

文章编号: 1673-3363-(2015)06-0889-09

# 基于微裂纹演化的煤层底板损伤破裂与 渗流演化过程数值模拟

陆银龙, 王连国

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 基于岩石细观尺度微裂纹扩展演化的物理机制, 将微裂纹损伤张量引入到经典的 Biot 孔隙弹性理论中, 推导了岩石细观损伤演化与岩石宏观力学性能及渗透特性之间的联系, 建立了基于微裂纹演化的岩石渗流-应力-损伤耦合模型与控制方程。利用 MATLAB 软件编程, 将该耦合模型嵌入到 COMSOL 软件中, 实现了流-固耦合作用下岩石损伤破裂及渗流演化过程动态模拟的数值程序。在此基础上, 进行了承压水体上采煤的数值模拟, 系统研究了煤层开采过程中底板裂隙损伤演化、破坏形态和渗流演化规律, 深入揭示了煤层底板“渗流通道”形成及突水灾变的复杂演化过程和机理。

**关键词** 微裂纹损伤; 渗流; 破裂演化; 底板突水

**中图分类号** TD 31 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.06.004

## Numerical modeling of mining-induced fracturing and flow evolution in coal seam floor based on micro-crack growth

LU Yinlong, WANG Lianguo

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** Based on the mechanisms of micro-crack growth, a micro-crack damage tensor has been introduced to the classical Biot's poroelasticity theory to deduce the relation between the microscopic damage evolution of rock and the macroscopic mechanical and hydraulic properties and to establish the hydro-mechanical coupling model and governing equation based on the fracturing evolution. Then the proposed model has been programmed with MATLAB and COMSOL to simulate the failure process and flow evolution of rock under hydro-mechanical couplings. On this basis, numerical simulations of coal mining above a confined aquifer have been performed and the mining-induced fracturing, failure patterns and flow evolution in coal seam floor have been analyzed systematically. The numerical results clearly show how the groundwater inrush channel is formed.

**Key words** micro-crack damage; seepage; fracturing evolution; groundwater inrush

收稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046905); 国家自然科学基金项目(51274191, 51404245); 教育部博士点基金项目(20130095110018)

作者简介: 陆银龙(1985—), 男, 江苏省盐城市人, 讲师, 从事矿山工程力学、岩石力学等方面的研究。

E-mail: yinlong\_lu@163.com

Tel: 15262026776

煤层底板突水灾害是困扰和威胁我国煤矿安全生产的重大问题之一。近年,随着浅部煤炭资源的枯竭,各大矿井相继进入深部(约 800~1 500 m)开采状态。在深部开采条件下,岩体通常处于高地应力、高地温、高岩溶水压以及强烈开采扰动影响等多种因素共同作用的复杂地质力学环境中,从而导致深部开采煤层底板突水的问题更加突出。如何科学、准确地认识煤层底板突水发生条件与机理,对于确保我国大量的深部承压水体上煤炭资源的安全开采具有十分重要的意义<sup>[1-3]</sup>。

从本质上讲,煤层底板突水就是承压水沿煤层底板中采动裂隙网络涌入煤层工作面或采掘巷道的一种现象。因此,正确认识和解决煤层底板突水问题的一个关键内容在于如何有效地描述煤层底板在采动应力以及承压水压力联合作用下的损伤破裂及渗流行为,对此不少学者已尝试提出多种理论模型,如“下三带”理论<sup>[4]</sup>、递进导升理论<sup>[5]</sup>、隔水关键层理论<sup>[6]</sup>、非线性动力学理论<sup>[7]</sup>等。

近年,随着数值模拟技术的迅速发展,不少学者采用数值模拟手段来研究煤层底板破裂与突水过程<sup>[8-10]</sup>。这些研究从一定程度上揭示了煤层底板突水孕育和演化过程,对煤层底板突水防治工程实践具有一定的指导意义。大量的现场观测和实验数据表明,煤层底板岩体导水并不是由于底板岩体进入塑性阶段,而是由于岩体中大量的原生细观裂纹在采动应力与水压力联合作用下发生扩展、连通和汇集,从而导致底板损伤破裂以及隔水性能减弱(渗透性增强)而造成的<sup>[11]</sup>。因此,如何建立一种有效的理论模型和数值方法来描述流-固耦合作用下底板岩体裂隙损伤演化及渗流特性,仍是当前煤矿底板突水机理研究中的一个关键科学问题。

## 1 基于微裂纹演化的岩石渗流-应力-损伤耦合模型

### 1.1 基本理论框架

在传统的岩石渗流-应力耦合研究中,一种经典的理论是 Biot 孔隙弹性理论<sup>[12]</sup>,它通过引入流体孔隙压力  $p$  和容量变化  $\zeta$  2 个状态变量,建立起了固体变形和流体流动之间的耦合关系。为考虑损伤效应对岩石渗流-应力耦合作用过程的影响,文献[13-14]建议在经典的 Biot 模型中引入损伤张量  $\mathbf{D}$  作为新的状态变量,进而可以导出岩石渗流应力-损伤耦合控制方程,即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\mathbf{D}) : \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{D}) \cdot p \\ p = M(\mathbf{D}) \cdot [\zeta - \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{D}) : \boldsymbol{\varepsilon}] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{C}(\mathbf{D})$ ,  $\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{D})$  和  $M(\mathbf{D})$  分别为损伤岩石的弹性刚度张量、Biot 有效应力系数张量和 Biot 模量;  $\boldsymbol{\sigma}$  和  $p$  为岩石应力张量和孔隙压力。式中的岩石 Biot 系数( $\boldsymbol{\alpha}$  和  $M$ )不是独立变量,借助细观力学分析可进一步得出其与岩石弹性系数之间的关系<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \alpha_{ij}(\mathbf{D}) = \delta_{ij} - \frac{1}{3} \cdot \frac{C_{ijkk}(\mathbf{D})}{K_s} \\ M(\mathbf{D}) = \frac{K_s}{\left(1 - \frac{K^*(\mathbf{D})}{K_s}\right) - \phi \left(1 - \frac{K_s}{K_f}\right)} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号;  $C_{ijkk}$  为岩石弹性刚度系数;  $K_s$  为岩石矿物颗粒体积模量;  $K^*(\mathbf{D}) = C_{ijij}(\mathbf{D})/9$  为岩石广义排水体积模量;  $\phi$  为岩石孔隙度;  $K_f$  为水的体积模量。

为求解式(1)给出的全耦合方程,还需补充岩石渗流控制方程。假设水在宏观损伤岩石中流动仍服从 Darcy 定律,则有

$$-\nabla \left( -\frac{\mathbf{K}(\mathbf{D})}{\nu} \nabla p \right) = \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{M(\mathbf{D})} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{D}) : \boldsymbol{\varepsilon}) \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{K}(\mathbf{D})$  为损伤岩石的等效渗透张量;  $\nu$  为水的动力黏滞系数。

式(1)~(3)即为岩石渗流-应力-损伤耦合作的一般控制方程,其中岩石的弹性刚度张量  $\mathbf{C}(\mathbf{D})$  和渗透系数张量  $\mathbf{K}(\mathbf{D})$  均被视为岩石损伤张量  $\mathbf{D}$  的函数。下面将基于岩石内部微裂纹扩展机制,导出岩石损伤演化与岩石力学性能和渗透性能之间的具体关系。

### 1.2 微裂纹损伤演化方程

研究表明,岩石等脆性材料的细观损伤机制主要表现为微裂纹的起裂、扩展和连接贯通等作用(忽略微孔隙增长引起的韧性损伤和晶体位错造成的塑性损伤)<sup>[16]</sup>。岩石内部的细观尺度上的微裂纹演化是造成岩石宏观力学特性和渗流特性改变的根本原因。为表征微裂纹损伤特性的影响,这里考虑采用基于微裂纹密度相对变化的二阶对称损伤张量<sup>[17-18]</sup>。假设从宏观岩石介质中任意选取一个代表性的体积单元(REV),在该单元中随机分布着  $N$  组微裂纹,其中第  $k$  组微裂纹的数目密度和法向单位向量分别为  $m_k$  和  $\mathbf{n}_k$ ,于是微裂纹损伤张量可以定义为

$$\mathbf{D} = \sum_{k=1}^N m_k d_k (\mathbf{n}_k \otimes \mathbf{n}_k) \quad (4)$$

式中  $d_k$  为第  $k$  组微裂纹密度的相对变化, 其在平面条件下可以表示为

$$d_k = (a_k^2 - a_0^2) / a_0^2 \quad (5)$$

式中:  $a_0$  和  $a_k$  分别为第  $k$  组微裂纹的初始长度以及扩展以后的长度。

可以看出, 式(4)建立了岩石损伤张量与微裂纹扩展长度之间的联系, 是一个具有明确物理意义的损伤变量。显然, 该微裂纹损伤演化方程须进一步根据微裂纹扩展的动力学条件和规律来确定。目前, 用于分析宏观预制裂纹扩展的一种经典模型是翼型裂纹滑动模型<sup>[19-20]</sup>, 但是这种模型并不能有效地描述细观尺度下的微裂纹扩展。大量的岩石细观试验结果表明, 在细观尺度下微裂纹扩展很少表现为翼型模式, 而是其他更为复杂的形式<sup>[21]</sup>。为了便于从宏观连续介质力学角度建立岩石损伤演化准则, 这里采用文献[22-24]建议的等效微裂纹扩展模型, 即认为在微裂纹周围存在一个等效的局部拉应力场, 在该局部拉应力场的作用下微裂纹将发生自相似模式的拉伸扩展。局部拉应力场的大小与微裂纹所受的远场偏应力和围压的控制, 可采用如下形式来表示:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_i &= \sigma_n + f(a_k) S_n \\ &= \mathbf{n}_k \sigma \mathbf{n}_k + f(a_k) \mathbf{n}_k [\sigma - (\text{tr} \sigma / 3) \delta] \mathbf{n}_k \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\tilde{\sigma}_i$  为作用在第  $k$  组微裂纹表面的等效局部拉应力;  $\sigma_n$  和  $S_n$  分别为第  $k$  组微裂纹所受到的远场正应力和偏应力;  $\delta$  为 Kronecker 符号;  $f$  为取决于当前微裂纹长度  $a_k$  的一个标量比例函数, 可以取如下函数形式<sup>[17]</sup>:

$$f(a_k) = \omega \cdot \left[ 1 - \frac{(a_k - b)^2}{a_0(a_0 - b)} \right] \quad (7)$$

式中:  $\omega$  为反映微裂纹扩展特征的无量纲常数;  $b$  为微裂纹扩展临界长度。以上这些参数均可以通过岩石常规三轴压缩试验来确定<sup>[17]</sup>。

根据式(6)给出的微裂纹表面等效拉应力, 同时考虑到微裂纹中孔隙压力对微裂纹扩展的影响, 依据线弹性断裂力学理论, 可以写出微裂纹的扩展演化准则为

$$K_I(a_k) = \sqrt{\pi a_k} (\tilde{\sigma}_i + p) = K_{IC} \quad (8)$$

式中:  $K_I$  为微裂纹尖端的应力强度因子;  $K_{IC}$  为岩石的 I 型断裂韧度。利用式(8)可以求得在给定的应力状态下岩石代表性体积单元中每一组微裂纹的

扩展情况, 进而可以利用式(4)计算出当前状态下该单元体的损伤张量。

现在考虑建立岩石的弹性刚度张量与微裂纹损伤张量之间的联系。对于包含微裂纹的固体材料, 许多学者<sup>[17,25]</sup>已建立起材料的弹性势与其内部的微裂纹损伤张量之间的函数关系, 这里采用修正的 Helmholtz 自由能函数来描述损伤岩石的弹性势函数<sup>[25]</sup>, 即

$$\Psi(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{D}) = \frac{1}{2} \lambda (\text{tr} \boldsymbol{\varepsilon})^2 + \mu \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}) + A \text{tr} \boldsymbol{\varepsilon} \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{D}) + 2B \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{D}) \quad (9)$$

式中:  $\Psi$  和  $\boldsymbol{\varepsilon}$  分别为岩石的 Helmholtz 自由能和应变张量;  $\lambda$  和  $\mu$  为岩石初始 Lamé 弹性常数;  $A$  和  $B$  为引入的损伤影响系数, 用于描述微裂纹损伤对岩石自由能的贡献。

在连续介质力学理论框架下, 将式(9)对应变张量  $\boldsymbol{\varepsilon}$  进行一阶求导, 就可以获得损伤岩石材料的等效弹性刚度张量, 其可以显式地表示为

$$\begin{aligned} C_{ijkl} &= \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{jk} \delta_{il}) + A (\delta_{ij} D_{kl} + D_{ij} \delta_{kl}) + \\ &B (\delta_{ik} D_{jl} + \delta_{il} D_{jk} + D_{ik} \delta_{jl} + D_{il} \delta_{jk}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $C_{ijkl}$  为岩石等效弹性刚度系数;  $D_{ij}$  为岩石微裂纹损伤张量分量。式(10)建立了岩石宏观力学特性参数与微裂纹损伤之间的直接联系。

### 1.3 微裂纹损伤引起的渗透性演化方程

岩石代表性体积单元(REV)可以视为由多孔基体介质和嵌在其中的随机分布的微裂纹所构成, 因此岩石 REV 的总体渗透性也可以看作是由两部分叠加构成, 即

$$\mathbf{K}(\mathbf{D}) = \mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_c(\mathbf{D}) \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{K}$  为岩石 REV 的总体渗透张量;  $\mathbf{K}_0$  为多孔基体介质的渗透张量, 可视为常数;  $\mathbf{K}_c$  为微裂纹系统引起的附加渗透张量, 其可以视为由岩石 REV 中每组微裂纹引起的渗透张量叠加而成。

对于岩石 REV 中的第  $k$  组微裂纹, 由修正的立方定理和 Darcy 定律, 不难推导求得该组微裂纹引起的附加渗透张量为(在平面条件下):

$$\mathbf{K}_{c(k)} = \frac{\kappa \pi^3 \tilde{\sigma}_i^3 a_k^4}{6VE_0^3} (\delta - \mathbf{n}_k \otimes \mathbf{n}_k) \quad (12)$$

式中:  $\kappa$  为立方定理的修正系数, 通常可取  $\kappa=1$ ;  $V$  为岩石 REV 的体积;  $E_0$  为岩石多孔基体的弹性模量。

将岩石 REV 中各组微裂纹引起的渗透张量进行叠加, 可以得到微裂纹系统引起的岩石 REV 的

等效渗透张量:

$$K_c = \sum_{k=1}^N R_k(a_k) m_k V K_{c(k)} \tag{13}$$

式中  $R_k(a_k)$ 为考虑到微裂纹系统中可能存在某些微裂纹没有参与形成导水裂隙网络而引入的一个连通性系数,文献[26]建议将其表示为微裂纹尺寸的函数,即

$$R_k(a_k) = t_1 \left( \frac{a_k - a_0}{b - a_0} \right)^{t_2} \tag{14}$$

式中  $t_1, t_2$ 为反映微裂纹网络连通性的材料常数。

式(13)建立了岩石等效渗透系数张量与微裂纹损伤之间的联系。尽管目前国内外已提出多种不同的理论模型来描述岩石渗透性能的演化规律<sup>[27]</sup>,但是这些模型大都只反映了应力状态对渗透系数的影响,而没有考虑岩石内部损伤变化带来的影响。本文建立的基于微裂纹损伤的岩石渗透性演化模型较好地弥补了这些缺陷,这为进一步研究煤层底板破坏突水过程奠定了基础。

1.4 耦合模型的数值求解

由上可见,如果模型中所有材料参数(如弹性刚度系数、渗透系数等)均为常数,则该耦合模型可以较容易地通过全耦合法或解耦迭代法进行求解<sup>[28]</sup>。但是,由于在耦合模型中包含了岩石损伤作用,即岩石材料参数是随损伤发展而不断调整变化的,因此上述建立的耦合模型实质上是一个考虑材料非线性的流固耦合问题。为此,采用如下的迭代算法来近似地求解该问题,其基本流程为:

- 1) 利用有限元网格将待求解的模型离散为一系列代表性体积单元(REV),对每一个 REV 属性参数和初始微裂纹参数进行初始化。
- 2) 将模型的加载条件在时间域上离散为若干个子加载步(载荷增量应当足够小),依次对模型进行加载。
- 3) 在每个子载荷步的加载过程中,视岩石材料所有参数均为常数,采用基于全耦合分析的有限元方法,计算模型中每个 REV 上的平均应力场、孔隙压力场、应变场和渗流速度场。
- 4) 根据有限元计算获得的每个岩石 REV 的应力状态,由式(8)计算每个 REV 中的每组微裂纹尖端的应力强度因子,判断微裂纹是否发生扩展,对于发生扩展的微裂纹分别计算其扩展以后的长度。
- 5) 分别利用式(4), (10), (13)计算每个岩石 REV 的微裂纹损伤张量、弹性刚度张量以及渗透系

数张量。

6) 将更新后的材料参数重新代入步骤(3)的全耦合有限元分析模型中,再次进行平衡计算,重新获得微裂纹损伤后的岩石内部应力场与渗流场。重复步骤(3)~(6)进行迭代计算,直到该子载荷步下模型中的所有微裂纹都不再发生扩展为止。

7) 施加下一个子载荷步,重复步骤(3)~(7),直至全部载荷加载完毕为止,停止计算并保存结果。

基于以上流程,利用 MATLAB 和 COMSOL Multiphysics 软件联合编程程序,实现了对流-固耦合作用下岩石损伤破裂过程以及渗流演化行为的动态模拟。关于该模型的正确性与有效性,已在文献[29]中进行了详细的探讨,下面将重点利用该模型来研究煤层底板破坏突水过程和机理。

2 煤层底板损伤破裂与渗流演化过程的数值模拟

2.1 数值计算模型与方案

基于大量带压开采煤层的基本工程地质条件与参数,建立了承压水体上采煤的基本数值计算模型,如图 1 所示。模型尺寸为 200 m×100 m,划分为 200×100=20000 个单元。为了便于分析,假设模型自上而下被合并均匀化为 4 个岩层,即顶板覆岩层、煤层、底板隔水层和底板含水层。在初始状态,各岩层中均匀地分布着微裂隙,微裂隙几何参数及各岩层的基本物理力学参数如表 1 所列。

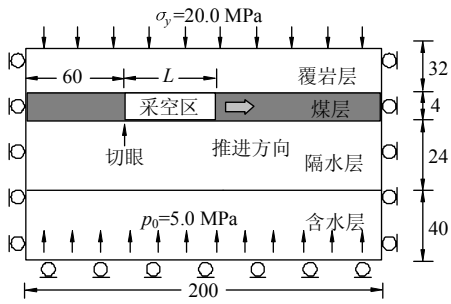


图 1 承压水体上采煤的数值计算模型 (m)  
Fig.1 Numerical model for coal mining above a confined aquifer

表 1 基本物理力学参数  
Table 1 Basic physical and mechanical parameters

岩层	$h/\text{m}$	$E_0/\text{GPa}$	$\nu_0$	$k_0/\text{m}^2$	$a_0/\text{mm}$	$K_{1c}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
覆岩层	32	9.5	0.25	$1\times10^{-15}$	15	4.5
煤层	4	1.5	0.30	$1\times10^{-14}$	25	1.5
隔水层	24	6.0	0.25	$1\times10^{-18}$	10	4.5
含水层	40	9.5	0.25	$1\times10^{-13}$	15	4.5

表1中 $h$ 为岩层厚度; $E_0$ ,  $\nu_0$ 和 $k_0$ 分别为岩石初始弹性模量、泊松比和渗透系数; $a_0$ 为微裂纹初始长度; $K_{IC}$ 为微裂纹I型断裂韧度。

模型左右边界设置为水平位移约束,下边界为垂直位移约束,上边界施加垂直载荷20 MPa,在模型下边界施加5.0 MPa的孔隙水压。模拟煤层开切眼位置距离模型的左边界60 m,工作面自左向右推进。采用分步开挖的方式来模拟煤层开采影响。考虑工作面的正常推进速度为4 m/d,模拟时取开挖步距为1 m,每步开挖时间为6 h。此外,考虑到实际工程中大部分的底板突水事故都是发生在初次来压期间,因此这里仅模拟初次来压前的煤层开采影响,而忽略煤层顶板破断对采空区的充填作用。

根据以上建立的数值计算模型,利用编制的岩石渗流-应力-损伤耦合分析程序对该模型进行了求解,得到了工作面推进过程中的煤层底板应力场、损伤场及渗流场等演化规律。

## 2.2 底板损伤与破裂演化规律

在工作面推进过程中,煤层底板损伤与破裂演化的总体特征可以通过底板岩层破裂的声发射活动规律来表征,如图2所示。

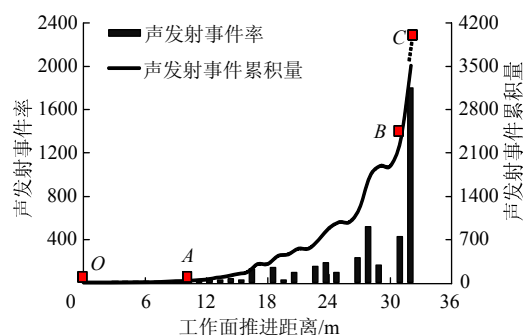


图2 煤层底板破裂声发射活动随工作面推进距离变化曲线

Fig.2 Acoustic emission events of coal seam floor versus advancing distance of workplace

图2中,一个声发射事件代表着一条微裂纹发生扩展。可以看出:

1) 当工作面推进距离较小时(OA段),开采扰动对煤层底板影响较小,采动应力尚不能诱发底板裂隙发生显著的扩展,因此这个阶段底板破裂的声发射活动很少。

2) 随着工作面推进距离的增加(AB段),采动应力在底板的影响范围和幅度明显提高,这导致了越来越多的裂隙在底板中发生扩展,底板破裂声发射活动明显增强,这个阶段可视为煤层底板突水的

孕育阶段。

3) 当工作面推进至某个临界距离以后(BC段),此时底板岩层中大量裂纹群迅速扩展,底板破裂的声发射活动数目急剧增加,这个阶段可视为煤层底板发生突水失稳阶段。现场监测资料表明,实际矿井在发生突水通常会伴有巨大声响和震动等动力现象<sup>[30]</sup>,这与本文的数值模拟结果是一致的。因此在实际工程中,可以尝试采用微震监测等技术来实时捕捉煤层底板突水的前兆信息与突变特征<sup>[31]</sup>,进而实现煤层底板突水的预测预报。

图3进一步给出了工作面推进过程中煤层底板损伤的分布云图,其中左侧的虚线代表开切眼的位置,右侧的虚线代表当前工作面的位置。

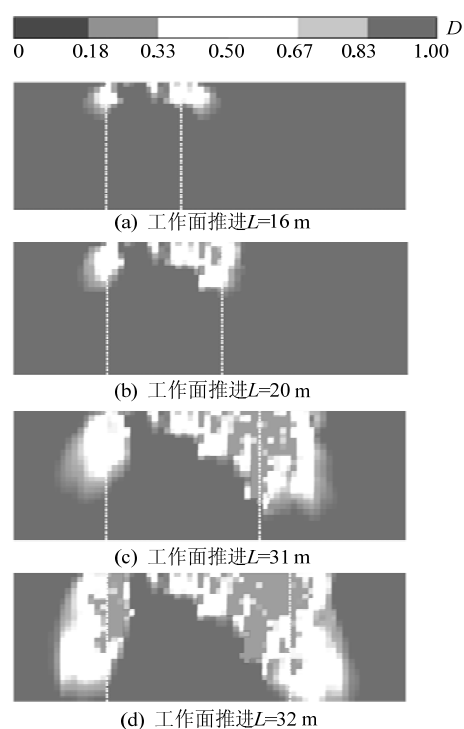


图3 煤层底板裂隙损伤破裂的演化过程

Fig.3 Damage evolution and failure process of coal seam floor

图3中,底板岩层的损伤程度 $D$ 考虑采用如下的裂隙长度的相对变化来描述,即

$$D_i = \frac{\max(a_k) - a_0}{b - a_0} \quad (15)$$

式中  $D_i$  为底板岩层中第 $i$ 个单元的损伤程度。

与图3相对应,图4还给出了工作面不同推进距离下煤层底板损伤与破裂区的空间分布形态,其中,开切眼的位置位于 $x=0$ 处,工作面沿着 $x$ 轴的正向推进。

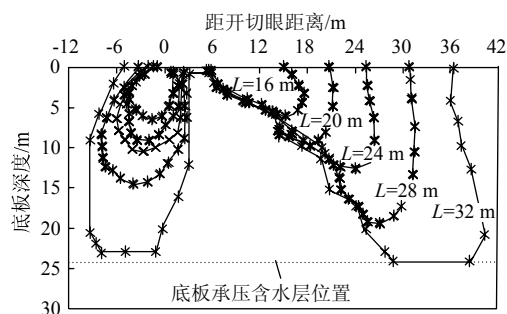


图4 煤层底板损伤与破裂区的分布形态

Fig.4 Distributional patterns of damage and fractured zones in coal seam floor

从图 3, 4 可以看出:

1) 煤层底板的损伤与破裂是一个渐进发展的演化过程。随着工作面推进距离的增加, 在切眼位置下方的底板中逐渐形成了一个不断向外扩展的“扁圆”状损伤区; 而在工作面位置下方的底板中形成了一个随着推进过程不断向前延伸的“上宽下窄”不规则状损伤区。煤层底板的损伤破裂区分布没有呈现关于采空区中部对称分布的形态, 在工作面位置下方的底板损伤区范围要稍高于开切眼位置下方的底板, 这是由于工作面推进中应力峰值位置不断向前转移及岩石损伤累积效应而造成的。

2) 当工作面推进距离达到临界值  $L=32\text{ m}$  时 (与图 2 中  $B$  点相对应), 工作面下方底板损伤破裂区与底板含水层相贯通, 此时煤层底板的完整性被完全破坏, 煤层底板将发生突水失稳。

3) 煤层底板损伤破坏的最大深度是位于采空区两侧的位置, 该位置也是最容易发生底板突水的位置。数值模拟获得的煤层底板损伤破裂区的空间分布规律与已有的现场监测数据是一致的<sup>[32]</sup>。

图 5 给出了煤层底板损伤破裂区的最大深度  $h$  随工作面推进距离  $L$  的变化曲线, 图中黑色方块为模拟数据, 实线为拟合曲线。

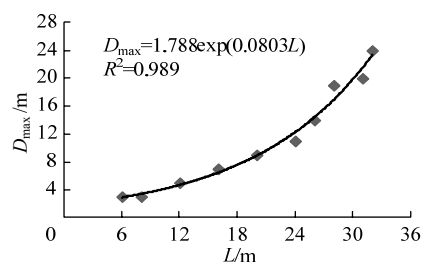


图5 底板最大损伤破裂深度随工作面推进距离变化曲线

Fig.5 Maximum depth of damage and fractured zones in coal seam floor versus advancing distance of working face

从图 5 可看出, 煤层底板损伤破裂区的最大深

度随着工作面推进距离增加以指数函数的形式急剧增长, 这意味着随着煤层顶板暴露范围的增加, 煤层底板突水的危险性将会显著增大。

### 2.3 底板渗流演化规律

开采扰动诱发煤层底板的损伤破裂将会显著改变底板岩层的渗透特性与渗流场分布。图 6 给出了工作面推进过程中 ( $L=16, 20, 31$  和  $32\text{ m}$ ) 底板渗透率的分布云图。可以看出, 煤层底板渗透率的分布特征与底板损伤破裂区的分布特征十分相似, 随着工作面的推进, 采空区下方底板的渗透性能不断提高, 且在开切眼和工作面位置下方的底板渗透率达到最大值 (与底板隔水层的初始渗透率相比, 其提高了约 3~5 个数量级), 该位置也是潜在的煤层底板的突水位置。当工作面推进距离达到临界值  $L=32\text{ m}$  时, 煤层底板损伤破裂导致的高渗透性区域已与底板含水层相连通, 底板隔水层的隔水性能丧失, 底板将发生突水失稳。

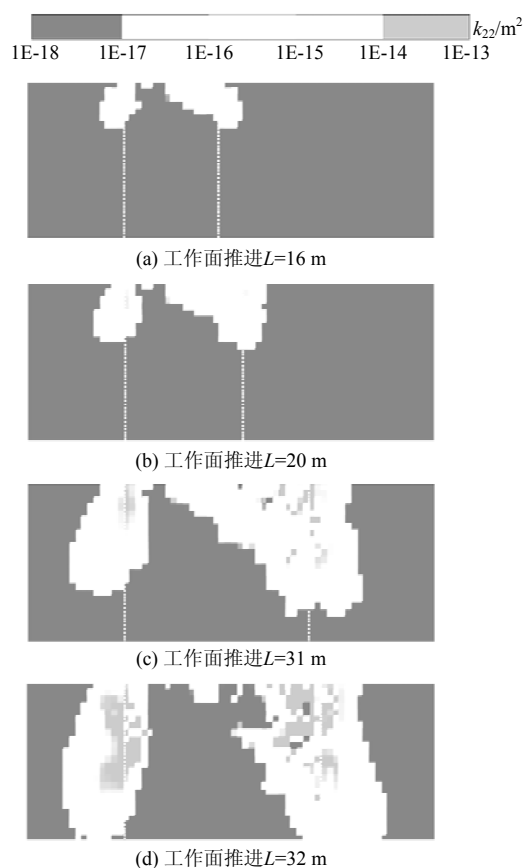


图6 煤层底板渗透率的演化过程

Fig.6 Permeability evolution in coal seam floor

图 7 进一步给出了煤层底板“渗流通道”形成前后的渗流速度场的分布云图, 图 8 给出了底板“渗流通道”形成过程中的渗流矢量场分布, 图中箭头



的方向和长度分别表示承压水的流动方向和流速大小。

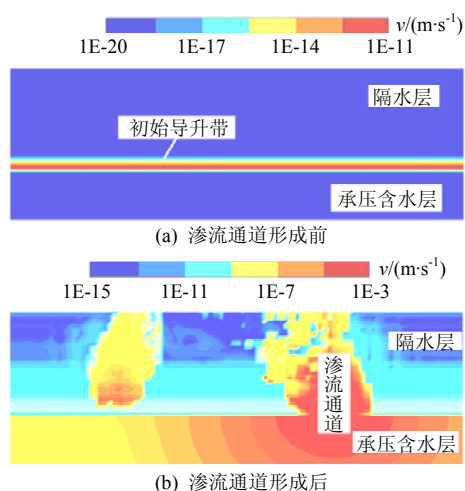


图7 煤层底板渗流通道形成前后的渗流速度场分布云图  
Fig.7 Seepage velocity field in coal seam floor before and after the formation of groundwater flow channel

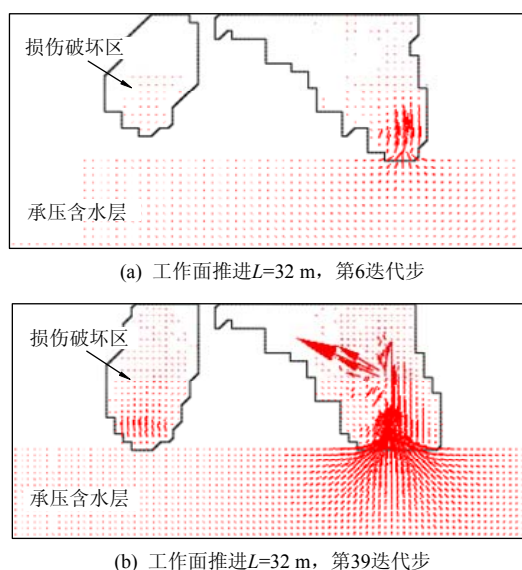


图8 煤层底板渗流通道形成过程中的  
渗流矢量场分布特征

Fig.8 Seepage vector field in coal seam floor before and after the formation of groundwater inrush channel

从图7, 8可看出:

1) 在煤层底板尚未形成宏观“渗流通道”之前, 底板含水层上部存在着一个导升高度很小的承压水的初始导升带, 其导升高度约0.5 m, 如图7a所示, 这是由于完整底板隔水层的隔水性能(弱渗透性)而造成的。

2) 当开采扰动诱发的煤层底板损伤破裂区域逐渐延伸至底板承压水的导升带时, 底板承压水开始沿着损伤破裂区向上导升, 如图8a所示。当底

板承压水进入底板损伤破裂区后, 在采动应力和承压水压力的共同作用下, 底板损伤破裂区中的岩石裂隙发生了更大规模的扩展, 从而进一步加快了底板承压水的导升速度(图8b), 这也解释了为什么在底板“渗流通道”形成过程中的底板破裂声发射事件数目会急剧增加。

3) 当底板损伤破裂区中裂隙扩展至一定程度时, 底板中形成了直接贯通承压含水层与采空区的宏观“渗流通道”, 此时大量的底板承压水快速地涌向“渗流通道”(图7b), 底板发生渗流突变失稳。

图9, 10给出了煤层底板“渗流通道”形成前后的底板孔隙水压及渗流速度的变化曲线。从图中可以看出: 在底板“渗流通道”形成前, 由于底板隔水层的阻隔作用, 底板中的孔隙水压与渗流速度很小, 且基本不受底板损伤破裂区的影响; 而当底板“渗流通道”形成以后, 在“渗流通道”处孔隙水压迅速升高至底板承压含水层的水压值, 底板“渗流通道”处渗流速度发生了数量级上的阶跃突变, 这意味底板隔水层隔水性能已完全丧失, 采空区与底板含水层被“渗流通道”直接贯通, 底板发生破坏突水事故。

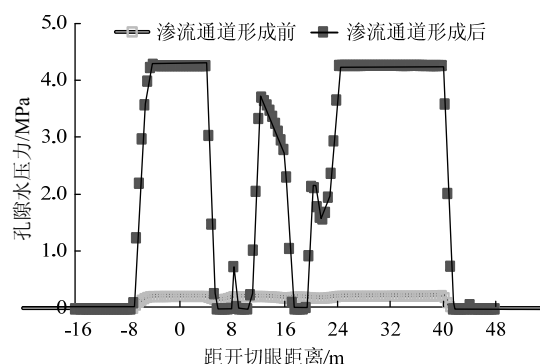


图9 煤层底板孔隙水压变化曲线  
Fig.9 Variation of pore pressure in coal seam floor

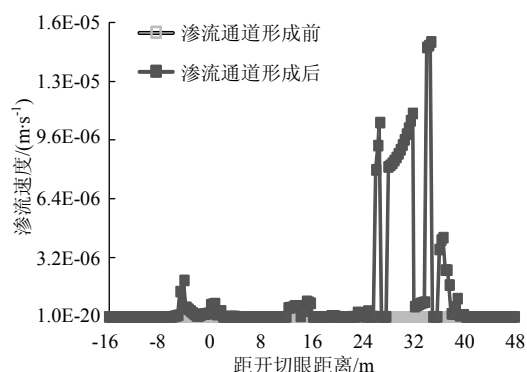


图10 煤层底板渗流速度变化曲线  
Fig.10 Variation of seepage velocity in coal seam floor

综合以上讨论可以看出,本文提出的模型以一种物理真实、可视化的方式再现了煤层底板“渗流通道”形成以及突水灾变演化的复杂过程,其从深层次上揭示了煤层底板破坏突水机制及突水前兆信息规律,对于我国煤层底板突水灾害的预测预报及防治具有一定的指导意义。

### 3 结 论

1) 岩石细观尺度上的微裂纹扩展演化是导致岩石损伤破裂以及渗流特性改变的根本原因。基于这一认识,将微裂纹损伤张量引入到了经典的 Biot 孔隙弹性理论中,建立了基于微裂纹演化的岩石渗流-应力-损伤耦合模型及控制方程,该模型克服了传统模型无法定量地描述岩石损伤作用对岩石渗流-应力耦合过程影响的局限,为从更深层次上探讨煤层底板突水灾变机理奠定了理论基础。

2) 采用 MATLAB 编程,将建立的基于微裂纹演化的岩石渗流-应力-损伤耦合模型嵌入至 COMSOL Multiphysics 软件中,实现了流-固耦合作用下岩石损伤破裂过程以及渗流演化动态模拟的数值计算程序;利用该数值程序建立了承压水体上采煤的数值计算模型,对煤层开采过程中底板裂隙损伤演化、破坏形态和渗流演化规律进行了数值仿真分析,模拟结果真实地再现了底板“渗流通道”形成以及突水灾变演化的复杂过程。

3) 数值模拟结果表明,煤层底板的损伤与破裂是一个渐进发展的演化过程,在采空区两侧下方底板损伤破裂深度最大,且损伤破裂区的最大深度随着工作面推进距离的增加以指数函数的形式急剧增长;底板损伤破坏区的渗透率显著增加,约比初始隔水层的渗透率提高 3~5 个数量级;当底板损伤破坏区与底板含水层贯通时形成了宏观的“渗流通道”,底板孔隙水压与渗流速度在“渗流通道”处发生了显著的阶跃突变,且底板破裂的声发射活动事件数目急剧增加,底板发生破坏突水。

### 参考文献:

- [1] 虎维岳,朱开鹏,黄选明.非均布高压水对采煤工作面底板隔水岩层破坏特征及其突水条件研究[J].煤炭学报,2010,35(7):1109-1114.  
HU Weiyue, ZHU Kaipeng, HUANG Xuanming. Study on floor rock mass failure and water inrush caused by non-uniform distributed water pressure in mining face [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1109-1114.
- [2] 武强,张志龙,马积福.煤层底板突水评价的新型实用方法 I: 主控指标体系的建设[J].煤炭学报,2007,32(1): 42-47.  
WU Qiang, ZHANG Zhilong, MA Jifu. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating I: the master controlling index system construction[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 42-47.
- [3] 武强,张志龙,张生元,等.煤层底板突水评价的新型实用方法 II: 脆弱性指数法[J].煤炭学报,2007,32(11): 1121-1126.  
WU Qiang, ZHANG Zhilong, ZHANG Shengyuan, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating II: the vulnerable index method[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1121-1126.
- [4] 李白英.预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J].山东矿业学院学报,1999,18(4): 11-18.  
LI Baiying. “Down three zones” in the prediction of the water inrush from coalbed floor aquifer-theory, development and application[J]. Journal of Shandong Institute of Mining and Technology, 1999, 18(4): 11-18.
- [5] 王经明.承压水沿煤层底板递进导升突水机理的模拟与观测[J].岩土工程学报,1999,21(5): 546-549.  
WANG Jingming. In-situ measurement and physical analogue on water inrush from coal floor induced by progressive intrusion of artesian water into protective aquiclude[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 546-549.
- [6] 缪协兴,浦海,白海波.隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J].中国矿业大学学报,2008,37(1): 1-4.  
MIAO Xiexing, PU Hai, BAI Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 1-4.
- [7] 王连国,宋扬.底板突水的非线性特征及预测[M].北京:煤炭工业出版社,2001: 98-114.
- [8] WANG J A, PARK H. Coal mining above a confined aquifer[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 537-551.
- [9] 王金安,魏现昊,陈绍杰.承压水体上开采底板岩层破断及渗流特征[J].中国矿业大学学报,2012,41(4): 536-542.  
WANG Jin'an, WEI Xianhao, CHEN Shaojie. Fracture and seepage characteristic in the floor strata when mining above a confined aquifer[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(4): 536-542.
- [10] 李连崇,唐春安,梁正召,等.含断层煤层底板突水通道形成过程的仿真分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2): 290-297.  
LI Lianchong, TANG Chun'an, LIANG Zhengzhao, et



- al. Numerical analysis of pathway formation of ground-water inrush from faults in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 290-297.
- [11] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268-277.  
YANG Tianhong, TANG Chun'an, TAN Zhihong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of ground-water inrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 268-277.
- [12] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.
- [13] SHAO J F. Poroelastic behavior of brittle rock materials with anisotropic damage[J]. Mechanics of Materials, 1998, 30(1): 41-53.
- [14] SHAO J F, LU Y, LYDZBA D. Damage modeling of saturated rocks in drained and undrained conditions[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(6): 733-739.
- [15] CHENG A H D. Material coefficients of anisotropic poroelasticity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 199-205.
- [16] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 52-70.
- [17] HOMAND-ETIENNE F, HOXHA D, SHAO J F. A continuum damage constitutive law for brittle rocks[J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(2): 135-151.
- [18] SHAO J F, HOXHA D, BART M, et al. Modeling of induced anisotropic damage in granites[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(8): 1001-1012.
- [19] ASHBY M F, HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states [J]. Acta Metallurgica, 1986, 34(3): 497-510.
- [20] KRAJCINOVIC D, FANELLA D. A micromechanical damage model for concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25(5): 585-596.
- [21] ODA M, KATSUBE T, TAKEMURA T. Microcrack evolution and brittle failure of Inada granite in triaxial compression tests at 140 MPa[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B10): ECV9-1-ECV9-17.
- [22] COSTIN L. A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1983, 88(B11): 9485-9492.
- [23] SHAO J F, CHAU K, FENG X. Modeling of anisotropic damage and creep deformation in brittle rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(4): 582-592.
- [24] GOLSHANI A, OKUI Y, ODA M, et al. A micro-mechanical model for brittle failure of rock and its relation to crack growth observed in triaxial compression tests of granite[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38(4): 287-303.
- [25] HALM D, DRAGON A. A model of anisotropic damage by mesocrack growth; unilateral effect[J]. International Journal of Damage Mechanics, 1996, 5(4): 384-402.
- [26] SHAO J F, ZHOU H, CHAU K. Coupling between anisotropic damage and permeability variation in brittle rocks[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29(12): 1231-1247.
- [27] 杨天鸿. 岩石破裂过程渗透性质及其与应力耦合作用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2001.
- [28] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 70-96.
- [29] LU Y L, ELSWORTH D, WANG L G. Microcrack-based coupled damage and flow modeling of fracturing evolution in permeable brittle rocks[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49(4): 226-244.
- [30] 杨新安, 郭鑫禾. 矿井突水过程中的动力现象分析 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, 12(1): 12-15.  
YANG Xin'an, GUO Xinhe. Analysis of dynamic phenomenon in mine water inrush process[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995, 12(1): 12-15.
- [31] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932-1938.  
JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932-1938.
- [32] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 32-51.