



移动阅读

于秋鸽,张华兴,邓伟男,等. 开采沉陷中不同断层活化模式研究[J]. 煤炭学报,2019,44(9):2777-2786. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1214

YU Qiuge, ZHANG Huaxing, DENG Weinan, et al. Different fault activation models in mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2777-2786. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1214

开采沉陷中不同断层活化模式研究

于秋鸽^{1,2}, 张华兴^{1,2}, 邓伟男^{1,2}, 张玉军^{1,2}, 张刚艳^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013)

摘要:当工作面上覆岩层中含有断层时,地表下沉规律与不含断层时具有显著差别。为了研究开采沉陷中断层活化机理,通过理论推导将开采沉陷中断层活化分为“断层面产生离层空间”、“煤柱压缩”两种断层活化模式并分别利用数值模拟和现场实例进行了验证。研究表明:①采动将造成断层面产生离层空间,离层空间以下沉系数等于1传递给松散层造成断层露头处地表产生台阶下沉,影响断层离层空间的主要因素有工作面推进长度、基岩厚度、保护煤柱宽度、煤层厚度、断层倾角、断层是否含水、断层带岩体内摩擦角及黏聚力等;②断层面离层空间随着工作面推进长度的增加而增加,当工作面推进一定长度时不再变化;断层面离层空间随着基岩厚度的增加而线性增加;断层面离层空间随着保护煤柱宽度增加而减小;断层面离层空间随煤层厚度增加而线性增加;断层面离层空间随断层倾角增大而增加;断层带岩体原生水的存在对断层面离层空间产生具有促进作用;断层面离层空间随断层带岩体黏聚力和内摩擦角的增加而减小;③工作面主要影响角和断层倾角的大小关系控制“断层面产生离层空间”模式断层活化,当断层倾角大于主要影响角并与主要影响角在基岩内相交时,断层将活化;④当断层倾角小于主要影响角时,工作面超前支承压力影响范围控制“煤柱压缩”模式断层活化,当工作面超前支承压力接触断层时,断层将活化。

关键词:开采沉陷;断层活化模式;断层面离层空间;煤柱压缩;主要影响角;超前支承压力

中图分类号:TD325 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2019)09-2777-10

Different fault activation models in mining subsidence

YU Qiuge^{1,2}, ZHANG Huaxing^{1,2}, DENG Weinan^{1,2}, ZHANG Yujun^{1,2}, ZHANG Gangyan^{1,2}

(1. Coal Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: When a fault exists in overburden strata, the laws of surface subsidence caused by mining would be greatly different from that without faults. To study the mechanism of fault activation in mining subsidence, it is divided into two different kinds of model, which are respectively the separation zone along fault plane and the coal pillar compression. At the same time, the two kinds of fault activation model are verified by numerical simulation and field example. The results show that the fault will produce separation space and the space will be transmitted to loose layer with subsidence coefficient equal to 1, which result in step subsidence at outcrop, and the influencing factors are working face advancing length, bedrock thickness, coal pillar width, coal seam height, fault dip, water in fault zone, and rock mass properties including cohesion and internal friction angle. Fault separation space will increase with working face advancing length and the increase will stop when working face advance length reach a limit. At the same time, the fault separation space will increase with bedrock thickness, coal seam height and fault dip angle, while it will decrease when coal pillar width, cohesion and friction angle of fault zone rock mass increases. Simultaneously, the fault activation model of

收稿日期:2018-09-11 修回日期:2018-10-11 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51604151);国家自然科学基金面上资助项目(51874177);天地科技开采设计事业部青年基金资助项目(KJ-2018-TDKCZL-10)

作者简介:于秋鸽(1989—),男,河南信阳人,博士研究生。E-mail:418909128@qq.com

separation space along fault plane is decided by the relationship between fault dip and influence angle and the fault will be activated when the fault angle is larger than influence angle and they intersect in bedrock. When the fault angle is smaller than influence angle, the activation model of coal pillar compression is controlled by advancing abutment pressure and it will be activated when the advancing abutment pressure reaches the fault.

Key words: mining subsidence; fault activation model; fault separation space; coal pillar compression; influence angle; advancing abutment pressure

当工作面上覆岩层存在断层时,地表沉降规律与普通地质条件下的地表沉降规律具有显著不同并引起国内外学者的广泛关注。早在 20 世纪 80 年代初期,美国学者 NELSON W J 就发现当工作面上覆岩层中含有断层时,开采将引起断层活化造成断层露头处产生台阶性裂缝^[1];科瓦尔楔克指出,断层露头处台阶为正常情况下该处位移与岩块滑动位移之和^[2];煤炭科学研究北京开采研究所根据国内外 25 个断层影响下移动台阶位置的实测资料进行回归分析得到断层露头处的台阶落差的大小^[3];郭文兵等根据云盖山煤矿地表沉陷实测资料,研究了断层对开采沉陷的影响,发现地表沉陷范围与断层倾角密切相关并得到相应的概率积分法预计参数与角值参数^[4-5];郭迅和戴君武通过在抚顺矿区实地调研发现多断层影响下,断层间岩体运动呈现“多米诺骨牌”形式,导致地表出现反陡坎^[6]。至于断层存在条件下地表沉降规律为何与普通地质条件下存在差异,张玉卓等认为岩层移动角与断层倾角之间的大小关系对地表沉陷范围起控制作用,当断层倾角大于岩层移动角时,地表沉陷范围将缩小^[7-8];戴华阳利用数值模拟发现断层作为岩体内部弱面存在,对力和能量的传递具有阻断作用而导致地表非连续变形的发生^[9];张华兴和仲惟林认为断层在开采影响下产生了离层体,离层体的存在是影响地表移动变形规律与普通地质条件下存在差异的主要原因^[10];吴侃等也认为开采会造成离层空间,将断层离层空间视为等效采空区根据概率积分法计算了断层影响下的地表移动变形规律^[11]。根据上述文献分析可知,当开采造成断层活化时,断层对采动引起的地表移动变形具有阻断作用,从而引起断层露头处地表台阶下沉的产生,但并不是所有的断层在采动后都会活化,笔者在文献^[10]的基础上,利用理论推导分析了断层面离层空间的存在性及影响因素并将开采沉陷中断层活化模式进行分类。

1 “断层面产生离层空间”模式断层活化

1.1 断层面离层空间存在性分析

煤层开采以后,工作面上覆岩层中不含与含断层时,根据岩层的软弱强度可将工作面上覆岩层可分为

关键层下部软弱岩层、关键层、关键层上部软弱岩层、松散层^[12],如图 1 所示。

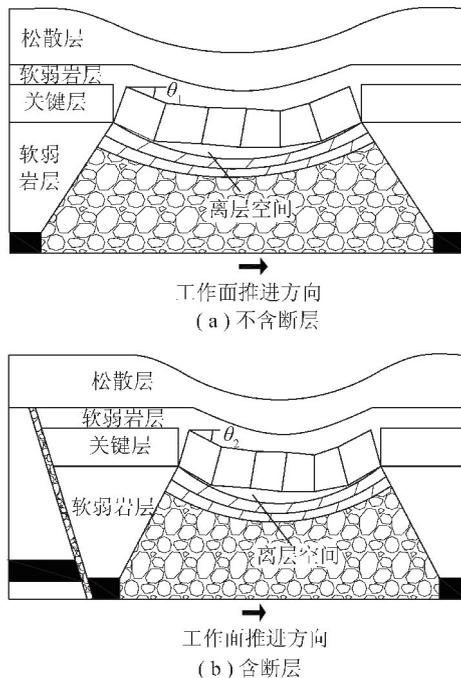


图 1 工作面上覆岩层划分

Fig. 1 Division of overburden strata of working face

对关键层下部软弱岩层受力分析如图 2 所示。图中, α 为断层倾角, Ψ 为顶板垮落角, q_1 为关键层未断裂段对其下部软弱岩层均布载荷, F 为关键层断裂段形成的“砌体梁”结构对关键层下部软弱岩层的集中力。

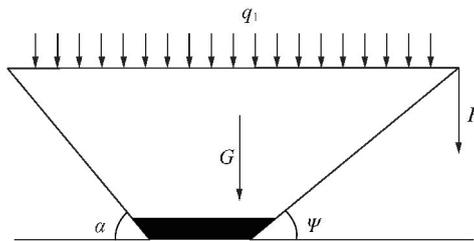


图 2 关键层下部软弱岩层受力分析

Fig. 2 Force analysis of soft stratum under key-strata

由图 2 可知:当断层倾角 $\alpha >$ 岩层跨落角 Ψ 时,在自身重力和上部岩层载荷作用下,关键层下部软弱岩层有向采空区方向倾倒的趋势,由于采空区垮落岩石具有可压缩性,导致关键层下部软弱岩层在断层面

产生离层空间,离层空间来自于采空区垮落岩石的再次压缩。

由于关键层岩体厚度较大,岩性较硬,在上覆岩层重力的作用下将产生弯曲、断裂,相互铰接成“砌体梁”结构^[13]。由于上下盘断层面之间岩体比较破碎,对力和变形的传递具有阻断效应^[14],在不考虑岩层受拉膨胀效应时,关键层弯曲下沉状态如图3所示。

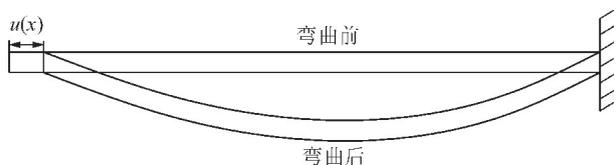


图3 关键层及上部软弱岩层运动状态

Fig. 3 Motion state of key-strata and soft stratum above

由图3可知,关键层在弯曲下沉时将在断层面形成宽度为 $u(x)$ 的离层空间。下面通过关键层形成的“砌体梁”的关键块来分析关键层及其上部岩层在断层面形成的离层空间来源。

当上覆岩层不含断层时,关键层第1次断裂前,关键层两端为“固支”约束,当上覆岩层中含有断层时,关键层初始断裂前,关键层约束变为一端“固支”。工作面上覆岩层不含断层与含有断层时,将关键层视为厚度为 h ,宽度为1的梁,关键层第1次断裂前力学模型如图4所示。

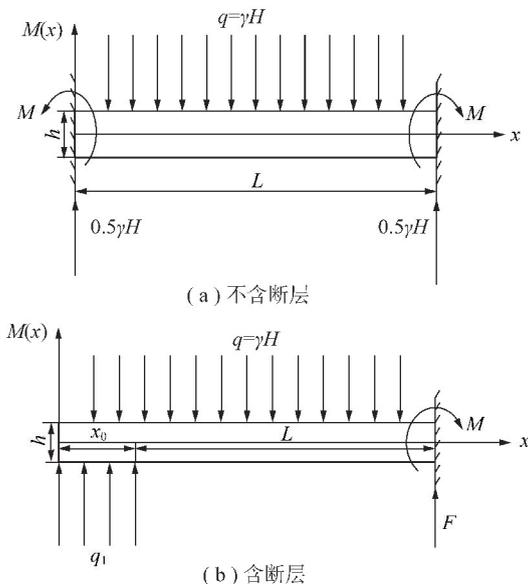


图4 含与不含断层时关键层初次断裂前力学模型

Fig. 4 Mechanical model of key-strata before initial broken when including fault or not

当工作面上覆岩层不含断层时,根据两端固支梁的计算,梁内最大弯矩发生在梁的两端,其最大值^[15]为

$$M_1 = \frac{1}{12}qL^2 \quad (1)$$

式中, q 为梁的上覆载荷,其值为 γH , kN/m^2 ; L 为工作面推进距离, m 。

当工作面上覆岩层含有断层时,梁的最大弯矩在梁的固支端,其最大值^[16]为

$$M_2 = \frac{1}{2}qL^2 + \frac{1}{2}(q - q_1)x_0^2 + \frac{1}{2}(q - q_1)x_0L \quad (2)$$

式中, q_1 为下部岩层对梁的支承力, kN/m^2 ; x_0 为关键层下部岩层对关键层支承宽度, m 。

由于 $q > q_1$,根据式(1),(2)可知 $M_1 < M_2$ 。

由 $\sigma = M_y/I_z$ 可知梁的最大拉应力在不含断层时要小于含断层时,也就是说当梁的抗拉强度极限相等时,不含断层时梁的断裂步距要大于含断层时。

根据文献^[17]可知关键层旋转角度 θ 满足:

$$\theta = \frac{1}{L_1} \left[m - \sum h(k_p - 1) \right] \quad (3)$$

式中, L_1 为关键层初次断裂长度, m ; m 为煤层厚度, m ; $\sum h$ 为关键层下部垮落岩层高度, m ; k_p 为岩层碎胀系数。

由不含断层时的关键层初次断裂步距大于含断层时可知不含断层时关键层旋转角度 $\theta_1 < \theta_2$,则关键层与下部软弱岩层层间空间将减小,即关键层及其上部岩层在断层面的离层空间来自于关键层及软弱岩层之间的离层空间。

综上所述可知,工作面上覆岩层中含有断层时且断层倾角 $\alpha >$ 顶板跨落角 Ψ 时,断层面将形成近似于图5所示的离层空间。

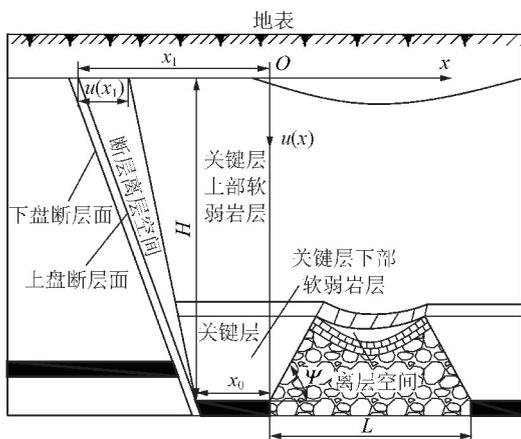


图5 断层面离层空间示意

Fig. 5 Diagram of fault separation space

关键层下部软弱岩层在断层面的离层空间主要来自于采空区垮落岩石的压缩,关键层及其上部岩层在断层面的离层空间主要来自于关键层与下部软弱岩层离层空间的减小。断层面离层空间会以 $q=1$ 传

递给松散层,造成断层露头处地表移动变形偏大。

1.2 断层面离层空间影响因素分析

岩层内部任意点的水平移动可以由开采沉陷学知识求得,从而得到图5中断层面离层空间大小^[18]为

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta V &= \frac{1}{2}u(x_1)H \\ u(x_1) &= bw_0 \exp\left(-\pi \frac{x_1^2}{r^2}\right) - bw_0 \exp\left[-\pi \frac{(x_1 - L)^2}{r^2}\right] \\ x_1 &= \frac{H}{\tan \alpha} + x_0 \\ r &= \frac{H}{\tan \beta} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中, x_1 为断层露头距离开切眼的距离,m; x_0 为保护煤柱宽度,m; L 为工作面推进长度,m; H 为基岩厚度,m; b 为水平移动系数,取0.3; w_0 为不含断层时地

表最大下沉值,其值为 mq ;主要影响角 β , $\tan \beta$ 一般取2.0, $\beta=64^\circ$; α 为断层倾角, $(^\circ)$ 。

由式(4)可知,影响断层离层空间的主要因素有:工作面推进长度 L ;基岩厚度 H ;保护煤柱宽度 x_0 ;煤层厚度 m ;断层倾角 α 等。以上因素与断层离层空间的关系如图6所示。

由图6可知:断层面离层空间随着工作面推进长度的增加而增加,当工作面推进一定长度时不再变化,这是因为工作面距离断层较近时,随着工作面推进长度增大,采动对断层扰动越大,当工作面推进一定长度后,工作面位置距离断层较远,对断层不再产生影响;断层面离层空间随着基岩厚度的增加而线性增加,这是因为基岩厚度越大,根据 $r=H/\tan \beta$ 可知开采造成的覆岩移动变形范围越大,而断层对覆岩变形传递具有阻断作用,覆岩在断层以外的移动变形将以断层面离层空间的形式出现;断层面离层空间随着

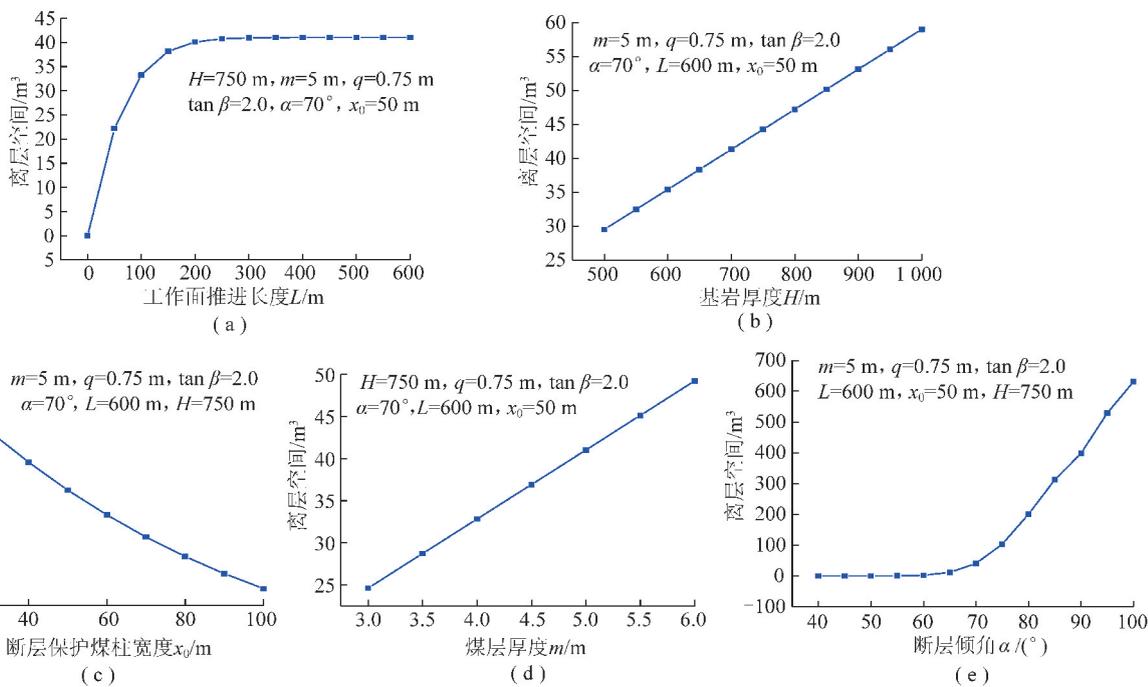


图6 断层离层空间与各种因素之间关系

Fig. 6 Relationship between fault separation space and different factors

保护煤柱宽度增加而减小,这是因为断层保护煤柱宽度越大,开采对断层的影响越小;断层面离层空间随煤层厚度增加而线性增加,这是因为煤层厚度越大,覆岩移动变形越剧烈,开采对断层的扰动越大;断层面离层空间随断层倾角增大而增加,当断层倾角 $<64^\circ$ 时,断层面离层空间几乎为0,当煤层倾角 $>64^\circ$ 时,断层面离层空间将会随着断层倾角增大而急剧增加,这是因为主要影响角 $\beta=64^\circ$,地表移动变形主要集中在主要影响角范围内,当断层倾角大于主要影响

角时将导致断层活化而在断层面产生离层空间,这也说明主要影响角与断层倾角的大小关系对断层面离层空间产生起控制作用,从而对地表移动变形规律起控制作用,由于主要影响角不易确定,并且主要影响角与岩层移动角在数值上相近,在实际生产过程中可用岩层移动角代替主要影响角进行断层面是否产生离层空间的判断,这也是文献[7]通过总结大量断层影响下的地表沉陷规律得到移动角对地表沉陷范围起控制作用的主要原因。

1.3 断层带岩体性质对离层空间影响分析

根据文献[14]可知,断层在开采沉陷中主要起到弱面的作用,对开采造成的覆岩应力和能量传递具有阻断作用,但实际地质条件下的断层都是以一定宽度断层带的形式出现^[19]。断层带岩体性质不同也会对断层面离层空间产生一定的影响。下面通过FLAC^{3D}数值模拟来研究断层带岩体黏聚力、内摩擦角以及断层带岩体是否含水对“断层面产生离层空间”模式断层活化的影响。

本文建立数值模型的工作面走向长600 m,倾向长100 m,煤层平均厚度5 m,平均埋深525 m,煤层倾向0°,松散层厚度20 m。在工作面西北部揭露正断层,断层落差10 m,倾角70°,断层带宽度5.6 m。断层走向近似与工作面倾向平行,留设断层保护煤柱50 m,工作面近似垂直于断层走向推进。断层与工作面的相对位置关系如图7所示。

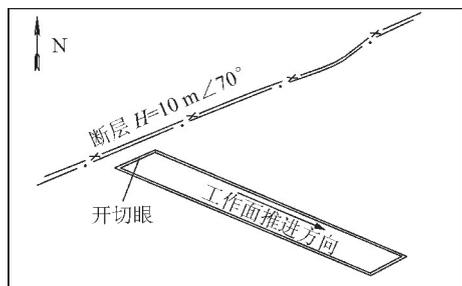


图7 断层与工作面相对位置关系

Fig. 7 Relative position between fault and working face

根据工作面附近钻孔资料,工作面上覆岩层及实测岩性参数见表1。

建立模型大小为1 328.98 m×300 m×625 m(长×宽×高),考虑到沉陷影响范围,模型四周各留设一定宽度的保护煤柱,模型除了上边界外全部采用固定约束,建立三维地质模型如图8所示。

表1 工作面上覆岩层及其岩性其参数

Table 1 Parameters of the overburden strata above working face

岩性	厚度/m	内摩擦角/(°)	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
松散层	20.0	15	0.003 8	0.008 3	0.30	0.002
砂质泥岩	200.0	42	3.500 0	3.560 0	1.70	2.00 0
泥岩	150.0	43	6.610 0	8.890 0	11.23	4.530
粉砂岩	100.0	43	4.300 0	4.580 0	6.82	2.350
中细砂岩	50.0	44	0.860 0	0.810 0	2.60	1.200
煤层	5.0	20	0.130 0	0.260 0	0.70	0.900
底板细砂岩	100.0	39	6.550 0	8.390 0	7.59	1.900
断层带	5.6	15	0.003 8	0.008 3	0.30	0.002

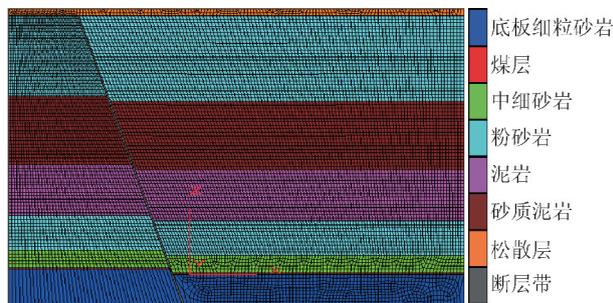


图8 工作面三维地质模型

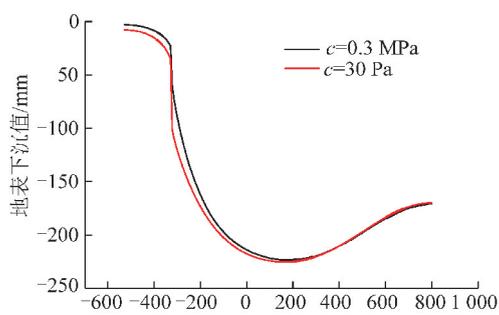
Fig. 8 Three-dimensional geological model of working face

为了研究断层带岩体黏聚力和内摩擦角对断层面离层空间的影响,分别取断层带岩体黏聚力为0.3 MPa,30 Pa;断层带岩体内摩擦角为15°,5°,得到不同断层带岩体黏聚力和内摩擦角时地表下沉值如图9所示。由图9可知:当断层带岩体黏聚力和内摩擦角减小时,地表在断层露头处的台阶下沉更大,而地表在断层露头处的台阶下沉主要来自于断层面离

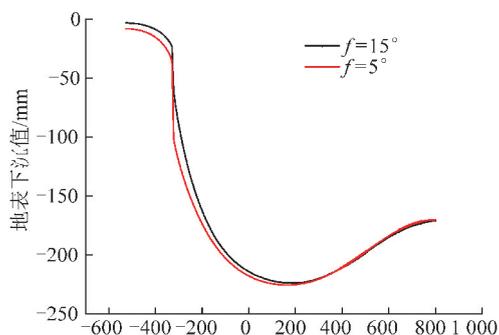
层空间以 $q=1$ 传递给松散层,这也说明断层带岩体黏聚力和内摩擦角越小,断层面离层空间越大,这是因为断层带岩体越软弱,断层带岩体越易滑动^[20]。

为了研究断层带岩体含水情况对断层面离层空间的影响,在图8所示的断层带岩体中注水,分别取断层带岩体和其余层状岩体的渗透率为 1.02×10^{-10} , $1.02 \times 10^{-12} \text{ m}^2$;水的密度为 1 kg/m^3 ;水的体积模量为 0.1 GPa ^[21],采用固液耦合模式分析水的存在对断层面离层空间的影响得到在断层带岩体不含水和含水条件下的地表下沉值如图10所示。

由图10可知,当断层带岩体含水时,地表在断层露头处的台阶下沉更大,这说明当断层带岩体含水时,开采造成的断层面离层空间更大。这是因为水的存在降低了断层两壁间的摩擦阻力、断层面的抗剪强度和断层带岩体的变形模量和剪切模量,同时水在重力的作用下还会产生一定的压力,对断层面离层空间具有扩容作用^[22]。



(a) 不同黏聚力



(b) 不同内摩擦角

图9 不同断层带岩体黏聚力和内摩擦角时地表下沉曲线

Fig. 9 Surface subsidence curves according to different cohesions and friction angles of fault zone rock

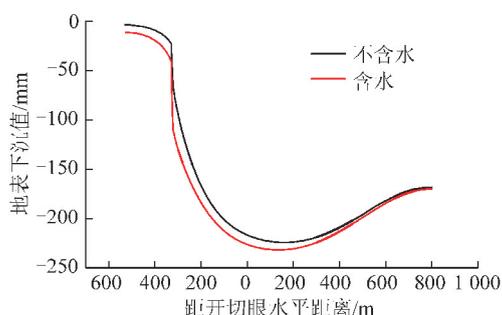


图10 断层带岩体不同含水情况下的地表下沉曲线

Fig. 10 Surface subsidence curves on conditions of water being existing or not

由上文分析可知,当断层倾角大于主要影响角并且断层面与主要影响角在基岩内相交时,开采将造成断层面产生离层空间而使断层活化。根据 Anderson 断层模型,正逆断层形成的力学机制不同,正断层在形成过程中最大主应力为垂直应力,而逆断层在形成过程中最大主应力为水平应力,最大主应力方向的不同会影响覆岩破断垮落状态,从而导致正逆断层煤层开采时的顶板移动变形范围不同,也即是正逆断层煤层开采时主要影响角不同^[23]。假设正断层煤层开采的主要影响角为 β_1 ,逆断层煤层开采的主要影响角为 β_2 ,正逆断层活化如图 11 所示。

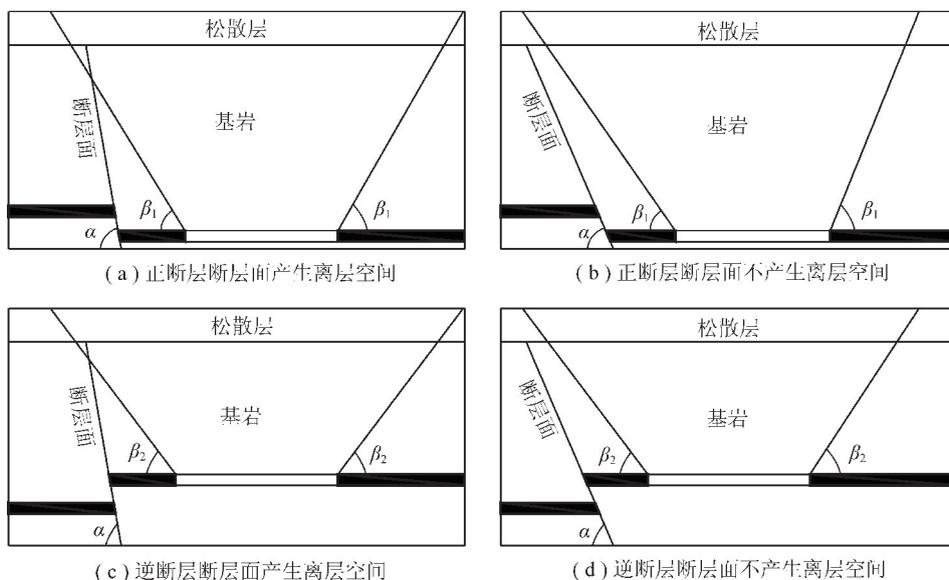


图 11 断层倾角与主要影响角之间关系对断层活化影响

Fig. 11 Effect of relationship between the fault dip and the main influence angle on the fault activation

当断层倾角小于主要影响角时,如图 11(b),(d)所示。无论工作面如何靠近断层,开采沉陷范围都无法影响到断层,但是这并不代表断层不活化,这是因为当煤层开采时,打破了上覆岩层的平衡状态而引起工作面超前支承压力的产生,下面引入开采沉陷学中另一种断层活化模式。

2 “煤柱压缩”模式断层活化

对于小倾角断层,煤层开采主要影响角不会与断层面在基岩内相交,但是煤层开采后会在工作面前方形成大于原岩应力的超前支承压力的^[24],如图 12 所示。

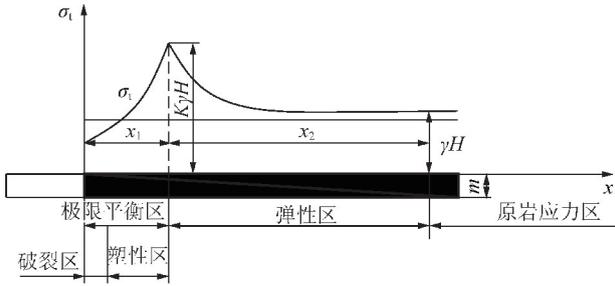


图12 工作面超前支承压力的分布

Fig. 12 Distribution of advance abutment pressure

在工作面超前支承压力的作用下,处于极限平衡区和弹性区的工作面前方煤体将会压缩,尤其是当工作面上覆岩层中含有断层时,由于断层对力和能量传递具有阻断作用而导致工作面超前支承压力的更大,煤柱压缩量更大,相当于增加了一部分开采空间。当工作面超前支承压力的接触断层时,势必导致断层活化。由于煤柱压缩量相对较小,“断层面产生离层空间”模式断层活化造成断层露头处的地表移动变形值将大于“煤柱压缩”模式断层活化。

3 数值模拟验证

3.1 “断层面产生离层空间”模式断层活化模拟验证

由图6可知,断层倾角对断层面离层空间的影响较大。本文利用FLAC^{3D}数值模拟,以断层倾角为例来说明断层倾角对“断层面产生离层空间”模式断层活化的影响。根据1.3节中断层与工作面的相对位置关系和覆岩条件建立数值模型,断层倾角分别采用50°,60°,70°,80°,模型除了上边界外全部采用固定约束。由于断层带岩体多为砂砾岩、角砾岩等粒状岩石在胶结而成,断层带岩体破坏准则选择应变软化准则,其余层状岩体破坏选择Mohr-coulomb准则,断层带岩体累积塑性应变与对应的岩体黏聚力和内摩擦角见表2^[25]。

表2 断层带岩体不同塑性累积应变对应的岩体黏聚力和内摩擦角

Table 2 Cohesions and friction angles of fault zone rock according to different accumulated plastic strains

参数	累积塑性应变				
	0	1×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-4}	1
黏聚力/MPa	1.1	0.9	0.7	0.5	0.3
内摩擦角/(°)	35	30	25	20	15

在煤层开挖结束后,监测地表下沉值得到不同断层倾角时的地表下沉值如图13所示。

由图13可知:断层倾角越大,地表在断层露头处

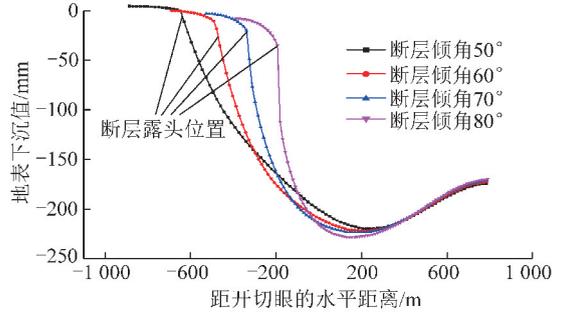


图13 不同断层倾角条件下地表下沉曲线

Fig. 13 Surface subsidence curve of different fault angles

的台阶落差越大,断层露头的台阶落差主要是由于断层面离层空间传递给松散层造成的,这可以说明断层倾角越大,断层面离层空间越大。同时,由图11可以看出,断层露头处台阶落差开始急剧增长时的断层倾角在60°~70°,与图6(e)中断层面离层空间开始急剧增加时的断层倾角范围一致,验证了主要影响角与断层倾角大小关系对断层面离层空间起控制作用的正确性,也说明当主要影响角与断层面在基岩内相交时,煤层开采将造成断层面产生离层空间而引起断层活化。

当断层倾角 $\alpha \leq 60^\circ <$ 主要影响角 β 时,断层不会发生活化,此时断层倾角为50°,60°的地表下沉曲线应该一致。但是由图13可以看出,相对于断层倾角为50°,断层倾角为60°时的地表下沉曲线在断层露头处更陡,这是因为此时的断层保护煤柱为50m,小于超前支承压力的影响范围而引起“煤柱压缩”模式断层活化导致的。由图13中断层露头处的台阶落差变化的急剧程度还可知,“断层面产生离层空间”模式断层活化造成地表在断层露头处的移动变形值更大。

3.2 “煤柱压缩”模式断层活化模拟验证

为了验证断层倾角比较小时,断层是否活化。本次数值模拟中采取断层倾角为40°,留设断层煤柱宽度分别为50,70,90,100m。根据模拟结果,保护煤柱宽度为50,70,90,100m时,工作面超前支承压力的及地表水平变形值如图14,15所示。

数值模拟中煤层上方岩层厚度 H 为525m,根据 $\sigma = \gamma H$ 计算可知原岩应力大小为13.133MPa。由图14可知,当工作面上覆岩层含有断层时,工作面超前支承压力的峰值更大,煤柱的压缩量更大。通过不断增大断层煤柱宽度,发现当煤柱宽度为100m时,断层才会处于工作面超前支承压力的影响范围之外;此时由图15可知,地表在断层露头处的水平变形值为1.75mm/m,地表构筑物达不到I级变形。由此可见,当断层倾角较小时,工作面超前支承压力的接触断层时将引起“煤柱压缩”模式断层活化而引起断层露

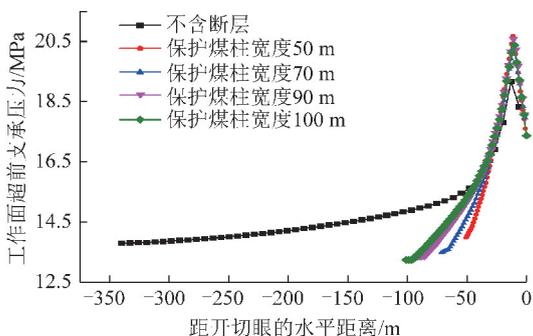


图 14 不同保护煤柱宽度时的工作面前超前支撑压力

Fig. 14 Advance of abutment pressure of different protective coal pillar widths

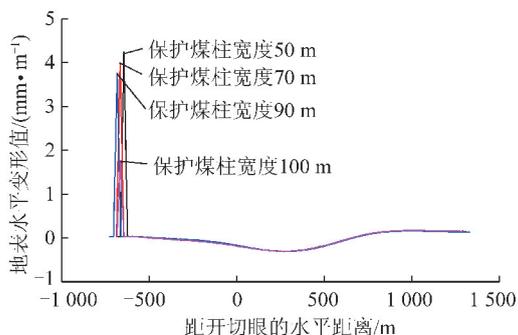


图 15 不同保护煤柱宽度时的地表水平变形值

Fig. 15 Horizontal strain on earth surface of different protective coal pillar widths

头处地表移动变形值偏大,验证了结论的正确性。

4 实例验证

峰峰矿区某矿 A 工作面走向长 660 m, 倾斜长 55 m, 平均埋深 538 m, 煤层平均厚度 5 m, 倾角 8°。在工作面西北部揭露 F37 正断层, 断层落差 10 m, 倾角 70°, 断层带宽度 5.6 m。断层走向近似与工作面走向方向平行, 留设保护煤柱 17 m, 工作面近似平行于断层走向推进。根据峰峰矿区的角值参数划定采动影响边界、危险移动边界如图 16 所示。

当不考虑断层时, 工作面附近村庄建、构筑物破坏应集中在危险移动边界以内, 但是在现场实际调查中发现破坏严重地表建、构筑物在危险移动边界之外并且形成一带状破坏区, 在图 16 中沿煤层倾向作 I-I' 剖面, 发现受损严重地表建、构筑物集中在断层露头附近, 如图 17 所示。

在图 17 中作主要影响角影响线, 与 F37 断层相交, 说明 A 工作面开采造成断层活化而导致断层露头处地表建、构筑物损害严重。同时, 工作面超前支撑压力影响范围 x 满足:

$$x = x_0 + x_1 = \frac{m}{2f} \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \ln \frac{K\gamma H}{\tau_0 \cot \varphi} + \frac{m\beta}{2f} \ln K \quad (5)$$

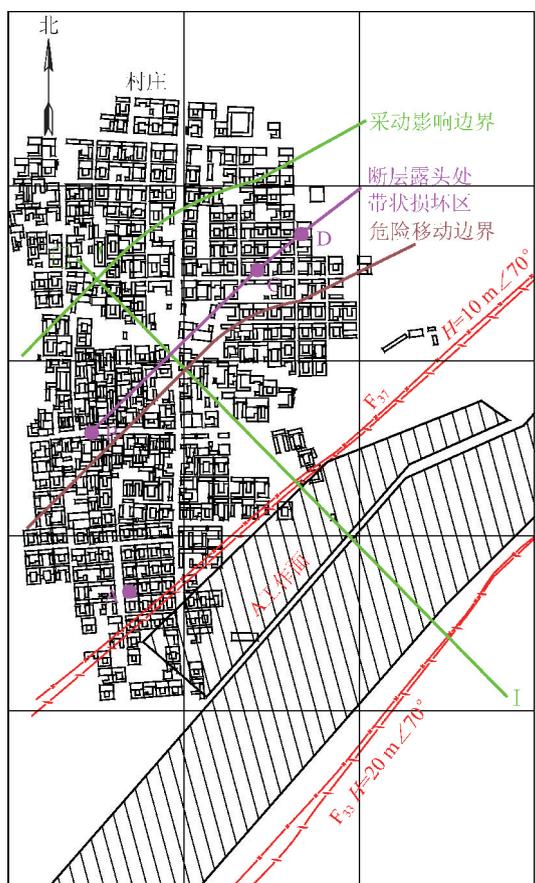


图 16 采动影响边界和危险移动边界示意

Fig. 16 Diagram of influence and dangerous boundary caused by mining

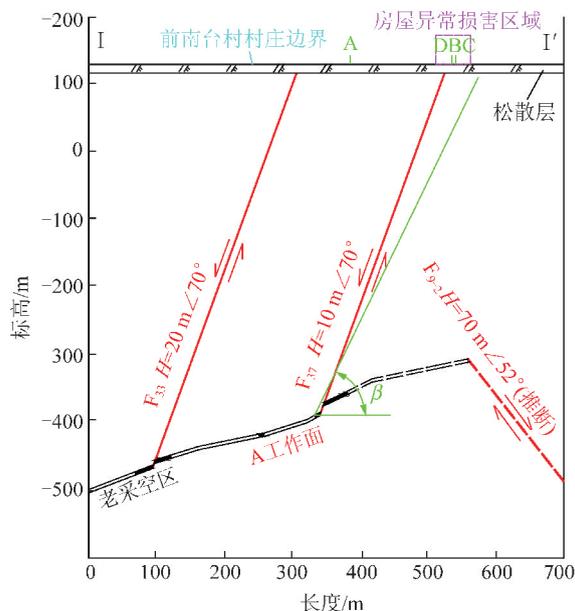


图 17 A 工作面剖面示意

Fig. 17 Cross section of A working face

式中, x_1 为极限平衡区宽度, m; x_2 为弹性区宽度, m; f 为顶板与煤层的摩擦因数; φ 为煤层内摩擦角, (°); K 为应力集中系数; γ 为工作面上覆岩层的平均容重

力,一般为 0.025 MN/m^3 ; H 为煤层埋藏深度, m ; τ_0 为煤体极限抗剪强度, MPa ; β 为侧压系数, 一般为 $0.8 \sim 1.5$ 。

根据文献[26], 式(5)相关参数分别取 $m=5 \text{ m}$, $H=525 \text{ m}$, $\varphi=29^\circ$, $\gamma=0.025 \text{ MN/m}^3$, $\tau_0=8.9 \text{ MPa}$, $K=1.5$, $\beta=1.5$, $f=0.02$, 得到工作面超前支承压力极限平衡区宽度为 10.25 m , 弹性区宽度为 80.89 m , 支承压力影响范围为 91.14 m , 而 A 工作面留设保护煤柱仅仅 17 m , 在支承压力的影响下也会造成断层的活化。

A 工作面开采结束后, 断层露头处地表建、构筑物达到 IV 级变形, 如图 18 所示, 验证了结论的正确性。同时, 也为开采沉陷学中断层防滑煤柱留设提供了依据。



图 18 断层露头处民房损坏情况

Fig. 18 Damage conditions of buildings on fault outcrop

5 结 论

(1) 根据理论推导得到煤层开采会造成断层面产生离层空间, 关键层及上部软弱岩层在断层面处的离层空间主要来自于关键层与下部软弱岩层的离层空间; 关键层下部软弱岩层在断层面的离层空间主要来自于采空区垮落矸石的再次压缩, 断层面离层空间影响因素主要有工作面推进长度、基岩厚度、保护煤柱宽度、煤层厚度、断层倾角、断层带岩体黏聚力、断层带岩体内摩擦角以及断层的含水情况等。

(2) 当其他影响因素一定时, 断层倾角与主要影响角的大小关系决定了“断层面产生离层空间”模式

断层活化的发生。当断层倾角大于主要影响角并与主要影响角在基岩内相交时, 断层将在断层面产生离层空间而引起断层活化。

(3) 当断层倾角小于主要影响角时, 工作面超前支承压力影响范围决定了“煤柱压缩”模式断层活化的发生, 当工作面超前支承压力接触到断层时将导致煤柱压缩而引起断层活化。

参考文献 (References):

- [1] NELSON W J. Faults and their effect on coal mining in Illinois [J]. Champaign ILL Illinois State Geological Survey, 1981.
- [2] 袁亮, 吴佩. 淮河堤下采煤的理论研究与技术实践 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [3] 煤炭科学研究院北京开采研究所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [4] 郭文兵, 邓喀中, 白云峰. 受断层影响地表移动规律的研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2002, 21 (6): 713-715. GUO Wenbing, DENG Kazhong, BAI Yunfeng. Study on laws of ground surface movements influenced by fault [J]. Journal of Liaoning Technology and University (Natural Science), 2002, 21 (6): 713-715.
- [5] 郭文兵. 断层影响下地表裂缝发育范围及特征分析 [J]. 矿业安全与环保, 2000, 27 (2): 25-27. GUO Wenbing. Surface creature scope and characteristics influenced by fault [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000, 27 (2): 25-27.
- [6] 郭迅, 戴君武. 采煤沉陷与断层相互作用引起地表建筑破坏特点分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25 (6): 851-854. GUO Xun, DAI Junwu. Analysis of building damage caused by interaction between faults and coal mining subsidence [J]. Journal of Liaoning Technology and University, 2006, 25 (6): 851-854.
- [7] 张玉卓, 仲惟林, 姚建国. 断层影响下地表移动规律的统计和数值模拟研究 [J]. 煤炭学报, 1989, 14 (1): 23-31. ZHANG Yuzhuo, ZHONG Weilin, YAO Jianguo. Study on surface movement influenced by faults using methods of statistics and numerical simulation [J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14 (1): 23-31.
- [8] 张玉卓, 仲惟林, 姚建国. 岩层移动的位错理论解及边界元法计算 [J]. 煤炭学报, 1987, 12 (2): 21-31. ZHANG Yuzhuo, ZHONG Weilin, YAO Jianguo. Theoretical solution of dislocation and boundary element method for studying strata movement [J]. Journal of China Coal Society, 1987, 12 (2): 21-31.
- [9] 戴华阳. 地表非连续变形机理与计算方法研究 [J]. 煤炭学报, 1995, 20 (6): 614-618. DAI Huayang. Mechanism and calculation of surface discontinuous deformation [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20 (6): 614-618.
- [10] 张华兴, 仲惟林. 受断层影响的地表移动计算 [J]. 煤炭学报, 1995, 20 (2): 163-166. ZHANG Huaxing, ZHONG Weilin. Calculation of surface movement induced by fault [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20 (2): 163-166.

- [11] 吴侃,蔡来良,陈冉丽. 断层影响下开采沉陷预计研究[J]. 湖南科技大学学报自然科学版,2008,23(4):10-13.
WU Kan, CAI Lailiang, CHEN Ranli. Study of mining subsidence prediction with the influence of fault[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 23(4):10-13.
- [12] 顾伟,谭志祥,邓喀中. 基于双重介质力学耦合相关的沉陷模型研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(4):589-594.
GU Wei, TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Study on subsidence model based on dual media related with mechanical coupling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4):589-594.
- [13] 王作棠,钱鸣高. 基本顶初次来压步距的计算预测法.[J]. 中国矿业大学学报,1989,18(2):9-18.
WANG Zuotang, QIAN Minggao. The calculating method of the first weighting span of main roof[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1989, 18(2):9-18.
- [14] 王明洋,赵跃堂,钱七虎. 缓倾角断裂隔震效应的机理及定量研究[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(1):60-64.
WANG Mingyang, ZHAO Yuetang, QIAN Qihu. Studies on mechanism and quantization of isolation effect of slow angle fault[J]. Chinese Journal of Rock Mechanic and Engineering, 1999, 18(1):60-64.
- [15] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [16] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- [17] 钱鸣高,缪协兴,何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报,1994,19(6):557-563.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6):557-563.
- [18] 郭文兵. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京:煤炭工业出版社,2013.
- [19] 孟召平,彭苏萍,黎洪. 正断层附近煤的物理力学性质变化及其对矿压分布的影响[J]. 煤炭学报,2001,26(6):561-566.
MENG Zhaoping, PENG Suping, LI Hong. Influence of normal faults on the physical and mechanical properties of coal and the distribution of underground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6):561-566.
- [20] 蒋建平,高广运. 地下工程引起的不平衡地表沉陷分析[J]. 煤炭学报,2003,28(3):225-229.
JIANG Jianping, GAO Guangyun. Analysis of non-uniform settlement at the ground induced by underground engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(3):225-229.
- [21] 陈育民. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M]. 北京:水利水电出版社,2009.
- [22] 蒋建平,章杨松,阎长虹,等. 地下工程中岩移的断层效应探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2002,20(8):1257-1262.
JIANG Jianping, ZHANG Yangsong, YAN Changhong, et al. Study on strata displacement under fault effect in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 20(8):1257-1262.
- [23] 张译心. 多因素影响下断层活化规律研究[D]. 青岛:山东科技大学,2017.
ZHANG Yixin. Research on fault activation pattern under multiple influencing factors[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [24] 任艳芳,宁宇. 浅埋煤层长壁开采超前支承压力变化特征[J]. 煤炭学报,2014,39(S1):38-42.
REN Yanfang, NING Yu. Changing feature of advancing abutment pressure in shallow long wall working face[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1):38-42.
- [25] 彭文斌. FLAC^{3D} 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [26] 谢福星,张召千,崔凯. 大采高采场超前支承压力分布规律及应力峰值位置研究[J]. 煤矿开采,2013,18(1):80-83.
XIE Fuxing, ZHANG Zhaoqian, CUI Kai. Advanced abutment pressure distribution rule and stress summit location in mining field with large mining-height[J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(1):80-83.