

# 煤柱挖潜开采影响下断层活化危险性研究

刘德民<sup>1,2</sup> 连会青<sup>1</sup> 李 飞<sup>1</sup>

(1. 华北科技学院 河北省矿井灾害防治重点实验室,北京 101601; 2. 中国矿业大学(北京) 北京 100083)

**摘要:**为研究防水煤柱挖潜开采影响下断层活化突水机理及危险性,以荆各庄矿F<sub>3</sub>断层为例,采用力学理论分析及数值模拟分析,建立了煤柱挖潜开采影响下断层活化力学模型、力学判据、数值分析模型,分析了断层活化影响因素,对F<sub>3</sub>断层活化危险性进行了判定,最后利用钻孔压水试验验证了判定结果。研究表明:煤柱挖潜开采影响下断层活化的主要因素有断层的富水性、断层倾角、断层带特性、断层所处的位置等,F<sub>3</sub>断层活化指数为 $-3.81 \times 10^5$ ,小于0,断层不会出现活化,此结论通过数值模拟分析及现场钻孔压水试验得到验证。

**关键词:**挖潜开采;煤柱;断层活化;力学判据;突水机理

中图分类号:TD823.83 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)03-0044-05

## Study on danger of fault activation under potential excavation of coal pillar

Liu Demin<sup>1,2</sup>, Lian Huiqing<sup>1</sup>, Li Fei<sup>1</sup>

(1. Hebei Provincial Key Lab of Mine Disaster Prevention and Control, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;  
2. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to study the water inrush mechanism and danger of the fault activation under the potential excavation of the coal pillar, based on Fault F<sub>3</sub> in Jinggezhuang Mine as an example, the mechanics theoretical analysis and numerical simulation analysis were applied to establish the mechanics model, mechanics criterion, numerical analysis model and to analyze the factors affected to the fault activation. A judgement was conducted on the danger of the Fault F<sub>3</sub> activation and finally a pressurized water test of the borehole was applied to verify the judgement results. The study showed that under the potential excavation of the coal pillar, the main factors of the fault activation under the potential excavation of the coal pillar would be the watery of the fault, inclination of the fault, fault zone features, location of the fault and others. The activation index of Fault F<sub>3</sub> was  $-3.81 \times 10^5$  and less than 0. The fault would not be activated and the conclusion was approved by the numerical simulation analysis and the site pressurized water test of the borehole.

**Key words:** potential excavation; coal pillar; fault activation; mechanics criterion; water inrush mechanism

## 0 引 言

防水煤柱留设是一种最常用、最有效的断层突水防治方法之一,根据《煤矿防治水规定》防水煤柱留设宽度取决于采高、水头压力和煤的抗张强度<sup>[1-2]</sup>,其中采高、水头压力在生产实践中较容易获取和确定,而煤的抗张强度很难取值。我国对煤层进行水压致裂测试抗张强度的试验不多,

抗张强度的选取多采用室内实验室数据的1/7~1/20。由于样品在采取时受到了很大的扰动,试验数据本来就偏小,再经过折减,使得强度的取值变得更小,都不足0.1 MPa,因此前期断层防水煤柱留设的宽度通常过大,使得工作面的长度大幅缩短,增大了采掘率,提高了生产成本。同时大量煤柱压占煤炭资源,大幅缩短了矿井的服务年限。随着煤矿资源的减少以及煤层抗张强度原位水压

收稿日期:2015-11-28;责任编辑:曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.03.009

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51204069);河北省自然科学基金资助项目(E2013508123);河北省矿井灾害防治重点实验室开放基金资助项目(KJZH2013K01)

作者简介:刘德民(1981—)男,河南商丘人,副教授,博士。Tel:010-61596506 E-mail:liudm@ncist.edu.cn

引用格式:刘德民,连会青,李飞.煤柱挖潜开采影响下断层活化危险性研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):44-48.

Liu Demin, Lian Huiqing, Li Fei. Study on danger of fault activation under potential excavation of coal pillar[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 44-48.

致裂测试技术的成熟,断层防水煤柱挖潜逐渐发展起来。如荆各庄矿  $F_3$  断层 9 号煤层煤柱原留设宽度为 110 m,后经过水文地质研究和煤层抗张强度原位测试,经论证留设煤柱缩短为 60 m,可以挖潜开采出煤炭约 150 万 t。然而煤柱储量挖潜开采在该矿属首项,国内外相关研究较少,几乎没有成熟经验可以借鉴,开采过程中仍然存在很多问题需要探索完善,比如天然状态下断层弱含水、弱导水,为弄清在煤柱采动影响下其活化情况,笔者在前人研究的基础上<sup>[3-18]</sup>,以荆各庄矿  $F_3$  断层为例,系统研究了煤柱挖潜开采影响下断层活化突水危险性分析方法及手段,建立了力学模型、判据和数值分析模型,设计了孔压水试验方案,对断层活化危险性进行了判定,研究成果可以为煤柱挖潜下断层防治水工作提供一定的理论依据。

### 1 荆各庄矿 $F_3$ 断层水文地质条件分析

荆各庄井田为一个盆状向斜,向斜轴线偏居西侧,近南北延伸,中部略向西呈弧形弯曲,并向南偏东倾伏,倾伏角  $5^\circ \sim 6^\circ$ 。向斜轴线西侧地层产状急陡,而东侧则较为舒缓,同时向斜边缘较之中部地层产状陡。荆各庄矿水文地质条件属复杂型。一般可划分为 3 个主要充水含水层组:奥陶统巨厚层碳酸盐岩充水含水层组、煤系充水含水层组、第四系松散孔隙充水含水层组。奥陶统巨厚层碳酸盐岩充水含水层组为富水性较强的含水层,单位涌水量为  $0.002 \sim 0.267 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,渗透系数为  $0.512 \sim 32.609 \text{ m}/\text{d}$ 。煤系充水含水层组有  $K_2-K_6$  砂岩裂隙承压含水层、 $K_6-12$  号煤层砂岩裂隙承压含水层、5 号煤层以上砂岩裂隙承压含水层。第四系松散孔隙充水含水层单位涌水量为  $0.053 \sim 0.231 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,平均为  $0.129 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,渗透系数为  $7.464 \sim 32.748 \text{ m}/\text{d}$ ,平均为  $10.455 \text{ m}/\text{d}$ ,为含水丰富的含水层。

荆各庄矿区断裂构造复杂,落差大于 2 m 的断层 200 多条。井田东翼及南翼断层大部分为 NW—SE 向的正断层,少数为 NE 向的逆断层,断层分布具有一定的等距性;西翼采区以逆断层为主,走向大多为 NE—NEE 向,大部分为雁列式的逆断层,断层组之间无等距性规律。 $F_3$  断层位于井田南部,逆掩断层,构成了井田的天然边界,断层落差 27~95 m,断层倾向  $140^\circ \sim 160^\circ$ ,倾角  $25^\circ \sim 50^\circ$ 。 $F_3$  断层向下切割了奥灰含水层,向上发育至第四系底部。根据

以往探测结果,天然条件下, $F_3$  断层含水性较差,断层不导水。1986 年,原开滦矿务局批复了荆各庄矿  $F_3$  断层煤柱留设宽度,9 号煤层原煤柱留设宽约 110 m。后经过相关水文地质探查和 9 号煤层抗张强度原位测试,结果表明,9 号煤层平均厚度为 7.62 m,水头压力为 4.753 3 MPa,抗张强度为 0.37 MPa,按照《煤矿防治水规定》公式计算煤柱留设宽度  $L$  为

$$L = 0.5KM\sqrt{3P/K_p} = 59.15 \text{ m}$$

式中: $K$  为安全系数,取 2.5; $M$  为 9 号煤层厚度, m; $P$  为静水压力, MPa; $K_p$  为煤的抗张强度, MPa。

为安全起见,最终确定  $F_3$  断层防水煤柱留设宽度为 60 m。

### 2 煤柱挖潜开采时断层活化模型及判据

断层活化是指相对稳定的断层在其他外在原因(如水库建设、采矿、地震等)作用下重新激活,开始活动。断层活化可以使不导水断层演化为导水断层,或者使弱导水断层演化为强导水断层,增大突水概率,因而在生产过程中应注意防范。

$F_3$  断层防水煤柱宽度由原来的 110 m 缩减为 60 m 后,在该断层的下盘布置 1196F 工作面,该工作面平行  $F_3$  断层推进挖潜煤柱,距离  $F_3$  断层 60 m (防水煤柱宽度)。由于煤柱挖潜开采可能导致  $F_3$  断层活化,沟通奥灰水和第四系松散水,后果非常严重,为研究  $F_3$  断层煤柱挖潜开采断层活化危险性,假定断层的上、下盘为弹性岩体,断层面上、下盘的接触面,则在煤柱挖潜影响下,工作面平行断层推进的断层活化力学模型可以转化成二维受力状态,如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

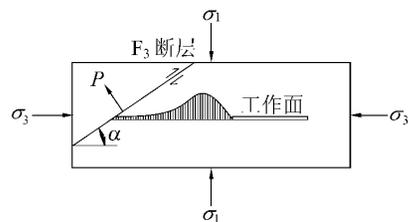


图 1 工作面平行断层推进断层活化二维受力简化模型  
Fig. 1 Simplified two-dimensional mechanical model of fault activation under working face advancing parallel to fault

初始应力状态下断层面的正应力  $\sigma_n$  与剪应力  $\tau_n$  分别为

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \quad (1)$$

$$\tau_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (2)$$

式中:  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小主应力;  $\alpha$  为断层倾角。

如断层为含导水断层, 则断层同时还受到静水压力  $P$  的影响,  $P$  的大小与断层面水头高度  $h$  有关,  $P = \rho gh$ ,  $\rho$  为水的密度,  $g$  为重力加速度, 在断层含导水情况下, 式(1)可以写为

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha - \rho gh \quad (3)$$

根据摩尔-库仑破坏准则, 断面上的抗剪强度  $\tau_f$  为

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi_f + c_f \quad (4)$$

式中:  $c_f$  为断层面充填物的黏聚力;  $\varphi_f$  为断层面充填物的内摩擦角。

设断层活化指数  $f$  为

$$f = \tau_n - \tau_f \quad (5)$$

将式(2)、式(3)和式(4)代入式(5)得

$$f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha - \left\{ \left[ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha - \rho gh \right] \tan \varphi_f + c_f \right\} \quad (6)$$

根据以岩层运动为中心的矿山压力控制理论, 由于采动的影响, 工作面周围会出现应力增量, 其分布形式如图1所示。由于工作面平行断层推进, 工作面至断层的距离不变, 应力增量大小一定, 最大主应力和最小主应力为

$$\sigma_1 = K_z \gamma H \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \lambda K_z \gamma H \quad (8)$$

式中:  $K_z$  为应力集中系数;  $\gamma$  为上覆岩层的平均密度;  $H$  为采深;  $\lambda$  为侧压系数。

将式(7)和式(8)代入式(6)得

$$f = \frac{1}{2} K_z \gamma H (1 - \lambda) \sin 2\alpha - \left\{ \left[ \frac{1}{2} K_z \gamma H (1 + \lambda) + \frac{1}{2} K_z \gamma H (1 - \lambda) \cos 2\alpha - \rho gh \right] \tan \varphi_f + c_f \right\} \quad (9)$$

由摩尔-库仑破坏准则和式(9)可知, 当断层活化指数  $f \geq 0$  时, 断层将出现活化。同时由式(9)也可以得出影响断层活化的因素主要包括: 断层的富水性、断层倾角、断层带特性、断层所处的位置等, 具

体分析如下。

1) 断层的富水性。断层带内富水有利于断层的活化, 断层富水不但减小了正应力而且使得断层带内的摩擦因数大幅降低, 因此断层带富水且水头较高时断层越容易活化。根据以往对  $F_3$  断层的钻探和物探表明,  $F_3$  断层不含水而且不导水, 因此渗透压力等于0, 该指标不影响  $F_3$  断层的活化。

2) 断层倾角。断层的破坏形式与断层倾角有很大关系, 随着断层倾角的增大, 断层的破坏形式依次表现为剪切破坏和拉破坏。断层倾角越大, 断层越容易活化。 $F_3$  为逆掩断层, 断层倾角变化较大, 另外从整体上分析,  $F_3$  断层上部倾角较大而下部倾角较小, 9号煤层处断层倾角为  $38^\circ$ , 其值较小, 再加上随着深度的增加, 断层底部逐渐表现出韧性变形, 因此综合起来, 断层倾角不利于断层的活化。

3) 断层带特性。断层带的特性主要指带内的胶结物及胶结程度, 表现在断层带内的黏结系数和内摩擦角的大小, 从式(9)可以看出, 黏结系数和内摩擦角越大, 断层活化的概率越小。根据以往探查工程  $F_3$  断层含水性、导水性较差, 且在穿越  $F_3$  断层时均无浆液漏失, 说明断层带内具有一定的胶结程度, 不利于断层的活化。

4) 断层所处的位置。断层所处的位置主要是指断层与工作面的空间位置关系, 包括工作面的埋深、工作面到断层的距离, 以及工作面的推进方向。从式(9)可看出, 随着工作面埋藏深度  $H$  的增加, 矿山压力也逐渐增加, 有利于断层的活化, 另外工作面距离断层越近则应力集中系数也逐渐增大, 也利于断层的活化。1196F工作面的埋藏深度为 275.6 ~ 323.63 m, 埋藏较浅。工作面距离断层 60 m, 平行于断层走向, 且随着工作面的推进, 工作面至断层的距离变化不大, 因此 1196 工作面矿山压力对  $F_3$  断层影响较小, 该工作面采掘活动使  $F_3$  断层产生活化的概率较小。

综上所述,  $F_3$  断层在煤柱挖潜的影响下活化概率较小。另外依据现场探查, 同时为安全起见, 取应力集中系数为 1.2, 上覆岩体的平均密度为  $2.6 \text{ g/cm}^3$ , 工作面的采深为 323.6 m, 侧压系数为 0.333。根据测试并借鉴邻近矿井的相关资料, 9号煤层处断层倾角为  $38^\circ$ , 断层面充填物的内摩擦角  $20^\circ$ , 断层面充填物的黏聚力为 0.9 MPa, 将上述参数代入式(9), 可以求出断层活化指数  $f = -3.81 \times 10^{-5} < 0$ , 也可以得出在断层煤柱挖潜影响下,  $F_3$  断

层不会出现活化。

### 3 断层煤柱挖潜开采数值模拟分析

为进一步研究 1196F 工作面开采对  $F_3$  断层的影响,判断断层是否存在活化危险性,依据 1196F 工作面回采地质说明书、1196F 工作面采掘工程平面图、1196F 巷道素描图以及 1196F 工作面附近钻孔柱状图,利用 FLAC<sup>3D</sup> 建立了三维数值模拟模型,工作面倾斜长度 98 m,煤层厚度 7 m,工作面距离断层 60 m,模拟长 330 m,宽 300 m,高 120 m,三维模型共划分有 68 400 个三维单元,共 73 076 个结点。模型侧面限制水平移动,模型底面限制垂直移动,模型上部施加垂直载荷模拟上覆岩层的重量<sup>[18]</sup>。根据现场地质调查和相关研究提供的岩石力学试验结果,考虑到岩石的尺度效应,模拟计算采用的岩体力学参数见表 1<sup>[18]</sup>。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Rock mechanical parameters

岩层	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
细砂岩	12.0	0.23	7.3	33	3.5
页岩	8.0	0.24	6.2	32	2.4
细砂岩	11.0	0.25	7.7	35	3.5
粉砂岩	9.0	0.24	7.5	32	3.4
煤层	4.0	0.25	0.8	20	0.7
泥岩	8.0	0.28	5.2	36	2.7
粉砂	10.0	0.27	7.9	35	3.1
中砂	14.0	0.25	8.0	37	3.2
断层	2.7	0.40	0.9	20	0.2

数值模拟分析表明:随着煤层的开采,煤层围岩应力场发生了变化,并且产生了相应的位移场<sup>[18]</sup>,同时由于采掘活动影响,在采空区顶底板都产生了塑性破坏区,其中顶板破坏最大高度为 45 m,底板最大破坏深度为 11 m,而断层带内并未出现断层活化的标志即剪切塑性破坏(图 2),所以  $F_3$  断层煤柱挖潜没有引起断层活化。

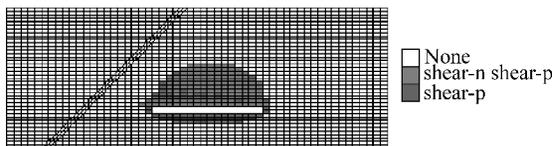


图 2 工作面推进 80 m 塑性破坏区域分布

Fig. 2 Section of plastic damage area distribution when working face advancing 80 m

### 4 钻探工程验证

为验证理论分析与数值模拟结果,探查  $F_3$  断层

在煤柱挖潜影响下断层是否产生活化,在 9 号煤层煤柱挖潜开采的采区井巷联络工程布置钻场,实施钻探工程,在钻场中分别布置 2 个钻孔:1 号和 2 号钻孔,钻孔由侧帮斜向上 40° 穿入工作面,向  $F_{1-3}$  断层组方向钻进,穿过断层带终孔 10 m 左右(图 3)。2 号钻孔分别在采前、采中实施钻孔压水试验,研究断层带活化及活化条件。

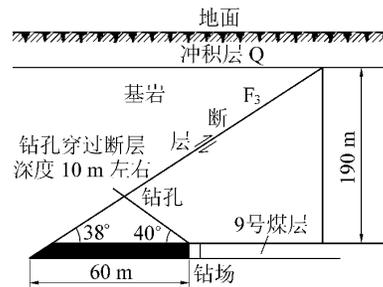


图 3 钻孔施工设计剖面

Fig. 3 Design section of drilling construction

根据钻探结果,2 个孔结构完整,在钻进过程中基本无出水,1 号钻孔最大出水量仅为 0.18 m<sup>3</sup>/h,2 号钻孔最大出水量仅为 0.3 m<sup>3</sup>/h,同时 2 号钻孔穿越  $F_3$  断层时无浆液漏失;在采前、采中实施钻孔压水试验也没有发现明显的漏失现象,从上述探查试验结果表明  $F_3$  断层不含水(无水),不导水,且煤柱挖潜活动没有造成  $F_3$  断层的活化。

### 5 结论

1) 断层煤柱挖潜可以节约大量的煤炭资源,但可能引起断层活化,增加突水概率。影响断层活化的主要因素包括断层的富水性、断层倾角、断层带特性、断层所处的位置等。断层富水性强、倾角大、距离工作面近有利于断层活化,断层带内胶结程度好,内摩擦角和黏聚力大则不利于断层活化。

2) 以  $F_3$  断层为例,建立了煤柱挖潜影响下断层活化力学判据和数值模拟分析模型,设计了断层活化探查方案,三者的分析结果得到了相互验证,形成了一套煤柱挖潜影响下断层活化危险性分析的技术方案,其分析结果可以为煤柱挖潜断层防治水提供一定的依据。

#### 参考文献(References):

[1] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009.  
[2] 武强,赵苏启,李竞生,等.《煤矿防治水规定》编制背景与要点[J].煤炭学报,2011,36(1):70-74.

- Wu Qiang, Zhao Suqi, Li Jingsheng, *et al.* The preparation back-ground and the main points of *Rule of Mine Prevention and Cure Water Disaster* [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(1): 70-74.
- [3] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 范各庄矿井地下水系统广义多重介质渗流模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2319-2325.
- Yin Shangxian, Wu Qiang, Wang Shangxu. Generalized multiple porous media seepage model of groundwater system for Fanggezhuang Mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2319-2325.
- [4] 施龙青, 韩进. 底板突水机理及预测预报[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [5] 卜万奎, 徐慧. 某矿区带压开采逆断层活化及突水性分析[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(7): 1177-1183.
- Bu Wankui, Xu Hui. Analysis on reverse fault activation and water inrush possibility for coal mining above confined aquifer in a mining area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(7): 1177-1183.
- [6] 武强, 刘金韬, 钟亚平等. 开滦赵各庄矿断裂滞后突水数值仿真模拟[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(5): 511-516.
- Wu Qiang, Liu Jintao, Zhong Yaping, *et al.* The numeric simulations of water-bursting time-effect for faults in Zhaogezhuang Coal Mine, Kailuan [J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(5): 511-516.
- [7] 李青锋, 王卫军, 彭文庆等. 断层采动活化对南方煤矿岩溶突水影响分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 3417-3424.
- Li Qingfeng, Wang Weijun, Peng Wenqing, *et al.* Influence of activation fault after coal extraction on coal mine karst water-inrush [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 3417-3424.
- [8] 孙文斌. 断层对底板突水的影响作用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006.
- [9] 李晓昭, 罗国煜, 陈忠胜. 地下工程突水的断裂变形活化导水机制[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(6): 695-700.
- Li Xiaozhao, Luo Guoyu, Chen Zhongsheng. The mechanism of deformation and water conduction of fault due to excavation in water inrush in underground engineering [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(6): 695-700.
- [10] 施龙青, 曲有刚, 徐望国. 采场底板断层突水判别方法[J]. *矿山压力与顶板管理*, 2000, 17(2): 49-52.
- Shi Longqing, Qu Yougang, Xu Wangguo. Method to determine water inrush from a fault in floor [J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 2000, 17(2): 49-52.
- [11] 谭志祥, 周鸣, 邓喀中. 断层对水体下采煤的影响及其防治[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(3): 256-259.
- Tan Zhixiang, Zhou Ming, Deng Kazhong. Influence of fault to mining under water bodies and its control [J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(3): 256-259.
- [12] 董书宁. 对中国煤矿水害频发的几个关键科学问题的探讨[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(1): 66-71.
- Dong Shuning. Some key scientific problems on water hazards frequently happened in China's coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(1): 66-71.
- [13] 杨随木, 张宁博, 刘军等. 断层冲击地压发生机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(10): 6-9.
- Yang Suimu, Zhang Ningbo, Liu Jun, *et al.* Research on mechanism of fault rock burst [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(10): 6-9.
- [14] 李利平, 李术才, 石少帅等. 基于应力-渗流-损伤耦合效应的断层活化突水机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S0): 3295-3304.
- Li Liping, Li Shucui, Shi Shaoshuai, *et al.* Water inrush mechanism study of fault activation induced by coupling effect of stress-seepage-damage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S0): 3295-3304.
- [15] 张拥军, 杨登峰, 陈关平等. 含隐伏小断层底板采动突水机理数值模拟研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(10): 45-47.
- Zhang Yongjun, Yang Dengfeng, Chen Guanping, *et al.* Numerical simulation research on activation water inrush mechanism of mining floor with concealed minor faults [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(10): 45-47.
- [16] Yang Ke, He Xiang, Dou Litong, *et al.* Experimental investigation into stress-relief characteristics with upward large height and upward mining under hard thick roof [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2015, 2(1): 91-96.
- [17] Pang Yihui, Wang Guofa, Ding Ziwei, *et al.* Mechanical model of water inrush from coal seam floor based on triaxial seepage experiments [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2015, 2(4): 428-433.
- [18] 刘德民, 韩永. 煤柱挖潜影响下断层活化 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟研究[J]. *中国煤炭地质*, 2014, 26(8): 83-86.
- Liu Demin, Han Yong. FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation study for fault activation induced by coal pillar potential tapping [J]. *Coal Geology of China*, 2014, 26(8): 83-86.