

# 固液耦合模式下采动诱发断层两盘 滑移规律的模拟分析

张培森<sup>1,2</sup>, 张文泉<sup>1,2</sup>, 王明辉<sup>1,2</sup>, 王浩<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

**摘要:**以五沟煤矿 F16 断层的地质条件为背景,采用三维有限差分数值软件 FLAC<sup>3D</sup> 的固液耦合模式,对断层倾角、断层破碎带宽度及承压水水压不同时,在断层上盘煤层开采过程中断层界面滑移量的变化规律进行了分析,研究得出:断层界面同一标高处的垂向滑移量随断层倾角、断层破碎带宽度及含水层水压的增加而增大。断层界面的垂向滑移量越大,突水危险性越大。

**关键词:**固液耦合;断层滑移;采动诱发;数值模拟

中图分类号:U455

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)02-0053-05

## Numerical Simulation of Sliding Rule of Two Plates of Fault Induced by Mining Under Solid-liquid Coupling Mode

Zhang Peisen<sup>1,2</sup>, Zhang Wenquan<sup>1,2</sup>, Wang Minghui<sup>1,2</sup>, Wang Hao<sup>1,2</sup>

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base for Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** The study was on the geological conditions of F16 fault of Wugou coalmine, using solid-liquid coupling model of 3D finite difference numerical software FLAC<sup>3D</sup>. Analysis was made on variation of interface slip of fault during the process of coal mining on the interface when width of fault fracture zone, the fault dip and confined water pressure were different. The research conclusion is that the vertical slip at the same elevation of fault interface increases with the growth of fault dip, width of fault fracture and aquifer water pressure. The more the vertical slip amount of interface, the higher risk of water inrush is of.

**Key words:** solid-liquid coupling; fault slip; mining-induced; numerical simulation

临近断层时,采矿活动会引起断层上下盘的相对错动<sup>[1]</sup>,即为断层滑移,是断层活化并引起断层突水的主要原因。由于煤炭资源不可再生以及煤炭开采强度的不断加大,浅部的煤炭资源大大减少,煤炭的开采逐渐向深部发展。随着煤炭开采强度的提高以及开采深度的不断加大,开采煤层所赋存的地质条件也越趋复杂,开采难度大大提高,煤矿事故特别是断层突水事故是深部开采首先要面对的难题之一<sup>[2]</sup>。

断层活化使得断层带以及两盘靠近断层的部位产生新的裂隙,原有的裂隙进一步扩大,最后形成突水通

收稿日期:2013-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51379119, 51109124);教育部博士点新教师基金项目(20113718120009);山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助项目;煤柱性能与覆岩控制创新团队资助项目;国家重点基础研究发展计划(“973”)前期研究专项(2012CB72310401);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2011SF016)

作者简介:张培森(1977—),男,山东曹县人,副教授,博士后,主要从事矿山压力与岩层控制、地下工程灾害预测及防治、矿井特殊开采及模拟分析等教学与科研工作。E-mail: peisen\_sky@163.com

道,为工作面突水提供了重要的条件<sup>[3]</sup>。长期以来,国内不少学者对断层突水进行了大量研究<sup>[2-8]</sup>,取得了很多有价值的成果,并进行了大量有关断层突水的相似模拟试验和数值模拟研究,而有关采动诱发断层滑移对断层活化突水的影响研究却很少。本研究以五沟煤矿 F16 断层地质条件为背景,采用三维有限差分数值软件 FLAC<sup>3D</sup>的固液耦合模式对采动诱发断层两盘滑移规律进行数值模拟,为断层突水的现场预测和防治提供参考。

## 1 模型建立及计算方案

### 1.1 模型构建

五沟煤矿 F16 断层落差为 70 m,开采煤层为 10 煤,平均厚度为 4 m。计算模型选取工作面的推进方向为 X 轴,工作面的倾斜方向为 Y 轴,模型的竖直方向为 Z 轴。考虑到边界效应和计算速度因素,最终确定计算模型大小为 600 m×10 m×200 m。根据研究目的,对断层、煤层及煤层直接顶和直接底网格进行加密处理,具体网格划分如图 1 所示。模型四周边界均施加水平位移约束,底边界均施加水平位移及垂直位移约束,上部边界为应力边界,其数值大小由上覆岩层的重力决定。计算模型选取 MOHR 及 FL\_ISO 模型,主要岩层的物理力学参数如表 1 所示。

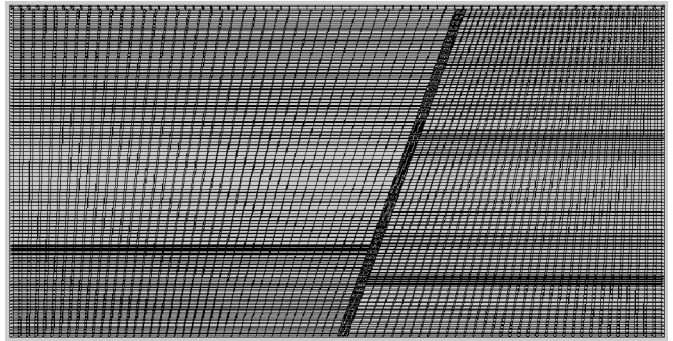


图 1 模型网格划分示意图  
Fig. 1 Grid partition of mode

表 1 主要岩层的物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters table of main rock stratum

岩性	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	摩擦角/(°)	粘结力/MPa	抗拉强度/MPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	渗透系数/(cm/s)	孔隙率
中砂岩	2 700	34	6.00	2.40	5.400	3.880	3.60×10 <sup>-3</sup>	0.40
细砂岩	2 500	32	7.20	6.02	8.750	4.040	1.23×10 <sup>-3</sup>	0.30
10 煤	1 400	24	0.55	1.60	0.802	0.528	4.07×10 <sup>-3</sup>	0.35
泥岩	2 200	30	5.00	2.20	6.250	3.570	3.06×10 <sup>-5</sup>	0.20
粉砂岩	2 550	31	5.20	3.60	13.900	4.630	4.07×10 <sup>-4</sup>	0.25
灰岩	3 000	36	5.70	5.10	7.690	8.110	0.13×10 <sup>-1</sup>	0.52
断层	2 000	26	1.50	0.10	0.278	0.208	4.07×10 <sup>-2</sup>	0.44

### 1.2 计算方案

针对五沟煤矿 F16 断层的地质条件,采用三维有限差分数值软件 FLAC<sup>3D</sup>的固液耦合模式对采动诱发断层两盘滑移规律进行数值模拟研究。断层两盘滑移规律与多种因素有关,在分析现有研究资料的基础上,本研究重点分析断层倾角、断层破碎带宽度及承压水水压不同时在断层上盘煤层开采过程中断层界面滑移量的变化规律。

计算方案拟分析 11 个计算工况,共分为三类:第一类为断层破碎带宽度为 4 m,含水层水压为 3 MPa 保持不变的前提下,断层倾角分别为 30°,40°,50°,60°,70°;第二类为断层倾角为 70°,含水层水压为 3 MPa 保持不变的前提下,断层破碎带宽度分别为 4,6,8 m;第三类为断层破碎带宽度为 6 m,断层倾角为 70°保持不变的前提下,含水层水压分别为 2,3,4 MPa。

## 2 计算结果分析

开采煤层位于断层上盘,考虑到边界效应,工作面从  $x=100\text{ m}$  处开挖推进。从左向右,向断层推进,直到距离断层  $50\text{ m}$  时。为了研究煤层开采过程中断层界面滑移量的变化规律,分别在断层上下盘同一水平布置一对监测点。

### 2.1 断层倾角不同对断层滑移的影响

在回采作业时,由于采动影响,煤壁前方一定范围内产生应力集中,随着工作面的连续推进,高集中应力逐渐向断层靠近,断层的上、下盘相互错动,使得断层上、下盘之间形成断开状态,断层滑移量急剧增加,致使断层活化。图 2~6 描述了断层倾角分别为  $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  及  $70^\circ$  时,断层界面同一标高处的滑移量随计算时步增加而变化的过程。

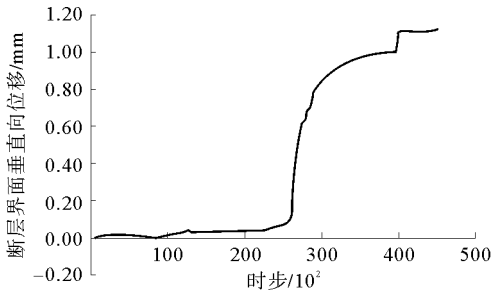


图 2 断层倾角为  $30^\circ$  断层垂直向位移曲线

Fig. 2 Curve of fault vertical displacement when the fault dip angle is  $30^\circ$

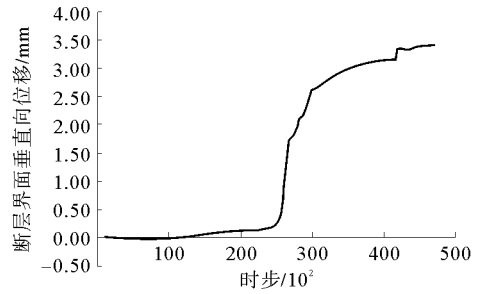


图 3 断层倾角为  $40^\circ$  断层垂直向位移曲线

Fig. 3 Curve of fault vertical displacement when the fault dip angle is  $40^\circ$

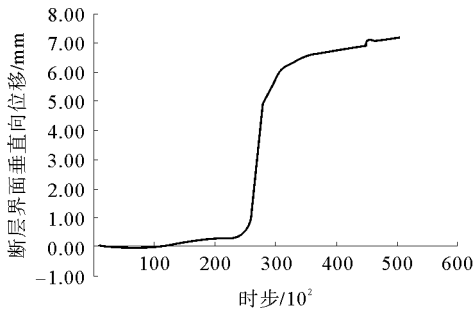


图 4 断层倾角为  $50^\circ$  断层垂直向位移曲线

Fig. 4 Curve of fault vertical displacement when the fault dip angle is  $50^\circ$

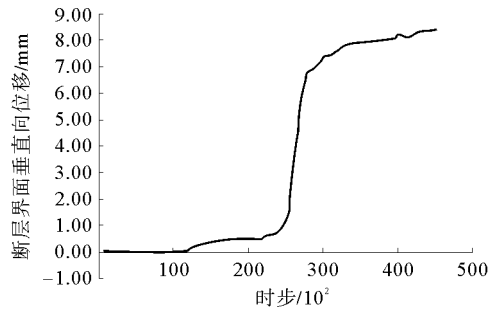


图 5 断层倾角为  $60^\circ$  断层垂直向位移曲线

Fig. 5 Curve of fault vertical displacement when the fault dip angle is  $60^\circ$

从图 2~6 中可以看出,随着断层倾角的增大,断层垂向位移也随之增大。在煤层连续推进过程中,采动致使高集中应力渐趋靠近断层,断层所受剪应力逐渐增大,断层垂向位移缓慢增加,断层开始活化,在距离断层  $50\text{ m}$  时,可看出不同倾角断层垂向位移都出现了不同程度的跳跃式增长。

### 2.2 断层破碎带宽度不同对断层滑移的影响

随着煤层的连续推进,高集中应力逐渐向断层靠近,在支承压力的作用下,断层的上、下盘相互错动,使得断层上、下盘之间形成断开状态,断层滑移量急剧增加,致使断层活化。图 7~9 描述了断层破碎带宽度分

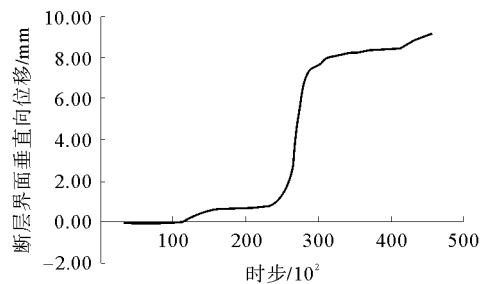


图 6 断层倾角为  $70^\circ$  断层垂直向位移曲线

Fig. 6 Curve of fault vertical displacement when the fault dip angle is  $70^\circ$

别为 4, 6, 8 m 时, 断层界面同一标高处的滑移量随计算时步增加而变化的过程。

图 7~9 给出了不同破碎带宽度断层界面上同一标高处的滑移曲线, 时步构成为:  $0 \sim 7.4 \times 10^3$  为工作面推进距离断层 150 m 时所需计算时步,  $7.4 \times 10^3 \sim 2.22 \times 10^4$  为工作面推进距离断层 100 m 时所需计算时步,  $2.22 \times 10^4$  之后为工作面推进距离断层 50 m 时所需计算时步。从图 7~9 中可以看出, 随着断层破碎带宽度的增大, 断层滑移量也随之增大。

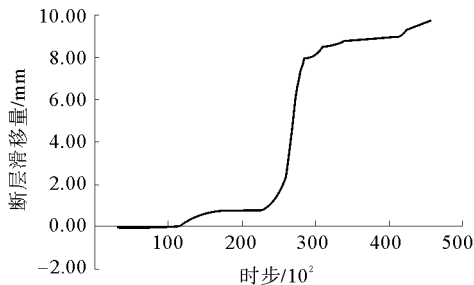


图 7 断层破碎带宽度为 4 m 时断层的滑移曲线图

Fig. 7 Slip curve when the thickness of fault fracture is 4 m

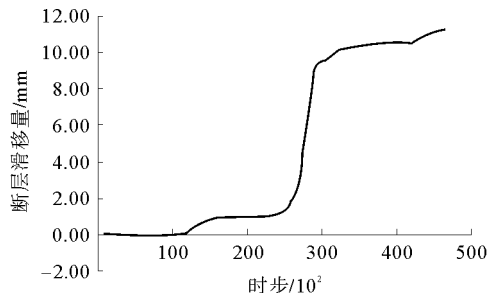


图 8 断层破碎带宽度为 6 m 时断层的滑移曲线图

Fig. 8 Slip curve when the thickness of fault fracture is 6 m

### 2.3 含水层水压不同对断层滑移的影响

图 10~12 描述了含水层水压分别为 2, 3, 4 MPa 时, 断层界面同一标高处的滑移量随计算时步增加而变化的过程。从图 10~12 中可以看出, 随着煤柱宽度的减小, 断层滑移量缓慢增加, 在距离断层 50 m 时, 不同水压含水层断层滑移量都出现了急剧增长, 只是含水层水压越大, 断层滑移量所增长的幅度越大, 因此水压越大, 断层突水危险性就越大。

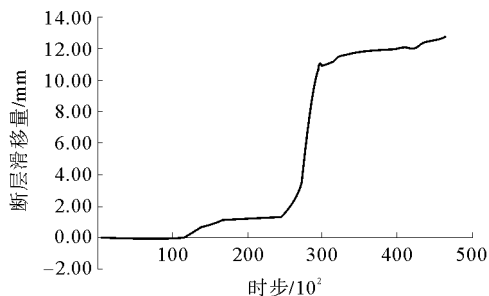


图 9 断层破碎带宽度为 8 m 时断层的滑移曲线图

Fig. 9 Slip curve when the thickness of fault fracture is 8 m

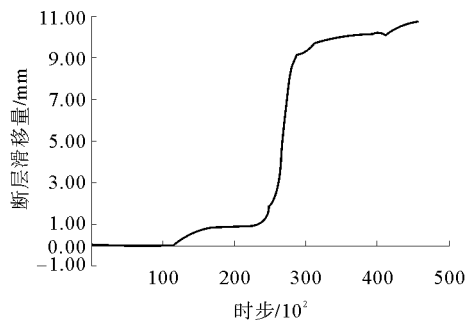


图 10 含水层水压为 2 MPa 时断层的滑移曲线图

Fig. 10 Slip curve when the hydraulic pressure of the aquifer is 2 MPa

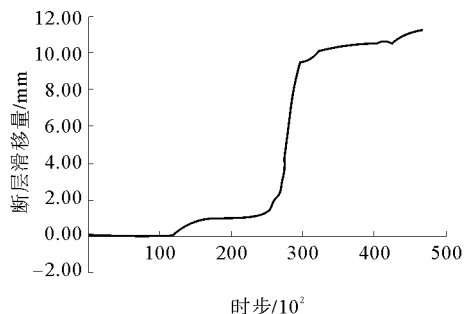


图 11 含水层水压为 3 MPa 时断层的滑移曲线图

Fig. 11 Slip curve when the hydraulic pressure of the aquifer is 3 MPa

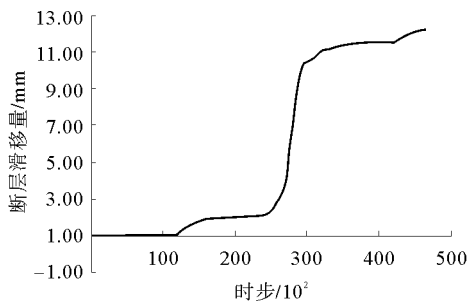


图 12 含水层水压为 4 MPa 时断层的滑移曲线图

Fig. 12 Slip curve when the hydraulic pressure of the aquifer is 4 MPa

### 3 结论

利用三维有限差分数值软件 FLAC<sup>3D</sup>,采用固液耦合计算模式,对具体地质条件下采动诱发断层两盘滑移规律进行了数值模拟研究,得出如下结论:

1)在相同工况及工作面推进相同步距时,由于断层上、下盘界面所受的正应力随断层倾角增加而减少,而断层上、下盘所受的剪应力随断层倾角增加而增加,断层界面同一标高处的垂直向滑移量随之增大。

2)断层界面同一标高处的垂直向滑移量随着断层破碎带宽度增大而增加;断层界面垂向滑移量与含水层水压的关系与其与断层破碎带宽度的关系一致,含水层水压越大,断层滑移量越大,断层活化程度也越剧烈,断层突水危险性更大。

#### 参考文献:

- [1]李志华,窦林名,陆菜平,等.断层冲击相似模拟微震信号频谱分析[J].山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(4):51-56.  
Li Zhihua, Dou Linming, Lu Caiping, et al. Frequency spectrum analysis on micro-seismic signal of similar simulation test of fault rock burst[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4): 51-56.
- [2]卜万奎,茅献彪.断层倾角对断层活化及底板突水的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):386-394.  
Bu Wankui, Mao Xianbiao. Research on effect of fault dip on fault activation and water inrush of coal floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 386-394.
- [3]刘志军,胡耀青.承压水上采煤断层突水的固液耦合研究[J].煤炭学报,2007,32(10):1046-1050.  
Liu Zhijun, Hu Yaoqing. Solid-liquid coupling study on water inrush through faults in coal mining above confined aquifer[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(10): 1046-1050.
- [4]黎良杰,钱鸣高,李树刚.断层突水机理分析[J].煤炭学报,1996,21(2):119-123.  
Li Liangjie, Qian Minggao, Li Shugang. Mechanical of water-inrush through fault[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 119-123.
- [5]李凯,茅献彪,陈龙,等.采动对承压底板断层活化及突水危险性的影响分析[J].力学季刊,2011,32(2):261-268.  
Li Kai, Mao Xianbiao, Chen Long, et al. Research on fault activation and risk analysis of water inrush in mining floor above confined aquifer[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(2): 261-268.
- [6]卢兴利,尤春安,孙锋,等.断层保护煤柱合理留设的数值模拟分析[J].岩土力学,2006,27(增):239-242.  
Lu Xingli, You Chunan, Sun Feng, et al. Numerical simulation of rational protective pillar of fault[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S): 239-242.
- [7]李志华,窦林名,陈国祥,等.采动影响下断层冲击矿压危险性研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(4):490-495.  
Li Zhihua, Dou Linming, Chen Guoxiang, et al. The risk of fault induced rockburst during mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(4): 490-495.
- [8]尹会永,魏久传,李子林,等.潘西煤矿断裂构造突水机制探讨[J].山东科技大学学报:自然科学版,2007,26(1):30-33.  
Yin Huiyong, Wei Jiuchuan, Li Zilin, et al. Analysis on water inrush mechanism in fracture tectonics of Panxi coalmine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 26(1): 30-33.

(责任编辑:吕海亮)