

考虑饱和度修正的应力腐蚀和压力溶解作用 热-水-应力耦合过程有限元分析

张维庆¹, 张玉军²

(1. 中铁隧道勘测设计院有限公司, 天津 300133; 2. 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: 针对笔者开发的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力 (T-H-M) 耦合二维有限元分析程序中使用的应力腐蚀和压力溶解模型, 引入水饱和度修正因子。以一个假设的位于含水地层中的高放废物地质处置模型, 拟定 3 种初始裂隙水饱和度的计算工况 ($S_{w20}=1.0、0.8、0.2$) 进行热-水-应力耦合的数值模拟, 考察岩体中的温度、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。结果显示, 随着初始裂隙水饱和度的由高值到低值, 应力腐蚀和压力溶解产生的闭合速率从大变小, 裂隙开度由初始值趋于残余值, 粗糙面接触率由初始值趋于其名义接触率的时间也增加, 裂纹应力强度因子的下降亦变慢; 近场的裂(孔)隙水压力的变化、分布及其流速矢量场的形态有明显的不同; 3 种工况的岩体中的应力量值及分布的差别不大。

关 键 词: 应力腐蚀; 压力溶解; 饱和度修正; 双重介质; 热-水-应力(T-H-M)耦合; 有限元分析

中图分类号: O242.21

文献标志码: A

Finite element analysis of thermo-hydro-mechanical coupling processes under stress corrosion and pressure solution considering saturation correction

ZHANG Wei-qing¹, ZHANG Yu-jun²

(1. China Railway Tunnel Survey & Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300133, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: For the models of stress corrosion and pressure solution used in the 2D finite element method(FEM) code of thermo-hydro-mechanical coupling analysis for dual-porosity medium developed by the authors, a correction factor for water saturation is introduced. Aiming at a hypothetical model for geological disposal of nuclear waste located at a water-bearing stratum, three computation conditions with different initial fracture saturations were designed ($S_{w20}=1.0、0.8、0.2$), then the corresponding two-dimensional numerical simulation for the coupled thermo-hydro-mechanical processes were carried out; and the states of temperatures, rates and magnitudes of aperture closure, pore and fracture pressures, flow velocities and stresses in the rock mass were investigated. The results show: With the change of initial fracture saturation from high value to low value, the closure rates caused by stress corrosion and pressure solution vary from fast to slow, and the times of fracture aperture tending to its residual value and contact-area ratio of asperity tending to its nominal area from their initial values also increase, as well as the drop in stress intensity factors slows down; the changes and distributions of fracture and pore pressures in near-field as well as the states of flow vectors have obvious distinctions; the magnitudes and distributions of stresses within the rock mass in three calculation cases make little difference.

Key words: stress corrosion; pressure solution; saturation correction; dual-porosity medium; thermo-hydro-mechanical coupling; finite element analysis

1 引 言

对于 Yasuhara 等^[1] 提出的描述岩样中裂隙开

度演化现象的应力腐蚀和压力溶解模型, 目前在国内外已经得到了一定的应用, Taron 等^[2] 将压力、温度、化学复杂环境下矿物溶解与沉淀对裂隙张开

收稿日期: 2012-10-17

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

第一作者简介: 张维庆, 男, 1986 年生, 硕士, 助理工程师, 主要从事城市地下铁道工程方面的设计工作。E-mail: lzjtu309@163.com

与闭合的影响进行数学简化,建立了一种独特的 THMC 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^[3-4]尚在 Yasuhara 工作的基础上,发展了一种新的压力溶解模型,并将其应用于工程地热库中力学和化学耦合过程的数值模拟。Ki-Bok Min 等^[5]认为,岩体裂隙渗透率的改变起因于包括压力溶解在内的多因素,其固有地取决于温度、有效应力和化学势,提出加、卸载时单条裂隙开度变化的数学模型。Zheng 等^[6]将压力溶解模型和 PFC^{2D} 软件相结合,开发了一种可表现颗粒介质内化学压缩过程的计算程序,并用于模拟应力作用下非均匀颗粒聚集体的孔隙率与渗透系数的演化。张玉军等^[7]也曾将 Yasuhara 的应力腐蚀和压力溶解模型引入所开发的双重孔隙—裂隙介质热-水-应力耦合分析有限元程序中,对裂隙开度和渗透系数作适时修正,针对以一个假定的位于非饱和节理岩体中的高放废物地质处置库进行了数值分析。张玉军等^[8]还基于上述工作,考虑溶质浓度场的存在,实现了有限元程序的热-水-应力-迁移耦合计算功能,并进行了相应的高放废物地质处置库泄漏核素(溶质)扩散的数值模拟。

然而,以上的工作都有一个前提,即裂隙为水饱和状态,但据 Dove^[9]的研究,当裂隙分别处于液体水并具有一定相对湿度的水蒸气和真空中时(裂隙水的饱和程度不同),裂隙的扩展速率是有明显差别的,这必定影响到应力腐蚀和压力溶解的快慢。对此前述的工作中尚未考虑。为了弥补这一缺陷,笔者进行了下述研究。首先,基于已有的相对湿度和对应饱和度的试验数据,建立相对湿度—饱和度的经验关系式,从而对 Dove 提出的裂隙的扩展速率公式引入了水饱和度修正因子,并将修正后的裂隙扩展速率公式计算值与文献[9]中的相应试验值进行对比,以显示水饱和度修正项的合理性。然后,以一个假定的位于含水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,且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),在相同的初始岩体温度、地应力条件下,取初始孔、裂隙水饱和度 S_{w10} 、 S_{w20} 相同,针对 3 种初始裂隙水饱和度(即有 3 组初始孔、 $S_{w20}=1.0$ 、 0.8 、 0.2 裂隙水压力 p_{w10} 、 p_{w20}) 计算工况,对应力腐蚀和压力溶解的速率进行水饱和度和修正,进行双重孔隙—裂隙介质热-水-应力耦合有限元计算,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,得出了某些新的结论。

2 裂(孔)隙开度及渗透特性

2.1 应力腐蚀作用

如图 1 所示,岩体裂隙中的粗糙面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^[9]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,其与温度有关; $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 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硅-氧反应的组成成分,其符合 $\theta_{\text{Si-O}}^{\text{H}_2\text{O}} + \theta_{\text{Si-O}}^{\text{OH}^-} = 1$, 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^[1]给出裂隙力学开度的应力腐蚀闭合速率为

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

而

$$\begin{aligned} K_1 &\approx \sigma_t \sqrt{2\pi r} \\ \sigma_t &= -\frac{(1-2\mu)\sigma_a}{2} \\ \sigma_a &= \frac{\bar{R}}{R_c} \bar{\sigma} \end{aligned} \quad (3)$$

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_a 为作用在裂隙接触面积上的真实压应力; 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; $\bar{\sigma}$ 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:

$$E^s = E_r + (E_0 - E_r) \exp[-(R_c - R_{c0})a] \quad (4)$$

式中: E^s 、 E_r 、 E_0 分别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。

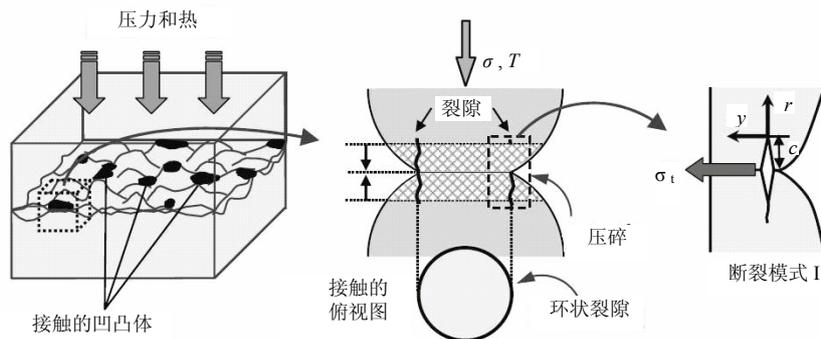


图 1 微裂纹传播引起的裂隙压缩^[1]

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

裂隙力学开度因应力腐蚀的演化律为

$$E_{t+\Delta t}^s = E_t^s + \frac{dE^s}{dt} \Delta t \quad (5)$$

2.2 压力溶解的作用

Yasuhara 等^[1]定义了物质的溶解速率为

$$\frac{dM_{diss}}{dt} = \frac{3\pi V_m^2 (\sigma_a - \sigma_c) k_+ \rho_g d_c^2}{4RT} \quad (6)$$

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

$$\left. \begin{aligned} k_+ &= k_+^0 \exp(-E_a / RT) \\ \sigma_c &= \frac{E_m(1 - T/T_m)}{4V_m} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： k_+^0 为常数因子； E_a 为活化能； E_m 、 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

$$\frac{dE^p}{dt} = -\frac{dM_{diss}}{dt} \frac{1}{\rho_g} \frac{1 - R_c}{(\pi/4)d_c^2} = -\frac{3V_m^2 k_+^0 (1 - R_c) (\sigma_a - \sigma_c)}{RT} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

从而裂隙力学开度因压力溶解的演化律亦为

$$E_{t+\Delta t}^p = E_t^p + \frac{dE^p}{dt} \Delta t \quad (9)$$

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

$$E_{t+\Delta t} = (E_0 + \sum_{\Delta t} dE^s + \sum_{\Delta t} dE^p) \quad (10)$$

故单条裂隙的水力开度^[10]为

$$e_{t+\Delta t} = \frac{E_{t+\Delta t}^2}{JRC^{2.5}} \quad (11)$$

式中： JRC 为裂隙粗糙度系数。

等效后裂隙岩体的渗透系数^[11]为

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

式中： g 为重力加速度 (9.81 m/s^2)； ν 为运动黏度 (对于 20°C 的纯水其值是 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)。

2.4 应力基岩的渗透系数

对于承受应力的基岩的孔隙率和渗透系数，可使用 Davis 等^[12]提出经验公式：

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \phi_r + (\phi_0 - \phi_r) \exp(\alpha \sigma'_m) \\ k &= k_0 \exp[c(\phi/\phi_0 - 1)] = F_{\phi k} k_0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

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_r 为高应力状态下的残余基岩孔隙率； σ'_m 为平均有效应力； α 、 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 裂隙扩展速率的饱和度修正

工程分析中常用空气相对湿度 RH 通过实验室条件下确定的“ $RH-Sat$ ”的关系曲线来估计混凝土孔隙水饱和度，如宋晓冰^[13]曾给出过实测的 $RH-Sat$ 关系数据点，见图 2。

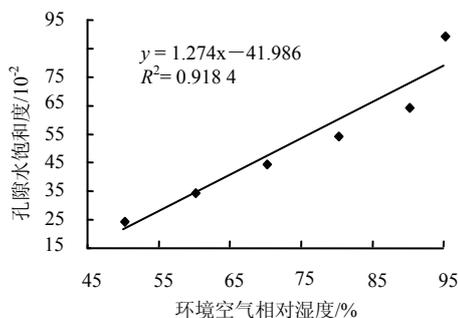


图 2 实验室试验得到的孔隙水吸附曲线^[13]

Fig.2 Correlation between relation humidity and degree of capillary saturation derived in the laboratory^[13]

笔者对这些数据点进行线性回归，得出 $RH-Sat$ 曲线方程为

$$Sat = 1.274RH - 41.986 \quad (14)$$

式中： Sat 、 RH 的单位均为 10^{-2} 。

笔者认为，确定 $RH-Sat$ 曲线的方法也可用于岩石类材料。

基于 Atkinson^[14] 的试验数据，Dove^[9] 给出了裂隙分别处于液体水、68%相对湿度的水蒸气和真空中时的裂隙扩展速率散点图（见图3）。因笔者目前尚缺乏岩石材料的 $RH-Sat$ 曲线关系资料，故暂时使用式（14）由裂隙的相对湿度求其的饱和度。对于 68%相对湿度的水蒸气，其相应的饱和度为 0.45，而液体水和真空对应的饱和度分别为 1.0 及 0。经试算，取水饱和度修正因子为

$$\chi = Sat^{2.5} \quad (15)$$

将式（14）代入式（1），则 I 型裂纹的扩展速率修正为

$$V_{Si-O} = \chi V_{Si-O} \quad (16)$$

需指出，裂纹的扩展速率式（1）不能用于真空中的情况^[9]，故式（15）的适用条件是 $0 < \chi \leq 1$ 。

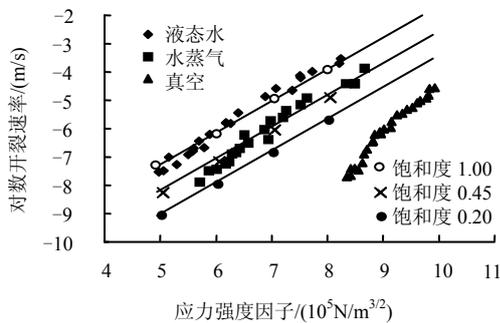


图3 对数扩展速率与应力强度因子数据^[9]
Fig.3 Lg rate of fractures vs. intensity factors^[9]

使用式（15）和文献[9]中的有关参数，在图3中绘出饱和度分别为 1.0（液体水）、0.45（68%相对湿度的水蒸气）、0.2（49%相对湿度的水蒸气）时的应力强度因子-对数裂纹扩展速率曲线。由此可见，对于液体水和 68%相对湿度的水蒸气，裂纹扩展速率的试验值和修正计算值吻合程度较好。

经饱和度修正后的裂隙力学开度的应力腐蚀闭合速率和压力溶解闭合速率分别为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE^s}{dt} &= -\chi(1-R_c)v_{Si-O} \\ \frac{dE^p}{dt} &= -\chi \frac{dM_{diss}}{dt} \frac{1}{\rho_g} \frac{1-R_c}{(\pi/4)d_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

将上述应力腐蚀、压力溶解模型及裂纹的扩展速率饱和度修正式引入笔者所建立的双重孔隙-裂隙岩体热-水-应力-迁移耦合控制方程中，其有限元算法见文献[15-16]。

4 算 例

某实验室尺寸的计算模型如图4所示。设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，取计算域尺寸为水平向 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。其边界条件：顶面位移自由，其上作用有分布荷载 $\sigma_v = 26.7 \text{ MPa}$ ；左、右侧面的水平方向位移约束；底面的垂直方向位移约束；所有边界的温度固定为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，而边界孔隙水压力和裂隙水压力依次为：4.587、4.587 MPa（工况 1）；-3.59、-1.83 MPa（工况 2）；-52.89、-7.32 MPa（工况 3）。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、2（表中参数虽为假定，但量级是合理的）和表 3（表中除 R_{c0} 、 \bar{R} 、 JRC 、 E_0 、 E_r 外，其余参数取自文献[1]）。初始状态时，孔隙介质和裂隙介质的饱和度相同，其对于工况 1~3 依次为 1.0、0.8 和 0.2，岩体的温度均为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。核废物以 1 000 W 的不变功率释放热量，时间经历了 4 年。

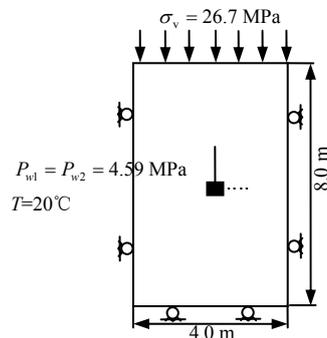


图4 计算模型(工况 1)
Fig.4 Computation model(case 1)

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_1/μ_w ($\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$)	弹性模量 E/GPa	泊松系数 μ	比热 C ($\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	热膨胀系数 β ($^\circ\text{C}^{-1}$)	导热系数 λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
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	1.0×10^{-27}	53.0	0.25	0.7	1.0×10^{-5}	5.3

表 2 应力腐蚀和压力溶解的计算参数

Table 2 Parameters for stress corrosion and pressure solution

参数	量值
经验常数 a	5.0
初始粗糙面接触率 R_{c0}	0.1
名义粗糙面接触率 \bar{R}	1.0
裂隙粗糙度系数 JRC	2.5
因子 A_{H_2O} / (m/s)	1.12×10^{-4}
因子 A_{OH} / (m/s)	2.51×10^3
初始开度 E_0 / m	0.012 5
残余开度 E_r / m	0.002 5
常数 $b_{H_2O}^*$ / (N ⁻¹ m ^{3/2})	2.69×10^{-5} (石英)
常数 b_{OH}^* / (N ⁻¹ m ^{3/2})	1.78×10^{-5} (石英)
活化能 E_a / (J/mol)	7.0×10^4 (石英)
熔化热 E_m / (J/mol)	8.57×10^3 (石英)
H ₂ O 的活化焓 ΔH_{H_2O} / (J/mol)	6.6×10^4
OH ⁻ 的活化焓 ΔH_{OH} / (J/mol)	8.27×10^4
参考的溶解速率常数 k^0 / (mol·m ⁻² s ⁻¹)	1.59
到裂纹尖端的微小距离 r / m	1.0×10^{-6}
气体常数 R / (J·mol ⁻¹ K ⁻¹)	8.31
熔化温度 T_m / K	1 883 (石英)
摩尔体积 V_m / (m ³ /mol)	2.27×10^{-5} (石英)
组成分数 $\theta_{SiO_2}^{H_2O}$	0.999 21 (pH=7)
组成分数 $\theta_{SiO_2}^{OH}$	0.000 79 (pH=7)

表 3 裂隙组的计算参数

Table 3 Parameters for fracture sets used in calculation

参数	裂隙组	
	水平裂隙	垂直裂隙
间距 S / m	0.3	0.3
连通率 l	1	1
倾角 θ / (°)	0	90
法向刚度 k_n / (MPa/m)	1 000	2 000
切向刚度 k_s / (MPa/m)	500	1 000
孔隙率 ϕ	0.01	0.01
初始渗透系数 / (m ² /Pas)	9.7×10^{-9}	9.7×10^{-9}

孔隙介质和裂隙介质的水分特性曲线符合 Van Genuchten 模型，即

$$s_w = (s_{ws} - s_{wr})(1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} + s_{wr} \quad (18)$$

式中：对于孔隙介质： $\alpha = 4.20 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ ， $n = 1.67$ ，对于裂隙介质： $\alpha = 2.50 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ ， $n = 2.50$ ； $m = 1 - 1/n$ ； 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 0.02 和 0.01。

比渗透率与饱和度的关系为

$$k_{rw} = s_w^{2.0} \quad (19)$$

取孔隙介质及裂隙介质的温度梯度水分扩散系数相同， $D_t = 2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ 。

针对上述的 3 种裂隙饱和度的工况，用式 (17) 替代式 (2)、(8)，即考虑裂隙饱和度对应力腐蚀和压力溶解速率的修正作用，完成了热-水-应力耦合有限元数值模拟。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^[17]，3 种工况条件下计算域中的温度变化基本相

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如图 5 所示。由图看到，在开始的约 0.1 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、52.5 °C、45.7 °C。

图 6、7 分别为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。从图中可见，随着裂隙水饱和度的由高降低，两种因素产生的闭合速率也从大变小，且均先随时间增加，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要高 6 个数量级，与文献[10]中呈现的规律类似。同时，由于岩体中垂直应力高于水平应力，使得水平裂隙开度的闭合速率比垂直裂隙开度大。

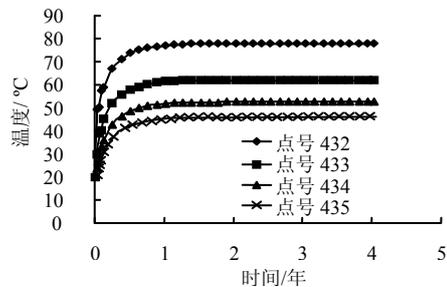
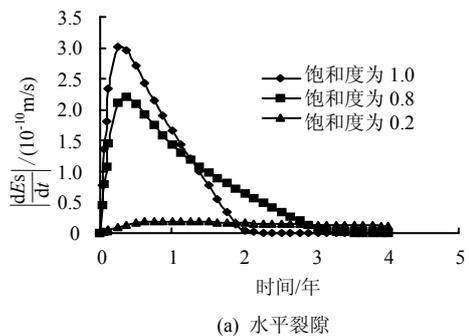
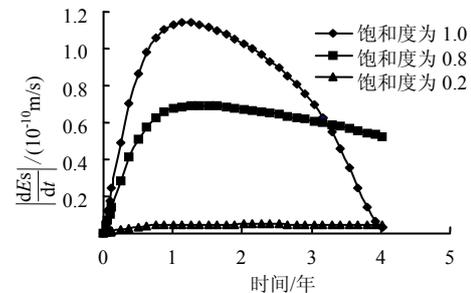


图 5 工况 1 温度-时间曲线
Fig.5 Temperatures vs. time at some nodes for Case 1



(a) 水平裂隙



(b) 垂直裂隙

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

Fig.6 $|dE^s/dt|$ caused by stress corrosion vs. time at middle point of right margin of vitrified waste

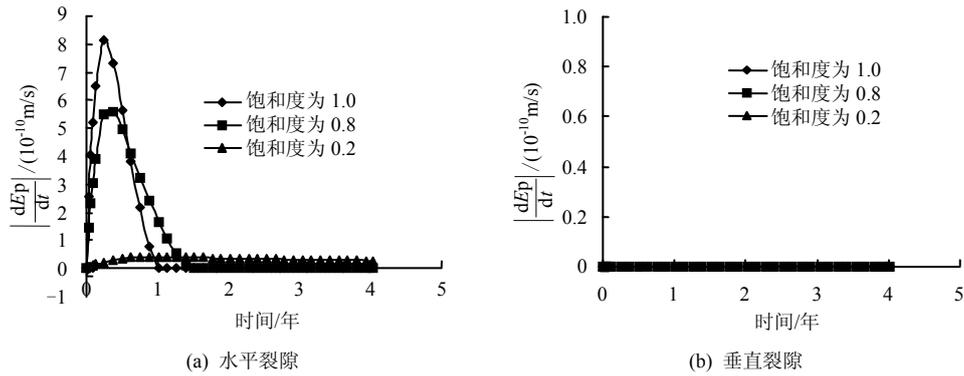


图 7 玻璃固化体右缘中点因压力溶解引起的 $|dE^s/dt|$ 与时间曲线
 Fig.7 $|dE^s/dt|$ caused by pressure solution vs. time at middle point of right margin of vitrified waste

图 8、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。从图可见，随着裂隙水饱和度的从高变低，裂隙开度由初始值下降而趋于残余值、粗糙面接触率由初始值上升而趋于其名义接触率（单位值）的时间亦增加，并且对

应于水平裂隙的值的明显变化要快。

从图 10 看出，随着裂隙水饱和度由高到低的变化，裂纹应力强度因子的下降变慢，且该中点处水平裂纹上的应力强度因子比垂直裂纹上的应力强度因子大了约 2 个量级。

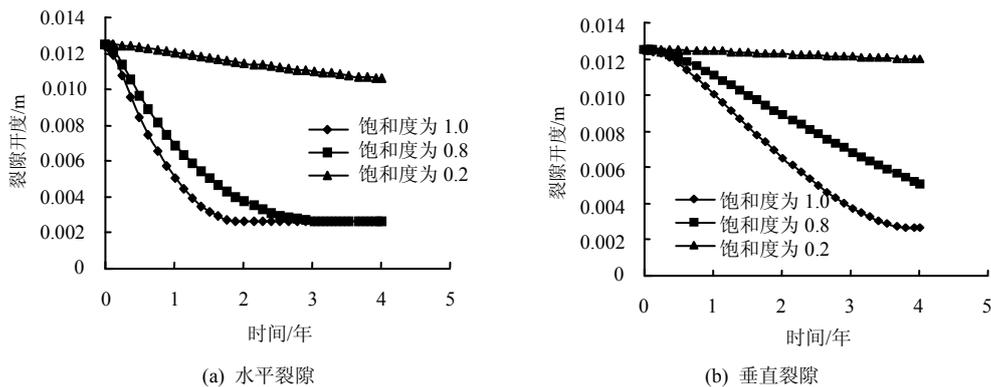


图 8 玻璃固化体右缘中点裂隙开度-时间曲线
 Fig.8 Fracture apertures vs. time at middle point of right margin of vitrified waste

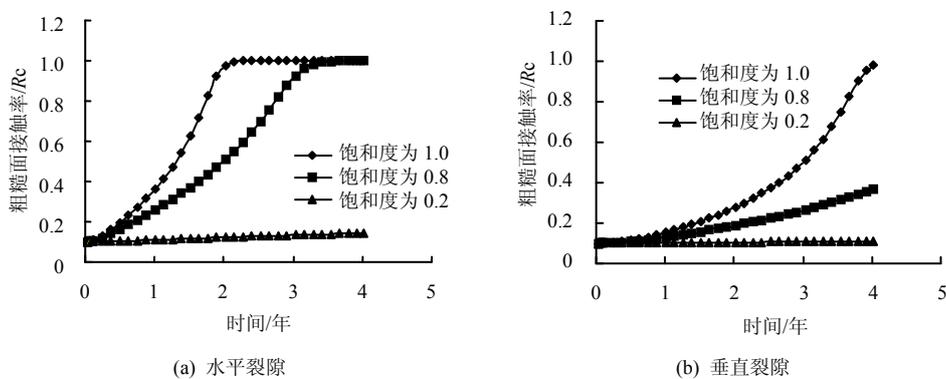


图 9 玻璃固化体右缘中点粗糙面接触率-时间曲线
 Fig.9 Contact-area ratios of asperity vs. time at middle point of right margin of vitrified waste

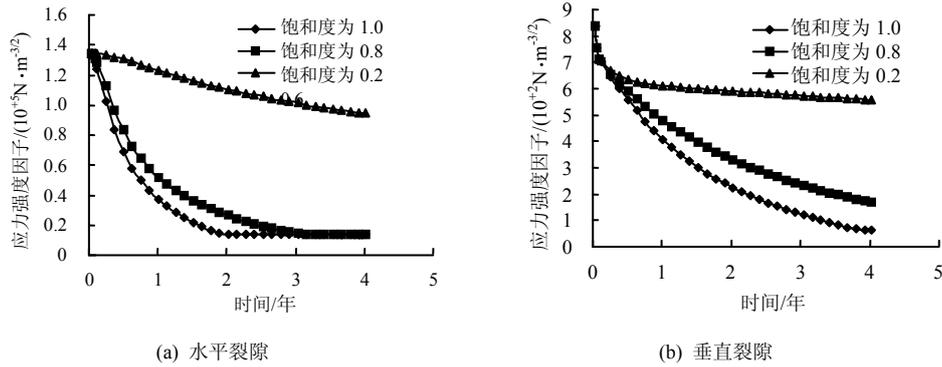


图 10 玻璃固化体右缘中点应力强度因子与时间曲线

Fig.10 Stress intensity factors vs. time at middle point of right margin of vitrified waste

图 11 显示了该中点处水平和垂直裂隙的临界应力不受裂隙水饱和度的影响且相同，其值在开始的约 1 年内快速下降，之后逐渐趋于常数。由上述各图及式 (15)、(17) 也可以看出，应力腐蚀、压力溶解随裂隙水饱和度的变化并非线性的。

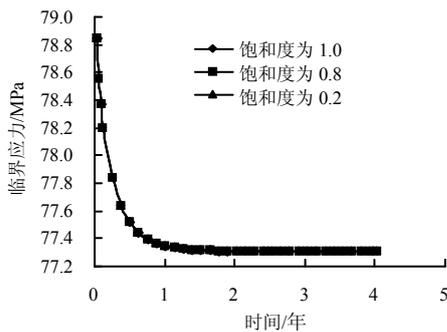
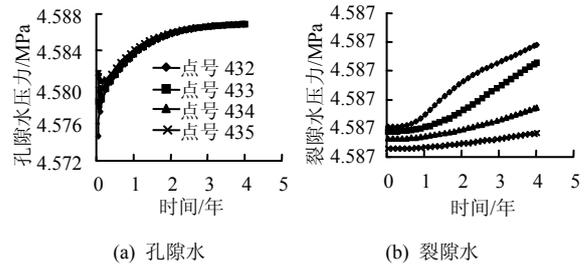


图 11 玻璃固化体右缘中点临界应力-时间曲线

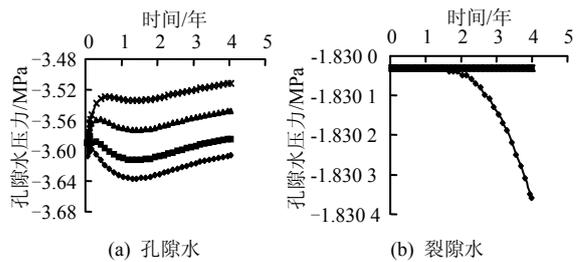
Fig.11 Critical stresses vs. time at middle point of right margin of vitrified waste

图 12 为工况 1、2、3 中 432、433、434、435 各点处的孔（裂）隙水压力随时间的变化曲线。从图中可见，无论是孔（裂）隙水压力为正值（饱和度为 1.0）的工况 1，还是孔（裂）隙水压力为负值（初始饱和度分别为 0.8 和 0.2）的工况 2、3，因应力腐蚀和压力溶解的叠加效应，使得裂隙开度减小和渗透系数降低，裂隙水压力在开始呈一定调整（因地应力的突然施加）后均随时间而有轻微增长（工况 1 的孔隙水压力的变化亦是如此），特别是在应力腐蚀和压力溶解效应最强烈的 432 点表现明显。对于工况 2、3，在温度梯度水分扩散和边界地下水浸润的共同作用下依各点距玻璃固化体的近、远，其负孔隙水压力在开始呈一定调整后，或是先增加（饱和度降低）后减小（饱和度升高），或一直是减小。4 年时 432 点的负孔（裂）隙水压力，工况 1 为 4.586 MPa、4.587 MPa，工况 2 为 -3.607 MPa、

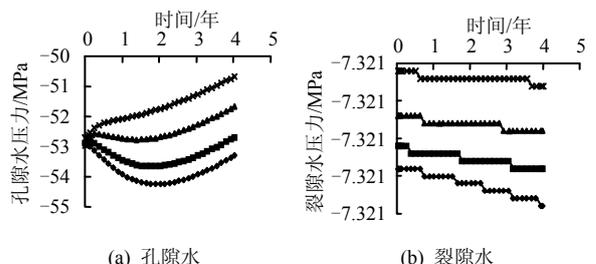
-1.830 MPa，工况 3 为 -53.305 MPa、-7.322 MPa。图 13 为工况 1~3 在 4 年时玻璃固化体周围 2 m×2 m 范围内孔（裂）隙水压力等值线的分布（图中边界尺寸的单位为 m）。从图中可见，由于受到应力腐蚀和压力溶解的作用，各工况中的裂（孔）隙水压力在玻璃固化体周围呈现明显的集中区域，但其分布依初始水饱和度的不同而有所差异。



(1) 工况 1



(2) 工况 2



(3) 工况 3

◆点号 432 ■点号 433 ▲点号 434 ×点号 435

图 12 孔(裂)隙水压力与时间曲线

Fig.12 Pore and fracture water pressures vs. time at some nodes for cases

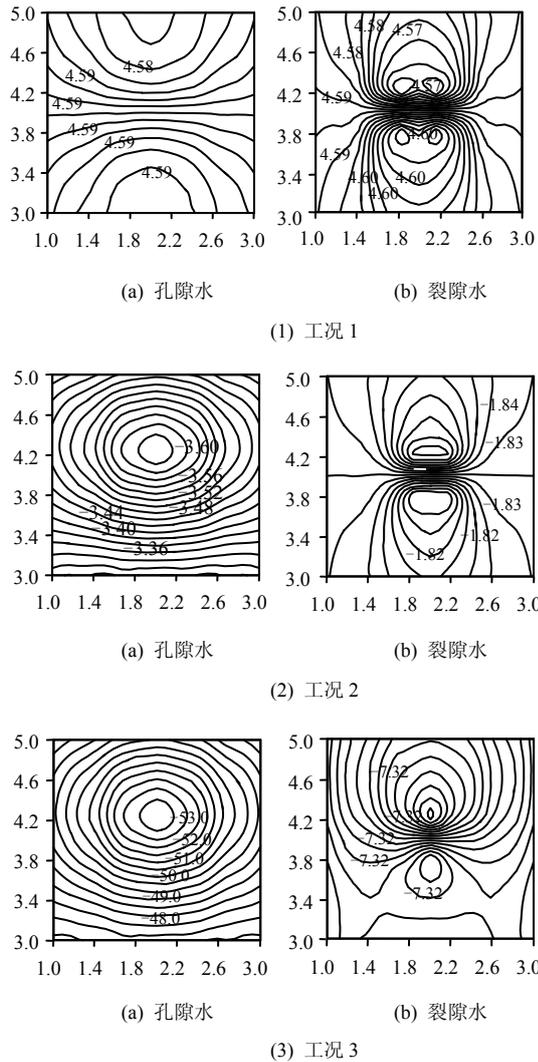


图 13 4 年时 2 m×2 m 区域中的孔(裂)隙水压力等值线(单位: MPa)
 Fig.13 Contours of pore and fracture pressures in a 2 m×2 m area at 4 years(unit: MPa)

图 14 为 3 种工况在 4 年时计算域中的孔隙水流动和裂隙水流动矢量分布。由图可见, 工况 1~3 孔隙水流动和裂隙水流动矢量的比例依次为 100 000: 1、10: 1、500: 1。由于考虑了初始裂隙水饱和度的不同对应力腐蚀和压力溶解效应的影响, 各工况的裂(孔)隙水流动矢量有显著的不同, 特别是在玻璃固化体附近。以 432 点为例, 孔隙水流动和裂隙水流动工况 1 为 4.47×10^{-10} m/s 和 2.70×10^{-5} m/s, 工况 2 为 1.72×10^{-8} m/s 和 2.50×10^{-5} m/s, 工况 3 为 2.67×10^{-8} m/s 和 3.87×10^{-7} m/s。

由于不考虑负的孔(裂)隙水压力对应力平衡的作用^[18], 工况 2、3 的计算域中应力量值及分布差别很小, 这里以工况 1、2 为例给出 4 年时计算域中的正应力等值线, 见图 15。从图中可见, 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), 并且因考虑了初始裂隙水饱和度的不同对应力腐蚀和压力溶解效应的影响, 工况 1 与工况 2 应力场形态也存在差异。到 4 年时玻璃固化体右缘中点的水平应力和垂直应力工况 1 为 -0.123 MPa 和 -26.74 MPa, 工况 2 为 -0.124 MPa 和 -26.75 MPa。

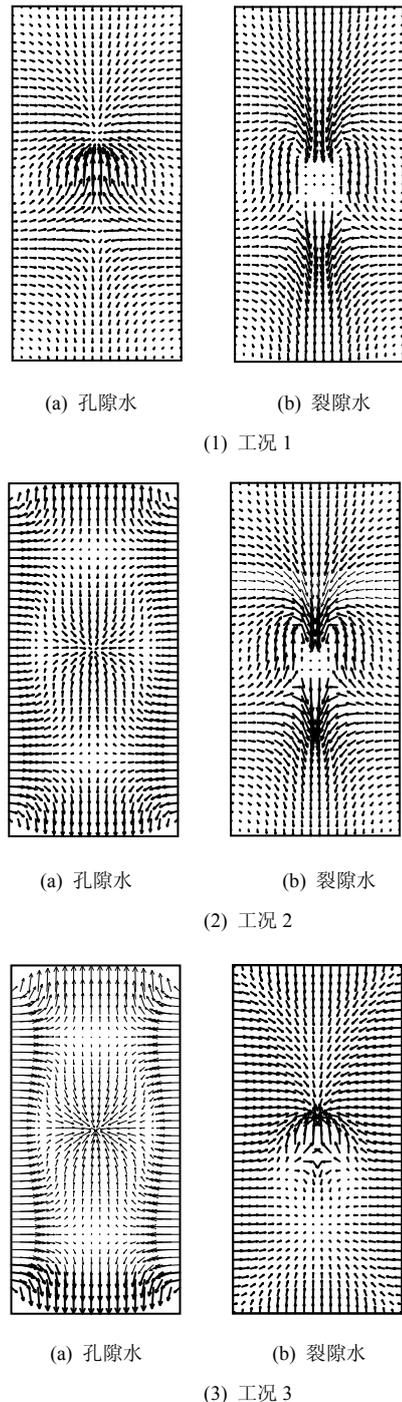


图 14 4 年时计算域中的孔(裂)隙水流动矢量
 Fig.14 Flow vectors of pore and fracture water in calculation domain at 4 years

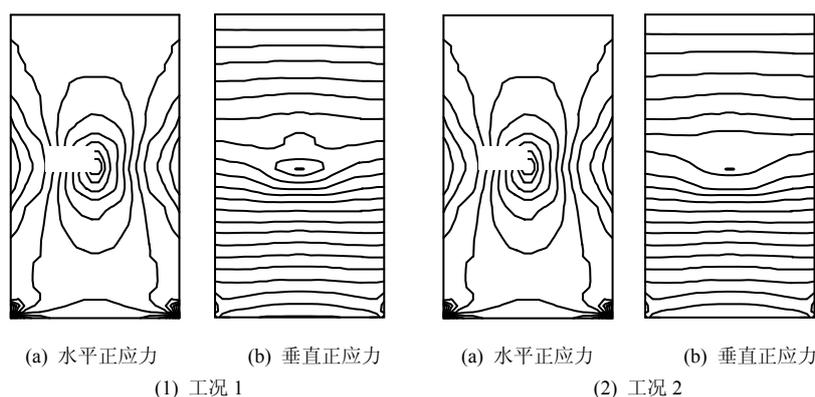


图 15 4 年时工况 1、2 计算域中正应力等值线(单位: MPa)
Fig.15 Normal stress contours in calculation domain at 4 years for cases 1 and 2 (unit: MPa)

5 结 论

(1) 3 种工况中的温度状态基本相同, 在初始温度为 20℃ 的条件下, 计算终了(4 年)时近场的温度可达到 30~80℃; 应力腐蚀引起的闭合速率比压力溶解引起的闭合速率要高 6 个数量级。

(2) 随着初始裂隙水饱和度的由高值到低值, 应力腐蚀和压力溶解产生的闭合速率从大变小, 裂隙开度由初始值趋于残余值、粗糙面接触率由初始值趋于其名义接触率的时间也增加, 裂纹应力强度因子的下降亦变慢, 并且对应于水平裂隙的值的明显变化明显要快, 水平裂纹上的应力强度因子比垂直裂纹上的要约高 2 个量级, 但裂隙的临界应力不受裂隙水饱和度的影响。

(3) 在不同的初始裂(孔)隙水饱和度条件下, 近场的裂(孔)隙水压力的变化、分布及其流速矢量场的形态亦有明显的差异。在本计算的特定情况下, 非饱和状态的工况 2、3 的岩体中的应力量值及分布基本相同, 并且与饱和状态的工况 1 的差别也不大。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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, 46(5): 855—864.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] KI-Bok Min, RUTQVIST J, ELSWORTH D. Chemical and mechanically mediated influences on the transport and mechanical characteristics of rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(1): 80—89.
- [6] ZHENG B, ELSWORTH D. Evolution of permeability in heterogeneous granular aggregates during chemical compaction: Granular mechanics models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117:B03206, doi: 10.1029/2011JB008573.
- [7] 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]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(7): 1748—1756.
- [8] ZHANG Yu-jun, YANG Chao-shuai, XU Gang. FEM analyses for T-H-M-M coupling processes in dual-porosity rock mass under stress corrosion and pressure solution[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2012, doi: 10.1155/2012/983718.
- [9] DOVE M. Geochemical controls on the kinetics of quartz fracture at subcritical tensile stresses[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B11): 22, 349—352, 359.

- [10] 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.
- [11] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. **Water Resources Research**, 1969, 5(6): 1273—1289.
- [12] DAVIS J, DAVIS D. Stress-dependent permeability: Characterization and modeling[J]. **SPE Journal**, 2001, 6(2): 224—235.
- [13] 陆秀峰, 刘西拉, 覃维祖. 自然环境条件下混凝土孔隙水饱和度分布[J]. **四川建筑科学研究**, 2010, 33(5): 114—121.
LU Xiu-feng, LIU Xila, QIN Wei-zu. Moisture distribution of concrete in nature climate[J]. **Sichuan Building Science**, 2010, 33(5): 114—121.
- [14] ATKINSON B K. A fracture mechanics study of subcritical tensile cracking of quartz in wet environments[J]. **Pure Applied. Geophysics.**, 1979, 117: 1011—1024.
- [15] ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing. 3D thermo-hydro-mechanical model and finite element analyses of dual-porosity fractured medium for ubiquitous-joint rock mass[J]. **Science China Technological Sciences**, 2010, 53(8): 2172—2182.
- [16] ZHANG Yu-jun, YANG Chao-shuai. Coupled thermo-hydro-mechanical-migratory model for dual-porosity medium and numerical analysis[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2011, 18(4): 1256—1262.
- [17] 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.
- [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]. Tokyo, Hazama Corporation: [s.n.], 2002: 1—43.

上接第 522 页

- [10] 龚敏, 方祖烈. 爆破模型动光弹和全息干涉研究中的两个基本问题[J]. **北京科技大学学报**, 1998, 20(4): 311—315.
GONG Min, FANG Zu-lie. Foundational problems in two kinds of blasting model by dynamic photoelasticity and hologram interferometry[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 1998, 20(4): 311—315.
- [11] 张凤鹏, 金校元, 冯夏庭. 台阶高度对露天矿爆破效果影响的三维有限元分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(12): 1835—1838.
ZHANG Feng-peng, JIN Xiao-yuan, FENG Xia-ting. 3D FEM analysis of the influence of bench height on open-pit mines bench blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1835—1838.
- [12] 郝亚飞, 李海波, 郭学彬, 等. 含软弱夹层顺层岩体爆破效应模拟试验研究[J]. **煤炭学报**, 2012, 37(3): 389—395.
HAO Ya-fei, LI Hai-bo, GUO Xue-bin, et al. Simulation test on blasting effect of bedding rock with intercalation[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(3): 389—395.
- [13] 褚怀保, 杨小林, 梁为民, 等. 煤体爆破作用机制模拟试验研究[J]. **煤炭学报**, 2011, 36(9): 1451—1456.
CHU Huai-bao, YANG Xiao-lin, LIANG Wei-min, et al. Simulation experimental study on the coal blast mechanism[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(9): 1451—1456.
- [14] 龚敏, 黎宝华. 延长药包不同位置起爆时的应力场[J]. **北京科技大学学报**, 2002, 24(3): 248—253.
GONG Min, LI Bao-hua. A research on stress field of column and strip-shaped charge in different detonated points[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2002, 24(3): 248—253.
- [15] 胡少斌, 王恩元, 陈鹏, 等. 起爆位置对煤岩体深孔爆破的影响[J]. **煤矿安全**, 2012(2): 167—171.
HU Shao-bin, WANG En-yuan, CHEN Peng, et al. The influence research of initiating position on deep-hole blasting among coal-rock masses[J]. **Coal Mine Safety**, 2012(2): 167—171.
- [16] 龚敏, 黄毅华, 王德胜, 等. 松软煤层深孔预裂爆破力学特性的数值分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(8): 1674—1681.
GONG Min, HUANG Yi-hua, WANG De-sheng, et al. Numerical simulation on mechanical characteristics of deep-hole presplitting blasting in soft coal bed[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1674—1681.