

# 断层煤柱尺寸对地表建筑物影响分析

马志涛, 张云月, 张梦寒, 徐汉文

(山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 由于王楼煤矿二采区受多断层影响, 采区上方又有一个村庄, 为最大限度地回收资源和降低对上部建筑物的损坏, 通过岩体宏观结构调查分析及相关实验研究提供的岩石力学成果, 综合确定岩体力学参数; 考虑到尺寸效应和地质构造面的影响, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟开采过程中预留不同尺寸断层保护煤柱, 研究地表沉陷及地表建筑物的损坏情况。模拟结果表明: 随着保护煤柱宽度的增加, 地表水平、倾斜变形和曲率都逐渐减小, 建筑物的损坏程度也逐渐降低。断层保护煤柱为 25 m 时, 地表水平变形为 2.8 mm/m, 倾斜变形为 1.9 mm/m, 曲率为  $0.18 \times 10^{-3}$  /m, 符合我国砖混结构建筑物的损坏等级评判标准, 能有效避免地面建筑物的损坏。

**关键词:** 地表沉陷; 地表建筑物; 断层煤柱; 数值模拟

中图分类号: TD822.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)02-0044-06

## Damage Analysis of Fault Pillars of Different Sizes to Surface Buildings

MA Zhitao, ZHANG Yunyue, ZHANG Menghan, XU Hanwen

(College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Due to the influence of multi-faults and the village above the 2<sup>nd</sup> panel of Wanglou Mine, the parameters of rock mass mechanics were determined by investigating rock structure and studying rock mechanics results provided by relevant experimental researches, for the purpose of reclaiming resources and reducing the damage to the surface buildings to the utmost extent. Considering the influence of size effect and geological structural plane, the surface subsidence and damage of fault pillars of different sizes to surface buildings were studied based on the simulation of varisized protective pillar of fault in mining process with FLAC<sup>3D</sup>. The results show that the horizontal deformation, tilt deformation, curvature and the damage to buildings are gradually reduced with the increase of coal pillar's widths. When the fault pillar is 25 m wide, the horizontal deformation, tilt deformation and curvature are 2.8 mm/m, 1.9 mm/m and  $0.18 \times 10^{-3}$  /m respectively, which can effectively avoid the damage to the surface buildings.

**Key words:** surface subsidence; surface buildings; faults pillar; numerical simulation

采动沉陷过程中, 断层不仅能改变地表沉陷的影响范围, 而且能使地表变形增大<sup>[1]</sup>。为减小断层对地表沉陷的影响、降低对地表建筑物的损害影响, 必须留设合理的煤柱。现有沉陷理论(如概率积分法)基本上都以均匀连续介质假设作为理论前提, 给断层区地表沉陷预测和断层保护煤柱的留设工作造成了困难<sup>[2]</sup>。专家学者对断层保护煤柱留设做过一些研究, 王临清等<sup>[3]</sup>根据保护煤柱留设角计算保护煤柱范围; 赵华安等<sup>[4]</sup>根据应力场、位移场和塑性区演化规律, 提出合理的断层煤柱留设尺寸。但是关于断层煤柱尺寸对地表建筑物影响的研究则很少。

确定煤柱尺寸的传统方法有理论计算、相似材料模拟实验等。随着计算机技术的发展, 数值模拟方法在国内外得到广泛应用。相比传统方法, 数值模拟是建立在客观反映地质构造原型和模拟煤层开采过程力学

收稿日期: 2015-09-04

作者简介: 马志涛(1974—), 男, 山东烟台人, 副教授, 博士, 主要从事矿山岩石力学、岩层破坏及稳定性控制等方面的教学及科研工作。E-mail: mzt123@sina.com

效应的基础上,弥补了经典沉陷理论的一些缺点<sup>[5]</sup>。张培森等<sup>[6]</sup>利用 FLAC 对断层界面滑移量的变化规律进行分析,得到断层界面垂向滑移量随断层倾角增大而增加;李伟等<sup>[7]</sup>通过模拟围岩的塑性破坏情况,确定煤柱合理尺寸。需要指出,模型越能客观反映地质条件,就越能准确预计开采引起的地表变形与移动,所以在进行数值模拟之前,对地质构造原型的了解、研究和合理的简化是非常重要的。本研究基于 FLAC<sup>3D</sup> 软件,以王楼煤矿为例,分析预留不同尺寸断层保护煤柱情况下地表建筑物的损坏情况,从而确定断层保护煤柱的合理尺寸。该模拟结果为断层煤柱的留设提供了理论依据,有利于更好地保护地面建筑物。

### 1 地质背景及数值计算模型的建立

王楼煤矿二采区的可采煤层倾角为 0°~10°,平均采深 279 m,煤层平均厚度 3.1 m。区内西南厚东北薄,属河流及湖相沉积地层。表土层以粘土为主,厚度为 60 m,其他各岩层主要以粉砂岩、细砂岩、中砂岩等为主。王楼井田以近南北向断层为主,褶曲构造不发育,在南部和北部也发育有近东西向断层,区内以断裂构造为主,近南北向断层伴有附生断层。本区的西南部靠边界断层附近构造偏复杂,其余地段偏简单。研究区域主要受 3 条断层影响,断层张开距离很小,倾角 50°~65°。其中 F12 断层落差为 20 m, XF40 断层落差为 42 m, XF43 断层落差为 38 m。以该区域作为研究对象,建立区域二维平面模型,如图 1。并根据工程地质 FLAC 对断层的处理方法,采用 *interface* 命令进行编制,建立区域三维数值计算模型。模型的几何外形尺寸为 1 300 m×1 000 m×400 m,共划分 83 840 个六面体单元。此次模拟参数距地表深度不大,仅考虑自重应力场。表面边界移动量较大,定义为自由边界,不予约束,底面边界移动小得多,定义为全约束边界,左右边界施加单约束边界。

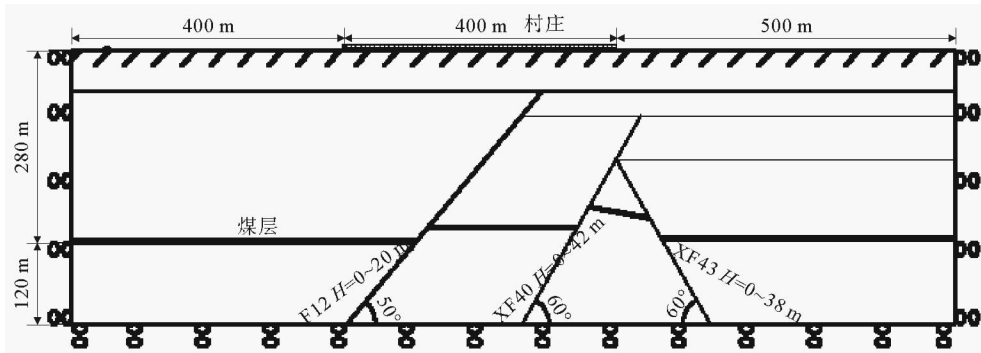


图 1 二维平面模型(F12, XF40, XF43 为断层)

Fig. 1 Two-dimensional plane model(F12, XF40 and XF43 denote faults)

### 2 数值计算参数的选取

根据研究区域地质条件和相关实验研究提供的岩石力学成果<sup>[3-8]</sup>,综合尺寸效应和地质构造面的影响,对实验所得参数进行相应调整和简化,数值模拟物理力学参数的选取依据表土层、煤和岩石和断层进行分类。

#### 1) 表土层物理力学参数选取

表土层是塑性较强的弹塑性地质材料,可产生较大的塑性流动。因此本研究对表土计算采用莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则。表土层的物理力学参数如表 1。

表 1 表土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soils

岩类	容重/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
砂质粘土	2 000	20	0.30	0.05	0.126	15
粘土	1 870	15	0.29	0.12	0.155	24
砂砾	2 230	25	0.30	0.01	0.105	30

2) 岩石与煤层物理力学参数选取

大量岩石力学实验证实<sup>[8]</sup>, 岩石破坏后强度有所降低, 产生强度弱化现象, 虎克-布朗(Hoek-Brown)强度准则能较为准确地反映岩石这一力学特性。故本次模拟对岩石和煤采用 Hoek-Brown 强度准则, 其岩体强度公式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{mR_c\sigma_3 + sR_c^2} \quad (1)$$

其中:  $\sigma_1, \sigma_3$  分别是岩体破坏时的最大和最小主应力;  $R_c$  为完整岩石的单轴抗压强度;  $m, s$  表示岩体质量的两个无量纲常数。岩石与煤物理力学参数见表 2。

表 2 岩石与煤物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of rock and coal

岩层类别	容重 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	单轴抗压强度 $R_c/\text{MPa}$	破裂的岩性 参数 $m_b$	断裂程度 参数 $s$	分线性程度 参数 $a$
泥岩、粉砂岩	2 480	3 500	0.22	70	5.0	0.040	0.5
粗砂岩	2 492	11 000	0.21	75	7.0	0.070	0.5
中砂岩	2 510	10 500	0.20	80	7.0	0.070	0.5
细砂岩	2 610	10 000	0.19	85	7.0	0.070	0.5
泥岩	2 590	4 500	0.20	70	4.5	0.050	0.5
砂质泥岩	2 660	3 000	0.19	75	5.0	0.080	0.5
煤	1 500	1 000	0.36	8	1.0	0.004	0.5
粉砂岩	2 710	4 100	0.17	66	6.0	0.080	0.5

3) 断层物理力学参数选取

在采动影响下, 断层将在很大程度上影响岩层移动规律, 断层物理力学参数见表 3。

表 3 断层物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of faults

断层名称	法向刚度/(MPa/m)	切向刚度/(MPa/m)	摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
F12	2 500	1 000	25	0.3	0.000 1
XF40	1 500	600	22	0.3	0.000 1
XF43	1 500	600	22	0.3	0.000 1

3 地面建筑物损坏等级评判标准

1) 建筑物的损坏评判标准

地面建筑物的损坏是地表变形传递给建筑物而引起的。在采动过程中, 地表产生下沉、倾斜、水平移动和变形, 建筑物则随之产生类似的变形。根据对我国建筑物下采矿的实际观测资料分析研究<sup>[9]</sup>, 对于一般砖石结构的建筑物, 地表所允许的最大变形及曲率定义为: 地表倾斜  $i = 3 \text{ mm}/\text{m}$ , 水平变形  $\epsilon = 2 \text{ mm}/\text{m}$ , 曲率  $K = 0.2 \times 10^{-3}/\text{m}$ 。

2) 位移与变形的关系

我国评判建筑物破坏等级的标准是地表倾斜和水平变形值的大小, 模拟计算结果是地表移动量, 应将模拟计算得到的位移值进行一定计算。倾斜变形为下沉对  $x$  的一阶导数, 曲率为下沉对  $x$  的二阶导数, 水平变形为水平移动对  $x$  的一阶导数, 设  $A, B$  表示开采前、后地面上的两点, 在开采后地表形成了下沉盆地,  $A$  变

到 A 点, B 变到 B' 点, 单元出现变形形态<sup>[10]</sup>, 如图 2。则其单位长度内倾斜变形为:

$$i_{AB}(x) = \frac{\partial W}{\partial x} = \left| \frac{W_B - W_A}{X_B - X_A} \right| = \left| \frac{\Delta W}{\Delta x} \right| \quad (2)$$

其中:  $W_A, W_B$  分别表示 A、B 两点地表移动的垂直分量;  $X_A, X_B$  分别表示 A、B 两点间的水平距离。

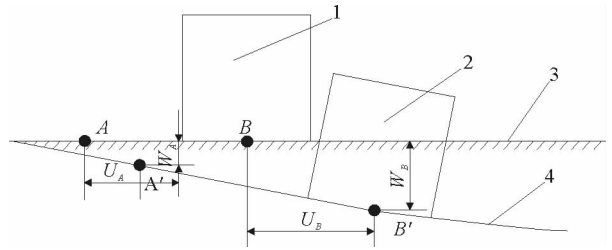
曲率的计算公式为:

$$K = \frac{\partial i(x)}{\partial x} = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = \left| \frac{\Delta W_1 - \Delta W_2}{\Delta x_1 - \Delta x_2} \right| \quad (3)$$

单位长度内水平变形为:

$$\epsilon_{AB}(x) = \frac{\partial(U)}{\partial(x)} = \left| \frac{U_B - U_A}{X_B - X_A} \right| = \left| \frac{\Delta U}{\Delta x} \right| \quad (4)$$

其中:  $U_A, U_B$  分别表示 A、B 两点地表移动的水平分量;  $X_A, X_B$  分别表示 A、B 两点间的水平距离。



1—开采前建筑物; 2—开采后建筑物; 3—地表; 4—下沉盆地

图 2 开采前后地表及建筑物的变形

Fig. 2 Deformation of surface and buildings after extraction

#### 4 数值模拟计算结果分析

根据建立的数值计算模型, 运算达到平衡状态, 然后模拟煤层开挖使其收敛, 采空区位于区域  $X=100 \sim 1\ 200\text{ m}, Y=100 \sim 900\text{ m}$ 。根据 FLAC<sup>3D</sup> 的计算结果, 得到煤层开采后地表下沉云图(图 3)。将计算结果运用 SURFER 绘制地表移动变形等值线, 得到煤层开采后地表下沉等值线图(图 4)。

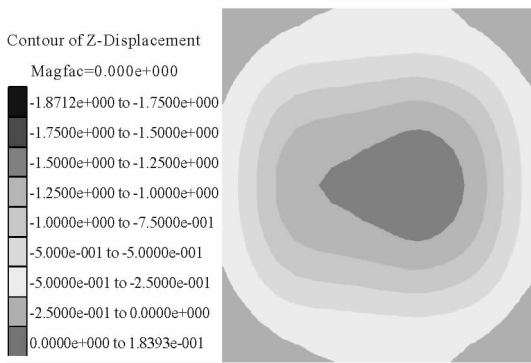


图 3 煤层开采后地表下沉云图

Fig. 3 Surface subsidence after extraction of coal

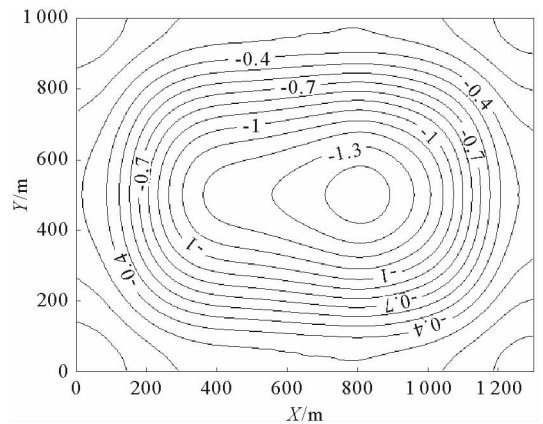


图 4 煤层开采后地表下沉等值线图

Fig. 4 Surface subsidence contour after extraction of coal

由模拟结果可知, 地下煤层的采出, 导致地表出现下沉, 形成一个沉陷区(地表移动盆地), 地表下沉中心位置偏离开采区域中心的上方。经过监测点数据的提取, 得到地表最大下沉量为 1.64 m。

本研究对在断层两侧分别留设 15, 20, 25, 30 和 35 m 煤柱进行数值模拟。分析不同煤柱尺寸下地表的变形, 得到不同尺寸保护煤柱下地表变形曲线图, 如图 5 所示。并制成地表最大沉降值及村庄内监测点的变形值表(表 4)。

由图 5 可见, 随着保护煤柱宽度的增加, 地表水平、倾斜变形和曲率都逐渐减小, 当保护煤柱为 15 m 时, 最大下沉值为 1.48 m, 保护煤柱从 15 m 增大到 35 m, 地表最大沉降值逐渐减小, 当保护煤柱为 35 m 时, 最大下沉值为 0.81 m, 地表下沉中心位置向两侧移动, 最后出现了两个下沉盆地。模拟表明: 当断层保护煤柱

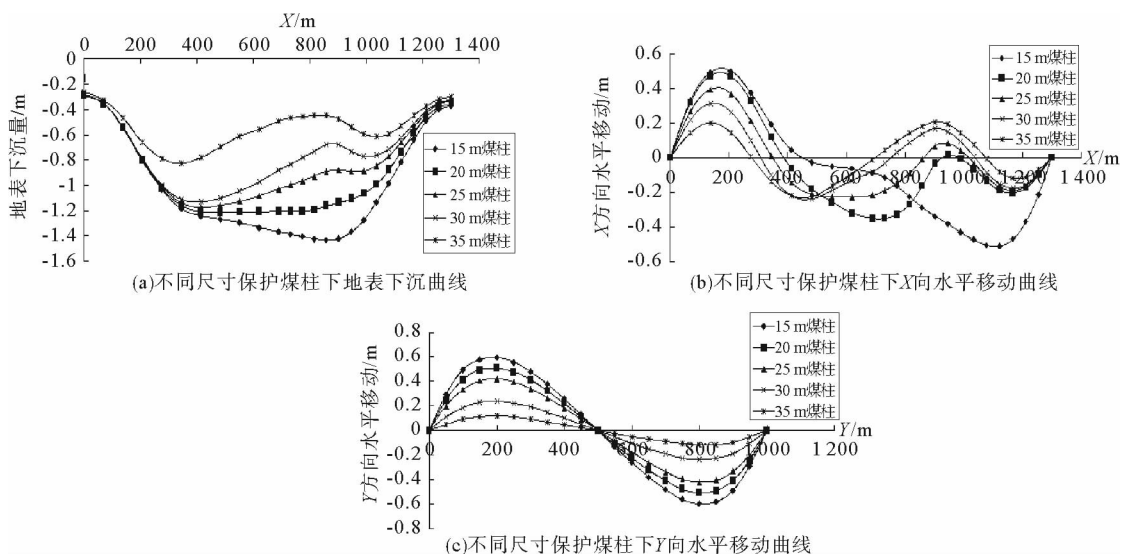


图 5 不同尺寸保护煤柱下地表变形曲线图

Fig. 5 Deformation of surface under different sizes of fault pillar

表 4 地表最大沉降值及监测点的变形值

Tab. 4 Maximum settlement and deformation of surface

预留煤柱尺寸/m	地表最大沉降值/m	X 方向最大水平位移/m	Y 方向最大水平位移/m	倾斜变形/(mm/m)	水平变形/(mm/m)	曲率/( $10^{-3}/m$ )	是否符合标准
15	1.48	0.52	0.58	5.7	2.8	0.39	否
20	1.29	0.48	0.50	3.4	2.2	0.26	否
25	1.02	0.39	0.42	2.8	1.9	0.18	是
30	0.81	0.26	0.24	2.2	1.6	0.14	是
35	0.76	0.22	0.12	1.9	1.2	0.12	是

为 25 m 时,水平变形、倾斜变形和曲率分别为 2.8 mm/m、1.9 mm/m 和  $0.18 \times 10^{-3}/m$ ,均符合砖混结构建筑物的损坏等级评判标准,能有效保护地面建筑物。图 6 给出了保护煤柱为 25 m 时的地表下沉等值线图,可见地表出现了两个下沉盆地,其中左侧盆地最大沉降值为 1.02 m,右侧盆地最大沉降值为 0.81 m。

二采区工作面开采后,对引起的地表下沉和建筑物房屋受损进行现场观测,得到左侧下沉盆地 1.12 m,右侧下沉盆地为 0.88 mm。区内大部分建筑物裂缝宽度不超过 4 mm,多条裂缝的总宽度也不超过 10 mm。所以看作 I 级损坏,不进行维修或者进行简单维修后仍然可以居住使用。初步证实了数值模拟预计方法的正确性。

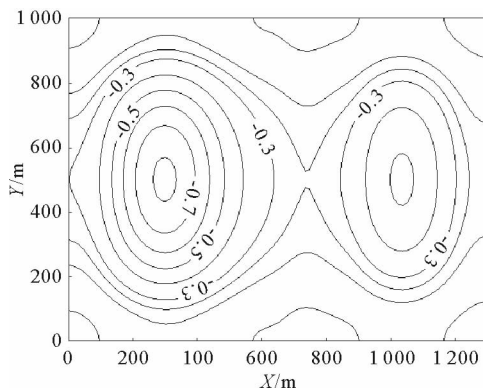


图 6 煤柱为 25 m 地表下沉等值线图

Fig. 6 Contour of surface subsidence while the coal pillar is 25 m

## 5 结论

1) 由于断层的存在,地表下沉盆地的中心位置即最大位置并不在开采的中心区域,而是发生了偏移。当采区断层较多时这种影响更加复杂,二采区地表下沉盆地的中心位置随保护煤柱尺寸的增加向远离断层的方向偏移,最后出现了两个下沉盆地。

2) 随着保护煤柱尺寸的增大  $X$  方向水平移动和  $Y$  方向水平移动都逐渐减小,其中沿断层走向方向( $Y$  方向)的减小速度较倾向( $X$  方向)快,在走向方向影响较大。

3) 当开采矿区含有断层时,通过数值模拟研究,能较为准确地通过地表下沉的最大值、水平变形及倾斜变形来确定合理的煤柱尺寸,达到保护地面建筑物的目的。

4) 数值模拟结果比实际观测结果小,因为岩体本身存在着节理裂隙、断层伴有复生断层、采矿爆破振动等影响。目前的岩体力学理论还不能完全解释采矿所带来的地压问题等多种原因,应对采动过程中受影响较大的地表建筑物采取一定的防护措施。

### 参考文献:

- [1] 曹代勇, 吴李泉, 占文锋, 等. 断层应力封闭性的 FLAC 模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(1): 1-3.  
CAO Daiyong, WU Liquan, ZHAN Wenfeng, et al. Application of FLAC in simulation of fault stress seal[J]. Coal Geology and Exploration, 2005, 33(1): 1-3.
- [2] 吕婷婷, 杜荣军. 采煤沉陷与地质不连续界面关系的数值实验研究[J]. 煤, 2011(8): 10-13.  
LÜ Tingting, DU Rongjun. Coal mining subsidence and geological discontinuity of the interface between numerical experiments[J]. Coal, 2011(8): 10-13.
- [3] 王临清, 厉东伟, 吴侃, 等. 煤炭地下开采保护煤柱留设问题研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(11): 18-20.  
WANG Linqing, LI Dongwei, WU Kan, et al. Study on the problem of protecting coal pillar in underground coal mining[J]. Coal Engineering, 2014, 46(11): 18-20.
- [4] 赵华安, 赵光明, 孟祥瑞. 断层影响下合理煤柱尺寸留设数值模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(11): 27-33.  
ZHAO Huaan, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui. Numerical simulation on rational size setting of coal pillar under influence of fault[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(11): 27-33.
- [5] 高明中, 余忠林. 煤矿开采沉陷预测的数值模拟[J]. 安徽理工大学学报, 2003, 23(1): 11-16.  
GAO Mingzhong, YU Zhonglin. Numerical simulation of coal mining subsidence prediction[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 2003, 23(1): 11-16.
- [6] 张培森, 张文全, 王明辉, 等. 固液耦合模式下采动诱发断层两盘滑移规律的模拟分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 53-57.  
ZHANG Peisen, ZHANG Wenquan, WANG Minghui, et al. Numerical simulation of sliding rule of two plates of fault induced by mining under solid-liquid coupling mode[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2014, 33(2): 11-16.
- [7] 李伟, 张广鹏, 刘志达, 等. 断层保护煤柱合理宽度及工作面合理宽度数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(1): 16-19.  
LI Wei, ZHANG Guangpeng, LIU Zhida, et al. Numerical simulation study on rational width of fault protection coal pillar and rational width of working face[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2014, 41(1): 16-19.
- [8] 谢和平, 周宏伟, 王金安, 等. FLAC 在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 397-401.  
XIE Heping, ZHOU Hongwei, WANG Jin'an, et al. Application and comparative analysis of FLAC in coal mining subsidence prediction[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 1999, 18(4): 397-401.
- [9] 余学义, 王鹏, 李星亮. 大采高浅埋煤层开采地表移动变形特征研究[J]. 煤炭工程, 2012(7): 64-67.  
YU Xueyi, WANG Peng, LI Xingliang. Study on surface movement and deformation features of underground mining in shallow seam with high cutting height[J]. Coal Engineering, 2012(7): 64-67.
- [10] 王仲仁, 苑世剑, 胡连喜. 弹性与塑性力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 19-20.