

# 基于界面单元的正断层破碎带对煤矿采动响应的影响分析

曹 栩<sup>1</sup>, 常亚峰<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082)

**摘要:**为更准确地反映断层的特性,以典型煤矿为例,采用数值计算方法,结合地层中断层带的实际特征,建立断层带和断层面共同存在的断层地质模型,研究了正断层条件下,断层面和断层破碎带对煤矿工作面开采的影响。研究表明:断层面的刚度越小,模型平衡需要计算的时步越多。断层带厚度为给定条件下,当接触面参数不同时,随着工作面的推进,距离断层面越近时,断层面影响逐渐增加;随着接触面刚度的增加,工作面前方的应力峰值有升高的趋势,无接触面时的应力峰值最高。给定接触面刚度条件下,随着断层带厚度的增加,工作面前方的应力呈现升高的趋势。工作面顶板的垂直位移随着断层带厚度的增加有一定程度的增加。断层带厚度给定时,不同接触面参数下随着距离煤层的垂直距离的增加,高位岩层的断层两侧的位移差较低位岩层的位移差大,计算结果显示,两盘单独的滑移量也是高位岩层较大。给定的接触面参数下,不同断层带厚度下,随着工作面的推进断层两盘的位移差不断增加,在一定垂直距离范围内,岩层层位高的点比层位低的点滑移量要大。随着断层带厚度的增加,断层两盘的滑移量呈现增加的趋势。该研究对断层影响下的煤炭开采具有一定的指导作用。

**关键词:**断层;断层破碎带;接触面;煤炭开采

中图分类号:TD322

文献标识码:A

## Influence of normal fault fracture zone on mining response based on interface element

CAO Xu<sup>1</sup>, CHANG Yafeng<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Institute of Architecture Science Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

**Abstract:** To capture the characteristics of faults accurately, considering a typical coal mine as an example, the geological model of fault zone and fault plane is established by the numerical calculation method, and the influence of thickness of fault fracture zone and fault plane on mining of coal mine working face under normal fault condition is studied. The study shows that the smaller the stiffness of the fault plane is, the more time steps need to be calculated for the model balance. Under given conditions for the thickness of the fault zone, the influence of the fault plane gradually increases as the working face advances closer to the fault plane under the conditions of different contact surface stiffness, the stress peak in front of the working face tends to rise with the increase of interface parameters, and the stress peak is the highest when there is no interface, and the vertical displacement of the working face roof increases gradually with the decrease of the interface stiffness. The stress in front of the working face increases with the increase of the thickness of the fault zone under the same interface parameters. The vertical displacement of the roof increases with the thickness of the fault zone. With the increase of the vertical

收稿日期:2022-12-11; 修回日期:2023-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11572244);陕西省自然科学基金基础研究重点项目(2021JZ-47);陕西省自然科学基金基础研究青年项目(2021JQ-467)

作者简介:曹 栩(1988—),男,博士研究生,主要从事地下岩土工程研究。E-mail:cx20111210@163.com

distance from coal seam under different interface parameters, the displacement difference between the two sides of the fault of the high strata is larger than that of the low strata, and the two separate plates is also larger in the high strata. Under the condition of different fault zone thicknesses, the displacement difference between the two sides of the fault increases with the advance of working face. The slip amount of the point with higher strata is larger than that of the point with lower strata in a certain range of vertical distance. The slip amount on the two sides of the fault increases with the increase of the thickness of fault. This study has certain guiding function for coal mining under the influence of faults.

**Key words:** fault; fault fracture zone; interface; coal mining

## 0 引言

断层是一种常见的地质构造类型,对地下工程的应用有一定的影响<sup>[1-5]</sup>,在煤矿开采中,受采掘活动的影响<sup>[6]</sup>,断层构造的存在往往会导致透水、瓦斯突出以及冲击地压<sup>[7]</sup>等煤矿事故的发生,导致大量的人员伤亡和财产损失。断层由于弱面和破碎带的存在,在采掘活动影响下,往往容易造成断层滑移<sup>[8-9]</sup>失稳,改变矿山压力分布,给煤炭开采工作带来很大的困难。

在以往的研究中,对断层的研究方法主要集中在:理论分析、实验室实验、相似模拟试验及数值模拟方法等<sup>[10-11]</sup>。由于实际地质条件中断层及地层的尺寸较大,数值模拟成为了近年来研究断层的一种重要方法<sup>[12]</sup>。张雨霆等<sup>[13]</sup>针对岩土工程数值分析中地质断层建模困难的问题,提出基于单元重构的岩土工程复杂地质断层建模方法,为岩土工程的复杂地质断层建模提供便捷的实现途径。于秋鸽等<sup>[14-15]</sup>采用数值模拟手段对开采中不同断层的活化模式、采动影响下断层活化机理及影响因素以及开采活动断层滑移引起地表沉降机理等进行研究,为工程实践中断层地质构造下的煤炭开采提供指导。朱广安等<sup>[16]</sup>为研究开采扰动下断层滑移失稳诱发冲击矿压的致灾条件,推导了断层面正应力、剪应力的计算公式,进而得到断层滑移失稳与覆岩“关键层”的破断和采场的推进的关系,利用数值模拟计算比较了不同开采影响因素下的断层面位移场、应力场、速度场和能量场的响应规律,得出:断层滑移对采动影响具有不同的敏感性,断层带上剪切位移和应力分布受断层摩擦角、采深、断层位置和回采方式等影响较大;而受断层力学性质(诸如法向刚度、切向刚度等)影响较小。蒋金泉等<sup>[17]</sup>采用数值模拟方法分析了上覆硬厚岩层受逆断层切割后的顶板运动和采动应力变化情况,认为上下盘工作面受断层距离的影响较大,下盘工作面的活化性受断层及地层条件的影响较上盘工作面较大。姜耀东等<sup>[18]</sup>采用库仑剪切模型的接触面单元代表断层两盘的接触状态,模拟工作面从断层面上盘和下盘向断层方向逐步回采的过程,断层带上的应力分布具有明显的时空特征,断层面上法向应力和剪切应力对采动影响具有不同的敏感性,断层法向应力的变化总是早于剪切应力;工作面距离断层越近,断层越易于活化。

已有研究者对采动影响下断层的活化机理、诱因和形式进行了大量研究,对于预防由于断层活化引起的矿井灾害具有很好的指导作用。根据以往的研究,断层往往起到弱面作用,对应力和能量的传递形成阻断<sup>[19]</sup>,但是在实际的地质层带中,断层往往又以一定宽度的断层带形式出现<sup>[20]</sup>,以往的研究往往单一的把断层视作弱面或者断层带,实际的断层应该是既能起到弱面的作用,又以断层带的形式存在,而断层带厚度的取值并没有明确的给出。本文以典型的煤矿为例,建立断层地质模型,研究在断层面作用下正断层破碎带对工作面煤炭开采的影响,为断层条件下的煤矿开采提供了参考。

## 1 研究区域概况

济三煤矿隶属于兖矿集团,地理位置在山东省济宁市,矿井面积覆盖 110 km<sup>2</sup>,预计可采煤炭储量 5.26 亿吨,井型设计初为 500 t/a,产量曾一度达到 800~1000 万 t/a,属于国有特大型煤矿。6303 工作面布置在 6 采区 6300、6301、6302 工作面以西(图 1),设计倾斜长度 239.8 m,走向长度 2057.8 m,采用综合机械化放顶煤一次采全高的采煤工艺。工作面回风顺槽是沿空巷道,顺槽全长 2114 m,工作面埋深 669~711 m,6303 回风顺槽临近 6302 采空区,6302 采空区与 6303 工作面回风顺槽之间留设窄煤柱 2~3 m,煤层平均厚

度 4.75 m,煤层为近水平煤层,煤层柱状图如图 1 所示,顶底板共列出 13 层,总高度 114 m。工作面在推进过程中曾多次发生冲击矿压事件,回风顺槽掘进期间共通过 3 条断层 SF62、SF28 和 SF3,断层落差分别是 1.0、1.6、0.5 m,SF28 断层附近掘进时发生多次冲击矿压显现。

岩性	厚度/m	岩柱	岩性	厚度/m	岩柱
黏土岩	14		中砂岩	5	
细粉岩	3		细砂岩	20	
中砂岩	8		中砂岩	5	
粗砂岩	5		煤层	5	
中砂岩	11		粉砂岩	2	
细砂岩	13		细砂岩	6	
			粉砂岩	14	

(a) 岩层柱状图



(b) 工作面布置图

图 1 研究区域概况

Fig.1 Overview of the study area

## 2 正断层滑移受力分析

采动响应可能导致断层的滑移,断层的滑移反之作用于采场,建立正断层滑移的概念力学模型如图 2 所示。由图可知,模型受上覆垂直应力  $\sigma_u$  和水平应力  $\sigma_s$  的作用,则断层面上附近微元的正应力  $\Delta\sigma_n$  和切应力  $\Delta\tau$  为

$$\Delta\sigma_n = \frac{\Delta\sigma_u + \Delta\sigma_s}{2} + \frac{\Delta\sigma_u - \Delta\sigma_s}{2} \cos 2\theta \tag{1}$$

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\sigma_u - \Delta\sigma_s}{2} \sin 2\theta \tag{2}$$

式中: $\Delta\sigma_n$  为断层面上的正应力; $\Delta\tau$ 为断层面上的切应力; $\Delta\sigma_u$  为模型垂直应力; $\Delta\sigma_s$  为模型水平应力。根据 Mohr-Coulomb 失效准则,断层面微元产生滑动的剪切强度由式(3)计算,得

$$\Delta\tau_s = \Delta\sigma_n \tan \varphi + c \tag{3}$$

式中: $\Delta\tau_s$  为剪切滑移强度; $\varphi$  为断层内摩擦角; $c$  为内聚力。

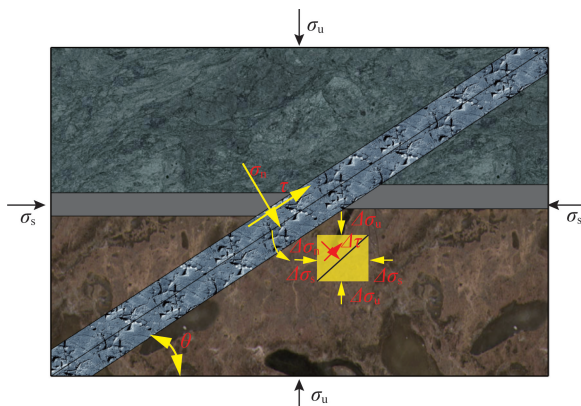


图 2 正断层滑移的力学概念模型

Fig.2 Mechanical conceptual model of normal fault slip

当断层产生滑移时的条件为  $\Delta\tau \geq \Delta\tau_s$  时,根据式(1)、式(2)和式(3)可得断层临界滑移状态下的表达式为

$$(\Delta\sigma_u - \Delta\sigma_s)_{\text{slip}} = \frac{2(\Delta\sigma_s \tan \varphi + c)}{(1 - \cot \theta \tan \varphi) \sin 2\theta} \tag{4}$$

由式(4)可知,当  $\theta$  值一定时, $\varphi \rightarrow \theta, (1 - \cot \theta \tan \varphi) \rightarrow 0$ ,此时  $(\Delta\sigma_u - \Delta\sigma_s) \rightarrow \infty$ ,由式(4)可以得到:

$$\Delta\tau - \Delta\sigma_n \tan \varphi = \frac{(\sigma_u - \sigma_s)(\sin 2\theta - \tan \varphi \cos 2\theta)}{2} - \frac{(\sigma_u + \sigma_s) \tan \varphi}{2} \quad (5)$$

对  $\theta$  求偏导可得到极值  $\tan 2\theta = -1/\tan \varphi$ , 有  $\sin 2\theta = (\tan^2 \varphi + 1)^{-1/2}$ ,  $\cos 2\theta = -\tan \varphi (\tan^2 \varphi + 1)^{-1/2}$ , 根据滑移条件可知, 临界滑移条件为  $\tau - \sigma \tan \varphi = c$ , 则

$$2c = \Delta\sigma_u [( \tan^2 \varphi + 1 )^{1/2} - \tan \varphi] - \Delta\sigma_s [( \tan^2 \varphi + 1 )^{1/2} + \tan \varphi] \quad (6)$$

变换得到:

$$(\Delta\sigma_u - \Delta\sigma_s)_{\text{slip-min}} = 2 [c + \Delta\sigma_u \tan \varphi] [(1 + \tan^2 \varphi)^{1/2} + \tan \varphi] \quad (7)$$

由式(7)及前述分析可知, 当断层倾角  $\theta$  以及垂直应力  $\sigma_u$  和水平应力  $\sigma_s$  确定时, 滑移发生的条件取决于断层的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ , 因此只要确定合理的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  的值, 断层即可发生滑动。

### 3 数值模型的建立和方案

#### 3.1 建模和方案

对于断层的建模在已有研究的基础上提出新的建模思路, 对于界面单元的断层带的建模主要分为 3 种类型: 只含有接触面单元的断层模型 a, 用弱化的夹层带建立断层带的模型 b, 在断层带两侧弱化的断层带与岩层之间建立界面单元的断层带模型 c, 如图 3(a)、(b) 和 (c) 所示。模型 a 只能反映出断层的滑移特性, 模型 b 只能在一定程度上表征断层带的挤压变形特性, 模型 c 存在断层带岩层和完成岩层带之间参数选取的问题, 模型建立也相对较为复杂。本文基于前人对断层带模型建立的基础上, 提出在断层带内建立断层的界面单元, 对于真实的断层带来说(图 3(d)), 断层的滑移一般是发生在断层带的内部, 优化后的界面单元的断层带模型如图 3(e) 所示, 该模型不但能够反映出断层的滑移特性, 还能对断层带的挤压变形特性进行表征, 同时还具有建模方面的优点, 只需要建立一条基于弱化断层带的界面单元, 该界面单元参数的选取依照断层带的岩性参数进行选取即可。

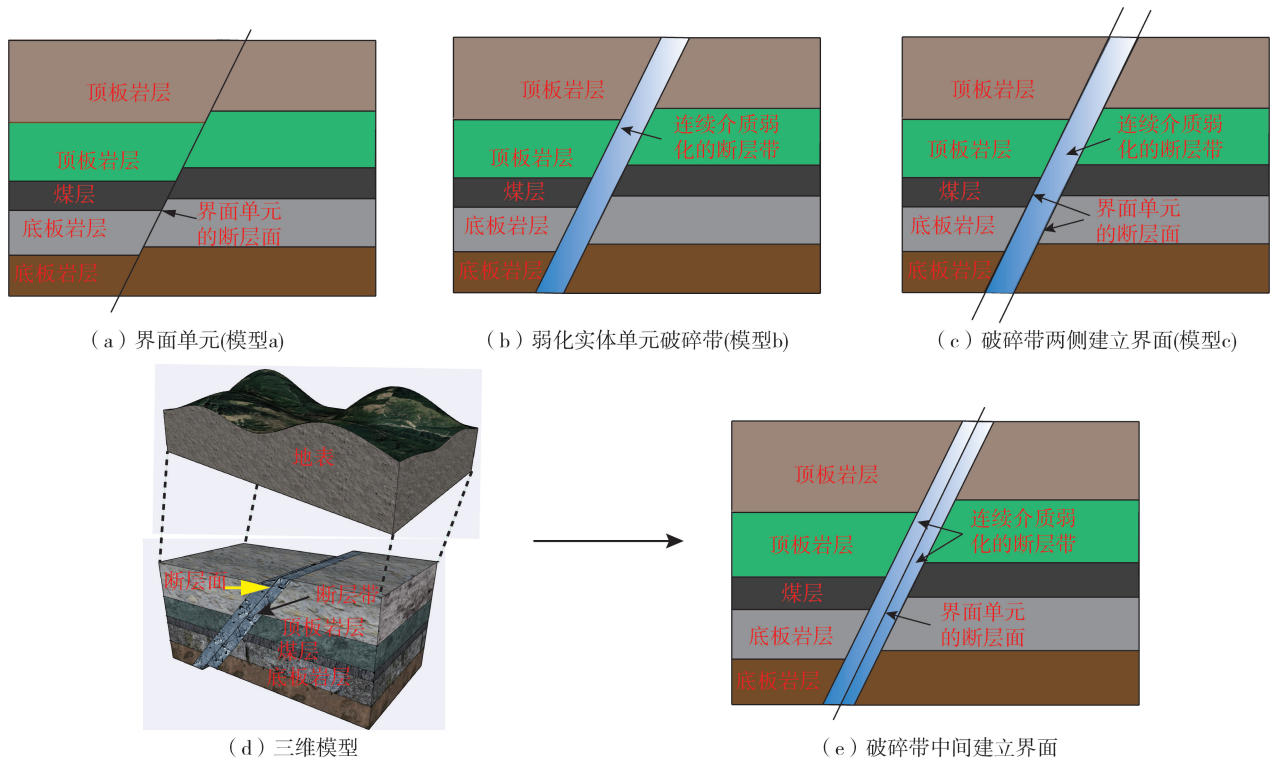


图 3 界面单元的断层带优化模型

Fig. 3 Fault zone optimization model of interface element

采用 FLAC3D 软件进行计算, Mohr-Coulomb 被广泛应用于地震分析<sup>[21-23]</sup>, 煤柱及临近的完整地层选用连续介质模型, 模型的本构关系选取摩尔库伦 (Mohr-Coulomb) 模型, 数值模型依据兖矿集团济三煤矿 6303 工作面进行建立, 断层模型倾角  $45^\circ$ , 断层模型尺寸为长 400 m, 宽 5 m, 高 111 m, 工作面的开采深度为 730 m, 将上覆岩层简化为 15.7 MPa 的均布荷载, 断层为正断层, 水平应力比为 0.5, 模型前后左右和下部固定边界, 模

型中断层带的厚度从 5~13 m 进行递增,梯度为 2 m,在断层带的中间部位建立断层面,模型的地层关系如图 4所示,在断层带与岩层的接触布设设置若干监测点 A-A',B-B',C-C',在断层面左右 0.1 m 处与 A、B、C 平行的位置设置监测点 a-a',b-b',c-c'监测位移和应力的变化。地层模型选取 Mohr-Coulomb 模型,断层面选取接触面中的库伦剪切模型,模型中的物理力学参数参照济三煤矿的 C8-9 钻孔资料<sup>[16,24]</sup>,具体参数见表 1。这里不考虑断层带的岩体性质影响,断层带的参数根据弱化后的泥岩或松散层进行选取<sup>[17,25]</sup>。

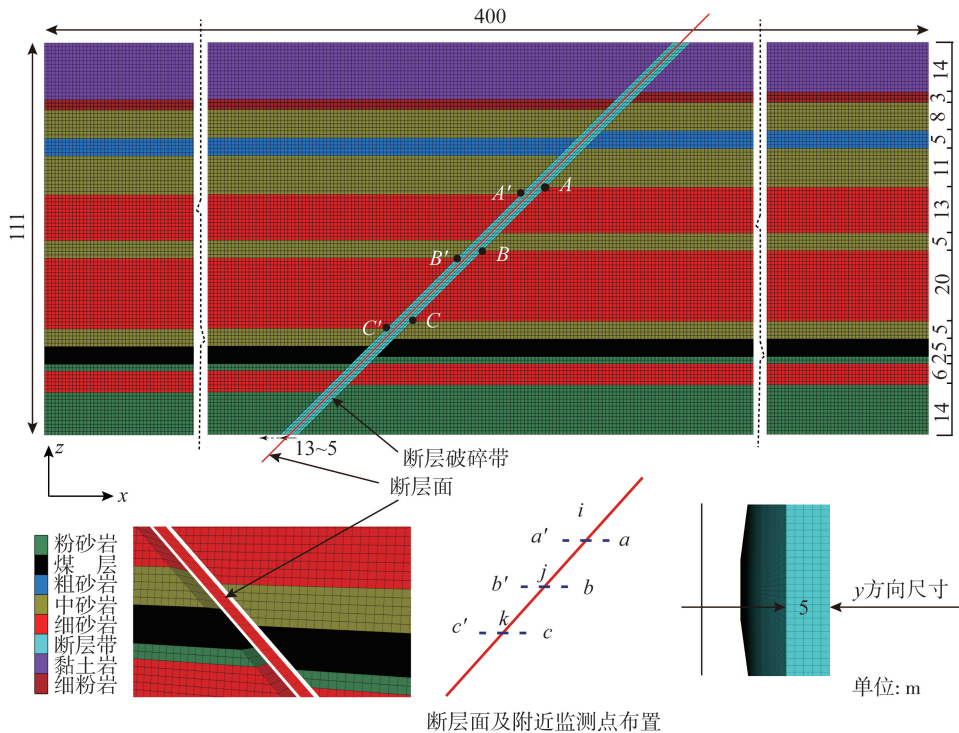


图 4 数值模型的三维尺寸

Fig. 4 3D dimensions of the simulation model

表 1 岩层模型中使用的物理力学参数

Table 1 Physical mechanics parameters of the rock strata used in simulation

岩体名称	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
黏土岩	8.20	1.10	2500	1.80	30
细粉岩	9.60	3.60	2500	2.50	31
细砂岩	23.00	15.20	2700	17.00	38
煤层	1.50	0.80	1420	1.10	25
粗砂岩	16.50	7.80	2620	5.00	29
中砂岩	19.40	13.20	2700	12.80	40
粉砂岩	13.10	4.20	2500	3.00	33
断层带	0.03	0.07	2200	0.03	20

### 3.2 断层面参数的选取及参数验证

在以往的研究中,断层面参数的选取往往是根据断层面附近岩层的参数进行选取,断层面的参数选取范围在附近岩层参数的 1/6 至数倍不等<sup>[26-27]</sup>,而对于接触面参数的选取与岩性的关系的研究较少,参照 FLAC3D 软件说明,根据周围单元的参数,接触面的参数可以根据相邻区域单元的等效刚度进行选取,即

$$k_{es} = \max \left[ \frac{\left( K + \frac{4}{3}G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (8)$$

式中:K 为体积模量; G 为剪切模量;  $\Delta z_{\min}$  为接触面周围单元的最小尺寸。当建立真实的可以滑动的接触面单元时,主要取决于接触面单元的法向刚度( $k_n$ )和切向刚度( $k_s$ )。根据模型参数断层带的岩性值及周围网格尺寸,计算得到接触面的等效刚度  $k_{es} = 0.148$  GPa,为了研究接触面参数的影响,接触面的参数分别选取  $0.25k_{es}$ 、 $0.5k_{es}$ 、 $k_{es}$ 、 $2k_{es}$ 、 $4k_{es}$ 、 $6k_{es}$ 、 $8k_{es}$ 、 $10k_{es}$  对上述 5 m 断层带厚度的模型进行计算,并与无接触面条件下的模型进行对比,接触面内摩擦角取值为 14°。

根据图 3(e) 中的模型对选取断层带参数以及断层面参数进行验证,断层带两侧选取的岩层参数为表 1 中的粗砂岩,断层面的参数选取刚度参数的最大和最小值  $0.5k_{es}$ 、 $10k_{es}$ ,模型的前后左右固定,上部根据不同情况施加一定的上覆均布荷载,下部断层面左侧自由,右侧固定,施加自重应力,计算一定循环后,观察断层滑移状况。图 5 是对选取的两刚度参数下的模型的断层滑移验证,显示的是垂直位移云图,由图可知, $0.5k_{es}$ 、 $10k_{es}$  的断层面参数下,断层都产生了不同程度的滑移,表明该断层参数能够进行断层滑移的计算。

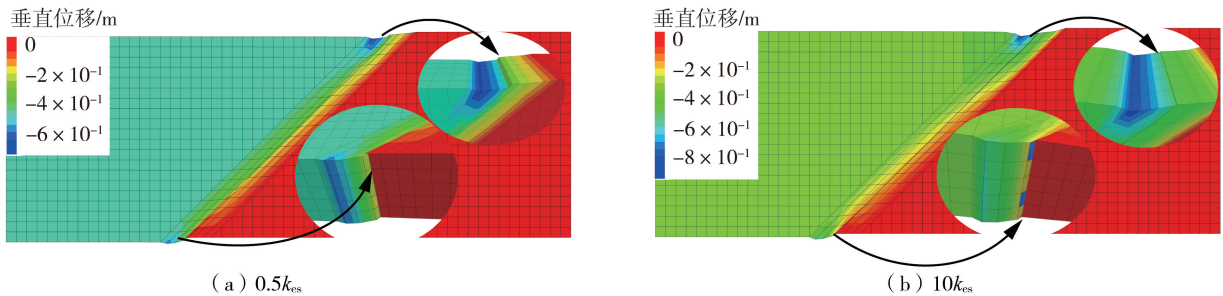


图 5 断层滑移参数验证

Fig. 5 Parameters verification of fault-slip

计算了不同接触面参数下的 5 m 断层带厚度的模型,当接触刚度降低到  $0.25k_{es}$  时,模型发生刚度破坏,无法进行计算,计算以  $0.5k_{es}$  为刚度的下边界,依次递增。图 6 为模型平衡时断层面附近的监测点垂直位移差与接触面刚度的关系图,以  $12k_{es}$  为无接触面的情况进行绘制。由图可知,在无接触面的情况下, $a-a'$ 、 $b-b'$ 、 $c-c'$  这 3 对点的位移差几乎为零,随着接触面刚度的减小,接触面监测点的位移差逐渐增大,这主要体现在模型靠上部的  $a-a'$  对点,模型下部的  $b-b'$ 、 $c-c'$  这 2 对点的位移差较小,由于是正断层,模型左侧点  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  点的位移要大于  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点,说明断层上盘产生了一定程度的滑移。模型平衡时步与接触面参数的关系图,如图 7 所示。由图可知,随着模型接触面刚度的不段加大,模型平衡计算时步数逐渐减小,无接触面时的计算平衡时步数最小。模型平衡时为了模拟原始的地应力状态,计算平衡后,将模型所有节点的位移进行清零,进行后续计算。

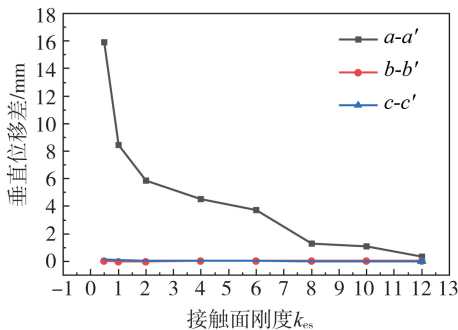


图 6 模型平衡时断层面监测点垂直位移差

Fig. 6 Vertical displacement difference of fault plane monitoring points when the model is balanced

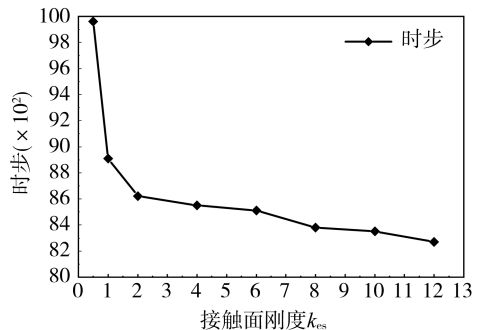


图 7 模型平衡时步和断层面参数关系

Fig. 7 Relationship of model equilibrium time step and fault plane parameters

## 4 结果与分析

### 4.1 同断层带厚度下断层面的影响分析

在给定断层带厚度为 5 m 的条件下,对不同接触面参数的模型进行分析。计算模型中  $0.5k_{es}$ 、 $6k_{es}$ 、无断层面的模型开挖 100、50、10 m 的垂直应力分布如图 8 所示。由图可知,随着工作面的不断推进,工作面前方的应力集中逐渐向断层移动,当工作面距断层 5 m 时,应力集中完全转移到了正断层的上盘,而且应力集中的程度有所增加,最大应力值随着工作面的推进不断增加,100、50、10 m 的应力峰值分别为 26、45、50 MPa。对于接触面参数的影响,从图中可以看出,当工作面推进 100 m 时, $0.5k_{es}$  较无断层面和  $6k_{es}$  断层面上方开始出现应力变化,出现 20~22 MPa 的应力,当工作面推进至断层 50 m 时,断层面对工作面的应力影响逐渐显著,在工作面的前方,正断层下盘出现一块低应力区域,应力值在 5~10 MPa,当工作面推进至断层 5 m 时,工作面顶板和底板出现大面积低应力区域。

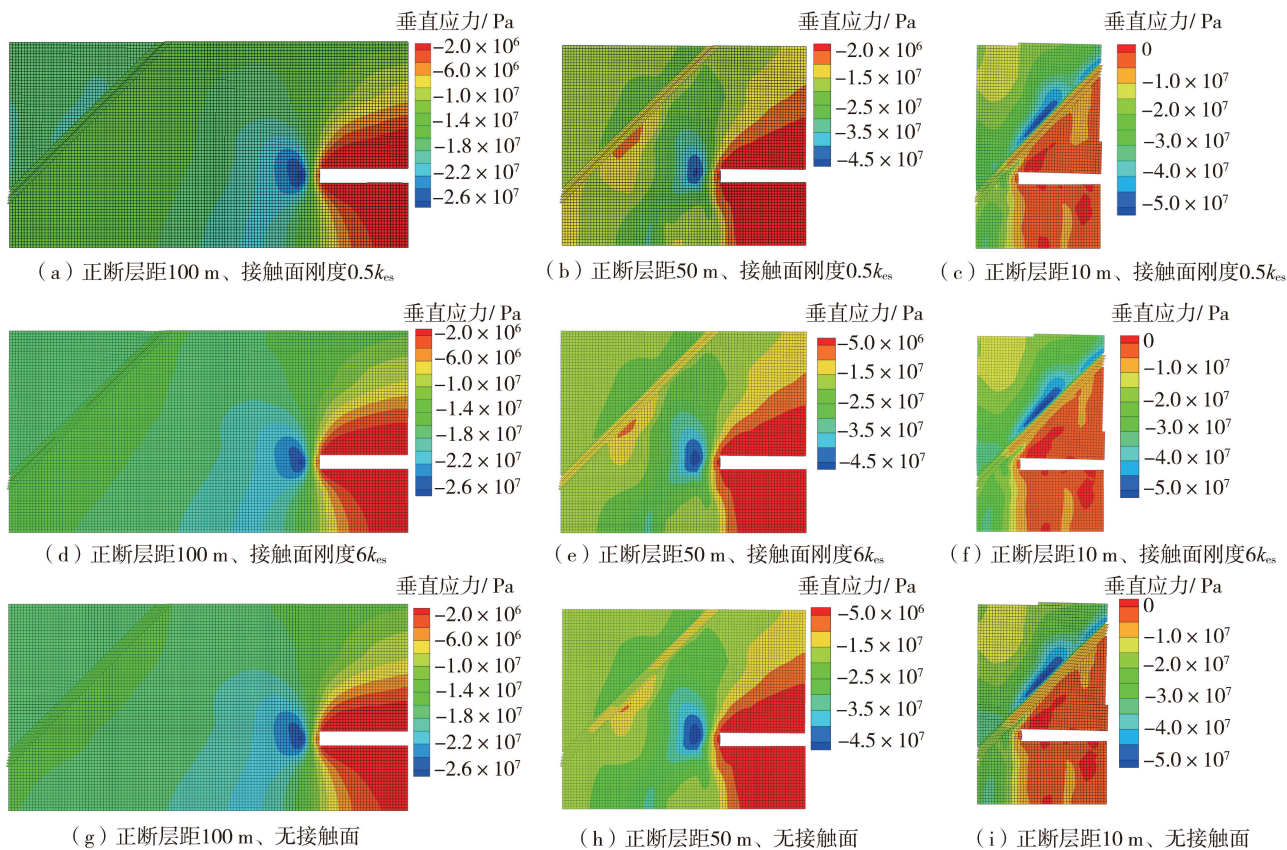


图8  $0.5k_{es}$ 、 $6k_{es}$ 和无接触面下工作面距断层 100、50、10 m 时的垂直应力

Fig. 8 Distribution of vertical stress when the working face is 100 m, 50 m and 10 m away from the fault under  $0.5k_{es}$ 、 $6k_{es}$  and no contact surface

图9为不同接触面参数下的工作面推进至断层70、40 m时前方煤柱内的垂直应力图。由图9(a)可知,当工作面推进至距断层70 m时,工作面前方附近煤层内的应力受断层影响较小,自工作面至断层呈现先升高后下降的趋势,工作面前方6.5 m处出现应力峰值,峰值强度在38.39 MPa,距离断层面附近的应力受接触面参数有一定的影响,主要体现在,随着接触面参数的增大,断层附近煤柱内的应力有所升高,主要由于断层面的存在,导致断层的滑移挤压,对煤柱起到一定的泄压作用。由图9(b)可知,当工作面推进距断层40 m时,断层对工作面前方煤柱内应力的影响逐渐显现,同样在工作面前方7 m处出现应力峰值, $0.5k_{es}$ 条件下应力峰值为49.83 MPa, $10k_{es}$ 和无接触面条件下的应力峰值分别为54.06、54.64 MPa。研究表明,受接触面参数影响,随着接触面刚度的增加,应力峰值增大,无接触面时的应力峰值最高。在断层面附近,同样随着接触面刚度的增加,应力呈现上升的趋势。在断层附近区域应力发生一定程度的突变,从15 MPa突变至25 MPa。

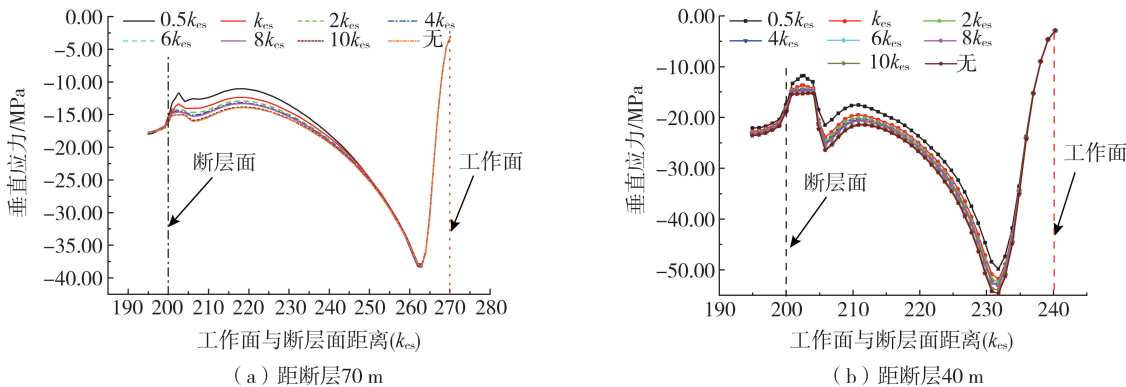


图9 不同接触面参数下工作面距断层70、40 m时煤柱内的垂直应力分布图

Fig. 9 Vertical stress distribution in coal pillar at 70 m and 40 m from fault under different interface parameters

图10为不同接触面参数下工作面推进至距断层70、40 m时煤层顶板的位移图。由图10(c)可知,从断层至工作面,顶板的垂直位移量不断增大,断层面附近的位移受工作面开挖影响较小,工作面因受开挖影响,

顶板位移逐渐增大,  $0.5k_{es}$  接触面参数工作面顶板的位移量最大, 达到 0.15 m, 随着接触面刚度的增加, 顶板位移逐渐减小, 无接触面时的位移最小。由图 10(d) 可知, 当工作面距断层 35 m 时, 随着工作面向断层的逐渐推进, 顶板的位移量逐渐加大, 同样,  $0.5k_{es}$  接触面参数工作面顶板的位移量最大, 达到 0.52 m, 其余接触面刚度参数下的位移差别较小, 而断层附近受工作面采动影响, 位移有一定变化, 呈现出先增大后减小的趋势, 至工作面方向位移量逐渐增大, 断层附近附近的位移随着接触面参数的增加逐渐增加, 但增加的幅度较工作面顶板的位移量小。

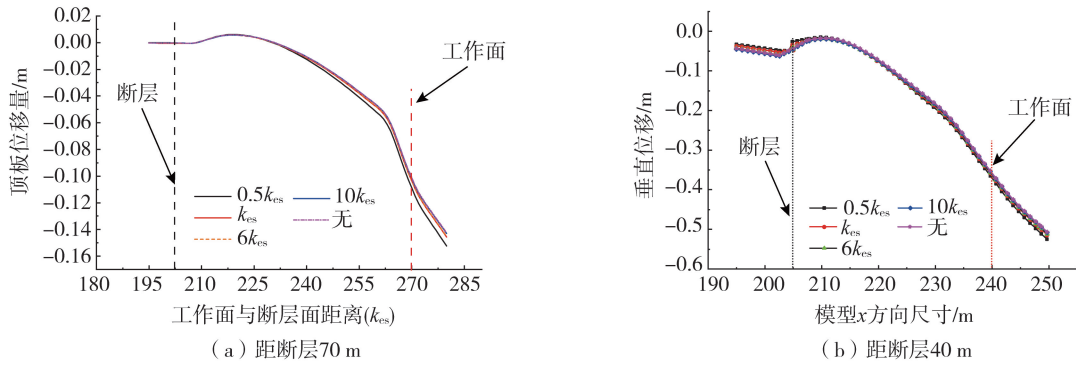
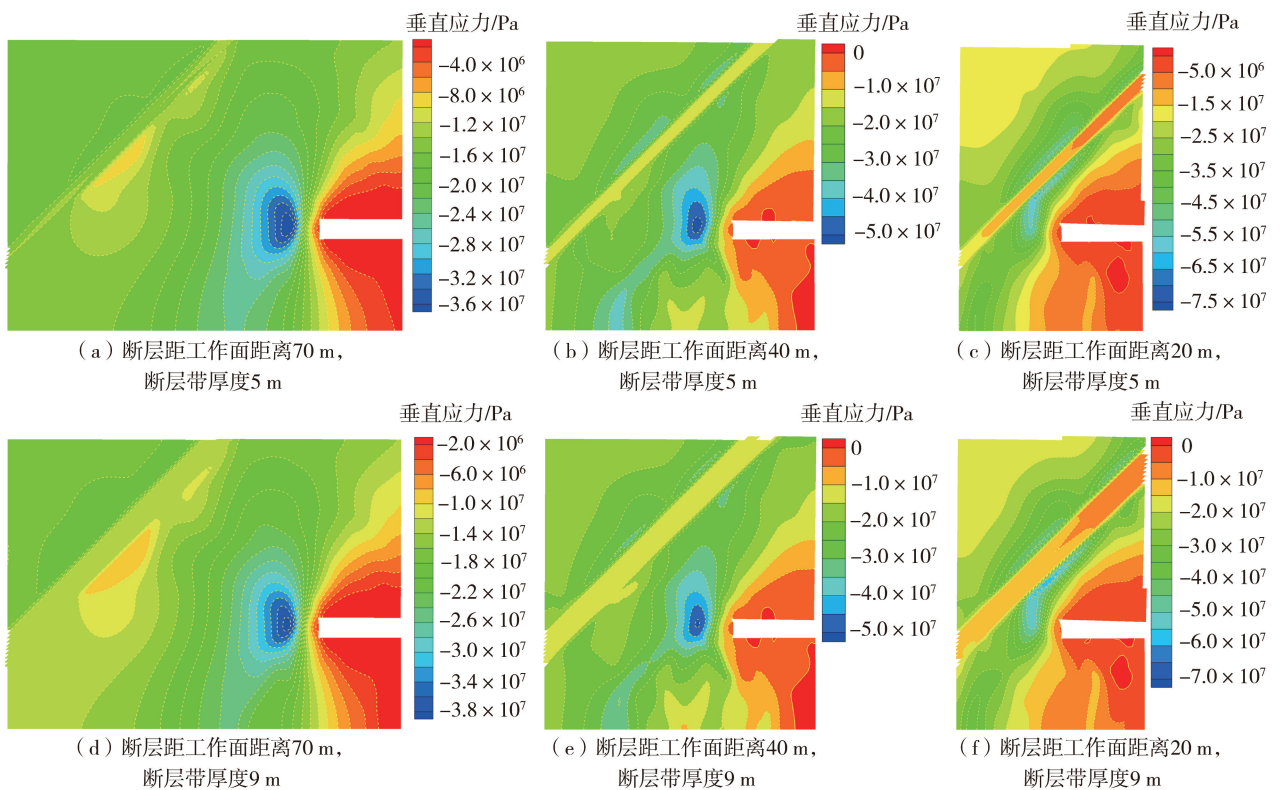


图 10 不同接触面参数下工作面距断层 70、40 m 时煤层顶板的垂直位移

Fig. 10 Vertical displacement of coal seam roof when the working face is 70 m and 40 m from the fault under different interface parameters

#### 4.2 断层面作用下不同断层带厚度的影响分析

取上述接触面参数的最小可计算刚度, 即  $0.5k_{es}$  对不同断层带厚度的模型进行计算, 断层带厚度的取值为 5、7、9、11、13 m。图 11 为断层带厚度为 5、9、13 m 时, 工作面与正断层距 70、40、20 m 时的垂直应力分布。由图可知, 随着工作面不断的向断层面推进过程中, 断层处的应力逐渐对工作面前方的应力产生一定的影响, 应力集中逐渐由工作面最终转移至断层面, 开挖后的煤层顶底板由于应力的释放, 出现低应力区域, 工作面前方一段距离出现应力升高区域, 煤层内的支撑压力在工作面前方呈现先升高后降低的趋势。当工作面推进至距断层面 70 m 时, 可以看出, 9 m 和 13 m 断层带厚度下, 工作面前方的应力峰值较 5 m 层厚要高, 而断层带附近的应力降低区域随着断层带厚度的增加而逐渐增大。随着断层面的增加, 工作面推进过程中, 工作面前方的应力集中区域逐渐减小。



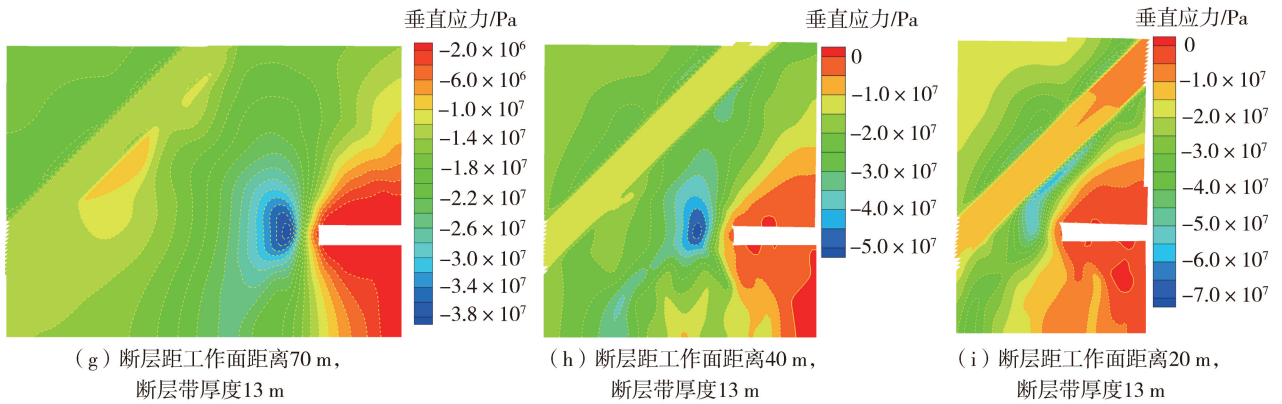


图 11 厚度 5、9、13 m 下工作面距断层 70、40、20 m 时的垂直应力

Fig. 11 Vertical stress when the thickness is 5 m, 9 m and 13 m, the working face is 70 m, 40 m and 20 m away from the fault

图 12 为不同断层带厚度下工作面距断层 40、20 m 时煤层内的垂直应力和煤层顶板垂直位移图,从图 12(a)可以看出,随着断层带厚度的增加,在断层左侧,应力随着断层带厚度的增加而降低,过断层后,应力经过突变后,先降低继而逐渐升高,在工作面附近出现应力峰值。随着断层带厚度的增加,应力峰值逐渐升高,13 m 断层带厚度下,在工作面前方的应力峰值为 52.15 MPa,5 m 断层带厚度下的应力峰值为 49.83 MPa。研究表明,随着工作面的推进,断层带的厚度增加,会导致工作面前方的应力峰值升高。图 12(b)为顶板的位移图。由图 12(b)可知,顶板的位移自断层至工作面呈现逐渐降低的趋势,这是由于开采导致的顶板下沉以及断层的滑移所致,随着断层带厚度的增加,工作面处的顶板下沉量逐渐增大。图 12(c)为工作面推进 20 m 时工作面前方煤柱内的应力分布。由图 12(c)可知,在工作面前方 7 m 左右出现应力峰值随着层厚的增加而有所升高,断层带厚度为 13 m 时的应力峰值最大,达到 53.94 MPa,说明随着工作面的推进,越靠近断层,应力峰值有逐渐升高的趋势,而在断层带附近左侧,应力呈现出先降低后升高的趋势,而断层左侧的应力是随着断层带厚度的增加而降低,并在断层面附近呈现一定的跃迁突变,断层面右侧的应力变化和正常开采情况相同。图 12(d)为工作面距离断层 20 m 时煤层顶板的位移变化图。由图 12(d)可知,在断层面左侧,位移随着层厚的增加而减小,过断层面后,随着远离断层面,位移逐渐增加,并随着断层带厚度的增加,位移逐渐增大,13 m 断层带厚度下的位移最大,在距离工作面后方 10 m 处的顶板位移量为 0.9 m。

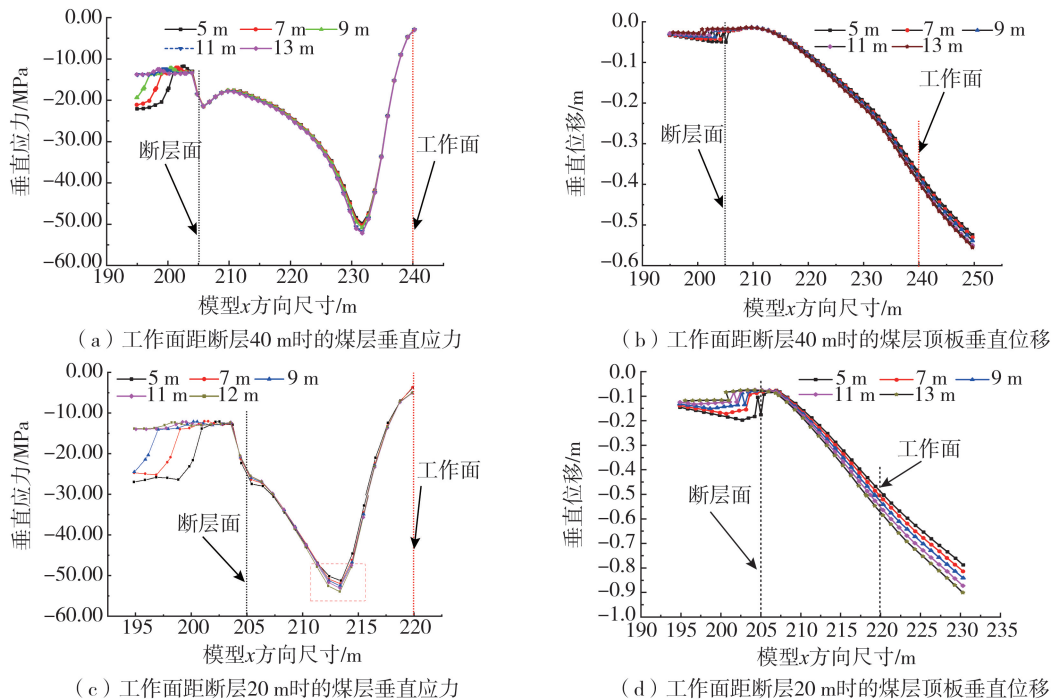


图 12 不同厚度下工作面距断层 40、20 m 时煤层内的垂直应力和煤层顶板位移

Fig. 12 The vertical stress in the coal seam and the displacement of the coal seam roof when the working face is 40 m and 20 m away from the fault under different thicknesses

### 4.3 正断层的滑移特征

#### 1) 接触面参数的影响

图 13 为工作面开采时不同接触面参数下断层监测点的位移图。由图 13 可知,随着距离煤层的垂直距离的增加,高位岩层的断层两侧的位移差较低位岩层的位移差较大,同样的计算结果显示,两盘单独的滑移量也是高位岩层较大, $A'$ 、 $A$  点在不同刚度下的位移量如图 13(d) 所示。图 13(a) 为不同接触面参数下监测点  $A'-A$  的相对滑移量。由图 13(a) 可知,当工作面距断层 100 m 时,两点的相对滑移量接近为 0,表明此时工作面距断层较远,受断层影响较小,随着工作面的不断推进,工作面距断层的距离不断减小,两点的相对滑移量逐渐增加;而且,随着接触面刚度的不断增加,两点的相对滑移量不断减小。图 13(b)、(c) 为不同接触面参数下  $B'-B$ 、 $C'-C$  的相对位移图。由图 13(b)、(c) 可知,距煤层垂直距离 30 m 的  $B'-B$  点的滑移先开始,在工作面推进至距断层 70 m 时,两点的相对滑移逐渐显现,随着工作面的推进逐渐增加。距离煤层上方垂直距离 10 m 的  $C'-C$  点的滑移是工作面推进至距断层面 20 m 开始,工作面从 20 m 推进至 10 m 时相对滑移量陡增至 0.4 m,接触面参数对该点的断层滑移影响不显著。从三点的相对滑移量和距离煤层的距离可以看出,在一定范围内,距离煤层垂直距离较高的岩层,从低到高断层相对滑移量逐渐增加。随着开采的进行,工作面推进至断层从远至近,断层滑移量逐渐增加,并且岩层层位较低的岩层处的断层滑移相对较高的岩层滑移相对迟缓。

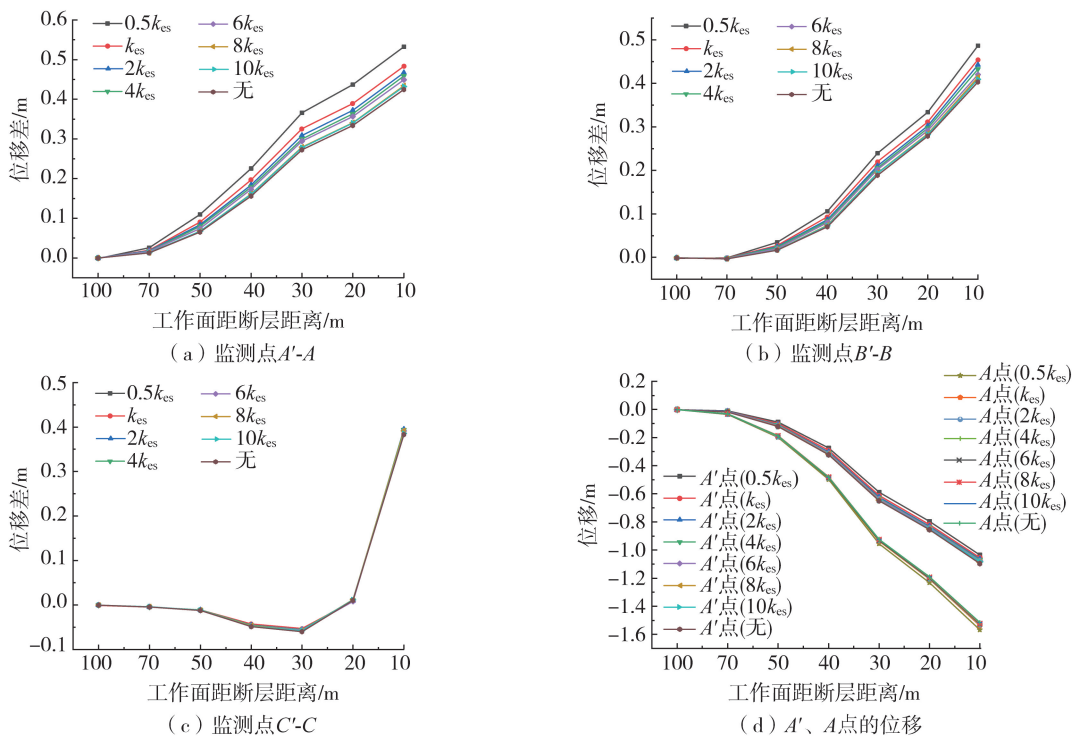


图 13 工作面开采时不同接触面参数条件下断层监测点的位移

Fig. 13 Displacement of fault monitoring points under different interface parameters in working face mining process

#### 2) 断层带厚度的影响

图 14 为工作面开采时不同断层带厚度下断层监测点的位移。由图 14 可知,随着工作面的推进,断层两盘的位移差不断增加,在一定垂直距离范围内,岩层层位高的点比层位低的点滑移量要大。随着断层带厚度的增加,断层两盘的滑移量呈现增加的趋势。图 14(a) 为上位岩层  $A'-A$  点的相对滑移。由图 14(a) 可知,在工作面距离断层较远的 100 m 时,滑移量较小,当工作面推进至距断层 70 m 时,两点的相对滑移量逐渐增加,随着断层带厚度的增加,断层相对滑移的趋势逐渐增加。图 14(b) 为  $B'-B$  点的相对位移图。由图 14(b) 可知,当工作面推进 50 m 时,两点开始出现明显的滑移量,随着工作面的推进,滑移量逐渐增加,总体两点的滑移量相对  $A'-A$  两点的滑移量要小,当断层带厚度为 5 m 时,两点的相对滑移趋势比较平缓,当距断层面 50~10 m 时,滑移增量为 0.4 m,随着断层带厚度的增加,滑移趋势增加,断层带厚度为 13 m 时,当距断层面 50~10 m 时,滑移增量为 0.85 m。图 14(c) 为  $C'-C$  点的相对位移图,当工作面推进至断层 40~20 m 时,两点的滑移量不显著,当工作面推进至 20~10 m 时两点的相对滑移量陡增,断层带厚度为 13 m 时,最大滑移量为 0.65 m。图 14(d) 为  $B'$ 、 $B$  两点各自的垂直位移图。由图 14(d) 可知,随着层厚的增加,断层上盘  $B'$  点的

位移量逐渐减小,断层下盘  $B$  点的位移量逐渐增加。断层上盘的  $B'$  点的位移,随着工作面的推进,位移变化相对平缓,距断层面为 50~10 m 时,断层带厚度为 5 m 时,位移增量 0.64 m,断层带厚度为 13 m 时,位移增量 0.35 m。断层下盘的  $B$  点的位移,距断层面为 50~10 m,断层带厚度为 5 m 时,位移增量 1.05 m,断层带厚度为 13 m 时,位移增量 1.21 m。

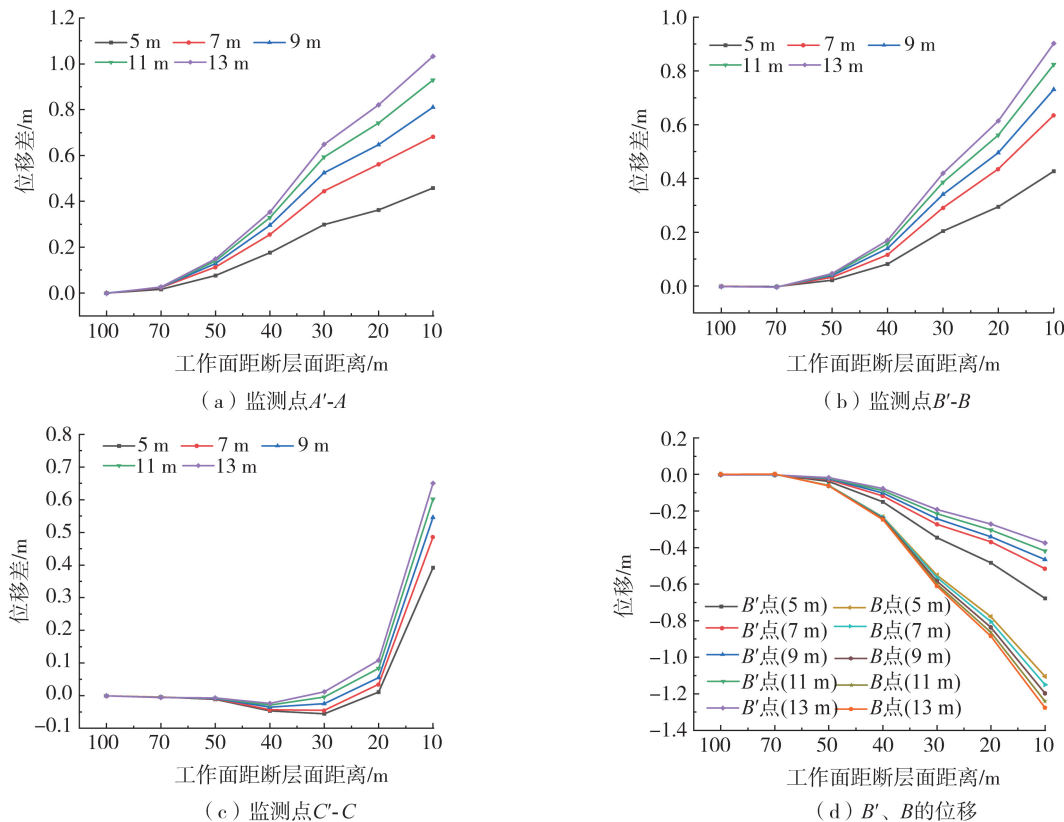


图 14 工作面开采时不同断层带厚度下断层监测点的位移

Fig. 14 Displacement of fault monitoring points under different fault zone thicknesses in working face mining process

## 5 讨论

为分析该正断层破碎带条件下的断层滑移特征,重新对 5 m 模型进行开挖计算,开挖分为 2 个阶段:第一阶段,分部开挖距离 20 m,直至距采场工作面距断层 60 m;第二阶段进行开挖,开挖距离为 10 m。图 15 给出了开挖过程中工作面前方应力峰值的变化情况。由图 15 可知,在工作面从模型边界推进至采场工作面距离断层 60 m 的过程中,应力峰值逐渐上升,从 26.21 MPa 上升至 65.59 MPa,自采场工作面距离工作面 60 m 开始,工作面前方的应力开始下降,并向断层方向转移,此时,采场的采掘活动与断层的滑移处在相互影响阶段;当工作面推进至距离断层 20 m 时,再次开挖后,工作面前方应力发生突降,从 50.18 MPa 下降至 24.73 MPa,应力降低 50.72%。研究表明,当采场工作面推进至距离断层 15 m 时,此时的采掘活动有可能导致断层的滑移突变和工作面结构的失稳。

从工作面采场结构的顶板下沉、煤壁变形及底板鼓起三个方面统计采场结构的破坏情况,统计结果如图 16 所示。由图 16 可知,采场结构明显变形主要表现在顶板下沉和煤壁变形两个方面,底板的变形量并不显著,顶板下沉量在采场工作面推进至距离断层 60 m 时逐渐增加,而后在工作面推进至距离断层 20 m 以前有所减小,当工作面至断层距离从 20 m 开挖至 10 m 时,顶板下沉量剧增,从 0.420 m 下降至 0.695 m。煤壁变形量在工作面距离断层 80 m 以前逐渐增加,从工作面距断层 80~20 m 逐渐减小,当工作面距离断层从 20 m 减小至 10 m 时,煤壁变形量剧增至 0.366 m。

综上所述,正断层破碎带影响下的采场结构破坏在断层激活距离以前缓慢增加,当达到断层激活距离时,受断层滑移影响,变形量有所减小,当靠近至断层带时,采场结构的变形量剧增,有可能导致采场结构的失稳。

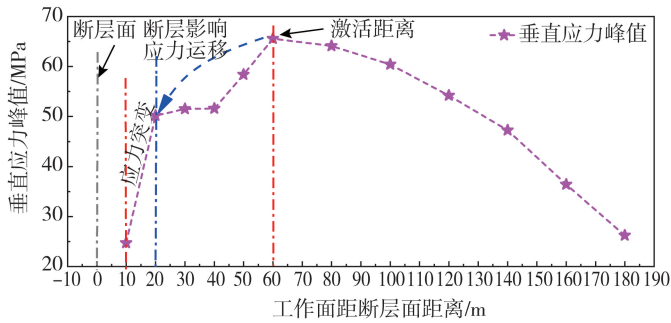


图 15 重新开挖下的模型采场工作面峰值应力变化

Fig. 15 Variation of peak stress in the working face of the model stope under re-excitation

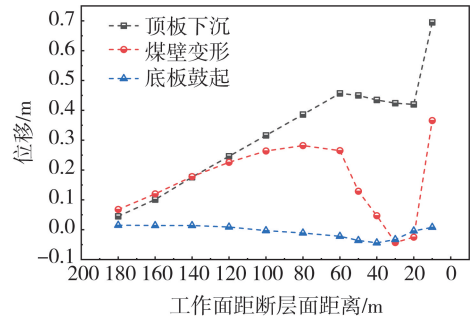


图 16 工作面位移变化情况

Fig. 16 Displacement variation of working face

## 6 结论

本文通过数值方法,研究了断层带和断层面共同作用下断层对采动的影响,得出如下结论:

1) 正断层条件下,断层带和断层接触面共同存在条件下,断层面参数的选取与岩层的岩性相关,断层面的参数对于模型平衡有一定的影响,随着模型接触面刚度的不断加大,模型平衡计算时步数逐渐减小,无接触面时的计算平衡时步数最小。

2) 接触面参数对于采动的影响,随着接触面参数的增大,断层附近煤柱内的应力有所升高,主要由于断层面的存在,断层的滑移挤压,对煤柱起到一定的泄压作用。受接触面参数影响,随着接触面刚度的增加,应力峰值增大,无接触面时的应力峰值最高。在断层面附近,同样随着接触面刚度的增加,应力呈现上升的趋势。而断层附近受工作面采动影响,位移有一定变化,呈现出先增大后减小的趋势,至工作面方向位移量逐渐增大,断层面附近的位移随着接触面参数的增加逐渐增加,但增加的幅度较工作面顶板的位移量小。

3) 断层带厚度对于采动的影响,随着工作面不断的向断层面推进过程中,断层处的应力逐渐对工作面前方的应力产生一定的影响,应力集中逐渐由工作面最终转移至断层面,开挖后的煤层顶底板由于应力的释放,出现低应力区域,工作面前方一段距离出现应力升高区域,煤层内的支撑压力在工作面前方呈现先升高后降低的趋势。

4) 不同接触面参数下随着距离煤层的垂直距离的增加,高位岩层的断层两侧的位移差较低位岩层的位移差大,计算结果显示,两盘单独的滑移量也是高位岩层较大。不同断层带厚度下,随着工作面的推进断层两盘的位移差不断增加,在一定垂直距离范围内,岩层层位高的点比层位低的点滑移量要大。随着断层带厚度的增加,断层两盘的滑移量呈现增加的趋势。

## 参考文献:

- [1] 张杰,张瀚,梁政. 跨断层埋地油气管道屈曲行为研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 267-271, 448.  
ZHANG Jie, ZHANG Han, LIANG Zheng. Buckling behavior of buried pipeline crossing strike-slip fault [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(2): 267-271, 448. (in Chinese)
- [2] 刘爱文,胡聿贤,李小军,等. 大口径埋地钢管在地震断层作用下破坏模式的研究[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 82-87.  
LIU Aiwen, HU Yuxian, LI Xiaojun, et al. Damage behavior of large-diameter buried steel pipelines under fault movements [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 82-87. (in Chinese)
- [3] 李鹏,蔡美峰,郭奇峰,等. 煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 1-17.  
LI Peng, CAI Meifeng, GUO Qifeng, et al. Research situations and development tendencies of fault slip rockburst in coal mine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 1-17. (in Chinese)
- [4] 耿萍,吴川,唐金良,等. 穿越断层破碎带隧道动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1406-1413.  
GENG Ping, WU Chuan, TANG Jinliang, et al. Analysis of dynamic response properties for tunnel through fault fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1406-1413. (in Chinese)
- [5] 张社荣,王宽,王高辉,等. 近断层地震动方向性效应对混凝土重力坝累积损伤特性的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 44-53.  
ZHANG Sherong, WANG Kuan, WANG Gaohui, et al. Effects of the directivity of near fault ground motions on accumulated damage of concrete gravity dams [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 44-53. (in Chinese)
- [6] 王学滨,白雪元,侯文腾,等. 开采与均布荷载条件下无粘结双层叠梁变形-开裂-垮落的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2018, 35(6): 1326-1332, 1424-1425.

- WANG Xuebin, BAI Xueyuan, HOU Wenteng, et al. Numerical simulation of the deformation-cracking-collapsing of double-layer beams with no cohesions under uniform loading and excavation [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(6): 1326–1332, 1424–1425. (in Chinese)
- [7] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses[J]. Engineering, 2021, 7(5): 687–700.
- [8] WEI C C, ZHANG C G, CANBULAT I. Numerical analysis of fault-slip behaviour in longwall mining using linear slip weakening law[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103541.
- [9] SAINOKI A, MITRI H S. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 66: 19–29.
- [10] WANG H W, JIANG Y D, XUE S, et al. Influence of fault slip on mining-induced pressure and optimization of roadway support design in fault-influenced zone[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5): 660–671.
- [11] 梁建文, 吴泽群, 辛钰, 等. 断层错动下盾构隧道抗震措施研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(1): 1–11.  
LIANG Jianwen, WU Zequn, XIN Yu, et al. Seismic countermeasures of shield tunnel under fault movement[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(1): 1–11. (in Chinese)
- [12] 徐龙军, 刘庆阳, 谢礼立. 海底跨断层输气管道动力特性数值模拟与分析[J]. 工程力学, 2015, 32(12): 99–107.  
XU Longjun, LIU Qingyang, XIE Lili. Numerical simulation and analysis for submarine pipeline systems crossing active strike-slip fault[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(12): 99–107. (in Chinese)
- [13] 张雨霆, 肖明, 左双英. 基于单元重构的岩土工程复杂地质断层建模方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1848–1855.  
ZHANG Yuting, XIAO Ming, ZUO Shuangying. Methodology for modeling of complex geological faults in geotechnical engineering based on element reconstruction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1848–1855. (in Chinese)
- [14] 于秋鸽. 上下盘开采断层滑移失稳诱发地表异常沉降机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 41–50.  
YU Qiuge. Mechanism of abnormal subsidence induced by fault slipping instability during mining on hanging-wall and foot-wall[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 41–50. (in Chinese)
- [15] 于秋鸽, 张华兴, 张玉军, 等. 采动影响下断层活化机理及影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊1): 18–30.  
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, ZHANG Yujun, et al. Analysis of fault activation mechanism and influencing factors caused by mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 18–30. (in Chinese)
- [16] 朱广安, 窦林名, 刘阳, 等. 采动影响下断层滑移失稳的动力学分析及数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 27–33.  
ZHU Guang'an, DOU Linming, LIU Yang, et al. Dynamic analysis and numerical simulation of fault slip instability induced by coal extraction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 27–33. (in Chinese)
- [17] 蒋金泉, 武泉林, 曲华. 硬厚岩层下逆断层采动应力演化与断层活化特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 267–277.  
JIANG Jinquan, WU Quanlin, QU Hua. Characteristic of mining stress evolution and activation of the reverse fault below the hard-thick strata[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 267–277. (in Chinese)
- [18] 姜耀东, 王涛, 赵毅鑫, 等. 采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 1–5.  
JIANG Yaodong, WANG Tao, ZHAO Yixin, et al. Numerical simulation of fault activation pattern induced by coal extraction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 1–5. (in Chinese)
- [19] 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 Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 60–64. (in Chinese)
- [20] 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. (in Chinese)
- [21] SUN Q Q, DIAS D. Significance of Rayleigh damping in nonlinear numerical seismic analysis of tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 489–494.
- [22] MAYORAL J M, FLORES F A. Effects of soil cracking on the seismic response of soil-structure systems[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(6): 509–523.
- [23] MAYORAL J M, TEPALCAPA S, ROMAN-DE LA SANCHA A, et al. Ground subsidence and its implication on building seismic performance[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105766.
- [24] 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, 545.  
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, 545. (in Chinese)
- [25] 徐乃忠, 高超. 正断层存在的地表沉降特殊性规律研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 101–106.  
XU Naizhong, GAO Chao. Study on the special rules of surface subsidence affected by normal faults[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 101–106. (in Chinese)
- [26] 朱广安, 蒋鹏翥, 伍永平, 等. 应力波扰动作用下断层滑移失稳的数值反演[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(2): 370–379.  
ZHU Guang'an, JIANG Qipeng, WU Yongping, et al. Numerical inversion of dynamic behavior of fault slip instability induced by stress waves[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 370–379. (in Chinese)
- [27] 王宏伟, 邵明明, 王刚, 等. 开采扰动下逆冲断层滑动面应力场演化特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2318–2327.  
WANG Hongwei, SHAO Mingming, WANG Gang, et al. Characteristics of stress evolution on the thrust fault plane during the coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2318–2327. (in Chinese)