

# 脆性岩石破裂过程损伤与渗流耦合数值模型研究<sup>1)</sup>

杨天鸿 唐春安 梁正召 李连崇 朱万成

谭国焕

(东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110006)

(香港大学土木工程系, 香港)

**摘要** 大量的实验结果表明, 脆性岩石的渗透性不是一个常量, 而是应力和应力诱发损伤破裂的函数。建立了一个描述非均匀岩石渗流 - 应力 - 损伤耦合数学模型 (FSD Model), 开发出岩石破裂过程渗流 - 应力 - 损伤耦合分析计算系统 (F-RFPA<sup>2D</sup>)。在该系统中, 单元的力学、水力学性质根据统计分布而变化, 以体现材料的随机不均质性, 材料在开裂破坏过程中流体压力传递通过单元渗流 - 损伤耦合迭代来实现。该系统能够对岩石试件在孔隙水压力和双轴荷载作用下裂纹的萌生、扩展过程中渗透率演化规律及其渗流 - 应力耦合机制进行模拟分析。最后, 给出两个算例: 算例 1 模拟荷载作用下岩石应力应变 - 渗透率全过程。模拟结果表明, 非均匀性对岩石的应力峰值强度、峰值前后其渗透性演化规律及其破裂机制影响十分明显, 模拟结果和实验结果较为一致; 算例 2 模拟孔隙水压力作用下岩石拉伸断裂过程, 通过和物理实验对比验证, 验证了模型计算结果的可靠性。

**关键词** 岩石破裂, 非均匀性, 脆性, 渗透率, F-RFPA<sup>2D</sup> 系统

## 引 言

工程岩体在渗流与应力相互作用下的变形、损伤破坏及其稳定性是许多工程学科所面临的共同问题<sup>[1]</sup>, 它具有重大的理论价值和工程应用背景。

尽管研究岩体渗流 - 应力耦合的模型和程序较多<sup>[1,2]</sup>, 但都局限于分析宏观裂隙 (从单裂隙到裂隙网络) 中应力应变状态, 涉及到岩体损伤破裂过程中新裂纹的萌生、扩展和贯通过程中渗透率的演化及其与应力的耦合作用模型较少。裂纹扩展过程中的渗透性演化及其力学机制, 还没有完全弄清楚<sup>[2]</sup>。

基于断裂力学理论的数值分析中, 一般使用加密网格模拟水压作用下的岩石断裂, 提出了多种宏观断裂模型: 分离裂缝模型 (Discrete Crack Model)、分布裂缝模型 (Smeared Crack Model) 和内嵌单元裂缝法 (Element-embedded Crack Approach)<sup>[3,4]</sup>。基于损伤力学原理的模型有 Kachanov 模型和 Perkins-Kern-Nordgren 模型<sup>[5]</sup>。郑少河<sup>[6]</sup>、朱珍德<sup>[7]</sup>提出裂隙岩体渗流场和损伤场的耦合模型。

近年来, 随着先进的试验设备和方法的不断研制开发, 许多学者通过研究水压致裂问题<sup>[8,9]</sup>和岩石应力应变 - 渗透率全过程试验<sup>[10~12]</sup>能够测定出岩石变形、渐近破裂过程中渗透性演化规律及其对

宏观力学行为的响应, Charlez<sup>[8]</sup>通过水压致裂实验指出, 随着水压增加和微破裂的发展, 渗透性变化引起应力变化十分明显, Yale<sup>[9]</sup>认为水压致裂模型中没有考虑损伤和渗透率的相互影响, 将导致一定程度的计算误差, Wang<sup>[10]</sup>认为岩石破裂引起的渗透性增高是矿井底板突水的控制因素, Li<sup>[11]</sup>提出了水压力和荷载作用下岩石应变 - 渗透率多项式方程。

本文依据岩石应力应变 - 渗透率全过程实验结果, 从细观角度初步建立具有脆性特征的岩石渗流 - 应力 - 损伤耦合模型 (FSD Model)<sup>[13]</sup>, 开发出岩石破裂过程渗流 - 应力耦合分析系统 (F-RFPA)<sup>[14]</sup>, 能够初步进行岩石破裂过程渗流与损伤耦合机制分析, 可以得到岩石破裂过程中渗流演化结果, 并且在水压致裂<sup>[15]</sup>和煤层开采底板突水<sup>[16]</sup>等典型渗流 - 损伤问题中得到初步应用。

## 1 渗流 - 应力 - 损伤耦合模型 (FSD Model)

在本文的模型中, 基于以下基本假设: (1) 岩石材料介质中的流体遵循 Biot 渗流理论<sup>[17]</sup>, (2) 岩石介质为带有残余强度的弹脆性材料, 其加载和卸载过程的力学行为符合弹性损伤理论, (3) 最大拉伸强度准则和 Mohr Coulomb 准则作为损伤阈值对单元进行损伤判断, (4) 在弹性状态下, 材料的应

2002-04-09 收到第一稿, 2003-07-12 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目 (50204003)、国家自然科学基金重点项目 (50134040) 和香港专项研究基金 (HKU7029/02E) 资助。

力-渗透系数关系按负指数方程描述<sup>[18]</sup>, 材料破坏后, 渗透系数明显增大, (5) 材料细观结构的力学参数, 按 Weibull 分布进行赋值, 以引入非均匀性

$$\varphi(s, m) = \frac{m}{s_o} \left( \frac{s}{s_o} \right)^{m-1} \exp \left[ - \left( \frac{s}{s_o} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中  $s$  为细观单元的参数,  $s_o$  为细观单元参数的统计平均值,  $m$  为非均匀系数.

### 1.1 渗流-应力耦合基本方程 (FS Model)

平衡方程

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_{ij}} + \rho X_j = 0, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

几何方程

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \varepsilon_\nu = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (3)$$

本构方程

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_\nu + 2G \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

渗流方程

$$k \nabla^2 p = 0 \quad (5)$$

耦合方程

$$k(\sigma, p) = \xi k_0 e^{-\beta(\sigma_{ii}/3 - \alpha p)} \quad (6)$$

式中,  $\rho$  为体力密度;  $\sigma_{ii}, \sigma_1, \sigma_3$  分别为正应力之和、最大和最小主应力;  $\varepsilon_\nu, \varepsilon_{ii}$  分别为体应变和正应变;  $\delta$  为 Kronecker 常数;  $G, \lambda$  为剪切模量和拉梅系数;  $\nabla^2$  为拉氏算子;  $k_0, k$  为渗透系数初值和渗透系数;  $p$  为孔隙水压力;  $\xi, \alpha, \beta$  分别为渗透系数突跳倍率、孔隙水压系数、耦合系数, 由试验确定.

式 (1)~ 式 (5) 是基于 Biot 经典渗流理论的表达式, 稳态时, 式 (5) 右端项为零. 式 (6) 引入了应力对渗透系数的影响<sup>[18]</sup>. 此外, 大量的实验结果表明, 渗透率不仅是应力的函数, 而且随着应力诱发损伤破裂演化, 渗透率发生显著变化<sup>[10~12]</sup>.

### 1.2 渗透率-损伤耦合方程 (FD Model)

当单元的应力状态或者应变状态将满足某个给定的损伤阈值时, 单元开始损伤, 损伤单元的弹性模量有下式表达

$$E = (1 - D)E_0 \quad (7)$$

式中:  $D$  为损伤变量,  $E$  和  $E_0$  分别是损伤单元和无损单元的弹性模, 这些参数假定都是标量. 下面

以单轴压缩和拉伸本构关系为例, 介绍单元的渗透率-损伤耦合方程.

当单元的剪应力达到 Mohr-Coulomb 损伤阈值时

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \geq f_c \quad (8)$$

式中:  $\phi$  为摩擦角,  $f_c$  为单轴抗压强度, 损伤变量  $D$  按下式表达

$$D = \begin{cases} 0, & \varepsilon < \varepsilon_{c0} \\ 1 - \frac{f_{cr}}{E_0 \varepsilon}, & \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $f_{cr}$  为残余强度, 其余的参数见图 1. 由实验可知<sup>[10~12]</sup>, 损伤引起的试件渗透突跳系数增大,  $\xi = 5$ ,  $\xi$  的大小由实验给出, 单元渗透系数的描述按下式

$$k = \begin{cases} k_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)}, & D = 0 \\ \xi k_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)}, & D > 0 \end{cases} \quad (10)$$

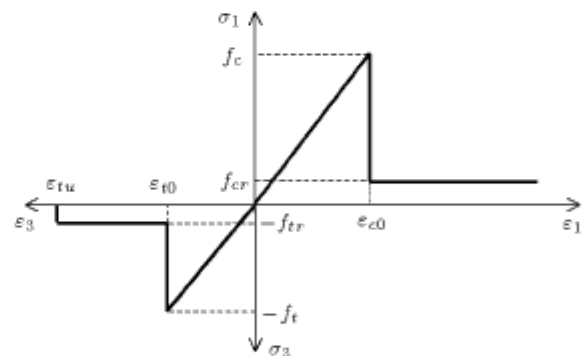


图 1 单轴拉伸和压缩下细观单元本构模型

Fig.1 Elastic damage constitutive law for element under uniaxial compressive stress and tensile stress

当单元达到抗拉强度  $f_t$  损伤阈值时

$$\sigma_3 \leq -f_t \quad (11)$$

损伤变量  $D$  按下式表达

$$D = \begin{cases} 0, & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon \\ 1 - \frac{f_{tr}}{E_0 \varepsilon}, & \varepsilon_{tu} \leq \varepsilon < \varepsilon_0 \\ 1, & \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $f_{tr}$  为残余强度, 其余的参数见图 1.

单元渗透系数的描述按下式

$$k = \begin{cases} k_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)}, & D = 0 \\ \xi k_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)}, & 0 < D < 1 \\ \xi' k_0 e^{-\beta(\sigma_3 - p)}, & D = 1 \end{cases} \quad (13)$$

由于实验结果是在三轴压缩状态下得到的, 本文的模型延伸到拉伸坐标轴。同时, 实验研究还表明<sup>[19]</sup>, 岩石试件达到峰值后, 形成贯通裂纹的试件比形成非贯通剪切带试件的渗透系数还要高上百倍。所以在模型中, 当拉应变达到极限拉应变 ( $\varepsilon > \varepsilon_{tu}$ ) 时, 单元的完全丧失承载能力和刚度, 与文献<sup>[24]</sup>对裂纹单元的处理方法一致, 设置成软单元 ( $D = 1$ )。认为该单元的渗透系数和损伤单元 ( $D < 1$ ) 相比, 显著增加,  $\xi' = 100$ 。岩石峰值后的渗透特性, 取决于岩石性质, Wang<sup>[10]</sup>, Li<sup>[11]</sup> 对不同岩性的峰值后的渗透特性进行了描述, 所以  $\xi$  值应该由实验确定。

## 2 渗流 - 应力 - 损伤耦合计算的程序设计

F-RFPA<sup>2D</sup> 系统中, 针对介质的非均匀性, 把模型离散为不同参数分布的细观单元, 得到以下两组代数方程组, 应用传统有限元技术进行稳态渗流和线弹性应力计算

$$Kp = F \quad (14)$$

$K$  为总体渗透矩阵,  $K = \iint_{\Omega} k^e dx dy = \iint_{\Omega} B^T M^e B dx dy$ , 由单元渗透矩阵组装而成;  $p$  为未知节点的水压列阵;  $F$  是节点的流量列阵;  $B$  为几何矩阵;  $M^e$  为单元渗透系数矩阵

$$\bar{K}\delta = \bar{P} \quad (15)$$

$\bar{K}$  为总体刚度矩阵,  $\bar{K} = \iint_{\Omega} \bar{k}^e dx dy = \iint_{\Omega} B^T D^e B dx dy$ , 由单元刚度矩阵组装而成;  $\delta$  为节点位移列阵;  $\bar{P}$  为等效节点载荷列阵;  $D^e$  为单元弹性矩阵。

对于不同的单元, 具有相同的几何矩阵和积分区域, 但是弹性矩阵和渗透矩阵随单元的不同而改变, 分别求解式 (14) 和式 (15) 可得到水压  $p$  和有效应力  $\sigma'$ 。

由于有效应力  $\sigma'$  和损伤变量  $D$  决定了单元的渗透系数  $k$ ; 反之, 渗透系数  $k$  又通过水压力  $p$  的变化影响有效应力  $\sigma'$  的分布, 单元应力场和渗流场是相互耦合的, 同时单元损伤弱化过程将引起应力场的调整。因此, 对于每一个加载步, 计算流程为 (见图 2):

- (1) 由渗透系数  $k^n$  进行渗流计算 (方程 (5)), 求解单元水压力  $p$ ;
- (2) 按修正的有效应力原理 (方程 (4)) 计算有效应力  $\sigma'$ ;
- (3) 按渗流 - 应力耦合方程 (方程 (6)), 求解渗透系数的变化值  $k^{n+1}$ ;
- (4) 用强度准则 (方程 (8),(11)), 判断是否有单元损伤;
- (5) 对损伤单元按渗流 - 损伤耦合方程 (方程 (6)), 求解损伤后渗透系数的变化值  $k^{n+1}$ ;
- (6) 迭代计算, 比较前后两步渗透系数值的误差  $\omega = |k^{n+1} - k^n|/k^n$ , 直到满足给定的精度为止;
- (7) 否则, 重新回到第一步计算, 直到单元损伤演化过程停止为止;
- (8) 进入下一个载荷步。

本文的模型中, 将细观力学的思想应用到材料破坏问题中, 将连续介质在细观尺度上离散为由四边形单元联结而成的网络系统, 引入弹性损伤本构关系, 通过弹性模量和强度等力学性质的弱化和渗透系数、水压力的提高描述单元的损伤和破坏后的渗流 - 应力 - 损伤耦合作用机制。虽然单元的力学、水力学行为比较简单, 但宏观复杂的破坏现象和非线性行为可能通过它们的相互作用反映出来<sup>[24]</sup>。相对于分布裂缝模型<sup>[3,4]</sup>, 避免了复杂而任意的本构描述。相对于分离裂缝模型<sup>[3,4]</sup>, 避免了复杂的应力强度因子计算和网格重新划分工作。对比文献<sup>[6,7]</sup>的渗流 - 损伤耦合模型, 考虑了材料的非均匀性, 具有分析裂纹萌生、扩展、贯通过程的特点。由于 F-RFPA<sup>2D</sup> 系统是针对脆性破裂性质的岩石材料开发的, 所以分析结论不适合具有明显塑性性质、屈服后渗透率减小的岩石材料<sup>[20]</sup>, 针对这一现象, 在本模型中也可以通过调整残余强度和减小  $\xi$  值近似描述。

本文模型另一个特点是认为在单元损伤破裂时释放的弹性能即为声发射的能量, 破坏单元的数量为声发射次数, 这些信息为岩石破裂失稳前兆预测提供科学依据。

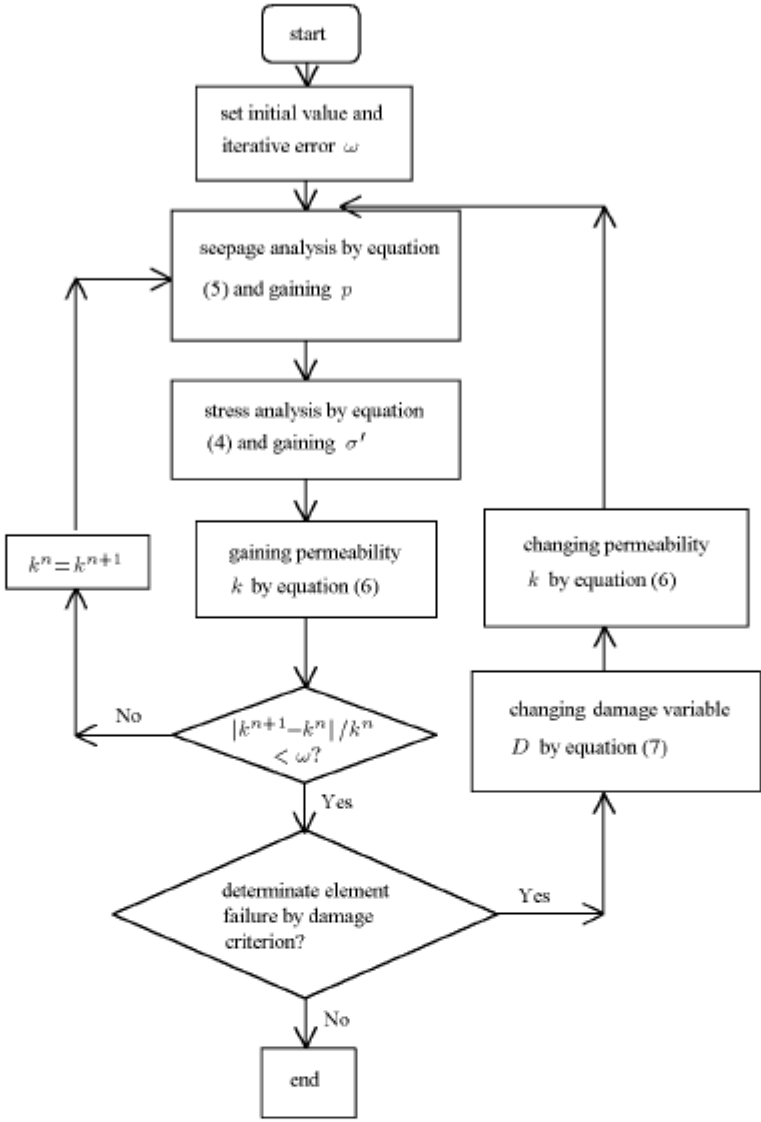


图 2 F-RFPA<sup>2D</sup> 计算流程图

Fig.2 The flow chart of F-RFPA<sup>2D</sup> program

3 载荷作用下岩石应力应变 - 渗透率全过程试验对比

数值模型几何尺寸以及加载条件和试验模型 [11,12,19] 一致. 采用二维平面应力薄板模型, 长 80 mm, 宽 50 mm. 总共  $160 \times 100 = 16\,000$  个四边形单元. 侧压 4 MPa, 试件底端孔隙水压 3.8 MPa, 上端孔隙水压 2.3 MPa. 单元的力学、水力学特性参数具体取值见表 1 所列, 模型见图 3 所示. 由于数值模型为二维模型, 无法和试验结果进行定量比较, 但仍可以定性地得出应力应变 - 渗透率过程的基本规律.

图 4 显示的是当均质度  $m = 2$  时, 渗透系数 - 应变曲线图和应力应变 - 声发射事件. 其中试件整

表 1 材料力学参数 (平均值)

Table 1 Input material mechanical properties (mean values)

| Parameter                  | Denotation | Value      |
|----------------------------|------------|------------|
| Young's modulus            | $E_0$      | 10 GPa     |
| Poisson's ratio            | $\nu$      | 0.25       |
| internal friction angle    | $\varphi$  | $30^\circ$ |
| compression strength       | $f_c$      | 100 MPa    |
| tension strength           | $f_t$      | 10 MPa     |
| residual strength          | $f_{cr}$   | 6 MPa      |
| residual strength          | $f_{tr}$   | 0.6 MPa    |
| permeability               | $k_0$      | 0.1 cm/s   |
| water pressure             | $\Delta p$ | 1.5 MPa    |
| water pressure coefficient | $\alpha$   | 0.6        |
| homogeneity index          | $m$        | 2          |

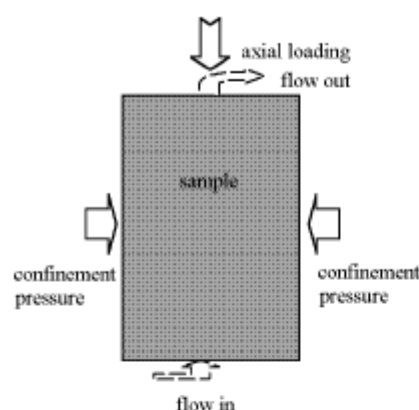
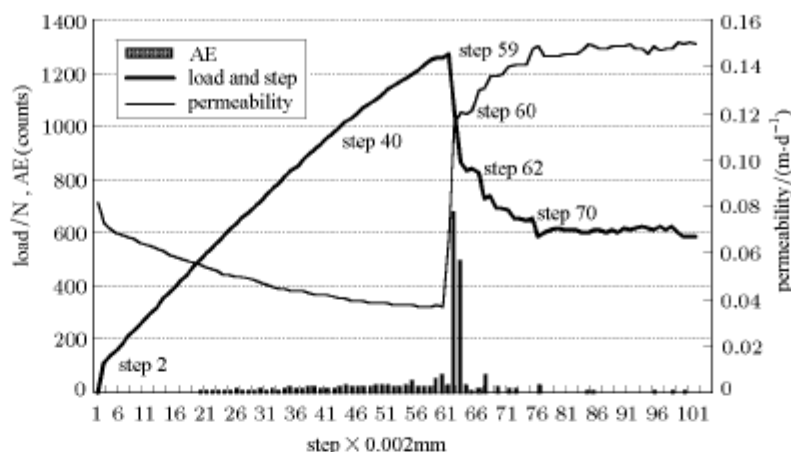


图 3 数值模拟试验的结构图

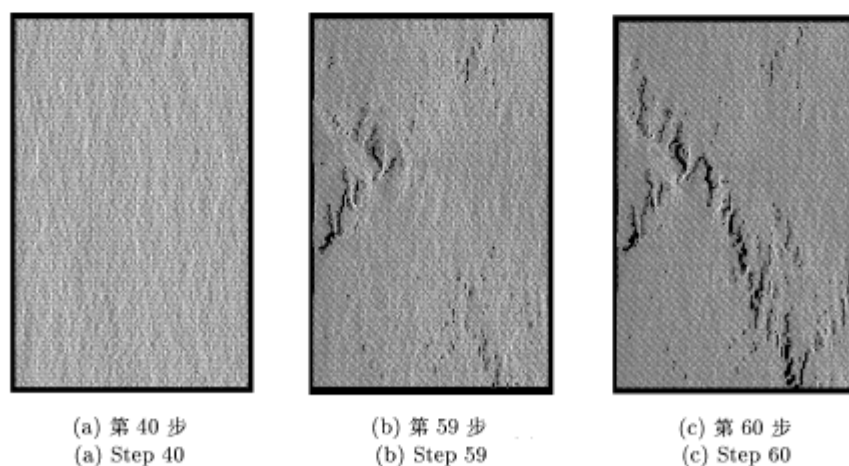
Fig.3 Configuration for numerical tests

图 4 岩石试件应力应变 - 渗透率以及声发射全过程曲线 (F-RFPA<sup>2D</sup> 模拟结果)Fig.4 Numerically obtained relationship among load, permeability and loading step and the associated acoustic emissions (AE events, relative counts) of the sample with the homogeneity index  $m = 2$  (F-RFPA<sup>2D</sup> simulated)

体渗透系数可通过计算得到的总流量、试件两端的水压力差，由达西定律统计得到。

图 4 表明，在弹性变形阶段，渗透系数是在逐渐减小的。在非线性变形阶段，当轴向应变增加时，渗透系数较小程度变缓，并开始缓慢增加，失稳破坏后出现大的阶跃。在每一次渗透系数发生变化时，就可以发现与之相对应的应力降。因为是位移加载方式突然破裂，将导致强烈的声发射现象和突然的应力降。由此可得：试件损伤（微破裂）的发展引起渗透系数的变化，很明显渗透系数的变化和试样的损伤是一致的。图 5(a)~图 5(f) 是在水压力和围压作用下岩石试样逐渐破裂过程图片，图中的亮度表示

应力的大小。图 5(e) 显示的是加载应力达到峰值强度后的声发射分布，图中圆圈的大小代表破坏单元释放的弹性能的大小。需要注意的是声发射弥散分布在整个试件表面，到第 59 步的时候试件发生断裂成核，虽然在整个试件范围内都有声发射产生，但是大量的声发射还是集中在成核区附近，这个区域实际上是最后发生断裂的位置。在第 62 步的时候，在这个成核区形成一个声发射非常显著的区域，断裂破坏为渗流提供了流动的路径（图 5(f)），整体的渗透系数比加载之前提高了 1 倍，从图上可以看出峰值后渗透系数增大的倍率不大，这是由于裂纹没有完全贯通。

图 5 岩石试件不同加载步应力场、渗流场以及声发射分布图 (F-RFPA<sup>2D</sup> 模拟结果)Fig.5 Numerically obtained stress and flow velocity evolution during failure of sample ( $m = 2$ ) with hydraulic pressure (F-RFPA<sup>2D</sup> simulated)

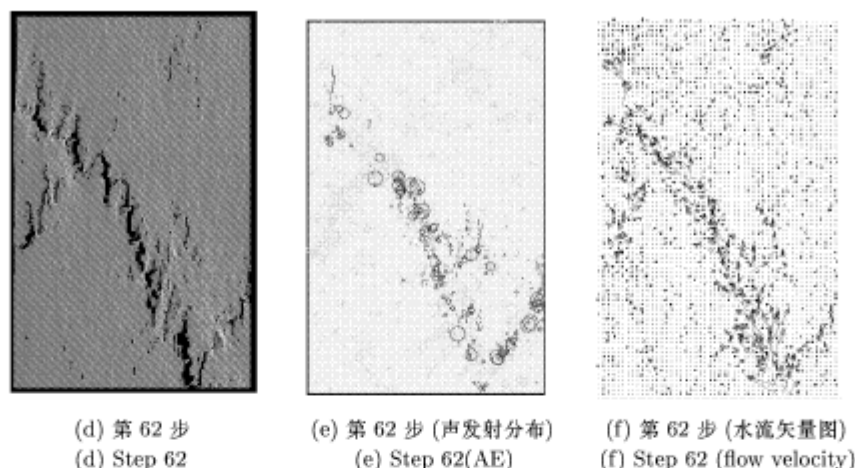
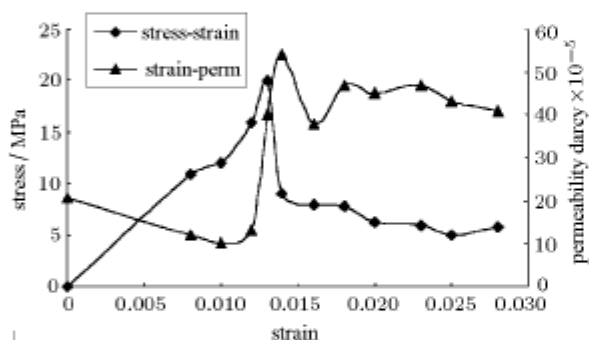


图 5 岩石试件不同加载步应力场、渗流场以及声发射分布图 (F-RFPA<sup>2D</sup> 模拟结果)(续)

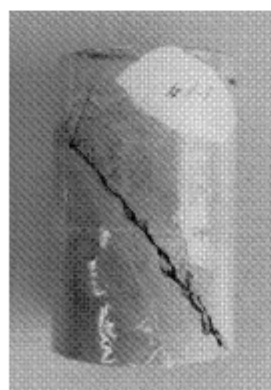
Fig.5 Numerically obtained stress and flow velocity evolution during failure of sample ( $m=2$ ) with hydraulic pressure (F-RFPA<sup>2D</sup> simulated)(continued)

实验得到的典型应力应变 - 渗透率曲线和裂纹扩展模式见图 6, 由于数值模型为二维模型, 无法



(a) 典型岩石试件应力应变 - 渗透率变化曲线

(a) The relationship among stress, strain and permeability of sample



(b) 破坏模式

(b) Failure of sample

图 6 实验结果 [19]

Fig.6 Results of experiment [19]

和圆柱形试样的试验结果进行定量比较, 但从应力应变 - 渗透率变化趋势和裂纹扩展模式上对比, 具有相似性。

#### 4 孔隙水压力作用下岩石拉伸断裂验证

Bridgman<sup>[22]</sup> 提出了一个在没有任何机械载荷下孔隙水压引起岩石断裂的经典实验 (Pinch-off test), Bruno 和 Nakagawa<sup>[21]</sup> 得到了孔隙水压力和直接拉伸实验强度关系的理论解 (当孔隙水压力大于等于试样的抗拉强度时断裂), 对比这一经典的实验, 本文通过数值模拟验证模型的可靠性。

参照 Bridgman 的试验<sup>[22]</sup>, 本文设计的数值模拟模型见图 7. 流体的渗流边界条件为: 流体由试样上下侧面流入, 由试样左右端流出. 数值试样尺寸 50mm×400mm, 划分 2000 个单元, 均质度  $m=3$ , 细观单元的统计平均抗拉强度 8 MPa, 由此得到的整体试样的拉伸强度只有  $f_t = 2.05$  MPa. 细观单元其他参数的统计平均值为: 弹性模量 50 GPa, 泊松比  $\nu = 0.25$ , 渗透系数初值  $k_0 = 0.1$  cm/s, 水压系数  $\alpha = 0.80$ .

图 8, 图 9 是渗流矢量图和孔隙水压力梯度的数值模拟结果, 由图可以看出, 单个拉裂纹首先萌生在试样垂直于  $X$  轴的中心位置, 此时的压力为  $p_0 = 2.5$  MPa. 同试验结果一样, 数值模拟结果也表明裂纹萌生时的孔隙水压力接近或稍高于直接拉伸试验时的强度 (等效孔隙水压系数  $\alpha = f_t/p_0 \approx 0.82$ ), 同 Bruno<sup>[21]</sup> 与 Rice<sup>[23]</sup> 的试验结果相一致. 表明本文的模型中孔隙水压力计算结果是可靠的。

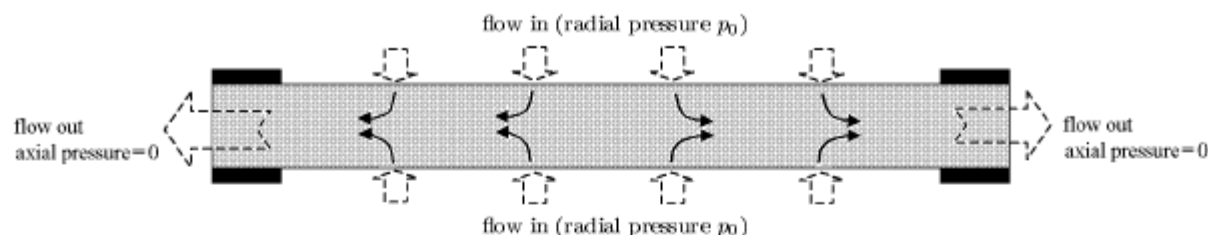
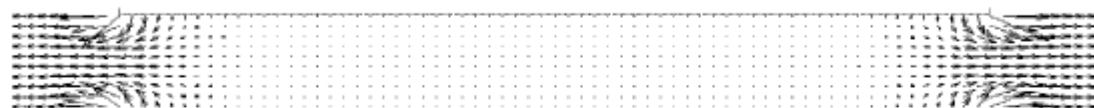
图 7 孔隙压力试验容器示意图<sup>[21]</sup>Fig.7 Pore pressure fracture vessel<sup>[21]</sup>

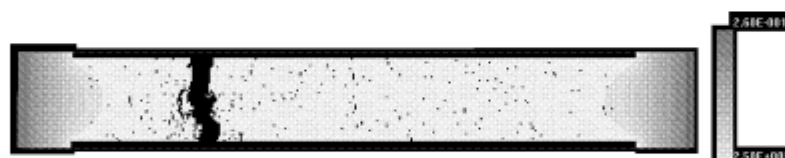
图 8 数值模拟的渗流速度场

Fig.8 Numerically obtained flow velocity evolution during failure of sample



(a) 断裂前

(a) Before in failure



(b) 断裂后

(b) After in failure

图 9 数值模拟得到的破坏过程中孔隙水压梯度图 (单位: 0.1 MPa)

Fig.9 Numerically obtained pore pressure grads during failure of sample (unit: 0.1 MPa)

## 5 结 论

认清岩石或岩体破坏过程中的裂纹扩展对渗流场演化的影响,从细观力学的更高层次上解释宏观工程岩体渗流-应力耦合作用下的破坏、失稳行为,更具有理论价值和实际意义。本文基于损伤力学和Biot经典渗流力学,在岩石应力应变-渗透率全过程试验基础上,建立了渗流-应力-损伤耦合模型(FSD Model),开发出岩石破裂过程渗流-应力耦合分析系统(F-RFPA<sup>2D</sup>),这个系统能够对裂纹的萌生、扩展过程中渗透率演化规律及其渗流-应力耦合机制进行模拟分析,把流固耦合问题的研究从应力状态分析深入到破坏过程分析之中。通过压缩载

荷和单轴拉伸两个典型试验的数值模拟验证,表明本文提出的模型是可靠的。

## 参 考 文 献

- 1 仵彦卿,张倬元. 岩体水力学导论. 成都:西南交通大学出版社, 1995 (Wu Yanqing, Zhang Zhuoyuan. An Introduction to Rock Mass Hydraulics. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995(in Chinese))
- 2 陶振宇,窦铁生. 关于岩石水力学模型. 力学进展, 1994, 24(3): 409~417 (Tao Zhenyu, Dou Tiesheng. Model of rock hydraulics. *Advances in Mechanics*, 1994, 24(3): 409~417 (in Chinese))
- 3 Jeffrey RG, Mills KW. Hydraulic fracturing applied to inducing longwall coal mine goaf falls. *Pacific Rock* 2000,

- Girard, Liebman, Breeds, Doe eds, Balkema, Rotterdam, 2000. 423~430
- 4 Keivan Noghabai. Discrete versus smeared versus element-embedded crack models on ring problem. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 3: 307~314
- 5 Valko P, Economides MJ. Propagation of hydraulically induced fractures—A continuum damage mechanics approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(3): 221~229
- 6 郑少河, 朱维申. 裂隙岩体渗流损伤耦合模型的理论分析. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 156~159 (Zheng Shaohe, Zhu Weishen. Analysis on a coupled seepage-damage model for jointed rock mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(2): 156~159 (in Chinese))
- 7 朱珍德, 孙钧. 裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合分析模型. 水文地质工程地质, 1999, 2: 35~40 (Zhu Zhende, Sun Jun. Coupled model of seepage field and damage field of unsteady state in fractured rock mass. *Hydrogeology and engineering geology*, 1999, 2: 35~40 (in Chinese))
- 8 Charlez PA. *Rock Mechanics (II: Petroleum Applications)*. Paris: Technical Publisher, 1991
- 9 Yale DP, Lyons SL, Qin G. Coupled geomechanics-fluid flow modeling in petroleum reservoirs: Coupled versus uncoupled response. *Pacific Rocks 2000*, Girard, Liebman, Breeds, Doe eds, Balkema, Rotterdam, 2000. 137~144
- 10 Wang JA, Park HD. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process. *Engineering Geology*, 2002, 63: 291~300
- 11 Li Shiping, Wu Daxin. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of Yinzhuang sandstone. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34(3/4): 435~441
- 12 Souley M, Homand F, Pepa S, et al. Damage-induced permeability changes in granite: A case example at the URL in Canada. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2001, 38: 297~310
- 13 Tang CA, Yang TH, Tham LG, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2002, 39: 477~489
- 14 杨天鸿, 唐春安, 朱万成等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 489~493 (Yang Tianhong, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, et al. Coupling analysis of seepage and stress in rock failure process. *Chinese Journal of Rock and Soil Engineering*, 2001, 23(4): 489~493 (in Chinese))
- 15 Yang TH, Li LC, Tang CA, et al. Numerical approach to hydraulic fracturing in heterogeneous and permeable rocks. *Key Engineering Materials*, 2002, 46/47: 351~356
- 16 Yang TH, Zhu WC, Xu T, et al. Numerical simulation on instable failure process of floor in confined aquifer. In: *Proceedings in Mining Science and Safety Technology*, Beijing: Science Press, 2001. 37~43
- 17 Biot MA. General theory of three-dimensional consolidation. *J Appl Phys*, 1941, 12: 155~164
- 18 Louus C. *Rock hydraulics*. In: *Rock Mechanics*, Muller L ed, New York: Elsevier Science, 1974
- 19 杨天鸿. 岩石破裂过程渗透特性及其与应力耦合作用的研究. [博士学位]. 沈阳: 东北大学, 2001 (Yang Tianhong. Study on permeability character and coupling analysis of seepage and stress in rock failure process. [Ph D Thesis]. Shenyang: Northeastern University, 2001 (in Chinese))
- 20 Zhu W, Wong T-F. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: permeability evolution. *J Geophys Res*, 1997, 102 (B2): 3027~3041
- 21 Bruno MS, Nakagawa FM. Pore pressure influence on tensile fracture propagation in sedimentary rock. *In J Rock Mech Min Sci*, 1991, 28(4): 261~273
- 22 Bridgman PW. Breaking tests under hydrostatic pressure and conditions of rupture. *Phil Mag*, 1912, 24: 63~80
- 23 Rice JR, Cleary MP. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. *Rev Geophys Space Phys*, 1976, 14: 227~241
- 24 陈永强, 郑小平, 姚振汉. 三维非均匀脆性材料破坏过程的数值模拟. 力学学报, 2002, 34(3): 351~359 (Chen Yongqiang, Zheng Xiaoping, Yao Zhenhan. Numerical simulation of failure processes in 3-D heterogeneous brittle material. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34(3): 351~359 (in Chinese))

## STUDY ON MODEL OF DAMAGE AND FLOW COUPLING IN BRITTLE ROCK FAILURE PROCESS<sup>1)</sup>

Yang Tianhong   Tang Chunan   Liang Zhengzhao   Li Lianchong   Zhu Wancheng  
(*Centre for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China*)

Tham L.G.

(*Department of Civil and Structural Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong*)

**Abstract** Experimental results provide strong evidence that rock permeability cannot be a constant but a function of stresses and stress-induced damage. In this paper, a numerical code Rock Failure Process Analysis (F-RFPA<sup>2D</sup>) is implemented by introducing a flow-stress-damage (FSD Model) coupling model for heterogeneous rocks and taking into account the growth of the existing cracks and the formation of new fractures. In this FSD model, material is described by many elements with the same size and different mechanical and permeability parameters in order to reflect the heterogeneity of rock. The water fluid pressure during failure process is obtained by flow and stress coupling iteration. A coupling analysis of flow and damage under hydraulic fracturing on rock is attained to simulate the fracture process of rock, and this model has been used to investigate the behavior of fluid flow, damage evolution and their coupling action in samples subjected to both hydraulic and biaxial compressive loading. Two numerical simulations are given. The results of the first simulation suggest that the nature of fluid flow in rocks varies from material to material and the peak strength of the rock samples and the change of rock permeability during progressive failure process depend strongly upon the heterogeneity of the rocks, and the numerical results compare well with the corresponding experimental results. Another simulation result presents a failure process subjected to tensile stress caused by pore pressure. It shows that the FSD model is valid by comparing with the experimental results.

**Key words** failure process, heterogeneity, brittleness, permeability, F-RFPA<sup>2D</sup>

---

Received 9 April 2002, revised 12 July 2003.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50204003, 50134040) and the Hong Kong Research Grants Council (HKU7029/02E).