

文章编号: 1006-6616 (2003) 03-0281-08

承压水底板突水失稳过程的数值模型初探

杨天鸿¹, 唐春安¹, 刘红元¹, 朱万成¹, 冯启言²

(1. 东北大学, 辽宁沈阳 110006; 2. 中国矿业大学, 江苏徐州 221008)

摘要: 利用自行开发的岩石破裂过程渗流与应力耦合分析系统 F-RFPA^{2D}, 对承压水底板破裂失稳过程进行了数值模拟。在这个数值模型中, 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。根据模拟结果, 分析了承压水底板失稳的机理, 对承压水底板的突水部位的预测进行了探讨。得出了与实际基本一致的结果, 说明了 F-RFPA^{2D}作为一种新的数值模拟方法, 可以用来研究承压水底板突水问题。

关键词: 底板突水; 数值模拟; 破裂失稳过程; 渗流与应力耦合

中图分类号: P554

文献标识码: A

0 前言

煤层底板突水是煤层下伏承压水冲破底板隔水层的阻隔, 以突水、缓发或滞发的形式进入工作面, 造成矿井涌水量增加或淹井的自然灾害, 为矿井生产的五大灾害之一^[1]。多年来, 我国煤矿科技工作者对底板突水作了大量的研究工作, 提出了几种突水判据和理论^[2~4], 张金才等^[5]用解析方法从力学的角度对底板岩层进行了理论分析, 白晨光等^[6]、王连国等^[7]提出应用突变理论来研究煤矿生产中底板突水问题, 周瑞光等^[8]认为突水部位的断层具有蠕变的时效特征。底板突水过程实际上是水压驱动下岩层裂纹萌生、扩展、贯通, 直到最后断裂导致失稳破裂的过程。采用断裂力学、突变理论和蠕变理论等解析方法, 不能直观地认识底板破坏失稳及其水力传递的全过程, 数值模拟方法具有良好的应用前景。作为一种尝试, 本文提出了应用自行开发的渗流与应力耦合作用分析系统来模拟煤矿生产中的底板突水问题, 旨在探讨承压水底板的突水机理及对突水部位预测等承压水底板破坏失稳的基本问题。

1 底板突水的力学模型及作用机理

煤层开采之后, 从煤层底板到底部承压含水层顶板之间的隔水层, 受采动影响形成导水裂隙。由于其下部为承压含水层, 在水压力的作用下, 隔水层像板一样产生弯曲变形。形成

收稿日期: 2002-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助 (50204003)

作者简介: 杨天鸿 (1968-), 男, 副教授, 2001年东北大学工程力学博士毕业, 现从事岩石力学方面的教学和科研工作。

突水的地质条件为：

(1) 下部围岩赋存渗透性良好的含水层，该含水层处于较封闭的承压状态，具有较高的承压水头（水可通过导水断层和地表水连通），存在较高的孔隙水压力。

(2) 在煤层和含水层之间存在有一定厚度的隔水底板（渗透性较低），煤层开采后，底板岩层失去上部岩体支撑压力，而本身的自重和抗张强度小于水压力。

在正常的开采条件下，对于长壁全陷采煤工作面，当煤层为近水平及缓倾斜状赋存时，解析方法可以假设底板隔水带是四边固支的矩形平板^[1]。隔水底板的上部受已破坏的底板导水裂隙带的重力 W 的作用，下部受均布水压力 P 的作用。隔水带的受力如图 1 所示。

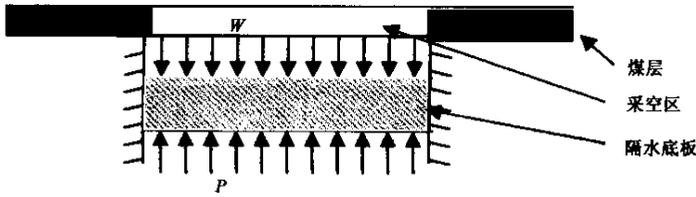


图 1 隔水带受力的力学模型

Fig.1 Mechanical model of a confining zone subjected to stresses

底板突水破坏过程和岩石的水力压裂机制一样，应该考虑渗流—应力耦合作用机理^[9]。主要表现为以下 3 个力学机制：(1) 裂缝开裂判据及其形成前后的渗透特性；(2) 裂缝张开与流体压力的关系；(3) 流体在裂缝中的流动过程。没有考虑渗流—应力耦合作用机理的数值模型的主要缺陷为：(1) 仅给出了描述岩体渗透率和法向应力关系的方程^[10]，但没有研究岩体破裂后渗透率的突变和水压的跟踪传递规律，不能表述岩体破裂后从隔水层变成导水层的演化过程；(2) 耦合计算需要应力场和渗流场映射为一个研究域，而渗流场中存在统一的水头分布，这样无法区分隔水单元和导水单元不同的水压作用的机制。Wang, J. A. 和 Park, H. D.^[11]通过沉积岩应力应变—渗透性全过程实验发现，渗透性随岩石中应力应变的状态而变化，在峰值强度之前，渗透性随着载荷的增加不断减小，在岩石的软化阶段发生突变。并用这一结论结合 FLAC^{3D} 程序很好地解释了采空区底板岩层破裂突水机理，但是他们所用的 FLAC^{3D} 程序并不能描述上述采空区底板岩层破裂突水过程渗流—损伤耦合机制。

2 数值模拟系统简介

针对这一复杂问题，作者开发出岩石破裂过程渗流—应力耦合分析系统（Coupling System of Flow & Solid in Rock Failure Process Analysis 简称 F-RFPA^{2D}）^[12,13]，建立了岩体渗流—应力—损伤耦合模型（FSD Model）。在本模型中，基于以下基本假设：(1) 岩石材料介质中的流体遵循 Biot 固结理论^[14]；(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（图 2）；(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，材料的应力—渗透系数关系按负指数方程描述^[10]，材料破坏后，渗透系数明显增大^[12]，见式（1）

$$k(\sigma, p) = \xi k_0 e^{-\beta(\sigma_u/3 - ap)} \tag{1}$$

根据大量的实验结果，式（1）认为渗透率不仅是应力的函数，还随着应力诱发损伤破

裂演化，渗透率发生显著变化^[11, 12]。式中， k_0 —渗透系数， p —静水压力， σ_{ii} 为平均应力， β —耦合系数， ξ 为渗透系数突跳倍率， α 为孔隙水压系数。

图 2 根据实验结果给出单元压剪损伤的本构关系，对于单元拉损伤本构关系，把图 2 扩展到拉伸应力应变轴，也认为单元破坏后渗透系数有一定的增高。

模型中，渗流和应力计算用有限元方法，对于每一个载荷步骤，进行渗流—应力耦合静态计算分析，考察单元应力水平后，确定以下 4 种基本状态（图 2 所示）：

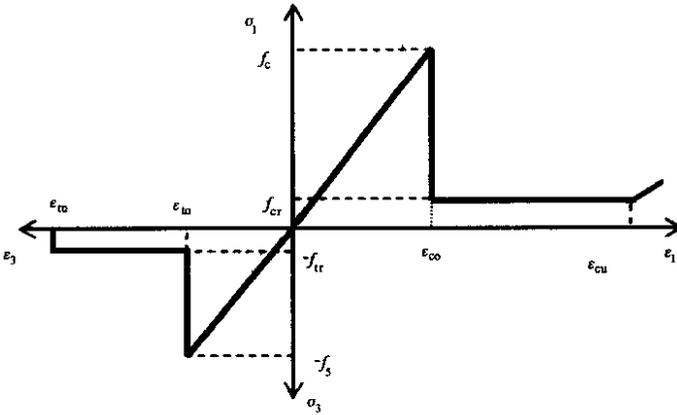


图 2 单元的应力应变弹性损伤本构曲线

Fig.2 Elastic damage constitutive curve of element

(1) 弹性状态：当 $\sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} < f_c$ 或 $\sigma_3 > -f_t$ 时 (f_c —抗压强度， f_t —抗拉强度， ϕ —摩擦角)，单元处于弹性状态，只进行应力—渗透系数耦合迭代计算，对于隔水单元，式 (1) 中 $\xi = 1, \alpha = 0$ 。

(2) 损伤状态：当 $\sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \geq f_c$ 时，由于压应力诱发单元损伤，其弹性模量按具有残余强度的弹脆性损伤本构方程进行弱化，

$$E = (1 - D)E_0 \tag{2}$$

式中， D —损伤变量， E 、 E_0 分别是损伤后和损伤前的弹性模量，损伤变量演化按下式定义：

$$D = 1 - \frac{f_{cr}}{E_0 \epsilon} \tag{3}$$

f_{cr} 为残余强度。当 $\sigma_3 \leq -f_t$ 时，由于拉应力诱发单元损伤，其弹性模量按具有残余强度的弹脆性损伤本构方程进行弱化（图 2 所示），损伤变量演化按下式定义：

$$D = 1 - \frac{f_{tr}}{E_0 \epsilon} \tag{4}$$

f_{tr} 为拉伸残余强度，对于损伤单元，渗透系数有一定的增高，式 (1) 中 $\xi = 5, \alpha = 0$ 。

(3) 断裂状态：当拉应变达到极限拉应变 ($\epsilon > \epsilon_{tu}$) 时，单元完全丧失承载能力和刚度，其弹性模量赋予小值，画黑形成裂纹单元。实验研究表明^①，岩石试件达到峰值后，形

① 杨天鸿，岩石破裂过程渗流与应力耦合作用研究，东北大学博士学位论文，2001。

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。所以在模型中认为裂纹单元的渗透系数和孔压系数与损伤单元相比,显著增加,式(1)中 $\xi = 100$, $\alpha = 1$ 。

(4) 裂纹闭合状态:当裂纹单元的压应变达到极限压应变($\epsilon > \epsilon_{cu}$)时,裂纹处于闭合状态,单元弹性模量随着压应力的增加而增高(式5),文献表明^[15],闭合裂纹的渗透率明显减小,式(1)中 $\xi = 0.01$, $\alpha = 0$ 。

$$E = \frac{f_{cr}}{\epsilon_{cu}} \times \frac{\epsilon}{\epsilon_{cu}} \quad (5)$$

随着单元参数的调整,要反复进行损伤—渗流迭代计算,导致压力调整和再分配,直到一个新的应力平衡为止,在这一迭代过程中将引发单元依次破坏,从而能够模拟出水压致裂的全过程。这样,细观损伤演化和宏观裂纹产生过程中渗透性质的演化进程就可进行。

本文的模型中,将连续介质离散为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力学性质的弱化和渗透性、水压力的提高描述单元的损伤和破坏后的渗流—损伤耦合作用。虽然单元的力学行为比较简单,但宏观复杂的破坏现象可能通过它们的相互作用反映出来。相对于分布裂缝模型^[16],避免了复杂而任意的本构描述,相对于分离裂缝模型^[16],避免了复杂的应力强度因子计算和网络重新划分工作^[17],关于模型的详细介绍见文献[12~13]。

3 数值模型的建立

本文算例的地质模型见图3所示,煤层上覆岩层的渗透性较差,起隔水作用,地表较高的水头压力通过边界传递到煤层的下伏含水层,并作用于隔水底板。耦合数学模型的长200m,高112m,数值模型的力学、水力学参数如表1所列,岩体只承受自重和水压力。边界条件为:两端水平约束,可垂直移动,设定110m高的定水头边界,底端固定,设定隔水

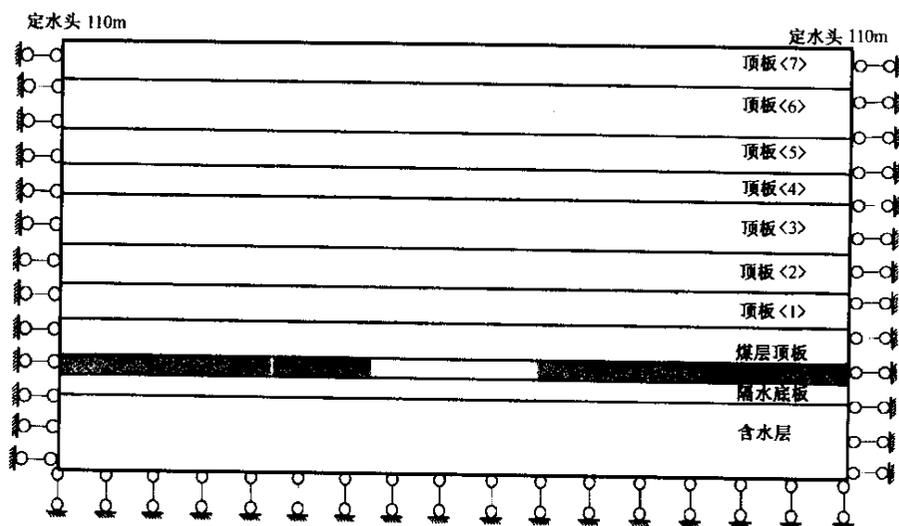


图3 数值模拟模型

Fig.3 Numerical simulation model

边界。通过分步开挖来模拟采动的影响：其中第一步为自重计算过程，第二步开始开挖，每步 5m，共 5 步。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Parameters of rock mass mechanics

岩层编号	编号 (m)	弹性模量 E (MPa)	凝聚力 C (kPa)	摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	泊松比 μ	容重 γ (kg/m^3)	渗透系数 K (m/d)	孔隙水压力 系数 α
顶板 7	10	6000	25	30	0.25	2500	0.1	0.01
顶板 6	12	4000	20	28	0.25	2500	0.1	0.01
顶板 5	10	8000	30	30	0.25	2500	0.1	0.01
顶板 4	8	2000	15	25	0.25	2500	0.05	0.01
顶板 3	12	8000	30	30	0.25	2500	0.1	0.01
顶板 2	10	6000	25	30	0.25	2500	0.1	0.01
顶板 1	10	4000	20	28	0.25	2500	1.0	0.01
直接顶	10	2000	15	25	0.25	2500	0.1	0.01
煤层	5	1500	10	25	0.3	1400	0.1	0.01
底板隔水层	5	1500	8	25	0.3	1400	0.1	0.01
含水层	20	10000	30	35	0.2	2650	5.0	1.0

4 数值模拟结果分析

图 4 为岩层弹性模量分布图和最小主应力图，图 5 为水位等值图和水流矢量图。图中的灰度代表数值的大小，颜色越亮，数值越大，颜色越暗，数值越小。Step3 表示第三步开挖，Step4-4 表示第四步开挖状态下引起的岩层渐进破断过程。随着煤层开采，底板破断、突水过程可划分以下几个阶段：

(1) 从图 4 中可以看出，开挖后，底板岩层失去上部岩体的支撑作用，在煤层底板中间拉应力引起卸压膨胀，当其自重和抗拉强度足以抵抗水压力时，岩层只产生弹性鼓起变形，没有破坏（见 Step2、3）。

(2) 随着工作面的推进（Step4 时），底板岩层膨胀变形加剧，并和下伏含水层离层，在静水压力的作用下产生弯曲变形（图 4 中的 Step4-1 到 Step4-5），由于岩石的抗拉强度远远低于抗压强度，所以首先在底板岩层的上界面产生拉破坏，在隔水层的 2 个约束端产生拉剪破坏（Step4-5），从而导致含水层的承压水跟踪传递过来（见图 5 中 Step4-5）。数值模拟结果表明底板中间和 2 个约束端是易产生突水的部位。

(3) 随着隔水层破坏区的不断发展，抵抗力和水压力的此消彼长，隔水层断裂，失去隔水作用，这时巷道渗水量达到最大（图 5 的 Step4-5）。随着工作面继续推进（Step5），水压引起隔水底板折断，这时巷道渗水量趋于稳定而有所减小。

综上所述，在底板中煤壁下方岩层的 2 个约束端和底板中部卸压膨胀区是易破坏突水的区段。从图 4、图 5 中的底板突水发展过程中还可以看出，工作面推进距离为 20m 底板发生突水失稳，这与文献 [2] 指出的底板突水多发生在初次来压期间，此时，工作面距开切眼 20~40m 的结论也是一致的。因此，为了防止突水事故，优化开挖工序和支护设计是很重要

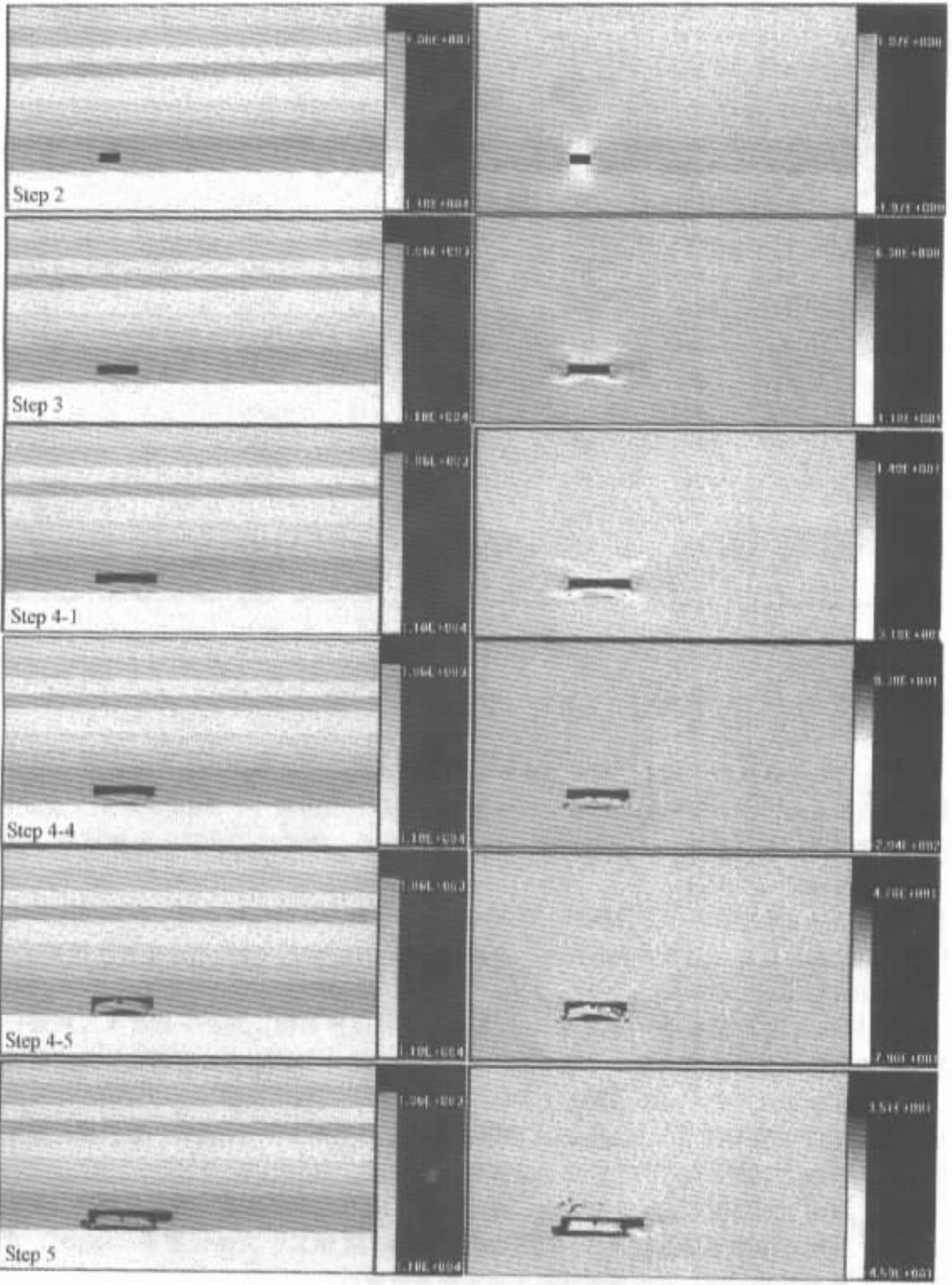


图 4 承压水底板突水过程的数值模拟结果 (岩层和应力分布)

Fig.4 Numerical simulation of the process of water inrush from the confined aquifer through the floor (elastic modulus and minimum principal stress)

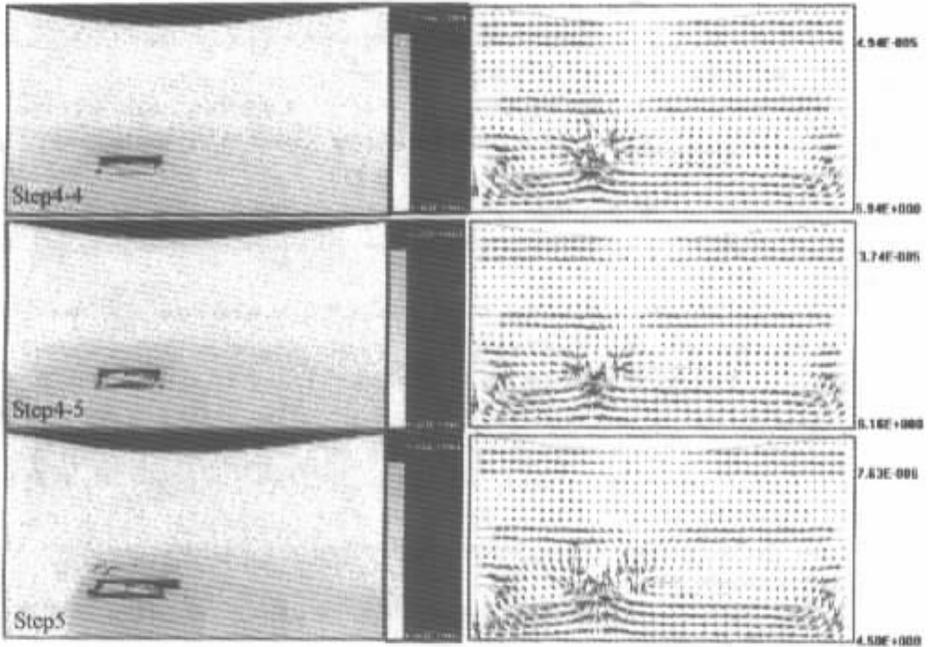


图 5 承压水底板突水过程的数值模拟结果
(水头和流速分布 (单位: $10^2 \text{ m}^3/\text{d}$))

Fig.5 Numerical simulation of the process of water inrush from the confined aquifer through the floor
(isochromatic draw of water level and vector draw of the water flow)

的。

由于篇幅所限,本文的主要内容是介绍数值模型的基本原理,对模型结果没有做详细的讨论。

5 结论

本文尝试了用自行开发的渗流与应力耦合分析系统模拟承压水底板的破裂失稳过程,分析了底板突水的机理,对底板的易发生突水部位进行了预测。根据所建立的数值模型,以直观的图像动力学方式展现了承压水底板破裂的失稳过程。模拟结果表明,承压水底板最易发生突水的部位是底板的最大膨胀处和约束端,这与其它承压水底板突水研究方法所取得的结论是一致的,说明该分析系统可以作为一种新的数值模拟方法,能够来研究承压水底板的突水问题。

参 考 文 献

- [1] 魏久传,李白英.承压水上采煤安全性评价[J].煤田地质与勘探,2000,(8):57~59.
- [2] 王作宇.承压水上采煤[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [3] 李家祥.原岩应力与煤层底板隔水层阻水能力的关系[J].煤田地质与勘探,2000,(8):47~50.
- [4] 赵全福.煤矿安全手册矿井防治水分册[M].北京:煤炭工业出版社,1992.

- [5] 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. 91 ~ 92.
- [6] 白晨光, 黎量杰, 于学隼. 承压水底板关键层失稳的尖点突变模型 [J]. 煤炭学报, 1997, 22 (2): 149 ~ 154.
- [7] 王连国, 宋扬. 煤层底板突水突变模型 [J]. 工程地质学报, 2000, 8 (2): 160 ~ 163.
- [8] 周瑞光, 成彬芳, 叶贵钧, 等. 断层破碎带突水的时效特征研究 [J]. 工程地质学报, 2000, 8 (4): 411 ~ 415.
- [9] 郑少河, 朱维申, 王书法, 承压水上采煤的流固耦合问题研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, (7): 421 ~ 424.
- [10] Louis, C. Rock Hydraulics [A]. In: Rock Mechanics [C], ed. by L Muller, 1974.
- [11] Wang, J. A., Park, H. D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process [J]. Engineering Geology, 2002, 63: 291 ~ 300.
- [12] Tang, C. A., Yang, T. H., Tham, L. G. et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2002, 39: 477 ~ 489.
- [13] 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 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (4): 489 ~ 493.
- [14] Biot, M. A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. J. Appl. Phys, 1941, 12: 155 ~ 164.
- [15] Zhu, W., Wong, T. F. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: permeability evolution [J]. J. Geophys. Res. 1997, 102 (B2): 3027 ~ 3041.
- [16] Keivan Noghabei. Discrete versus smeared versus element-embedded crack models on ring problem [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125 (6): 307 ~ 314.
- [17] 杨强, 张浩, 吴荣宗. 二维格构模型在岩石类材料开裂模拟中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (增): 941 ~ 945.

NUMERICAL MODEL OF THE INSTABILITY-FAILURE PROCESS OF THE COAL-BED FLOOR DUE TO CONFINED WATER INRUSH

YANG Tian-hong¹, TANG Chun-an¹, LIU Hong-yuan¹, ZHU Wan-cheng¹, FENG Qi-yan²

(1. Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China ;

2. China University of Mining Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

Abstract : In this paper the instability-failure process of floor due to confined water inrush is numerically simulated by using the Coupling System of Flow & Solid in Rock Failure Process Analysis (F-FRPA^{2D}) that has been recently developed by CRISR, Northeastern University. In this numerical model the fluid pressure transmission during the rupture-failure process of material is achieved by the coupling and iteration of flow-damage of an element. According to the results of the simulation the instability-failure mechanism of floor associated with the confined aquifer is analyzed and the position where water inrush is liable to happen is predicted. The results are in the main consistent with the phenomena at the site, which indicates that the F-RFPA^{2D}, as a newly developed numerical simulation code, can be used to study water inrush from the confined aquifer through the floor.

Key words : water inrush from the floor ; numerical simulation ; instability-failure process ; coupling of flow and stress