

文章编号: 1000-7598 (2013) 02-0559-09

应力腐蚀和压力溶解引起的裂隙开度-刚度变化对 THMM 耦合过程影响的数值模拟

张玉军¹, 徐 刚¹, 杨朝帅²

(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.中铁隧道集团有限公司 技术中心, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 在使用 Yasuhara 等建立的裂隙开度的应力腐蚀和压力溶解模型的基础上, 考虑裂隙闭合量对裂隙刚度的影响, 针对一个假设的位于非饱和和双重孔隙-裂隙岩体中且有核素泄漏的高放废物地质处置模型, 拟定两种计算工况: (1) 裂隙的刚度系数是裂隙闭合量的线性函数; (2) 裂隙刚度为常数, 进行热-水-应力-迁移耦合的二维有限元数值模拟, 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、核素浓度、裂隙刚度和正应力的变化、分布等情况。结果表明, 两种工况岩体中的温度场、孔(裂)隙水压力、地下水流速、核素浓度无明显差别; 裂隙闭合基本由应力腐蚀产生; 在相同计算时间内两种工况的裂隙闭合量较为接近, 工况 1 略大; 工况 1 中离玻璃固化体越近, 裂隙刚度值越高, 并且在玻璃固化体附近的应力值较大, 且集中程度较高。

关 键 词: 应力腐蚀; 压力溶解; 双重孔隙-裂隙介质; 裂隙刚度; 热-水-应力-迁移耦合分析

中图分类号: O 241

文献标识码: A

Numerical simulation for influence of fracture aperture-stiffness change caused by stress corrosion and pressure solution on T-H-M-M coupling processes

ZHANG Yu-jun¹, XU Gang¹, YANG Chao-shuai²

(1.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Technical Centre, China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: On the basis of using the models of stress corrosion and pressure solution established by Yasuhara et al, the effect of fracture aperture closure on the fracture stiffnesses is considered. Aiming at a hypothetical model for geological disposal of nuclear waste in an unsaturated dual-porosity-fractured rock mass from which there is a nuclide leak, two computational conditions are designed: (1) the stiffness coefficients of a fracture are linear functions of magnitude of fracture aperture closure; (2) the stiffness coefficients of a fracture are constants, then the corresponding two-dimensional numerical simulations for the coupled thermo-hydro-mechanical-migratory processes are carried out by using finite element method; and the states of temperatures, rates and magnitudes of fracture aperture closure, pore and fracture pressures, flow velocities of underground water, nuclide concentrations, fracture stiffnesses and normal stresses in the rock masses are investigated. The results show: there are no obvious differences between the temperature fields, pore and fracture pressures, flow velocities of underground water, nuclide concentrations in the rock masses of two cases; fracture aperture closure is produced mainly by stress corrosion; the magnitudes of fracture aperture closure in two cases are closer each other at the same computation time; and those of case 1 are slightly larger; in the rock mass of case 1, the nearer the vitrified waste is, the higher the fracture stiffnesses are; and the larger stress values and higher stress concentrations occur in the vicinity of the vitrified waste.

Key words: stress corrosion; pressure solution; dual-porosity-fracture medium; fracture stiffness; coupled thermo-hydro-mechanical-migratory analysis

1 引 言

众所周知, 裂隙对于控制不连续岩体的力学及

水理性质起着关键性的作用^[1-2]。当经受外部荷载时, 与围岩相比, 裂隙中要聚集更多的物理和化学响应, 从而呈现出较明显的水力传导性和力学柔性。

收稿日期: 2011-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51079145); 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (No. 2010CB732101)。

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

作为产生在岩体裂(孔)隙中的两种化学—力学过程,应力腐蚀和压力溶解已经被人们研究许多年了^[3-5],并近来尝试将其应用于增强的地热系统、CO₂地质封存和高放核废料的深埋处置等工程领域。如在相关的数值模拟中,Taron等^[6]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^{3D}分析了天然裂隙岩体的渗透率变化机制。Taron等^[7]还提出了一种结合考虑粗糙裂隙中弹性变形、化学-力学蠕变、矿物反应和剪切膨胀的计算方法,并使用于具有动态渗透率的工程地热库中力学-化学耦合过程的数值模拟。笔者等^[8]也曾引入Yasuhara等^[9]建立的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和双重孔隙-裂隙岩体中的高放废物地质处置库,进行了热-水-应力耦合的二维有限元分析。

在上述计算工作中,主要是计入了应力腐蚀和压力溶解对裂隙的孔隙率及渗透系数的贡献,并没有涉及这两个因素对裂隙力学性质的影响。然而在研究中发现,压力溶解会增加裂隙的刚度^[7, 10](笔者认为,应力腐蚀也如此),从而改变不连续岩体的宏观变形特征,并且对多场耦合过程产生力作用。

为了探讨这种应力腐蚀和压力溶解引起的力作用,笔者以文献[8]的工作为基础-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),针对一个假定位于非饱和和双重孔隙-裂隙介质中的高放废物地质处置库模型,拟定两种工况:
(1)裂隙的刚度系数是应力腐蚀和压力溶解引起的裂隙闭合量的线性函数;(2)裂隙刚度为常数,在一定的初始温度、孔隙水压力、岩体应力和核素释放强度条件下,进行热-水-应力-迁移耦合有限元分析,考察了处置库模型近场的温度、孔隙水压力、

水流速、饱和度、核素浓度和应力的分布与变化,得出了若干规律性认识。

2 裂(孔)隙渗透特性的修正

2.1 应力腐蚀对裂隙开度的影响

如图1所示,假定脆性材料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^[11]对石英材料定义其中I型裂纹的扩展速率为

$$v_{\text{Si-O}} = A_{\text{H}_2\text{O}} \exp\left(\frac{-\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}}{RT}\right) \exp(b_{\text{H}_2\text{O}}^* K_1) (\theta_{\text{Si-O}}^{\text{H}_2\text{O}}) + A_{\text{OH}^-} \exp\left(\frac{-\Delta H_{\text{OH}^-}}{RT}\right) \exp(b_{\text{OH}^-}^* K_1) (\theta_{\text{Si-O}}^{\text{OH}^-}) \quad (1)$$

式中: $v_{\text{Si-O}}$ 为因化学溶解引起的I型裂纹扩展速率; $A_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 A_{OH^-} 为由试验确定的因子,与温度有关; $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 ΔH_{OH^-} 为活化焓; R 为气体常数; T 为温度; $b_{\text{H}_2\text{O}}^*$ 、 $b_{\text{OH}^-}^*$ 为由试验确定的常数,其与裂纹尖端的几何条件有关; K_1 为应力强度因子; $\theta_{\text{Si-O}}^{\text{H}_2\text{O}}$ 、 $\theta_{\text{Si-O}}^{\text{OH}^-}$ 为具有分子水或氢氧根离子的Si-O反应的组成分数,符合 $\theta_{\text{Si-O}}^{\text{H}_2\text{O}} + \theta_{\text{Si-O}}^{\text{OH}^-} = 1$,并且在低pH值时有 $\theta_{\text{Si-O}}^{\text{H}_2\text{O}} = 1$ 、 $\theta_{\text{Si-O}}^{\text{OH}^-} = 0$,在高pH值时有 $\theta_{\text{Si-O}}^{\text{H}_2\text{O}} = 0$ 、 $\theta_{\text{Si-O}}^{\text{OH}^-} = 1$ 。则Yasuhara等^[9]给出裂隙力学开度的应力腐蚀闭合速率为

$$\frac{dE^s}{dt} = -(1 - R_c) v_{\text{Si-O}} \quad (2)$$

$$\text{而} \quad K_1 \approx \sigma_t \sqrt{2\pi r} \quad (3)$$

$$\sigma_t = -\frac{(1-2\mu)}{2} \sigma_a \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\bar{R}}{R_c} \bar{\sigma} \quad (5)$$

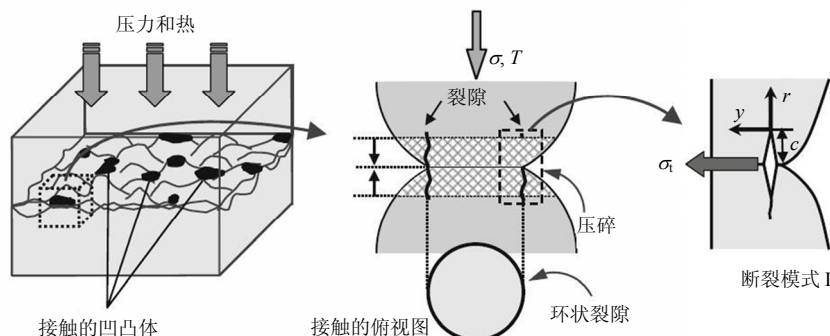


图1 微裂纹传播引起的裂隙压缩^[9]

Fig.1 Schematic of fracture compaction induced by microcrack propagation^[9]

式中： r 为沿由 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 为材料的泊松比； σ_t 为由 σ_a 引起的拉应力，其在裂隙的接触边缘达到最大值； σ_a 为作用在裂隙接触面积上的真实压应力； $\bar{\sigma}$ 为平均的宏观有效应力； \bar{R} 为裂隙的名义面积（可取单位值）； R_c 为裂隙的接触面积，并且 $R_c \leq \bar{R}$ ， R_c 由下式求算：

$$E^s = E_t + (E_0 - E_t) \exp[-(R_c - R_{c0})a] \quad (6)$$

式中： E^s 、 E_t 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

$$E_{t+\Delta t}^s = E_t^s + \frac{dE^s}{dt} \Delta t \quad (7)$$

2.2 压力溶解对裂隙开度的影响

Yasuhara 等^[9]定义了物质的溶解速率为

$$\frac{dM_{diss}}{dt} = \frac{3\pi V_m^2 (\sigma_a - \sigma_c) k_+ \rho_g d_c^2}{4RT} \quad (8)$$

式中： dM_{diss}/dt 为从裂隙界面上进入溶液中的溶解质量速率； V_m 为固体的摩尔体积； σ_c 为临界应力，当 $\sigma_a = \sigma_c$ 时体系达到平衡，反应停止； k_+ 为固体的溶解速率常数； ρ_g 为固体的密度； d_c 为粗糙面接触的直径。

而 $k_+ = k_+^0 \exp(-E_a / RT)$ (9)

$$\sigma_c = \frac{E_m(1 - T/T_m)}{4V_m} \quad (10)$$

式中： k_+^0 为常数因子； E_a 为活化能； E_m 和 T_m 分别为熔化热和熔化温度。

则裂隙力学开度的压力溶解闭合速率为

$$\frac{dE^p}{dt} = -\frac{dM_{diss}}{dt} \frac{1}{\rho_g} \frac{1 - R_c}{(\pi/4)d_c^2} = -\frac{3V_m^2 k_+^0 (1 - R_c) (\sigma_a - \sigma_c)}{RT} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

从而裂隙力学开度因压力溶解的演化律亦为

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

2.3 裂隙渗透系数

设岩体中裂隙的间距为 s ，而单条裂隙开度为

$$E_{t+\Delta t} = \left(E_0 + \sum_{\Delta t} dE^s + \sum_{\Delta t} dE^p \right) \quad (13)$$

故单条裂隙的水力开度为^[12]

$$e_{t+\Delta t} = \frac{E_{t+\Delta t}^2}{JRC^{2.5}} \quad (14)$$

式中： JRC 为裂隙粗糙度系数。

从而等效后裂隙岩体的渗透系数为^[13]

$$K_{t+\Delta t} = \frac{g e_{t+\Delta t}^3}{12\nu s} \quad (15)$$

式中： g 为重力加速度（9.81 m/s²）； ν 为运动黏度（对于 20℃ 的纯水其值为 1.0×10^{-6} m²/s）。

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^[14]提出的经验公式进行如下修正：

$$\phi = \phi_t + (\phi_0 - \phi_t) \exp(a\sigma'_m) \quad (16)$$

$$k = k_0 \exp[c(\phi/\phi_0 - 1)] = F_{\phi k} k_0 \quad (17)$$

式中： ϕ_0 、 k_0 分别为 0 应力状态的基岩孔隙率和渗透系数； ϕ_t 为高应力状态下的残余基岩孔隙率； σ'_m 为平均有效应力； a 、 c 分别为由试验确定的参数； $F_{\phi k}$ 为孔隙渗透系数的修正因子。

3 裂隙刚度的修正

Bandis 等^[15]为节理闭合提出的本构模型为

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (18)$$

式中： K_{ni} 、 K_n 分别为初始及现时的法向刚度； σ_n 为施加在节理上的法向应力； V_m 为最大的可能闭合量。

从式 (18) 看出，当 K_{ni} 和 σ_n 为常数时， K_n 随着 V_m 的降低而增大。而在应力腐蚀和压力溶解的作用下， V_m 是持续减小的。

为了简化并定性分析问题，笔者假设了如下的裂隙刚度系数与应力腐蚀和压力溶解引起的裂隙闭合量 ΔE 的线性关系式为

$$K_n = K_{ni} \left(1 + \lambda \frac{\Delta E}{E_0} \right) \quad (19)$$

$$K_s = K_{si} \left(1 + \chi \frac{\Delta E}{E_0} \right) \quad (20)$$

$$\Delta E = \sum_{\Delta t} dE^s + \sum_{\Delta t} dE^p \quad (21)$$

式中： λ 、 χ 为经验系数，本计算中分别取 1 和 0.5。

将上述裂(孔)隙开度、渗透率和刚度系数的修正式代入笔者所建立的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力-迁移耦合模型及有限元分析程序中^[16-17]。

4 算 例

如图 2 所示,在地下一定深处埋入一个圆柱状核废料玻璃固化体,其周围是非饱和的双重孔隙-裂隙石英岩体。将该模型近似简化平面应变问题。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 432~436。其边界条件为: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为 -4.59 MPa、裂隙水压力为 -0.46 MPa(二者相异的原因在于处置洞开挖和回填时孔隙及裂隙渗流场受到扰动不同)及温度 20℃ 固定。岩体中发育有水平及垂直两组裂隙,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(该表中除 R_{c0} 、 \bar{R} 和 JRC 外,其余参数取自文献[9])。初始状态时,岩体的温度均为 20℃。核废物以 1 000 W 的不变功率释放热量,时间经历了 4 a。

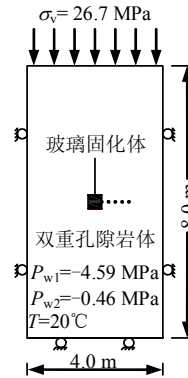


图 2 计算模型
Fig.2 Computation model

表 1 主要计算参数

Table 1 Main computational parameters

介质	重度 ρ /(kN/m ³)	孔隙率 ϕ	渗透系数 k_1 /(m/s)	弹性模量 E /GPa	泊松系数 μ	比热 C /(kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	热膨胀系数 β /°C ⁻¹	导热系数 λ /(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
岩石	26.7	0.11	1.24×10^{-13}	37.0	0.30	1.0	8.8×10^{-6}	2.8
固化体	25.0	0.00	1.00×10^{-27}	53.0	0.25	0.7	1.0×10^{-5}	5.3

表 2 裂隙组的计算参数

Table 2 Parameters for fracture sets used in calculation

裂隙类型	间距 S /m	连通率 l	倾角 θ /(°)	法向刚度 k_n /(MPa/m)	切向刚度 k_s /(MPa/m)	孔隙率 ϕ	渗透系数 k_2 /(m/s)
水平裂隙	0.2	1	0	1 000	500	0.01	9.7×10^{-9}
垂直裂隙	0.2	1	90	500	250	0.01	9.7×10^{-9}

表 3 应力腐蚀和压力溶解的计算参数

Table 3 Parameters for stress corrosion and pressure solution

参数名称	数值	参数名称	数值
经验常数 a	5.0	熔化热 $E_m / J \cdot mol^{-1}$	8.57×10^3 (石英)
初始粗糙面接触率 R_{c0}	0.1	H ₂ O 的活化焓 $\Delta H_{H_2O} / J \cdot mol^{-1}$	6.6×10^4
名义粗糙面接触率 \bar{R}	1.0	OH ⁻ 的活化焓 $\Delta H_{OH^-} / J \cdot mol^{-1}$	8.27×10^4
裂隙粗糙度系数 JRC	2.67	参考的溶解速率常数 $k^0 / mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	1.59
因子 A_{H_2O} / ms^{-1}	$1.12 \times 10^{-4} T$	到裂纹尖端的微小距离 r / m	1.0×10^{-6}
因子 A_{OH^-} / ms^{-1}	$2.51 \times 10^3 T$	气体常数 $R / J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	8.31
初始开度 E_0 / m	0.012 5	熔化温度 T_m / K	1 883 (石英)
残余开度 E_r / m	0.002 5	摩尔体积 $V_m / m^3 \cdot mol^{-1}$	2.27×10^{-5} (石英)
常数 $b_{H_2O}^* / N^{-1} \cdot m^{3/2}$	2.69×10^{-5} (石英)	组成分数 $\theta_{SiO_2}^{H_2O}$	0.999 21 (PH=7)
常数 $b_{OH^-}^* / N^{-1} \cdot m^{3/2}$	1.78×10^{-5} (石英)	组成分数 $\theta_{SiO_2}^{OH^-}$	0.000 79 (PH=7)
活化能 $E_a / J \cdot mol^{-1}$	7.0×10^4 (石英)		

孔隙介质和裂隙介质的水分特性曲线符合 Van Genuchten 模型,即

$$s_w = (s_{ws} - s_{wr})(1 + |\alpha \psi|^n)^{-m} + s_{wr} \quad (22)$$

式中:对于孔隙介质: $\alpha = 3.86 \times 10^{-6} m^{-1}$, $n = 1.41$;

对于裂隙介质： $\alpha = 5.26 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ， $n = 2.55$ ； $m = 1 - 1/n$ ； 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

$$k_{rw} = s_w^{2.0} \tag{23}$$

取孔隙及裂隙介质的温度梯度水分扩散系数相同，其为

$$D_t = 2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s } ^\circ\text{C}$$

贮存罐为孔隙岩体中的源项，某种放射性核素的释放强度为 $Q_c = 1.44 \times 10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。设与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 τ_1 、 τ_2 分别为 0.4、0.8，纵向弥散度 α_{1L} 、 α_{2L} 分别为 1.0、2.0 m，横向弥散度 $\alpha_{1T} = \alpha_{1L} / 10$ ，分子扩散系数 α_{1m} 、 α_{2m} 分别为 1.0×10^{-9} 、 $2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ ，分配系数 K_{d1} 、 K_{d2} 分别为 8.0、5.3 ml/g，干密度 ρ_{d1} 、 ρ_{d2} 分别为 2.3、2.1 g / cm^3 ，参数 $\bar{\omega}$ 为 100.0 m^{-2} ，放射性核素的衰减常数 $\chi = \ln 2 / T_{\text{half}}$ ，其中 T_{half} 为半衰期，取为 1 000 a。取计算的时间步长为 100 000 s。

针对前述的两种裂隙开度变化工况，计算了岩体中的温度、位移、孔隙水压力、核素浓度和应力等的变化及分布情况，其主要结果及分析如下。

工况 1 和工况 2 两种条件下计算域中的温度变化基本相同。以工况 1 为例，432~435 各点处的温度随时间的变化曲线见图 3。由图可知，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 432~435 各点的温度依次为 77.8 $^\circ\text{C}$ 、62.0 $^\circ\text{C}$ 、52.5 $^\circ\text{C}$ 和 45.7 $^\circ\text{C}$ 。

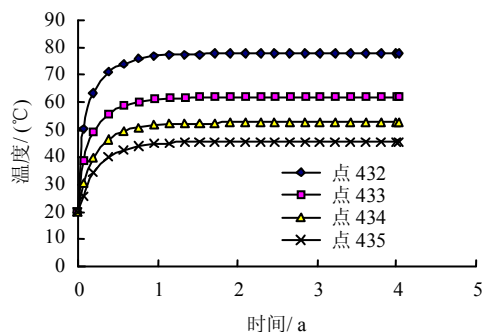


图 3 工况 1 温度-时间曲线
Fig.3 Temperatures versus time curves for Case 1

图 4、5 分别是工况 1 中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，工况 2 的情形与此相似。

当到达峰值时，该点水平裂隙和垂直裂隙的 dE^s / dt ，工况 1 分别为 -3.09×10^{-10} 、 $-1.14 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ ；工况 2 分别为 -3.03×10^{-10} 、 $-1.13 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 。而该点的 dE^p / dt 仅在水平裂隙中产生，其相对于工况 1、2 的峰值分别为 -8.30×10^{-16} 、 $-8.15 \times 10^{-16} \text{ m/s}$ 。可见裂隙闭合主要由应力腐蚀控制。图 6、7 分别表现了工况 1 中玻璃固化体右缘中点处水平和垂直裂隙开度、粗糙面接触率随时间的演化，工况 2 的情形与此相似。水平裂隙和垂直裂隙的开度缩减达到残余值（粗糙面接触率上升到 1）的时间工况 1 为 2.41、3.93 a，工况 2 为 2.67、4.0 a。根据分析结果来看，在同一时间工况 1 中应力腐蚀和压力溶解造成的裂隙闭合量比工况 2 的相应值略大一点，两者相差不明显。其原因在于裂隙闭合基本由应力腐蚀产生，且其主要完成于前面的约 1~2 a 内，在此期间两种工况岩体中对应力腐蚀起控制作用的应力强度因子 K_I 的差别不大，如 1 a 和 2 a 时，玻璃固化体右缘中点的 K_I 为，工况 1 为 0.208、0.099 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ；工况 2 为 0.186、0.069 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

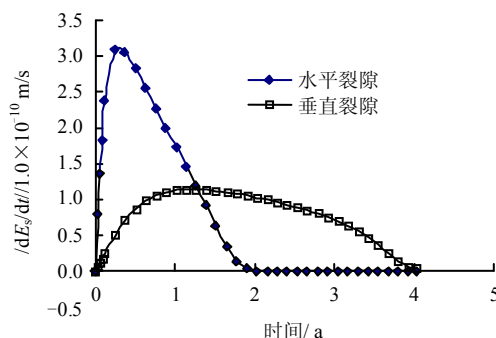


图 4 玻璃固化体右缘中点因应力腐蚀引起的 $|dE^s / dt|$ -时间曲线

Fig.4 $|dE^s / dt|$ caused by stress corrosion versus time at middle point of right margin of vitrified waste

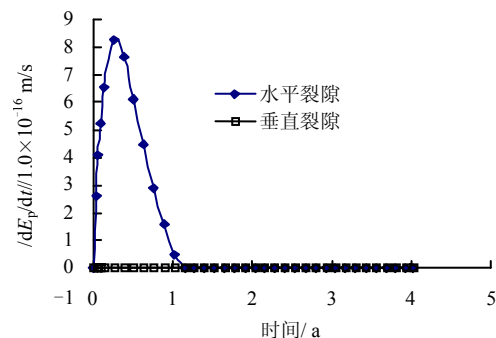


图 5 玻璃固化体右缘中点因压力溶解引起的 $|dE^p / dt|$ -时间曲线

Fig.5 $|dE^p / dt|$ caused by pressure solution versus time at middle point of right margin of vitrified waste

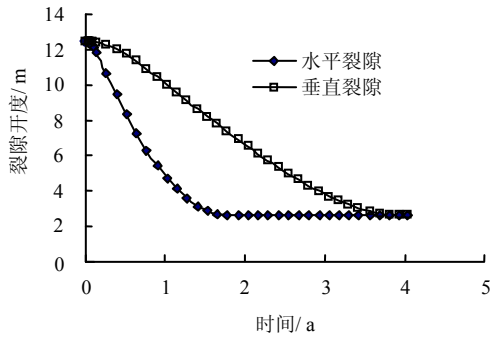


图6 玻璃固化体右缘中点裂隙开度-时间曲线
Fig.6 Fracture apertures versus time at middle point of right margin of vitrified waste

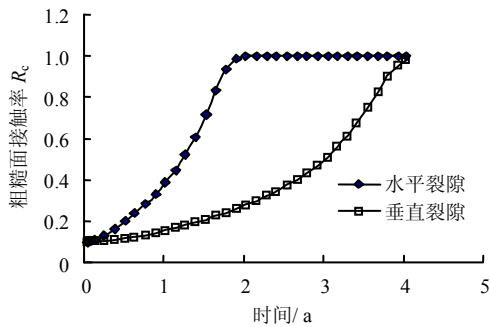


图7 玻璃固化体右缘中点粗糙面接触率-时间曲线
Fig.7 Contact-area ratios versus time at middle point of right margin of vitrified waste

图8为工况1中432~435各点处的孔(裂)隙水压力随时间的变化曲线,工况2的情形与此相似。由图可见,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4a时432点的负孔(裂)隙水压力工况1分别为-8.77、-31.09 MPa;工况2分别为-8.45、-29.45 MPa。图9为工况1在4a时贮存罐周围2m×2m范围内孔(裂)隙水压力等值线的分布。由图可见,由于受到应力腐蚀和压力溶解的影响,其中的裂隙水压力在贮存罐周围呈现明显的增高区域。

图10为工况1在4a时计算域中的孔隙水流速和裂隙水流速矢量分布,工况2的情形与此相似。以432点为例,孔隙水流速和裂隙水流速工况1分别为 4.36×10^{-8} 、 2.66×10^{-8} m/s;工况2分别为 4.26×10^{-8} 、 2.85×10^{-8} m/s。

图11为工况1中432~435各点处的孔隙核素浓度和裂隙核素浓度随时间的变化曲线,工况2的情形与此相似。到4a时两种工况中432~435各点的核素浓度孔隙岩体分别为46.86/47.32、40.60/41.20、34.31/34.32、28.28/27.63;裂隙介质分别为17.24/17.72、14.88/14.80、12.10/11.54、9.81/9.05(“/”的上、下分别是工况1、2的数据,

其单位是 10^{-3} mol/m^3)。图12为工况1中4a时贮存罐周围2m×2m范围内的孔隙核素浓度和裂隙核素浓度等值线分布。

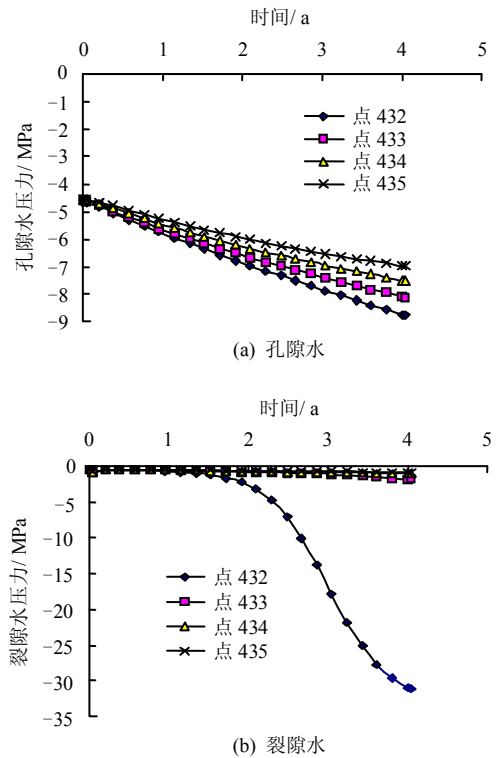


图8 工况1孔(裂)隙水压力-时间曲线
Fig.8 Pore and fracture water pressures versus time curves for Case 1

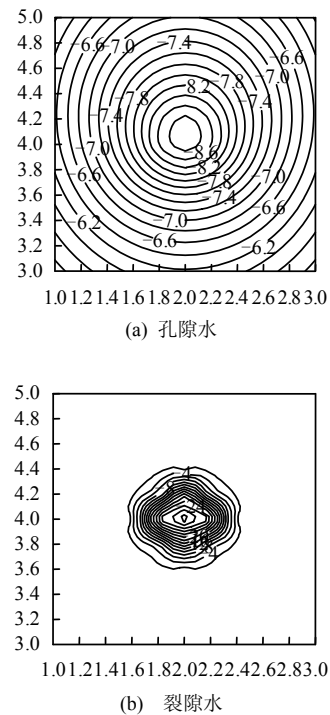


图9 工况1中4a时2m×2m区域中的孔(裂)隙水压力等值线(单位:MPa)
Fig.9 Contours of pore and fracture pressures in a 2m×2m area at 4 years for Case 1 (unit:MPa)

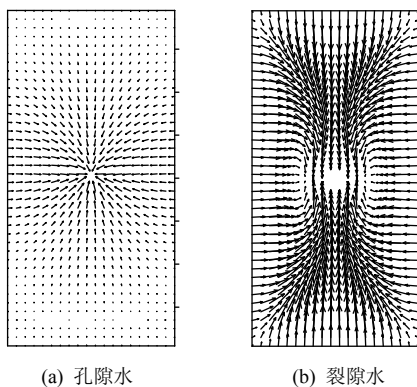


图 10 工况 1 中 4 a 时计算域中的孔(裂)隙水流速矢量
Fig.10 Flow vectors of pore and fracture water in calculation domain at 4 years

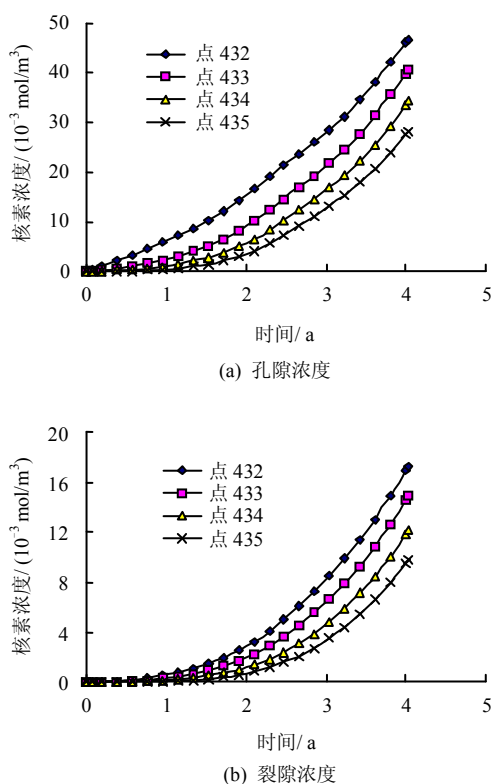


图 11 工况 1 中 4 a 时岩体中核素浓度-时间曲线
Fig.11 Nuclide concentrations versus time curves for Case 1

图 13 为工况 1 中 4 a 时的两组裂隙法向刚度 K_{n1} 、 K_{n2} 的等值线分布(切向刚度的情形与此相似,而工况 2 中裂隙刚度为常量)。由图可见,离玻璃固化体越近,裂隙刚度值越高,其原因在于玻璃固化体附近的应力集中程度较高,导致在应力腐蚀和压力溶解作用下裂隙闭合量较大,故增大了裂隙的刚度。而因裂隙刚度的提高,也增加了岩体的等效变形模量,使得在耦合的热、水、力环境中岩体应力进一步升高。图 14 为工况 1 中 432、434 点处的裂隙刚度随时间的变化曲线。

图 15 为工况 1、2 中 432~435 各点处的垂直正应力随时间的变化曲线(水平正应力的情形与此类似)。由图可见,工况 1 中的应力随时间呈现增长趋势(裂隙刚度提高的缘故);而工况 2 中的应力在开始的约 1 a 有轻微下降,之后渐趋稳定(温度膨胀效应引起)。

计算中不考虑负的孔(裂)隙水压力对应力平衡的影响^[18]。图 16 为两种工况中 4 a 时计算域中的正应力等值线。由图可见,由于工况 1 中裂隙刚度随裂隙闭合量而线性增长,而工况 2 中裂隙刚度为常数,使得两种工况的计算域中的应力场有显著差

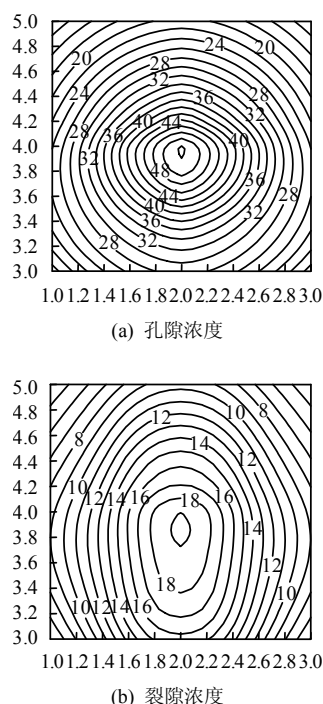


图 12 工况 1 中 4 a 时 2 m x 2 m 区域中核素浓度等值线 (单位: 10^{-3} mol/m³)
Fig.12 Contours of nuclide concentration in a 2 m x 2 m area at 4 years for Case 1 (unit: 10^{-3} mol/m³)

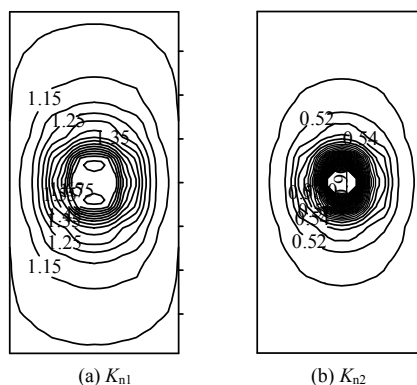
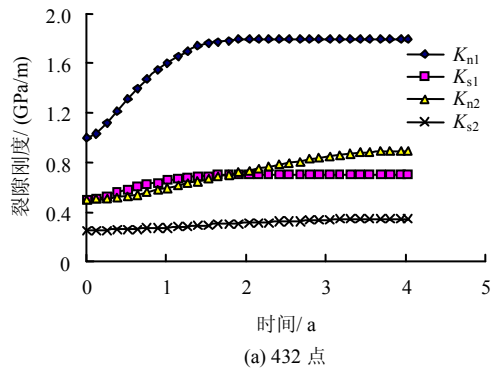
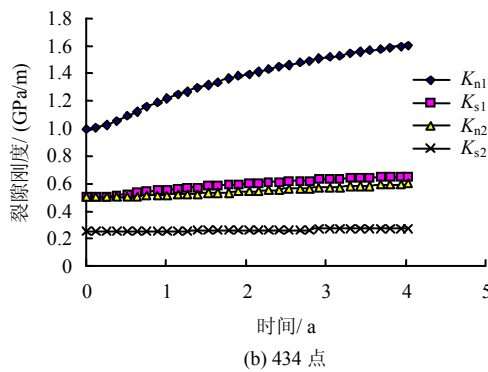


图 13 工况 1 中 4 a 时裂隙法向刚度的等值线 (单位: GPa/m)
Fig.13 Normal stiffness contours of fracture at 4 years for Case 1 (unit: GPa/m)



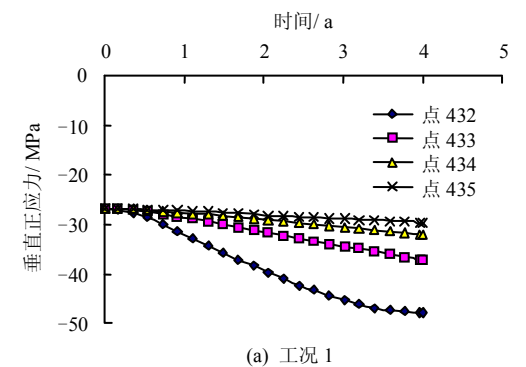
(a) 432 点



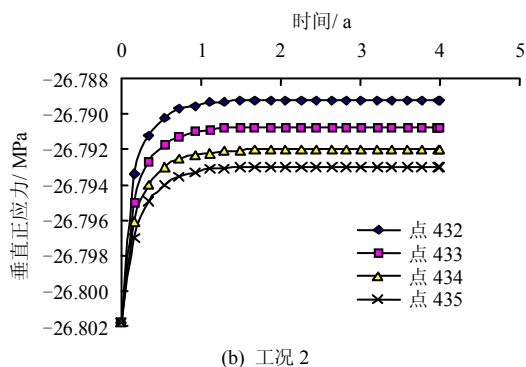
(b) 434 点

图 14 工况 1 中 4 a 时裂隙刚度-时间曲线

Fig.14 Fracture stiffness versus time curves for Case 1



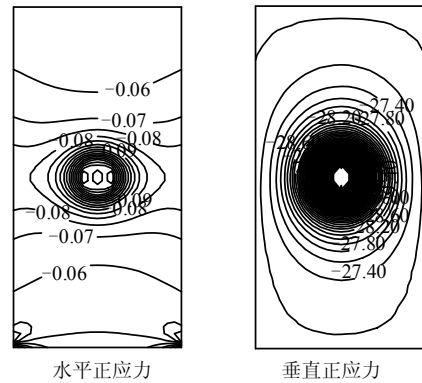
(a) 工况 1



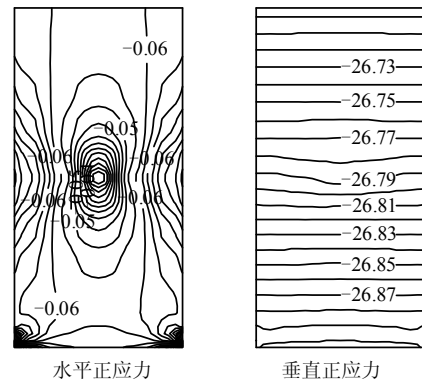
(b) 工况 2

图 15 垂直正应力随时间的变化曲线

Fig.15 Normal stresses versus time curves



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图 16 4 a 时计算域中正应力等值线(单位: MPa)

Fig.16 Normal stress contours in calculation domain at 4 years (unit: MPa)

异。如到 4 a 时玻璃固化体右缘中点的水平正应力和垂直正应力工况 1 分别为 -0.15、-47.86 MPa; 工况 2 分别为 -0.04、-26.79 MPa。

5 结 论

(1) 两种工况岩体中的温度场基本相同; 孔隙水压力、地下水流速、核素浓度无明显差别; 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。

(2) 在相同时间内两种工况的裂隙闭合量较为接近, 工况 1 略大, 其原因在于岩体中对应力腐蚀起控制作用的应力强度因子的差别不大。

(3) 工况 1 中形成了裂隙刚度场, 离玻璃固化体越近, 裂隙刚度值越高;

(4) 两种工况的计算域中的应力场有显著不同, 工况 1 的玻璃固化体附近的应力值较大, 且集中程度较高。

参 考 文 献

[1] GOODMAN J. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[M]. New York: West Publishing,

- 1976.
- [2] WALSH J. Effect of cracks on uniaxial elastic compression of rocks[J]. **Geophys. Res.**, 1965: 399—411.
- [3] NARA Y, KANEKO K. Study of subcritical crack growth in andesite using the double torsion test[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2005, 42(4): 521—530.
- [4] REVIL A. Pervasive pressure-solution transfer: A poro-visco-plastic model[J]. **Geophys. Res. Lett.**, 1999, 26: 255—258.
- [5] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A. Evolution of permeability in a natural fracture: Significant role of pressure solution[J]. **J. Geophys. Res.**, 2004, 109(B3), B03204, doi:10.1029/2003JB002663.
- [6] 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:10.1016/j.ijrmms.2009.01.007.
- [7] 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: 1339—13481.
- [8] ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing, YANG Chao-shuai. FEM analyses for influences of stress corrosion and pressure solution on THM coupling in dual-porosity rock mass[J]. **Sci. China Tech. Sci.**, 2011, 54(7): 1748—1756.
- [9] YASUHARA H, ELSWORTH D. Compaction of a rock fracture moderated by competing roles of stress corrosion and pressure solution[J]. **Pure Appl. Geophys.**, 2008, 165: 1289—1306.
- [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] DOVE M. Geochemical controls on the kinetics of quartz fracture at subcritical tensile stresses[J]. **J. Geophys. Res.**, 1995, 100(B11): 22349—22359.
- [12] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 317—329.
- [13] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. **Water Resour. Res.**, 1969, 5(6): 1273—1289.
- [14] DAVIS J, DAVIS D. Stress-dependent permeability: characterization and modeling. Society of Petroleum Engineers[R]. [S. l.]: SPE, 1999.
- [15] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock mass[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1985, 22(3): 121—140.
- [16] 张玉军, 张维庆. 双重孔隙介质 THMM 耦合模型及其有限元分析[J]. **力学学报**, 2010, 42(4): 660—669. ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing. Coupled thermo-hydro-mechanical-migratory model and FEM analyses for dual-porosity medium[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2010, 42(4): 660—669.
- [17] 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[J]. **岩土力学**, 2010, 31(41): 1269—1275. ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing. Finite element analysis of influence of pressure solution of fracture aperture on T-H-M coupling in dual-porosity medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(41): 1269—1275.
- [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[R]. [S. l.]: [s. n.], 2002: 1—43.