



移动扫码阅读

王同旭,曹明辉,江东海.采动影响下断层活化失稳及能量释放规律研究[J].煤炭科学技术,2022,50(7):75-83.

WANG Tongxu, CAO Minghui, JIANG Donghai. Study on law of fault activation, failure and energy release under influence of mining[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 75-83.

采动影响下断层活化失稳及能量释放规律研究

王同旭^{1,2}, 曹明辉^{1,3}, 江东海^{1,2}

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要:为研究工作面开采邻近断层时断层活化致灾机理,基于理论分析与数值模拟的手段分析断层面应力场、位移场变化规律,探讨断层活化失稳面积变化趋势,并计算断层活化释放能量及传递到工作面的剩余能量。结果表明:断层活化分为初始活化、稳定活化、活化加剧、活化弱化 4 个阶段;断层活化位置由高位顶板处断层向煤层附近发展,底板处断层活化时间晚于顶板处断层。采动影响下断层面将出现剪切应力突降,导致能量释放;断层面剪切应力和剪切法向应力比值均呈现出稳定-增长-降低的趋势,但剪切法向应力比值变化滞后于剪切应力。采用断层活化失稳释放能量计算公式,计算工作面向断层方向推进过程中断层活化能量释放大小,计算结果与微震监测记录具有相似规律,佐证了计算方法的可行性。断层活化释放能量以负指数形式传递至工作面,断层初始活化、稳定活化、活化弱化阶段所释放的能量传递至工作面后剩余能量的量级小于 10^5 J,而活化加剧阶段释放能量传递至工作面后剩余能量大于 10^7 J。因此工作面与断层间距小于 40 m 时,受断层活化扰动影响较大,冲击危险性更高。

关键词:断层活化;应力变化;能量释放;采动影响;冲击地压

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2022)07-0075-09

Study on law of fault activation, failure and energy release under influence of mining

WANG Tongxu^{1,2}, CAO Minghui^{1,3}, JIANG Donghai^{1,2}

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study the mechanism of fault activation and disaster when the working face was mined near fault, the stress field and displacement field of the fault layer were analyzed, based on theoretical analysis and numerical simulation, the trend of fault activation and destabilization area was discussed. At the same time, the fault activation release energy and the residual energy transferred to the working face were calculated. The results show that the fault activation is divided into four stages: initial activation stage, stable activation stage, activation intensification stage, and activation weakening stage. The fault activation position develops from the fault at the high roof to the vicinity of the coal seam, and the activation time of the fault at the floor is later than that of the fault at the roof. Under the influence of mining, the shear stress of the fault surface drops abruptly and leads to energy release. The shear stress and the ratio (shear stress to normal stress) on the fault surface exhibits a trend of stability-growth-decrease, but the latter of them always lags behind the former. Using the cal-

收稿日期:2021-11-18 责任编辑:朱恩光 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-0844

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2016EEM36)

作者简介:王同旭(1963—),男,山东海阳人,教授,博士生导师。E-mail:WTX6383@163.com

通讯作者:曹明辉(1995—),男,山东济宁人,博士研究生。E-mail:caominghui7@163.com

ulation formula of the energy released by the activation and instability of the fault, the magnitude of the fault activation energy released as mining approaches the fault is calculated using the fault activation release energy formula. The calculation results are similar to the micro-seismic monitoring records, which proves the feasibility of the calculation method. The energy released by the activation of the fault is transferred to the working face in the form of a negative index. The energy released in the initial activation, stable activation, and activation weakening stages of the fault is transferred to the working face. During the activation intensification stage, the fault activation energy received by the working face is greater than 10^7 J, and the fault activation energy received by the working face at other stages is less than 10^5 J. Therefore, when the distance between the working face and the fault is less than 40 m, it is greatly affected by the disturbance of fault activation, and the impact risk is higher.

Key words: fault activation; stress change; energy release; influence of mining; rockburst

0 引 言

冲击地压是采矿开挖形成的扰动能量在煤岩体中聚集、演化和在一定诱因下突然释放的动力过程,随着煤炭资源开采逐步移向深部,冲击地压问题日益凸显,严重制约着煤矿的安全高效生产^[1-2]。统计表明,在断层附近进行煤炭资源开采更容易诱发冲击地压灾害^[3-4],需要研究采动影响下断层冲击地压的发生机理。断层冲击地压是井田范围内由于煤层采掘活动引起断层的突然相对错动(断层活化)而猛烈释放能量的现象^[5],国内外学者针对断层活化与断层冲击地压进行了大量的研究工作。理论分析方面:梁冰等^[6]提出了矿震发生的黏滑失稳机理,指出了断层等地质构造处易发生黏滑失稳释放能量造成冲击地压;李振雷等^[7]、蔡武等^[8]提出了断层闭锁与解锁的理论,阐述了断层活化冲击地压的机制,并进行了诱冲机理分析;林远东等^[9]分析了断层摩擦与视摩擦因数的量值关系,并以此判断断层是否活化。现场实测与室内试验方面:朱斯陶等^[10]根据现场微震监测结果分析,将断层活化过程分为应力显现、蓄能、结构活化 3 个阶段;潘一山等^[5]建立了扰动响应稳定性判别准则,并利用试验验证了断层冲击地压的间歇性;赵毅鑫等^[11]采用岩石力学试验的方法获得了逆断层下盘煤层回采扰动下断层活化失稳特征;王爱文等^[12]通过相似材料试验,分析了断层下盘覆岩运动规律及断层面应力变化特征;王宏伟等^[13]使用石膏单元搭建相似材料模型,分析采动影响下断层面切应力变化规律,并利用声发射观察断层附近能量释放情况。数值模拟方面:姜耀东等^[14]采用数值模拟方法研究了工作面回采遇断层时,断层接触面上法向应力和剪切应力变化规律;蒋金泉等^[15]通过数值计算的手段分析了工作面遇断层时采动应力与覆岩移动变化规律,并通过分析断层滑移量与断层应力变化判断断层是否活化;焦振华等^[16]分析采动影响下断层动态力学响应特征,并提出了断层损伤变量的概念来反映断层破

坏情况;SAINOKI 等^[17-18]基于 FLAC^{3D} 二次开发模拟研究了应力波、断层面粗糙度等因素对断层活化的影响,并分析了不同影响因素下断层滑移地震矩的变化规律;朱广安等^[19-20]研究了采动影响下断层面位移场、速度场、应力场和能量场的变化特征。

综上所述,围绕断层冲击地压理论、采动诱发断层活化机理,国内外学者使用理论分析、现场实测、室内试验、数值模拟的方法进行了广泛而深入的研究,研究结果对煤矿安全生产具有重要的指导意义,但是针对采动影响下断层整体的活化趋势,断层活化释放能量及传递到工作面的剩余能量大小有待进一步研究。以跃进煤矿 25110 工作面为工程背景,建立数值计算模型,分析逆断层下盘采动影响下断层整体的活化趋势,活化过程中断层位移场、应力场的变化规律,采用断层活化失稳释放能量计算公式计算工作面向断层方向推进过程中断层活化释放能量数值,并计算传递到工作面的剩余能量大小。

1 断层面应力分析

受采动的影响,断层附近煤岩层的原始平衡状态被打破,采空区上部岩层垮落,形成“砌体梁”结构^[11,19],如图 1 所示。图 1 中, σ, τ 为断层面正应力

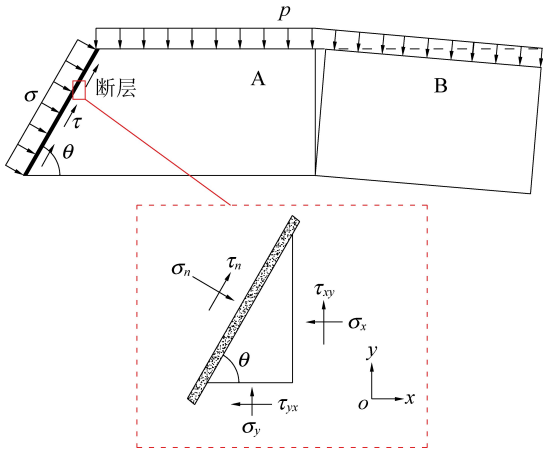


图 1 断层面应力分析

Fig.1 Stress analysis of fault plane

与剪应力,MPa; θ 为断层倾角, ($^{\circ}$); p 为岩层所受到的构造应力,MPa;此外,B 岩块对 A 岩块作用有剪切力和水平力,煤层对 A 岩块作用有支承应力。

取断层面处任意微小单元进行分析,如图 1 所示,该单元受到断裂顶板岩层所给的水平作用力 σ_x 和剪应力 τ_{xy} ,下部煤层对单元的正应力 σ_y 和剪应力 τ_{yx} ,假设作用在断层面上的正应力为 σ_n ,剪应力为 τ_n ,对单元进行力学分析, σ_n 和 τ_n 分别为:

$$\tau_n = (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

(1)

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

(2)

断层面上的应力函数形式为:

$$\sigma_n, \tau_n = f(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \theta)$$

(3)

可以看出,煤层开采引发的 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 的变化将会引起断层面正应力与剪应力的变化,断层面应力状态的改变可能会诱发断层活化失稳。为进一步对断层活化过程进行分析,下文采用数值模拟计算的手段分析采动影响下断层面活化趋势,断层面位移场、应力场、能量场变化规律。

2 数值模拟分析

2.1 数值模型建立

跃进矿 25110 综放工作面开采 2-1 煤层,煤层厚度 7.4~13.8 m,倾角 12° ,采深 800~1 200 m。2-1 煤层上方直接顶为厚度 18 m 的泥岩,基本顶为厚度 190 m 砂岩,下方直接底为厚度 4 m 的泥岩,基本底为厚度 26 m 的砂岩。25110 工作面北部为 25090

工作面,南部接近 F16 断层。F16 断层为逆冲断层,走向为 EW 方向,断层倾角 $30^{\circ} \sim 75^{\circ}$,25110 工作面附近断层倾角为 $50^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 。

针对跃进矿 25110 综放工作面开采接近 F16 逆冲断层,工作面掘进回采期间冲击事故频发的现象,以 25110 工作面所处地质环境为背景,并做一般化处理,使用 FLAC^{3D} 建立三维数值计算模型,如图 2a 所示。模型的尺寸为 400 m(长)×400 m(宽)×140 m(高),模拟煤层埋深 800 m,顶部施加 16 MPa 的垂直应力,使用 interface 命令建立断层面,断层倾角 50° ,落差 10 m。模型采用摩尔-库仑强度准则,煤岩层参数见表 1,断层法向刚度 20 GPa、切向刚度 10 GPa、内摩擦角 20° 、黏聚力 0.7 MPa。断层面采用库伦剪切模型,主要参数参见文献[16]。模型底部边界固定约束,顶部边界自由,四周边界水平方向固定、垂直方向自由。工作面自模型左端沿 x 轴方向推进,开采宽度为 140 m,分析逆断层下盘采动影响下断层活化规律。

表 1 煤岩层参数

Table 1 Rock property parameters

岩层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	黏聚 力/ MPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉 强度/ MPa
砂岩	2 650	12.6	7.6	4.5	40	8.2
泥岩	2 550	7.4	7.0	3.0	35	1.5
煤	1 450	5.0	4.0	1.2	30	1.2
砂岩	2 650	12.6	7.6	4.5	40	8.2

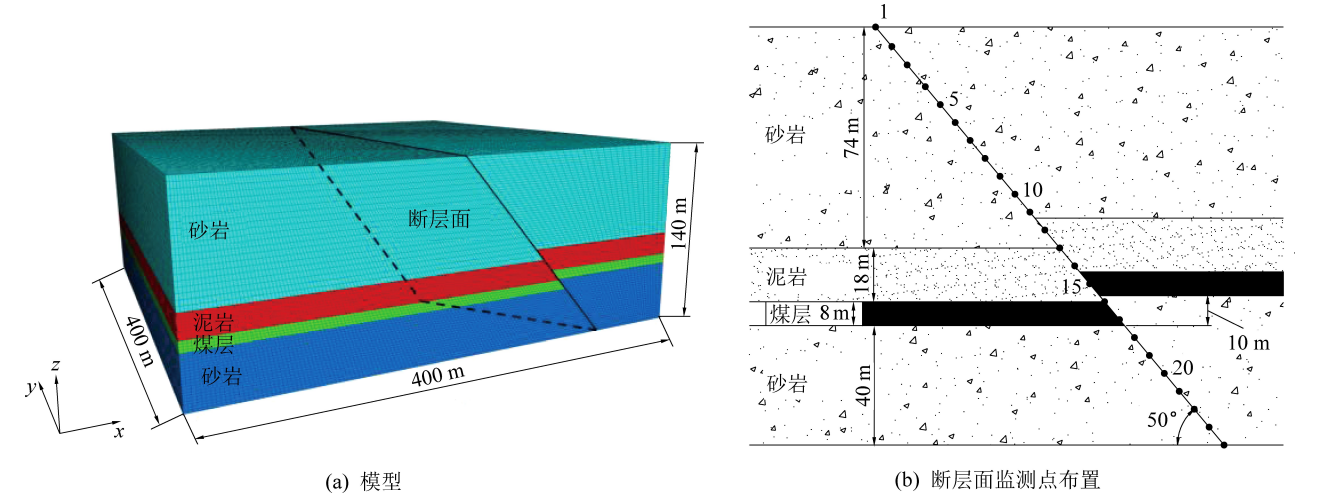


图 2 数值计算模型

Fig.2 Numerical model

如图 2b 所示,在断层面上布置若干监测点,监测点编号按照煤层顶板向煤层底板的方向依次递增,编号分别为 1~24,其中 1 号监测点位于顶板,距

煤层 92 m,24 号监测点位于底板,距煤层 40 m,监测断层面的剪切应力、法向应力。

2.2 断层面活化失稳

FLAC^{3D}中断层接触面采用的是无厚度的接触面单元,单元由一系列三节点的三角形单元组成,接触面单元将三角形面积分配到各节点中,每个接触面节点都有一个相关的表示面积,如图3中的阴影部分,表示该节点的相关面积。本次模拟计算中一个节点单元的相关面积为19.757 8 m²。

由断层面应力分析可知,当逆断层下盘煤层开采时,断层面应力状态发生改变,若 interface 断层面某一节点应力超过其极限强度,则该节点出现破坏^[18]。如图4所示,随着工作面向断层方向推进,断层面出现活化失稳现象。观察采动影响下的断层活化规律,并统计断层活化失稳面积,见表2、图5,工作面过断层后至断层距离以负值表示。断层活化

失稳面积的计算公式为:失稳面积=活化节点数目×节点相关面积。

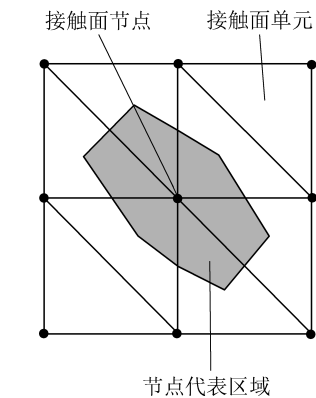


图3 接触面节点及单元
Fig.3 Interface nodes and elements

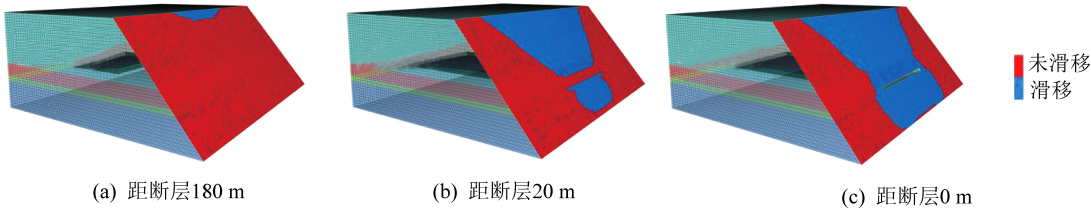


图4 断层活化失稳
Fig.4 Fault activation and instability

表2 断层活化面积				
Table 2 Fault activation area				
工作面距断层距离/ m	新增破坏单元数量/个	新增活化区域面积/ m ²	总破坏单元数量/个	总活化区域面积/m ²
200	0	0	0	0
180	98.5	1 946.14	98.5	1 946.14
160	201	3 971.32	299.5	5 917.46
140	173	3 418.10	472.5	9 335.56
120	144	2 845.12	616.5	12 180.68
100	123	2 430.21	739.5	14 610.89
80	95	1 876.99	834.5	16 487.88
60	119	2 351.18	953.5	18 839.06
40	118	2 331.42	1 071.5	21 170.48
20	426	8 416.82	1 497.5	29 587.31
0	364	7 191.84	1 861.5	36 779.14
-20	148.5	2 934.03	2 010.0	39 713.18

采动诱发断层活化失稳,当工作面距断层180 m时,断层面原始应力状态被打破,位于煤层顶板的基本顶处断层首先出现活化失稳现象,活化节点数目为98.5个,活化面积为1 946.14 m²;距断层160 m时,新增活化失稳面积出现突增现象,新增面积为3 971.32 m²。

随着工作面的继续推进;断层活化面积逐步增大,但增长速率保持稳定且相对较小,断层处于稳定

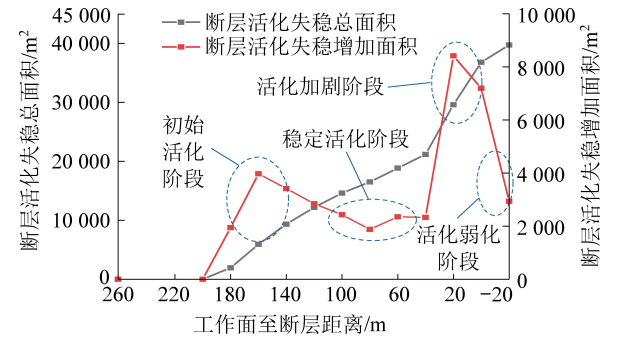


图5 断层活化失稳面积
Fig.5 Fault activation and instability area

活化阶段,此阶段断层活化主要发生在顶板断层内;当工作面距断层20 m时,活化失稳面积再次突然增大,新增活化面积达到8 614.82 m²,底板处断层首次发生活化,此时顶底板处的断层都已出现活化失稳现象;当工作面距断层0 m时,断层新增活化失稳面积为7 191.84 m²,断层已基本发生整体的活化。工作面过断层后,新增活化面积减小,采动对断层的影响减弱。

采动影响下,顶板岩层垮落,采空区上方应力重分布。当工作面逐步向断层方向开采时,沿断层面岩层高位点先于低位点受到采动影响^[11],即高位顶板处断层周围应力环境先发生改变。由式(3)可

知,当断层周围应力环境发生改变时,断层易发生滑移失稳。故断层活化位置演化趋势为从高位顶板处断层向煤层附近发展。

受采动影响,距离煤层顶板较远的高位覆岩处断层最先出现剪切滑移,如图 6 所示,2 号监测点距煤层顶板 85.5 m,自工作面距断层 180 m 之后,该监测点剪切滑移量逐渐增大,滑移量达到 0.01 m 后趋于稳定。随着工作面逐步接近断层,顶板处断层的整体滑移量变化与 2 号监测点类似,呈现出先增大后趋于稳定的趋势。底板处断层发生剪切滑移的时间较晚,但滑移量较大,当工作面与断层间距小于 20 m 时,底板处断层滑移量开始增大,工作面距断层 0 时,

底板处断层的最大剪切滑移量为 0.038 m。工作面过断层后,断层整体活化,剪切滑移量增量较小。采动影响下的断层活化失稳主要分为 4 个阶段:①当工作面距断层 180~140 m 时,为初始活化阶段,此阶段发生在距煤层 92~52 m 处的顶板断层附近,新增活化面积较大;②当工作面距断层 140~40 m 时,为稳定活化阶段,主要发生在距煤层 52~14 m 的顶板断层附近,新增活化面积相对较小且保持稳定;③当工作面距断层小于 40 m 时,为活化加剧阶段,同时发生于煤层顶底板断层,新增活化面积急剧增大,断层基本整体活化;④工作面过断层后,为活化弱化阶段,此阶段新增活化面积较小,断层受采动影响减弱。

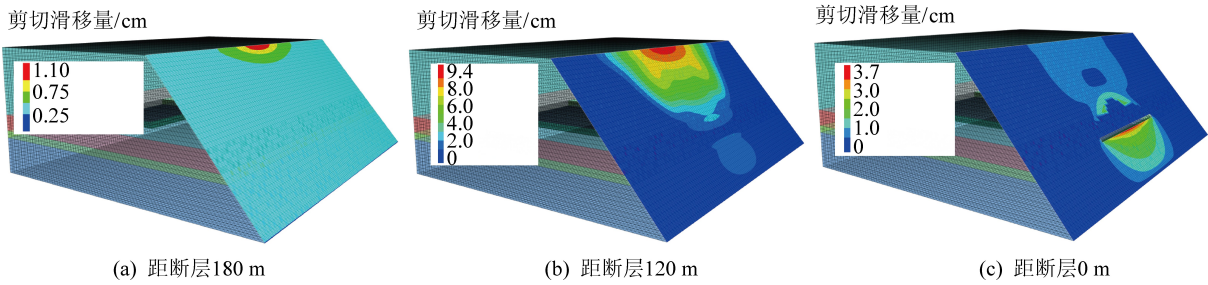
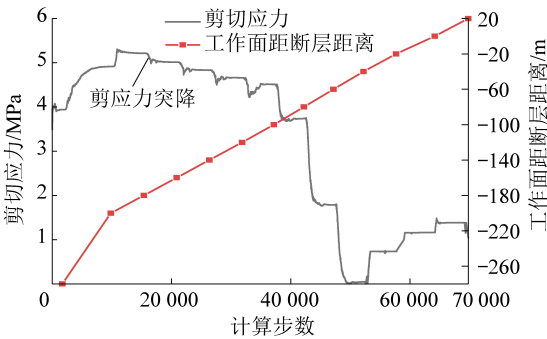


图 6 剪切滑移量变化趋势
Fig.6 Trend of shear slip

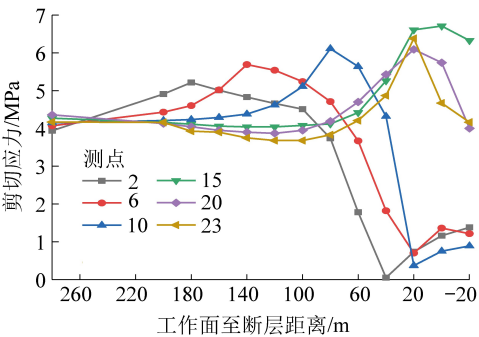
2.3 断层面剪切应力突降

由第一节分析可知,随着工作面的开采,改变了断层面的应力状态,使断层出现滑移失稳的可能性增大。根据建立的数值模拟模型,并选取断层面 2 号监测点进行剪应力分析,如图 7a 所示。由图 7 可以看出,随着工作面推进,断层面的剪应力出现先增大后突降的趋势。工作面开采初期,距离断层较远,断层面的剪应力缓慢增加,随着工作面逐步靠近断层,监测点处的单元开始活化失稳,剪应力突降,单元破坏,伴随着能量的释放。

由点及面,分析采动影响下断层面整体的剪切应力变化规律。在断层面选取 6 个监测点,其中 2、6、10、15 号为顶板监测点,与煤层间距分别为 85.5、60、36、12 m,20、23 号为底板监测点,与煤层间距分别为 16、34 m,得其剪切应力变化趋势,如图 7b 所示。可见,断层面各测点的剪应力整体呈现出先稳定-增长-突降的趋势,剪切应力减小以突降的形式进行。随着工作面的推进,顶板处的断层应力监测点最先出现剪应力突降,以 2、6、10 号监测点为例,当工作面距断层分别为 180、140、80 m 时,监测点的剪应力出现突降,突降值分别为 0.21、0.14、0.46 MPa;底板处的断层应力监测点发生剪应力突降的时间较晚,当工作面距断层 20 m 时,20、23 号监



(a) 2 号监测点剪应力突降



(b) 断层面剪切应力变化

图 7 断层面剪切应力变化规律

Fig.7 Variation of shear stress on fault plane

测点开始出现剪切应力突降,突降值分别为 0.35、1.71 MPa。当工作面距断层 0 时,15 号监测点出现

剪应力突降,数值为 0.39 MPa。监测点剪切应力突降规律与断层活化失稳面积变化规律相似。断层面节点破坏导致剪切应力突降,从而诱发断层活化失稳,因此,剪切应力突降可以作为判断断层是否活化失稳的标志。

2.4 剪切应力与法向应力比值变化规律

根据摩擦定律,接触面的摩擦性质取决于剪切力与正压力的比值^[14],因此,判断断层面是否发生活化失稳,可采用剪切应力与法向应力的比值作为参考指标,图 8 为剪切/法向应力变化规律。

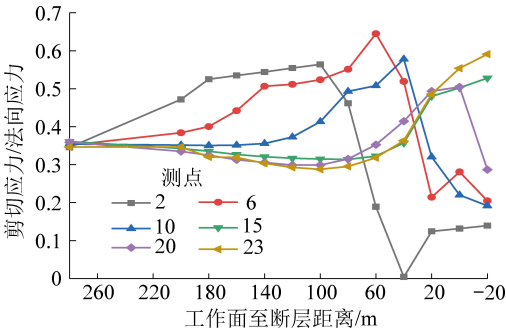


图 8 剪切应力与法向应力比值

Fig.8 Ratio of shear stress to normal stress

以 2、6、10、15、20、23 号监测点为例进行分析。2 号监测点的应力比值最先出现变化,当工作面与断层间距为 100 m 时,2 号监测点的应力比值达到峰值,为 0.56,说明此时距煤层较远的高位顶板断层易发生活化失稳;工作面距断层分别为 60、40 m 时,6、10 号监测点处的应力比值达到峰值,分别为0.64、0.58,两点处的断层易出现活化失稳。随着工作面开采至过断层,15、23 号监测点一直处于增大状态,剪切应力与法向应力比值增大,意味着底板处断层

与靠近煤层的顶板处断层出现活化失稳时间较晚。

由图 4 断层活化失稳图可知,工作面距断层 180 m 时,位于煤层顶板的基本顶处断层首先出现活化失稳现象;由图 7 剪切应力变化规律可知,工作面距断层 180 m 时,2 号监测点破坏;由图 8 剪切应力与法向应力比可知,工作面距断层 100 m 时,2 号监测点破坏。对比可以看出,剪切/法向应力峰值的出现晚于剪切应力峰值及塑性单元的出现。

2.5 断层活化失稳能量释放

断层面发生剪切破裂后,剪切应力突降,同时伴随着能量的释放,产生微震事件,断层活化失稳释放能量 E_k 的计算公式^[18-20]如下:

$$E_k = 0.5 \int \tau_e R dA \tag{4}$$

式中: τ_e 为断层新增活化区域平均剪应力降; R 为断层新增活化区域平均滑移量; A 为断层新增活化区域面积。

以工作面距断层 160 m 时,煤层顶板上方基本顶处断层活化失稳释放能量为例进行计算。此时,断层面新增活化节点数目为 201 个,每个节点单元的相关面积为 19.757 8 m²,断层新增活化面积为 201×19.757 8=3 971.32 m²。活化区域内有 3、4、5 号共 3 个监测点,取此时 3 个监测点剪应力突降的平均值,为 141 143 Pa,断层滑移量的平均值为 0.002 3 m。将变量代入式(4),得到工作面距断层 160 m 时,断层活化所释放的能量为 647 615.02 J。同理,可计算出工作面推进过程中断层活化释放的能量大小,见表 3。

表 3 断层活化失稳参数变化

Table 3 Parameter variations of fault activation and instability

工作面距断层 距离/m	断层新增滑移区域 面积/m ²	断层新增滑移区域 平均剪应力降/Pa	断层新增滑移区域 平均滑移量/m	断层滑移失稳 释放能量/J	震中至工作面 距离/m	工作面接 收能量/J
200	0	0	0	0	0	0
180	1 946.14	125 720	0.001 72	210 904.80	140.26	25 726.12
160	3 971.32	141 143	0.002 31	647 615.02	124.98	99 344.78
140	3 418.10	129 850	0.001 35	300 608.98	110.17	57 584.90
120	2 845.12	138 470	0.000 94	186 128.78	94.88	44 846.20
100	2 430.21	6 790	0.000 87	7 181.54	79.13	2 191.45
80	1 876.99	463 250	0.002 06	893 638.20	63.64	344 020.41
60	2 351.18	602 535	0.001 85	1 312 746.12	48.33	635 826.99
40	2 331.42	1 804 530	0.001 17	2 745 359.09	33.03	1 672 738.13
20	8 416.82	1 035 813	0.007 53	32 835 327.69	46.15	16 432 400.06
0	7 191.84	1 085 080	0.018 38	71 727 900.46	0	71 727 900.46
-20	2 934.03	656 540	0.001 41	1 355 217.03	30.37	859 341.92

图9可以看出,断层活化失稳会伴随有能量的释放。断层初始活化阶段,活化区域位于高位顶板处断层,活化面积较大,但剪应力降与剪切滑移量较小,因此释放能量较小,工作面距断层160 m时释放的能量为 6.48×10^5 J。断层稳定活化阶段,断层活化面积处于稳定增长阶段,此时断层活化释放的能量相对稳定且数值较小,大小在 $7.18\times 10^3\sim 1.31\times 10^6$ J。当工作面推进至距断层20 m处,此时断层处于活化加剧阶段,活化同时发生在顶底板断层,新增活化面积急剧增大,断层剪应力降及滑移量也处于较高水平,会释放大量的能量,为 3.28×10^7 J;当工作面距断层0 m时,断层活化发生的场所主要在煤层附近,释放能量为 7.17×10^7 J。工作面过断层20 m时,断层处于活化弱化阶段,释放能量急剧减小,为 1.36×10^6 J。可见,采动影响下断层发生活化并释放能量,工作面过断层前与断层间距小于40 m时,释放能量较大。

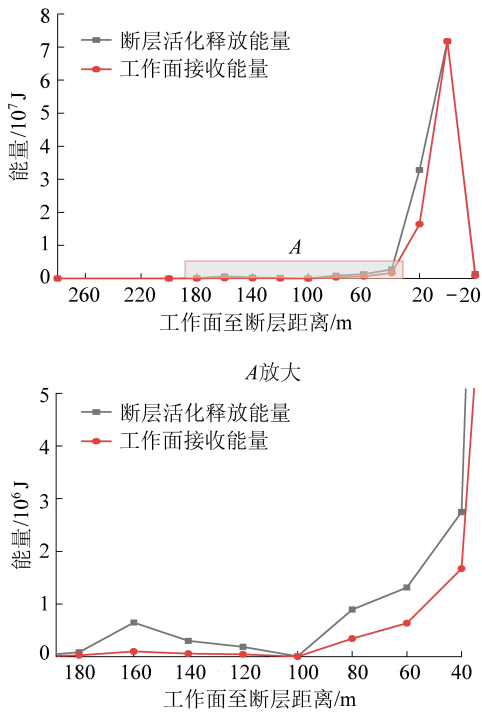


图9 断层活化失稳释放能量

Fig.9 Fault activation and instability release energy

断层活化释放的能量,以震动、地震波的形式释放出来并向工作面传播,如图10所示,由于部分能量的损失,到达工作面时剩余能量^[21-22]为

$$E = E_k e^{-\lambda l} \tag{5}$$

式中: E_k 为断层活化释放能量; λ 为能量衰减系数,根据文献[22]中的试验记录,取0.015; l 为释放能量中心点(震中)至工作面的距离。

由式(5)可以看出,随传播距离增大,能量呈负

指数关系衰减。表3、图9显示,当工作面距断层180 m时,断层活化中心点至工作面的距离为140.26 m,断层活化释放的能量为 2.11×10^5 J,计算出传递至工作面的能量为 2.57×10^4 J,衰减了87%;当工作面距断层40 m时,断层活化释放的能量为 2.74×10^6 J,传递至工作面的能量为 1.67×10^6 J,衰减了39%。随着工作面逐步接近断层,能量衰减量逐步减小,传递至工作面的剩余能量逐步增大。当工作面与断层距离大于100 m时,剩余能量的数量级为 10^4 J;工作面距断层距离小于60 m时,剩余能量的数量级为 $10^6\sim 10^7$ J;当工作面推进至断层时,断层活化所释放的能量全部聚集在工作面处,达到 7.17×10^7 J。随着工作面接近断层,断层煤柱内能量积聚,储存有大量的弹性能^[23],同时断层活化能量传递至工作面附近煤柱,造成煤体能量的进一步积聚,煤柱的冲击危险性增大。

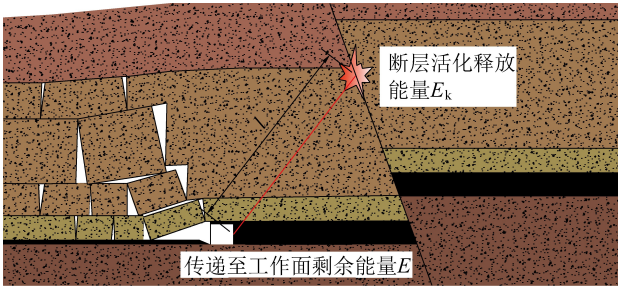


图10 断层活化释放能量并传递至工作面

Fig.10 Fault activation releases energy and delivered to working face

3 工程实例验证

跃进矿25110工作面回采初期,下巷距F16大断层距离小于80 m,下巷与F16断层之间出现大量震源能量大于 10^7 J的微震事件,受工作面回采扰动和F16大断层滑移活化扰动叠加影响,发生了“8·11”冲击矿压事故,震级为2.7级,能量为 9×10^7 J。新巨龙矿2301N工作面中部距开切眼625 m位置发育一条FL37断层,图11为2301N工作面过断层期间微震特征曲线^[10]。图11中显示工作面过断层前,断层活化分为应力显现(距断层274.8~214 m)、蓄能(距断层214~84 m)、结构活化(距断层84~0 m)3个阶段,应力显现与结构活化期间微震事件较多,且能量数值较大。结合图5、图9得出工作面过断层前,断层活化分为3个阶段,分别为:初始活化(距断层180~140 m)、稳定活化(距断层140~40 m)、活化加剧阶段(距断层40~0 m),初始活化与活化加剧阶段断层新增活化面积较大,断层

活化加剧阶段释放大量的能量等模拟结果基本一致。可见,采用给出的数值计算方式,分析采动影响下断层活化趋势及应力变化规律,预测工作面接收能量大小的方法是可行的。

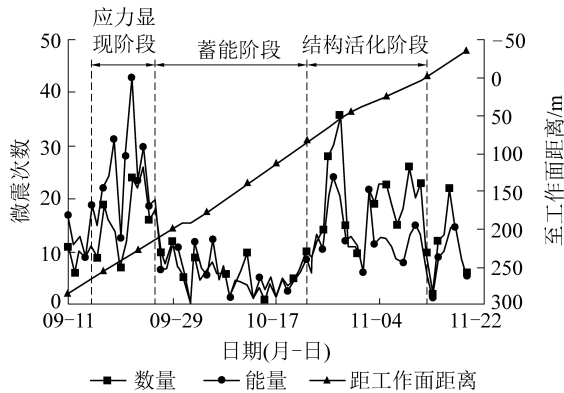


图 11 工作面过断层期间微震特征曲线^[10]

Fig.11 Distribution curves of microseismic events during working face passing through fault^[10]

4 结 论

1)随着工作面逐步接近断层,断层活化分为4个阶段,分别为:初始活化阶段(工作面距断层180~140 m)、稳定活化阶段(距断层140~40 m)、活化加剧阶段(距断层40~0 m)、活化弱化阶段(过断层)。初始活化阶段活化发生于距煤层较远的顶板处断层内,活化面积相对较大;稳定活化阶段发生于顶板处断层内,断层活化面积增长平稳;活化加剧阶段发生于靠近煤层的顶底板处断层内,活化面积急剧增大,断层基本全面失稳;活化弱化阶段发生于工作面过断层后,此阶段采动对断层的影响较小。

2)采动影响下的断层面发生剪应力突降,断层面剪切应力与剪切法向应力比值的变化规律可作为判断断层是否活化失稳的依据,剪切法向应力比值的响应时间晚于剪切应力。

3)通过分析采动影响下断层新增活化面积,并计算断层新增活化面的滑移量与剪应力降,利用断层活化失稳释放能量公式,可估算工作面向断层方向推进过程中,断层新增活化面能量释放大小,计算数值与现场微震监测结果对比分析,具备相似的规律性。

4)断层活化释放能量呈负指数的形式传递至工作面,工作面与断层距离小于40 m时,传递至工作面的断层活化能量量级明显增大,造成煤柱内能量的进一步积聚,易导致冲击地压灾害,需要采取防范措施加以应对。

参考文献 (References):

[1] 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,2014,39(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, 2014, 39(2): 205-213.

[2] 潘一山.煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J].煤炭学报,2018,43(8):2091-2098.
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2091-2098.

[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 rock burst in coal mine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 1-17.

[4] 姜耀东.煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.

[5] 潘一山,王来贵,章梦涛.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. The theoretical and testing study of fault rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642-649.

[6] 梁 冰,章梦涛.矿震发生的粘滑失稳机理及其数值模拟[J].阜新矿业学院学报(自然科学版),1997(5):521-524.
LIANG Bing, ZHANG Mengtao. Numerical simulation and instability slide mechanism of fault bursts [J]. Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science), 1997(5): 521-524.

[7] 李振雷,窦林名,蔡 武,等.深部厚煤层断层煤柱型冲击矿压机制研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):333-342.
LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu, et al. Fault-pillar induced rock burst mechanism of thick coal seam in deep mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 333-342.

[8] 蔡 武,窦林名,王桂峰,等.煤层采掘活动引起断层活化的力学机制及其诱冲机理[J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1193-1202.
CAI Wu, DOU Linming, WANG Guifeng, et al. Mechanism of fault reactivation and its induced coal burst caused by coal mining activities [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1193-1202.

[9] 林远东,涂 敏,付宝杰,等.采动影响下断层稳定性的力学机理及其控制研究[J].煤炭科学技术,2019,47(9):158-165.
LIN Yuandong, TU Min, FU Baojie, et al. Study on mechanics mechanism and control of fault stability under mining-induced influence [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 158-165.

[10] 朱斯陶,姜福兴, KOUAME K J A, 等.深井特厚煤层综放工作面断层活化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(1):50-58.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, KOUAME K J A, et al. Fault activation of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep

- shaft[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(1):50-58.
- [11] 赵毅鑫,王浩,卢志国,等.开采扰动下断层面库仑应力及诱发矿震时空演化特征[J].煤炭学报,2018,43(2):340-347.
- ZHAO Yixin, WANG Hao, LU Zhiguo, *et al.* Characteristics of tremor time-space evolution and Coulomb stress distribution along the fault during workface excavation[J].Journal of China Coal Society, 2018,43(2):340-347.
- [12] 王爱文,潘一山,李忠华,等.断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J].岩土力学,2014,35(9):2486-2492.
- WANG Aiwen, PAN Yishan, LI Zhonghua, *et al.* Similar experimental study of rockburst induced by mining deep coal seam under fault action[J].Rock and Soil Mechanics, 2014,35(9):2486-2492.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 焦振华,姜耀东,赵毅鑫,等.工作面过断层动态力学响应特征研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(1):54-63.
- JIAO Zhenhua, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, *et al.* Study of dynamic mechanical response characteristics of working face passing through reverse fault[J].Journal of China University of Mining & Technology, 2019,48(1):54-63.
- [17] SAINOKI A, MITRI H S. Effect of slip-weakening distance on selected seismic source parameters of min-ing-induced fault-slip[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015,73:115-122.
- [18] 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.
- [19] 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 simulation[J].Journal of China University of Mining & Technology, 2016,45(1):27-33.
- [20] 朱广安,窦林名,王红胜,等.临断层孤岛面冲击危险与断层滑移数值反演:以朝阳煤矿3108工作面为例[J].煤炭学报,2020,45(2):533-541.
- ZHU Guang'an, DOU Linming, WANG Hongsheng, *et al.* Back analysis of rock burst risk and fault slip due to mining in the island panel along fault: A case study of island panel 3108 in Chaoyang Coal Mine[J].Journal of China Coal Society, 2020,45(2):533-541.
- [21] 窦林名,陆莱平,牟宗龙,等.冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J].煤炭学报,2005,30(6):690-694.
- DOU Linming, LU Caiping, MOU Zonglong, *et al.* Intensity weakening theory for rockburst and its application[J].Journal of China Coal Society, 2005,30(6):690-694.
- [22] 杜涛涛.矿震震动传播与响应规律[J].岩土工程学报,2018,40(3):418-425.
- DU Taotao. Propagation and response laws of mine seism[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(3):418-425.
- [23] 武泉森,蒋力帅,孔朋,等.断层煤柱及倾角对采动应力及能量分布的影响特征[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):708-716.
- WU Quansen, JIANG Lishuai, KONG Peng, *et al.* Effects characteristics of fault pillar and its dip angle on mining-induced stress and energy distribution[J].Journal of Mining & Safety Engineering, 2018,35(4):708-716.