

采动诱发大采高工作面断层活化失稳机理及预测模型

王波, 刘硕, 卢兴州

青岛理工大学理学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年3月7日; 录用日期: 2024年3月28日; 发布日期: 2024年4月24日

摘要

针对大采高工作面开采过逆断层过程中断层活化诱发煤岩冲击失稳灾害问题, 采用数值模拟软件FLAC^{3D}构建数值模型, 对比分析了不同采高条件下采动作用对断层活化的影响, 探讨了断层活化失稳过程中的应力场及位移场变化规律, 基于加卸载响应比理论对模拟结果进行了分析, 探讨了断层失稳的判定准则。研究表明: 随着采高的增大, 开采过程中更早出现断层活化, 煤岩发生冲击失稳的风险增加。采动过程中, 断层面上的剪应力呈现先缓慢增长后加速增长再突降的趋势, 正应力呈现先缓慢上升后逐渐下降最终急剧下降的趋势。引入加卸载响应比, 分析采动作用对断层的加卸载作用, 形成了基于加卸载响应比的断层活化失稳预测方法和评价指标。研究成果能为大采高工作面的安全开采提供一定的理论支持。

关键词

大采高, 断层, 冲击失稳, 数值计算, 加卸载响应比

Mechanism and Prediction Model of Fault Activation and Instability Induced by Mining in Working Face with Large Cutting Height

Bo Wang, Shuo Liu, Xingzhou Lu

College of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

Received: Mar. 7th, 2024; accepted: Mar. 28th, 2024; published: Apr. 24th, 2024

Abstract

In response to the problem of coal and rock impact instability caused by fault activation during the process of mining through reverse fault in mining face with large cutting height, a numerical simulation software FLAC3D was used to construct a numerical model. The influence of mining on fault activation under different mining heights was compared and analyzed, and the changes in stress and displacement fields during the process of the activation and instability of the fault were discussed. Based on the theory of loading/unloading response ratio, the simulation results were analyzed and the criteria for determining fault instability were explored. The research results indicate that as the mining height increases, the degree of fault activation intensifies, and fault activation occurs earlier during the mining process, increasing the risk of coal and rock impact instability. During the mining process, the shear stress on the fault plane shows a trend of slow growth, accelerated growth, and then sudden decrease, while the normal stress shows a trend of slow rise, gradual decrease, and finally sharp decrease. By introducing the loading/unloading response ratio, the loading and unloading effects of mining on faults were analyzed, A fault activation instability prediction method and evaluation index based on loading/unloading response ratio have been developed. The research results can provide certain theoretical support for the safe mining of the mining face with large cutting height.

Keywords

Large Cutting Height, Fault, Impact Instability, Numerical Calculation, Loading/Unloading Response Ratio

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着开采深度和采高的不断增大,煤岩冲击失稳的威胁也愈发严重[1]。据煤矿灾害统计规律,在地质构造发育的区域,煤岩冲击失稳灾害的发生率较高,而断层则是其中一种重要的构造形式,其诱发作用不可忽视[2][3]。尤其是大采高条件下断层活化导致的煤岩冲击失稳影响范围更广,释放的能量也更加剧烈。因此,大采高工作面条件下的断层活化规律及由此引发的煤岩冲击失稳亟待探究。

国内外学者针对断层活化与煤岩冲击失稳进行了大量的研究工作。Wang 和 Park [4]基于突变理论对断层诱发的煤岩冲击失稳进行了探讨,在此基础上给出了煤岩系统发生破坏的临界条件,并推导出了释放总能量的表达式。Sainoki 等[5]通过数值模拟二次开发研究了不同影响因素对断层滑移活化的影响,提出表面粗糙的断层比表面光滑的断层更容易活化。蔡武等[6]指出断层冲击地压是由断层煤柱高静载与断层活化动载叠加诱发的。王存文等[7]指出断层、褶曲等构造形成的支承压力和采掘工程形成的支承压力叠加诱发了冲击地压。林远东等[8]基于断层带-上盘-下盘系统分析得出断层是否活化取决于断层摩擦和视摩擦因数的量值关系。张宁博等[9]运用尖点突变理论将断层活化滑移分为线性稳态、非线性稳态、亚失稳和失稳4个阶段。毛德兵等[10]指出断层延展长度越长、落差越大、断层面越粗糙,断层活化释放能量越大,越易引发断层冲击地压。蒋金泉等[11]通过数值计算,确定了以断层滑移量与断层应力作为断层是否活化的判据。焦振华等[12]分析指出断层损伤变量为参量可判断断层在采动作用下的破坏程

度。任政等[13]提出了滑移倾向性指标 T_s ，并对下盘工作面开采过程中逆断层的活化过程进行了定量分析。王同旭等[14]将断层活化可被划分为初始活化，稳定活化，活化加剧和活化弱化四个阶段，并确定了采动过程中断层活化各阶段对应的工作面位置。于秋鸽等[15]基于断裂力学数值模拟计算分析了断层带岩体水平应力和垂直应力比值 λ 与断层活化的关系。这些研究成果对含断层工作面冲击地压防控起到了积极的作用，但开采实践表明，大采高条件下冲击地压灾害问题更复杂也更严重，尤其是断层存在的时候，更易诱发煤岩冲击失稳灾害，因此有必要对断层活化诱发大采高工作面煤岩体突出的灾害机理进行深入研究。

加卸载响应比理论已被诸多学者应用于地震预测、边坡分析、岩石损伤、煤岩冲击失稳研究[16]，取得了一系列科研成果。崔峰等[17]提出了一种基于采动加卸载响应比的方法，用于合理确定冲击地压矿井工作面的推进速度。但研究成果较少对断层活化诱发煤岩冲击失稳的灾害机制进行研究，也没有分析断层层面加卸载响应比的可行性。

鉴于此，本文选取逆断层作用下大采高工作面发生煤岩冲击失稳灾害问题，通过数值模拟软件 FLAC^{3D} 分析采动作用对断层活化的影响作用，研究不同采高条件下逆断层下盘工作面推进期间采动应力场，上覆岩层运移特征，以及在采动作用下断层加卸载的内在规律。从加卸载响应比理论的基本原理出发，探讨该理论对断层活化失稳预测的可行性。

2. 模型构建及分析

矿 21521 工作面位于东侧，毗邻 21521 轨道巷、21521 运输巷和 21521 回风巷，工作面北侧为 21510 工作面，南侧近 F22 断层，工作面东侧为井田边缘。F22 断层为逆断层，走向为 EW 方向，断层倾角为 40°~75°，21521 工作面附近断层倾角为 70°，21521 工作面平面布置如图 1 所示。

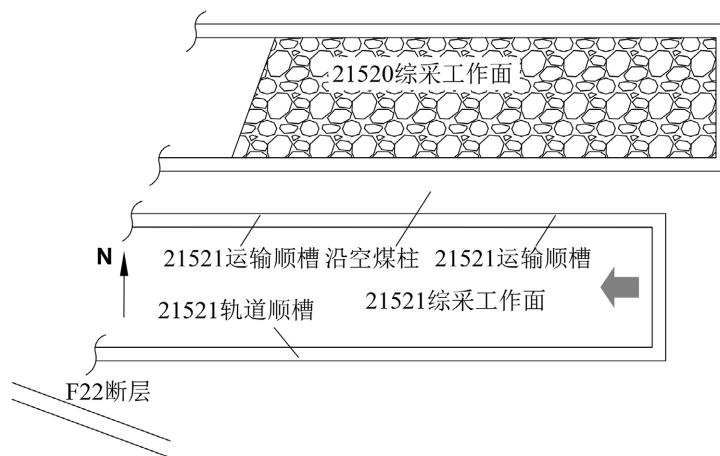


Figure 1. Layout plan of 21521 working face

图 1. 21521 工作面平面布置图

21521 工作面开采 3⁻¹ 煤层，煤层的平均厚度为 8 m，平均倾角为 8°，煤体普氏系数为 1.3~1.4，采深为 600~1000 m。采用综放开采工艺，工作面长度为 160 m 左右。采用走向长壁综合机械化一次采全高后退式采煤法，岩层纵向分布图如图 2 所示。

以 21521 综采工作面开采为背景，采用 FLAC^{3D} 数值软件构建模型，探究工作面推进对采动应力演化特征及断层活化规律的影响。数值模型的岩层属性参数一般在实验室测试样品后获得，或者从地质相同或相近的文献中获取。本文岩体和断层的属性参数主要参考于现有文献，详情见表 1 [9]。

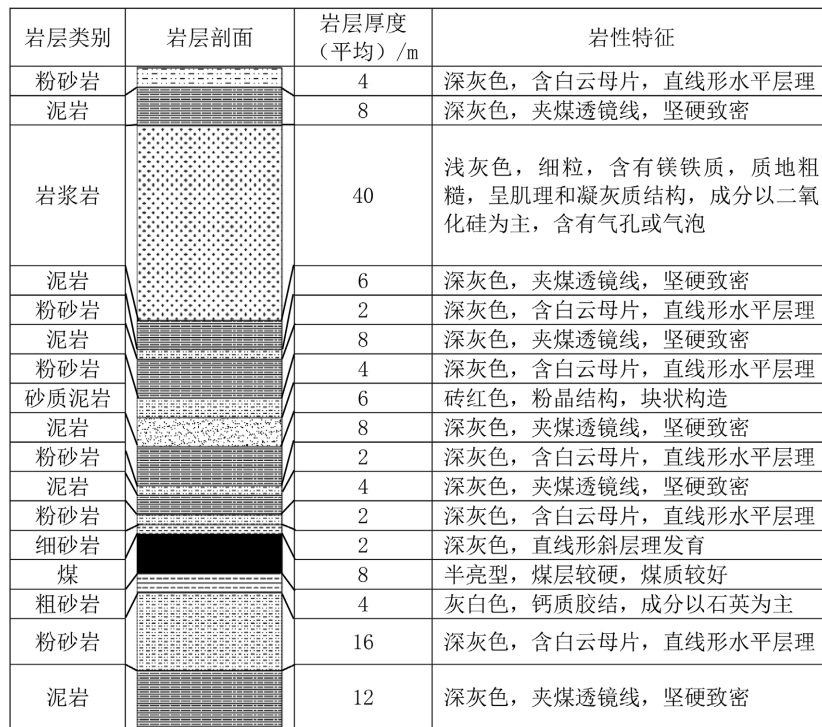


Figure 2. Vertical distribution map of rock layers in working face 21521
图 2. 21521 工作面岩层纵向分布图

Table 1. Rock layers and their attributes in the model [11]
表 1. 模型中的岩层及其属性[11]

岩性	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	2530	13.4	7.6	1.4	1.85	37
泥岩	2340	9.8	7.1	0.5	1.55	39
岩浆岩	3000	75.0	47.0	2.2	25.00	45
泥岩	2340	9.8	7.1	0.5	1.55	39
粉砂岩	2530	13.4	7.6	1.4	1.85	37
泥岩	2340	9.8	7.1	0.5	1.55	39
粉砂岩	2530	13.4	7.6	1.4	1.85	37
砂质泥岩	2600	10.5	7.1	1.7	2.30	30
泥岩	2340	9.8	7.1	5.0	1.55	39
粉砂岩	2530	13.4	7.6	1.4	1.85	37
泥岩	2340	9.8	7.1	0.5	1.55	39
粉砂岩	2530	13.4	7.6	1.4	1.85	37
细砂岩	2530	13.4	7.6	1.4	11.55	37
煤	1350	10.5	6.5	1.2	0.90	23
粗砂岩	2540	14.7	8.1	10.0	11.55	26
粉砂岩	2530	13.4	7.6	1.4	1.85	37
泥岩	2340	9.8	7.1	0.5	1.55	39
断层	2000	0.01	0.0035	0.001	0.40	5

基于 21521 工作面的覆岩分布情况,模拟时将岩浆岩厚度设置为 40 m,且距离开采煤层为 76 m。模型设计尺寸为 306 m × 160 m × 140 m,其中顶板的厚度设置为 100 m,底板的厚度设置为 32 m,工作面距离开切眼在下盘 50 m 处开始开挖,以此来消除边界效应,且每步开挖 5 m。边界条件:下部固定,左右两侧限制水平方向位移,上部设置重力,左右两侧设置水平应力。在模拟煤层埋深达到 600 m 的情况下,顶部所承受的垂直应力为 12 MPa(即设置为重力),水平方向施加梯形分布荷载,值是垂直方向的 1.2 倍。设置 1 m 软弱带模拟逆断层(力学参数见表 1),落差 8 m,倾角 70°(数值模型如图 3 所示),煤岩体屈服破坏判据采用摩尔-库伦强度准则。模拟分析逆断层下盘大采高工作面的采动应力的分布规律以及断层活化特征。

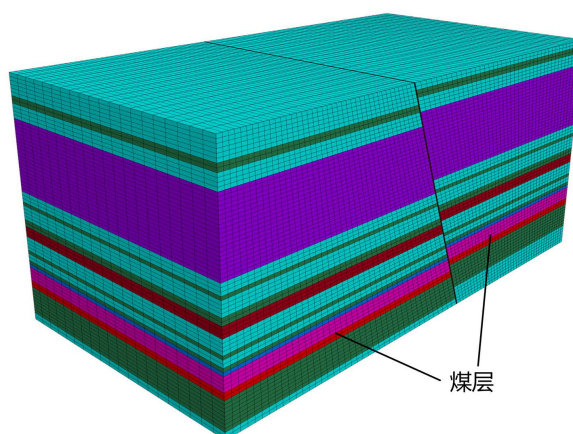


Figure 3. Mesh generation of numerical model
图 3. 数值模型的网格剖分

断层带中点设置多个监测点,监测点的编号按煤层顶板至煤层底板方向依次增大 A~I 是各监测点的编号,其中监测点 A 位于煤层的远端顶部,距离煤层有 102 m 的距离;监测点 I 位于煤层的直接顶部,距煤层 10 m(详见图 4)。

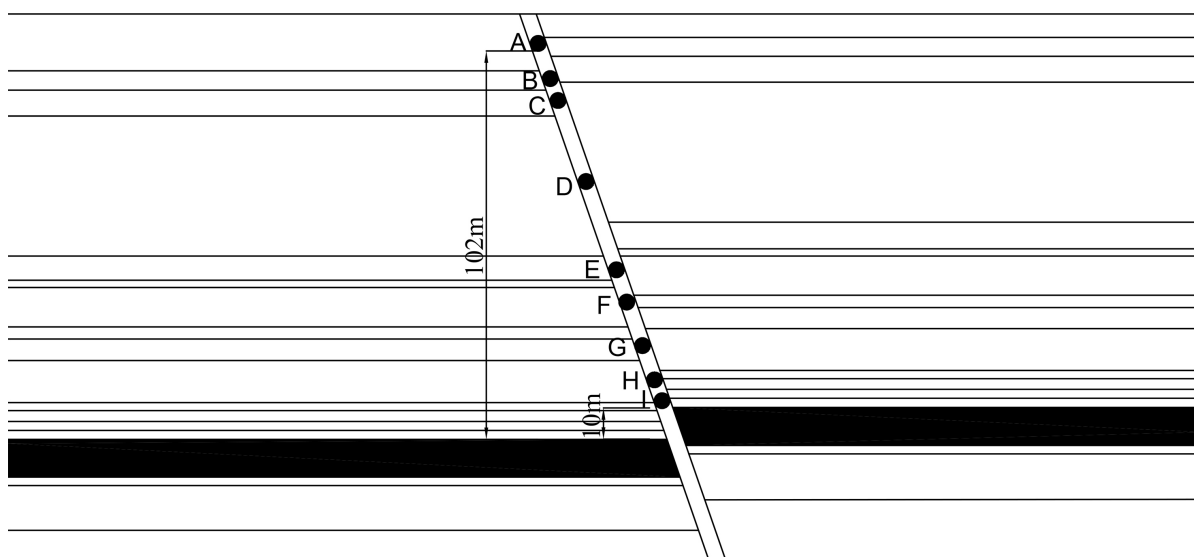


Figure 4. Location of monitoring points in the fault zone
图 4. 断层带各监测点位置

3. 采动应力场的演化特点

模拟时不同采高条件下断层发生活化对应的开采位置有所变化, 在分析采动应力场时保证 4、6、8 m 采高工作面从开采初期到断层发生活化、断层活化到断层活化发展时期之间的开采距离一致。当 4 m 采高工作面与逆断层的距离为 75、55、20、0 m 时, 围岩垂直应力分布如图 5 所示。工作面推进至距断层 75 m 时, 受断层切割影响, 覆岩呈楔形, 围岩垂直应力集中程度不高, 垂直应力水平范围在 16~20 MPa 之间, 断层切割作用下采动引起的断层带应力阻隔效应明显, 采动初期采动没影响到断层, 上盘应力几乎接近于原岩应力, 工作面两侧出现应力集中, 垂直应力水平为 20~28 MPa; 工作面推进至距断层 55 m 时, 断层远端垂直应力降幅较大, 为 4~8 MPa, 断层监测点 D 附近出现“活化”, 围岩垂直应力的集中程度不断增加, 在 20~24 MPa 之间, 工作面中部的垂直应力水平范围是在 2~14 MPa 之间, 工作面外侧煤体垂直应力集中水平为 24~36 MPa; 工作面推进至距断层 20 m 时, 煤柱及顶底板围岩的垂直应力水平为 12~16 MPa, 此时开挖工作面另一端垂直应力水平为 28~36 MPa。

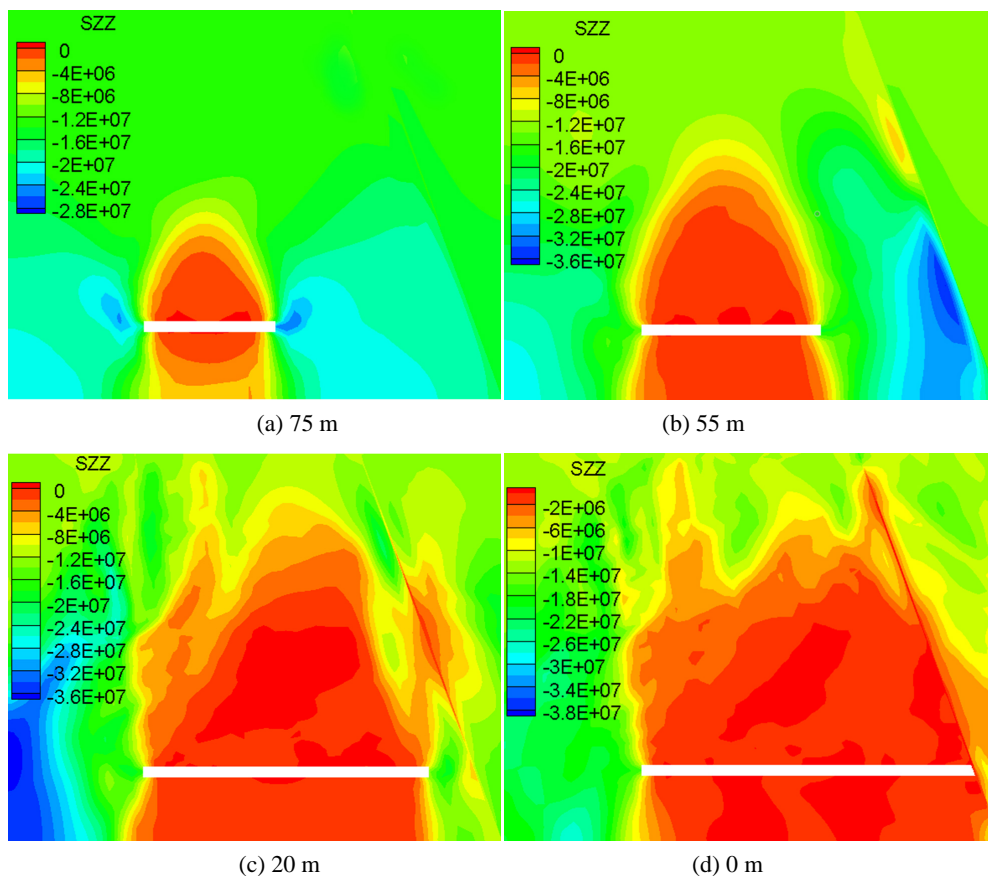


Figure 5. Vertical stress distribution at a distance of 75, 55, 20, and 0 m between a 4 m working face and reverse fault

图 5. 4 m 工作面与逆断层间距 75, 55, 20, 0 m 时垂直应力分布

6 m 采高工作面距逆断层 80, 60, 25, 0 m 处围岩的垂直应力分布见图 6。工作面推进至距断层 80 m 时, 围岩垂直应力水平为 18~22 MPa, 集中程度较低, 工作面两侧出现应力集中, 垂直应力水平为 22~30 MPa; 工作面推进至距断层 60 m 时, 断层远端垂直应力为 6~8 MPa, 监测点 D 点处附近出现“活化”, 围岩垂直方向应力集中程度变大, 应力水平在 20~24 MPa 之间, 且工作面中间位置垂直方向应力水平比

两端低, 为 2~16 MPa, 应力集中区域的垂直应力水平为 24~32 MPa; 工作面推进至距断层 25 m 时, 煤柱及顶底板围岩的垂直应力集中水平明显降低至 12~16 MPa, 开挖工作面另一端垂直应力水平为 28~36 MPa。

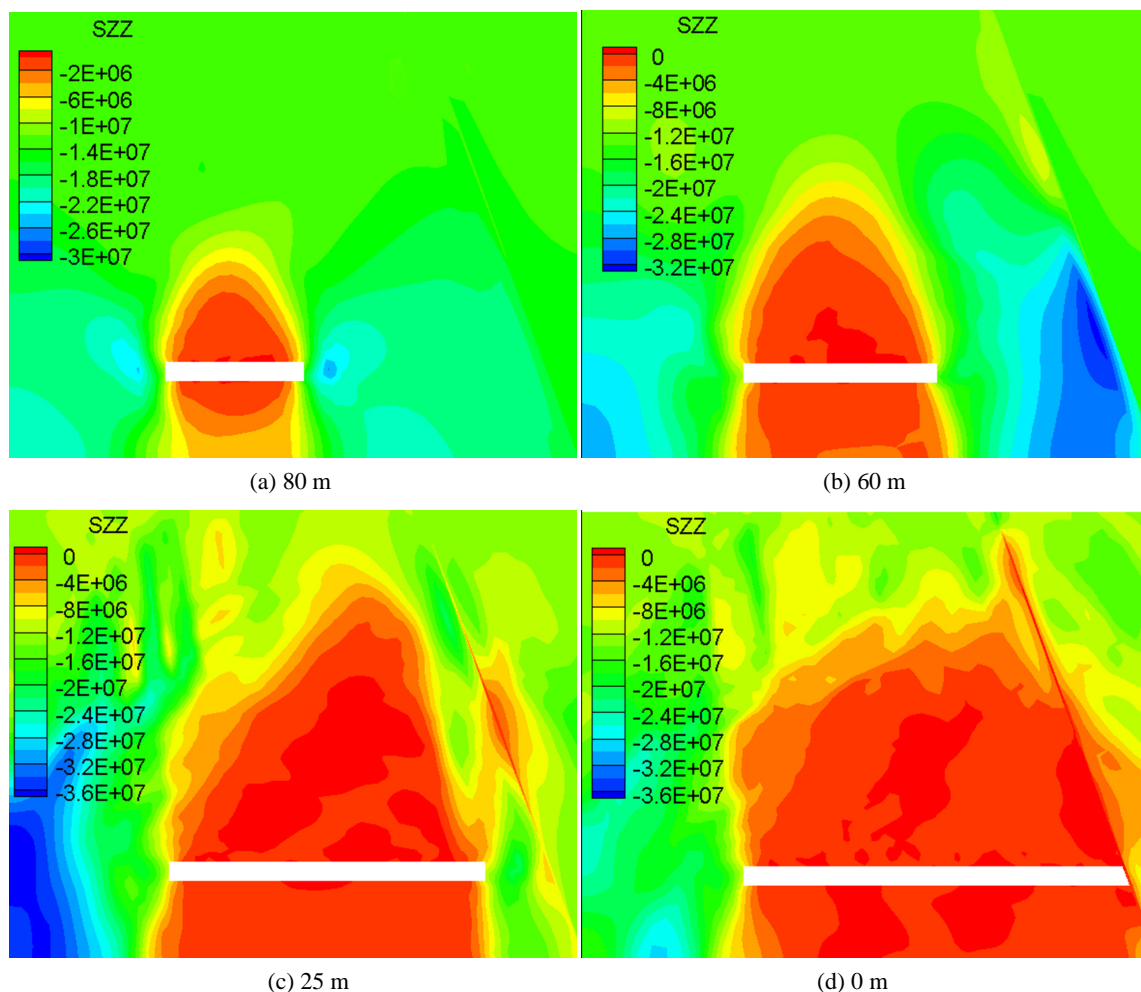
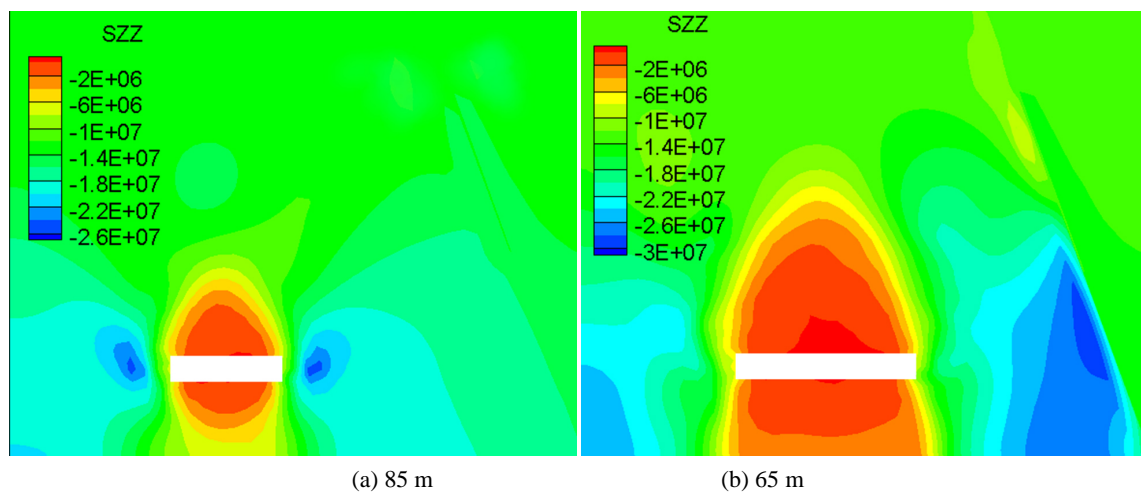


Figure 6. Vertical stress distribution at a distance of 80, 60, 25, and 0 m between a 6 m working face and reverse fault
图 6. 6 m 工作面与逆断层间距 80, 60, 25, 0 m 时垂直应力分布



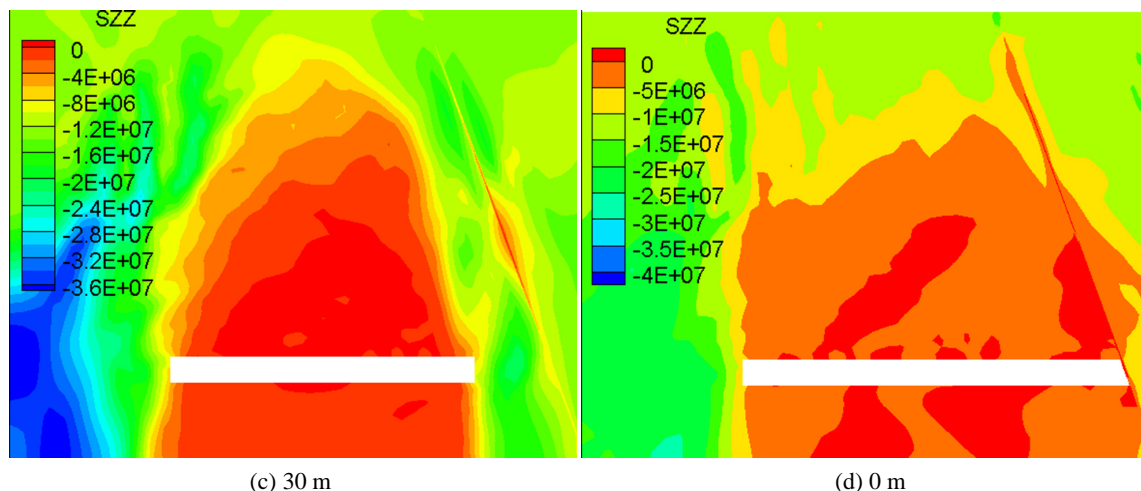


Figure 7. Vertical stress distribution at a distance of 85, 65, 30, and 0 m between a 8 m working face and reverse fault
图 7. 8 m 工作面与逆断层间距 85, 65, 30, 0 m 时垂直应力分布

当 8 m 采高工作面与逆断层的距离为 85, 65, 30, 0 m 时, 围岩垂直应力分布如图 7 所示。工作面推进至距断层 85 m 时, 围岩垂直应力集中程度较低, 垂直应力水平为 14~18 MPa, 工作面两侧出现应力集中, 垂直应力水平为 18~26 MPa; 工作面推进至距断层 65 m 时, 断层远端垂直应力为 8~10 MPa, 监测点 D 点处附近出现“活化”, 围岩垂直应力更加集中, 应力水平为 18~22 MPa, 工作面中部垂直应力水平为 4~14 MPa, 工作面外侧煤体垂直应力集中水平为 22~30 MPa; 工作面推进至距断层 30 m 时, 煤柱及顶底板围岩的应力集中程度均明显降低, 垂直应力水平为 12~16 MPa, 工作面另一端垂直应力水平相应地提高, 垂直应力水平为 28~36 MPa。

图 5(a), 图 6(a), 图 7(a) 均处于采动初期, 在 4 m, 6 m, 8 m 采高工作面不断推进的过程中, 断层带的应力阻隔效应显著, 这导致围岩的垂直应力存在的连续稳定传播特性受到明显削弱。此外, 开挖工作面两端的垂直应力出现应力集中现象。由图 5(b), 图 6(b), 图 7(b) 可知, 由于煤壁与断层之间距离缩小, 工作面与断层之间的顶底板垂直应力以及煤层支撑压力的集中程度会进一步增加。在断层远离开采层的位置首先受到采动的影响, 导致远端垂直应力发生变化, 表现为张拉和剪切作用, 断层远端的垂直应力变得很低(厚岩浆岩处最为明显), 在工作面的两端, 围岩所承受的垂直应力高于其中部, 且垂直应力会向着承载力较大的区域(工作面外侧的煤体)转移。分析图 5(c), 图 6(c), 图 7(c) 可以发现, 因为煤柱的宽度较小, 其承载能力较低, 因此在煤壁和断层之间, 煤柱和顶底板围岩的应力集中现象显著变少, 此时开挖工作面另一端应力集中程度变高, 垂直应力水平明显提高。断层活化程度变高, 活化区从断层远端向近开挖面断层方向发展。图 5(d), 图 6(d), 图 7(d) 的垂直应力分布可以看出, 当 4 m, 6 m, 8 m 工作面与逆断层距离缩小到 0 m 时, 构造应力在工作面和断层之间得到释放, 导致煤层的顶底板处于卸压状态, 断层均已基本发生整体的失稳。综上, 断层活化失稳的演变规律在应力方面表现为围岩垂直应力集中的程度变化及其位置的转移、断层面垂直应力突降并向下部延伸; 且随着采高的增大, 断层活化的程度加剧, 采高为 4 m、6 m、8 m 的工作面分别推进 55 m、60 m、65 m 断层出现活化, 采高变大开采时更早出现断层活化, 煤岩发生冲击失稳的风险增大。

4. 断层位移场的变化规律

断层采动应力场与位移场密切相关, 在一定程度上应力的变化通过位移变形表现出来。采高 4 m、6 m、8 m 工作面与逆断层的距离为 75, 55, 20, 0 m 时, 覆岩运移演变如图 8~10 中所示。

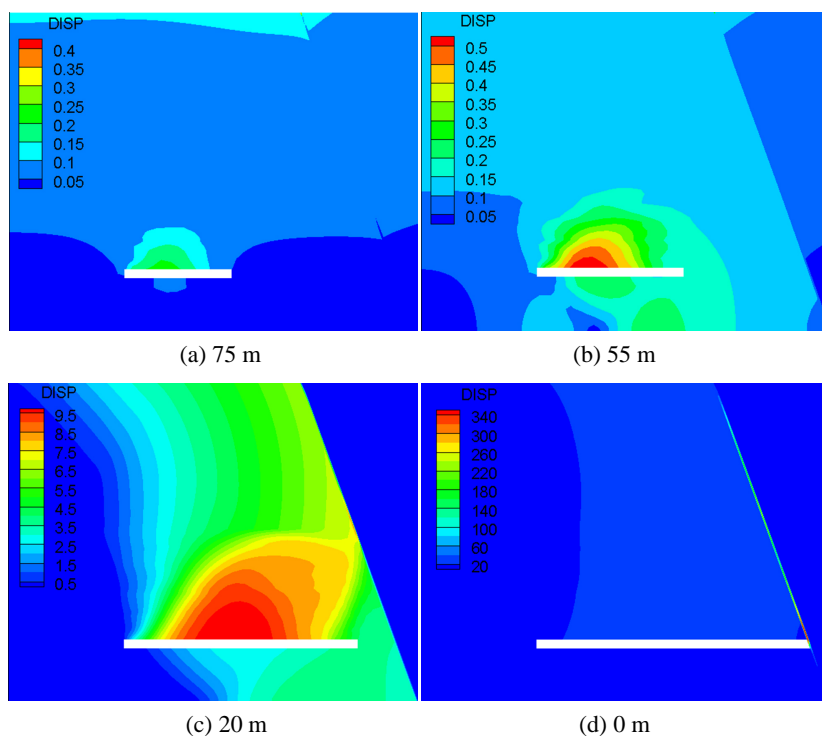


Figure 8. Evolution of overlying rock migration at a distance of 75, 55, 20, and 0 m between a 4 m working face and reverse fault

图 8. 4 m 工作面与逆断层间距 75, 55, 20, 0 m 时覆岩运移演变

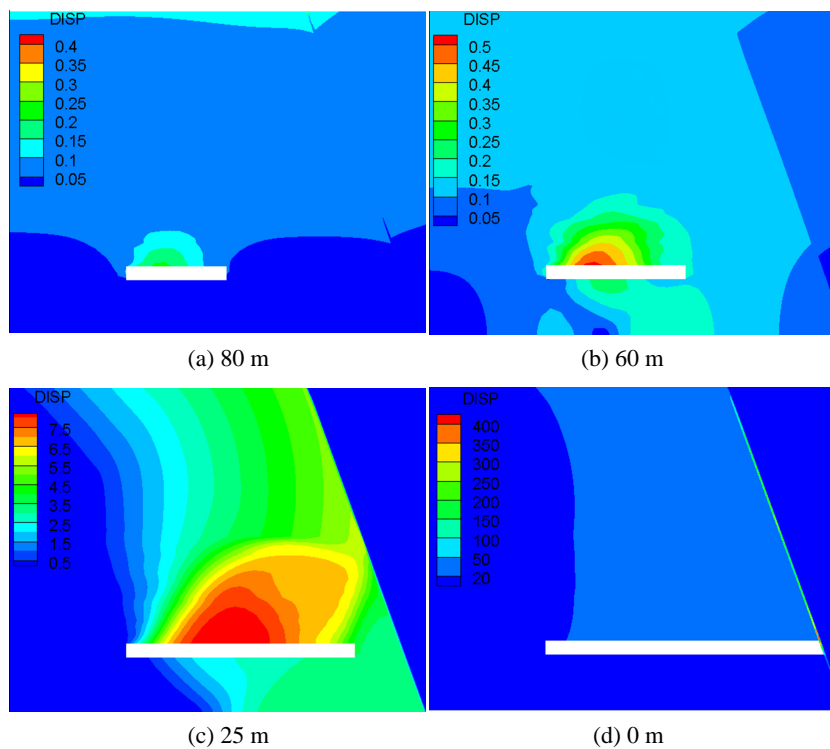


Figure 9. Evolution of overlying rock migration at a distance of 80, 60, 25, and 0 m between a 6 m working face and reverse fault

图 9. 6 m 工作面与逆断层间距 80, 60, 25, 0 m 时覆岩运移演变

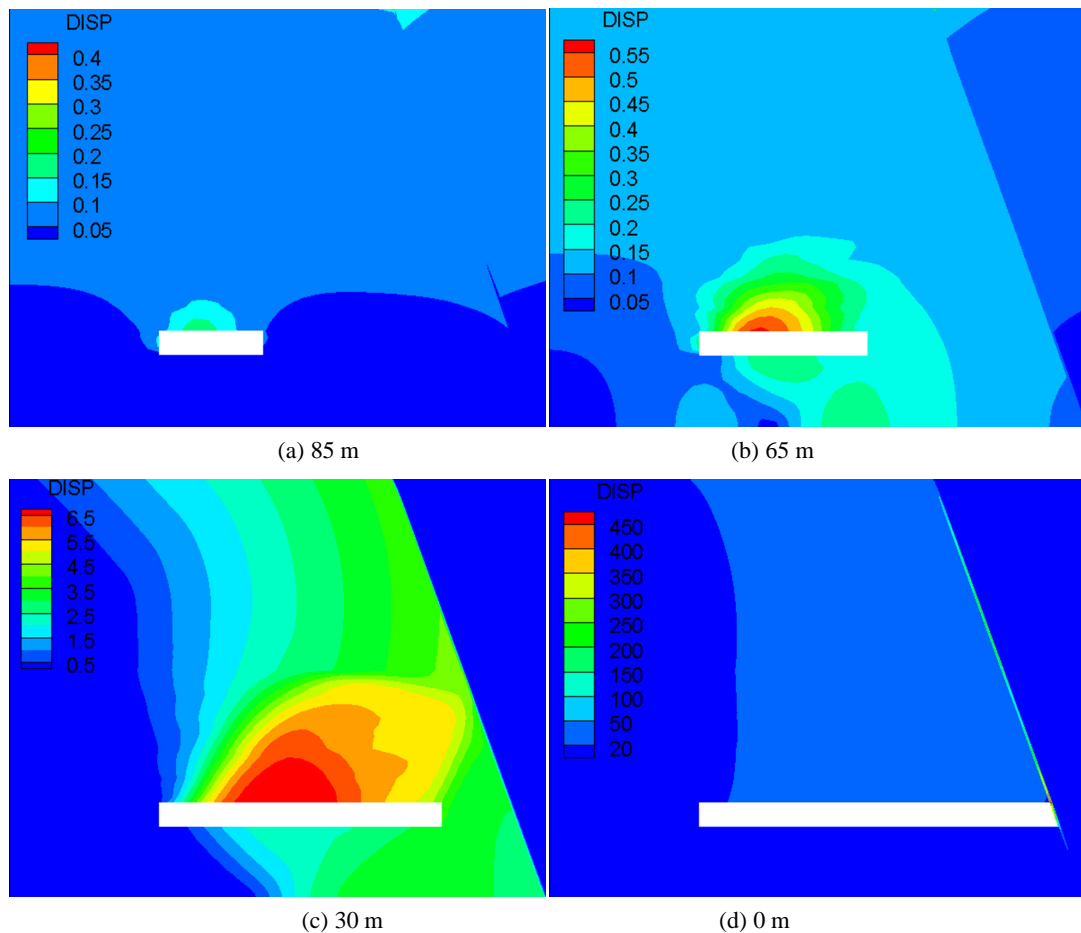


Figure 10. Evolution of overlying rock migration at a distance of 85, 65, 30, and 0 m between a 8 m working face and reverse fault

图 10. 8 m 工作面与逆断层间距 85, 65, 30, 0 m 时覆岩运移演变

采动初期位移分布如图 8(a), 图 9(a), 图 10(a)所示, 当工作面与断层距离较远时, 在 4 m~8 m 采高工作面不断推进的过程中, 受采动作用影响, 煤层上覆岩层均开始发生沉降。由于断层的存在, 上下盘岩层的沉降具有不连续性。工作面正上方受采动直接影响沉降程度最高, 覆岩整体上基本稳定。对比图 8(b), 图 9(b), 图 10(b)可以发现, 此时, 4 m~8 m 采高工作面均进入断层活化初期, 工作面正上方沉降量持续增大, 顶板受采动影响范围不断扩展, 底板也出现微小位移, 断层阻隔上下盘沉降量变化不大, 覆岩沉降向承载能力较大的工作面外侧煤体发展。受到采动和断层切割作用的影响, 厚岩浆岩逐渐发生断裂和扩展, 导致断层活化错动, 释放出大量的应变能, 进而在厚岩浆岩和断层共同作用下引发煤岩冲击失稳。

由图 8(c), 图 9(c), 图 10(c)可知, 4 m~8 m 采高工作面断层活化并都发生较大滑移, 工作面上方沉降范围和程度进一步加大, 此时断层的阻隔作用更加明显, 上下盘下沉量差别更大。由图 8(d), 图 9(d), 图 10(d)可见, 工作面正上方覆岩沉降量最高, 变形最大, 断层面上位移分布不均匀性明显, 近工作面断层处滑移量最大, 且采高越大, 位移量越大。

综合以上分析可知, 断层活化过程中围岩出现不均匀沉降及向底板蔓延、断层面位移突增并向下部发展。上覆的巨厚岩浆岩是煤岩发生冲击失稳的关键因素, 硬厚岩层的破坏运动, 使断层易发生活化从而诱发煤岩冲击失稳。

5. 采动影响下断层活化与煤岩冲击失稳规律分析

5.1. 断层面剪切应力特征

以采高 4 m 为例进行分析, 根据所构建的数值模型, 首先分析断层面上 D 监测点的剪应力, 应力的变化曲线见图 11。

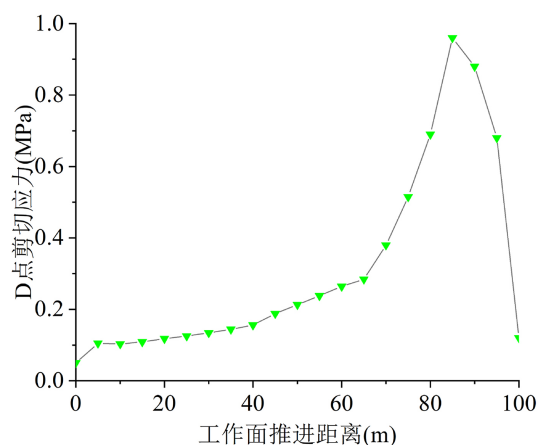


Figure 11. Trend of shear stress at point D under the advance ment of the working face

图 11. 工作面推进下 D 点剪切应力变化趋势

工作面推进 0 m~65 m 的过程中, 与断层的距离较远, 断层面的剪切应力增速较缓, 仅增加 0.23 MPa; 工作面推进 65 m~85 m 过程中, 断层面上剪切应力开始快速增加, 从 0.28 MPa 增加到 0.96 MPa, 增加 0.68 MPa, 断层进入活化期; 工作面推进 85 m 时(距断层 35 m 处), 监测点 D 附近发生活化失稳, 剪应力突降。

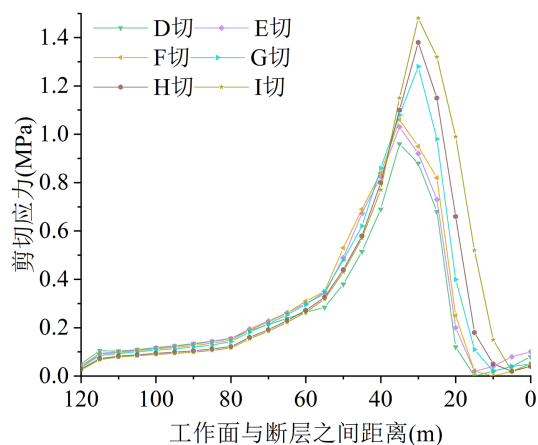


Figure 12. Shear stress variation law of fault plane

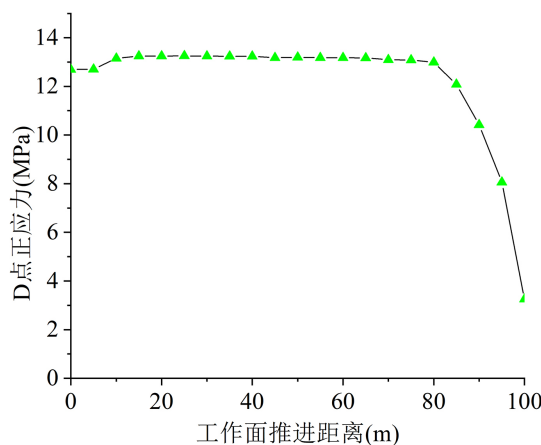
图 12. 断层面剪切应力变化规律

在断层面选取其中 6 个监测点(D~I), 得到采动影响下剪切应力的变化曲线见图 12。由图中曲线变化趋势可知, 在断层面上, 各个测点的剪切应力呈现出一种先缓慢增长后加速增长再突降的趋势, 而剪切应力的减小表现为突降。当工作面推进至与断层距离较远时(120 m~55 m), D~I 点剪切应力均缓慢增长, 增长约 0.25 MPa; 当工作面推进至与断层距离 55 m~35 m 时, D、E、F 点剪切应力开始快速增长, 最大

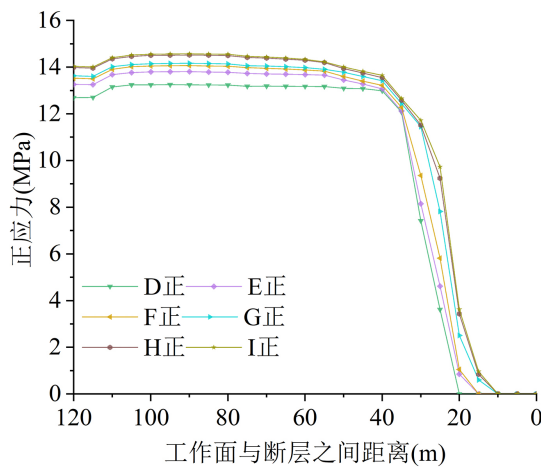
增幅达到 0.71 MPa，工作面推进至距断层 55 m~30 m 时，G、H、I 点剪切应力也开始快速增长，最大增幅达到 1.13 MPa；当工作面推进至与断层距离 35 m 后，D、E、F 点剪切应力开始突降，当工作面推进至与断层距离 30 m 后，G、H、I 点剪切应力也开始突降，监测点处单元发生活化失稳。

工作面推进距断层 55 m 后，剪应力出现突增。在断层活化前，剪应力增幅较小，断层出现活化，剪应力随工作面推进增速明显。随着断层活化程度不断增加至出现失稳，剪应力发生突降。

5.1.1. 断层面正应力特征



(a) 工作面推进下 D 点正应力变化趋势



(b) 断层面正应力变化

Figure 13. Normal stress variation law of fault plane

图 13. 断层面正应力变化规律

结合数值模型，选取断层面 D 点进行正应力分析，如图 13(a)所示。随着工作面的推进，断层面的正应力呈现先稳定再逐渐减小后快速降低的趋势。工作面推进 0 m~65 m 过程中，距离断层较远，断层面上的正应力相对稳定，从 12.70 MPa 缓慢增长至 13.17 MPa；工作面推进 65 m~85 m，断层面上的正应力逐渐降低，从 13.17 MPa 降至 12.08 MPa，断层进入活化期；工作面推进 85 m 之后，断层活化到一定程度，正应力急剧降低，从 12.08 MPa 以 2 MPa 以上的速度发生突降。

选取模型上 6 个监测点(D~I)，得到正应力的变化趋势如图 13(b)所示。断层面上监测点的正应力整体呈现出先缓慢上升、逐渐下降、最终急剧下降的趋势。当工作面距断层较远时(120 m~55 m)，D~I 点正应

力均缓慢增长, 增长约 1 MPa; 当工作面推进至与断层距离 55 m~35 m 时, D、E、F 点正应力开始逐渐减小, 分别减小 1.09 MPa、1.54 MPa、1.55 MPa, 工作面推进至与断层距离 55 m~30 m 时, G、H、I 点正应力也开始逐渐减小, 分别减小 2.16 MPa、2.37 MPa、2.21 MPa; 当工作面推进至与断层距离 35 m 后, D、E、F 点正应力开始急剧减小, 当工作面推进至与断层距离 30 m 后, G、H、I 点正应力也开始急剧减小。由于采空区不断推进至监测点下方, 上覆岩层会出现回转或者滑动, 正应力降低。

工作面推进距断层 55 m 后, 正应力开始出现降低的趋势。在工作面推进的过程中, 断层面上的正应力也呈现出明显的变化规律。在断层未活化前, 正应力相对稳定, 缓慢地增加。一旦断层出现活化, 继续开挖正应力将逐渐降低。随着断层活化程度不断增加至出现失稳, 正应力急剧减小。

综上, 工作面推进过程中, 断层面上剪应力出现增加、正应力出现降低是断层活化的一个标志。断层刚活化时剪应力逐渐增大, 正应力逐渐减小; 随着断层活化程度不断增加至出现失稳, 剪应力急剧减小, 正应力急剧减小。同时工作面不断推进至断层过程中, 断层面正应力和剪应力增加, 能量不断积累, 断层活化的可能性增加, 而断层活化能量释放出来, 反过来断层活化对工作面附近煤体产生非稳态的冲击和加卸载作用, 此时会导致煤岩冲击失稳的发生。

5.1.2. 断层面滑移量特征

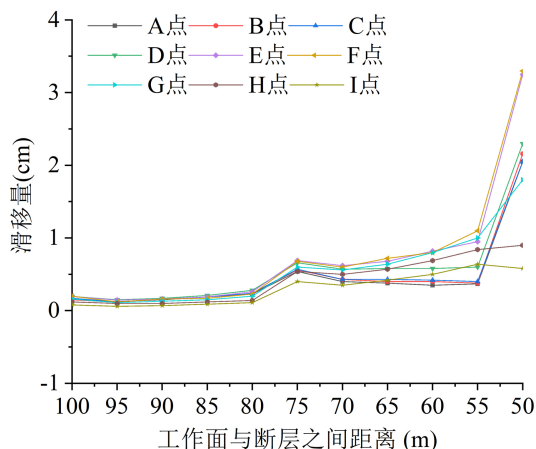


Figure 14. Curve of fault slip

图 14. 断层滑移曲线

断层面滑移量随开采过程的变化曲线如图 14 所示。由曲线可知, 在工作面推进初期, 滑移量增长缓慢; 工作面推进到距断层 55 m 处滑动位移开始增大, 继续推进将会造成断层的滑移错动。采动作用下断层发生活化, 通常会从上部区域开始, 逐渐向下蔓延并扩大范围。随着工作面不断接近断层, 断层面上部区域(A~G)先进入错动阶段。

综合图 11~14, 可知采高 4 m 时, 工作面距断层 55 m 是产生活化的临界点。在工作面推进过程中应力重分布和覆岩运动的影响传递到断层时, 断层面应力缓慢增加, 在此过程中变形能量逐渐积累, 采动作用下, 断层首先会发生极细微的滑动, 这种慢速变形过程可伴有煤炮或者微型的煤岩冲击失稳; 随着工作面的持续推进, 断层带周围煤岩体的变形能不断积累, 一旦突破临界平衡, 断层将发生突然下滑, 并冲击工作面煤岩, 导致煤体瞬间涌出, 发生煤岩冲击失稳灾害。

6. 断层活化诱发煤岩冲击失稳的加卸载分析

前文发现采动过程中断层面正应力和剪应力的增加造成能量的不断积累, 断层出现活化释放能量,

反过来对大采高工作面附近的煤体产生非稳态的冲击和加卸载作用，此时会导致煤岩冲击失稳的发生。另外采动过程中，上覆岩层发生垮落时断层会滑移错动。上覆岩层在未破坏前断层相对稳定，而随着大面积煤体被开采出，岩层发生运动，覆岩受采动影响垮落，应力连续性传递被迫中断，断层应力重分布，受采动应力和岩层运动的影响断层附近会局部出现离层空间，断层面上受到的水平荷载会变小，在断层构造的一侧会表现出卸载效应，断层活化失稳加剧。同时，断层活化滑移又会以非稳态的冲击和加卸载的形式反作用于煤岩，上覆岩层又会出现更严重的垮落，诱发煤岩冲击失稳事故。基于采动对断层的加卸载作用，结合加卸载响应比理论对断层活化诱发煤岩冲击失稳进行加卸载分析。

6.1. 断层活化加卸载响应率的参数及其变化特点

断层活化失稳前兆预测的研究，要以非均匀软弱夹层为受力单元，分析其本构关系和变形与破坏规律，整个断层面可以被简化成“完全弹性”与应变软化这两种性质的介质，基于软弱夹层两种不同介质的本构曲线如图 15 所示。

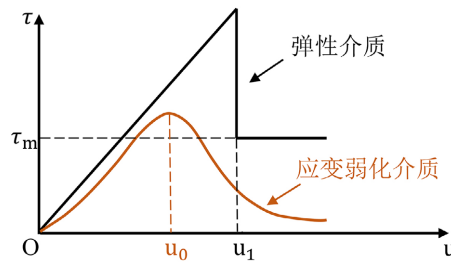


Figure 15. Constitutive curves of two kinds of media in soft intercalation

图 15. 两种不同软弱夹层介质的本构曲线

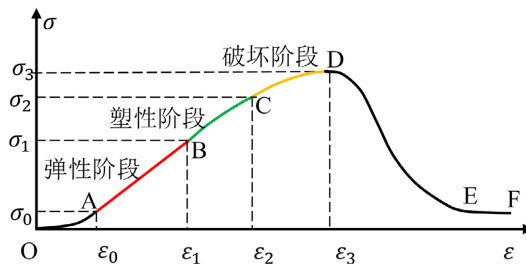


Figure 16. Constitutive curve of strain-softening material under triaxial stress condition

图 16. 三轴应力条件下应变软化材料的本构曲线

三轴压缩应力作用下应变软化材料的本构曲线如图 16 所示，在一个非线性系统中，应变软化材料彻底破坏前三个阶段的应变和应力变化量之间的比值即 $\Delta\varepsilon/\Delta\sigma$ 与三阶段是能一一对应的，因此 $\Delta\varepsilon/\Delta\sigma$ 可以作为非线性系统临近失稳的定量表示，定义这个比例系数为 k ，用下式计算：

$$k = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\sigma} \tag{1}$$

断层作为典型的非线性系统，在受到采动作用下会产生应变和位移等响应结果，因此在断层活化失稳前兆研究过程中，可将采动作用记为断层所受广义荷载表示为 P ，把该断层在广义荷载作用下所引起的系统响应记为 R ，由应变软化材料的本构曲线可推演出断层活化失稳前的 P 与 R 的关系曲线见

图 17。

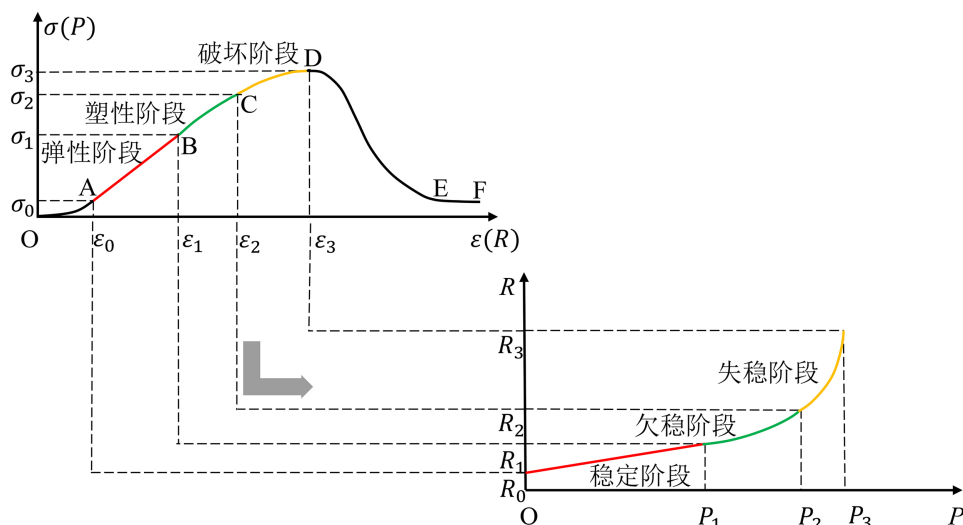


Figure 17. Relationship curve between load applied and response before fault activation and instability
图 17. 断层活化失稳前所受荷载和响应的关系曲线

由图 17 可知，弹性阶段对应的是断层稳定阶段，塑性阶段对应的是断层欠稳阶段，破坏阶段对应的是断层活化失稳阶段。三阶段下断层所受广义荷载所引起的系统响应与荷载变化量之间的比值 $\Delta R/\Delta P$ 都一一对应：断层稳定阶段对应的 $\Delta R/\Delta P$ 是定值，断层欠稳阶段对应的 $\Delta R/\Delta P$ 不断增大，断层活化失稳阶段对应下的 $\Delta R/\Delta P$ 趋向于无穷大。

将断层所受广义荷载的变化量记为 ΔP ，在广义荷载作用下断层的响应变化量记为 ΔR ，则断层非线性系统受采动作用而产生的荷载响应率 X 可定量表示为[18]：

$$X = \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (2)$$

式(2)中可描述煤矿开采下，断层非线性系统中系统响应量对采动荷载变化的响应程度。

设采动作用对断层进行加载(增量为 ΔP_+)时所引起的响应的增量为 ΔR_+ ；采动作用对系统进行卸载(增量为 $-\Delta P_-$)所引起的响应的增量为 $(-\Delta P_-)$ 。即可定义断层活化加载和卸载响应率分别为：

$$X_+ = \frac{\Delta R_+}{\Delta P_+} \quad X_- = \frac{\Delta R_-}{\Delta P_-} \quad (3)$$

6.2. 断层活化加卸载响应比参数特性

结合应变软化材料的本构曲线特征，在介质处于弹性阶段即在断层稳定阶段，断层活化加载响应率 X_+ 与卸载响应率 X_- 是相等的；但当介质所荷载超出弹性阶段即断层进入欠稳阶段后，则 $X_+ > X_-$ ；当断层失稳时， $X_+ \rightarrow \infty$ 。这说明，临近失稳时，即使再小的加载都会导致断层产生极大的响应。所以对断层进行加载时，荷载增量不变，所在阶段不同，荷载响应率也会有区别，响应越大，系统越接近失稳。因此，针对采动作用定义断层活化加卸载响应比 Y ：

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (4)$$

由断层活化失稳前的动力荷载与响应的关系及断层活化加卸载响应比参数的定义，可以推演出采动

过程中断层活化加卸载响应比曲线的变化规律，如图 18 所示。

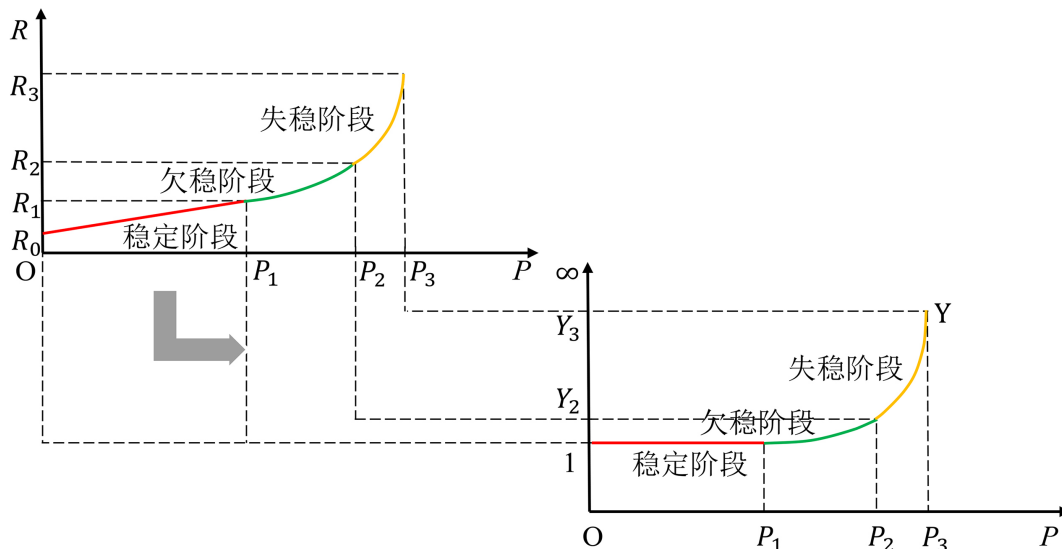


Figure 18. Change curve of loading/unloading response ratio during mining
图 18. 采动过程中加卸载响应比的变化曲线

断层活化加卸载响应比 Y 的值是由断层的稳定程度决定的，由图 18 可知，系统在稳定阶段时， $Y = 1$ ；系统在欠稳阶段时， $Y > 1$ ；系统在失稳阶段时， $Y \rightarrow \infty$ 。

结合响应比曲线规律分析，断层活化加卸载响应比参数 (Y) 的变化反映了断层稳定程度的变化，而且与稳定性能够一一对应，因此该参数可以用来定量地描述采动下断层的稳定程度；再者该参数可有效揭示断层的稳定性以及断层活化失稳机理，其大小只随着断层的稳定性变化而变化，与开采时荷载变化无关，因此对断层活化失稳能很好地进行预测。综上所述，可利用断层活化加卸载响应比参数对断层活化失稳进行评价和失稳预测。

6.3. 参数的选择及计算

采动下断层处于动态变化之中，即处于不断地加卸载之中。因此，可以把采动作用作为对断层进行加卸载的手段。

由图 11~13 可知，受采动作用断层面应力呈现明显的变化规律，考虑将煤矿开采引起的采动作用作为对断层的加卸载，把工作面推进的距离划分为若干个加卸载区段，将加卸载区段内断层面上剪应力变化量的绝对值作为加载量，将加卸载区段内断层面上正应力变化量的绝对值作为卸载量；将采动作用对断层进行的加卸载即断层面上剪应力和正应力的变化时对应的应变变化作为断层受到采动后的响应，从而确定断层活化加卸载响应比 Y 的值。

断层活化加卸载响应比 Y 可采用式(5)表示。

$$Y = \frac{X_+}{X_-} = \frac{(\Delta\varepsilon/\Delta\tau)_+}{(\Delta\varepsilon/\Delta\sigma)_-} \quad (5)$$

6.4. 断层活化前兆预测指标

根据数值模型，对各监测点累积滑移量曲线(见图 19)进行分析。工作面与断层距 55 m 之前，各监测点累积滑移量曲线总的增长趋势是缓慢平稳，随后继续开挖断层上部区域(A~G 点)累积滑移量将先出现

大幅度增加, 断层出现活化突变。

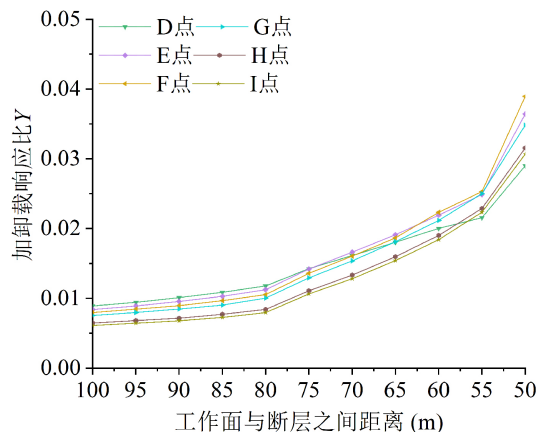


Figure 19. Accumulated slip curve of each monitoring point before fault activation

图 19. 断层活化前各监测点累积滑移量曲线

崔峰等[17]引入加卸载大小比的概念计算加卸载响应比来研究开采扰动诱发煤层破坏的规律, 本文基于此方式对采动下断层的加卸载情况进行表征。加卸载响应比 Y 可采用式(6)计算。

$$Y = \frac{\sigma_+}{\sigma_-} = \frac{\tau}{\sigma} \quad (6)$$

式中, σ_+ , σ_- 分别为采动下断层的加载应力和卸载应力。 τ 和 σ 是每个加卸载区段的剪应力和正应力的值。以此参数研究断层活化的前兆特征。

图 20 为工作面推进下加卸载响应比 Y 的变化趋势。

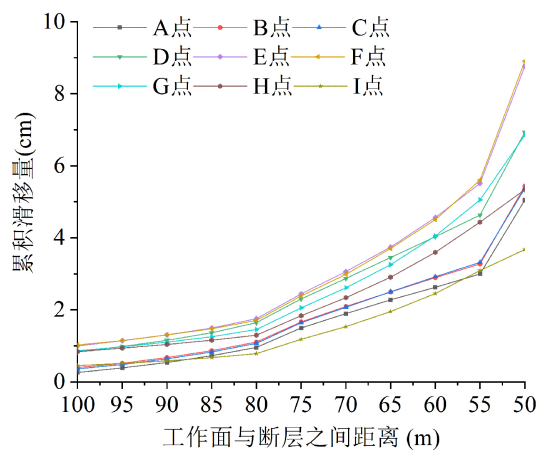


Figure 20. Change trend of loading/unloading response ratio Y under the advancement of the working face

图 20. 工作面推进下加卸载响应比 Y 的变化趋势

由图 20 曲线变化趋势可知, 工作面刚开始推进时, 断层面加卸载响应比 Y 一直处于相对稳定的状态, 缓慢上升, 当工作面推进至距离断层 55 m 前 D~I 点均 Y 值缓慢从 0.008 附近增加至 0.02 左右; 继续开挖, 其加卸载响应比 Y 突然增大, 在工作面距断层 55 m 后继续开挖各点处 Y 值均会突增, 发生突变, 这就预示着断层处即将失稳, 突变时工作面与断层之间的距离与数值模拟中所对应的断层活化时工作面推进所

在位置相吻合。因此，可以依据断层处加卸载响应比对断层活化诱发的煤岩冲击失稳进行预测。

7. 结论

1) 随着大采高工作面逐渐推进至断层，围岩垂直应力不断积累并向着承载力较大的区域(工作面外侧的煤体)集中，近断层侧煤柱达到一定宽度，围岩垂直应力发生“转移”集中于工作面另一端，随着工作面继续推进，断层面垂直应力突降由断层远端向近端延伸。4 m~8 m 采高工作面在采动过程中断层活化位置出现相应的提前；对比发现采高越大，断层滑移量越大。

2) 随工作面推进，断面上的剪应力呈现先缓慢增长 - 加速增长 - 突降的趋势，正应力呈现先缓慢增长 - 逐渐减小 - 急剧减小的趋势；剪应力增加和正应力减小同时出现，预示采动作用下断层开始活化。

3) 将加卸载响应比直接与断层活化失稳机制进行有机的耦合，分析了断层活化诱发煤岩冲击失稳机制，证明加卸载响应比理论可以用来对断层活化失稳进行预测，也能为大采高工作面的安全开采提供一定的理论支持。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 断层黏滑动态变形过程的实验研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 171-179.
- [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.
- [4] Wang, J.A. and Park, H.D. (2001) Comprehensive Prediction of Rockburst Based on Analysis of Strain Energy in Rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**, 49-57. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00030-X)
- [5] Sainoki, A. and Mitri, H.S. (2015) Effect of Slip-Weakening Distance on Selected Seismic Source Parameters of Mining-Induced Fault-Slip. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **73**, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.09.019>
- [6] 蔡武, 窦林名, 司光耀, 等. 煤矿开采动静叠加载诱发断层冲击地压机理[J]. 工程, 2021, 7(5): 306-334.
- [7] 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(A2): 263-268.
- [8] 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.
- [9] 张宁博, 赵善坤, 赵阳, 等. 逆冲断层卸载失稳机理研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1671-1680.
- [10] 毛德兵, 陈法兵. 采动影响下断层活化规律及其诱发冲击地压的防治[J]. 煤矿开采, 2013, 18(1): 73-76+65.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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(S1): 18-30.
- [16] 郭璐, 贺可强, 周云, 等. 水库型滑坡复合水动力增载位移响应比物理预测模型及其应用[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1561-1572.
- [17] 崔峰, 贾冲, 来兴平, 等. 基于加卸载响应比的冲击地压矿井急倾斜巨厚煤层推进速度研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 745-761.
- [18] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统失稳的前兆与地震预报——响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B 辑化学生命科学地学), 1991(5): 512-518.