



应力腐蚀和压力溶解对双重孔隙岩体中 THM 耦合影响的有限元分析

张玉军^{①*}, 张维庆^②, 杨朝帅^①

① 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;

② 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031

* E-mail: yjzhang@whrsm.ac.cn

收稿日期: 2010-08-22; 接受日期: 2011-02-28

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2010CB732101)和国家自然科学基金(批准号: 51079145)资助项目

摘要 引入裂隙开度的应力腐蚀和压力溶解模型, 针对一个假设的位于非饱和双重孔隙-裂隙岩体中的高放废物地质处置库, 拟定 2 种计算工况: (i) 裂隙开度随应力腐蚀和压力溶解而变化(基岩的孔隙率亦是应力的函数); (ii) 裂隙开度和基岩的孔隙率均为常数, 进行热-水-应力耦合的二维有限元分析, 考察了岩体中的温度、裂隙开度的闭合速率、闭合量、孔(裂)隙水压力、地下水流速和应力的变化、分布等情况. 结果主要显示: 应力腐蚀引起的闭合速率要高于压力溶解引起的闭合速率 6 个数量级, 且 2 种因素产生的闭合速率随时间先增加后减少, 并趋于稳定; 随着时间的推移裂隙开度由初始值下降并趋于残余值, 而粗糙面接触率亦由初始值上升并趋于其名义值; 当考虑应力腐蚀和压力溶解时, 近场的负裂隙水压力上升很高; 2 种工况的岩体中的应力量值及分布差别很小.

关键词

应力腐蚀
压力溶解
双重孔隙-裂隙介质
热-水-应力耦合
有限元分析

1 引言

为了从地下深处有效地回采矿物和能源, 安全地隔离和贮存高放废物及 CO₂ 等, 搞清楚液体在多孔介质中的流动和传输特性是非常重要的. 对于双重岩体而言, 孔隙和裂隙不仅是流体迁移的通道, 而且因二者之间存在压力差、浓度差还要产生水分、空气和溶质的交换. 所处环境应力和温度条件的改变可能通过综合效应而影响这些通道的渗透特性. 与裂隙相对的分别称之为应力腐蚀^[1-4]和压力溶解^[5-8], 前者以支撑糙度的破裂(或压碎)、后者由接触糙度的

溶解产生的闭合使得裂隙渗透性退化.

所谓应力腐蚀, 即当作用在支撑糙度上的压缩荷载引起局部拉应力时, 可能产生“次临界”或“准静态”的破裂, 导致随时间发展的渐进破坏. 特别是有水存在时次临界裂纹的生长由化学反应促使. 而压力溶解则包括了 3 个连续的过程: 首先在承受应力的接触糙度处矿物溶解, 之后溶质沿着水膜扩散, 最终在孔隙壁处溶质沉淀下来. Dove^[9]曾通过室内试验, 在 25~300°C 和 2~12 pH 值的宽广范围内严格地考察了石英的溶解动力学, 设想在裂纹尖端的化学溶解直接地控制着次临界破裂动力学, 从而得出了因化学溶解引

英文版发表信息: Zhang Y J, Zhang W Q, Yang C S. FEM analyses for influences of stress corrosion and pressure solution on THM coupling in dual-porosity rock mass. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 1748-1756, doi: 10.1007/s11431-011-4437-6

起的 I 型裂纹扩展速率经验表达式. Yasuhara 等人^[10] 基于试验数据, 检查了一个含有单条天然裂隙的均密石英岩样中的裂隙开度的演化, 其观察到裂隙的开度在初始阶段迅速减少, 紧接着是呈对数衰减的闭合; 并提出了描述该现象的应力腐蚀和压力溶解模型, 分析了响应的压力和温度依存性. Taron 等人^[11] 引入了一种新的热-水-应力-化学双重介质模型, 其中在简化的基础上考虑了压力溶解、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影响, 从而适时修正渗透性和孔隙率, 并以此结合 TOUGHREACT 和 FLAC^{3D} 分析了天然裂隙岩体的主要特性和渗透率变化机理. 笔者等人^[12, 13] 为了考虑应力拉压和压力(化学)溶解对裂隙开度的综合影响, 利用 Ki-Bok Min 等人提出的裂隙开度的应力、化学及温度依存性简化公式, 对所建立的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型作了修改, 并就一个假定的高放废物地质处置库算例中岩体裂隙开度变化的不同工况, 用有限元方法分析了近场的温度、孔(裂)隙水压力和主应力的变化、分布情况. 然而, 在上述的数值模拟中, 裂隙开度的变化是经过了简化处理的, 即以不同的经验参数表征应力、化学及温度的作用, 并没有使用原来意义上的裂隙开度随应力、化学及温度变化的模型, 即 Dove 和 Yasuhara 各自建立的应力腐蚀和压力溶解表达式, 故其分析的科学性和准确性有待进一步提高.

本文基于以上的工作, 对其所建模型中^[12]裂隙渗透系数的计算方法作了重要改进, 即引入 Yasuhara 给出的应力腐蚀和压力溶解模型, 对裂隙开度进行适时修正, 使用裂隙的渗透系数与开度关系的“立方定律”, 建立裂隙的渗透系数随应力腐蚀和压力溶解的演化模式; 然后以一个假定的位于非饱和地层中的高放废物地质处置库为算例, 认为岩体是双重孔隙-裂隙介质, 在相同的初始温度、孔隙水压力和岩体应力条件下, 针对 2 种裂隙开度的计算工况: (i) 裂隙开度随应力腐蚀和压力溶解而降低(基岩的孔隙率也是应力的函数); (ii) 裂隙开度和基岩的孔隙率是常数, 考察了处置库近场的温度、裂隙开度的闭合速率和闭合量、孔(裂)隙水压力、地下水流速、应力的变化、分布情况, 得出了某些认识.

2 裂隙开度及渗透系数的修正

对于双重孔隙-裂隙介质, 笔者认为其中存在着

孔隙水压力和裂隙水压力、但应力场和温度场是单一的, 从而建立了一种热-水-应力耦合模型, 并开发了相应的二维有限元程序, 详细内容可见文献[14]. 耦合模型的合理性验证见文献[12, 13].

2.1 裂隙开度与渗透系数

如图 1 所示, 在三维岩体中发育着一组裂隙, 其开度和间距分别是 b 和 s , 裂隙面法线 N 与坐标轴夹角的余弦依次为

$$\cos(N, x) = \alpha, \cos(N, y) = \beta, \cos(N, z) = \gamma. \quad (1)$$

在垂直于裂隙面的单位长度(1 m)范围内, 共有 $\lambda=1/s$ 条裂隙, 则裂隙总开度为 $E=\lambda b$.

故裂隙的水力总开度 e 为^[15]

$$e = \frac{E^2}{JRC^{2.5}}, \quad (2)$$

式中, JRC 为裂隙粗糙度系数.

从而, 裂隙渗透系数为

$$K = \frac{ge^2}{12\nu}, \quad (3)$$

式中, g 为重力加速度(9.81 m/s²); ν 为运动粘度(对于 20°C 的纯水其值是 1.0×10^{-6} m²/s).

当岩体中发育有 K 组裂隙时, 在 xy 平面内有

$$E_x = \sum_{i=1}^K E_i \alpha_{xi}, \quad E_y = \sum_{i=1}^K E_i \alpha_{yi}, \quad (4)$$

以及^[16]

$$[K_i] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^K K_{ii} (1 - \alpha_{xi} \alpha_{xi}) & -\sum_{i=1}^K K_{ii} \alpha_{yi} \alpha_{xi} \\ -\sum_{i=1}^K K_{ii} \alpha_{xi} \alpha_{yi} & \sum_{i=1}^K K_{ii} (1 - \alpha_{yi} \alpha_{yi}) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

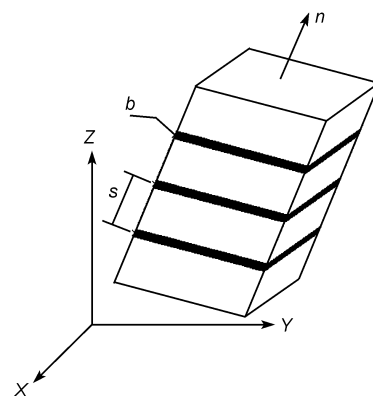


图 1 三维裂隙岩体

式中, E_x, E_y 分别为在 x, y 方向的裂隙力学总开度; $[K_I]$ 为形成的总渗透张量; α_{xi}, α_{yi} 分别是第 i 组裂隙面法线与坐标轴 x, y 夹角的余弦。

2.2 应力腐蚀对裂隙开度的影响

如图 2 所示, 假定脆性材料的裂隙中的粗糙面接触是 Hertzian 接触, 则在这种接触的内部或外部可能因拉应力 σ_t 产生圆形裂纹, 此被称为应力腐蚀。Dove 对石英材料定义其中 I 型裂纹的扩展速率为^[9]

$$v_{Si-O} = A_{H_2O} \exp\left(\frac{-\Delta H_{H_2O}}{RT}\right) \exp(b_{H_2O}^* K_I) (\theta_{Si-O}^{H_2O}) + A_{OH^-} \exp\left(\frac{-\Delta H_{OH^-}}{RT}\right) \exp(b_{OH^-}^* K_I) (\theta_{Si-O}^{OH^-}), \quad (6)$$

式中, v_{Si-O} 是因化学溶解引起的 I 型裂纹扩展速率; A_{H_2O}, A_{OH^-} 是由试验确定的因子, 其与温度有关; $\Delta H_{H_2O}, \Delta H_{OH^-}$ 是活化焓; R 是气体常数; T 是温度; $b_{H_2O}^*, b_{OH^-}^*$ 是由试验确定的常数, 其与裂纹尖端的几何条件有关; K_I 是应力强度因子; $\theta_{Si-O}^{H_2O}, \theta_{Si-O}^{OH^-}$ 是具有分子水或氢氧根离子的硅-氧反应的组成分数, 其符合 $\theta_{Si-O}^{H_2O} + \theta_{Si-O}^{OH^-} = 1$, 并且在低 pH 值时有 $\theta_{Si-O}^{H_2O} = 1, \theta_{Si-O}^{OH^-} = 0$, 在高 pH 值时有 $\theta_{Si-O}^{H_2O} = 0, \theta_{Si-O}^{OH^-} = 1$ 。

则 Yasuhara 等人^[10]给出裂隙力学开度的应力腐蚀闭合速率为

$$\frac{dE^s}{dt} = -(1 - R_c) \cdot v_{Si-O}, \quad (7)$$

而

$$K_I \approx \sigma_t \sqrt{2\pi r}, \quad (8)$$

$$\sigma_t = -\frac{(1-2\mu)}{2} \sigma_a, \quad (9)$$

$$\sigma_a = \frac{\bar{R}}{R_c} \bar{\sigma}, \quad (10)$$

式中, r 是沿由 σ_t 产生的 I 型裂纹长轴方向的距离, 假定裂纹的初始长度及 r 都是足够小的; μ 是材料的泊松比; σ_t 是由 σ_a 引起的拉应力, 其在裂隙的接触边缘达到最大值; σ_a 是作用在裂隙接触面积上的真实压应力; \bar{R} 是裂隙的名义面积(可取单位值); R_c 是裂隙的接触面积, 并且 $R_c \leq \bar{R}$ 。

R_c 由下式计算

$$E^s = E_r + (E_0 - E_r) \exp[-(R_c - R_{c0})a], \quad (11)$$

式中, E^s, E_r 和 E_0 依次为裂隙力学开度的平均值、残余值和初始值; R_{c0} 为裂隙接触面积的初始值; a 为经验常数。

从而裂隙力学开度因应力腐蚀的演化律为

$$E_{t+\Delta t}^s = E_t^s + \frac{dE^s}{dt} \Delta t. \quad (12)$$

2.3 压力溶解对裂隙开度的影响

Yasuhara 等人^[10]定义了物质的溶解速率为

$$\frac{dM_{diss}}{dt} = \frac{3\pi V_m^2 (\sigma_a - \sigma_c) k_+ \rho_g d_c^2}{4RT}, \quad (13)$$

式中, dM_{diss}/dt 是从裂隙界面上进入溶液中的溶解质

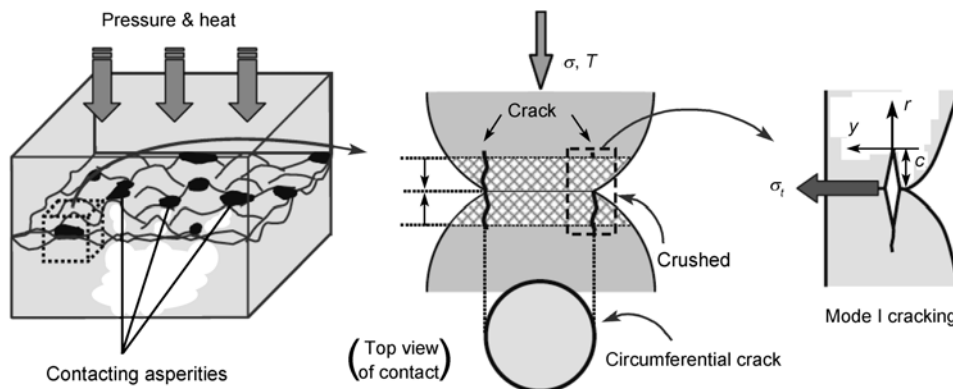


图 2 微裂纹传播引起的裂隙压缩^[10]

量速率; V_m 是固体的摩尔体积; σ_c 是临界应力, 当 σ_a 等于 σ_c 时体系达到平衡, 反应停止; k_+ 是固体的溶解速率常数; ρ_g 是固体的密度; d_c 是粗糙面接触的直径. 而

$$k_+ = k_+^0 \exp(-E_a / RT), \quad (14)$$

$$\sigma_c = \frac{E_m(1-T/T_m)}{4V_m}, \quad (15)$$

式中, k_+^0 是常数因子; E_a 是活化能; E_m 和 T_m 是熔化热和熔化温度.

则裂隙力学开度的压力溶解闭合速率为

$$\begin{aligned} \frac{dE^p}{dt} &= -\frac{dM_{diss}}{dt} \cdot \frac{1}{\rho_g} \cdot \frac{1-R_c}{(\pi/4)d_c^2} \\ &= -\frac{3V_m^2 k_+^0 (1-R_c)(\sigma_a - \sigma_c)}{RT} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

从而裂隙力学开度因压力溶解的演化律亦为

$$E_{t+\Delta t}^p = E_t^p + \frac{dE^p}{dt} \Delta t. \quad (17)$$

2.4 应力对基岩渗透系数的影响

而对于基岩的孔隙率和渗透系数, 当岩体中的应力发生改变时, 可根据 Davis 等人^[17]提出经验公式进行如下修正

$$\phi = \phi_r + (\phi_0 - \phi_r) \exp(a \cdot \sigma'_m), \quad (18)$$

$$k = k_0 \exp[c \cdot (\phi/\phi_0 - 1)] = F_{\phi k} k_0, \quad (19)$$

式中, ϕ_0 , k_0 分别是零应力状态的基岩孔隙率和渗透系数; ϕ_r 是高应力状态下的残余基岩孔隙率; σ'_m 是平均有效应力; a , c 分别是由试验确定的参数; $F_{\phi k}$ 是孔隙渗透系数的修正因子.

3 算例

如图3所示, 有一个圆柱状核废料玻璃固化体被埋入地下 1000 m 处, 其周围是石英岩体, 亦为非饱和的双重孔隙-裂隙介质. 作为近似简化, 认为这是一个平面应变问题. 取计算域尺寸为水平向 4 m, 垂直向 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, 其上作用有分布荷载 $\sigma_v = 26.7$ MPa; 左、右侧面的水平方向

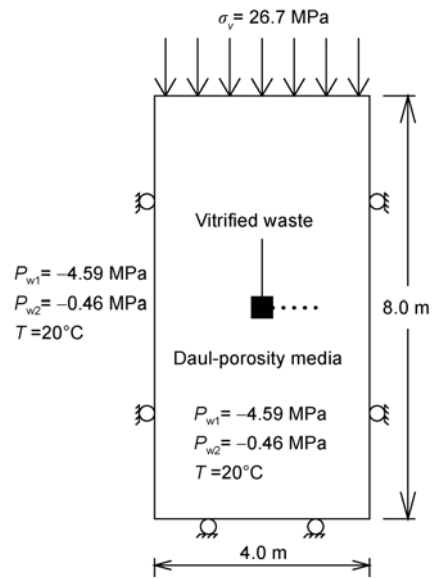


图3 计算模型

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-4.59 MPa、裂隙水压力-0.46 MPa 及温度 20°C 固定. 岩体中发育有水平及垂直两组裂隙, 并为简化计算, 取两组裂隙的刚度不同, 但孔隙率和渗透系数一样. 热-水-应力耦合的环境对裂隙的开度要产生应力腐蚀和压力溶解作用. 有关的计算参数见表 1~3. 初始状态时, 岩体的温度均为 20°C. 核废物以 1000 W 的不变功率释放热量, 时间经历了 4 a.

假定孔隙介质和裂隙介质的水分特性曲线符合 Van Genuchten 模型, 即

$$s_w = (s_{ws} - s_{wr})(1 + |\alpha \psi|^n)^{-m} + s_{wr}, \quad (20)$$

式中, 对于孔隙介质: $\alpha = 3.86 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, $n = 1.41$; 对于裂隙介质: $5.26 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, $n = 2.55$; $m = 1 - 1/n$; ψ 为水势; s_{ws} 为最大饱和度, 其值为 1.0; s_{wr} 为最小饱和度, 其值对孔隙介质和裂隙介质各取 0.19 和 0.01.

比渗透率与饱和度的关系为

$$k_{rw} = s_w^{2.0}. \quad (21)$$

取孔隙介质及裂隙介质的温度梯度水分扩散系数相同, 其为

$$D_t = 2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \cdot ^\circ\text{C}.$$

针对前述的二种裂隙开度变化工况, 计算了岩体中的温度、位移、应力、孔隙水压力等的变化及分布情况, 其主要结果及分析如下.

Table 1 Main computation parameters

Property	Rock mass	Vitrified waste
Density, ρ (kN/m ³)	26.7	25.0
Porosity, ϕ	0.11	0.0
Permeability, k_l/μ_w (m ² /Pa.s)	1.24×10^{-13}	1.0×10^{-27}
Young's modulus, E (GPa)	37.0	53.0
Poisson's ratio, μ	0.3	0.25
Specific heat, C (kJ/kg°C)	1.0	0.7
Thermal expan. coeff., β (1/°C)	8.8×10^{-6}	1.0×10^{-5}
Thermal conductivity, λ (W/m°C)	2.8	5.3

Table 2 Parameters for fracture sets used in calculation

Parameter	Horizontal fracture	Vertical fracture
Spacing, S (m)	0.3	0.3
Continuity ratio, l	1	1
Dip angle, θ (°)	0	90
Normal stiffness, k_n (MPa/m)	1000.0	2000.0
Shearing stiffness, k_s (MPa/m)	500.0	1000.0
Porosity, ϕ_2	0.01	0.01
Permeability, k_2/μ_w (m ² /Pa.s)	9.7×10^{-9}	9.7×10^{-9}

Table 3 Parameters for stress corrosion and pressure solution

Parameter	Unit	Values
Empirical constant, a	-	5.0
Origin asperity contact-area ratio, $R_{c,0}$	-	0.1
Nominal asperity contact-area ratio, \bar{R}	-	1.0
Roughness coefficient of fractures, JRC	-	9.7
Factor, A_{H_2O}	ms ⁻¹	$1.12 \times 10^{-4} T$
Factor, A_{OH^-}	ms ⁻¹	$2.51 \times 10^3 T$
Origin aperture, E_0	m	0.0125
Residual aperture, E_r	m	0.0025
Constant, $b_{H_2O}^*$	N ⁻¹ m ^{3/2}	2.69×10^{-5} (quartz)
Constant, $b_{OH^-}^*$	N ⁻¹ m ^{3/2}	1.78×10^{-5} (quartz)
Activation energy, E_a	J · mol ⁻¹	7.0×10^4 (quartz)
Heat of fusion, E_m	J · mol ⁻¹	8.57×10^3 (quartz)
Activation enthalpy for H ₂ O, ΔH_{H_2O}	J · mol ⁻¹	6.6×10^4
Activation enthalpy for OH ⁻ , ΔH_{OH^-}	J · mol ⁻¹	8.27×10^4
Reference dissolution rate constant, k_+^0	mol · m ⁻² S ⁻¹	1.59
Infinitesimal distance from crack tip, r	m	1.0×10^{-6}
Gas constant, R	J · mol ⁻¹ K ⁻¹	8.31
Temperature of fusion, T_m	K	1883 (quartz)
Molar volume, V_m	m ³ mol ⁻¹	2.27×10^{-5} (quartz)
Fraction of Si-O reacting with H ₂ O, $\theta_{Si-O}^{H_2O}$	-	0.99921 (pH=7)
Fraction of Si-O reacting with OH ⁻ , $\theta_{Si-O}^{OH^-}$	-	0.00079 (pH=7)

工况 1 和工况 2 两种条件下计算域中的温度变化差别很小. 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. 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 432, 433, 434, 435 各点的温度依次为 77.8 °C, 62.0 °C, 52.6 °C 和 45.7 °C. 图 5 是工况 1 在 60 d 时计算域中的温度等值线分布.

图 6 和 7 分别是玻璃固化体右缘中点的水平和垂直裂隙开度因应力腐蚀、压力溶解产生的闭合速率随时间的变化. 从中看到, 2 种因素产生的闭合速率均先随时间增加, 到达峰值再衰减, 之后逐渐趋于不变, 并且应力腐蚀引起的闭合速率要比压力溶解引起的闭合速率高 6 个数量级, 这与文献[10]中呈现的规律

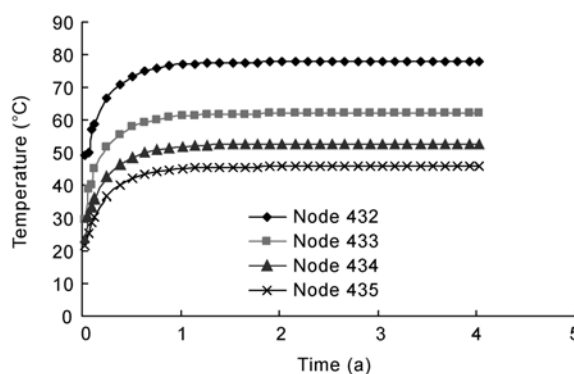


图 4 工况 1 温度-时间曲线

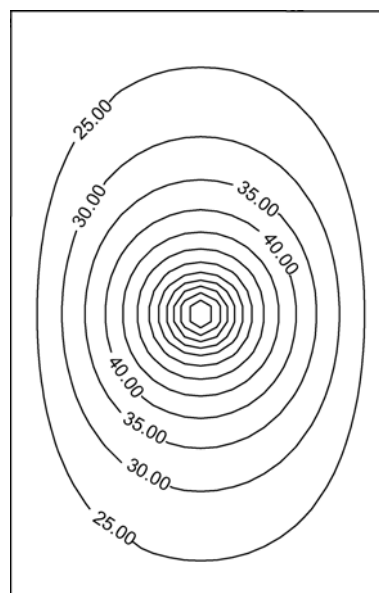


图 5 4 a 时工况 1 计算域中温度等值线(°C)

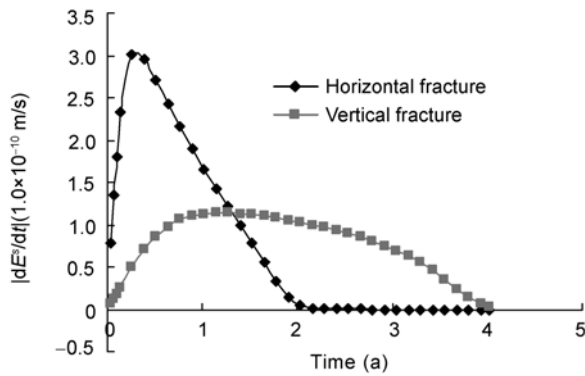


图6 玻璃固化体右缘中点因应力腐蚀引起的 $|dE^s/dt|$ -时间曲线

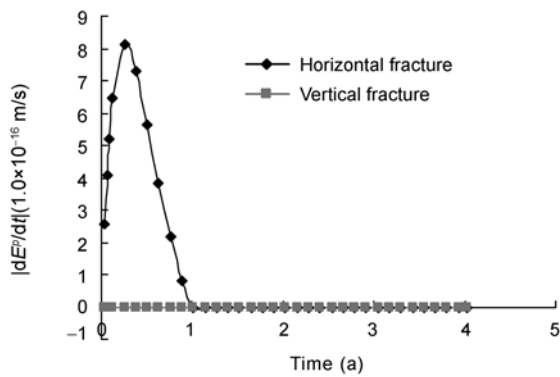


图7 玻璃固化体右缘中点因压力溶解引起的 $|dE^p/dt|$ -时间曲线

类似;同时水平裂隙开度比垂直裂隙开度闭合速率大,这是由于岩体中垂直应力大于水平应力的缘故.图8和9分别表现了该中点处水平和垂直裂隙开度、粗糙面接触率随时间的演化,前者由初始开度下降而趋于残余开度,后者由初始接触率上升而趋于其名义接触率(单位值),并且对应于水平裂隙的值的明显要快.从图10看到,在该中点处作用在垂直裂纹上的拉应力比作用在水平裂纹上的拉应力大的多,且二者均随时间减小.而图11显示了中点处水平和垂直裂隙的临界应力相同,且其在开始阶段快速下降,之后逐渐趋于常数.产生上述现象的原因正在于温度、应力与化学的综合作用.

图12和13是工况1和2中432,433,434,435各点处的孔(裂)隙水压力随时间的变化曲线.比较后看到,由于工况1考虑了应力腐蚀和压力溶解对裂隙开度的减小作用及孔隙的渗透系数随应力的变化,而工况2的裂隙开度及孔隙的渗透系数保持为常数,

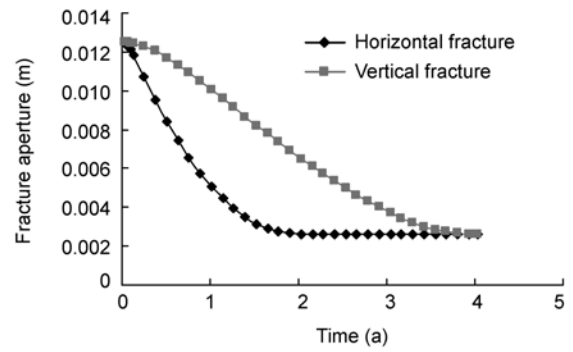


图8 玻璃固化体右缘中点裂隙开度-时间曲线

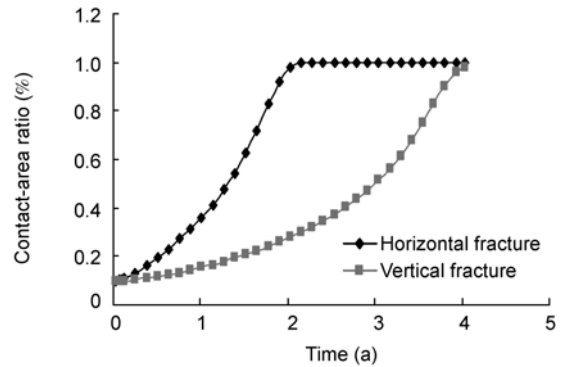


图9 玻璃固化体右缘中点粗糙面接触率-时间曲线

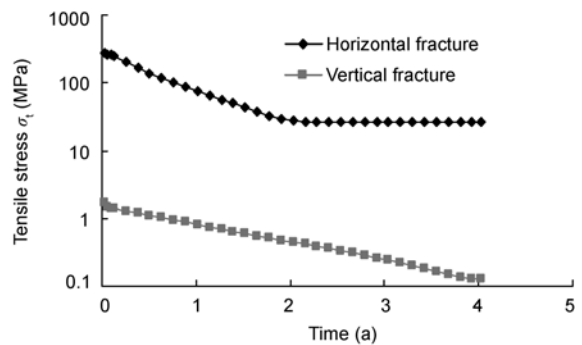


图10 玻璃固化体右缘中点裂纹拉应力-时间曲线

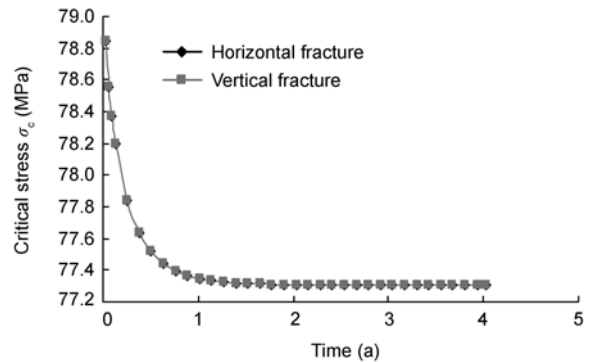


图11 玻璃固化体右缘中点临界应力-时间曲线

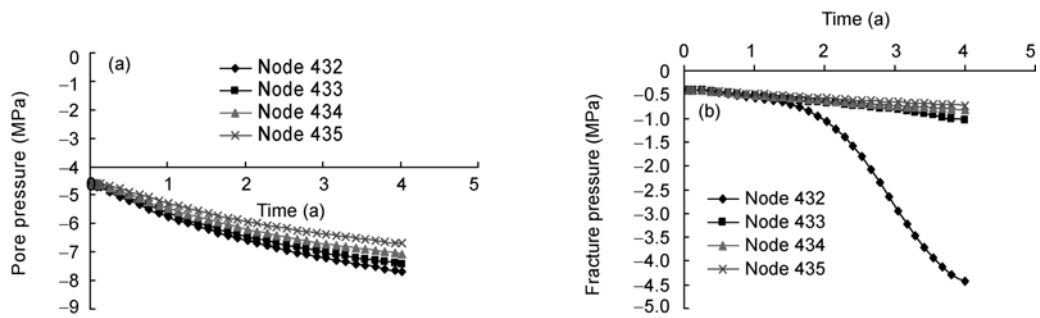


图 12 工况 1 孔(裂)隙水压力-时间曲线

(a) 孔隙水; (b) 裂隙水

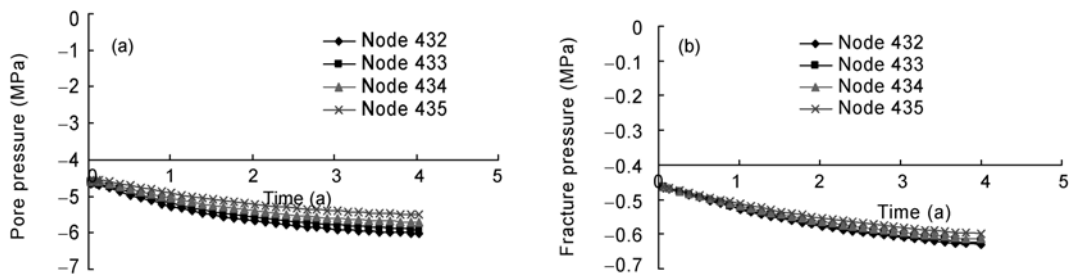


图 13 工况 2 孔(裂)隙水压力-时间曲线

(a) 孔隙水; (b) 裂隙水

故工况 1 的负孔(裂)隙水压力上升较高, 特别是在应力腐蚀和压力溶解效应最强烈的 432 点, 该处的负裂隙水压力达到很大的值. 在 4 a 时 432 点的负孔(裂)隙水压力分别为, 工况 1: -7.78 MPa, -4.52 MPa; 工况 2: -6.03 MPa, -0.65 MPa. 图 14 和 15 是工况 1, 2 在 4 a 时贮存罐周围 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 范围内孔(裂)隙水压力

等值线的分布. 从中看到, 由于工况 1 受到应力腐蚀和压力溶解的影响, 与工况 2 相比, 其中的裂隙水压力在贮存罐周围呈现明显的增高区域.

图 16 是两种工况在 4 a 时计算域中的孔隙水流速和裂隙水流速矢量分布. 看到由于工况 1 考虑了应力腐蚀和压力溶解效应, 与工况 2 相比, 其中的裂隙

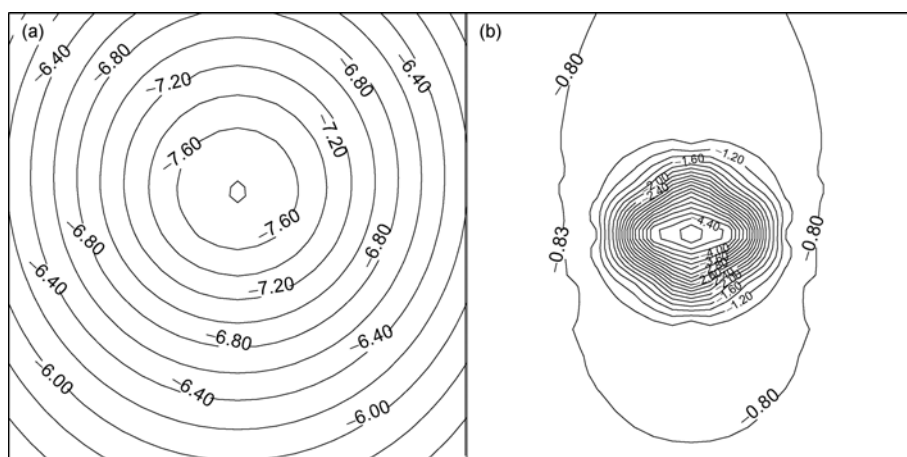


图 14 工况 1 中 4 a 时 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 区域中的孔(裂)隙水压力等值线(MPa)

(a) 孔隙水; (b) 裂隙水

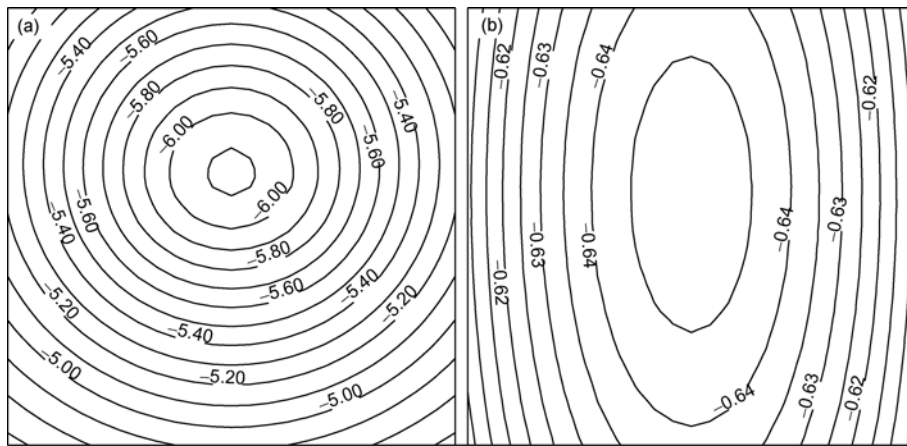


图 15 工况 2 中 4 a 时 2 m × 2 m 区域中的孔(裂)隙水压力等值线(MPa)
(a) 孔隙水; (b) 裂隙水

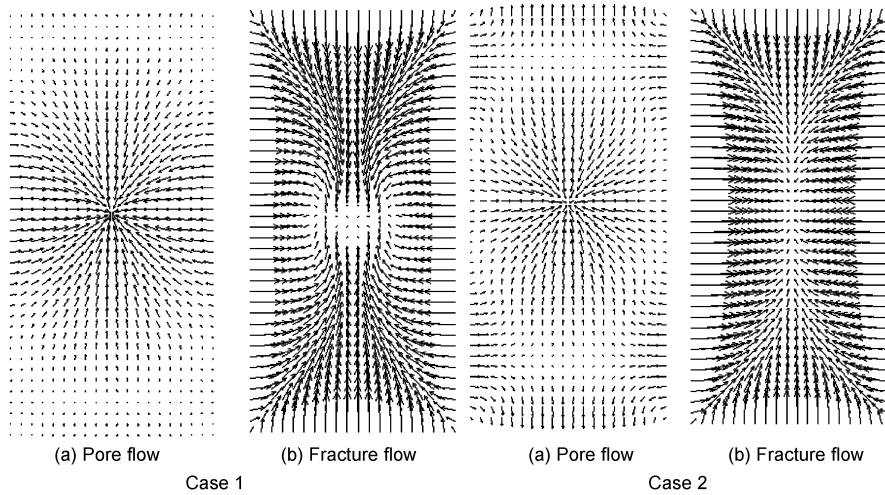


图 16 4 a 时计算域中的孔(裂)隙水流速矢量

水流速矢量有显著的不同, 特别是在贮存罐附近. 注意两种流速矢量的比例不同, 其为 1: 0.5. 以 432 点为例, 孔隙水流速和裂隙水流速分别为, 工况 1: 2.80×10^{-8} m/s, 4.94×10^{-9} m/s; 工况 2: 3.01×10^{-8} m/s, 3.11×10^{-8} m/s.

由于不考虑负的孔(裂)隙水压力对应力平衡的影响^[18], 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放热效应, 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 时玻璃固化体右缘中点的水平应力和垂直应力分别为 -0.12 和 -26.72 MPa.

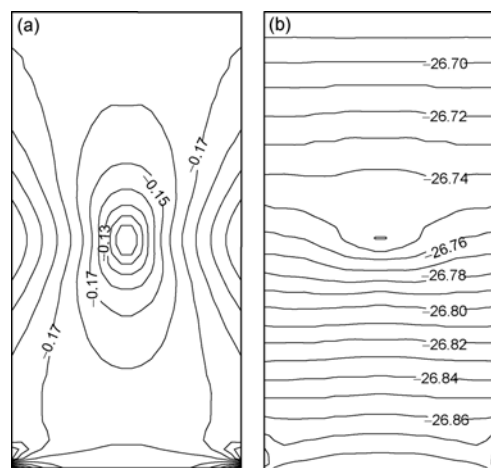


图 17 4 a 时工况 1 计算域中正应力等值线(MPa)
(a) 水平正应力; (b) 垂直正应力

4 结束语

以一个假定的位于非饱和双重孔隙-裂隙岩体中的高放废物地质处置库为例子, 就主要考虑裂隙开度是否随应力腐蚀和压力溶解而变化(同时基岩的孔隙率也作为是否为应力函数的处理)的 2 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、裂隙开度的闭合速率、闭合量、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: 工况 1 和 2 中的温度状态差别不大, 计算终了(4 a

时, 近场的温度可达到 30.0°C~80.0°C; 应力腐蚀引起的闭合速率要高于压力溶解引起的闭合速率 6 个数量级, 且 2 种因素产生的闭合速率随时间先增加后减少, 并趋于稳定; 随着时间的推移裂隙开度由初始值下降并趋于残余值, 而粗糙面接触率亦由初始值上升并趋于其名义值; 作用在裂纹上的拉应力及临界应力均随时间减小, 并趋于常数; 当考虑应力腐蚀和压力溶解时, 与不计该作用时相比近场的负裂隙水压力上升很高, 且其流速矢量场有显著的不同; 但二种工况的岩体中的应力量值及分布差别很小.

参考文献

- 1 Atkinson K. A fracture mechanics study of sub-critical tensile cracking of quartz in wet environments. *Pure Appl Phys*, 1979, 117: 1011-1024
- 2 Dove M. The dissolution kinetics of quartz in sodium chloride solutions at 25°C to 300°C. *Am J Sci*, 1994, 294: 665-712
- 3 Chester S, Lenz C, Chester M, et al. Mechanisms of compaction of quartz sand at diagenetic conditions. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 220: 435-451
- 4 Nara Y, Kaneko K. Study of subcritical crack growth in andesite using the double torsion test. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2005, 42: 521-530
- 5 Robin F. Pressure solution at grain to grain contacts. *Geochim Cosmochim Acta*, 1978, 42: 1383-1389
- 6 Dewers T, Hajash A. Rate laws for water-assisted compaction and stress-induced water-rock interaction in sandstones. *J Geophys Res*, 1995, 100: 13093-13112
- 7 Revil A. Pervasive pressure-solution transfer: A poro-visco-plastic model. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 255-258
- 8 Yasuhara H, Elsworth D, Polak A. Evolution of permeability in a natural fracture: Significant role of pressure solution. *J Geophys Res*, 2004, 109(B3): B03204
- 9 Dove M. Geochemical controls on the kinetics of quartz fracture at subcritical tensile stresses. *J Geophys Res*, 1995, 100: 22349-22359
- 10 Yasuhara H, Elsworth D. Compaction of a rock fracture moderated by competing roles of stress corrosion and pressure solution. *Pure Appl Geophys*, 2008, 165: 1289-1306
- 11 Taron J, Elsworth D. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.01.007
- 12 张玉军, 张维庆. 裂隙开度的压力溶解对双重孔隙介质热-水-应力耦合影响的有限元分析. *岩土力学*, 2010, 31: 1269-1275
- 13 张玉军, 张维庆. 三维双重孔隙-裂隙介质热-水-应力-迁移耦合模型及其有限元分析. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40: 1426-1436
- 14 张玉军. 遍有节理岩体的双重孔隙介质热-水-应力耦合模型及其有限元分析. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28: 947-955
- 15 Olsson R, Barton N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2001, 38: 317-329
- 16 周维垣, 主编. 高等岩石力学. 北京: 水利电力出版社, 1990. 276-282
- 17 Davis J, Davis D. Stress-dependent permeability: Characterization and modeling. Society of Petroleum Engineers, SPE Paper no. 56813, 1999
- 18 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. DECOVALES III-Task3-Bench Mark Test 1(BMT1)-Subtask BMT1-B, 2002. 1-43