

文章编号: 1001-1986(2009)03-0033-05

# 断层破碎带变形破坏失稳过程模拟

刘伟韬, 姬保静, 何寿迎

(山东科技大学资源与环境工程学院, 山东 青岛 266510)

**摘要:** 为了研究断层破碎带在采动影响下的变形破坏失稳过程, 采用电镜、薄片分析及蠕变力学试验方法分别对范各庄矿  $F_0$  断层物质的原样和 3 种含水量、5 组样品的复制样进行了分析研究。在力学实验的基础上, 借助数值仿真软件 FLAC<sup>3D</sup> 完成了对断层破碎带变形破坏失稳过程的模拟计算。模拟结果较好地刻画出了承压水对上覆岩层及断层带的影响; 开采活动对底板岩层的影响; 断层破碎带受开采影响的大小和范围; 承压水影响的时间效应和特定水头作用下承压水沿断层导升的高度。

**关键词:** 破碎断层; 变形破坏; 过程; 模拟

**中图分类号:** TD12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2009.03.008

## Simulation of the distortion and destruction process of fractured fault zone

LIU Weitao, JI Baojing, HE Shouying

(College of Natural Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** In order to study the distortion and destruction process of fractured fault zone under the mining influence, we carried out the electron microscopy, the thin section analysis and the creep test on original samples and duplicated samples of fault materials. According to test results of the electron microscopy and the thin section analysis of test samples, uniaxial and triaxial creep tests for five group samples, which respectively have three kinds of moisture content, we obtained creep characteristics and the distortion destruction characteristics of fault materials. On the basis of that, the flow-solid coupling numerical simulation was made with the aid of FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation software. The simulation results illustrate the influence of confined water on overlying strata and fault zone, the influence of mining activity on coal floor, the influencing size and scope of fault crushing zone, time effect of confined water.

**Key words:** fractured fault zone; distortion and destruction; process; simulation

已有的突水资料表明, 煤层底板突水问题的实质就是断裂的破坏失稳问题。断层内部及邻区的位移场、应力场的定量和实验研究成果可用于讨论地质灾害的发生、迁移和防治以及矿井水的运移和富水区预测等<sup>[1-4]</sup>。谭志祥对断层突水的力学机制进行了分析; 杨天鸿认为底板突水破坏过程和岩石的水力压裂机制一样, 是水压驱动下岩层裂纹萌生、扩展并跟踪传递, 直到最后贯通导致失稳破裂的复杂过程<sup>[5]</sup>; 杨小刚等应用 RFPA<sup>2D</sup>-Flow 系统对煤层底板破坏深度进行了数值模拟<sup>[6]</sup>; 王学滨等对岩石的变形破坏过程进行了模拟<sup>[7]</sup>; 对于断层变形破坏过程的研究还不多见。岩石的力学实验表明, 在最初的、有限的弹性形变之后, 当荷载达到屈服极限, 岩样会发生一个阶段的塑性形变, 继续加载达到强

度极限才会发生破裂。因此, 研究断层的破坏过程以及破坏前后的塑性、流变行为, 断层在外加应力作用下, 流变扩展规律以及应力场的变化过程, 对于煤矿预防断层滞后突水具有重要意义。

开滦矿业集团范各庄煤矿位于开平向斜东南翼, 井田内可采煤层共 6 层, 其中 12 号煤层是范各庄矿开采的最下部一层主采煤层。 $F_0$  断层是一条切割范各庄石炭系煤系和下覆奥陶系灰岩含水层的断裂构造。当该断层带变形到一定程度时, 将成为巷道突水的主要通道。由于生产区域多数布置在  $F_0$  断层附近, 采掘工程严重受  $F_0$  断层制约, 极大地影响了该矿采区布置及矿井深部开拓。 $F_0$  断层受采动影响有可能活化形成滞后突水, 因此, 本文通过对  $F_0$  断层破碎带物质的试验研究, 运用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件探

收稿日期: 2008-08-06

基金项目: 国家重大基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202205); 国家自然科学基金项目(40572149)

作者简介: 刘伟韬(1970—), 男, 山东东明人, 副教授, 博士, 从事矿井特殊开采与矿井水文地质等教学与研究工作。

讨和分析了断层破碎带物质的破坏失稳过程<sup>[8]</sup>。

## 1 断层带物质的物性分析

为了从微观—细观—宏观的不同尺度上分析断层破碎带物质原样和复制样的变形和破坏特征,对采集到的样品原样和复制样分别进行了薄片和扫描电镜分析。

### 1.1 $F_0$ 断层带物质的薄片分析

本次试验分别对原样和复制样共 7 个样品进行了薄片鉴定和分析。

由显微镜观察结果表明,断层带原样物质具有如下微细特征:**a.** 具有两组劈理及多组裂隙,呈粉砂泥质结构,矿物成分以粘土矿物为主;**b.** 劈理和裂隙较发育,呈网状分布,连续性差;**c.** 劈理两侧有轻微位移,裂隙分布不均匀,隙宽不等。断层带复制样物质则表现出明显不同于原样的如下微细特征:**a.** 均为碎屑结构,碎屑含量达 85 %之多;**b.** 无构造裂隙和劈理显现;**c.** 样品中裂隙形态多样,宽窄不一,主要分布在碎屑颗粒周边。

### 1.2 $F_0$ 断层物质的扫描电镜分析

为进一步了解断层物质的形貌、结构、成分及原样与复制样在构造上的异同,便于进行原样和复制样力学性质的对比分析,本次完成了 4 个样品的电镜分析,其中原岩样品 3 个,复制样品 1 个。扫描结果表明:**a.** 原样和复制样的主要元素成分相同,主要由泥质、粉砂质组成,泥质矿物由水云母、高岭石及少量绿泥石组成;**b.** 原样劈理面发育,劈理面上具定向微擦痕,泥质物和粉屑分层结合,具微细流动变形特征(图 1);**c.** 复制样的定向不明显,未见流动变形现象,未见劈理及微擦痕(图 2)。

## 2 $F_0$ 断层带物质流变试验

断层物质的单轴和三轴压缩蠕变试验采用单试件法对每一个试件在一个围压下,分别连续进行  $\sigma_i$  应力为常数的 7~8 级蠕变试验。各试件在第 1 级常应力  $\sigma_1$  作用下不产生常速流变,即该应力级下的应变速率为 0( $\dot{\epsilon}=0$ )。第 2 级  $\sigma_1$  至倒数第 2 级  $\sigma_1$  应力作用下,都会产生常速流变变形。在充分显示常速流动变形以后,结束该应力级的蠕变试验,直到最后一级常应力作用下,试件发生加速流动变形破坏,结束该试件的蠕变试验。

试验样品取自范各庄矿-623 m 水平。井下现场揭露后立即采集,并在现场密封处理后运至实验室。所采集样品的蠕变力学特点完全可以反映出断层带物质的特性。考虑到受采矿活动的影响,在底板承压水的作用下,断层带物质的含水量会逐步增大,因此进行样品测试时主要考虑了 3 种含水量;同时

由于采样位置埋藏较深,在进行试验时,特别施加了能够体现现场实际围压状态的高围压。

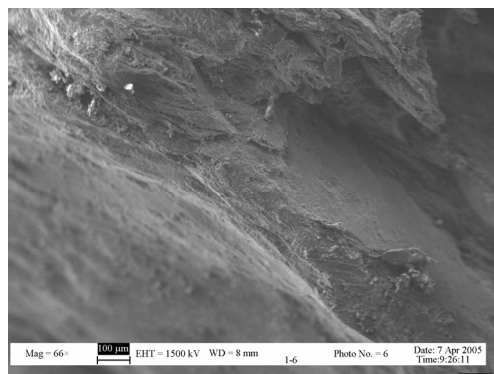


图 1 劈理面及定向微擦痕

Fig. 1 Cleavage surface and the directed micro striation

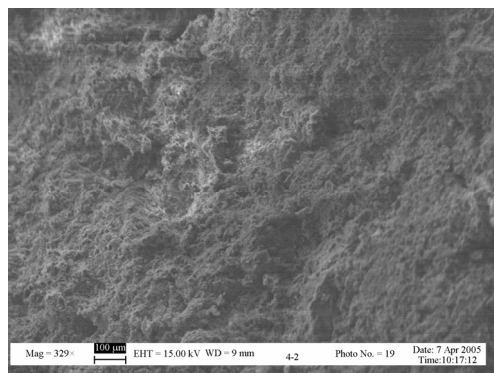


图 2 样品景观形态较致密定向分布不明显

Fig. 2 No obvious directed distribution in denser sample

### 2.1 $F_0$ 断层物质原样压缩蠕变试验结果

#### 2.1.1 原样单轴压缩蠕变试验结果

$F_0$  断层物质的原样单轴压缩蠕变试验编号为 5869。其密度为 2.30 g/cm<sup>3</sup>, 含水量为 3.54 %,  $\sigma_i$  应力级分别为 0.18 MPa、0.25 MPa、0.30 MPa、0.40 MPa、0.60 MPa、0.80 MPa、0.90 MPa。在  $\sigma_i$  为 0.18 MPa 应力级下产生瞬时变形和阻尼变形, 未发生常速蠕变。在  $\sigma_i$  应力级为 0.25~0.80 MPa 作用下, 产生了常速流变。在  $\sigma_i$  应力级为 0.90 MPa 时, 产生常速和加速蠕变。单轴压缩蠕变试验的应变历时曲线见图 3, 试验结果见表 1。

#### 2.1.2 原样三轴压缩蠕变试验结果

$F_0$  断层物质的原样三轴压缩蠕变试验编号为 5864、5866、5868、5867。4 个试件各应力级下的应变历时曲线图略, 试件破坏应力莫尔圆及莫尔包络线见图 4。各试件不同围压下的起始流变应力、流动破坏应力、变形模量、粘滞系数见表 2。

### 2.2 $F_0$ 断层物质复制样(含水量为 3.84 %~3.91 %)蠕变试验结果

$F_0$  断层物质的复制样蠕变试验分别进行了单轴和三轴压缩试验。

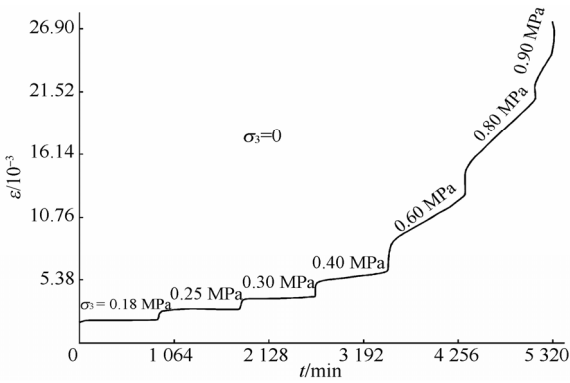


图 3 单轴压缩蠕变历时过程曲线  
Fig. 3 Curve of creep strain trial of sample 5869

单轴压缩蠕变试验在  $\sigma_i$  为 0.25 MPa 应力级下产生瞬时变形和阻尼变形，未发生常速蠕变；在  $\sigma_i$  应力级为 0.50~1.10 MPa 作用下，产生了常速流变；在  $\sigma_i$  应力级为 1.20 MPa 时，产生了常速和加速蠕变。试验结果见表 1。

表 1 范各庄矿  $F_0$  断层碎裂化断层岩单轴蠕变试验结果  
Table 1 Uniaxial creep test results of mylonitized fault rock of fault  $F_0$  in Fanggezhuang mine

取样 编号	岩石 描述	含水量 /%	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	围压 $\sigma_3$ /MPa	破坏应力 $\sigma_c$ /MPa	变形模量 $E_d$ /MPa	起始流变 应力 $\sigma_l$ /MPa	粘滞系数 $\eta/10^{12}$ Pa·s	破坏强度参数		长期强度参数		破 坏 描 述
									内聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	内聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	
5869	原样	3.54	2.30	0	0.90	115.6	0.22	3.98	0.36	16.0	0.04	10.5	沿极密集劈理带剪破坏
5887		3.85	2.30	0	1.20	181.0	0.29	7.0	0.54	21.5	0.09	14.5	剪切流动破坏
5873	复制样	6.84	2.31	0	0.65	91.3	0.18	3.26	0.28	17.0	0.07	11.3	剪切流动破坏
5881		10.56	2.23	0	0.39	60.5	0.12	0.779	0.15	13.5	0.05	9.2	剪切流动破坏

表 2 范各庄矿  $F_0$  断层碎裂化断层岩三轴蠕变试验结果  
Table 2 Triaxial creep test results of mylonitized fault rock of fault  $F_0$  in Fanggezhuang mine

取样 编号	岩石 描述	含水量 /%	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	围压 $\sigma_3$ /MPa	破坏应力 $\sigma_c$ /MPa	变形模量 $E_d$ /MPa	起始流变 应力 $\sigma_l$ /MPa	粘滞系数 $\eta/10^{12}$ Pa·s	破坏强度参数		长期强度参数		破 坏 描 述
									内聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	内聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	
5864	原样	3.52	2.31	0.3	1.60	200.2	0.58	10.7	0.36	16.0	0.04	10.5	沿极密集劈理带剪破坏
5866		3.56	2.33	0.6	2.03	225.2	1.0	14.7					
5868		3.51	2.33	0.9	2.59	257.9	1.49	13.4					
5867		3.54	2.31	1.2	3.06	289.8	1.86	15.2					
5888		3.84	2.30	0.3	2.17	294.1	0.70	15.2	0.54	21.5	0.09	14.5	鼓胀网化剪切流动破坏
5889		3.90	2.29	0.6	2.95	382.5	1.18	16.8					
5890		3.91	2.30	0.9	3.49	411.9	1.73	22.8					
5891		3.90	2.31	1.2	4.12	465.7	2.17	39.7					
5871	复制样	6.61	2.33	0.2	1.12	136.5	0.47	3.71	0.28	17.0	0.07	11.3	网化鼓胀流动破坏
5874		6.81	2.34	0.4	1.50	176.5	0.71	4.42					
5875		7.03	2.34	0.6	1.93	205.0	1.10	5.42					
5870		6.90	2.34	0.8	2.25	225.8	1.37	6.67					
5880		10.40	2.23	0.1	0.52	97.6	0.25	1.05	0.15	13.5	0.05	9.2	鼓胀流动破坏
5878		10.61	2.27	0.2	0.72	110.2	0.41	1.39					
5883		10.70	2.25	0.3	0.83	136.5	0.49	1.90					
5882		10.51	2.25	0.4	1.0	164.2	0.68	3.80					

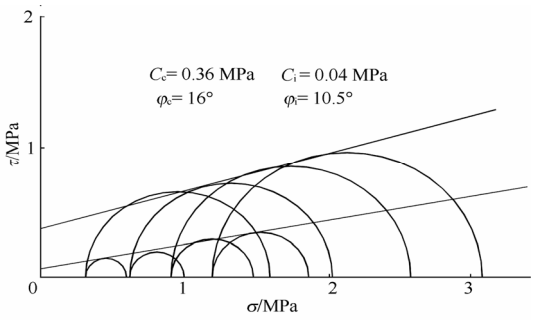


图 4 三轴蠕变破坏应力莫尔圆包络线  
Fig. 4 Mohr's envelope of triaxial creep test's failure stress

三轴压缩蠕变试验结果见表 2。

2.3 试验结果分析

断层物质的力学特性与许多因素有关，如断层软、散、碎物质的比例，颗粒组成，颗粒形状，矿物成分，含水量，围压状态以及断层内软、散、碎物质的分布规律，劈理、节理发育状态及延伸性等。通过对试验结果的分析认为：

a. 同类样品在含水量相同的条件下, 单轴压缩蠕变试验条件下的变形模量非常明显地低于有围压时的三轴压缩蠕变试验条件下的变形模量。而且随着围压的增大, 变形模量也随之增加。相同含水量情况下的复制样的试验数据以及其他含水量情况下的复制样蠕变试验结果都说明了断层物质的这个变化规律。

产生这种现象的原因是塑性变形成分受到围压的影响。在有围压或围压增大时, 一方面破坏应力增加; 另一方面粘塑性变形成分响应慢, 从而导致变形模量的增加。

b. 比较相同含水量下原样和复制样两组试件的试验结果可知, 断层物质原样在变形模量、粘滞系数、起始流变应力、破坏应力、内聚力、内摩擦角上都具有明显的结构效应。根据对相同围压下原样和复制样各试验参数进行的比较(见表 3), 在蠕变试验中原样和复制样各参数之比值介于 0.38~0.88。显然原样蠕变试验获得的力学参数明显地低于复制样的力学参数。

表 3 相同围压下原样和复制样各参数的比较  
Table 3 The comparison of parameters under same confining press between primary sample and copy sample

比较项目	样 品	围压 $\sigma_3/\text{MPa}$				
		0	0.3	0.6	0.9	1.2
起始流变应力 $\sigma_f/\text{MPa}$	原样	0.22	0.58	1.0	1.49	1.86
	复制样	0.29	0.70	1.18	1.73	2.17
	原样/复制样	0.76	0.83	0.85	0.86	0.86
破坏流变应力 $\sigma_c/\text{MPa}$	原样	0.90	1.60	2.03	2.59	3.06
	复制样	1.20	2.17	2.95	3.49	4.12
	原样/复制样	0.75	0.74	0.69	0.74	0.74
变形模量 $E_d/\text{MPa}$	原样	115.6	200.2	225.2	257.9	289.8
	复制样	181	294.1	382.5	411.9	465.7
	原样/复制样	0.64	0.68	0.59	0.63	0.62
粘滞系数 $\eta/10^{12}\text{Pa}\cdot\text{s}$	原样	3.98	10.7	14.7	13.4	15.2
	复制样	7.0	15.2	16.8	22.8	39.7
	原样/复制样	0.57	0.70	0.88	0.59	0.38
破坏强度参数	内摩擦角 /(°)	原 样	16			
	内摩擦系数 $f_c$	复制样	21.5			
	内聚力 $C_c$ /MPa	原样/复制样	0.73			
长期强度参数	内摩擦角 /(°)	原样	0.36			
	内摩擦系数 $f_i$	复制样	0.54			
	内聚力 $C_i$ /MPa	原样/复制样	0.67			
长期强度参数	内摩擦角 /(°)	原样	10.5			
	内摩擦系数 $f_i$	复制样	14.5			
	内聚力 $C_i$ /MPa	原样/复制样	0.72			
长期强度参数	内摩擦角 /(°)	原样	0.04			
	内聚力 $C_i$ /MPa	复制样	0.09			
	内聚力 $C_i$ /MPa	原样/复制样	0.44			

c. 对比 5 组蠕变试验各试件在加速流变发生时对应的应变可以发现, 加速流变发生时对应的应变随着围压的增加而增加。这就是说, 对于巷道围岩在无支护、巷道壁围岩处于单轴应力状态, 加速流动变形对应的应变小, 巷道壁围岩的位移也小。巷道围岩在位移较小时, 围岩处于破坏阶段, 突水可能发生。当支护施加后, 巷道围岩增加了围压, 巷道围岩的应变较大时, 仍未达到加速流变发生时的应变。

d. 试验表明, 断层物质中的断层泥、含泥碎裂岩的瞬时力学性质和蠕变力学性质都具有明显的含水量力学效应。含水量不仅影响断层物质的瞬时力学参数, 而且也影响断层物质与时间有关的力学参数。同时, 随着试验围压的增加, 各组试验试件的粘滞系数和变形模量也增加。

e. 根据  $F_0$  断层物质手标本、薄片和电镜分析,  $F_0$  断层物质的原岩为粉砂质泥岩。在经历断裂作用后, 其矿物成分仍以粘土矿物为主, 含少量粉砂级碎屑, 并且形成了以劈理及裂隙透镜体边缘组成的结构面系统。单轴蠕变试件的破坏形式均为剪切流动破坏, 三轴蠕变试件的破坏形式既有剪切流动破坏, 也有膨胀网化流动破坏, 还有膨胀流动破坏。

### 3 破坏失稳过程仿真模拟

根据试验得到的力学参数, 建立了工程地质物理概念模型和仿真数值模型, 施加岩层参数和边界条件后, 按照计算时间步长分别设置为 100 d、1 a、2 a、3 a、4 a、5 a、7 a、10 a、13 a、16 a、20 a 进行了模拟计算。每一个时间段计算完成后, 进入影响区的岩层进行弱化, 然后进入下一个时间段的计算, 直至蠕变和渗流耦合计算 20 a。

对比蠕变、渗流时间 100 d、20 a 以及中间时间段的计算结果(图 5), 可以看出:

a. 煤层顶板岩层的下沉量随着时间的增长逐渐变大, 采空区充填后底板位移随时间略有减小。底板岩层垂直位移量在断层附近最大, 影响范围为煤层下方 60~70 m。其变化趋势为采后很快就达到最大值, 随时间的推移深部区域的裂隙有所闭合, 导致影响范围有所减小, 但逐渐趋于稳定。

b. 底板奥陶系承压水在孔隙水压力的作用下, 随着时间的推移, 沿着断层逐渐向上渗透。开挖后 100 d, 孔隙水压力变化不大。但是 20 a 后, 水沿着断层上升了 70 m 左右。由于水的作用, 浸水的岩石及断层物质力学性能降低, 强度弱化。这样, 随着水的不断渗透和侵蚀, 底板水有可能沿着弱化形成的通道向上突出, 造成底板突水。

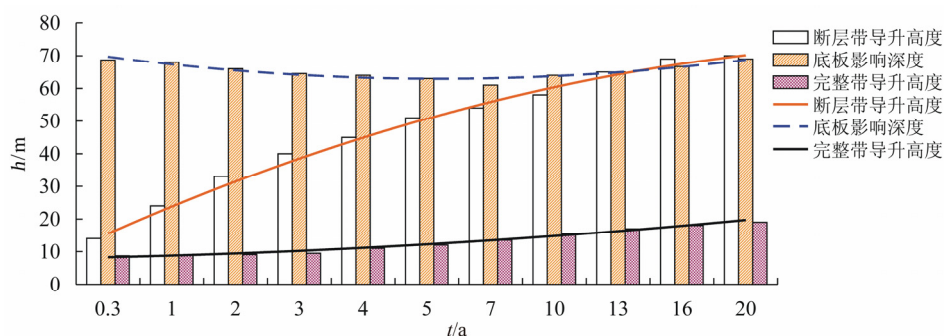


图5 变形破坏过程模拟变化示意图

Fig. 5 The simulation diagrammatic sketch of the distortion and destruction process

c. 煤层开采后, 由于顶底板岩层一定范围的应力释放, 煤层顶底板在断层附近产生面积较大的压剪应力和拉剪应力, 尤其是底板最为明显。因此可以判定, 由于断层的存在使得底板在较大构造应力的情况下存在大范围的剪应力区。因此在断层附近应重点监测, 加强防范。随着时间的增长, 在岩层蠕变和水压渗流的情况下, 断层底部的应力集中逐渐沿断层向上发展, 断层部位的应力集中有可能是造成底板破坏、发生底板突水的关键。

d. 从断层两侧煤层顶底板节点的位移随蠕变时间的变化曲线中可以看出, 断层的两侧(上、下盘)各监测点在推进方向上的位移随时间的增加逐渐增大, 但增幅逐渐减小。在垂直方向上也表现出同样的趋势, 说明采矿活动的影响是造成断层两侧岩层位移的主要因素, 影响程度随时间的增加逐渐减小。

e. 从断层两侧煤层顶底板节点的位移随蠕变时间的变化曲线中可以看出, 位移发生明显变化的时间在开采以后到  $10^8$  s 之间, 而且以开采结束时为最大, 基本上在  $5 \times 10^7$  s 时间之前趋于稳定, 在  $5 \times 10^7$  s 之后变化幅度相对较小, 因此可以判断开采对断层两盘的显著影响时间应该在 1.5 a 左右(约  $5 \times 10^7$  s)。

#### 4 结论

a. 根据对破碎断层物质的电镜和薄片分析认为, 断层物质劈理、裂隙发育, 劈理面上具微擦痕, 具微细流动变形特征, 正是这些微裂隙在承压水的作用下逐渐形成滞后导水的通道。

b. 通过对断层物质的蠕变力学试验, 获取了断层物质原样和复制样在不同围压、不同含水量条件下的流变力学参数, 也获得了不同试样不同力学参数的对比关系。试验表明, 断层物质具有明显的流变变形特征、结构效应和力学效应。结构面的存在、含水量以及围压的改变极大地改变了断层物质的性质。

c. 试验表明, 围压效应、结构效应、含水量效应等均对断层物质的性质产生巨大影响, 模拟结果

也说明, 范各庄矿 12 号煤层开采安全性评价结果虽然是安全的, 主要得益于其相对较厚的隔水层, 而对于条件类似的华北型煤田的其他矿区, 如山东肥城、淄博、开滦集团公司的其他薄隔水层矿井以及峰峰矿区、焦作矿区等大水煤炭基地, 矿井开采环境基本类似, 但相对隔水层厚度却非常小, 如何最大限度地增加有效隔水层厚度, 充分发挥底板岩层的延迟滞后效果, 仍是今后研究的重点。

d. 运用 FLAC<sup>3D</sup> 数值软件模拟变形破坏过程, 可以较好地刻画出承压水对上覆岩层及断层带的影响; 开采活动对底板岩层的影响; 断层破碎带受开采影响的大小和范围; 承压水影响的时间效应以及特定水头作用下承压水沿断层导升的高度。模拟结果表明, 破碎断层带在采矿活动和底板承压水的作用下不断弱化, 阻水能力降低, 当底板水压超过其阻抗能力时, 就会导致滞后突水的发生。

#### 参考文献

- [1] 万天丰. 古构造应力场[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [2] 武红岭, 王小凤, 马寅生, 等. 油田构造应力场驱动油气运移的理论和研究方法研究[J]. 石油学报, 1999, 20(5): 7-12.
- [3] 武红岭. 张性结构面的力学性质与主应力关系解析[J]. 地质论评, 1999, 45(5): 449-455.
- [4] 赵永红, 黄杰藩, 侯建军, 等. 岩石细观破裂的实验观测研究及其对认识地震活动性的启示[J]. 地球物理学报, 1995, 38(5): 627-636.
- [5] 杨天鸿. 岩石破裂过程的渗流特征——理论、模型与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] 杨小刚, 刘洋, 张壮路. 数值模拟在回坡底煤矿底板突水防治中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(5): 58-61.
- [7] 王学滨, 李毅. 平面应变含缺陷岩样变形破坏全过程数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 198-203.
- [8] 刘伟韬. 煤层底板断裂滞后突水机理及数值仿真模拟研究[D]. 中国矿业大学(北京)博士学位论文, 2005.