开采扰动下断层应力-能量演化与渐进-级联滑移特征研究

欧阳振华[1,2],许乾海[1],张宁博[1,2],刘　建[1,2],张天姿[1],石增柱[3],韩国文[3]
(1. 应急管理大学 矿山安全学院,河北 廊坊　065201;2. 矿山钻探救援应急管理部重点实验室,北京　100040;
3. 开滦(集团)有限责任公司唐山矿业分公司,河北 唐山　063003)

摘要: 为理清断层区域物理场演化特征,揭示采动作用下断层的滑移失稳规律,以唐山矿大巷煤柱区域为工程背景,采用相似模拟、数值模拟和理论分析相结合的研究方法,研究了开采扰动下断层应力-能量演化与渐进-级联滑移特征. 结果表明:覆岩支承压力随推进呈"速升—骤降—缓升—稳定"的阶段性变化规律,并在贯通过断层前后达到峰值;断层面剪应力经历"上升—震荡—下降"过程,中期受覆岩垮落卸载影响出现突降并表现出黏滑特征,后期随持续滑移而衰减;断层阻隔导致应力"上盘集中、下盘弱响应",且响应具有滞后性;声发射事件与能量释放出现2次突增,分别对应贯通后断层上盘黏滑变形与过断层后滑移空间扩大引发的岩层错动,能量在贯通阶段瞬时释放、过断层后再积聚,并呈随测点距工作面距离增大而延迟的传播特征;断层滑移倾向性指标在过断层前达峰后骤降,表征滑移启动及由局部活化向整体失稳的扩展;断层滑移具有"下部启动-中部传递-上部联动"的演化特征,裂隙贯通形成滑移体并最终诱发整体失稳垮落;理论分析表明断层局部滑移会引起剪应力非均匀传递并触发邻区级联滑移. 综合来看,断层附近应力集中会促使能量积聚,能量突释将驱动断层发生滑移失稳,研究结果可为预测断层区域动力灾害及制定差异化防控方案提供理论依据.

关键词: 断层滑移;级联传递;开采扰动;应力演化;能量演化
中图分类号: TD 313　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)03-0636-16

Stress-energy evolution and progressive-cascading fault slip under mining-induced disturbance

OUYANG Zhenhua[1,2], XU Qianhai[1], ZHANG Ningbo[1,2], LIU Jian[1,2], ZHANG Tianzi[1], SHI Zengzhu[3], HAN Guowen[3]
(1. School of Mine Safety, University of Emergency Management, Langfang, Hebei 065201, China;
2. Key Laboratory of Drilling Technology in Mine Rescue, Ministry of Emergency Management, Beijing 100040, China;
3. Kailuan (Group) Co., Ltd. Tangshan Mining Branch, Tangshan, Hebei 063011, China)

Abstract: To clarify the evolution of physical fields in fault zones and reveal the mechanisms of fault slip instability under mining disturbance, the coal pillar area of the main roadway in Tangshan Mine was selected as the engineering background. An integrated approach combining physical simi-

收稿日期: 2025-11-19　　**修回日期:** 2026-02-28　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250527
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52274120);河北省自然科学基金重点项目(E2024508004)
第一作者: 欧阳振华(1976—),男,湖南省洞口县人,教授,博士生导师. E-mail: oyzhua@163.com
通信作者: 许乾海(2001—),男,贵州省遵义市人,硕士研究生. E-mail: Bsea888@163.com
引用格式: 欧阳振华,许乾海,张宁博,等.开采扰动下断层应力-能量演化与渐进-级联滑移特征研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):636-651.
OUYANG Zhenhua, XU Qianhai, ZHANG Ningbo, et al. Stress-energy evolution and progressive-cascading fault slip under mining-induced disturbance[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 636-651.

larity simulation, numerical simulation, and theoretical analysis was employed to investigate the stress-energy evolution of faults and their progressive-cascading slip characteristics under mining disturbance. The results show that the abutment pressure in the overlying strata evolves through four stages, namely rapid increase, abrupt decrease, slow increase, and stabilization, and reaches peak values immediately before and after fault breakthrough. The shear stress on the fault plane undergoes a process of increase, fluctuation, and decrease, with a sudden drop in the intermediate stage due to unloading induced by overburden collapse and with evident stick-slip behavior, followed by gradual attenuation during continued slip. The fault barrier effect causes stress concentration in the hanging wall and a weak, delayed response in the footwall. Acoustic emission events and energy release exhibit two pronounced surges, corresponding respectively to hanging-wall stick - slip deformation after fault breakthrough and stratal dislocation induced by the expansion of fault slip space after mining across the fault. Energy is released instantaneously during fault breakthrough and then re-accumulates after crossing the fault, showing delayed propagation as the distance between the monitoring point and the working face increases. The fault slip tendency index peaks before mining across the fault and then decreases sharply, indicating slip initiation and the transition from local activation to overall instability. Fault slip is characterized by lower-part initiation, middle-part transmission, and upper-part linkage, with fracture coalescence forming a slip body that ultimately triggers global instability and collapse. Theoretical analysis indicates that local fault slip causes non-uniform shear stress transfer and may induce cascading slip in adjacent zones. In summary, stress concentration near the fault facilitates energy accumulation, whereas abrupt energy release drives fault slip instability. The findings provide a theoretical basis for predicting dynamic disasters in fault zones and for formulating differentiated prevention and control measures.

Key words: fault slip; cascading transfer; mining-induced disturbance; stress evolution; energy evolution

断层是井工煤矿开采中普遍存在的地质构造，其周围煤岩体通常处于结构松散、应力集中与能量富集的临界状态．采掘扰动会破坏断层周边的非均匀物理场，引起应力重新分布和能量释放，导致断层稳定性削弱，进而诱发断层滑移失稳[1]，甚至可能触发冲击地压等矿山动力灾害，造成严重的人员伤亡和财产损失[2-4]．因此，系统揭示断层区域物理场的演化特征，探究开采扰动下断层滑移失稳特征，对实现断层邻近区域的安全高效开采具有重要的理论与工程意义．

国内外学者基于相似模拟、数值模拟及现场监测等手段，对采动作用下断层滑移失稳机理进行了大量研究．文献[5-6]通过相似与数值模拟揭示了断层上、下盘开采诱发断层滑移的差异性机制，指出当工作面由断层下盘向断层推进时，断层更易发生滑移．文献[7]综合采用相似模拟、数值模拟与现场实测手段，系统探讨了断层冲击地压的形成机理，认为覆岩裂隙与断层带贯通是引发断层系统失稳和工作面煤体冲击的直接诱因．文献[8]通过开展断层动光弹试验、数值模拟试验和理论分析，对应力波在断裂结构中的传播规律和应力波作用下断层摩擦能演化特征进行了研究，认为应力波自上至下分区扰动断层并造成断层滑移，其滑移模式受初始应力状态和应力波扰动强度影响．文献[9]指出，断层冲击矿压的本质源于断层与顶板结构的双重作用，其中采动引起的水平卸载与垂向加载是采动应力主导型断层活化的根本力学机制．文献[10]基于分形理论分析了断层界面效应与岩体破坏间的关系，提出断层失稳过程具有明显的突变特征．文献[12]将突变理论中的尖点突变模型引入断层活动机制研究，为断层系统非连续性演化的理论分析提供了新的思路．文献[13]研究表明，断层倾角、落差、刚度以及断层面粗糙度等断层内在属性是断层滑移失稳的关键影响因素．文献[14]利用双面剪切试验，研究了不同粗糙度岩石组合结构在不同加载速度和竖

向载荷下滑移失稳的力学特征，结果表明断层面粗糙度增加会使岩石界面黏聚力增加、启滑剪应力提高.

由于断层-围岩结构的复杂性，断层区域的应力与能量演化过程呈现显著的非线性与耦合性. 文献[15-16]研究表明，采动作用下断层应力、能量演化特征对滑移失稳的发生具有决定性影响，并构建了断层理论力学模型，推导了表征断层滑动特征的位移场与能量场分布函数，揭示了断层面上应力场与能量场的时空演化规律. 文献[17]建立了断层面滑移力学模型，研究发现断层面正应力与剪应力与断层露头垂直距离呈近似线性关系. 文献[18]通过数值模拟分析了断层不同部位的应力积累与塑性应变演化，揭示了断层滑移趋势的空间差异性. 文献[19-20]结合数值模拟与室内试验，研究了断层周围应力演化及能量释放规律，揭示了不同应力状态下断层单元破坏、剪应力演变与能量释放特征. 文献[21]利用UDEC软件，模拟研究了硬厚顶板下邻断层工作面不同推采方向的应力分布特征.

综上所述，现有研究在断层滑移失稳机理方面取得了重要进展，但多数工作集中于应力与能量的整体响应规律，对采动下断层滑移的空间分区特征及其沿倾向方向的传递机制缺乏系统揭示. 事实上，断层滑移往往以“分区响应、局部触发、级联扩展”的形式发生，其局部滑移与上覆岩层结构之间存在显著的时空耦合关系. 基于此，本文以唐山矿大巷煤柱区域为工程背景，采用相似模拟与数值模拟相结合的方法，系统研究临近断层开采条件下的覆岩压力演化与动力响应特征，明晰采动下断层-覆岩系统变形场的时空演化规律，分析断层应力分布与能量积聚耗散机制，探讨断层-覆岩系统的分区滑移传递规律及其渐进-级联系统演化机制，为断层邻区矿井动力灾害预测与防控提供理论依据与技术支撑.

1 工程背景概况

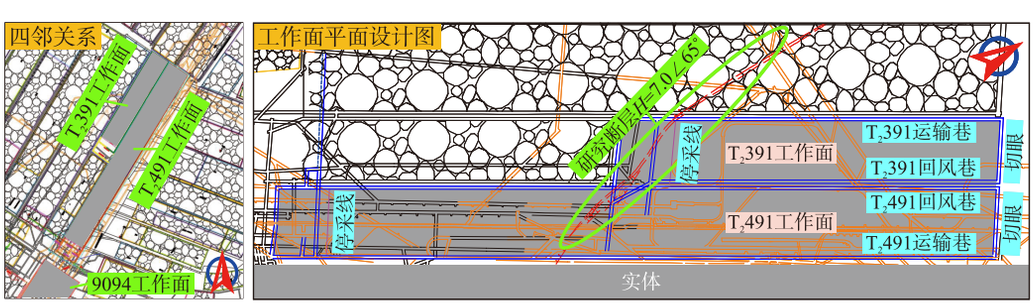
唐山矿为多水平、分区域生产，主要开采煤层为5，8，9号煤层，8，9号煤和5号煤之间的平均层间距约为34.76 m. 大巷煤柱区域位于该矿铁二采区，平均埋深为652.7 m，主采8，9号煤层，煤层平均厚度为11.4 m，平均倾角为21°，煤层结构复杂. 8，9号煤层顶、底板岩性变化不大，比较稳定. 该矿地应力以水平压应力为主导，最大主应力与最小主应力比值为1.55，具有较强的方向性，地应力实测结果见表1.

表1 地应力测试结果

Table 1 Crustal stress information

主应力类别	主应力值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)
最大主应力	33.00～33.33	259.30～264.57	2.01～0.86
中间主应力	22.09～22.19	－18.57～－1.11	－75.60～78.76
最小主应力	19.60～21.47	169.81～174.40	－14.25～11.21

在近似东西向的挤压作用下，该矿西部赋存着多条纵向断层，并伴随着大量中心断层的衍生[15]. 本文研究的断层位于大巷煤柱区域中部，落差为7 m，倾角为65°，如图1所示. 由于埋深大和采空区叠加影响，大巷煤柱区域煤岩应力集中程度较高，当工作面开采至该断层附近时，采掘活动引起的卸荷效应和能量瞬时释放极易导致断层滑移失稳，甚至诱发矿山动力灾害.



注：H为断层落差；∠为断层倾角.

图1 矿井地质概况

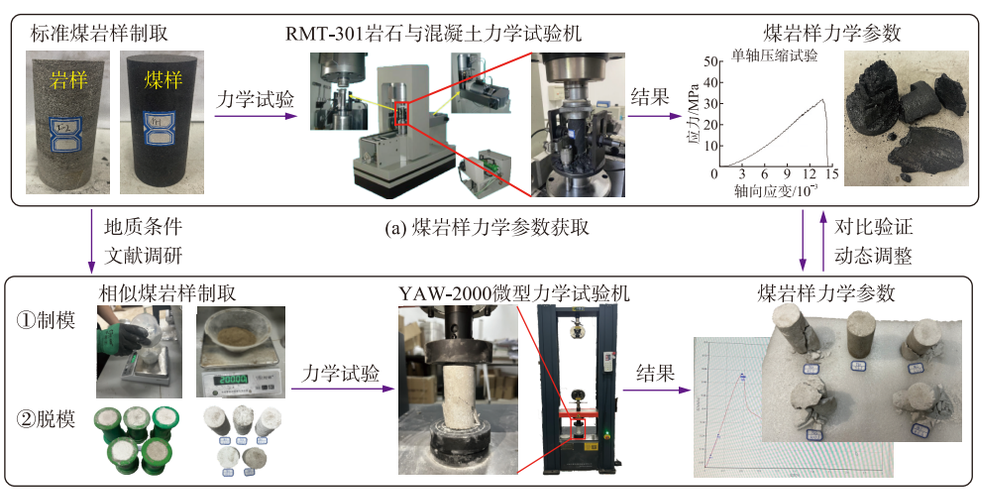
Fig. 1 Geological setting of the study mine

2　采动下断层滑移失稳物理试验研究

2.1　试验方案

基于唐山矿大巷煤柱区域地质特征构建二维相似物理模型．模型采用细砂作为骨料，碳酸钙与建筑石膏为胶结材料，水为黏结剂．模型整体尺寸为 2 000 mm×200 mm×1 200 mm(长×宽×高)，模型中 5 号煤层厚度为 2 cm，8，9 号煤层厚度为 6 cm，断层落差 3.5 cm，倾角为 65°．依据相似理论确定模型的几何相似比为 1∶200，容重相似比为 1∶1.56，强度相似比 1∶312，时间相似比为 1∶14.14．为模拟上覆岩层的自重应力，采用带压力表的千斤顶组施加 0.036 MPa 的补偿荷载，模型左右两侧采用位移约束．

模型从底到顶依次铺设，单次铺设高度为 2～4 cm，按照相似配比精确称量细砂、石膏、碳酸钙、水等模拟材料，并用搅拌机搅拌均匀后分散倒入试验台中，沿着事先做好的标记线条铺设夯实．每层铺设后在层间均匀撒云母粉-木屑混合物来表征模型层理．铺设断层区域时，在断层面铺设一层云母粉-木屑混合物，从而起到隔离上、下盘以及模拟断层粗糙度的作用．试验开始前，为减弱边界效应，模型左、右两侧留设了 30～40 cm 的边界煤柱．试验过程中采用分步开挖方式，单步开挖 3～6 cm，每次开挖结束待模型应力与位移趋于稳定后，再进行下一步开挖．根据研究区实际地质条件，在试验开始前预先开挖 5 号煤层，并对监测数据进行基线平衡．试验中各模拟岩层的相似材料配比标定流程如图 2 所示，煤岩层物理力学参数见表 2.



(b) 相似煤岩样力学参数获取

图 2　相似材料配比标定流程

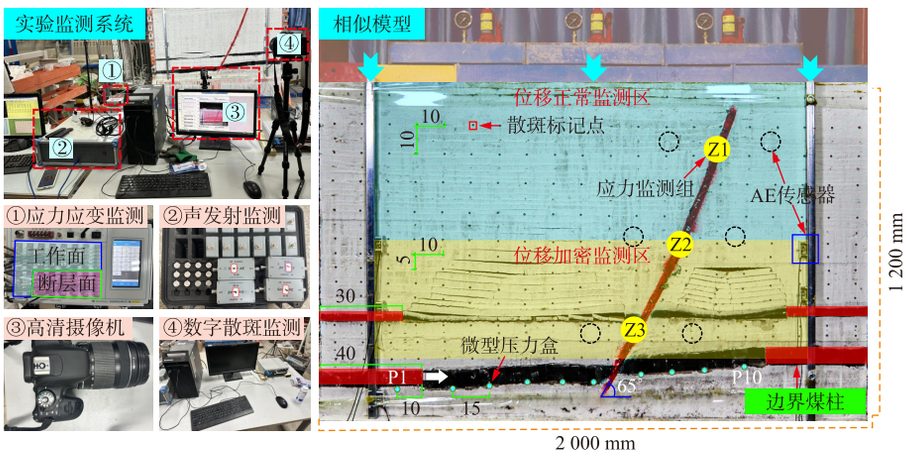
Fig. 2　Similar material mix ratio calibration process

表 2　煤岩物理力学参数

Table 2　Physical and mechanical parameters of coal rock layers

岩层序号	岩性	配比号	密度/(g·cm^{-3})	抗压强度/kPa	模型厚度/cm		岩层序号	岩性	配比号	密度/(g·cm^{-3})	抗压强度/kPa	模型厚度/cm	
					左	右						左	右
10	粉砂岩	464	1760	100.32	18	16	5	中砂岩	555	1670	88.14	17	17
9	细砂岩	355	1720	117.95	8	8	4	5号煤	755	860	21.96	2	2
8	粉砂岩	464	1760	100.32	7	7	3	粉砂岩	464	1760	100.32	16～20	12～16
7	中砂岩	555	1670	88.14	13	13	2	8,9号煤	755	860	21.96	6	6
6	细砂岩	355	1720	117.95	20	20	1	粉砂岩	464	1760	100.32	9～13	15～19

试验过程中，采用 JM3816D 采集系统记录应变信号，采用 DS5-16B 监测系统实时捕获声发射(AE)信号，采用 ISM-CONTR-VG5-2DB 系列非接触式视频应变-位移测量系统精密监测断层滑移位移及覆岩裂隙演化过程．此外，使用 Canon 相机对试验全过程进行图像记录．整体模型与监测系统布置如图 3 所示．



注:Z1,Z2,Z3为应力监测点编号;P1,…,P10为微型压力盒编号.

图3 相似模型及试验监测系统布置

Fig. 3 Schematic diagram of similar physical model and monitoring point layout

2.2 工作面超前支承压力及动力响应特征

工作面前方支承压力能够反映煤层的受力状态,声发射事件则可表征覆岩破裂与能量释放过程.基于预埋于断层上盘8,9号煤层底板的压力盒监测数据及声发射系统监测结果,对试验过程中超前支承压力及动力响应特征进行分析,结果如图4所示.

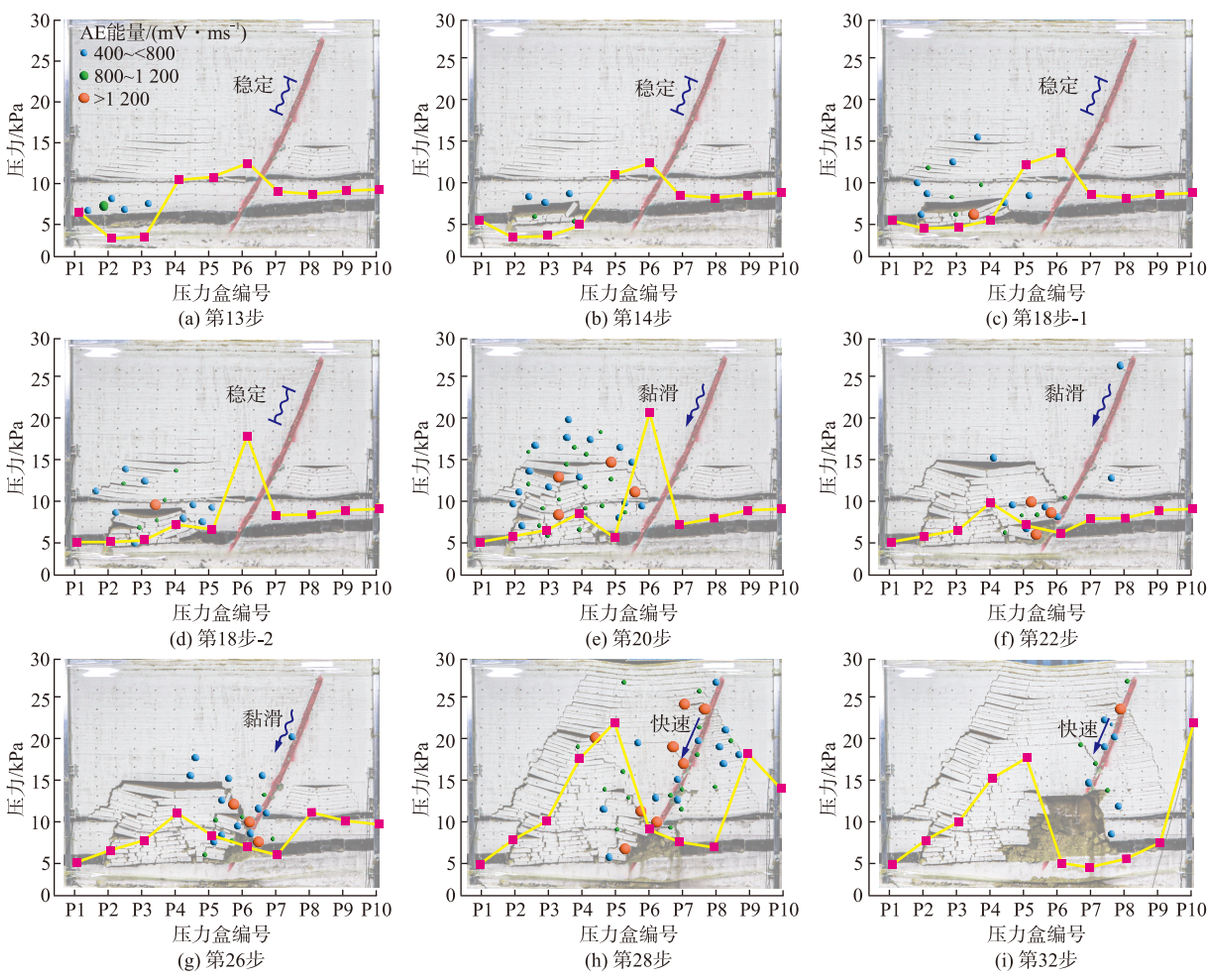


图4 开采过程中工作面覆岩压力变化及动力响应特征

Fig. 4 Characteristics of overlying rock pressure changes and dynamic responses on the working face during mining

由图4可见,随着工作面推进,各压力盒监测值随采动过程呈显著阶段性变化.工作面前方覆岩压力在支承压力影响下逐渐升高;当对应煤层被采出后,压力值迅速下降.随后,随着上覆岩层

的逐步垮落，采空区下方的压力监测点出现缓慢回升现象，最终在岩层完全垮落后趋于稳定，形成新的平衡结构．由于断层的阻隔作用，在上盘推进阶段，下盘监测点总体响应滞后且幅值有限，呈现明显的盘间不对称性．

声发射响应与应力演化过程密切相关，并受到断层结构控制．采动初期，声发射事件数量较少，能量水平普遍较低，主要集中在采空区上方垮落带中，说明此阶段断层稳定性较高．当采空区贯通后，声发射事件数及能量值均显著增加（声发射能量≥400 mV·ms），表明采动卸荷与重力共同作用下，断层上盘岩层开始产生黏滑变形，断层活动增强．此时声发射事件沿断层两侧密集分布并向上扩展，反映出断层应力调整与能量释放的集中发生．当工作面推进至断层并贯通过断层带时，断层中部区域首次出现高能量声发射事件，表明断层面已进入非稳定滑移阶段．过断层后，随着滑移空间增大，断层附近岩层沿断层面持续下滑，导致能量再次释放，声发射事件出现第 2 次集中爆发．此阶段断层两盘交互错动剧烈，裂隙在断层带内快速扩展；由于断层上盘为主动盘，其滑移量较大，声发射能量值明显高于下盘，揭示出上盘在失稳过程中的主导作用．在未过断层前，下盘声发射响应变化较弱，声发射能量峰值总体低于上盘，表明断层不仅影响应力传递路径，还充当裂隙扩展与能量释放的优先通道，对声发射事件的空间分布具有引导和控制作用．

综上，断层及其邻近围岩随煤层开采发生明显的应力传递与重分布现象，工作面前方覆岩压力整体呈现出“速升—骤降—缓升—稳定”的阶段性演化规律，并在过断层期间达到峰值．声发射事件数与能量在采动作用下均出现 2 次显著突增，反映出断层滑移过程中的能量积聚耗散特征．受断层阻隔作用，采动过程中区域应力与声发射呈现“上盘集中、下盘弱响应”非对称分布特征，断层上盘岩体的失稳下滑是系统破坏的主要诱因．

2.3　断层面剪应力变化

断层面剪应力是控制断层滑移的主要驱动力．当断层面上产生的剪应力超过其摩擦强度时，断层由稳定状态转变为滑动状态．为研究采动下断层面剪应力的空间分布特征，在断层端部、中部及下部区域分别布置了 3 个应力监测组．每个监测组由 2 个压力盒组成：其中一个沿水平方向布置，用于测量上覆岩层的垂向应力；另一个沿断层倾角方向布置，用于测量断层带法向应力．依据静力学平衡条件，可由法向应力与垂向应力分量求得断层面剪应力，其计算公式见式（1）[22]．压力盒布置位置示意见图 5a，断层面剪应力的变化规律如图 5b 所示．

$$\tau_f=\frac{\sigma_f\cos\theta-\sigma_z}{\sin\theta},\tag{1}$$

式中：τ_f 为断层面上的剪应力，MPa；σ_f 为断层面上的正应力，MPa；σ_z 为断层面附近的自重应力，MPa；σ_x 为断层面附近的水平应力，MPa；θ 为断层倾角，(°)．

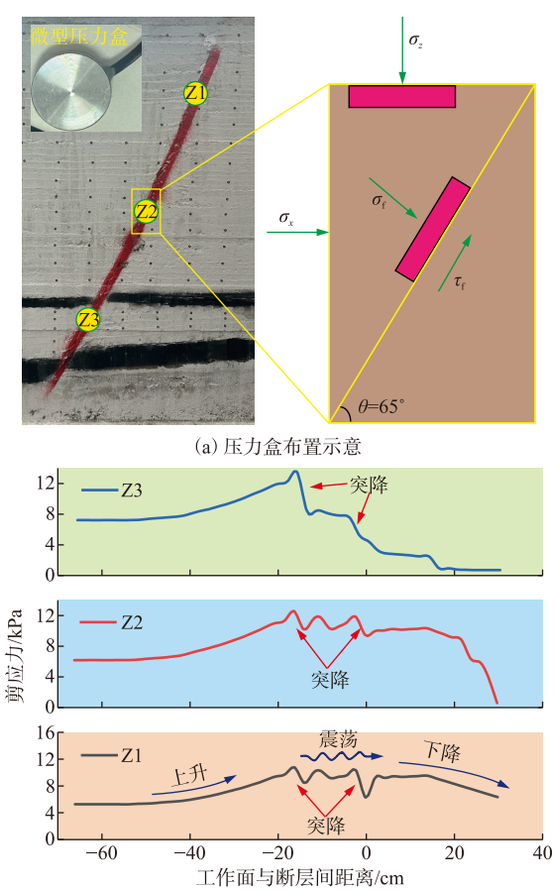


图 5　断层面剪应力

Fig. 5　Shear stress on the fault plane

图 5b 为采动过程中断层面剪应力的变化趋势．由该图可见，当工作面推进至距离断层约 18 cm 时，5 号煤采空区与 8，9 号煤采空区贯通，断层面剪应力整体发生第 1 次明显突降．其中，靠近煤层的 Z3 监测组剪应力降幅最大，随后进入稳定下降阶段；而 Z1，Z2 监测组由于距煤层较远，在突降后表现出一定的震荡特征，表征断层黏滑行为．随着工作面进一步接近断层，当推进至距离断层约 3 cm 时，断层面剪应力整体出现第 2 次突降，

3个监测组剪应力值均显著降低,并在应力平衡后开始持续下降.

在贯通过断层后,由于Z3监测组位于断层下方近煤层区域,最先受到采动扰动影响,其所处岩层率先发生垮落,导致剪应力持续衰减并长期维持在低水平.随后,当工作面越过断层约20 cm时,断层滑移加剧,引发模型大范围垮落,Z2测点所在岩层受此影响,剪应力迅速降低至最小值.相比之下,Z1测点距离工作面最远,其所在岩层未发生显著破坏,剪应力仅出现轻微下降.总体上,Z3测点的剪应力峰值与变化幅度均最大,Z1测点最小,表明断层面剪应力随埋深增加而增大,且距工作面越近,受采动扰动影响越显著.

综上所述,断层面剪应力在采动过程中经历了"上升—震荡—下降"的动态演化过程.初始阶段,随着煤层回采,断层面剪应力持续增加;当覆岩垮落导致卸载效应增强时,断层开始滑移,剪应力在第1次突降后进入震荡阶段,表征断层黏滑行为.过断层后,断层持续滑移引起剪应力迅速衰减,直至模型整体垮落,断层系统达到新的低应力平衡状态.该规律揭示出断层滑移失稳的发生与采动诱导的卸载效应及应力重分布密切相关,尤其是在断层附近区域,剪应力突降是系统失稳的先兆响应.

2.4 断层带变形场演化规律

随着工作面推进,覆岩空间结构持续演化,采动引起的覆岩垮落对断层稳定性产生显著影响,使断层上、下盘之间产生差异性错动,进而导致断层-覆岩系统发生复杂的非线性破坏.基于散斑监测系统的位移与应变数据,选取试验过程中相机拍摄的典型阶段覆岩破坏高清原始图像,对其进行灰度化处理后,导入数字图像相关分析软件DICe中进行二次计算,分析采动作用下断层-覆岩系统变形场的时空演化规律,如图6所示.

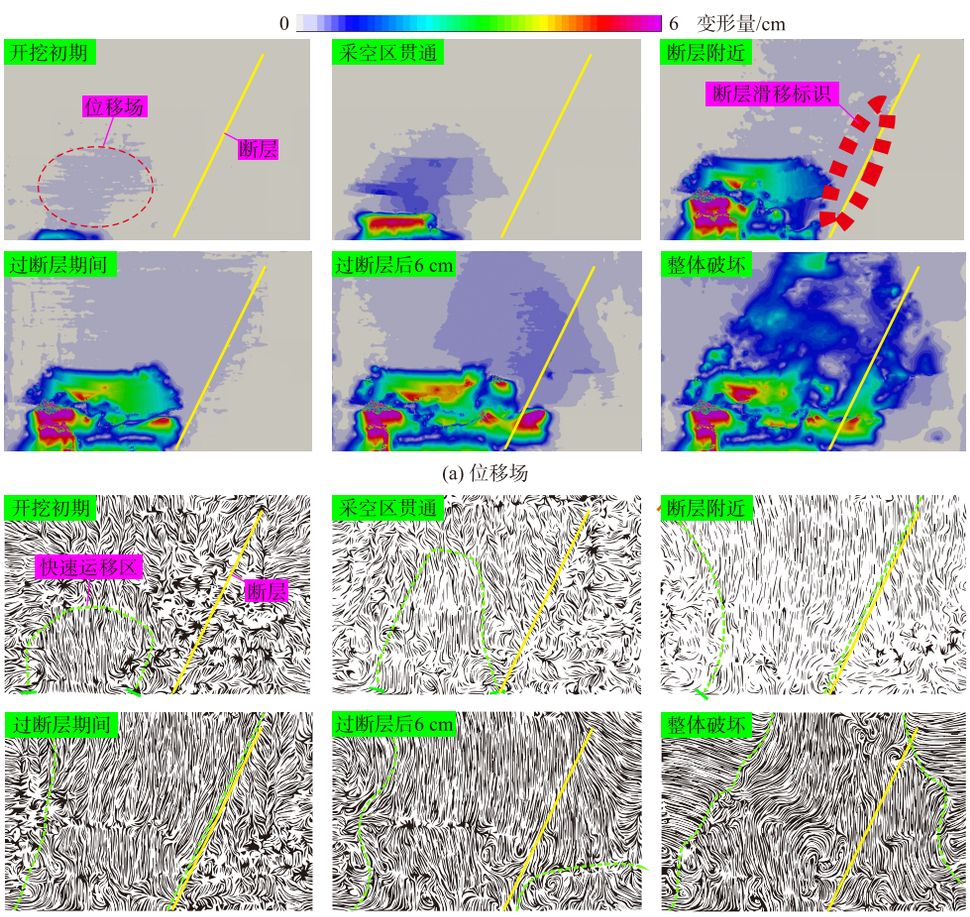


图6 采动作用下断层-覆岩系统变形场演化特征

Fig. 6 Evolution of the deformation field in the fault-overburden system during mining

由图6可知,在开采初期,断层受采动扰动影响较小,断层及邻区岩层位移幅度较小且分布均匀,运移趋势流线平稳,采空区位移云图呈现出典型的"梯形"分布特征,系统整体处于稳定阶段.随

着工作面推进并导致5号煤与8,9号煤采空区贯通,断层上盘局部岩层发生垮落,采空区岩层下沉量显著增加,断层上盘运移趋势流线由稳定期进入运移期,而下盘仍保持相对稳定.此阶段覆岩垮落带高度变化有限,但发育高度持续上升,表明采动影响逐步扩展至更高层位.当工作面临近断层时,受采空区贯通与卸载效应共同作用,断层下部区域率先出现滑移迹象,位移场沿断层面向上扩展.工作面越过断层后,断层上、下盘发生大范围错动,流线平行且光滑,预示断层滑移速度增加.值得注意的是,断层在持续滑移过程中不断破坏周围岩层结构,使断层上下盘裂隙贯通区逐步扩大,滑移空间进一步增大,最终诱发模型整体垮落并形成新的稳定结构.

为探明断层滑移趋势,对断层-覆岩系统变形场演化进行了分析,如图7所示.由图7可知,断层-覆岩系统的滑移破坏具有明显的阶段性.5号煤与8,9号煤采空区贯通前,模型处于稳定阶段;贯通后,在覆岩自重与卸载效应共同作用下断层下部率先进入局部滑移阶段;过断层期间,断层面阻断了覆岩连续性,致使滑移体沿断层面向下错动,应变场沿断层面持续向上演化并最终贯通.至此,断层-覆岩系统进入稳滑阶段,裂隙贯通形成的滑移体获得充分的滑移空间,并在上、下盘相对运动的反馈作用下诱发整体垮落.综上,断层-覆岩系统在采动过程中经历了“局部—整体”的滑移路径,其滑移失稳是应力传递、能量突释与空间结构重组协同作用的结果.

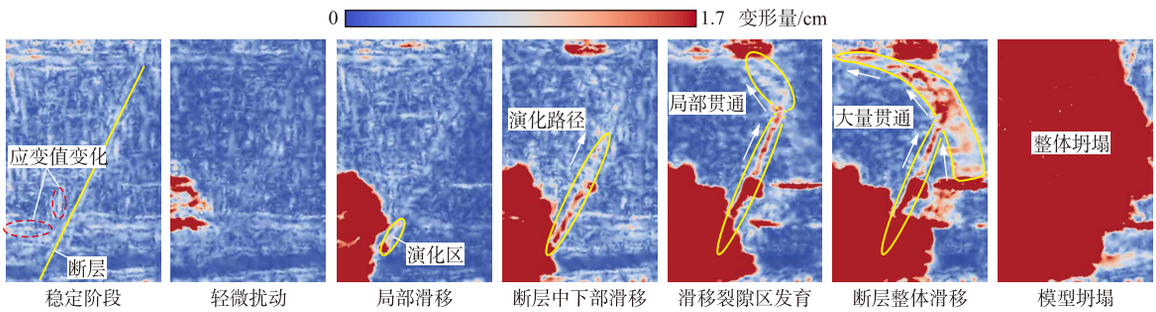


图7　采动作用下断层及其附近岩层变形场演化特征

Fig. 7　Evolution of the deformation field in faults and surrounding rock layers under mining activities

3　采动下断层应力分布及能量积聚耗散规律

3.1　数值模型建立

为进一步揭示采动作用下隐伏断层的应力分布特征及能量积聚与耗散规律,在相似模拟试验基础上,采用FLAC^{3D}建立数值计算模型.模型整体尺寸为2 000 mm×200 mm×1 200 mm(长×宽×高),共划分为83 698个单元与91 125个节点,如图8所示.

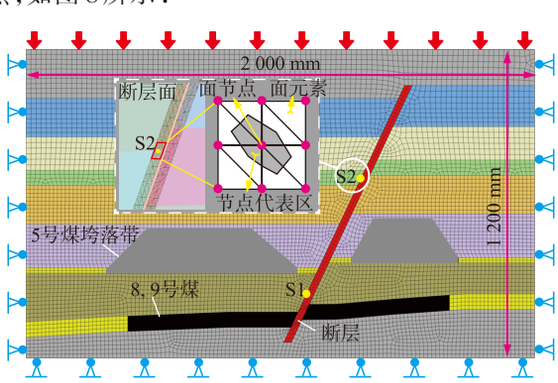


图8　FLAC^{3D}数值模型

Fig. 8　FLAC^{3D} numerical model

模型采用Mohr-Coulomb本构模型,考虑深部地应力及断层构造影响,侧压系数取1.6.模型前后及左右边界施加水平位移约束,底部施加垂直位移约束,顶部加载补偿荷载以模拟上覆岩层自重应力.断层面通过软件内置Interface接触面单元实现[23-25],其法向刚度取20 GPa,切向刚度取50 GPa,抗拉强度为0.5 MPa,内摩擦角设为20°[26].数值模拟共划分42个开挖步.并采用强度折减后的中砂岩模拟5号煤层回采,范围参照相似模拟试验所测得的5号煤垮落带范围.岩层力学参数依据矿区地质勘探资料及岩样力学试验结果综合确定,具体参数见表3.

表3　数值模型岩层力学参数

Table 3　Mechanical parameters of rock strata

岩性	密度/(g·cm^{-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	2 750	4.35	2.10	13.0	5.4	40
细砂岩	2 680	3.31	1.71	18.5	10.5	44
中砂岩	2 600	3.57	1.92	15.4	7.3	42
煤	1 340	1.14	0.45	3.0	0.1	26

3.2 采动下断层应力分布特征

在煤层回采过程中，煤体及断层周围的应力场不断发生调整与重分布．随着工作面逐步逼近断层，采动应力与构造应力叠加，形成局部高应力集中区，极易诱发断层活化与滑移，从而引起突发动力响应或冲击型灾害．为揭示采动扰动下断层区域应力演化特征，选取数值模拟中不同采动阶段的垂直应力分布云图进行对比分析，结果如图 9 所示．

由图 9 可见，断层带及其邻近煤岩体在采动过程中经历了显著的应力重分布．断层贯通前，断层带及周边区域垂直应力整体保持较高水平．开采初期，断层受采动扰动影响较小，应力处于低值区，超前支承压力的作用使应力峰值出现在工作面前方．至第 11 步开采时，断层下部区域应力集中明显，且随工作面逐步逼近断层，应力集中程度持续增强．至第 21 步，应力集中达到峰值，应力值高达 72.7 MPa，表明超前支承压力与构造应力发生叠加作用，形成典型的高应力集中区．过断层期间，集中应力快速释放，垂直应力下降至 51.8 MPa，较峰值降低约 29%．断层贯通后，断层带附近煤岩体主要受构造应力主导，同时受采空区卸载影响，应力水平显著下降，工作面前方重新形成新的支承应力峰区．

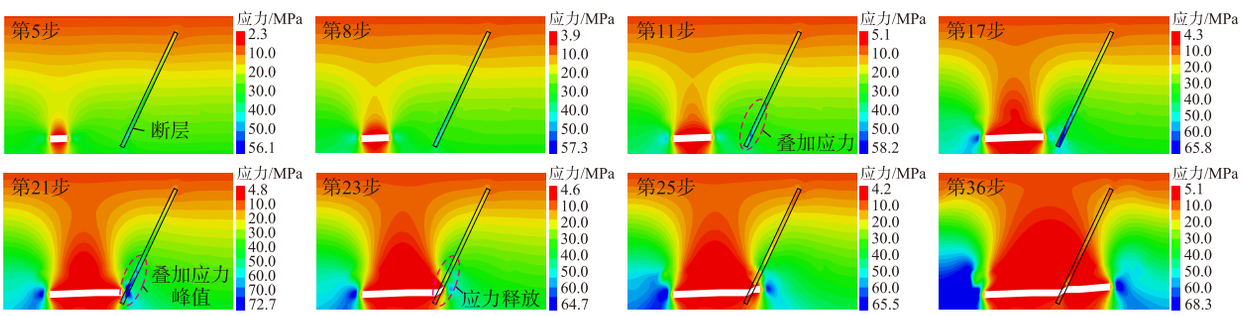


图 9 采动下垂直应力分布

Fig. 9 Stress distribution characteristics under mining activity

煤层开挖是持续扰动与应力调整的过程，每一次采动都会引起局部应力的重新分布与能量释放．为进一步揭示断层剪应力演化规律，基于 Fish 二次开发计算 S1，S2 测点在各开挖步的剪应力增量 $\Delta\tau$．当 $\Delta\tau>0$ 时，表示单元发生剪应力释放；$\Delta\tau<0$ 则代表剪应力集中．基于监测结果绘制各时步剪应力增量演化云图及变化曲线，如图 10 所示．S1 测点在第 18 步以前剪应力持续增加，表明断层上盘处于应力积聚阶段；在第 23 步（贯通过断层）时，剪应力出现最大释放，峰值为 14.3 MPa，随后断层围岩系统经历多次剪应力集中与释放交替过程，最终进入低值稳定阶段．S2 测点由于距离工作面较远，在过断层前受采动影响有限，剪应力变化幅度较小；但在第 23 步时，断层下盘活化影响传递至中部，使 S2 测点出现短暂的剪应力集中现象．此后（第 24～36 步），集中应力逐渐释放并趋于稳定．

综合分析可知，断层面剪应力在过断层前，采动应力持续积聚导致断层面进入高剪应力集中状态；过断层期间应力快速释放并触发滑移失稳；过断层后，系统通过多次局部应力释放实现新的平衡．断层活化路径表现为由断层下盘向上盘扩展，沿断层走向逐步发育，由局部活化过渡至整体滑移失稳，揭示了采动扰动下断层渐进性破坏特征．

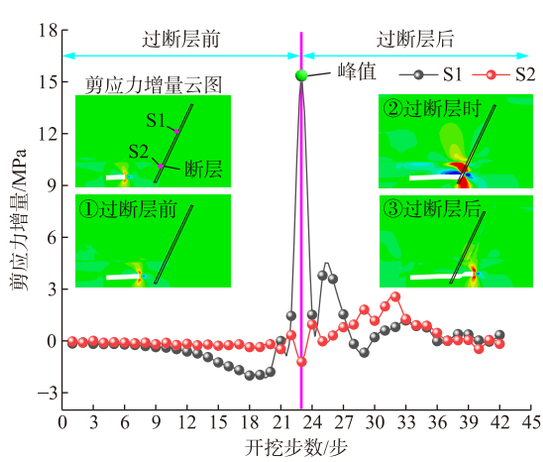


图 10 采动下断层剪应力增量动态响应规律

Fig. 10 Dynamic response law of shear stress increment in the fault under mining disturbance

3.3 采动下断层能量积聚耗散规律

采动作用下，断层及其周围煤岩体的能量会发生显著变化，能量的积聚与耗散控制着断层是否发生滑移及滑移的动力学特征．岩体空间任意一点 (x,y,z) 受到三向主应力 $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ 作用[27]，假定物体在受力过程中始终保持静力平衡，动能未

发生改变，外力所做的功将完全转变为弹性体因变形而储存于弹性体内部的能量，则煤岩体单元的总输入能量可由式(2)[28]表示：

$$e=\int_0^{\varepsilon_1}\sigma_1\,\mathrm{d}\varepsilon_1+\int_0^{\varepsilon_2}\sigma_2\,\mathrm{d}\varepsilon_2+\int_0^{\varepsilon_3}\sigma_3\,\mathrm{d}\varepsilon_3\,, \tag{2}$$

式中：e为采场应力作用于煤岩体单元所产生能量场的总能量，J；σ_1为垂直方向应力，MPa；σ_2，σ_3均为水平方向应力，MPa.

根据胡克定律可推导出煤岩体可释放的弹性应变能表达式，见式(3)：

$$U_\mathrm{e}=\frac{1}{2E}\left[\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2\mu\left(\sigma_1\sigma_2+\sigma_1\sigma_3+\sigma_2\sigma_3\right)\right], \tag{3}$$

式中：U_e为煤岩体单元能释放的弹性应变能，J/m^3；E为弹性模量，MPa；μ为泊松比.

基于数值模拟结果，提取S1，S2测点处的弹性模量、泊松比及三向主应力参数，并代入式(3)计算煤岩体单元的弹性应变能及其增量，从而表征采动过程中断层区域的能量积聚与耗散规律，结果见图11~12.

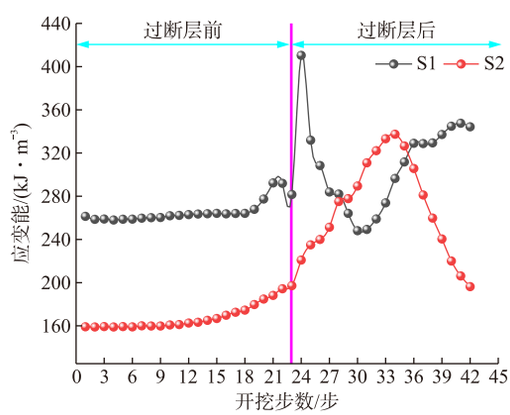


图11　采动下断层应变能动态响应规律

Fig. 11　Dynamic response law of strain energy in mining-induced faults

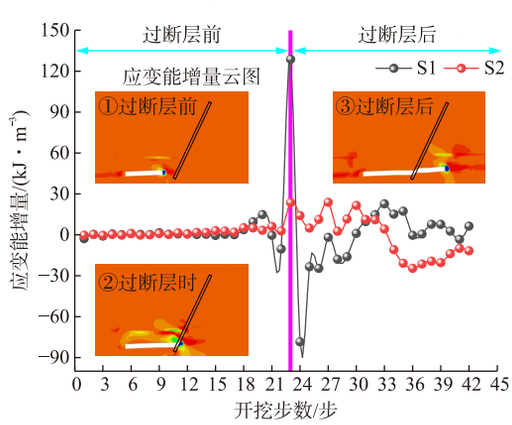


图12　采动下断层应变能增量动态响应规律

Fig. 12　Dynamic response law of strain energy increment in mining-induced faults

由图11可知，沿回采方向2个测点的弹性应变能均呈现“逐步累积—突变—再分配”的阶段性特征，但不同位置的响应存在显著差异. 对于S1测点，在工作面逼近断层的阶段，应变能持续上升；当工作面过断层时，应变能出现尖锐突峰，由约280 kJ/m^{3}瞬时跃增至约410 kJ/m^3，随后迅速释放并大幅回落. 之后，应变能进入以震荡为主的再分配阶段，并再次缓慢走高. 这表明S1测点所处区域在断层贯通瞬间发生了高能量集中并伴随快速卸载，其能量释放过程具有典型的瞬态特征. 相比之下，S2测点的响应表现出明显的滞后性. 在过断层瞬间，S2测点处并未发生同步的高能量突释，而是继续缓慢积累应变能，并在回采第34步达到峰值，约为330 kJ/m^3，随后逐步衰减. 这说明断层下盘—中部区域的能量释放并非立即发生，而是在工作面穿过断层后，伴随持续采动及结构调整逐步触发.

综合来看，采动下断层及邻近煤岩体整体经历了显著的能量积聚阶段. 在过断层期间，距工作面最近的区域(S1测点区域)率先发生高幅度能量突释，而相对远离工作面的区域(S2测点区域)则表现为滞后释放. 该滞后效应表明：断层的能量耗散过程在空间上具有传递性，其释放时序与监测点距工作面的距离近似成正相关. 这一特征揭示了断层滑移失稳的时空渐进性，即先由工作面邻近区发生瞬时失稳消能，随后沿断层带逐步向深部或外延区域传递并完成能量卸载.

图12为采动下断层应变能增量动态响应规律，由图12可见，断层区域应变能增量在回采至断层前后呈现出显著的非线性变化特征. 过断层前(开挖第1~21步)，断层受采掘扰动影响较小，岩体处于稳定的弹性加载阶段，应力场分布均匀，能量积聚与耗散不明显，S1，S2两测点的应变能增量均接近零. 过断层期间，S1测点能量响应剧烈，先急剧下降至约－90 kJ/m^3，随即跃升至约130 kJ/m^3，表现出典型的突降—跃增特征；S2测点波动幅度相对较小，能量增量在±40 kJ/m^{3}范围内呈交替变化. 断层贯通后，两测点曲线均出现频繁的正负波动，其中S1测点能量总体呈下降并逐渐震荡趋稳，而S2测点能量逐步转为以正值为主(约0~40 kJ/m^3)，表明断层后方岩体进入应力再加载与储能阶段.

综上所述，过断层前S1与S2测点能量变化平稳，断层处于准静态平衡状态；当工作面接近断层

时，S1测点所在区域应力突变，首先出现能量突释（负峰），反映出断层前方岩体发生卸载或微破裂；紧随其后的正峰则表明局部区域经历再加载过程，即断层滑移后的二次应力集中．这种“负峰-正峰”组合特征典型地表征了断层滑移过程中能量的瞬态释放与局部重新积聚．相较而言，S2测点的响应明显滞后于S1，且波动幅度较小、持续时间较长，说明断层带在滑移过程中具有一定的吸能与耗能特性，可削弱能量突释的强度但延长能量释放时程．这一现象揭示出断层滑移失稳具有由局部向整体演化的空间渐进特征，与相似模拟试验结果高度一致．因此，在实际矿井过断层开采过程中，应充分考虑断层的能量滞后效应与吸能特性．即便在断层贯通后，也需在工作面后方持续监测一段距离，以防滞后能量积聚诱发二次失稳或动力灾害．

3.4 采动下断层滑移倾向性分析

根据断层面应力状态可大致判断断层面活化难易程度，但无法量化判断断层阶段性转化的过程．为了量化断层活化条件，ALAN Morris基于库伦准则，定义了滑移倾向性指标 T_s[29]，其表达式为：

$$T_s=\frac{\tau}{\sigma_n}, \tag{4}$$

式中：T_s为滑移倾向性指标，T_s越大断层越容易发生活化；τ为剪切应力；σ_n为正应力．

基于模拟结果，计算出S1测点各时步剪应力τ、正应力σ_n，根据式(4)计算滑移倾向性指标T_s，并绘制采动下S1测点断层滑移倾向性曲线，如图13所示．由图13可见，在开挖初期（第0～15步），工作面距断层较远，断层面主要表现为弹性响应，剪应力随采动逐步增加，正应力变化较小，断层滑移倾向性T_s稳定上升，系统处于能量积聚与应力集中阶段．进入开挖中期（第16～21步），随着工作面逐渐逼近断层，断层面正、剪应力同步升高，应力集中效应显著增强．此阶段断层滑移倾向性迅速增加，在第21步（距断层约6 cm处）达到峰值，T_s突升至约0.46，表明断层面进入临界易滑阶段，系统稳定性显著下降．当开挖至第24步时，应力曲线出现突降，剪应力与正应力同时显著下降，T_s值由正迅速转为负，表明断层面发生了突发滑移与应力卸载．这一剧烈的负向跳变说明断层正应力瞬时减小，局部区域可能由压性转为张性状态，产生短暂的解耦或张开现象．该过程是断层剪切破坏与围岩卸载共同作用的结果，代表系统能量的集中释放阶段．

断层滑移后，断层面正、剪应力逐渐趋于稳定，并伴随轻微波动，T_s值维持在低位，表明断层应力重新分布、系统稳定性恢复．总体而言，断层在采动开挖过程中经历了典型的“应力集中—失稳滑移—应力重分布”演化全过程，反映出断层在采动作用下的渐进性失稳特征．

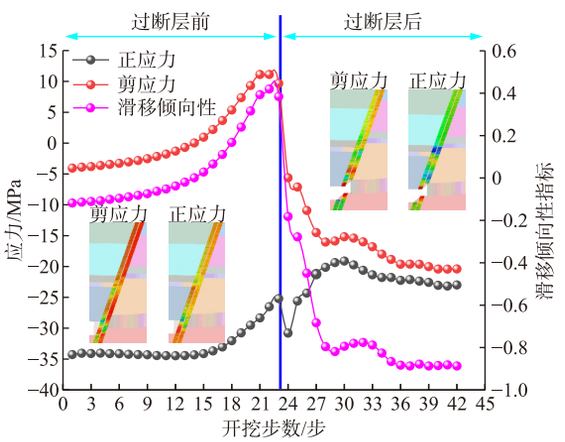


图13 断层滑移倾向性曲线

Fig. 13 Fault slip tendency curve

4 采动下断层分区滑移演化特征

通过试验结果可知，断层滑移失稳是开采扰动下的典型非线性响应过程，具有空间分区性与时序渐进性的显著特征．断层在采动影响下并非整体瞬时破坏，而是以“下部启动—中部传递—上部联动”的模式逐级演化．这种分区特征主要是由于断层各区域受力环境、边界约束和断层两侧岩体刚度不同，导致滑移启动时间、速度及范围均存在显著差异．

4.1 断层分区结构与应力分布特征

根据相似模拟试验结果，断层沿倾向方向可划分为下部滑移启动区、中部滑移过渡区和上部约束响应区．其中，下部滑移启动区靠近工作面，受超前支承压力影响最为显著，剪应力集中程度最高，是断层滑移首先启动的区域；中部滑移过渡区同时受下盘推挤与上盘约束的双重作用，是应力重新分布与滑移传递的过渡区域；上部约束响应区处于高位约束范围内，受采动扰动影响相对滞后．当中部分区贯通破坏后，上部约束随之削弱，断层整体滑移得以形成．

上述分区滑移特征从宏观上反映了断层在开采扰动下的非均匀响应，其形成机制与断层面内部的摩擦-黏结作用及接触力学特性密切相关．断

层面并非理想光滑界面，而是一个受摩擦-黏结作用共同控制的非连续接触系统．在相似模拟中，断层面受两侧相似材料的约束，其内部普遍存在颗粒嵌锁、局部胶结及摩擦阻力；在FLAC^{3D}数值模拟中，断层由Interface接触面单元表示，其力学响应由法向刚度K_n、切向刚度K_s及摩擦参数共同控制．开采扰动引起的剪应力逐步增加，使断层面经历了由“黏结-滑移”向“摩擦-滑动”的力学转变过程：在前期“黏结-滑移”阶段，界面存在显著的胶结与嵌锁结构，抗剪强度较高；随着滑移持续发展，胶结结构逐渐破坏，界面由黏结控制转变为摩擦控制．当摩擦特征趋于稳定后，界面滑动进入平衡状态，剪应力维持在恒定水平，其大小由残余黏聚力、法向应力及稳定摩擦系数共同决定．由于滑移后断层面黏结连续性被完全破坏，残余黏聚力趋近于零，因此断层面上的剪切残余强度可简化为：

$$\tau_r \approx \mu_r \sigma_n, \tag{5}$$

式中：τ_r为剪切残余强度；μ_r为摩擦系数．

因此，断层面上实际能够驱动滑移的剪应力为去除摩擦平衡部分后的有效剪应力，则在每个分区内，断层面上剪应力与正应力关系式可表示为：

$$\begin{cases} \tau_i = \dfrac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)\sin 2\theta - \tau_r, \\ \sigma_i = \dfrac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) + \dfrac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)\cos 2\theta, \end{cases} \tag{6}$$

式中：τ_i为断层面上的剪应力；σ_i为断层面上的正应力；σ_v为垂直应力；σ_h为水平应力．

由于在断层面上摩擦力、接触面刚度等因素会导致应力在传递过程中的逐渐衰减．假设应力传递过程中遵循弹簧-阻尼系统的行为，则当下部采动扰动引起正应力变化量$\Delta\sigma_i$与剪应力变化量$\Delta\tau_i$改变时，沿断层倾向方向的应力传递一阶线性衰减模型可近似表示为：

$$\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}x} = -k(\tau - \tau_c), \tag{7}$$

式中：x为沿断层倾向方向的空间位置；k为应力衰减系数；τ_c为滑移临界剪应力．

积分得：

$$\tau(x) = \tau_c + C\mathrm{e}^{-kx}, \tag{8}$$

式中　C为常数．

假设下部滑移启动区(x=0)的初始剪应力为τ_0，代入式(8)得：

$$\tau_0 = \tau_c + C\mathrm{e}^0 \Rightarrow C = \tau_0 - \tau_c. \tag{9}$$

将C代入式(8)，则可改写为：

$$\tau(x) = \tau_c + (\tau_0 - \tau_c)\mathrm{e}^{-kx}. \tag{10}$$

由公式(10)可知，沿倾向方向的滑移驱动力呈指数衰减分布，即滑移速度由下至上逐渐降低．

4.2　断层分区滑移的位移协调方程

断层滑移后，不同分区间位移协调性决定断层-覆岩系统是否稳定．定义分区间位移差$\Delta u_{i,i+1}$为：

$$\Delta u_{i,i+1} = u_i - u_{i+1}. \tag{11}$$

每个分区的滑移不仅影响到它自己，还会影响到相邻分区的位移和应力．假设分区i发生滑移，其位移为u_i，则会通过相邻的界面刚度K_s来影响到$i+1$分区的位移u_{i+1}．根据接触力学理论，剪应力增量与相对滑移量成正比[30]，则i分区的滑移引起的$i+1$分区的剪应力变化值$\Delta\tau_{i,i+1}$为：

$$\Delta\tau_{i,i+1} = K_s(u_i - u_{i+1}). \tag{12}$$

为表征各分区滑动会由于惯性对邻近分区产生影响，定义每个分区i都有一个等效质量m_i，由此基于质点运动方程可得分区滑移的动力学平衡方程为：

$$m_i\frac{\mathrm{d}^2u_i}{\mathrm{d}t^2} + c_i\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t} + K_s(2u_i - u_{i-1} - u_{i+1}) = F_i(t), \tag{13}$$

式中：c_i为分区阻尼系数；$F_i(t)$为外部扰动力；t为时间．

由式(13)可知，分区间存在明显的滑移传递与滞后响应特征．各分区间通过切向刚度K_s实现应力与位移的耦合，当断层下部受开采扰动$F_1(t)$增大并诱发滑移后，局部位移差$\Delta u_{i,i+1}$增大，导致上部分区剪应力τ_2随之升高，从而触发中部区域滑移，形成沿倾向方向的应力-位移级联传递．这一过程表明，断层滑移失稳并非瞬时整体破坏，而是由局部滑移逐级触发至整体响应的非线性演化过程，解释了数值模拟中S2测点响应明显滞后于S1的现象．

4.3　断层滑移演化的时空阶段性

依据上述分析可知，开采扰动作用下断层分区滑移可分为稳定积聚、局部启动、分区扩展和整体贯通4个阶段，各阶段特征及力学表现见表4．

从力学上看，滑移由下至上逐步扩展的根本原因是分区之间的滑移相互耦合，导致应力和位移的逐级传播．当第i个分区发生滑移时，它的位移u_i会引起相邻分区的位移响应(响应程度受i分区的刚度K_{ij}和位移差值Δu_i影响)，从而产生应力变化．在级联传递效应下影响至整体，其作用机制

见下式：

$$\frac{\mathrm{d}\tau_i}{\mathrm{d}t}>0\Rightarrow\frac{\mathrm{d}\tau_{i+1}}{\mathrm{d}t}=f\left(K_{ij},\Delta u_i\right),\qquad(14)$$

式中 $f(K_{ij},\Delta u_i)$为当第i个分区发生滑移时，其位移u_i引起的相邻分区的位移响应.

表 4 断层分区滑移阶段划分

Table 4 Fault slip stage division based on spatial zones

阶段	主要特征	力学表现
稳定积聚阶段	各分区应力缓慢上升	位移协调，无滑移
局部启动阶段	断层下部剪应力达极限	局部滑移，应力突降
分区扩展阶段	断层中部被触发	滑移带扩展，应力再分布
整体贯通阶段	断层上部失稳	贯通滑移，整体错动

基于式(14)可知，断层下部分区滑移会通过剪切作用引起断层上部分区应力增长，这是断层分区滑移的主要原因. 此结论与相似模拟试验所得结果一致，如图6所示.

5 讨 论

本文采用理论分析、相似模拟及数值模拟耦合研究方法，揭示了开采扰动下断层应力-能量演化与渐进-级联滑移特征. 相关研究结果对断层邻近煤层的安全开采具有一定的工程指导意义：

1) 随着工作面推进，断层及其邻区煤岩体的应力与能量演化具有明显的阶段性特征，尤其在采空区贯通及过断层前后，应力集中与能量释放表现出突变响应. 该阶段断层面剪应力与滑移倾向性指标达到峰值，系统稳定性显著降低，是断层滑移失稳及动力灾害发生的高风险时期. 因此，在工程实践中，可将过断层前后作为重点管控阶段，通过调整推进速度、加强支护与卸压措施，降低断层活化与突发灾害的发生概率.

2) 相似模拟与数值模拟结果一致表明，断层滑移并非整体同步发生，而是呈现出“下部启动—中部传递—上部联动”的分区渐进演化特征. 不同分区在应力集中程度、能量积聚与释放时序方面存在显著差异. 该认识表明，在断层邻区工程防控中，应避免采取统一化的控制措施，需根据断层不同分区的受力与滑移特征，实施分区、分阶段的差异化防控策略，以提高防灾措施的针对性与有效性.

3) 声发射事件、应力变化及能量演化在断层滑移过程中具有较好的对应关系，并表现出一定的前兆特征；同时，不同测点的应力与能量响应存在明显滞后性和传递性. 这表明，在实际矿井中，可结合多源监测手段，通过对微震事件活跃度、应力变化速率及能量增量等指标的综合分析，识别断层活化的启动位置及演化趋势，为断层滑移失稳及相关动力灾害的预警提供参考依据.

4) 本文在数值模拟中采用FLAC^{3D}作为计算平台，其本质为连续介质方法，难以真实模拟顶板岩层在采动过程中的离散破断、垮落及块体运动行为. 采空区及顶板垮落过程主要通过等效弱化方式进行处理，该简化假设在一定程度上可能放大局部应力集中水平，使部分数值结果在绝对量值上与工程实际存在差异. 但本文数值模拟的研究重点在于揭示应力与能量演化趋势及断层滑移的相对特征，该简化处理并不影响对断层分区滑移机制及渐进-级联演化规律的认识.

6 结 论

1) 开采扰动作用下断层及邻区应力随工作面推进表现出显著阶段性，覆岩支承压力遵循“速升—骤降—缓升—稳定”变化规律，在贯通过断层前后达到峰值；断层面剪应力经历“上升—震荡—下降”3个阶段，早期因采动应力集中持续上升，中期覆岩垮落诱发卸载导致首次突降并进入震荡(表征黏滑行为)，后期随断层持续滑移显著衰减至低水平. 受断层阻隔作用，区域应力呈“上盘集中、下盘弱响应”非对称分布，存在滞后性.

2) 声发射事件与能量释放随采动出现2次突增，分别对应采空区贯通后断层上盘黏滑变形、过断层后滑移空间扩大引发的岩层错动；断层区域能量在过断层前处于集中阶段，贯通期间瞬时释放，过断层后重新积聚. 两测点应变能达峰时间差异性表明能量耗散在空间上具有传递性，释放时序与测点距工作面距离正相关.

3) 相似模拟揭示了断层-覆岩系统滑移具有“下部启动—中部传递—上部联动”特征. 采空区贯通后断层下盘率先发生局部滑移，过断层期间裂隙贯通形成滑移体并获得充分滑移空间，最终诱发整体垮落. 数值模拟中滑移倾向性指标在过断层前达到峰值后急剧下降，标志滑移启动. 两测点应力与能量曲线均具有明显滞后特征，揭示了断层由局部活化向整体失稳的扩展模式.

4) 滑移分区理论分析表明，局部滑移会造成局部位移突变，产生剪应力向上传递的非均匀响应. 该应力扰动沿倾向方向逐级衰减并触发相邻分区滑移，形成典型的级联传递效应. 断层滑移因

此呈现出分区性、渐进性与非均匀性，表现为由局部滑移到整体稳滑的动态演化过程.

5)应力集中是能量积聚的前提，能量突释是断层滑移失稳的直接诱因. 相似模拟中应力峰值与声发射能量突增同步出现，数值模拟中剪应力集中阶段对应应变能积聚期，剪应力突降伴随能量瞬时释放与滑移倾向性指标值骤降. 这种协同关系表明，断层滑移失稳本质是应力集中区突发卸载与能量快速释放在空间结构中的耦合响应，应力、能量多源监测指标可作为断层活化预警的关键依据.

参考文献：

[1] 张建国，邱黎明，王　满，等. 深部煤层不同类型隐伏构造致灾规律研究[J]. 煤炭科学技术，2023，51(增2)：50-59.
ZHANG Jianguo，QIU Liming，WANG Man，et al. Study on disaster-causing law of different types of hidden structures in deep coal seam[J]. Coal Science and Technology，2023，51(Sup 2)：50-59.

[2] 袁　亮，马衍坤，黄勤豪，等. 煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(5)：827-856.
YUAN Liang，MA Yankun，HUANG Qinhao，et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(5)：827-856.

[3] 潘一山，宋义敏，刘　军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(9)：2081-2095.
PAN Yishan，SONG Yimin，LIU Jun. Pattern，change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(9)：2081-2095.

[4] 赵毅鑫，卢志国，朱广沛，等. 考虑主应力偏转的采动诱发断层活化机理研究[J]. 中国矿业大学学报，2018，47(1)：73-80.
ZHAO Yixin，LU Zhiguo，ZHU Guangpei，et al. Fault reactive induced by the principal stress rotation for the underground coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2018，47(1)：73-80.

[5] 李志华，窦林名，曹安业，等. 采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J]. 煤炭学报，2011，36(增1)：68-73.
LI Zhihua，DOU Linming，CAI Anye，et al. Mechanism of fault slip induced rockburst during mining[J]. Journal of China Coal Society，2011，36(Sup 1)：68-73.

[6] 李志华，窦林名，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 & Safety Engineering，2010，27(4)：499-504.

[7] 杨随木，张宁博，刘　军，等. 断层冲击地压发生机理研究[J]. 煤炭科学技术，2014，42(10)：6-9.
YANG Suimu，ZHANG Ningbo，LIU Jun，et al. Research on mechanism of fault rock burst[J]. Coal Science and Technology，2014，42(10)：6-9.

[8] 张宁博，许乾海，欧阳振华，等. 煤矿开采激发应力波扰动下逆冲断层失稳机理[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(10)：36-46.
ZHANG Ningbo，XU Qianhai，OUYANG Zhenhua，et al. Mechanism of thrust fault slip under the disturbance of stress waves induced by coal mining[J]. Coal Geology & Exploration，2024，52(10)：36-46.

[9] 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.

[10] 于广明，谢和平，杨　伦，等. 采动断层活化分形界面效应的数值模拟研究[J]. 煤炭学报，1998，23(4)：62-66.
YU Guangming，XIE Heping，YANG Lun，et al. Numerical simulation of fractal effect induced by activation of fault after coal extraction[J]. Journal of China Coal Society，1998，23(4)：62-66.

[11] 殷有泉，李平恩，邸　元. 岩石结构的不稳定性和突跳现象[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(5)：945-952.
YIN Youquan，LI Ping′en，DI Yuan. Instability and jumping phenomenon of rock structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2015，34(5)：945-952.

[12] 施泽进，罗蛰潭，彭大钧，等. 突变理论在断层活动机理分析中的应用[J]. 西安工程学院学报，1996(1)：50-55.
SHI Zejin，LUO Zhetan，PENG Dajun，et al. Appli-

cation of catastrophe theory to the analyses of mechanism of faulting movement[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 1996(1): 50-55.

[13] 赵扬锋,龚 政,王凯兴,等.不同粗糙度岩石界面断层滑移失稳过程电荷感应信号特征分析[J].岩土力学, 2025, 46(11): 3355-3370.
ZHAO Yangfeng, GONG Zheng, WANG Kaixing, et al. Characterization of charge sensing signals during slip destabilization of faults with different roughness rock interfaces[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(11): 3355-3370.

[14] 龚 政,宋 凯,司 绪,等.不同粗糙度岩石界面断层滑移失稳力学特征分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025, 44(5): 554-560.
GONG Zheng, SONG Kai, SI Xu, et al. Mechanical characteristics analysis of fault slip instability of rock interfaces with different roughness[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 554-560.

[15] 王宏伟,王 晴,石瑞明,等.煤矿冲击地压与断层构造失稳的多物理场互馈机制研究进展[J].煤炭学报, 2022, 47(2): 762-790.
WANG Hongwei, WANG Qing, SHI Ruiming, et al. A review on the interaction mechanism between coal bursts and fault structure instability from the perspective of multi physical field[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 762-790.

[16] WANG H W, SHI R M, SONG J Q, et al. Mechanical model for the calculation of stress distribution on fault surface during the underground coal seam mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 144: 104765.

[17] 于秋鸽,张华兴,白志辉,等.采动影响下断层面应力与滑移特征研究[J].煤炭科学技术, 2019, 47(4): 63-68.
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, BAI Zhihui, et al. Study on stress and slip characteristics of fault plane under mining influence[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 63-68.

[18] MAJID T, MOHAMMAD G, GHOLAM R L, et al. A geomechanical evaluation of fault reactivation using analytical methods and numerical simulation [J]. Coal Science and Technology, 2021, 54: 695-719.

[19] 朱广安,蒋启鹏,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.

[20] 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.

[21] 王 普,周海勇,万广绪,等.硬厚顶板下邻断层工作面不同推采方向应力特征分析[J].采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(4): 67-75.
WANG Pu, ZHOU Haiyong, WAN Guangxu, et al. Stress characteristics of different mining directions adjacented fault under hard thick roof[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(4): 67-75.

[22] 吕进国,韩文鹤,张学朋,等.采动影响下坚硬岩桥型断层活化与储能演变规律[J].煤炭学报, 2025, 50(2): 902-916.
LYU Jinguo, HAN Wenhe, ZHANG Xuepeng, et al. Evolution law of the activation and energy storage of fault with hard rock bridge under mining influence [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 902-916.

[23] 谭云亮,谭 涛,张修峰,等.正断层两盘动力灾害显现差异性及机制[J].煤炭科学技术, 2023, 51(1): 214-223.
TAN Yunliang, TAN Tao, ZHANG Xiufeng, et al. Difference and mechanism of dynamic behaviors between two walls of normal fault[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 214-223.

[24] 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.

[25] 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.

[26] 边 华,赵毅鑫,王 渊,等.回采速度对深部厚煤

层正断层活化特征影响研究[J]. 矿业科学学报，2025，10(3)：500-510.
BIAN Hua，ZHAO Yixin，WANG Yuan，et al. Effect of mining speed on the activation characteristics of normal faults in deep thick coal seams[J]. Journal of Mining Science and Technology，2025，10(3)：500-510.

[27] 师皓宇，马念杰，石建军，等. 应力增量触发断层岩体能量释放模拟与地震成因探讨：以龙门山断裂带为例[J]. 地震学报，2019，41(4)：502-511.
SHI Haoyu，MA Nianjie，SHI Jianjun，et al. Simulation on energy release of fault rock mass triggered by stress increment and discussion on seismogenesis：Taking Longmenshan fault zone as an example[J]. Acta Seismologica Sinica，2019，41(4)：502-511.

[28] 王　凯，孙加智，杜　锋，等. 深部煤岩瓦斯复合动力灾害中围岩与煤层的能量互馈机制[J]. 中国矿业大学学报，2025，54(6)：1242-1260.
WANG Kai，SUN Jiazhi，DU Feng，et al. Energy mutual feedback mechanism between surrounding rock and coal seam in deep coal-gas compound dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(6)：1242-1260.

[29] 任　政，姜耀东，张科学. 采动影响下逆断层阶段性活化诱冲机制[J]. 煤炭学报，2020，45(增2)：618-625.
REN Zheng，JIANG Yaodong，ZHANG Kexue. Mechanics of rock-burst induced by thrust fault phased activation under mining disturbance[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(Sup 2)：618-625.

[30] 赵　鹏，冯子军. 断层岩体剪切滑移变形及其临界应力判别准则[J]. 太原理工大学学报，2022，53(6)：997-1003.
ZHAO Peng，FENG Zijun. Shear-slipe deformation and critical stress state discriminant criteria for fault rock masses[J]. Journal of Taiyuan University of Technology，2022，53(6)：997-1003.

（责任编辑　沈春妮　宋　爽）