h_{fg} \\
 A_{\rho 0} &= \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dT}, \quad A_n = \frac{1}{n} \frac{d\rho_v}{dS_r}
 \end{aligned}$$

对于高放废物处置, 利用其特征, 可以简化为一维模型加以计算, 如取高放废物储存罐半径为 0.41 m, 储存洞室半径为 0.71 m, 则膨润土储存厚度为 0.3 m, 弹性模量为 27.8 MPa, 泊松比为 0.32。取 200 m 研究范围, 其中, 花岗岩研究范围为 199.29 m, 弹性模量 31 GPa, 泊松比为 0.235。计算简图见图 2。初始边界条件: 初始时刻, $t = 0$, 在 0.00~0.41 m 范围内, $P_w = 0$, $P_g = 0$, $T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$; 在 200 m 处, $P_w = -5 \text{ MPa}$, $P_g = 0.1 \text{ MPa}$, $T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。高放废物储存库在 0.00~0.41 m 范围内温度演化规律^[5]见图 3。

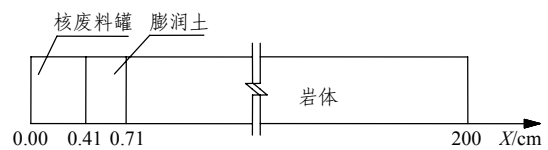


图 2 高放高放废物处置一维计算模型
Fig.2 One-dimensional calculation model of high-level radioactive waste disposal

利用上述初始条件和储存罐温度变化条件, 对高放废物在 0~500 a 变化过程中的位移演化特征进行计算分析, 其整个位移演化规律如图 4 所示。从计算结果可以看出, 随着温度的逐渐升高, 最大位移也随时间变化而发生变化, 最大位移初始发生在膨润土之中, 随着时间的推移, 最大位移向周围岩中发展; 随着温度下降, 整体位移减小, 但在洞室周边近 40 m 范围内, 岩体位移随高放废物的变化

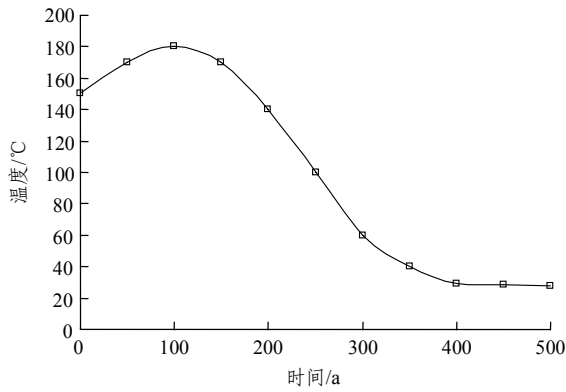
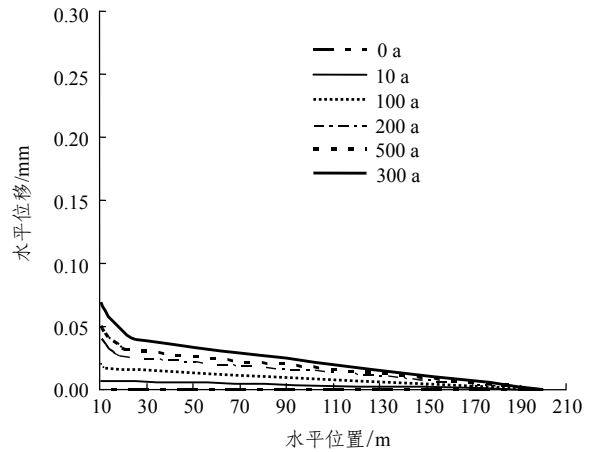


图3 高放废物处置罐温度随时间的演化规律

Fig.3 Evolution rule of temperature of high-level radioactive waste disposal canister vs. time

表现出非线性变形特征，在 40 m 范围之外，其变形表现出线性特征，这是否为洞室间距确定提供了借鉴意义。本计算结果是在温度呈图 3 变化规律的前提下而获得的，其温度变化特征为：1~100 a 温度增加，100~400 a，温度下降较快，之后温度呈稳定趋势。



(c) 10.00~200.00 m

图4 高放废物处置过程中位移的演化规律

Fig.4 Evolution rules of displacement of underground chamber of high-level radioactive waste disposal

4 结 论

本文首先分析了高放废物储存研究的重要意义，紧接着介绍了高放废物储存的基本形式，以及与此形式相关的研究课题。在此基础上，对高放废物处置的 THM 基本特征进行了理论分析和数值模拟研究，其基本结论如下：

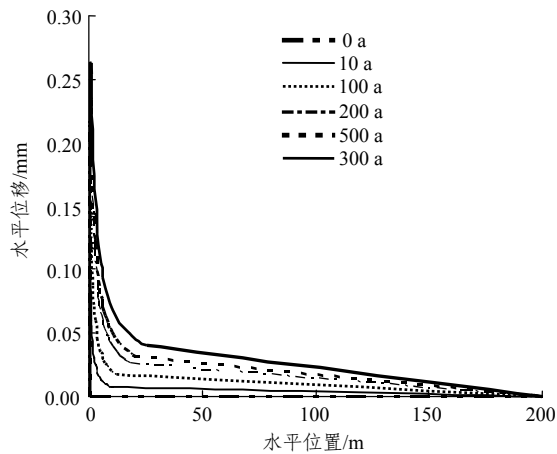
(1) 膨润土的土水特征曲线关于外部施加应力、蒸汽压力、水压力 and 温度，这种相互关系充分表明了膨润土持水特性的特殊性。

(2) 在高放废物处置库中，气体、液体、等温、等压、重力、热湿等耗散过程均被加以考虑。对于气体和液体中的水量守恒方程，考虑了气体在压力作用下的传播，气体在水中的溶解和气体的凝固等影响。对于能量守恒方程，对敏感热流和潜热流也进行了分析和研究，并考虑了它们的影响。

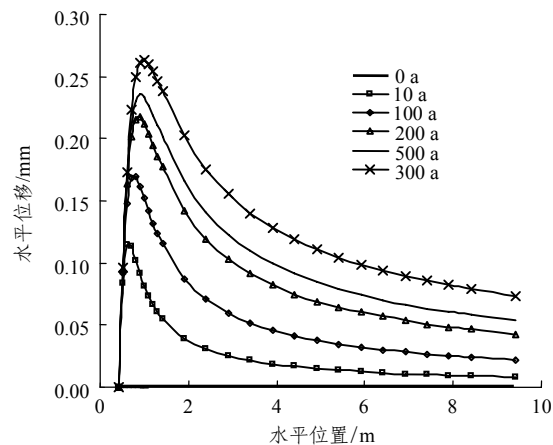
(3) 将水量守恒方程、能量守恒方程等写成了有限元形式，并在时间域内加以离散，编制了有限元和有限差分法混合程序。

(4) 结合现行研究的结果，对给定边界条件下的高放废物处置场进行了模拟，数值分析表明：高放废物储存结构的最大位移随时间的变化而变化，初始发生在膨润土之中，随着时间的推移，最大位移向周围岩体发展；在洞室周边 40 m 范围内，其变形表现出非线性变化特征，在 40 m 范围之外，其变形表现出线性特征，这为洞室间距确定提供了借鉴意义。

致谢 本项研究得到了国防科工委以及王 驹、刘



(a) 0.41~200.00 m



(b) 0.41~10.00 m

月妙等同志的大力支持和帮助, 在此深表感谢!

参考文献(References):

- [1] ABDULLAH W S, AL-ZOU'BI M S, ALSHIBLI K A. On the physicochemical aspects of compacted clay compressibility[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(4): 551 - 559.
- [2] ALONSO E E, ALCOVERRO J. Calculation and testing of the behaviour of unsaturated clays as a barrier in radioactive waste repository(“Catsius clay” project)[R]. Brussels, Belgium: European Commission, European Atomic Energy Commission, 1961.
- [3] AMEMIYA K, CHIJIMATSU M. Study on in-situ compaction method of buffer for high-level radioactive waste disposal[C]// Proceedings of the 6th International Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research. Paris, France: [s.n.], 2001: 71 - 82.
- [4] ANDRA. Synthèse des options initiales de conception d'un stockage de déchets de haute activité de à vie longue[R]. Paris, France: Atomic Energy Centre of Associated Research, 1998.
- [5] ANDRA. Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue[R]. Paris, France: Atomic Energy Centre of Associated Research, 2002.
- [6] CUI Y J, LOISEAU C, DELAGE P. Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils. Recife, Brazil: A. A. Balkema, 2002: 593 - 598.
- [7] DELAGE P, HOWAT M D, CUI Y J. Relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay[J]. Engineering Geology, 1998, 50(1/2): 31 - 48.
- [8] DI MAIO C. Exposure of bentonite to salt solutions: osmotic and mechanical effects[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 695 - 707.
- [9] DIXON D A, GRAY M N, Graham J. Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and USA[C]// Proceedings of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics. Osaka, Japan: [s. n.], 1996: 43 - 48.
- [10] GALLÉ C. Gas breakthrough pressure in compacted Fo-Ca clay and interfacial gas overpressure in waste disposal context[J]. Applied Clay Science, 2000, 17(1): 85 - 97.
- [11] KENNEY T C, VAN VEEN W A, SWALLOW M A, et al. Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(4): 364 - 374.
- [12] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 478 - 490.
- [13] LU Y F, SHAO J F. Modeling of anisotropic damage in brittle rocks under compression dominated stresses[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(10): 945 - 961.
- [14] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1/2): 117 - 127.
- [15] WINTERKORN H F. Studies on the surface behaviour of bentonite and clays. Soil Science, 1936, 41: 25 - 32.
- [16] ROMERO E, LI X L. Thermo-hydro-mechanical characterization of OPHELIE backfill mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 733 - 740.
- [17] 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 - 812.(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, 2006, 25(4): 801 - 812.(in Chinese))
- [18] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬. 高放废物地质处置库缓冲/回填材料性能测定[J]. 辐射防护, 1998, 18(4): 290 - 295.(LIU Yuemiao, XU Guoqing, LIU Shufen. A study on buffer/backfill materials for HLW geological repository[J]. Radiation Protection, 1998, 18(4): 290 - 295. (in Chinese))
- [19] 刘月妙, 徐国庆, 刘淑芬, 等. 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17(1): 44 - 47.(LIU Yuemiao, XU Guoqing, LIU Shufen, et al. Study on compatibility and swelling property of buffer/backfill material for HLW repository[J]. Uranium Geology, 2001, 17(1): 44 - 47.(in Chinese))