

文章编号: 1000-7598(2010)11-3361-06

渗流-化学溶解耦合作用下岩石单裂隙渗透特性研究

速宝玉¹, 张文捷^{1,2}, 盛金昌¹, 许孝臣³, 詹美礼¹, 刘继山⁴

(1. 河海大学 水利水电工程学院, 南京 210098; 2. 江西省水利厅, 南昌 330009; 3. 浙江广川工程咨询公司, 杭州 310000;
4. 西澳大利亚大学 机械与化学工程系, Perth 澳大利亚)

摘要: 为揭示在渗流-化学溶解耦合作用下单裂隙渗透特性的变化规律, 建立了描述二维渗流-化学溶解耦合作用的偏微分方程组, 并利用 COMSOL Multiphysics 软件成功地求解该方程组。首先, 模拟了文献[1]中的盐岩渗流-溶解耦合渗流试验结果, 数值模拟结果与试验结果较为吻合, 验证了数学模型的正确性和有效性。然后, 利用分形理论生成了一个粗糙的裂隙面数字模型, 着重分析了二维石灰岩粗糙裂隙面在水流、矿物溶解和输运过程中其渗透特性的变化规律。数值分析显示, (1) 溶质浓度对裂隙面的溶解具有非常重要的作用, 从而水流进口端的溶解厚度比出口端大得多。(2) 裂隙的整体渗透性在初始时刻增加较慢, 随着裂隙开度的增大和贯通, 溶解速度会逐渐增大, 是一个加速的过程。

关键词: 岩石裂隙; 渗流-化学溶解耦合过程; 数值模拟; 分形理论

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Study of permeability in single fracture under effects of coupled fluid flow and chemical dissolution

SU Bao-yu¹, ZHANG Wen-jie^{1,2}, SHENG Jin-chang¹, XU Xiao-chen³, ZHAN Mei-li¹, LIU Ji-shan⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangxi Provincial Department of Water Resources, Nanchang 330009, China; 3. Guangchuan Engineering Consulting Corporation, Hangzhou 310000, China;

4. School of Mechanical and Chemical Engineering, The University of West Australia, Perth, Australia)

Abstract: A two-dimensional numerical model of coupled fluid flow and chemical dissolution processes in single fracture is presented in order to understand permeability changes of single rock fracture in the coupled fluid flow and mineral chemical dissolution processes. The numerical model is solved by using a COMSOL Multiphysics-based simulator, which is the first engineering tool that performs partial differential equation-based multiphysics modeling in an interactive environment. The model is validated through comparing our numerical results with the known experimental measurements in salt rock reported by the reference [1], which shows our model is credible. A rough fracture is generated numerically by using fractal theory and used in the simulation of coupled fluid flow and mineral chemical dissolution processes of a rough fracture in limestone. The simulated results indicate that: (1) The solute concentration plays an important role on the dissolution process; this causes that the dissolved thickness at inlet is bigger than that at outlet. (2) The permeability of fracture increases exponentially with time during the dissolution process.

Key words: rock fracture; coupled fluid flow and chemical dissolution processes; numerical model; fractal theory

1 前言

深部岩石处在高地应力、高地温、高渗透水压力以及复杂的水化学环境之中, 将发生极其复杂的温度-渗流-应力-化学(THMC)耦合作用。在这一耦合作用过程中, 岩石内部矿物颗粒间联结被削弱, 岩石溶蚀物质被水溶液带走或被吸附沉淀, 裂隙结构面、岩石孔隙结构将发生显著的变异, 从而导致

裂隙岩石渗透特性发生重大改变, 最终对岩石工程的安全产生重要影响^[1-2]。近年来, 随着深部地下空间、地下资源(深埋隧洞、深部采矿、石油开采、核废料的处理、盐岩开采等)的开发和利用, 这一问题正日益突出地摆在人们的面前。

目前岩石多场耦合研究已成为国内外的研究热点^[3], 并取得了丰富的研究成果。1992 开始的国际重大合作项目 DECOVALEX 代表了当前这一领域

收稿日期: 2009-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50779012); 教育部留学回国人员科研启动基金(2008)。

第一作者简介: 速宝玉, 女, 1936年生, 教授, 博士生导师, 主要从事水工渗流研究。

通讯作者: 盛金昌, 男, 1969年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩石渗流及其流固热化学多场耦合研究。E-mail: jinchang@hhu.edu.cn

的最高研究水平,其目的就是为了解决核废料的安全贮存问题,该研究进行了大量的耦合方面的小尺度室内试验、大尺度室内试验和现场试验,建立了大规模的地下现场实验室,开发并验证了 THM 耦合模型,取得了一系列重要成果^[4-5]。目前正在进行的 DECOVALEX-THMC (2004—2007 年) 计划,其目的就是在 THM 耦合模型中增加化学过程^[6]。国内张文杰、周创兵等^[7]对裂隙岩体渗流特性物模试验研究进行了总结;张贵金、徐卫亚等^[8]对溶蚀岩体的溶渗作用及岩溶坝区的渗透性进行了研究;梁卫国、赵阳升等^[9]建立了岩盐水压致裂过程中溶解-固-流-传质耦合数学模型,并模拟了盐矿床致裂溶解的物理规律。目前多场耦合研究主要集中在耦合作用下裂隙岩石变形力学特性机制研究、力学本构关系和耦合模型的建立上,在耦合作用下岩石渗透特性的研究相对较为薄弱,如 Polak 和 Elsworth 等^[10]进行了常温低围压 (3.5 MPa) 条件下石灰岩裂隙的渗透试验,试验历时约 60 d,裂隙渗透系数先减小后增大;刘继山、盛金昌等^[11]利用理想化锯齿裂隙面模型,从裂隙面化学溶蚀和接触面压力溶解相互竞争的角度建立了一维应力-渗流-化学耦合模型,探讨裂隙渗透特性变化特性;Yasuhara 和 Elsworth 等^[12]利用规则的球型矿物颗粒模型,从压力溶解的角度对天然裂隙渗透特性的变化进行了理论模型研究;周辉等^[1]做了盐岩溶解的试验研究,并提出了一维的渗流-化学耦合模型。

以上研究大多在一维理想化裂隙面几何模型基础上进行耦合作用下裂隙渗透特性分析的,实际上天然岩石裂隙面是粗糙的,一维理想化裂隙面几何模型难以反映天然粗糙裂隙面形态。研究表明,裂隙岩体具有分形的特征,对裂隙面的水力特性有重要影响^[13]。本文在以往工作^[1, 11]的基础上,建立了对应二维粗糙裂隙面的渗流-化学溶解耦合作用的偏微分方程组,并利用 COMSOL Multiphysics 软件进行求解。首先,模拟了文献[1]的盐岩渗流-溶解耦合试验结果,证明了该数学模型的有效性。然后,利用传统的分形理论生成了一个二维的粗糙裂隙面数字模型,并用该模型模拟了石灰岩的渗流-化学溶解耦合过程,着重研究了二维粗糙裂隙面矿物溶解、输运过程中其渗透特性的变化规律。

2 单裂隙渗流-化学溶解耦合过程的数学模型及求解

单裂隙面的渗流与表面矿物化学溶解的耦合过程是一个相互影响相互作用的过程。对于单裂隙而

言,其渗透特性主要取决于裂隙开度的分布情况,如开度的大小、空隙的连通等。当裂隙面有液体(如水、酸性液体)流动时,岩石裂隙表面的某些矿物成分(如方解石等)由于化学溶蚀作用将发生化学溶解,导致裂隙面开度分布的改变,也就是说裂隙的渗透特性因化学溶解作用发生了改变。这种改变的速度主要取决于矿物化学溶解的快慢,而裂隙表面矿物溶解的速度则与当地的矿物离子浓度有关,从而涉及到一个溶质运移过程。因此,单裂隙渗流-化学溶解耦合作用实际上是裂隙面渗流、表面矿物化学溶解、溶质运移 3 个过程相互作用、相互影响的结果。图 1 为这 3 个子过程相互作用的示意简图。

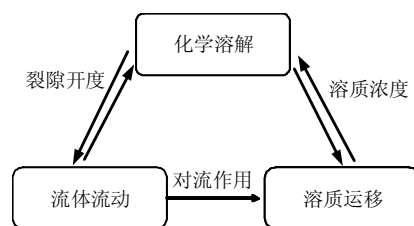


图 1 单裂隙面渗流-化学溶解耦合作用示意图
Fig. 1 Sketch of coupled fluid flow and chemical dissolution processes in single fracture

2.1 岩石表面矿物化学溶解过程

在流动的液体作用下,岩石表面的矿物化学溶解过程是一个复杂的过程。文献[14]对在水流作用下石灰岩的表面溶解过程深入地进行了研究,他认为主要有 3 个过程控制石灰岩的溶解速率:①石灰岩通过表面的各种化学反应从石灰岩晶体里溶解出来的速度;② CO_2 转换成 H^+ 和 HCO_3^- 的速度;③各种离子通过分子扩散作用从晶体表面扩散到水中的速度。本文用一极薄的扩散边界层模型来描述这一过程,如图 2 所示。

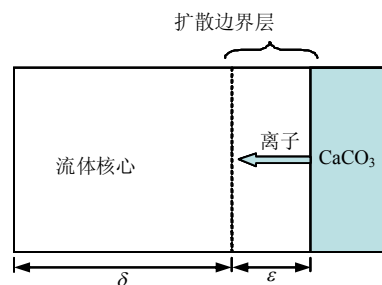


图 2 石灰岩溶解模型
Fig. 2 Sketch of ions dissolution on limestone surface

首先是离子在各种化学作用下从 CaCO_3 表面溶解出来,然后离子在扩散作用下通过边界层扩散到紊流核心区,由于在紊流核心区紊流脉动作用十

分明显,所以在紊流核心区的离子浓度是基本一致的,而在岩体表面的溶质浓度则认为是饱和浓度,那么就可以通过试验来测定出边界层的厚度,这里假定这一过程可用 Fick 定律来描述,则

$$F = D \frac{(C_s - C)}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: F 为物质通量; D 为扩散系数; C_s 为岩体固体中溶质的浓度,这里为饱和浓度; C 为裂隙中水的溶质浓度; ε 为薄膜的厚度。

由于离子从 CaCO_3 表面扩散出去造成了表面的后退,就可以用式 (2) 表示。

$$\frac{du}{dt} = D \frac{M}{\rho} \frac{(C_s - C)}{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: u 为固体边界的溶解厚度; M 为溶质的摩尔质量; ρ 为溶质的密度。

令

$$D_d = \frac{D}{\varepsilon} \quad (3)$$

式 (2) 变为

$$\frac{du}{dt} = D_d \frac{M}{\rho} (C_s - C) \quad (4)$$

即为描述离子扩散过程的表达式。在这里做一些简化和假定,在上述 CaCO_3 溶解的 3 个过程中,由于分子的扩散作用速度较慢,所以在整个溶解过程中起控制作用。另外,假定在裂隙水流的层流中同样有边界层的存在^[1],式 (4) 就可以用来描述裂隙中的矿物溶解过程。

2.2 溶质运移控制方程

地下水溶质运移的控制方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{D} \cdot \nabla C) - \mathbf{V} \cdot \nabla C + R \quad (5)$$

式中: C 为溶质浓度; R 为源项; $\mathbf{V}$ 为流速向量; $\mathbf{D}$ 为水动力弥散系数张量。公式分别为

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k \frac{\partial H}{\partial x} \\ -k \frac{\partial H}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{v} (\alpha_L v_x^2 + \alpha_T v_y^2) + D^* & \frac{1}{v} (\alpha_L - \alpha_T) v_x v_y + D^* \\ \frac{1}{v} (\alpha_L - \alpha_T) v_x v_y + D^* & \frac{1}{v} (\alpha_T v_x^2 + \alpha_L v_y^2) + D^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: α_L 、 α_T 为纵向和横向弥散度; D^* 为分子扩散系数; $\bar{v}$ 为平均水流速度。

由于存在水对固体边壁的溶解,将其作为源项耦合到溶质运移的控制方程中,得到下式:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{D} \cdot \nabla C) - \mathbf{V} \cdot \nabla C + D_d (C_s - C) / b(x, y) \quad (8)$$

式中: $b(x, y)$ 为裂隙面的开度分布。

2.3 渗流控制方程

根据裂隙岩体中渗流的立方定律,有

$$k = \frac{g}{12v} b(x, y)^2 \quad (9)$$

式中: k 为裂隙岩体的渗透系数; g 为重力加速度; v 为水的运动黏滞系数,取为 $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

根据渗流的连续性方程,有

$$-\text{div}(\rho q) = \frac{\partial n \rho}{\partial t} \quad (10)$$

$$\frac{\partial n \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (11)$$

式中: q 为流速; ρ 为水的密度; n 为孔隙率。

由于水的密度变化较小,可以忽略其影响,联立式 (9) 和式 (10) 可以得到裂隙中水流的控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kb(x, y) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kb(x, y) \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (12)$$

式 (4) 表明了溶解速度受溶质浓度的控制,式 (8) 表明了源的强度不仅与浓度有关,还与裂隙的开度有关,式 (12) 表明渗透系数受裂隙开度的控制,将这 3 个方程耦合在一起,可得到渗流-化学溶解耦合的控制方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(kb'(x, y) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kb'(x, y) \frac{\partial H}{\partial y} \right) &= \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{du}{dt} &= D_d \frac{M}{\rho} (C_s - C) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \text{div}(\mathbf{D} \cdot \nabla C) - \mathbf{V} \cdot \nabla C + D_d (C_s - C) / b'(x, y) \\ b'(x, y) &= b(x, y) + u \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2.4 方程组的求解

求解耦合方程组一般有 3 种方法,分别求解、交替迭代求解和全耦合求解,前两种方法求解精度

不高，最后一种方法会造成代数矩阵加大、矩阵变为非对称矩阵等，给求解带来困难。COMSOL Multiphysics 在求解多物理场耦合问题方面有独特的优势，它含有一些内嵌的经典物理模型，包括单物理场和多物理场耦合模型，可以直接用于分析。对于不同物理场中交叉耦合项的处理简单有效，而且各物理场中的计算变量可以直接用于耦合关系的定义。COMSOL 的有限元网格是自动生成，也可以根据需要控制网格的大小和分布，并能进行局部的加密；COMSOL 中提供了 5 个求解器，分别是 UMFPACK、SPOOLES、GMRES、CONJUGATE GRADIENTS、GEOMETRIC MULTIGRID，本文采用的是 UMFPACK 求解其，这是一种直接分解的求解器，对内存要求较高，但是较为可靠，精度高。

3 模型的验证

下面通过一个算例证明本数学模型的有效性。文献[1]做了盐岩溶解的试验研究，把一块磨平盐岩与有机玻璃板以一定的缝宽叠合在一起，然后，在一端注入一定浓度的溶液（图 3），记录下了盐岩溶解 125 h 以后的裂隙宽度，如图 4 中点画线所示。图 4 曲线为用本模型的计算结果。由图可以看出，二者的结果非常接近，说明本模型可以用来模拟渗流-化学的耦合过程。模拟选取的参数见表 1。

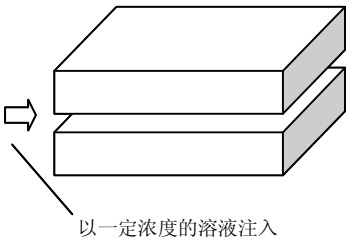


图 3 试验示意图
Fig.3 Sketch of experiment model

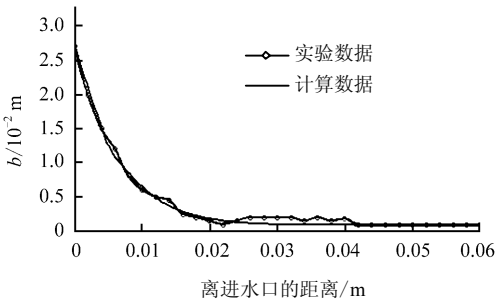


图 4 试验与计算结果对比
Fig.4 Comparison between experimental data and numerical results

表 1 盐岩裂隙渗流-溶解参数取值

Table 1 The values of parameters of salt rock			
参数	量值	参数	量值
$D^*/(10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$	1.34	$C_s/(\text{mol}/\text{m}^3)$	5 400
α_L/m	0.005	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 160
α_T/m	0.002	$M/(\text{g}/\text{mol})$	58.5
$D_d/(10^{-7} \text{ m/s})$	6.7		

4 石灰岩单裂隙渗流-化学溶解过程模拟

4.1 粗糙裂隙面的生成

已有的研究表明，粗糙裂隙面具有分形的特征，可以用传统的分形理论来描述裂隙面。生成裂隙面方法一般有 2 种，一种是逐次随机累加的方法，另一种是利用随机布朗函数法^[15]。本文采用随机布朗函数法来生成裂隙面。二维的分数布朗运动函数，可以构造各种随机曲面，它具有统计的自仿射特性。把裂隙看成由 2 组裂隙面叠合而成，调整俩裂隙面的位错值可以生成 1 组裂隙面。本文生成了 1 组 $(0.01/\text{m}^{-1} \times 0.005/\text{m}^{-1})$ 的裂隙，面积接触率为 14%，平均裂隙开度为 0.367 mm，生成裂隙的初始裂隙宽度如图 5 所示。

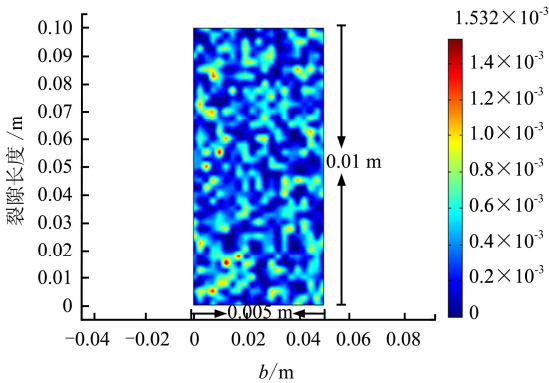


图 5 裂隙的初始裂隙宽
Fig.5 The distribution of initial fracture aperture

4.2 石灰岩的溶解过程模拟

本文利用上面生成的裂隙面及数学模型模拟了石灰岩的溶解过程，计算参数见表 2。

边界条件设置： $H|_{\Gamma_{AB}} = 0.1 \text{ m}$ ， $H|_{\Gamma_{CD}} = 0$ ， BC 、 AD 为不透水边界。 $C|_{\Gamma_{AB}} = 0$ ， $\mathbf{n} \cdot (-\mathbf{D} \cdot \Delta \mathbf{C})|_{\Gamma_{CD}} = 0$ ， $\mathbf{n} \cdot (-\mathbf{D} \cdot \Delta \mathbf{C} + \mathbf{C}\mathbf{V})|_{\Gamma_{(AD+BC)}} = 0$ 。

初始条件设置： $C|_{t=0} = 0$ ， $u|_{t=0} = 0$ 。

表 2 石灰岩渗流-溶解参数取值

Table 2 The values of parameters of limestone			
参数	量值	参数	量值
$D^*/(10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$	1.34	$C_s/(\text{mol}/\text{m}^3)$	0.2
α_L/m	0.005	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 660
α_T/m	0.002	$M/(\text{g}/\text{mol})$	100
$D_d/(10^{-7} \text{ m/s})$	2		

计算结果如图 6~10 所示。图 6 为溶解 2 000 d 后的溶解厚度。从图中可以看出, 溶解厚度是不均匀的, 总体上是在入口处的溶解厚度最大, 越往裂隙深部, 溶解厚度变的较小, 这是由于在入口处溶质的浓度较低, 溶解速度也较快, 随着岩石壁面的溶解, 溶质的浓度变得越来越高, 同时也使得壁面的溶解速度减慢。在图 6 中还出现了部分区域的溶解厚度较小的地方(图中的蓝色或黄色的点), 对比图 5 可以看出, 这些地方都存在着较大范围的裂隙面闭合处, 因此这是由于裂隙面的闭合, 使得这些地方的水流条件不畅通, 溶质不能被带走, 使得浓度升高, 抑制了岩石的溶解。

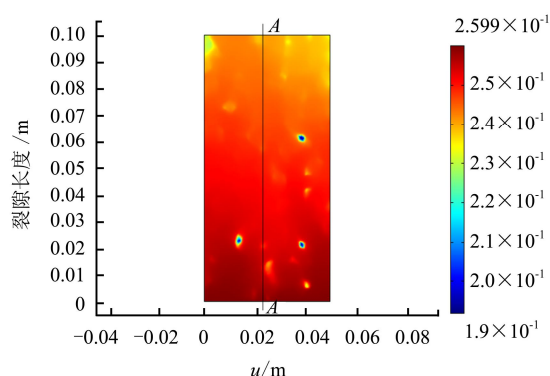


图 6 溶解 2 000 d 后的溶解厚度

Fig.6 The distribution of dissolved thickness after 2 000 days

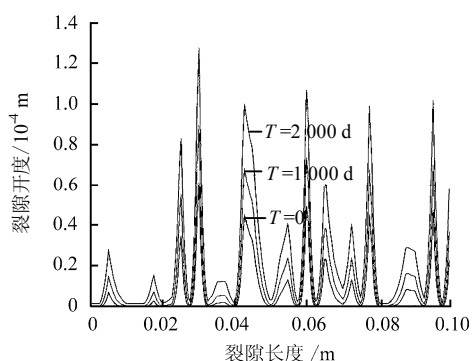


图 7 A-A 剖面裂隙开度随时间的变化图

Fig.7 The fracture aperture at section A-A at different times

图 7 为不同时刻剖面(A-A)处渗透系数的变化图。从图中可以看出, 初始渗透系数大的地方其增长的速度要大于初始渗透系数小的地方, 这是可能有两方面的原因: ①渗透系数的大小与裂隙开度成平方关系; ②由于裂隙开度大的地方水流条件比较畅通, 溶质能够被很快的带走, 溶液的浓度保持在一个较低的水平, 所以溶解的速度也比较快, 那么二者相互促进, 使得初始开度大的地方其增长的

速度也较快。这说明溶解并不是均匀溶解的, 而是一个加速的过程。

图 8、9 分别为初始时刻和末时刻的流速分布图。从图中可以看出, 水流存在着明显的沟道流现象, 这与相关结论是一样的。对比图 5 可以看出, 初始开度大且较为连通的地方其流速也较大, 说明这些地方的水流条件较为畅通。对比图 8、9 可见, 在初始流速较大的地方, 其末时刻的流速也较大, 并且其连通性也变的越来越好, 这同样是渗流和溶解二者相互促进的结果。图 10 为渗流量随时间的变化图。

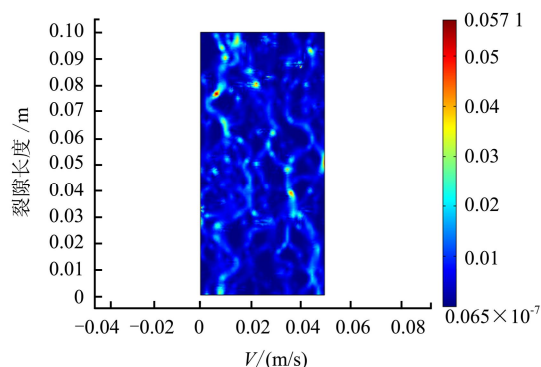


图 8 初始时刻的流速分布图

Fig.8 The distribution of initial velocities

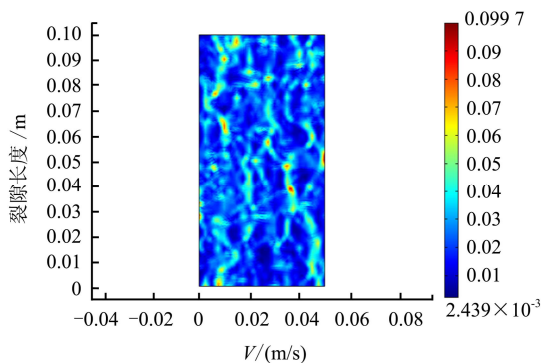


图 9 溶解 4 000 d 后的流速分布图

Fig.9 The velocity distribution after 4 000 days

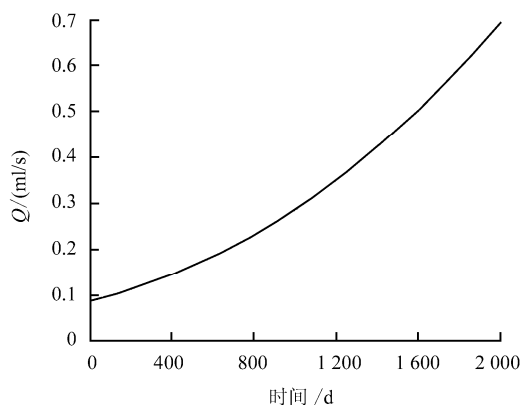


图 10 流量随时间的变化图

Fig.10 The change of flux with time

从图 10 中可以看出,流量的增加不是一个线性的过程,而是一个加速的过程,且由于上下游的水头差是一定的,流量的加速增加说明裂隙的整体渗透特性也发生了一个加速的变化过程。

5 结 论

(1) 本文提出了一个数学模型以揭示在渗流-化学溶解耦合作用下单裂隙渗透特性的变化规律,并将数值计算结果与已知试验相对比,验证了模型的正确性。

(2) 对粗糙裂隙面的渗流-化学溶解耦合作用分析表明,溶质浓度对裂隙面的溶解具有非常重要的作用,裂隙中的溶解速度存在着不均匀性,入口处的溶解厚度比裂隙内部的溶解厚度要大,裂隙闭合处与流动通道处的溶解也存在不均匀性。

本文的数学模型还需要进一步的试验成果验证,并将在更深入的试验成果基础上进行修正和完善。

参 考 文 献

- [1] 周辉, 汤艳春, 胡大伟, 等. 盐岩裂隙渗流-溶解耦合模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 946—950.
ZHOU Hui, TANG Yan-chun, HU Da-wei, et al. Study on coupled penetrating-dissolving model and experiment for salt rock cracks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 946—950.
- [2] 冯夏庭, 丁梧秀. 应力-水流-化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1465—1473.
FENG Xia-ting, DING Wu-xiu. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under coupled mechanical-hydrological-chemical environment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 1465—1473.
- [3] FENG X T, LIU J, JING L. Research and application on coupled T-H-M-C processes of geological media in China—A review[C]//International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling. Stockholm, Sweden: [s. n.], 2003: 32—43.
- [4] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2003, 40: 283—353.
- [5] HUDSON J A, STEPHANSSON O, ANDERSSON J, et al. Coupled T-H-M issue relating to radioactive waste repository design and performance[J]. **Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.**, 2001, 38: 143—161.
- [6] TSANG C-F, JING L, STEPHANSSON O, et al. The DECOVALEX III project: A summary of activities and lessons learned[J]. **Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.**, 2005.
- [7] 张文杰, 周创兵, 李俊平, 等. 裂隙岩体渗流特性物模试验研究进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1517—1524.
ZHANG Wen-jie, ZHOU Chuang-bing, LI Jun-ping, et al. Research progress of experimental study on seepage characteristic of fractured rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1517—1524.
- [8] 张贵金, 徐卫亚, 赖苗. 溶蚀岩体的溶渗作用及岩溶坝区的渗透性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 795—799.
ZHANG Gui-jin, XU Wei-ya, LAI Miao. Leaching of solution rock and permeability study under karst-engineering geological condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 795—799.
- [9] 梁卫国, 赵阳升, 李志萍. 盐岩水压致裂溶解耦合数学模型与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 427—430.
LIANG Wei-guo, ZHAO Yang-sheng, LI Zhi-ping. The coupled mathematical model and numerical simulation of hydraulic fracturing and dissolving in rock salt[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(4): 427—430.
- [10] POLAK A, ELSWORTH D, LIU J, et al. Spontaneous switching of permeability changes in a limestone fracture with net dissolution[J]. **Water Resources Research**, 2004, 40(W03502): 1029—1038.
- [11] JISHAN LIU, JINCHANG SHENG, POLAK A, et al. A fully-coupled hydrological-mechanical-chemical model for fracture sealing and preferential opening[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2006, 43: 23—36.
- [12] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A. The evolution of permeability in a natural fracture: the significant role of pressure solution[J]. **Journal of Geophysical Res.**, 2004, 109(B03204): 1029—1029.
- [13] 周创兵, 熊文林. 不连续面的分形维数及其在渗流分析中的应用[J]. 水文地质工程地质, 1996, (6): 1—5.
ZHOU Chuang-bing, XIONG Wen-lin. The fractal dimension of discontinuity surface and its application to the seepage analysis[J]. **Hydrology and Engineering Geology**, 1996, (6): 1—5.
- [14] DREYBRODT W, BUHMANN D. A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion[J]. **Chem. Geol.**, 1991, 90: 107—122.
- [15] LEE Y H, et al. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1990, 27(6): 453—464.