

文章编号: 1000-7598 (2014) 05-1461-09

# 压力溶解对颗粒聚集岩体中热-水-应力耦合影响的数值模拟

张玉军, 杨朝帅, 徐 刚

(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:** 在自主研发的孔隙介质热-水-应力耦合有限元程序中引入 Taron 等提出的颗粒聚集体的压力溶解模型, 针对一个假设的实验室尺度且位于非饱和和石英颗粒聚集岩体中的高放废物地质处置模型, 拟定两种计算工况: (1) 孔隙率和渗透系数是压力溶解的函数; (2) 孔隙率和渗透系数均为常数, 进行 4 a 处置时段的数值模拟, 考察了岩体中的温度、颗粒界面水膜及孔隙中的溶质浓度、迁移和沉淀质量、孔隙率及渗透系数、孔隙水压力、地下水流速和应力的变化、分布情况。研究结果表明: 工况 1 计算终了时, 压力溶解使得孔隙率和渗透系数分别下降到初始值的 43%~54%、4.4%~9.1%。在核废料释热温度场的作用下, 工况 1、2 中的负孔隙水压力分别为初始值的 1.00~1.25 倍、1.00~1.10 倍, 前者表现了压力溶解的明显影响; 两种工况的岩体中的应力量值及分布基本相同。

**关键词:** 压力溶解; 颗粒聚集岩体; 热-水-应力耦合; 数值模拟

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

## Numerical simulation for influences of pressure solution on thermo-hydro-mechanical coupling in granule aggregate rock

ZHANG Yu-jun, YANG Chao-shuai, XU Gang

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

**Abstract:** The model of pressure solution for granular aggregates established by Taron et al is introduced into the FEM code for analysis of thermo-hydro-mechanical coupling in porous media developed by the first author. Aiming at a hypothetical model for nuclear waste disposal in an unsaturated quartz aggregate rock mass with a laboratory scale, two computational conditions are designed: (1) the porosity and the permeability of rock mass are functions of the pressure solution; (2) the porosity and the permeability are constants, then the corresponding numerical simulations for a disposal period of 4 years are carried out; and the states of temperatures, solute concentrations in the intergranular fluid film and at the pore space, removal and precipitation masses, porosities and permeabilities, pore pressures, flow velocities and stresses in the rock mass are investigated. The results show: at the end of the calculation in case 1, pressure solution makes the porosities and the permeabilities decrease to about 43%—54% and 4.4%—9.1% of their initial values; under the action of the release heat of nuclear waste, the negative pore pressures in case 1 and case 2 are about 1.0—1.25 and 1.0—1.1 times of the initial values respectively; so the former represents an obvious effect of pressure solution; the magnitudes and distributions of stresses within the rock mass in the two calculation cases are much the same.

**Key words:** pressure solution; granule aggregate rock; thermo-hydro-mechanical coupling; numerical simulation

### 1 引 言

对于在地层深部的沉积岩体而言, 若处于明显的热-水-应力-化学耦合作用的环境中(如高放射性核废物处置库), 组成岩体的矿物颗粒要产生压力溶

解作用(见图 1), 引起岩体的孔隙率和渗透系数下降。压力溶解涉及到 3 个相继的过程<sup>[1]</sup>: 首先是在承受应力较高的颗粒接触面上矿物质溶解, 其次是溶质从接触面上扩散、迁移进入孔隙空间, 最后溶质在颗粒承受应力较低的表面沉淀下来。对此国外

收稿日期: 2013-01-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(No. 2010CB732101); 国家自然科学基金项目(No. 51379201)。

第一作者简介: 张玉军, 男, 1956 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: yjzhang@whrsm.ac.cn

已经进行了较多的研究。如在温度大于 300 °C 的条件下, Tenthorey 等<sup>[2]</sup>对砂岩、Moore 等<sup>[3]</sup>对花岗岩的试验, 在 50~150 °C 范围内 Lin 等<sup>[4]</sup>对凝灰岩、Polak 等<sup>[5]</sup>对均密石英岩的试验, Durham<sup>[6]</sup>在低有效应力 (0.2 MPa) 和使用酸溶液条件下的试验等, 显示了裂隙的闭合。Yasuhara 等<sup>[7]</sup>基于试验数据, 提出了一种表现压力溶解三过程的数学模型, 可模拟岩土体孔(裂)隙率及渗透系数的减小, 这是一个有着很高理论意义和实用价值的重要学术成果。Taron 等<sup>[8]</sup>将压力溶解、热-水-应力收缩与膨胀、矿物沉淀与溶解对裂隙开度张开与闭合的复杂影响进行数学简化, 建立了一种新的热-水-应力-化学双重介质模型, 并以此结合 TOUGHREACT 和 FLAC<sup>3D</sup> 分析了天然裂隙岩体的渗透率变化机制。Taron 等<sup>[9-10]</sup>还发展了一种新的压力溶解模型, 并将其应用于具有动态渗透率的裂隙岩体工程地热库中耦合的力学和化学过程的数值模拟。但迄今为止, 国内外尚无人将压力溶解模型用于颗粒聚集体孔隙介质的有限元等数值分析中。而这样的分析对于在诸如岩盐、黏土类岩体中进行高放废物地质处置等环境工程有着重要的指导价值。

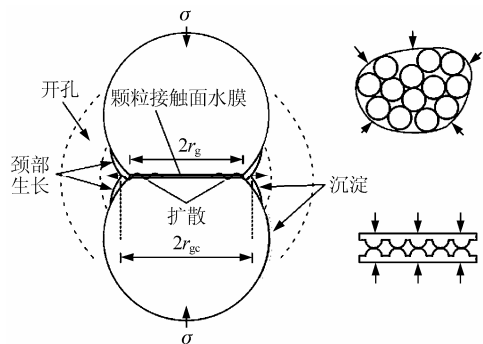


图1 孔隙介质、裂隙及化学压缩过程的概念化<sup>[10]</sup>  
Fig.1 Conceptualization of porous media, fractures and chemical compaction process<sup>[10]</sup>

鉴于此, 将 Taron 等建立的压力溶解模型引入笔者所研制的岩土介质热-水-应力耦合有限元分析程序中。与笔者的前期工作相比, 新引进的压力溶解模型的新意在于: 可模拟颗粒的贯穿深度、两个相互贯穿球形颗粒的接触面积、每个颗粒的接触数、颗粒接触面处和颗粒孔隙中的溶质浓度等变量随时间的演化; 笔者对其中的表征体即时体积与其应变求解式进行了一定修正, 即计入了有效应力的贡献, 并给出介质孔隙率随压力溶解的演化表达式, 计算时对孔隙率及渗透系数随应力、温度的变化实施动态调整, 并以一个假定的实验室尺度且位于非饱和

颗粒聚集体地层中的高放废物地质处置模型为算例, 在相同的初始温度、孔隙水压力和岩体应力条件下, 针对两种计算工况: ①孔隙率和渗透系数是压力溶解的函数; ②孔隙率和渗透系数均为常数(不考虑压力溶解), 进行热-水-应力耦合有限元数值模拟, 考察了处置库近场的温度、颗粒界面水膜及孔隙中的溶质浓度、迁移和沉淀质量、孔隙率和渗透系数、孔隙水压力、地下水流速、应力的变化、分布情况, 得出了某些新的认识。

## 2 压力溶解和孔隙-渗透性

### 2.1 混合质量平衡

对于如图 1、2 所示的颗粒聚集体化学压缩模型, Taron 等提出了物质在压力作用下的溶解浓度迭代求解式为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} C_i \\ C_p \end{cases}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} \left( \frac{k^+ \alpha A_i^{rx}}{C_{eq}^h} + D \right) + \frac{V_i}{\Delta t} & -D \\ -D & \left( \frac{k^+ A_p^{rx}}{C_{eq}^h} + D \right) + \frac{V_p}{\Delta t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{cases} k^+ \alpha A_i^{rx} a_{SiO_2} + \frac{V_i C_i}{\Delta t} \\ k^+ A_p^{rx} + \frac{V_p C_p}{\Delta t} \end{cases}_t \quad (1)$$

式中:  $C_i$  为在颗粒接触面水膜中溶解硅的即时浓度;  $C_p$  为在颗粒周界(孔隙空间)处的即时硅浓度;  $k^+$  为溶解速率常数;  $\alpha$  为固体接触部分所占据的颗粒边界的比例 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ );  $A_i^{rx}$  为表征体颗粒交界处的反应面积 (REV);  $C_{eq}^h$  为液态水中硅的溶解度;  $D$  为扩散系数;  $V_i$  为颗粒接触之内表征体的体积 (REV);  $A_p^{rx}$  为表征体的孔隙反应面积 (REV);  $V_p$  为表征体的孔隙体积 (REV);  $a_{SiO_2}$  为应力作用下固体硅的化学活度;  $\Delta t$  为时间增量。

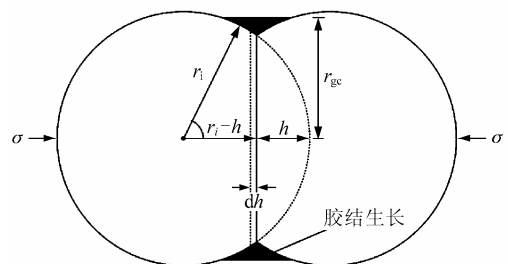


图2 压缩及颗粒和生长的胶结物半径的关系示意图<sup>[10]</sup>  
Fig.2 Diagram of compaction and relationship between granular and growing cement radius<sup>[10]</sup>

式 (1) 中各物理量可表示成

$$A_i^{rx} = V_0(1 - \phi_0)N_c a_g / V_g \quad (2)$$

$$A_p^{rx} = A_T - A_i^{rx} \quad (3)$$

$$D = 8D_f \omega \left( \frac{A_i^{rx}}{2a_g} \right) \quad (4)$$

$$V_i = \omega A_i^{rx} / 2 \quad (5)$$

$$V_p = \phi V \quad (6)$$

$$a_{SiO_2} = \exp\left(\frac{\Delta\mu}{QT}\right) \quad (7)$$

而  $A_T = V_0(1 - \phi_0)S_{ag} / V_g \quad (8)$

式中： $V_0$ 、 $V$  分别为表征体（可取单位量）的初始和即时体积（REV）； $\phi_0$  和  $\phi$  分别为初始和即时的孔隙率； $S_{ag}$ 、 $V_g$  分别为平均的单个颗粒表面积和体积； $a_g$  为两个相互贯穿球形颗粒的接触面积； $N_c$  为每个颗粒的接触数； $D_f$  为分子扩散系数； $\omega$  为颗粒接触面水膜的厚度； $\Delta\mu$  为化学势梯度； $Q$  为气体常数； $T$  为绝对温度； $A_T$  为总的接触面积。

并且有

$$a_g = \pi h(2r_i - h) \quad (9)$$

$$V = V_0 \left[ \left( \frac{r_i - h}{r_i} \right)^3 + \frac{\sigma'}{K_b} \right] \quad (10)$$

$$h = \sum_i \Delta h = \sum_i (\Delta m_i^{SiO_2} V_m) / A_i^{rx} \quad (11)$$

$$\Delta\mu = \frac{(\sigma_a - \sigma_a^{eq})}{\alpha} V_m \quad (12)$$

式中： $r_i$  为初始时刻的平均颗粒半径； $h$  为累积的球形颗粒贯穿深度（初值为 0）； $\sigma'$  为有效应力； $K_b$  为颗粒材料的体积模量（式 (10) 中  $\sigma'/K_b$  项为笔者所加，其体现应力压缩的作用）； $\Delta m_i^{SiO_2}$  为产生于颗粒接触面处的迁移质量（以溶解的数值为正）； $V_m$  为固体的摩尔体积。

而

$$\sigma_a = \sigma' / R_c \quad (13)$$

$$\sigma_a^{eq} = \frac{E_A(1 - T/T_A)N_c(1 - \phi_0)}{4V_m} \beta_c^2 \quad (14)$$

$$\beta_c = \frac{r_{gc}/r_i}{1 - h/r_i} \quad (15)$$

$$R_c = (\phi_0 - \phi) / \phi_0 \quad (16)$$

$$\Delta m_i^{SiO_2} = V_i(C_i^{t+\Delta t} - C_i^t) + D(C_i^{t+\Delta t} - C_p^{t+\Delta t})\Delta t \quad (17)$$

式中： $\sigma_a$  和  $\sigma_a^{eq}$  分别为真实应力及达到平衡时的临界应力； $R_c$  为接触面积比； $E_A$  和  $T_A$  分别为熔化热和熔化温度； $\beta_c$  为埋置常数； $r_{gc}$  为颗粒交界处沉淀胶结物外表面到颗粒中心连线的距离。

### 2.2 孔隙率和渗透系数演化律

Taron 等<sup>[9-10]</sup>给出的孔隙率表达式为

$$\phi = 1 - \left( \frac{1 - \phi_0}{1 - \varepsilon_v} + \frac{R}{V_0(1 - \varepsilon_v)} \right) \quad (18)$$

式中： $\varepsilon_v$  为有限的体积应变； $R$  为作为源/汇项的随时间求和的反应体积。

且有

$$\varepsilon_v = 1 - \left( 1 - \frac{h}{r_i} \right)^3 + \frac{\sigma'}{K_b} \quad (19)$$

$$R = V_m \sum_i (\Delta m_i^{SiO_2} + \Delta m_p^{SiO_2}) \quad (20)$$

$$\Delta m_p^{SiO_2} = V_p(C_p^{t+\Delta t} - C_p^t) - D(C_i^{t+\Delta t} - C_p^{t+\Delta t})\Delta t \quad (21)$$

式中： $\Delta m_p^{SiO_2}$  为在孔隙处溶解/沉淀的质量（以沉淀的数值为负）；式 (19) 中  $\sigma'/K_b$  项为笔者所加。

由此，可求出对应的渗透系数为<sup>[11]</sup>

$$k = k_0 \frac{(1 - \phi_0)^2}{(1 - \phi)^2} \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \quad (22)$$

式中： $k_0$  为初始时刻的渗透系数。

将上述颗粒聚集体的压力溶解模型引入笔者所研制的孔隙介质热-水-应力耦合有限元程序中<sup>[12-14]</sup>。其计算步骤为

- (1) 开始时，孔隙率、渗透系数和其他参数取初值；
- (2) 经  $t_i = \Delta t$  时段的 THM 耦合分析后，得出相应的温度场、渗流场和应力场；
- (3) 求出新的孔隙率、渗透系数和其他参数；
- (4) 用新的温度、有效应力和相关参数求出真实应力  $\sigma_a$  和临界应力  $\sigma_a^{eq}$ ；
- (5) 求出化学势梯度  $\Delta\mu$ 、化学活度  $a_{SiO_2}$  和有关参数后，由式 (1) 解出  $t_i$  时刻的  $C_i$  和  $C_p$ ；
- (6) 取  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ ，进行步骤 (2) 至步骤 (6) 的新循环计算，直到预定的时间长度终止。

### 3 算例

如图 3 所示，此为一实验室尺度的核废料玻璃

固化体埋置模型，其周围的介质是非饱和的石英颗粒聚集孔隙岩体。作为近似简化，认为这是一个平面应变问题。取计算域尺寸水平向为 4 m，垂直向为 8 m，有 800 个单元、861 个节点。从固化体边缘向右的点号依次为 432、433、434、435、436。

对于边界条件，计算域的顶面位移自由，其上作用分布荷载为 53.4 MPa；左、右侧面的水平方向位移约束；底面的垂直方向位移约束；所有边界的孔隙水压力均为 -4.59 MPa，其温度为 40 °C，岩体的初始孔隙率为 0.3。热-水-应力耦合的环境对岩体颗粒要产生压力溶解作用，从而引起孔隙率和渗透系数的变化。有关的计算参数见表 1、2（该表中主要数据参考自文献[1, 10]）。需要说明的是，为了突出压力溶解的作用，特将初始孔隙率取得较大（0.3），而渗透系数取得很小，这与实际情况有一定误差。初始状态时，岩体的温度均为 40 °C。核

废物以 1 000 W 的不变功率释放热量，时间经历了 4 a。

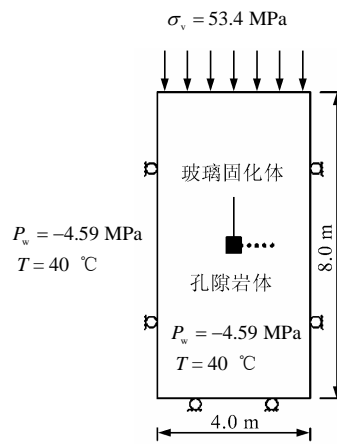


图 3 计算模型  
Fig.3 Computation model

表 1 岩体主要计算参数

Table 1 Main computation parameters for rock masses

介质	重度 $\rho$ /(kN/m <sup>3</sup> )	孔隙率 $\phi_0$	渗透系数 $k_0$ /(m/s)	弹性模量 $E$ /GPa	泊松系数 $\mu$	比热 $C$ /(kJ/(kg·°C))	热膨胀系数 $\beta$ /°C <sup>-1</sup>	导热系数 $\lambda$ /(W/(m·°C))
岩石	26.7	0.3	$1.24 \times 10^{-13}$	3.7	0.30	1.0	$8.8 \times 10^{-6}$	2.8
固化体	25.0	0.0	$1.0 \times 10^{-27}$	5.3	0.25	0.7	$1.0 \times 10^{-5}$	5.3

表 2 压力溶解计算参数

Table 2 Parameters for pressure solution

初始颗粒 界面间 溶质浓度 $C_0$ /(mol/m <sup>3</sup> )	初始孔隙 空洞中 溶质浓度 $C_{p0}$ /(mol/m <sup>3</sup> )	颗粒 直径 $r_i$ /mm	颗粒 界面上 水膜的 厚度 $\omega$ /mm	单个 颗粒的 接触 面积 $N_c$	表征体 的初始 体积 $V_0$ /m <sup>3</sup>	埋置 系数 $\beta_c$ (近似 取定值)	熔化热 $E_A$ (J/mol)	分子 扩散 系数 $D_i$ /(m <sup>2</sup> /s)	溶解 速率 常数 $k^+$ /(mol/(m <sup>2</sup> ·s))	比例 常数 $\alpha$	气体常数 $Q$ /(J/(mol·K))	熔化 温度 $T_A$ (石英) /K	摩尔体积 $V_m$ (石英) /(m <sup>3</sup> /mol)	溶质的 平衡 溶解度 $C_{eq}$ /(mol/m <sup>3</sup> )	颗粒材 料的体 积模量 $K_b$ /GPa
0.0	0.0	0.4	10.0	6	1.0	0.3	$8.57 \times 10^3$	$7.7 \times 10^{-10}$	$6.05 \times 10^{-8}$	1.0	8.31	1 883	$2.27 \times 10^{-5}$	12.997	3.1

岩体介质的水分特性曲线符合 Van Genuchten 模型<sup>[15]</sup>，即

$$s_w = (s_{ws} - s_{wr})(1 + |\omega\psi|^\beta)^{-\gamma} + s_{wr} \quad (23)$$

式中： $\omega = 3.86 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ， $\beta = 1.41$ ， $\gamma = 1 - 1/\beta$ ； $\psi$  为水势； $s_{ws} = 1.0$ ， $s_{wr} = 0.19$ ，其分别为最大饱和度和最小饱和度。

比渗透率与饱和度的关系为

$$k_{rw} = s_w^{2.0} \quad (24)$$

取岩体介质的温度梯度水分扩散系数为

$$D_t = 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / (\text{s} \cdot \text{°C}) \quad (25)$$

针对前述的 2 种工况，其主要结果及分析如下。由于渗流和地应力对核废物释热的影响较

小<sup>[16]</sup>，故 2 种工况条件下计算域中的温度场基本相同。以工况 1 为例，432、433、434、435 各点处的温度随时间的变化曲线见图 4。

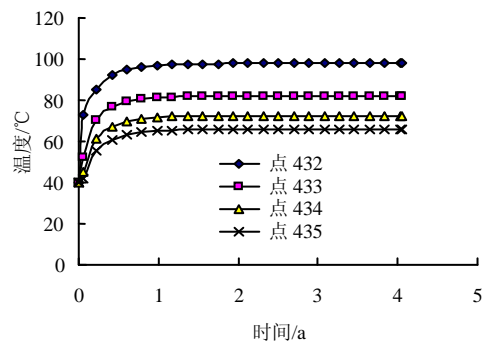


图 4 工况 1 的温度-时间曲线  
Fig.4 Temperatures versus time for case 1

由图看到,在开始的约 0.1 a 内缓冲层的温度快速上升,之后增加减缓,到计算终了时,点 432、433、434、435 的温度依次为 97.8、81.9、72.6、65.7 °C。图 5 是工况 1 在 4 a 时计算域中的温度等值线分布。

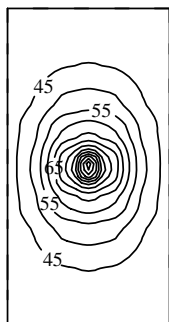


图 5 4 a 时工况 1 计算域中温度等值线 (单位: °C)  
Fig.5 Temperature contours in calculation domain after 4 years for case 1 (unit: °C)

从图 6 看到,在压力溶解作用下,颗粒接触面处和颗粒孔隙中的溶质浓度  $C_i$ 、 $C_p$  在开始约 0.2 a 内急速升、降,之后随时间的推移仍在减小,但变化幅度不大。到计算终了时  $x$  为 0.3、0.7、1.1、1.5 m 处的溶质浓度  $C_i$  分别为: 14.33、14.61、14.76、14.89 mol/m<sup>3</sup>;  $C_p$  分别为: 13.025、13.032、13.036、13.039 mol/m<sup>3</sup>。

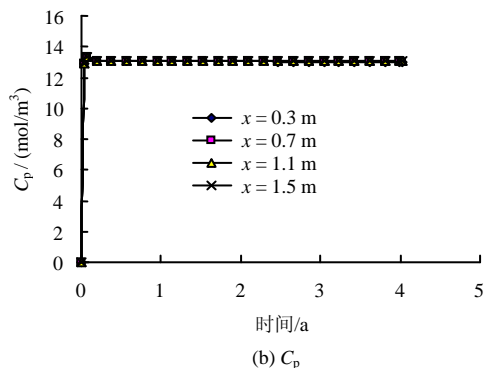
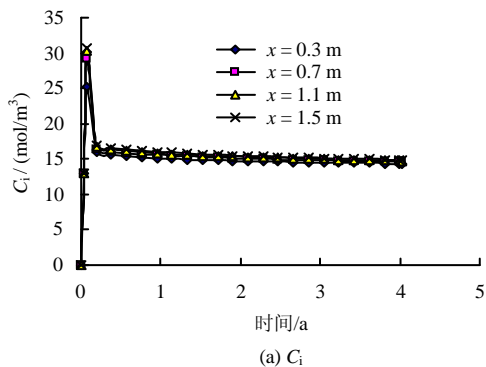


图 6 岩体中 4 个点的溶质浓度-时间曲线(固化体中心  $x=0$ )  
Fig.6 Solute concentrations versus time at four nodes ( $x=0$  at the center of vitrified waste)

从图 7 也可见,在压力溶解作用下,颗粒接触面处的迁移质量  $\Delta m_i^{SiO_2}$  和颗粒孔隙中的沉淀质量  $\Delta m_p^{SiO_2}$  亦在开始约 0.2 a 内急速升、降,之后随时间的变化趋缓。正是因为颗粒接触面处的溶解和颗粒孔隙中的沉淀使得岩体孔隙率减小。到计算终了时  $x$  为 0.3、0.7、1.1、1.5 m 处的迁移和沉淀质量  $\Delta m_i^{SiO_2}$  分别为: 0.839 664、1.013 058、1.113 291、1.189 999 mol,  $\Delta m_p^{SiO_2}$  分别为: -0.839 68、-1.013 08、-1.113 31、-1.190 02 mol。比较可知,  $\Delta m_i^{SiO_2} \approx \Delta m_p^{SiO_2}$ , 即颗粒接触面处的溶解质量基本变为颗粒孔隙中的沉淀质量。

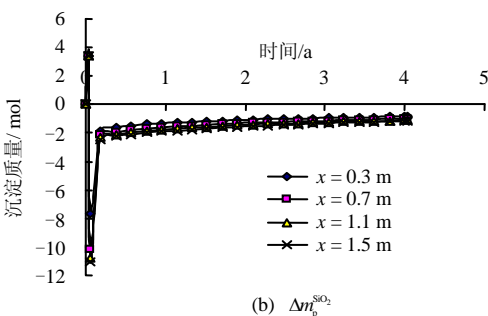
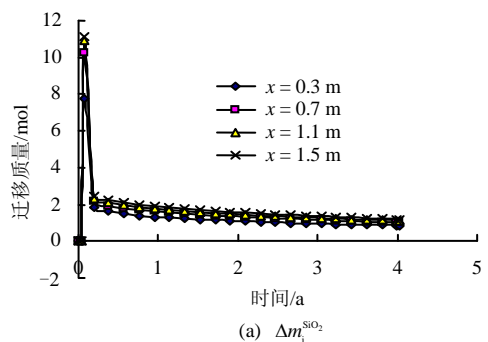


图 7 岩体中 4 个点的迁移/沉淀质量-时间曲线 (固化体中心  $x=0$ )  
Fig.7 Removal/precipitation masses versus time at four nodes ( $x=0$  at the center of vitrified waste)

图 8 是源/汇项反应体积  $R$  和颗粒贯穿深度  $h$  随时间的变化曲线。从中看到,在压力溶解作用下,  $R$  和  $h$  也是在开始约 0.2 a 内急速上升,之后随时间的推移  $R$  缓慢下降,而  $h$  还呈现明显的增长趋势(孔隙率减小的原因之一)。到计算终了时  $x$  为 0.3、0.7、1.1、1.5 m 处的反应体积  $R$  分别为:  $7.743 \times 10^{-5}$ 、 $7.745 \times 10^{-5}$ 、 $7.747 \times 10^{-5}$ 、 $7.749 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>; 颗粒贯穿深度  $h$  分别为:  $1.494 \times 10^{-5}$ 、 $1.587 \times 10^{-5}$ 、 $1.637 \times 10^{-5}$ 、 $1.672 \times 10^{-5}$  m。

图 9 是工况 1 到 4 a 时玻璃固化体周围 2 m×2 m 范围内岩体孔隙率等值线分布。此时在计算域水平对称轴上距玻璃固化体中心 0.3、0.7、1.1、1.5 m 点处的具体值依次为: 0.168、0.152、0.143、0.137,

分别约为初始值的 56%、51%、48%、46%。可以看到，距离玻璃固化体越远，孔隙率减小越多，其原因为：在玻璃固化体附近温度较高，由此产生的热效应使得真实应力  $\sigma_a$  与临界应力  $\sigma_a^{eq}$  之差较小，并且固体硅的化学活度  $a_{SiO_2}$  与温度  $T$  成反比，因而该处孔隙率下降较少，反之亦然。上述四点处的孔隙率随时间的变化曲线见图 10，从中可知，在开始的约 0.2 a 内，因上覆及自重荷载的施加，压力溶解使得岩体孔隙率内急速下降，之后随时间的推移孔隙率虽仍在衰减，但变化幅度较小（渐趋平衡），且与温度的增长趋势并不同步。

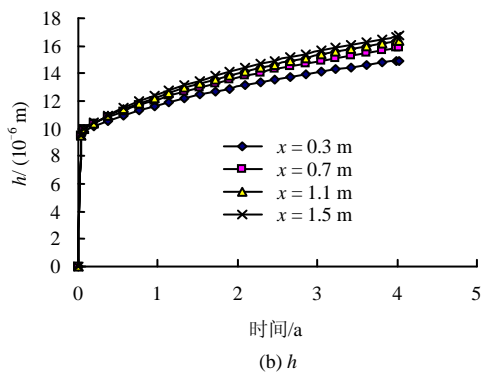
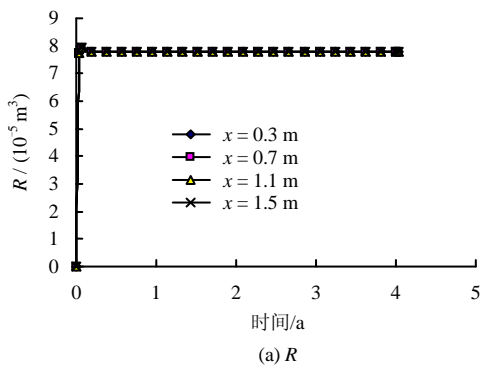


图 8 岩体中 4 个点的反应体积和颗粒贯穿深度-时间曲线(固化体中心  $x=0$ )  
Fig.8 Reaction volumes and granular interpenetrations versus time at four nodes ( $x=0$  at the center of vitrified waste)

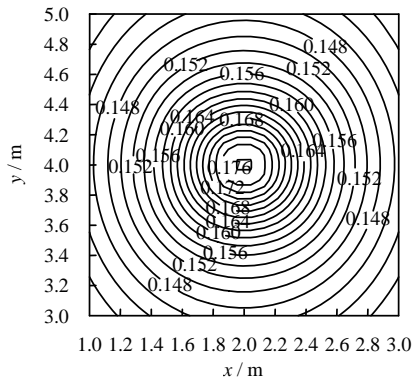


图 9 工况 1 在 4 a 时岩体中孔隙率等值线分布  
Fig.9 Contour map of porosity in rock mass at 4 years for case 1

将图 10 与 Taron 等<sup>[10]</sup>由解析及试验得出的岩体孔隙率-时间曲线（见图 11）相比较，可见二者虽在时间尺度不同，但变化规律在定性上较为一致。

相对应的渗透系数的等值线分布及随时间的变化曲线见分别图 12、13，其与孔隙率的演化规律类似，在时间上表现了一定的非线性特征(由式(22)决定)。上述 4 点处的渗透系数依次为  $0.153 \times 10^{-13}$ 、 $0.111 \times 10^{-13}$ 、 $0.090 \times 10^{-13}$ 、 $0.077 \times 10^{-13}$  m/s，分别约为初始值的 12.3%、9.0%、7.3%、6.2%。

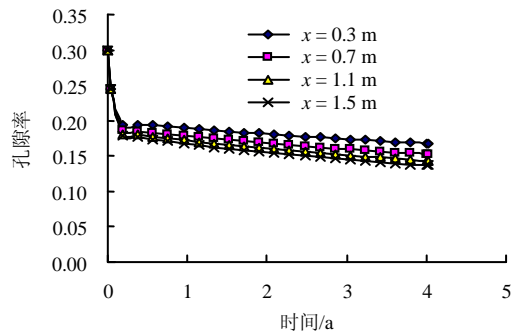


图 10 岩体中 4 个点的孔隙率-时间曲线(固化体中心  $x=0$ )  
Fig.10 Porosities versus time at four nodes ( $x=0$  at the center of vitrified waste)

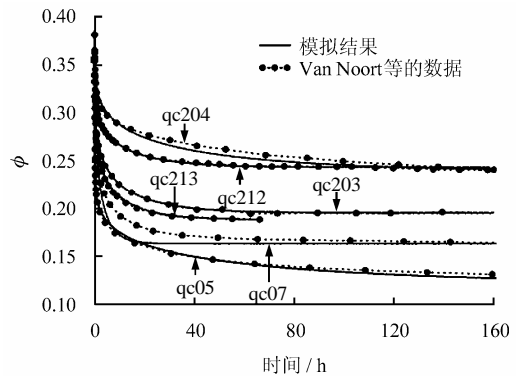


图 11 Taron 模型与试验数据的对比<sup>[10]</sup>  
Fig.11 Comparison of Taron model and experimental data<sup>[10]</sup>

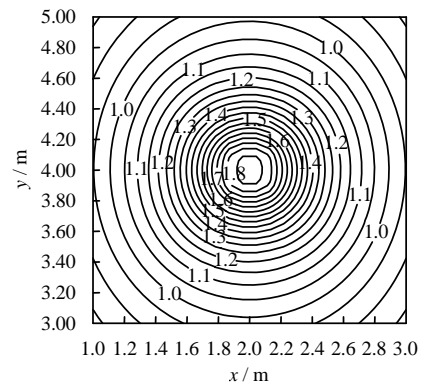


图 12 工况 1 在 4 a 时岩体中渗透系数等值线分布 (单位:  $10^{-14}$  m/s)  
Fig.12 Contour map of permeability in rock mass after 4 years for case 1 (unit:  $10^{-14}$  m/s)

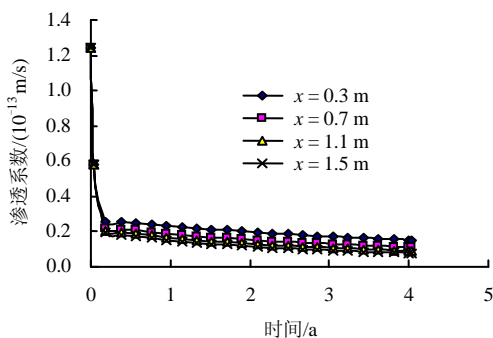


图 13 岩体中 4 个点的渗透系数-时间曲线 (固化体中心  $x=0$ )

Fig.13 Permeabilities versus time at four nodes ( $x=0$  at the center of vitrified waste)

而在工况 2 中, 因不考虑压力溶解, 故不出现  $C_i$ 、 $C_p$ 、 $\Delta n_i^{SiO_2}$ 、 $\Delta n_p^{SiO_2}$ 、 $R$  和  $h$  等变量 (无相应的图及分析内容)。

图 14 是两种工况中 432、433、434、435 各点处的孔隙水压力随时间的变化曲线。从中看到, 由于工况 1 考虑了压力溶解作用, 岩体孔隙率和渗透系数下降, 使得孔隙水压力随时间上升幅度较大。到 4 a 时工况 1 四点处的孔隙水压力值依次为:  $-5.73$ 、 $-5.70$ 、 $-5.631$ 、 $-5.56$  MPa, 约是初值 ( $-4.59$  MPa) 的 1.2 倍; 工况 2 四点处的孔隙水压力值依次为:  $-5.01$ 、 $-5.00$ 、 $-4.98$ 、 $-4.95$  MPa, 约为初值的 1.1 倍。计算终了时两种工况中的孔隙水压力等值线见图 15。

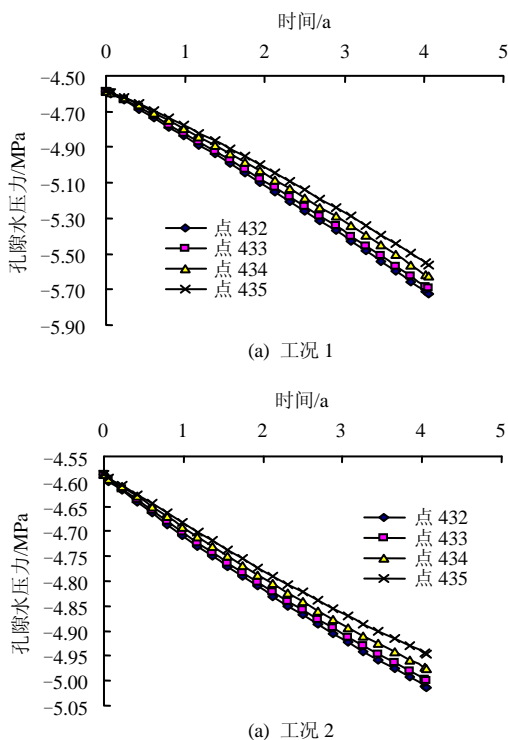


图 14 两种工况 4 个点的孔隙水压力-时间曲线

Fig.14 Pore pressures versus time at 4 nodes for two cases

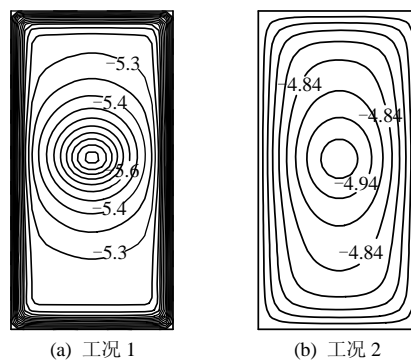


图 15 4 a 时两种工况岩体中的孔隙水压力等值线 (单位: MPa)

Fig.15 Contour map of pore pressures in rock mass after 4 years for two cases (unit: MPa)

图 16 是工况 1、2 在 4 a 时计算域中的孔隙水流速矢量分布, 前者与后者的比例尺为 1:2.5。由图看到, 由于工况 1 考虑了压力溶解作用, 与工况 2 相比, 孔隙水流速约减小了 1 个数量级。其矢量分布也有显著的不同, 特别是在贮存罐附近比其他部位大得多。以点 432、433、434、435 为例, 工况 1 孔隙水流速分别为:  $9.70 \times 10^{-10}$ 、 $7.07 \times 10^{-10}$ 、 $5.24 \times 10^{-10}$ 、 $4.10 \times 10^{-10}$  m/s; 工况 2 孔隙水流速分别为:  $29.85 \times 10^{-10}$ 、 $33.85 \times 10^{-10}$ 、 $39.03 \times 10^{-10}$ 、 $46.16 \times 10^{-10}$  m/s。

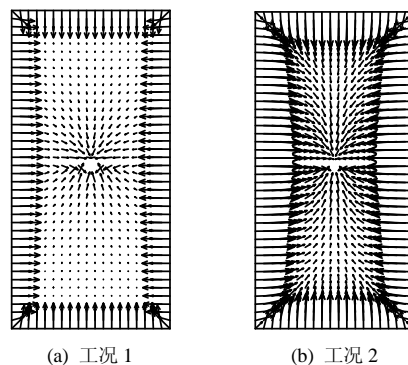


图 16 4 a 时两种工况计算域中的孔隙水流速矢量

Fig.16 Flow vectors of pore water in calculation domain after 4 years for two cases

从总体上来看, 由于不计入负孔隙水压力对岩体应力的影响<sup>[15]</sup>, 两种工况的计算域中应力量值及分布差别很小, 这里以工况 1 为例给出 4 a 时计算域中的正应力等值线, 见图 17。从中看到, 由于玻璃固化体的存在及温度效应, 使得计算域中的应力场不同于仅由岩体自重产生的应力场 (后者的应力等值线为水平线)。到 4 a 时, 432、433、434、435 各点水平正应力依次为  $-12.8$ 、 $-14.5$ 、 $-15.7$ 、 $-16.8$  MPa; 垂直正应力依次为:  $-33.9$ 、 $-35.3$ 、 $-36.4$ 、 $-37.2$  MPa。

由此可知, 由于玻璃固化体产生的热胀作用, 导致岩体初始应力下降, 并且下降的幅度依岩体部位到玻璃固化体距离的近、远呈现由大到小的变化趋势。

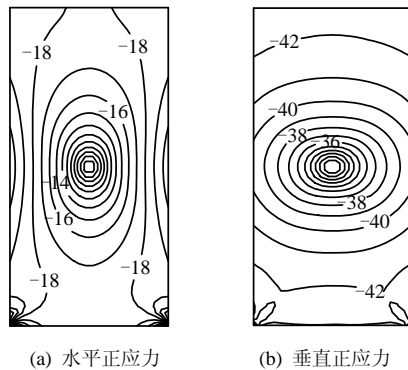


图 17 4 a 时工况 1 计算域中正应力等值线 (单位: MPa)

Fig.17 Normal stress contours in calculation domain after 4 years for case 1 (unit: MPa)

## 4 结 论

在笔者所研制的孔隙介质热-水-应力耦合有限元程序中引入 Taron 等建立的颗粒聚集体的压力溶解模型, 以一个假定的实验室尺度且位于非饱和颗粒聚集体孔隙岩体中的高放废物地质处置模型为例, 只考虑孔隙率及渗透系数是否随压力溶解变化的两种工况, 通过热-水-应力耦合的二维有限元模拟, 考察了岩体中的温度、颗粒界面水膜及孔隙中的溶质浓度、迁移和沉淀质量、孔隙率及渗透系数、孔隙水压力、地下水流速和主应力的变化、分布情况。计算结果表明:

(1) 两种工况中的温度状态基本相同, 计算终了的 4 a 时, 近场的温度可达到 40.0~98.0 °C。

(2) 在压力溶解作用下, 溶质浓度、迁移和沉淀质量在开始约 0.2 a 内急速升、降, 之后随时间的变化趋缓。

(3) 随着溶质的迁移和沉淀, 岩体孔隙率和渗透系数分别下降到初始值的约 43%~54%、4.2%~9.1%。

(4) 在核废料释热温度场的作用下, 岩体中孔隙水压力随时间上升, 到 4 a 时工况 1、2 中的孔裂隙水压力分别为初始值的 1.0~1.25 倍、1.0~1.10 倍, 前者表现了压力溶解的明显影响, 并且两种工况中孔隙水流速的矢量场有显著的不同。

(5) 因不考虑负孔隙水压力对岩体应力的影响, 故两种工况岩体中的应力量值及分布差别很小。

## 参 考 文 献

[1] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A. A

mechanistic model for compaction of granular aggregates moderated by pressure solution[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2003, 108: NO.B11, 2530, doi:10.1029/2003JB002536.

[2] TENTHOREY E, COX S, TODD H. Evolution of strength recovery and permeability during fluid-rock reaction in experimental fault zones[J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2003, 206: 161-172.

[3] MOORE E, LOCKNER A, BYERLEE D. Reduction of permeability in granite at elevated temperatures[J]. **Science**, 1994, 265: 1558-1561.

[4] LIN W, ROBERTS J, GLASSLEY W, et al. Fracture and matrix permeability at elevated temperatures[R]. San Francisco: Workshop on Significant Issues and Available Data, Near-field/Altered-zone Coupled Effects Expert Elicitation Project, 1997.

[5] POLAK A, ELSWORTH D, YASUHARA H, et al. Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids[J]. **Geophysical Research Letters**, 2003, 30(20): 2020, doi: 10.1029/2003GL017575.

[6] DURHAM W, BOURCIER W, BURTON E. Direct observation of reactive flow in a single fracture[J]. **Water Resources Research**, 2001, 37: 1-12.

[7] YASUHARA H, ELSWORTH D. Evolution of permeability in a natural fracture: Significant role of pressure solution[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2004, 109, B03204, doi:10.1029/2003JB002663.

[8] TARON J, ELSWORTH D. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, doi:1016/j.ijrmms.2009.01.007.

[9] TARON J, ELSWORTH D. Coupled mechanical and chemical processes in engineered geothermal reservoirs with dynamic permeability[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(8): 1339-1348.

[10] TARON J, ELSWORTH D. Constraints on compaction rate and equilibrium in the pressure solution creep of quartz aggregates and fractures: Controls of aqueous concentration[J]. **Journal of Geophysical Research**,



- 2010, 115: B07211. doi:10.1029/2009JB007118.
- [11] LEE D, ELSWORTH D, YASUHARA H, et al. Experiment and modeling to evaluate the effects of proppant-pack diagenesis on fracture treatments[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2006, 74: 67—76.
- [12] 张玉军. 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): 1553—1557. 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): 1553—1557.
- [13] 张玉军, 张维庆. 裂隙剪胀效应对双重孔隙介质热-水-应力耦合现象影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1513—1522. ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing. Finite element analysis of influences of fracture shear dilation effect on thermo-hydro-mechanical coupling in dual-porosity medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1513—1522.
- [14] 张玉军, 徐刚, 杨朝帅. 裂隙刚度随应力变化对双重孔隙介质热-水-应力耦合影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3326—3432. ZHANG Yu-jun, XU Gang, YANG Chao-shuai. Finite element analysis of influence of fracture stiffness changing with stress on thermo-hydro-mechanical coupling in dual-porosity medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 3326—3432.
- [15] CHIJIMATSU M, KURIKAMI H, ITO A, et al. Implication of THM coupling on the near-field of a nuclear waste repository in a homogeneous rock mass[R]. Tokyo: Hazama Corporation, 2002: 1—43.
- [16] RUTQVIST J, CHIJIMATSU M, JING L, et al. A numerical study of THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository—BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 3: Effects of THM coupling in sparsely fractured rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(5/6): 745—755.

## 城市岩土工程前沿论坛 (1 号通知)

(2014 年 10 月 18~19 日, 杭州)

针对城市岩土工程建设重大国家需求, 为了更好地培养岩土工程人才, 凝练城市岩土工程科学研究方向, 拟于 2014 年 10 月 18~19 日在浙江大学召开“城市岩土工程前沿”研讨会, 会议将围绕城市岩土工程特殊环境与科技创新重大任务, 开展城市岩土工程基础理论和前沿问题的研讨, 为提升我国城市岩土工程的科研水平和人才培养做出努力。

**会议主题** 城市地下空间开发利用, 城市地下交通工程, 城市地下水控制, 高层建筑基础工程, 城市地面沉降控制, 城市地质灾害防治, 城市抗震, 城市古建筑基础保护等。

**主办单位** 中国工程院土木、水利与建筑工程学部, 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江省城市化发展研究中心等。

**重要日期** 提交论文日为 2014 年 5 月 1 日, 论文录用日为 2014 年 8 月 1 日。

**论文格式要求** ①论文板式参照《岩土力学》格式要求, 可登录《岩土力学》网站的下载中心下载模板, 网站地址: <http://ytlx.whrsm.ac.cn/>; ②请务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及 E-mail 地址; ③论文以邮件(word 电子文档)向会务组 (zjzhuuyihong@zju.edu.cn) 投稿, 论文篇幅原则上在 4~8 页之间, 要求图表清晰、数据翔实。

**联系人:** 王笑笑 13646828087, wangxiuxiu713@163.com;

朱亦弘 15957103535, zjzhuuyihong@zju.edu.cn