



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

任 政,张科学,姜耀东.采动下逆断层活化过程中工作面应力场响应研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9): 61-68. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.009

REN Zheng,ZHANG Kexue,JIANG Yaodong.Research on response of stress field in working face during thrust fault activation process under mining disturbance[J].Coal Science and Technology,2021,49(9):61-68. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.009

采动下逆断层活化过程中工作面应力场响应研究

任 政^{1,2},张科学^{1,3,4,5},姜耀东^{1,2,5}

(1.中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083;2.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院;
3.华北科技学院 智能化无人开采研究所,北京 101601;4.河北省矿山智能化开采技术重点实验室,河北 廊坊 065201;
5.中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘 要:为了分析开采扰动与逆断层耦合作用下工作面应力状态变化情况,通过数值模拟手段,引入滑移倾向性指标 T_s 对下盘工作面回采过程中逆断层的复杂活化过程进行了综合定量分析,得到了开采扰动下逆断层对工作面应力状态的影响。分析结果表明:逆断层受开采扰动的影响会发生阶段性的转变,且可以划分为 3 个阶段:准静态阶段、活化阶段、滑移错动阶段。准静态阶段,逆断层面 T_s 处于活化危险基准面之下,逆断层面整体位移矢量沿着断层向上;活化阶段,逆断层小部分区域 T_s 位于活化危险基准面之上,逆断层面位移矢量由原来的向上开始向下逐渐转变;滑移错动阶段,逆断层面绝大部分区域位于活化危险基准面之上,逆断层发生大范围的向下滑动。断层在阶段性转变过程中对工作面支承压力影响不明显,但是,逆断层面倾角变化对工作面支承压力有着明显的影响,且断层倾角越小,工作面超前支承压力集中系数越大,越容易诱发冲击地压的发生。

关键词:冲击地压;断层活化;滑移倾向性;工作面支承压力

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)09-0061-08

Research on response of stress field in working face during thrust fault activation process under mining disturbance

REN Zheng^{1,2}, ZHANG Kexue^{1,3,4,5}, JIANG Yaodong^{1,2,5}

(1.State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3.Institute of Intelligent Unmanned Mining, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 4. Hebei Provincial Key Laboratory of Mine Intelligent Unmanned Mining Technology, Langfang 065201, China; 5.State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to analyze the change of the stress state of the working face under the coupling effect of mining disturbance and reverse fault, by means of numerical simulation, the slip tendency index T_s was introduced to comprehensively and quantitatively analyze the complex activation process of reverse faults in the mining process of footwall working face, and the influence of reverse faults on the stress state of working face under mining disturbance was obtained. The analysis results show that the reverse fault will undergo phase changes under the influence of mining disturbance, and it can be divided into three phases: quasi-static phase, activation phase, and slip dislocation phase. In the quasi-static phase, T_s value of the reverse fault is below the activation hazard base level, and the overall displacement vector of the reverse fault is upward along the fault. In the activation phase, T_s value of a small part of the reverse fault is up the activation hazard base level, and the slip direction of the partial fault area change from up to down along the fault. In the slip phase, most of the reverse fault plane is located above the activation danger base level, and the reverse fault slides downward in a large range. The influence of the

收稿日期:2021-03-22;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804160);中央高校基本科研业务费资助项目(3142019009);河北省自然科学基金资助项目(E2019508209)

作者简介:任 政(1991—),男,山西吕梁人,博士研究生。E-mail:sx290rz@163.com

通讯作者:张科学(1986—),男,河南永城人,副研究员,博士,现任华北科技学院智能化无人开采研究所所长、国家安全生产监督管理总局煤矿机械自动化关键技术研发平台主任。E-mail:zhkexue@163.com

fault on the bearing pressure of the working face is not obvious during the phase transition. But the change of the fault dip angle has a significant effect on the abutment pressure of the working face. The smaller the fault dip angle, the greater the concentration coefficient of the leading bearing pressure in the working face, and the easier it is to induce the occurrence of coal bumps.

Key words: coal-bump; fault activation; slip tendency; working face abutment pressure

0 引言

随着开采深度的加深,井下面临着“三高一扰动”的深部问题^[1-3],造成我国冲击地压现象越来越严重。针对这种重大的井下灾害,相关学者进行了大量的研究,根据冲击地压的诱发因素不同,可以将冲击地压分为不同的类型^[4-5],断层型冲击地压作为其中一种冲击范围大、破坏强度高的类型,被学界通过数值模拟、相似模拟^[6-13]、试验与理论推导^[14-17]等方法广泛研究。其中,SAINOKI 等^[18]通过数值模拟软件分析了矿体开挖过程中断层属性对断层活化过程中释放能量的影响,发现断层内摩擦角对其影响最为强烈;姜耀东等^[19]进行了砂岩-煤组合试样的双剪切摩擦试样,根据滑移量与应力状态将活化过程划分为:平静期、加速器和稳定期 3 个阶段;王涛等^[20]通过数值模拟方法对比分析上盘开采与下盘开采过程中断层面应力状态,认为下盘开采断层活化危险性更大;张科学等^[8]得出了采动影响断层发生滑移活化的 3 个阶段(失稳期、滑移期和活化期),提出了断层滑移活化诱发巷道冲击地压机理;王涛等^[21]应用数值散斑方法,进行了相似模拟试验,分析了上盘开采工作面不断逼近断层面过程中围岩位移场以及断层面滑移量与应力状态,发现断层远端受回采扰动影响较为敏感;蒋金泉等^[22]采用三维数值模拟方法对比了逆断层上下盘开采过程中采动应力演化与断层活化规律,发现下盘开采断层活化危险程度高于上盘开采;焦振华等^[23]通过损伤变量得到了逆断层不同属性对断层损伤变量的敏感度。

工作面采动过程中,存在围岩应力场的重新分布,这种应力重分布的过程对断层作用机制是动态的;受这种动态作用机制的影响,断层面发生复杂的力学行为,最终发生滑移错动。断层的这种复杂力学过程对工作面应力状态造成影响,诱发冲击地压灾害。因此,探明采动与断层活化对工作面应力场的耦合作用有助于进一步探明断层型冲击地压机理。由于断层活化过程以及断层本身的存在改变了井下环境,通过试验以及理论推导手段完整地还原采动应力场对断层的影响比较困难。目前研究多单一地关注采动应力场或者断层活化过程本身,对

于断层活化过程的综合性分析以及断层与采动对工作面应力场耦合作用机制研究相对较少。

笔者通过活化倾向性指标 T_s 、断层面三维位移矢量以及断层面应力状态,综合性地分析了受采动影响,逆断层阶段性活化及其对工作面应力状态影响,进一步分析了逆断层性质对工作面应力状态的影响。旨在明确指出逆断层与采动复杂的相互作用机制,以期为采动影响下逆断层冲击地压机理提供一定的理论参考。

1 采动下与逆断层活化机制数值分析

1.1 义马煤田工程概况

河南义马煤田为一冲击地压事故多发矿区,义马煤田地质地貌复杂,辖区范围内伴生丘陵、沟壑、断层、褶曲等地质构造,如图 1 所示。其中, F_{16} 逆断层横贯义马煤田,该断层为一压扭性逆断层,属于三门峡~平舆断层的组成部分,在陕澠~义马矿区延展长度约 45 km,浅部在中、上侏罗统刚性砾岩中,断层倾角为 75° 左右,深部在柔性泥质岩层和煤层中,倾角变小,倾角一般 $15^\circ \sim 35^\circ$,逆冲面上陡下缓,断距由耿村矿向东至千秋矿、跃进矿、常村矿逐渐变小,垂直落差 50~500 m。

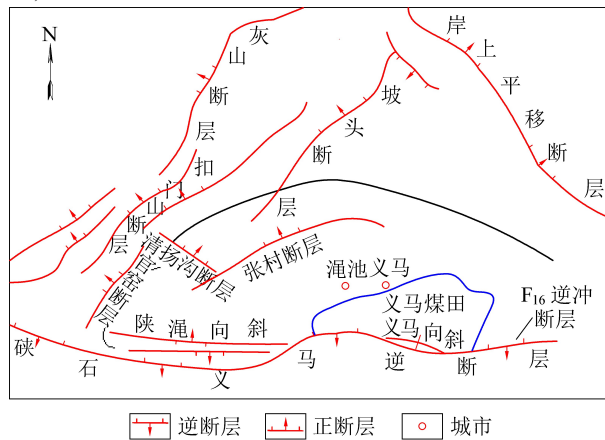


图 1 义马矿区地质构造

Fig.1 Geological structure of Yima Mining Area

1.2 数值模型建立

基于义马煤田地质资料,对相关参数进行折减优化后,运用 FLAC^{3D} 软件建立数值模型,模型尺寸与开采方式如图 2 所示,模型高 109 m,走向长 200 m,倾向长 400 m。图中,蓝色区域代表煤层,红色区域代表逆断层面,白色箭头所指的方向为工作

面推进方向。断层倾角为 45°、断层落差 20 m。下盘工作面布置如图 3 所示。工作面长 120 m,沿倾向方向推进,煤层两侧留有边界煤柱。

在数值模拟过程中,选取了断层面上轴线上分别靠近原岩、顶板、煤层与底板岩层区域的 4 个不同测点,如图 4 所示,监测这 4 个测点切向应力、法向应力与滑移倾向性指标。

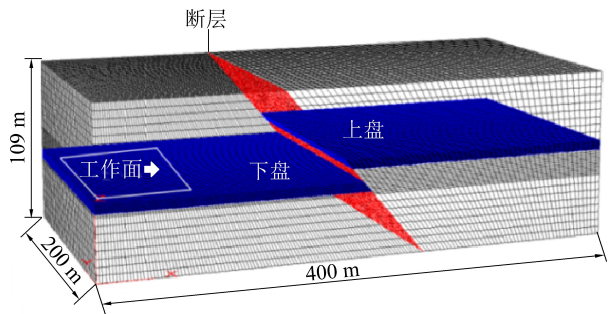


图 2 三维数值模型示意
Fig.2 3D numerical model diagram

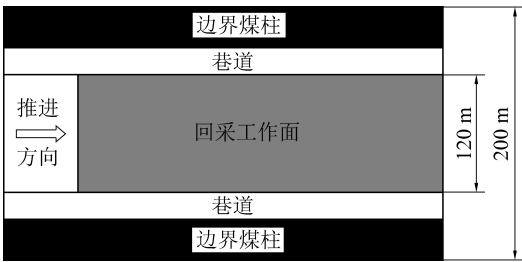


图 3 工作面布置示意
Fig.3 Schematic layout of working face

断层面以接触面代替,模型采用摩尔库仑破坏准则。模型边界条件:模型埋深 1 000 m,顶部为自由边界,施加上覆岩层自重应力,模型四周施加水平方向的位移约束,施加侧向压力,底部边界固定^[12-13]。各岩层力学性质参数见表 1,断层力学性质参数如下:

法向刚度/GPa	30
切向刚度/GPa	30
抗拉强度/MPa	0.5
内摩擦角/(°)	45

表 1 各岩层力学性质参数

Table 1 Mechanical parameters of each rock layer					
岩性	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
底板	12.1	9.2	4.7	2.8	37
煤层	1.6	1.4	2.4	0.2	32
顶板	10.4	7.3	3.9	2.1	30
上覆岩层	13.3	10.8	5.1	3.2	34

1.3 断层滑移倾向性指标 T_s

FLAC^{3D}中接触面本构模型选用库仑剪切破坏

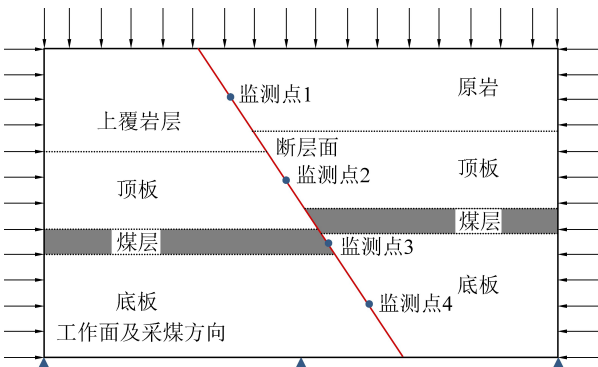


图 4 断层面各测点示意
Fig.4 Position diagram of each measuring point on the fault model,根据库仑剪切破坏准则可以给出接触面节点发生滑动所需要的切向力为

$$F_{\max} = C_i A + F_n \tan \varphi_i \tag{1}$$

式中: F_{\max} 为节点滑动切向力; C_i 为接触面节点上的黏聚力; φ_i 接触面节点内摩擦角; A 为接触面节点代表面积; F_n 为接触面节点法向力。

考虑到黏聚力相对于节点上的切向力与法向力来说很小,可以将其忽略,因此公式(1)两端除以面积 A ,简化后可以写作

$$\tan \varphi_i = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_n} \tag{2}$$

公式(2)为断层临近破坏时,切向应力与法向应力的关系,同样地,可以定义断层面任意时刻的切向应力 τ 与法向应力 σ_n 之间的比值为滑移倾向性 T_s ,即

$$T_s = \frac{\tau}{\sigma_n} \tag{3}$$

文献[24]根据滑移倾向性指标与断层摩擦因数,给出了断层活化瞬间两者的关系,对应于接触单元为:当 $T_s \geq \tan \varphi_i$ 时,可以判定该接触面节点发生破坏;当 $T_s < \tan \varphi_i$ 时,认为该接触面节点处于弹性阶段。

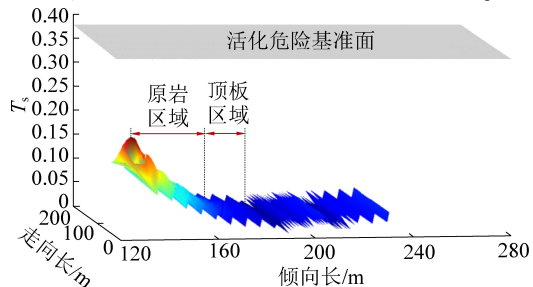
2 采动影响下逆断层活化过程分析

2.1 逆断层滑移倾向性 T_s 空间分布

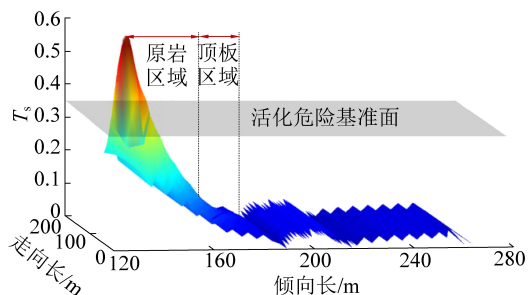
工作面推进到距离断层不同位置时 T_s 空间分布如图 5 所示。图中灰色平面给出了以 $T_s = \tan \varphi_i$ 面为基准的活化危险面,该基准面之下的区域处于稳定状态,高于该基准面的断层区域为活化危险区域。分析发现:靠近原岩处断层区域为整个断层面中断层活化性指标最高的区域,靠近顶板区域次之,靠近煤层与底板处断层面 T_s 相对处于较低的水平。

受采动影响,断层面 T_s 空间分布情况会随着工作面不断逼近而变化。当开采工作面距离断层面

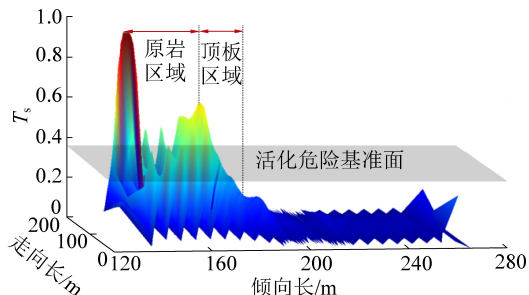
127 m 时,整个断层区域处于活化危险基准面之下,此时整个断层面处于准静态;当工作面推进到距断层 67 m 时,部分靠近原岩区域处的断层面 T_s 超过了活化危险基准面,该区域断层处于活化危险状态;当工作面继续推进到距断层 27 m 时,靠近原岩区域附近断层面 T_s 基本全部超过活化基准面,完全进入活化阶段;部分靠近顶板断层面 T_s 超过活化基准面,该区域断层开始由准静态转入活化阶段。



(a) 工作面距断层127 m



(b) 工作面距断层67 m



(c) 工作面距断层27 m

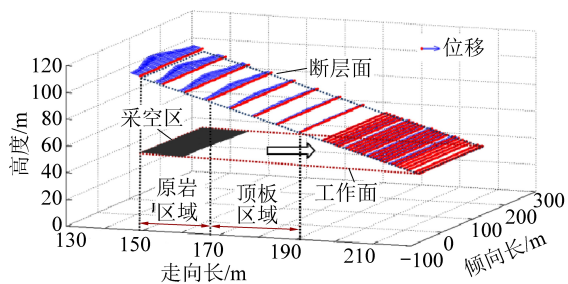
图5 工作面距断层不同位置处断层面 T_s 空间分布Fig.5 Spatial distribution of T_s value of fault with different distance between working face and fault

总体来说,随着工作面不断向逆断层逼近,断层面上部区域最先发生活化,且该活化趋势由上至下不断蔓延。但是在整个蔓延过程中,靠近煤层与底板区域断层面 T_s 一直位于活化基准面之下,保持在准静态。

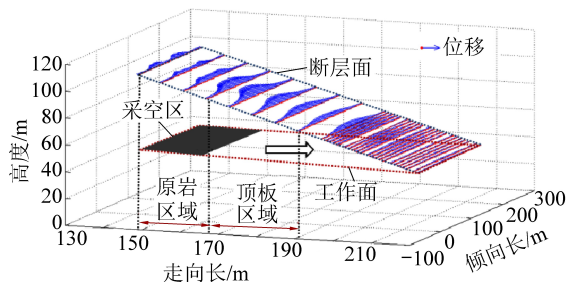
2.2 逆断层位移阶段性转变分析

工作面到断层面不同距离时,断层下盘位移如图6所示。由图6能够更加直观地看出断层面整体位移的趋势,有助于分析断层活化过程中各阶段的

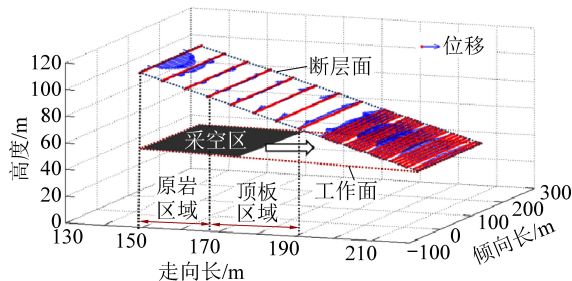
变化情况。



(a) 工作面距断层127 m



(b) 工作面距断层67 m



(c) 工作面距断层27 m

图6 工作面距断层不同位置断层下盘位移三维示意

Fig.6 Three-dimensional schematic of displacement of fault with different distance between working face and fault

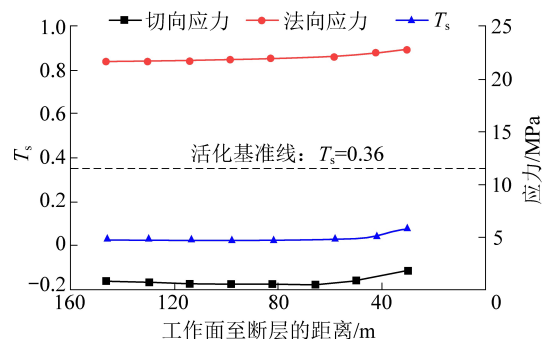
开采初期工作面距离断层较远,为 127 m 时,整个逆断层面受水平应力的主控影响,上下盘之间相互咬合,逆断层下盘整体存在较小的向上位移,断层处于准静态。位移最大值位于断层面中轴线处,且由中轴线位置沿两侧对称逐渐减小;随着工作面不断推进,到距离断层 67 m 时,下盘上部靠近原岩区域位置位移方向由原先的整体向上逐渐弱化转变为向下的趋势,而靠近原岩区域以下位置的断层面仍然保持着向上的位移趋势。从图 6b 中可以看出,特别是断层面下盘上部区域中轴线位置,这种趋势的转变尤其明显,此时断层面开始进入活化阶段;当工作面继续推进到距离断层 27 m 时,从图 6c 可以看出,下盘大部分靠近原岩区域断层面发生了向下的滑移,靠近顶板区域的断层面位移趋势也由向上转变为向下滑移,此时部分断层面进入滑移错动阶段。

因此,由断层面位移三维变化情况可以看出:断

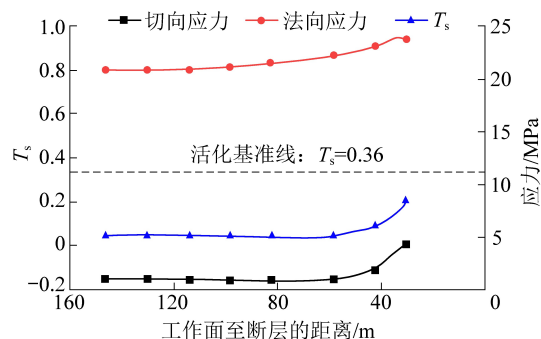
层面受采动影响发生活化,上部区域最先发生反应,由准静态阶段逐渐向活化阶段转变,随着开采工作面不断接近断层面,断层面上部区域进入错动阶段,且将该活化趋势由上向下蔓延,进一步扩大至大部分断层面,造成大规模的滑移。

2.3 逆断层滑移倾向性及应力状态变化分析

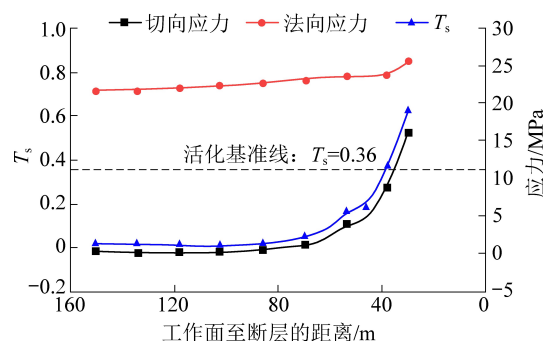
根据上述内容分析,断层面中轴线位置为整个



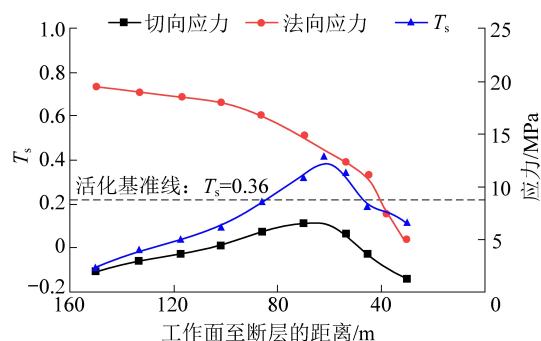
(a) 底板区域



(b) 煤层区域



(c) 顶板区域



(d) 原岩区域

图 7 不同岩层区域附近断层面应力与滑移倾向性变化曲线

Fig. 7 Curves of stress and slip tendency of fault close to different strata

靠近底板区域的断层面测点在整个回采过程中,切向应力、法向应力均保持在较为平缓的水平,相应的 T_s 变化不大,远低于活化基准线以下,该区域断层面一直处于准静态;靠近煤层区域处,断层面应力状态在工作面推进至距断层 60 m 左右位置前,处于平缓状态。小于 60 m 之后,断层面切向应力开始快速增长,法向应力相对增速缓慢, T_s 相应地快速增长,但在整个过程中仍然处于活化基准线之下,因此靠近煤层区域断层面同样处于准静态;靠近顶板断层面区域处切向应力、法向应力与 T_s 在工作面推进至距断层 80 m 左右前一直处于平稳状态,之后切向应力增速迅速加快,相应地 T_s 也快速增长,当工作面推进至距断层 40 m 左右时, T_s 超过活化基准线,表明该区域断层面进入活化阶段;靠近原岩处断层面切向应力从工作面推进开始就快速增长,法向应力相反地快速下降,相应地 T_s 迅猛增长,在工作面推进至距离断层 80 m 左右时, T_s 超过活化基准线,

面上位移、滑移倾向性最高的位置,断层面靠近不同岩层区域处 T_s 与应力状态随工作面到断层面距离的变化如图 7 所示,工作面布置在断层下盘煤层当中,在数值模拟过程中,工作面沿倾向不断向断层面逼近,选取了靠近原岩、顶板、煤层与底板 4 个不同岩层区域断层面中轴线上的 4 个测点,监测 4 个测点切向应力、法向应力与滑移倾向性指标。

此时该区域断层面进入活化阶段。当工作面继续推进至距断层 60 m 左右时,切向应力开始下降,相应地 T_s 也开始急剧下降,此时该区域断层完全处于滑移错动阶段。

对比发现:靠近不同岩层区域处的应力状态与活化程度受采动影响变化趋势不尽相同,其中:靠近底板与煤层断层面区域,在整个工作面推进过程中切向应力与法向应力增速均较平缓, T_s 处于活化危险线以下,处于准静态阶段;靠近顶板断层面区域在工作面靠近至断层面一定距离后,切向应力迅速增加,导致 T_s 超过活化危险线,进入活化阶段;靠近原岩区域附近断层面法向应力随工作面推进不断减小,切向应力先增大后减小,对应的 T_s 迅猛增加超过活化危险性之后,断层面由准静态进入活化阶段, T_s 进一步增大至峰值后快速下降,此时,该区域断层面由活化阶段进入滑移错动阶段。

根据断层面位移、应力状态以及滑移倾向性分

析,可以将断层面活化过程分为 3 个阶段:准静态阶段、活化阶段、滑移错动阶段。准静态阶段过程中断层面 T_s 处于缓慢增长过程且处于活化基准线之下,下盘位移沿着断面向上;当 T_s 超过活化基准线之后,断层面由准静态阶段转入活化阶段,该阶段下盘位移向上趋势减弱开始向沿着断面向下的方向转变;当 T_s 到达峰值之后,断层面切向应力开始突然下降, T_s 也开始下降,此时断层进入滑移错动阶段,位移沿着断面向下。

3 逆断层对采动应力场的影响

3.1 逆断层阶段性活化对工作面应力状态影响

煤体内部应力集中程度可以一定程度的影响工

作面冲击地压的发生,因此分析了工作面超前支承压力分布曲线受断层阶段性转变过程影响的变化情况,如图 8 所示,图中红色点标出了最大超前支承压力,根据该值可以得到:工作面分别推进至距离断层 167、127、67、27 m 时,断层面靠近原岩区域经历了准静态、活化、滑移错动阶段,对应的超前支承压力应力集中系数为:1.630、1.680、1.675、1.612。超前支承压力集中系数在 1.61 ~ 1.68 间小范围浮动。可见,断层在开采扰动过程中阶段性转变对于工作面超前支撑压力没有明显的影响。

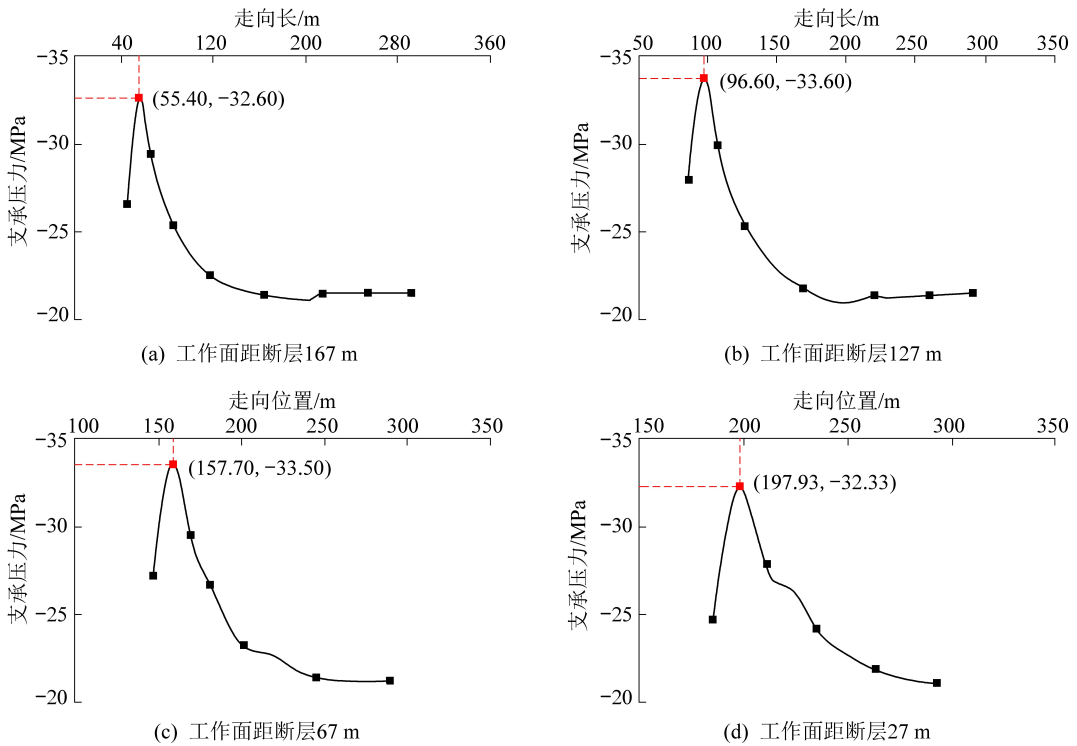


图 8 工作面距断层不同位置的超前支承压力分布曲线

Fig.8 Curve of lead abutment pressure with different distances between working face and fault

3.2 逆断层倾角对工作面应力状态影响

工作面推进 160 m 后工作面超前支承压力分布在不同断层倾角 θ 情况下的对比如图 9 所示。图 9 中红色曲线为模型所加载的原岩应力水平,为 20 MPa。图中不同倾角断层下,工作面超前支承压力在前方 40 m 范围内逐渐增大到峰值应力,随后由峰值应力缓慢减小到原岩应力水平,且倾角较小的断层相较于倾角较大断层会快速达到较高的峰值后快速下降到原岩应力水平。图中分别标注出了最大应力集中系数与最小应力集中系数,分别位于 $\theta = 30^\circ$ 、 $\theta = 55^\circ$ 所在曲线上。最大集中系数为 2.08,最小集中系数为 1.91。从图中可以看出,超前支承压

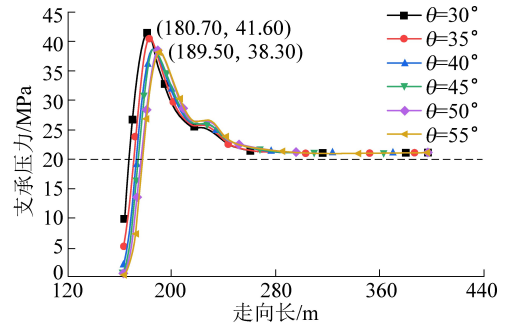


图 9 不同倾角断层工作面超前支承压力对比曲线

Fig.9 Contrast curves of the lead abutment pressure of different fault dip angles

力集中系数受到断层倾角的影响,随着断层倾角的增大,该系数由 2.08 逐渐减小到 1.91,且断层倾角为 $40^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的应力集中系数相差不多, θ 减小到 35° 之后,该系数出现明显的增大。因此,两者之间存在着非线性相关性,断层倾角越小,工作面超前支承压力集中系数越大。

4 结 论

1) 根据断层活化倾向性指标 T_s 定量分析了逆断层面活化过程,随着下盘工作面不断向逆断层逼近,逆断层面上部区域最先发生活化,并由上至下开始逐渐活化。但是在整个回采过程中,靠近煤层与底板断层面区域一直保持在准静态。

2) 综合断层面活化倾向性、位移以及应力状态,将逆断层活化过程分为 3 个阶段:准静态阶段、活化阶段以及滑移错动阶段。准静态阶段过程中断层面 T_s 增长缓慢且处于活化基准线之下,下盘位移沿着逆断层面上;当 T_s 超过活化基准线之后,断层面由准静态阶段转入活化阶段,该阶段下盘位移向上趋势减弱,开始向沿着逆断面向下的方向转变;当 T_s 到达峰值之后,逆断层面切向应力开始突然下降, T_s 也开始下降,此时逆断层进入滑移错动阶段,下盘位移沿着逆断面向下。

3) 逆断层阶段性活化过程对工作面超前支承压力没有明显的影响。但是,逆断层倾角的变化对工作面超前支承压力有着一定的影响,且逆断层倾角越小,超前支承压力集中系数越高,越容易诱发冲击地压的发生。

参考文献 (References):

- [1] 谢和平,高峰,鞠 杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, *et al.* Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1-40.
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, *et al.* Seventy years development of coal mine rockburst in China; establishment and consideration of theory and technology system [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [4] 潘一山,李忠华,章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防

- 治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2003, 22(11): 1844-1851.
- [5] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2013, 39(2): 205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 39(2): 205-213.
- [6] 吕进国,姜耀东,李守国,等. 巨厚坚硬顶板条件下断层诱冲特征及机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1961-1969.
LYU Jinguo, JIANG Yaodong, LI Shouguo, *et al.* Characteristics and mechanism research of coal bumps induced by faults based on extra thick and hard roof [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1961-1969.
- [7] 宋义敏,马少鹏,杨小彬,等. 断层冲击地压失稳瞬态过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 812-817.
SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin, *et al.* Experimental investigation on instability transient process of fault rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 812-817.
- [8] 张科学,何满潮,姜耀东. 断层滑移活化诱发巷道冲击地压机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 12-20.
ZHANG Kexue, HE Manchao, JIANG Yaodong. Mechanism research of roadway pressure bump induced by fault slip and activation [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 12-20.
- [9] 李忠华,潘一山. 基于突变模型的断层冲击矿压震级预测[J]. 煤矿开采, 2004, 9(3): 55-57.
LI Zhonghua, PAN Yishan. Forecasting scale of seismic magnitude caused by fault impact pressure based catastrophe model [J]. Coal Mining Technology, 2004, 9(3): 55-57.
- [10] 王学滨,潘一山,海 龙. 基于剪切应变梯度塑性理论的断层岩爆失稳判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 588-591.
WANG Xuebin, PAN Yishan, HAI Long. Instability criterion of fault rockburst based on gradient-dependent plasticity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(4): 588-591.
- [11] 齐庆新,史元伟,刘天泉,等. 冲击地压粘滑失稳机理的实验研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(2): 34-38.
QI Qingxin, SHI Yuanwei, LIU Tianquan, *et al.* Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst [J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(2): 34-38.
- [12] 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.
- [13] 张科学. 构造与巨厚砾岩耦合条件下回采巷道冲击地压机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 1040-1040.
ZHANG Kexue. Mechanism study of coal bump under tectonic

- and ultra-thick conglomerate coupling conditions in mining roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 1040-1040.
- [14] 王 浩, 赵毅鑫, 牟宗龙, 等. 综放工作面采动诱发逆断层张剪失稳特征及矿震活动规律分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2573-2581.
- WANG Hao, ZHAO Yixin, MOU Zonglong, *et al.* Characteristics of seismic activity and tensile-slip features of fault under stress and displacement disturbance in full-mechanized workplace[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2573-2581.
- [15] 张科学. 构造与巨厚砾岩耦合诱发冲击地压发生规律研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(12): 12-15.
- ZHANG Kexue. Occurrence regulation study of tectonic and ultra-thick conglomerate coupling induced coal bump[J]. Coal Technology, 2016, 35(12): 12-15.
- [16] 曾宪涛. 巨厚砾岩与逆冲断层共同诱发冲击失稳机理及防治技术[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014: 1-10.
- [17] 张科学. 构造与巨厚砾岩耦合条件下回采巷道冲击地压机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015: 1-30.
- [18] SAINOKI Atsushi, MITRI Hani S. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 66: 19-29.
- [19] 姜耀东, 王 涛, 宋义敏, 等. 煤岩组合结构失稳滑动过程的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 177-182.
- JIANG Yaodong, WANG Tao, SONG Yimin, *et al.* Experimental study on the stick-slip process of coal-rock composite samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 38(2): 177-182.
- [20] 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.
- [21] 王 涛, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 断层活化与煤岩冲击失稳规律的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 180-186.
- WANG Tao, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, *et al.* Experimental research on fault reactivation and relating coal bumps[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 31(2): 180-186.
- [22] 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. Characteristics of mining stress evolution and activation of reverse fault below the hard-thick strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 40(2): 267-277.
- [23] 焦振华, 赵毅鑫, 姜耀东, 等. 采动诱发断层损伤滑移及其影响因素敏感性分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 36-42.
- JIAO Zhenhua, ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, *et al.* Fault damage induced by mining and its sensitivity analysis of influencing factors[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 36-42.
- [24] 张科学. 深部煤层群沿空掘巷护巷煤柱合理宽度的确定[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 28-35.
- ZHANG Kexue. Determining the reasonable width of chain pillar of deep coal seams roadway driving along next goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 28-35.
- [25] MORRIS Alan, FERRILL David A, HENDERSON D Brent. Slip-tendency analysis and fault reactivation[J]. Geology, 1996, 24(3): 275-278.