

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.03.015

# 采动影响下逆断层特征参数对断层活化的作用规律

徐晓惠<sup>a</sup>, 吕进国<sup>b,c</sup>, 刘 闯<sup>a</sup>, 白润才<sup>a</sup>, 李 胜<sup>a</sup>

(辽宁工程技术大学 a.矿业学院; b.矿山安全技术装备研究院;  
c.力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**笔者分析了采动影响下断层滑移的主要影响因素,以数值模拟为研究手段,利用FLAC<sup>3D</sup>建立了逆断层简化模型,分析了不同断层倾角、不同落差及采掘工作面与断层不同距离的断层带附近煤岩体弹性能、断层面正应力与剪应力、断层滑移量的变化规律,从而揭示了采动影响下逆断层特征参数对断层活化的基本作用规律。研究结果表明:上盘或下盘开采,断层带附近煤岩体弹性能集中程度随工作面与断层距离的增大而降低,随断层倾角及落差的增加而增大,但下盘开采对断层带的能量集中程度较上盘高。下盘开采时剪应力较上盘显著增加,但正应力变化较小,易于断层活化。上盘或下盘开采,随工作面与断层距离的增加,断层滑移量减小。上盘开采,随断层倾角增大,断层滑移量增加;随断层落差增大,断层滑移量减小。下盘开采,随断层倾角增大,断层滑移量减小;随断层落差的增大,断层滑移量增加。

**关键词:**逆断层;断层活化;断层倾角;断层落差;特征参数;弹性能;正应力;剪应力;滑移量

**中图分类号:**TD163

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2015)03-0108-09

## Influence law of fault activation induced by coal extraction based on characteristic parameters of thrust fault

XU Xiaohui<sup>a</sup>, LÜ Jinguo<sup>b,c</sup>, LIU Chuang<sup>a</sup>, BAI Runcai<sup>a</sup>, LI Sheng<sup>a</sup>

(a. College of Mining and Engineering; b. Research Institute for  
Technology & Equipment of Coal Mine Safety; c. School of Mechanics and  
Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P.R.China)

**Abstract:** The main factors of fault slip are analyzed in this paper. A simplified model of thrust fault is constructed by FLAC<sup>3D</sup> and the basic change law of elastic energy, vertical stress, shear stress and slippage of fault plane in the conditions of different distance from the fault, different fault dips and different throws is analyzed. And then the influence law of fault activation induced by coal extraction based on the characteristic parameters of thrust faults is revealed. The study results show that the elastic energy near faults will decrease with the distance increases from faults and will increase with fault dips or fault throws increase in the hanging wall or the footwall mining. But the focus level of elastic energy is high in the footwall mining. Vertical stress and shear stress variation of the different characteristic parameters is complicated. In a word, the increase of shear stress is obvious and the variation of vertical stress is not obvious. And the situation is prone to faults activation. Fault slippage will decrease with the distance increase from faults in the hanging wall mining or the footwall mining. And fault slippage will increase with

**收稿日期:**2015-03-10

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51004063)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51004063).

**作者简介:**徐晓惠(1964-),男,博士研究生,主要从事采矿工程技术及管理工作,(E-mail)634252780@qq.com。

fault dips increase and will decrease with fault throws increase in the hanging mining. If faces are mined in the footwall, the reverse results will show.

**Key words:** thrust fault; fault activation; fault dip; fault throw; characteristic parameter; elastic energy; vertical stress; shear stress; slippage

随着采深的逐年增加,中国大部分煤矿将进入深部开采,煤层赋存环境更加复杂,在开采过程中地质构造发育区域易发生冲击地压、煤与瓦斯突出等矿山动力灾害,尤其断层构造带更易发生<sup>[1-3]</sup>。例如,2003年,芦岭煤矿“5·13”瓦斯爆炸事故,冲击地压诱发引起,84人死亡;2005年,孙家湾煤矿“2·14”瓦斯爆炸事故,冲击地压诱发引起,214人死亡;2011年,义马千秋煤矿发生“11·3”冲击地压事故,75人被困,10人死亡。上述案例中,冲击地压事故都是由断层诱发而成,根据地质力学的观点<sup>[4]</sup>,逆断层构造带附近更易发生冲击地压等动力灾害,这是由于在水平方向的构造应力强烈挤压作用下,断层两盘围岩更易发生弯曲,易于积聚大量的弹性能。一旦断层两盘发生相对滑动将直接导致断层带围岩积聚的弹性能瞬间释放,造成重大矿山伤亡事故<sup>[5]</sup>。因此,国内外专家学者对断层滑移机制进行了大量研究,取得了一定的进展。但由于断层滑移机理较为复杂,尚没有形成统一认识,目前仍无法指导实践。实验室相似模拟实验能较好地模拟开采过程中断层滑动现象,但多次改变断层特征参数的重复性实验,将要消耗大量的人力物力。然而,数值模拟方法可以较为方便地对断层滑动进行力学分析,从而探讨多种参量对断层滑动的诱导作用,是一种十分有效的研究手段<sup>[6-10]</sup>。

笔者分析了断层滑移的影响参量,利用FLAC<sup>3D</sup>构建逆断层简化模型,通过数值模拟的手段,研究了在采掘过程中距断层不同距离、不同断层倾角及落差条件下,断层面正应力、剪应力、两盘滑移量及断层带弹性能的基本变化规律,从而揭示采动影响下逆断层特征参数对断层活化的作用规律。

## 1 断层滑动的主控因素

根据地质力学的观点,断层附近往往会存在较为复杂的构造应力场,使得断层带的坚硬煤岩体易于积聚大量的弹性应变能。在煤层的开采活动中,断层受到采动的影响,使得断层的稳定状态受到破坏,导致断层发生活化,最终演变成断层失稳滑动,断层的突然滑移会诱发煤岩体体积聚的弹性能瞬间释放,形成冲击地压、矿震等矿山动力灾害。

以往的研究表明<sup>[1-3,9-16]</sup>,断层面正应力与剪应力的变化会是断层发生失稳滑动的主要影响因素。断层面正应力的减小或剪应力的增加都可能造成断层带两盘的相对滑动。

因此,断层面正应力与剪应力的变化规律、断层带附近的能量分布规律、断层两盘相对滑移量变化规律是判别断层发生失稳滑动的主要参量。

## 2 数值模型的构建

义马跃进煤矿 25 110 工作面主要开采 2-1 煤层,采深 800~1 200 m,煤层厚度 7.4~13.8 m,煤层较脆,硬度较低( $f=1$ ),煤层倾角 12°,属于缓倾斜特厚煤层。煤层赋存稳定,整体上沿走向上巷变化不明显,下巷东部厚西部薄。煤层伪顶为 0.2 m 厚的砂质泥岩,直接顶为 18 m 厚的泥岩,局部裂隙与节理发育,易破碎;老顶为超过 100 m 的巨厚坚硬砾岩;直接底为 4 m 厚的深灰色泥岩。

以义马跃进煤矿 25 110 工作面为工程背景,根据不同断层倾角、落差及工作面与断层面不同距离的条件,建立了多个数值模型。模型的长、宽、高略有不同,但大致为长 670 m,宽 200 m,高 152 m,单元个数约为 21 万,如图 1 所示<sup>[16]</sup>。

该模型位移边界为:顶端自由端,底端边界固定,断层下盘限制  $x$ 、 $y$  水平方向的移动,上盘限制  $x$  方向的移动。应力边界为:顶端施加相当于上覆岩层 850 m 自重载荷,根据义马矿区逆冲断层附近地应力资料,设定在上盘施加的水平  $y$  方向应力为自重应力的 1.2 倍。首先,选用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则来判断煤岩体的破坏;在开挖阶段,煤体重新选用应变软化模型来反映破坏后随着变形发展,强度逐渐弱化的性质。参数如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

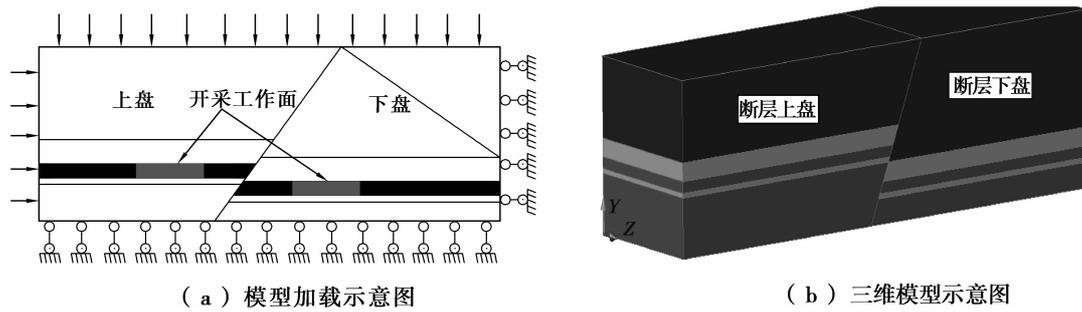


图 1 模型示意图

Fig.1 Diagram model

表 1 煤岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of stratum

岩性	厚度/ m	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	内凝聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	容重/ (kg · m <sup>-3</sup> )
砂砾岩	100	41.99	0.20	4.0	20.0	40	2 707
泥岩	16	4.92	0.35	3.0	5.0	35	2 461
煤	10	3.30	0.16	0.5	1.5	30	1 440
泥岩	4	4.92	0.35	3.0	5.0	35	2 461
砂岩	25	17.55	0.24	4.0	7.0	38	2 873

### 3 断层区域弹性能的分布特征

#### 3.1 距断层不同距离的弹性能分布特征

如图 2 所示,上盘开采过程中,当工作面与断层相距 20 m 时,临近断层带的巷道一侧煤岩体弹性应变能高度集中;当工作面与断层逐渐远离时,临近断层带的巷道一侧弹性能集中程度逐渐减弱;在工作面与断层相距 80 m 时,断层带附近弹性能集中效应基本消失,临近断层带的巷道受断层影响很小。

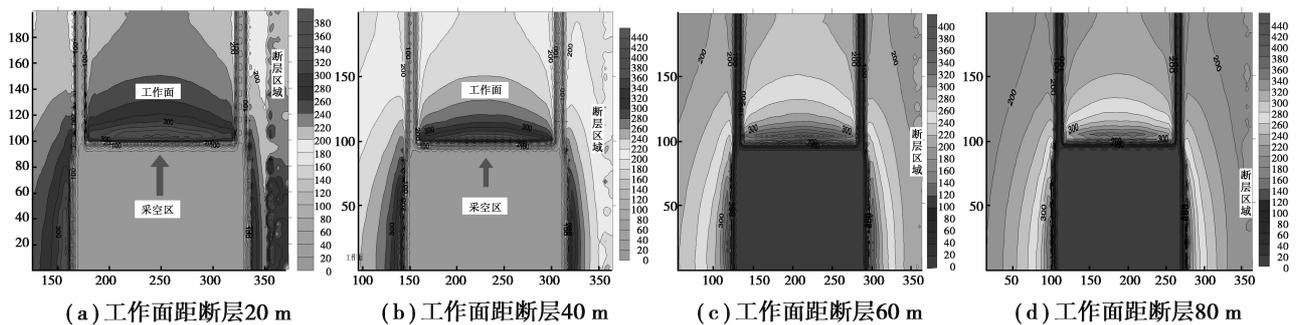


图 2 上盘开采距断层不同距离的能量分布

Fig.2 Energy distribution of different distances from the hanging wall

由图 3 可知,工作面下盘开采且工作面距断层 20 m 时,断层一侧已采区域弹性应变能集中程度与上盘开采相比,明显增高。当工作面与断层相距 80 m 时,临近断层带的煤岩体弹性应变能集中程度仍然很高,但靠近断层带的一侧巷道受断层影响仍旧很小。可见,断层带附近的弹性能集中程度随着工作面与断层距离的不断变远而逐渐降低,但下降较慢且仍保持较高的水平。

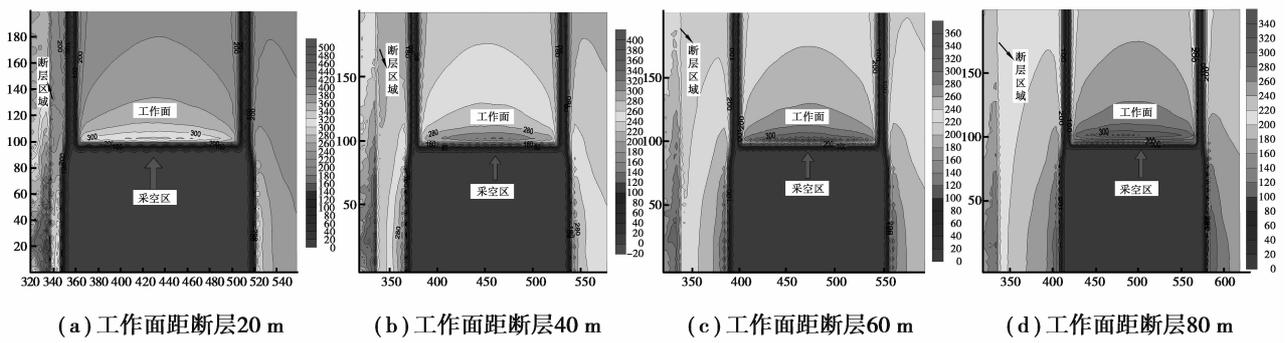


图 3 下盘开采距断层不同距离的能量分布

Fig.3 Energy distribution of different distances from the footwall

### 3.2 不同断层倾角弹性能分布特征

由图 4 可知,在上盘开采中,当断层倾角为  $30^\circ$  且与断层相距 40 m 时,断层带附近区域煤岩体的弹性应变能未出现集中现象;当断层倾角为  $45^\circ$ ,断层带附近区域的弹性能开始显现轻微的集中现象;当断层倾角达到  $75^\circ$ ,断层带附近区域的弹性应变能出现了高度集中现象,但对临近断层一侧的巷道影响仍然有限。

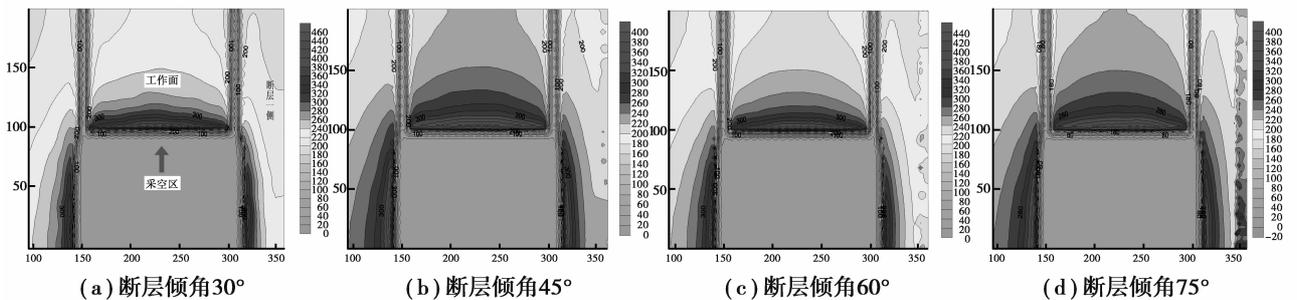


图 4 上盘开采不同断层倾角能量分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of elastic energy of different fault dips for the hanging wall mining

由图 5 可知,下盘开采过程中,当断层倾角为  $30^\circ$  时,断层带附近区域的弹性应变能集中程度与上盘开采相比,显著上升;当断层倾角为  $45^\circ$  时,断层带附近区域弹性能呈现出高度的集中现象;断层带区域的弹性能集中程度随着断层倾角的不断增加而增强,断层倾角对下盘开采的影响与上盘开采相比,影响程度更大。

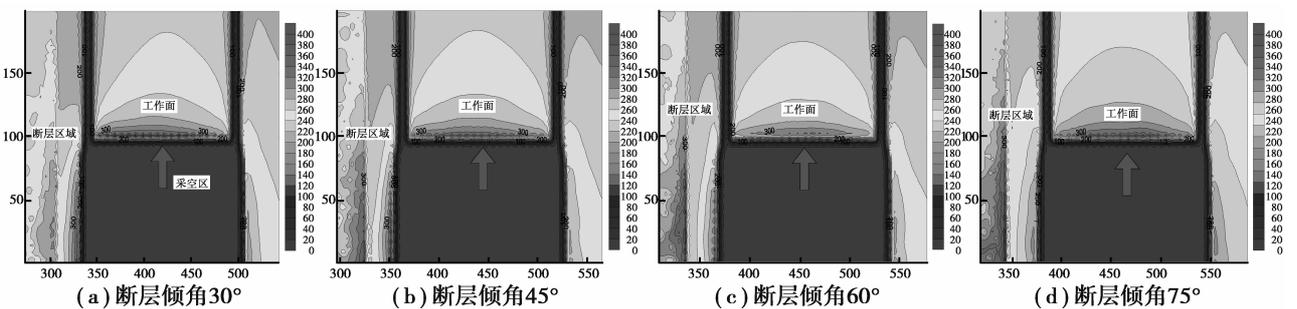


图 5 下盘开采不同断层倾角能量分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of elastic energy of different fault dips for the footwall mining

### 3.3 不同断层落差弹性能分布特征

由图 6 可知,当在上盘开采时,断层带附近煤岩体弹性应变能的集中程度随着断层落差的增大而显著增高。由图 7 可知,当在下盘开采时,断层带附近煤岩体弹性应变能的集中程度与上盘开采的规律相一致,但影响程度比上盘开采显著。

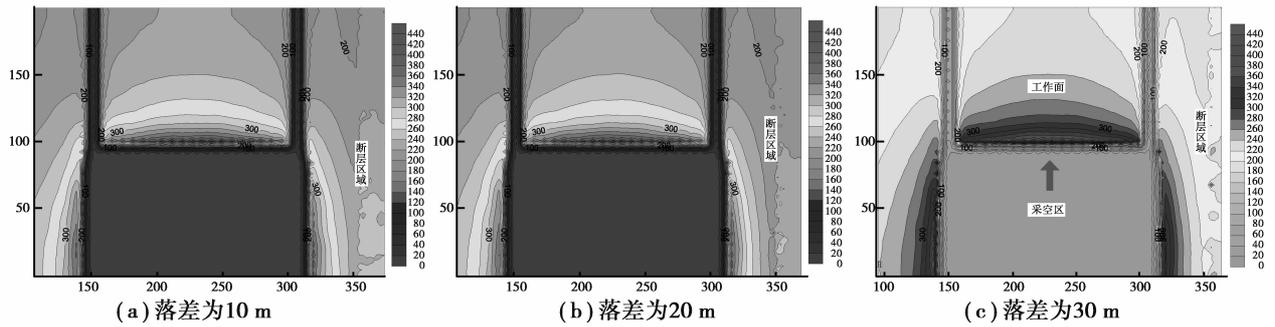


图6 上盘开采不同断层落差能量分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of elastic energy of different fault throws for the hanging wall mining

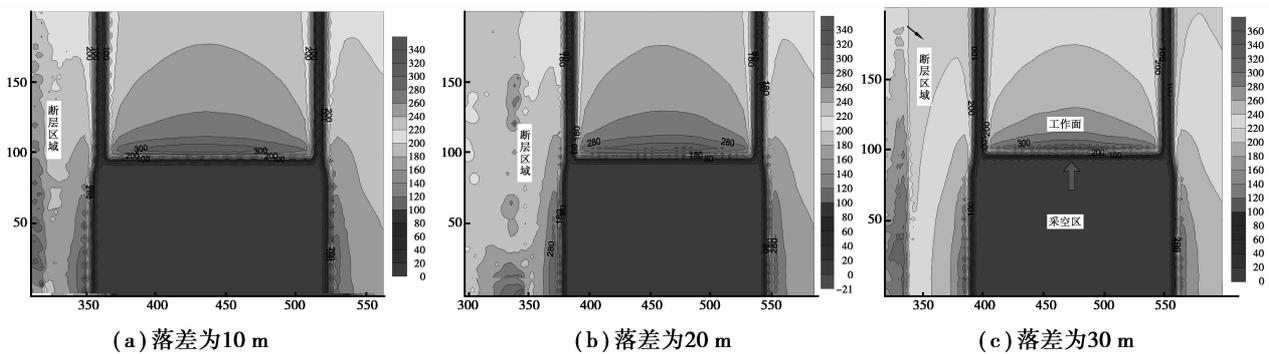


图7 下盘开采不同断层落差能量分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of elastic energy of different fault throws for the footwall mining

## 4 断层面应力场及滑移量变化特征

当工作面已回采了 90 m 时,在回采区域与未开采区域所对应的断层面上共布置 6 个监测点,且每隔 40 m 设置 1 个观测点,断面上的观测点均位于煤层上方的顶板处。

### 4.1 距断层不同距离的断层滑移特征

如图 8(a)所示,上盘开采时,断层面正应力的整体趋势为:随着工作面与断层距离的不断减小而逐渐增加,已采的区域与未采区域相比,断层面的正应力增加幅度更大。随着回采工作面逐渐远离切眼位置,断层面正应力呈现出线性减小的趋势。当工作面距断层 40 m 时,断层面的正应力最大。

如图 8(b)所示,在未采区域(工作面与切眼距离大于 90 m 处),断层面的剪应力总体趋势为:随着工作面与断层距离的增加而增大;在已采区域,当工作面与断层相距 20 m 时,断层面剪应力最大。

如图 8(c)所示,下盘开采过程中,在已采区域内,当工作面与断层相距 20 m 时,断层面正应力最小;在未采区域内,当工作面与断层相距 20 m 时,断层面正应力最大。

如图 8(d)所示,在已采区域内,工作面与断层相距 20 m 时,断层面剪应力最小;其他距离时,采空区域剪应力保持较高水平。在未采区域内,断层面剪应力随工作面与断层距离的增大而减小。

如图 9(a)所示,上盘开采过程中,断层面上、下两盘滑移量随着工作面与断层距离的增大而减小,且在已采区域与未采区域相比,断层滑移量的增加幅度更大。如图 9(b)所示,下盘开采时,断层滑移量与上盘开采的变化规律相似,但滑移量增加幅度比上盘大,尤其工作面与断层相距 20 m 时(在已回采区域内),断层滑移量突然快速增加,易导致断层的失稳滑动。

### 4.2 不同断层倾角的断层滑移特征

如图 10(a)所示,上盘开采,随工作面持续向前推进,无论断层倾角多大,断层面正应力呈现出下降趋势。在已采区域,断层面正应力在断层倾角为  $30^\circ$  与  $45^\circ$  时,下降幅度较快,且断层面正应力在倾角为  $30^\circ$  的最小;

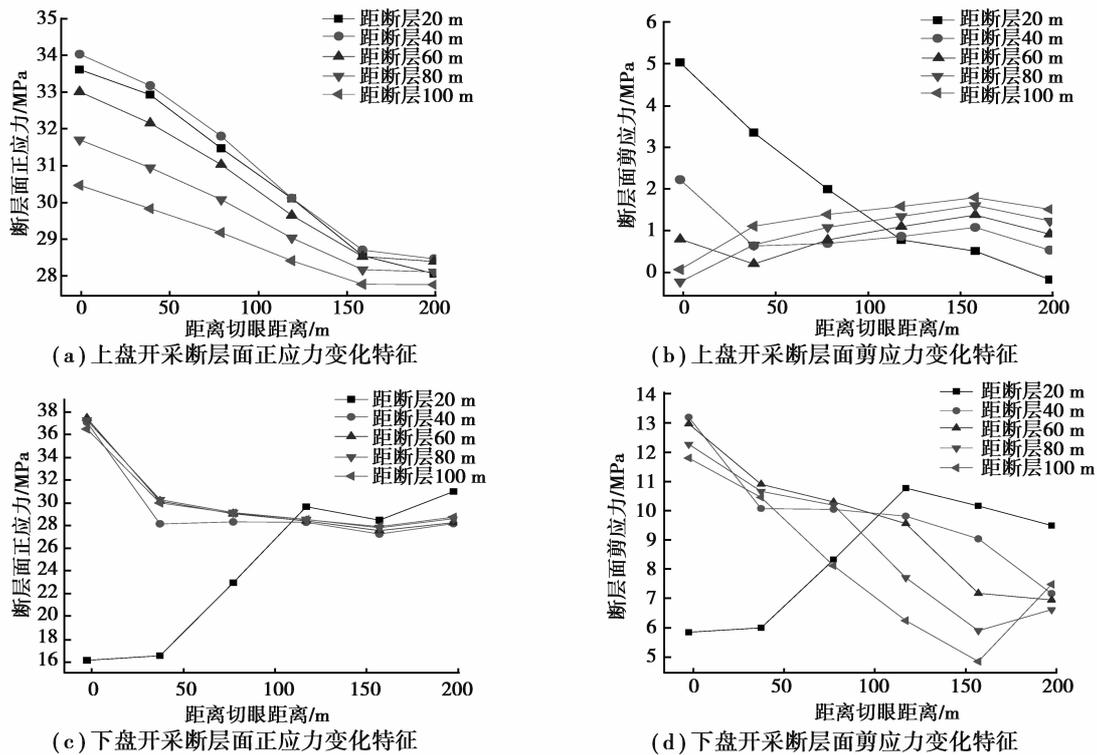


图 8 工作面距断层不同距离的断层面正、剪应力变化特征

Fig.8 Variation characteristics of normal stress and shear stress of different distances face from the fault

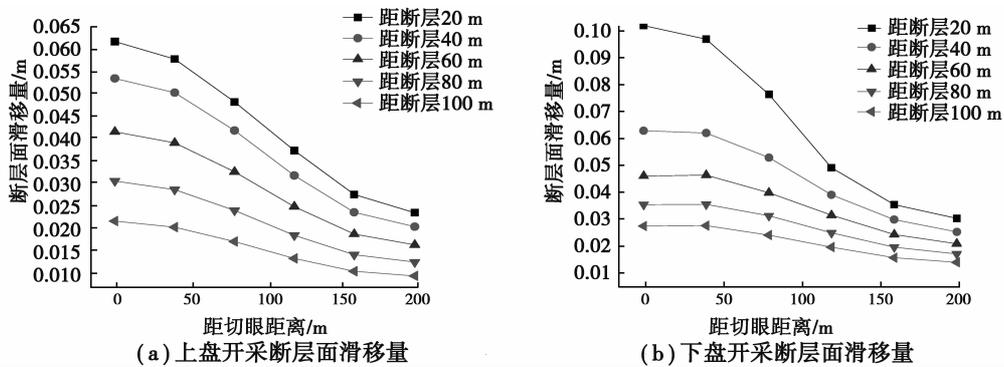


图 9 工作面距断层不同距离的断层面滑移量变化特征

Fig.9 Slippage variation characteristics of different distances of face from the fault

在未采区域,断层面正应力随倾角增加而增大。如图 10(b)所示,在已采区域,断层面剪应力变化规律并不显著;在未采区域,断层面剪应力随断层倾角的增大而减小。

如图 10(c)所示,下盘开采时,断层面正应力随断层倾角增加而增大,尤其在已采区域,增大较为显著;未采区域,增大幅度较小。如图 10(d)所示,断层面剪应力总体趋势与正应力变化规律相似。总体来看,下盘开采,剪应力增长幅度比上盘大。

如图 11(a)所示,上盘开采时,断层滑移量随断层倾角的增加而增大,断层滑移量在已采区域与未采区域相比,增加幅度较大。从图 11(b)可知,下盘开采时,在已采区域内,断层滑移量随断层倾角的增加而突然迅速减小,断层滑移量的突然大幅度变化,断层容易发生失稳滑动。

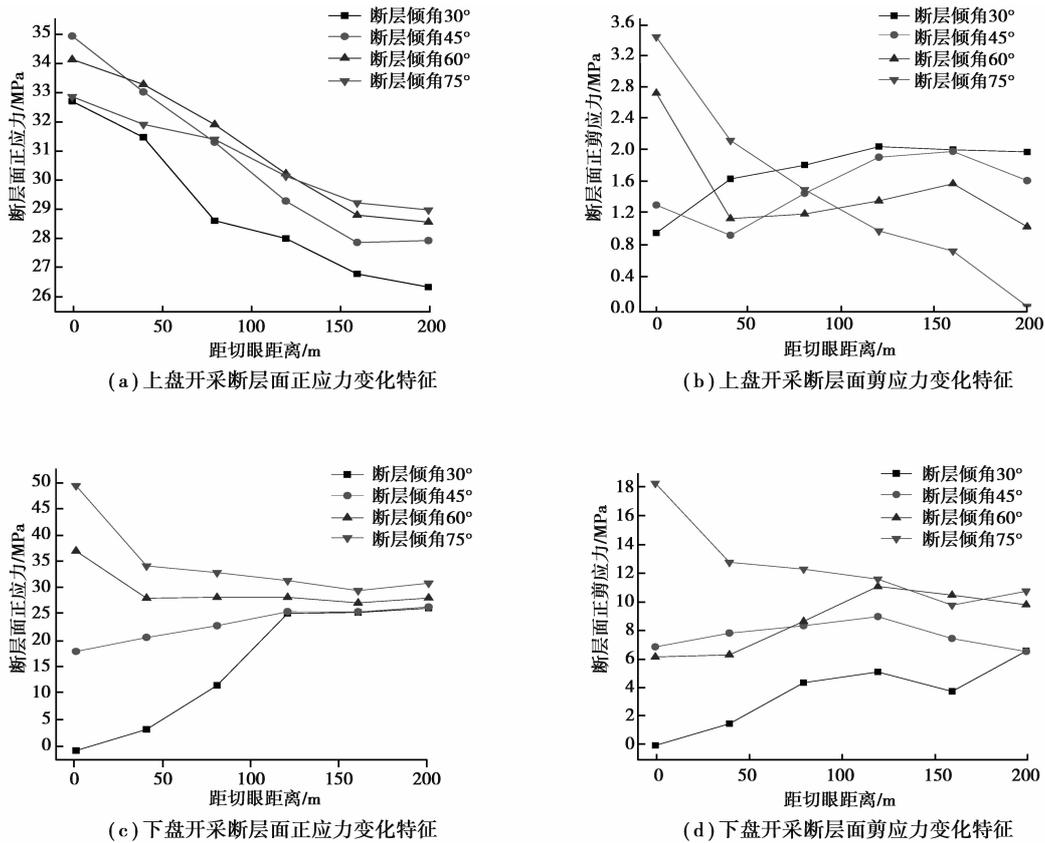


图 10 不同断层倾角的断层面正、剪应力变化特征

Fig.10 Normal stress and shear stress variation characteristics of different fault dips

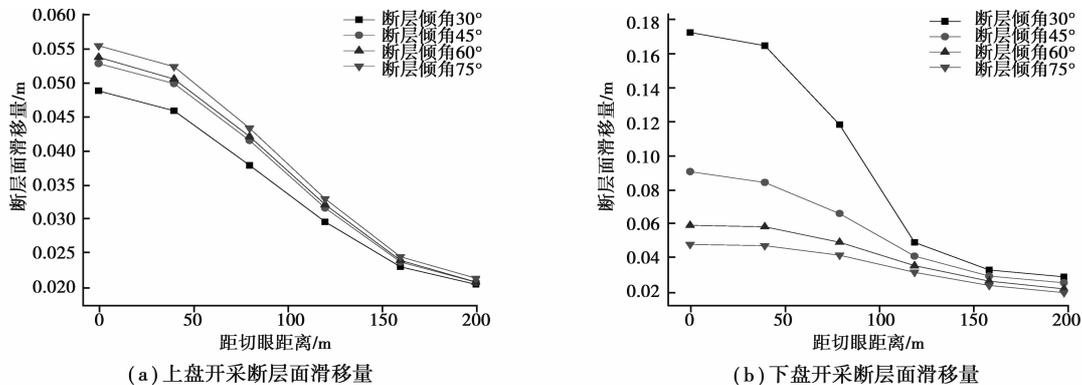


图 11 不同断层倾角的滑移量变化特征

Fig.11 Slippage variation characteristics of different fault dips

### 4.3 不同断层落差的断层滑移特征

从图 12(a)可知,上盘开采时,已采区域的断层面正应力较高,未采的区域相对较低,但断层面正应力的变化趋势整体呈现出随断层落差的增大而增高。如图 12(b)所示,在已采区域,断层面剪应力总体趋势为随断层落差的增大而增高;在未采区域,落差为 20 m 时,断层面剪应力最大,落差为 10 m 的剪应力最小。

如图 12(c)、(d)所示,在下盘开采时,断层面正应力随落差的增加而减小,剪应力随落差的增大而增大,两者在已采区域变化幅度较大,未采区域变化幅度较小。下盘开采时,正应力较上盘开采减小,剪应力较上盘开采增大。此种情况,易于断层滑动。

从图 13(a)可知,上盘开采时,断层两盘滑移量总体趋势为:随断层落差增大而减小,其中,当断层落差为 30 m 时,其滑移量最小。如图 13(b)所示,下盘开采时,在已采区域内,断层滑移量随落差的增加而增大,增大的幅度较上盘显著。

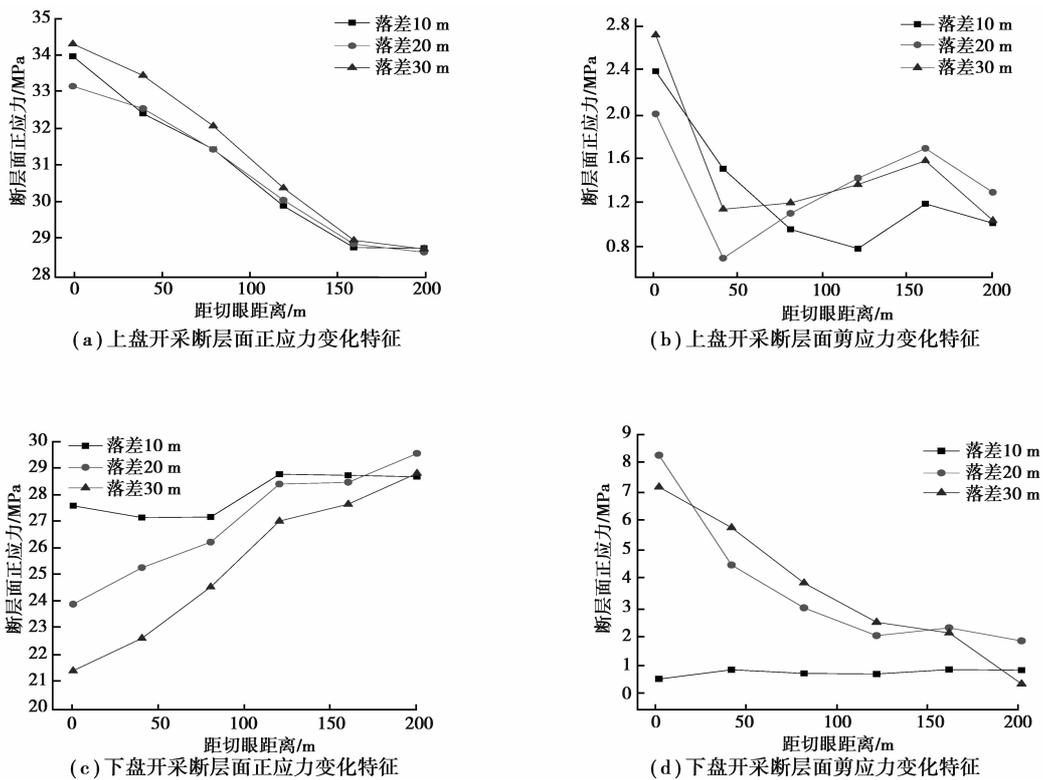


图 12 不同断层落差的断层面正、剪应力变化特征

Fig.12 Normal stress and shear stress variation characteristics of different fault throws

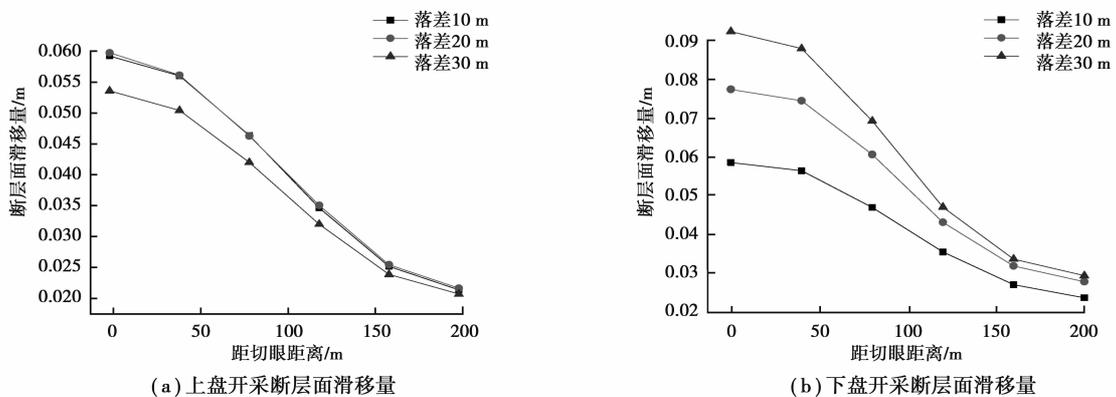


图 13 不同断层落差的断层面滑移量变化特征

Fig.13 Slippage variation characteristics of different fault throws

## 5 结 论

1) 断层上盘开采时, 临近断层带的弹性应变能集中程度随与断层距离的增大而减弱; 随着断层倾角及落差的增大而增强。下盘开采与上盘趋势类似, 但随着工作面远离断层, 能量下降较慢且仍保持较高水平; 随断层倾角及落差的不断增大, 断层带能量较上盘显著增加。可见, 下盘开采对断层带的影响比上盘大。

2) 在断层上盘与下盘开采时, 工作面距断层不同距离、不同断层倾角及不同落差条件下, 断层面正应力与剪应力变化规律明显不同且较为复杂。总体来说, 剪应力在下盘开采时较上盘显著增加, 但正应力变化较小。因此, 下盘开采更易于断层的活化。

3) 上盘或下盘开采, 随工作面与断层距离的增加, 断层滑移量不断减小; 上盘开采时, 随着断层倾角的增大, 断层滑移量不断增加; 下盘开采, 随断层倾角的增大, 断层滑移量不断减小, 但随落差的增大而增加; 总体而言, 断层滑移量的变化幅度较上盘开采大。

## 参考文献:

- [1] 姜耀东,赵毅鑫,刘文刚,等.煤岩冲击失稳的机理和实验研究[M].北京:科学出版社,2009.  
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, LIU Wengang, et al. Investigation on the mechanism of coal bumps and relating experiments[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 齐庆新,窦林名.冲击地压理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.  
QI Qingxin, DOU Linming. Rock burst theory and technologies[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008.
- [3] 潘一山,王来贵,章梦涛,等.断层冲击地压发生的理论与试验研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):642-649.  
PAN Yishan, WANG Laigui, ZHANG Mengtao, et al. The theoretical and testing study of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642-649.
- [4] 王存文,姜福兴,刘金海.构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J].煤炭学报,2012,37(S2):263-268.  
WANG Cunwen, JIANG Fuxing, LIU Jinhai. Analysis on control action of geologic structure on rockburst and typical cases[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 263-268.
- [5] 尹光志,张东明,代高飞,等.脆性煤岩损伤模型及冲击地压损伤能量指数[J].重庆大学学报,2002,25(9):75-77.  
YING Guangzhi, ZHANG Dongming, DAI Gaofei, et al. Damage model of rock and the Damage energy index of rockburst[J]. Journal of Chongqing University, 2002, 25(9): 75-77.
- [6] 彭苏萍,孟召平,李玉林.断层对顶板稳定性影响相似模拟试验研究[J].煤田地质与勘探,2001,29(3):1-4.  
PENG Suping, MENG Zhaoping, LI Yulin. Influence of faults on coal roof stability by physical modeling study[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(3): 1-4.
- [7] 王宏伟.长壁孤岛工作面冲击地压机理及防冲技术研究[D].北京:中国矿业大学,2011.  
WANG Hongwei. Investigation on the mechanism and prevention technology of coal bump in island long-wall mining face[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2011.
- [8] 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):1-6.  
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 and Technology, 2013, 42(1): 1-6.
- [9] 李志华.采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.  
LI Zhihua. Research on rockburst mechanism induced by fault slip during coal mining operation[D]. Xu zhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [10] 李志华,窦林明,陆振裕,等.采动诱发断层滑移失稳的研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):499-504.  
LI Zhihua, DOU Linming, LU Zhenyu, et al. Study of the fault slide destabilization induced by coal mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(4): 499-504.
- [11] 周光文,刘文岗,姜耀东,等.强采场冲击地压的能量积聚释放特征分析[J].采矿与安全工程学报,2008,25(1):73-77.  
ZHOU Guangwen, LIU Wengang, JIANG Yaodong, et al. Characteristics of energy accumulation and release of rock outburst in mining face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(1): 73-77.
- [12] Jiang Y, Wang H, Xue S, et al. Assessment and mitigation of coal bump risk during extraction of an island longwall panel[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 95(2): 20-33.
- [13] Wang J, Park H D. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 49-57.
- [14] 马瑾,马胜利,刘力强,等.断层几何结构与物理场的演化及失稳特征[J].地震学报,1996,18(2):200-207.  
MA Jin, MA Shengli, LIU Liqiang, et al. Geometrical textures of faults, evolution of physical field and instability characteristics[J]. Acta Seismological Sinica, 1996, 18(2): 200-207.
- [15] 左建平,陈忠辉,王怀文,等.深部煤矿采动诱发断层活动规律[J].煤炭学报,2009,34(3):205-309.  
ZUO Jianping, CHEN Zhonghui, WANG Huaiwen, et al. Experimental investigation on fault activation pattern under deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 205-309.
- [16] 吕进国.巨厚坚硬顶板条件下逆断层对冲击地压作用机制研究[D].北京:中国矿业大学,2013.  
LU Jinguo. Influence mechanism research of coal bump induced by thrust fault based on huge thick and hard roof[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.