

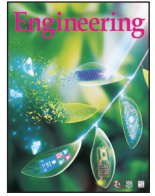


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Coal Technology—Article

## 煤矿开采动静载叠加诱发断层冲击地压机理

蔡武<sup>a,b,\*</sup>, 窦林名<sup>a</sup>, 司光耀<sup>c</sup>, 胡亚伟<sup>a</sup>

<sup>a</sup> State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

<sup>b</sup> Department of Earth Science and Engineering, Royal School of Mines, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

<sup>c</sup> School of Minerals and Energy Resources Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 2 November 2018

Revised 1 December 2018

Accepted 3 January 2019

Available online 2 September 2020

#### 关键词

冲击地压

断层活化

采动应力

矿震动载应力

断层煤柱

### 摘要

断层作为煤层采掘过程中普遍存在的一种地质构造,其独特不连续结构控制着煤岩的变形、破坏与力学性质,该结构与煤层采掘活动之间的相互作用是断层活化及其诱发冲击地压的关键。本文通过调研总结煤层采掘活动与断层赋存状态之间的概念模型,提出了采动应力主导和矿震动载主导两种断层活化类型的力学机制及其动静载叠加诱冲机理;其次,结合物理实验、数值模拟和现场微震监测结果验证了模型与机理的合理性;在此基础上,针对性地探讨了断层冲击地压监测与防治的方法和策略。研究结果表明,断层冲击地压是由断层煤柱高静载与断层活活动载叠加诱发,其中,断层煤柱高静载是断层与顶板结构双重作用导致,断层活活动载是由采动应力主导型局部解锁活化、等效劈裂破坏和矿震动载主导型超低摩擦效应组成。研究结果对于系统理解断层冲击地压机理、监测与防治具有重要指导意义。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

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而猛烈释放能量的现象[1],其中,断层错动(亦称“活化”)是断层冲击地压发生的关键。例如,2011年11月3日19时18分,河南义马千秋煤矿F16逆冲断层活化诱发的重大冲击地压事故,监测能量为 $3.5 \times 10^8$  J,造成10人死亡、75人被困[2];2014年3月27日11时18分,千秋煤矿再次发生的一起较大冲击地压事故,监测能量为 $1.1 \times 10^7$  J,造成6人死亡、13人受伤,断层活化被认为是此次事故的主要诱因[3];此外,义马跃进煤矿25110工作面采掘临近F16逆冲断层时发

生多起较为严重的冲击地压[4,5]。因此,如果能事先清楚煤层采掘扰动引起断层活化的力学机制及其诱冲机理,那么就可提前较准确地采用理论与监测数据驱动融合预测断层冲击地压的发生,并采取合理的防治及应急避让措施保障矿工人身安全。

针对断层活化及其诱冲机理,国内外学者紧紧围绕“开采活动如何引起断层活化,断层活化又如何影响工作面围岩应力状态”两大关键问题,采用现场观测和理论分析、相似模拟、数值模拟、实验研究等手段,获得了大量研究成果。

现场观测与理论研究表明[6],工作面临近断层开采时冲击地压危险上升;齐庆新等[7]提出的冲击地压黏滑

\* Corresponding author.

E-mail address: [caiwu@cumt.edu.cn](mailto:caiwu@cumt.edu.cn)

失稳机理指出,煤岩层的层间薄软层、断层弱面等结构的存 在,是导致冲击地压发生的主要结构因素;潘一山等[1]提出的扰动响应判别准则认为,断层切应力增大或正应力减小是断层活化的主要原因;李志华[8]提出的黏滑-黏弹脆性体突变理论认为,断层活化分为动态和稳态两种力学机制;李振雷等[5]提出的断层煤柱型冲击地压机理认为,断层煤柱型冲击分为断层活化型、煤柱破坏型和耦合失稳型三种,并计算得出砌体梁结构作用下的断层煤柱将承受高静载[9]。

相似、数值模拟研究方面,左建平等[10]在相似模型实验中利用经纬仪监测采动影响下断层活动的水平位移证实了断层发生滑移错动。孔朋等[11]、纪洪广等[12]、李志华[8]研究不同采掘布置方式对断层活化的影响表明,工作面平行于断层走向开采的扰动影响要小于垂直于断层走向开采;工作面在断层下盘开采时采动对断层活化的影响更大。蒋金泉等[13]研究了硬厚覆岩正断层附近的采动应力演化特征,结果表明,断层切割作用起到了应力阻隔效应,使得断层带的顶板处于低应力状态、底板处于应力集中状态。张宁博[14]、李腾等[15]研究采动影响下断层附近的矿压规律发现,随着工作面距断层距离的减小,工作面支撑压力的峰值位置向前转移,断层容易活化,通过断层后,支撑压力减小,并逐渐恢复至正常状态。姜耀东等[16]、朱广安等[17]研究开采扰动下断层应力演化规律发现,开采临近断层时,其正应力和剪应力急剧增加,断层活化的可能性增加,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,最终导致冲击地压发生。罗浩等[18]研究义马F16逆冲断层对冲击地压的影响规律表明,断层活化前,煤层开采引起覆岩运动形成高应力集中区;断层活化时,覆岩空间结构失稳、断层应力场变化与断层活化动载耦合作用导致灾变。Islam和Shinjo [19]采用边界元法模拟孟加拉Barapukuria煤矿开采引起断层活化的规律发现,开采扰动作用下断层及其附近围岩的变形及应力场产生显著变化,且在断层端部出现高应力集中。Sainoki和Mitri [20,21]基于三维快速拉格朗日分析程序(FLAC-3D)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。

断层活化实验研究方面,Brace和Byerlee [22]首次提出了地震黏滑说,认为断层正应力达到一定强度后,断层失稳不再是稳定滑动形式,而是一种伴随应力降的失稳错动。宋义敏等[23]采用双轴加载方式进行的直剪摩擦实验表明,断层冲击地压的发生需要满足一定的侧

向应力条件。崔永权等[24]研究侧向应力波对断层活化的影响发现,侧向应力的低幅度扰动可引起“低摩擦”现象出现,并产生大幅度的应力降。

综上所述,断层活化不管是在理论研究、现场观测,还是实验研究等方面均已被证实。断层附近应力分布的数值模拟及相似模型实验结果,很好地揭示了采动应力主导作用下的断层活化诱冲机理。然而,上述断层冲击地压理论主要以采动应力影响为主,很少考虑动载扰动的影响。同时断层活化的摩擦实验大部分也都是针对地震机理展开研究,忽略了地下工程巷道、煤层等采掘过程中真实的采动应力加卸载及矿震动载效应。因此,仍需进一步研究考虑真实采动应力路径和矿震动载扰动作用下的断层活化力学机制及其诱冲机理,这是解决断层冲击地压监测预警与防治这一前沿科学问题的理论基础,具有极其重要的作用。

鉴于此,本文首先在调研总结煤层采掘活动与断层赋存状态关系的基础上,将煤层采掘扰动作用下断层活化类型归结为采动应力主导型和矿震动载主导型两种;然后,采用理论与数值仿真计算研究了两种断层活化类型的力学机制及其动静载叠加诱冲机理,并探讨了断层冲击地压的监测与防治方法及策略;最后,结合数值模拟、相似模型实验以及微震监测验证了该机理的合理性。

## 2. 断层活化力学机制及其诱冲机理

### 2.1. 断层活化概念模型

断层作为煤层采掘过程中普遍存在的一种地质构造,其独特不连续结构控制着煤岩的变形、破坏与力学性质,该结构与煤层采掘活动之间的相互作用是断层活化的关键。根据现场调研总结,煤层采掘活动引起断层活化可归纳为如图1所示的四种概念模型。

(1) 模型A:采掘活动远离断层。断层煤柱静载应力与采动应力互不影响,此时断层活化的可能性较小,不过由于断层在漫长的地质构造活动中往往处于一种临界稳定状态,不排除开采活动引起的远场矿震动载触发断层的局部变形和瞬间错动。

(2) 模型B:垂直断层走向临近掘进或回采。断层煤柱静载应力与采动应力叠加形成高静载,同时采动应力呈水平采空侧卸载和竖直方向加载的特性[25],将必然引起断层应力场的局部调整而解锁活化,称之为采动应力主导型断层活化。

(3) 模型C: 垂直断层走向远离掘进或回采。断层煤柱足够宽时, 采动应力与断层煤柱静载应力互不影响, 与模型A类似; 反之, 随着工作面的开采, 上覆顶板岩层弯曲下沉, 断层煤柱上的采动应力呈水平采空侧完全卸载和竖直方向加载的特性, 并与断层煤柱静载应力叠加形成高静载, 此时容易引起断层应力场的局部调整而解锁活化, 加之顶板初次破断时产生的矿震动载, 更易引起断层活化, 称之为采动应力主导型断层活化。

(4) 模型D: 平行断层走向掘进或回采。断层煤柱足够宽时, 采动应力与断层煤柱静载应力互不影响, 可与模型A等价; 反之, 采动应力与断层煤柱静载应力叠加形成高静载, 此时采动应力扰动有限, 尤其是在掘进期间几乎固定不变, 不再改变断层应力场, 因此需要借助如煤岩、顶板破裂产生的矿震动载才能引起断层活化, 称之为矿震动载主导型断层活化。

## 2.2. 断层活力学机制

以断层为研究对象, 取一微小单元建立力学分析模型, 如图2(a)所示。因此, 断层面上的正应力( $\sigma_{yy}$ )和切应力( $\sigma_{xy}$ )可表述为:

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\delta) \quad (1)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\delta) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 为最大、最小主应力, 两者可以互换, 分别表示正、逆断层;  $\delta$ 为断层倾角。

根据库仑摩擦定律[26], 任一弱面极限剪切强度为:

$$\tau_f = \tan\varphi_f(\sigma_{yy} - p) + c \quad (3)$$

式中,  $c$ 为断层黏结力;  $\varphi_f$ 为断层摩擦角;  $p$ 为孔隙压力。令 $\tau_f = \sigma_{xy}$ , 可得断层活化的判别准则:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{slip}} = \frac{2[c + \tan\varphi_f(\sigma_3 - p)]}{(1 - \tan\varphi_f \cot\delta)\sin(2\delta)} \quad (4)$$

当 $\delta = 90^\circ$ 或 $\delta \rightarrow \varphi_f$ ,  $\sigma_1 - \sigma_3 \rightarrow \infty$ , 即:

$$\varphi_f < \delta < 90^\circ \quad (5)$$

令 $\partial[(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{slip}}]/\partial\delta = 0$ , 得:

$$\delta = 45^\circ + \varphi_f/2 \quad (6)$$

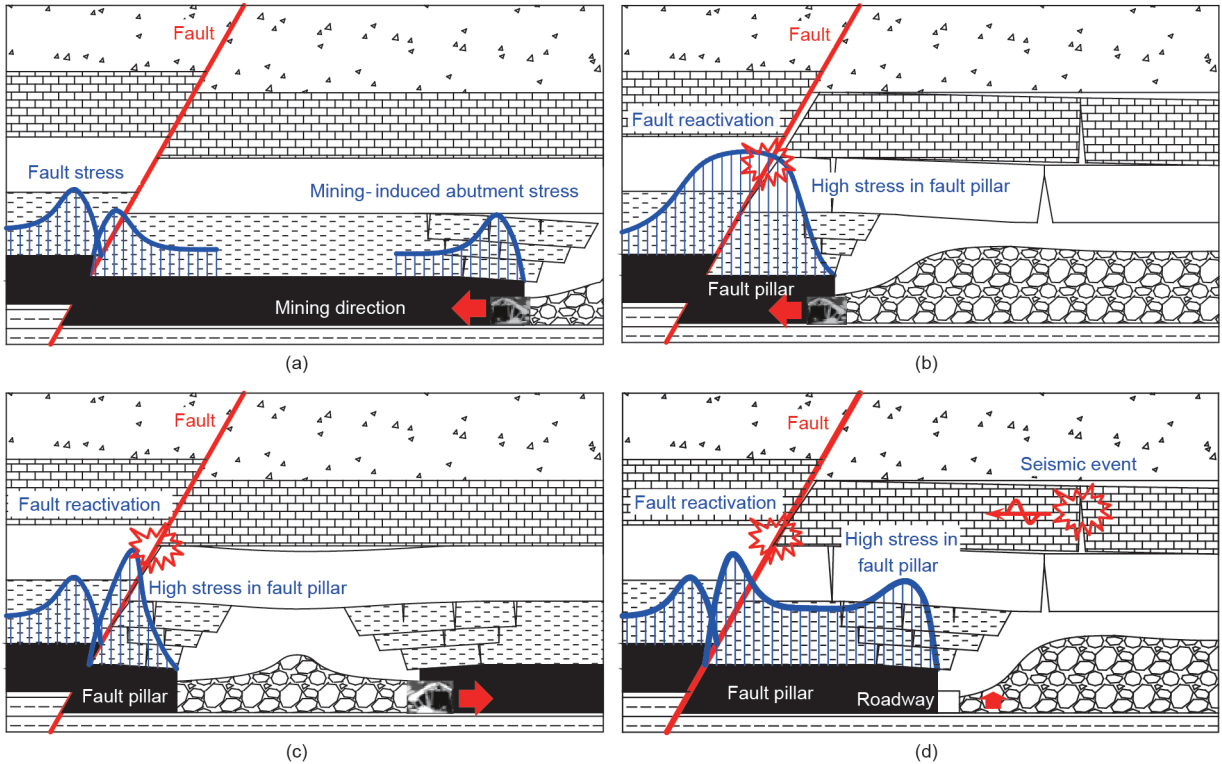


图1. 煤层采掘扰动作用下的断层活化概念模型。(a) 模型A: 采掘活动远离断层—断层静载应力和采动应力互不影响; (b) 模型B: 垂直断层走向临近掘进或回采—采动应力主导型断层活化; (c) 模型C: 垂直断层走向远离掘进或回采—采动应力主导型断层活化; (d) 模型D: 平行断层走向掘进或回采—矿震动载主导型断层活化。



由此可得出断层活化的最小临界值为:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{slip-min}} = 2[c + \tan\varphi_f(\sigma_3 - p)] \left[ (1 + \tan^2\varphi_f)^{1/2} + \tan\varphi_f \right] \quad (7)$$

由式(7)可知, 断层活化的最小临界值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{slip-min}}$ 与断层黏结力 $c$ 、最小主应力 $\sigma_3$ 以及断层摩擦角 $\varphi_f$  (一般 $\sigma_3 > p$ ) 呈正相关, 而与孔隙压力 $p$ 呈负相关, 即 $c$ 、 $\sigma_3$ 、 $\varphi_f$ 越大,  $p$ 越小, 断层越不容易活化。断层活化临界值曲线 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{slip}}$ 在断层倾角满足 $\delta = 45^\circ + \varphi_f/2$ 的位置达到最小, 当断层倾角越接近于 $45^\circ + \varphi_f/2$ 时, 断层越容易活化。

为了进一步研究 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 的扰动作用对断层活化失稳的影响, 设计了如下数值仿真实验:

$$\begin{cases} \tan\varphi_\sigma = \sigma_{xy}/\sigma_{yy} \\ \sigma_1 = \begin{cases} a_1 t, & t < t_{10} \\ a_1 t + b_1 \sin[\omega_1(t - t_{10})], & t \geq t_{10} \end{cases} \\ \sigma_3 = \begin{cases} a_3, & t < t_{30} \\ a_3 t + b_3 \sin[\omega_3(t - t_{30})], & t \geq t_{30} \end{cases} \\ \sigma_{1(-)} = \sigma_{1(+)} - \sigma_{\text{drop}}, \text{ when } (\sigma_1 - \sigma_3) \geq (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{slip}} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $a_1$ 为应力加载速度,  $\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $a_3$ 为围压应力,  $\text{MPa}$ ;  $t$ 为加载时间;  $b_1$ 、 $b_3$ 分别为 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 方向输入的动载应力波幅值,  $\text{MPa}$ ;  $\omega_1$ 、 $\omega_3$ 分别为 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 方向输入的动载应力波角速度,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $t_{10}$ 、 $t_{30}$ 分别为 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 方向开始输入应力波扰动的时间,  $\text{s}$ ;  $\sigma_{\text{drop}}$ 为断层活化失稳时释放的应力降, 并假设只作用于 $\sigma_1$ 方向;  $\tan\varphi_\sigma$ 为动态摩擦系数。研究表明[27],  $\tan\varphi_\sigma$ 与断层面摩擦系数 $\tan\varphi_f$ 密切相关, 其中,  $\tan\varphi_f$ 由摩擦面状况、接触时间、滑动距离等决定, 而 $\tan\varphi_\sigma$ 由加载方式决定。

如图2(a)所示的数值仿真实验过程, 图中左上角为断面试样双轴实验加载示意图, 整个实验过程分为3个阶段: 第1阶段, 在 $\sigma_3$ 方向保持压力常数5 MPa,  $\sigma_1$ 方向施加一应力加载速度 $0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 第2阶段, 在 $\sigma_3$ 方向压力保持不变的情况下, 于700 s时刻在 $\sigma_1$ 方向叠加一正弦应力波 $10\sin(0.1t)$ ; 第3阶段, 在上述加载条件不变的情况下, 于1000 s时刻在 $\sigma_3$ 方向叠加一正弦应力波扰动 $10\sin(0.1t)$ 。

模拟仿真结果如图2所示。由图2(a)可知, 第1阶段的常规带围压准静态加载作用下, 断层活化产生周期性应力降, 出现稳态黏滑失稳; 相比之下, 采动应力主导型断层活化对应的加卸载和瞬间卸载作用条件下的力学行为出现显著差异, 呈现出动态、甚至瞬间失稳, 如图2(b)、(c)所示; 第2阶段在 $\sigma_1$ 方向上附加一周期性扰动, 此时黏滑应力降略有增加, 但仍然保持准周期性

的扰动失稳,  $\tan\varphi_\sigma$ 曲线出现轻微扰动, 称之为轻微扰动失稳阶段; 第3阶段在 $\sigma_3$ 方向上叠加同一周期性扰动, 这一阶段 $\tan\varphi_\sigma$ 曲线出现多次突然上升和下降, 同时黏滑应力降急剧增大, 呈现出动态失稳特性, 并且局部的突变失稳均发生在 $\sigma_3$ 方向应力波扰动的波谷附近, 该阶段 $\sigma_3$ 方向的扰动达到最大拉伸状态, 断层法向正应力较小, 甚至出现负值拉应力, 即断面相对压紧程度消失, 出现超低摩擦现象, 此时断层面上微小的剪应力便可引起断层的活化。由此可见, 动载扰动(第2阶段和第3阶段)对断层稳定性的影响比准静态应力加载(第1阶段)明显; 其中, 动载扰动影响中,  $\sigma_3$ 方向的动载扰动(第3阶段)又要比 $\sigma_1$ 方向的动载扰动(第2阶段)更为显著。

综上所述, 断层法向上的动载扰动虽然很小, 但可以改变断层的受力状态及其活动进程, 尤其是降低断层摩擦强度、甚至产生超低摩擦效应, 不仅更容易引起断层活化, 而且可能触发比预期应力降更大的错动。因此, 动载扰动作用下的断层超低摩擦效应是矿震动载主导型断层活化的力学本质。

### 2.3. 断层冲击地压机理

根据图1所示的断层活化模型, 建立如图3所示的断层附近顶板-煤层-底板冲击载体系统模型。随着煤层采掘活动临近断层, 断层与工作面之间的煤层作为断层煤柱将承受高静载应力[9], 其受载应力应变关系可由图中右边曲线描述; 将顶板与底板视为一完整围岩, 且其刚度与强度远大于煤层, 其受载应力应变关系可由图中左边的曲线表述[28]。

准静载( $\sigma_s$ )作用下, 处于峰后阶段(DE)的煤层, 当其产生应变增量 $\Delta\varepsilon_2$ 时, 对应顶板-底板围岩中产生的应变增量 $\Delta\varepsilon_1$ 为:

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{k_2}{k_1} \Delta\varepsilon_2 \quad (9)$$

式中,  $k_1$ 为围岩的峰前加载刚度;  $k_2$ 为煤层的峰后卸载刚度。因此, 顶板-煤层-底板整个系统产生的总应变增量 $\Delta\varepsilon$ 为:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2 = \frac{k_1 + k_2}{k_1} \Delta\varepsilon_2 \quad (10)$$

其中, 煤层应变增量与系统整体应变增量的比值为:

$$\frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon} = \frac{1}{1 + k_2/k_1} \quad (11)$$

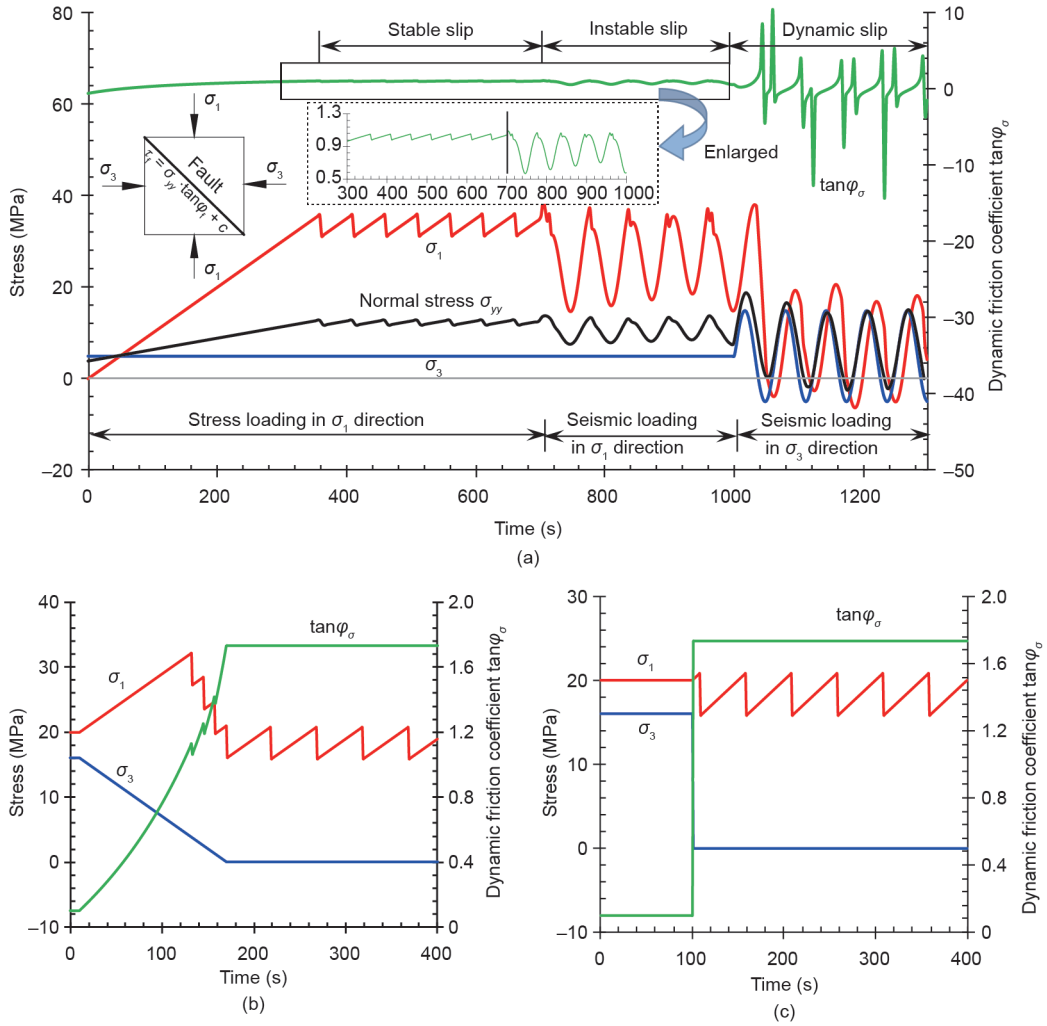


图2. 加卸载动静组合作用下断层活化仿真实验。(a) 带围压加载动静组合作用下断层活化仿真实验结果；(b) 加卸载作用下断层活化仿真实验结果；(c) 瞬间卸载作用下断层活化仿真实验结果。

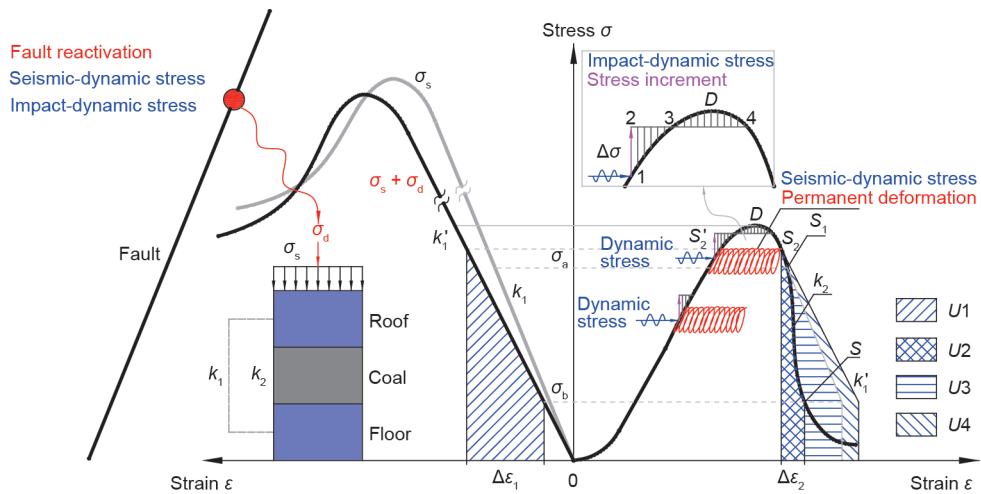


图3. 断层活化诱冲机理模型。

当 $k_1 + k_2 = 0$ 时，对应图3中的 $S_1$ 点，此时 $\Delta\epsilon_2/\Delta\epsilon \rightarrow \infty$ ，冲击过程启动，伴随着煤体冲击破坏过程的逐渐变

缓，顶板-煤层-底板系统逐渐达到新的平衡，对应图3中的 $S$ 点，冲击过程结束，该过程表征了冲击过程的动

态破坏时间[29]。根据能量守恒原理,系统整个冲击过程的能量形式包括:围岩弹性能释放 $U_1$ 、围岩释放能量的消耗部分 $U_2$ 和顶板-煤层-底板系统整体释放的剩余弹性能 $U_3$ 。 $\sigma_a$ 和 $\sigma_b$ 分别表示冲击发生前后的初始应力和残余应力。

当断层附近的顶板-煤层-底板冲击载体系统叠加断层活化动载( $\sigma_d$ )时,相比于准静载作用下的冲击能量释放 $U_3$ ,其能量释放将增加 $U_4$ ,如图3所示,此时等价于围岩刚度从 $k_1$ 降低至 $k_1'$ ,同时冲击启动位置(满足 $k_1 + k_2 = 0$ )从 $S_1$ 提前至 $S_2$ 。更重要的是,对于震动动载(seismic-dynamic stress),如微震,尤其是远场震源,其作用模式相当于循环加卸载,由于煤岩材料的非均质性本质,微震动载引起的每次加卸载将使煤体产生永久变形,此时当动载作用时间足够长时,对于应力状态处于 $S_2'$ 的煤体在叠加动载作用下,可启动类似准静载作用下位于 $S_2$ 应力状态下的冲击条件;对于冲击动载(impact-dynamic stress),如工作面附近断层滑移、顶板破断等产生的瞬间动载,其作用模式相当于施加一瞬间应力增量 $\Delta\sigma$ ,当面积 $S_{123} > S_{3D4}$ 时,对于应力状态处于峰前1处的煤体在叠加动载作用下,可启动类似准静载作用下位于峰后4处应力状态下的冲击条件[30]。

综上所述,断层冲击地压的发生机理可概括为由断层煤柱高静载与断层活化动载叠加诱发,其中断层煤柱高静载是断层、顶板结构双重作用导致,断层活化动载由采动应力静载为主的局部解锁和矿震动载为主的超低摩擦效应组成。

### 3. 验证与讨论

#### 3.1. 实验验证

##### 3.1.1. 采动应力主导型断层活化验证

为了验证采动应力主导型断层活化模型,开展了静载作用下的断面试样物理力学实验。首先,从

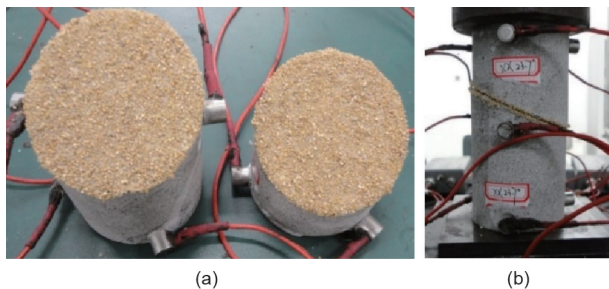


图4. 断面实验准备。(a) 粗糙面设计; (b) 实验前准备。

煤矿井下采集顶板砂岩试块,并在实验室加工成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准试样;然后,按照方案设计加工成 $23.7^\circ$ 的断面倾角。实验前,在试样上下断面同时采用双面胶粘取不同尺度大小的沙粒模拟不同断面粗糙度,最终将两断块合在一起实现不同粗糙度的断面试样,如图4所示。

本次实验由压力加载、声发射监测和数字照相量测采集三大系统组成,如图5所示。其中压力加载系统采用的是美国MTS公司生产的MTS-C64.106电液伺服材料试验机,实验加载采用位移控制,加载速率为 $0.18 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;声发射监测系统采用的是美国物理声学公司(PAC)生产的PCI-2卡多通道声发射系统,实验中采用8个Nano 30传感器(响应频率 $100 \sim 400 \text{ kHz}$ )进行信号采集,其空间布置如图5所示(上下两端各均匀布置三个传感器,中间对立布置两个传感器),声发射事件定位采用三维定位计算,采样频率为 $2 \text{ MHz}$ 、前置放大增益设置为 $40 \text{ dB}$ ;数字照相量测采集系统采用佳能TD数码相机,实验中采用实时摄像方式获取数字图像。实验全程自动采集应力、应变、声发射信号和数字图像。

如图6所示为断面试样加载初期应力与声发射撞击数随应变的变化曲线。由图可知,断面滑移过程中产生了明显的黏滑现象,并呈现出无震滑移(aseismic-slip)特征。该现象表明,砂粒型断层泥不易积聚剪切应变能,或者容易耗散弹性能。这类黏滑可能会随着断面粗糙微凸体的连锁而暂停,此时剪切应变能逐渐积累,直到达到临界值释放,从而不可避免地引起较高声发射强度现象的产生。在黏滑发生前的初始阶段,应力变化扰动很小,但声发射强度相对较高。这是因为该阶段除了产生少量小的断层黏滑外,在砂粒相互作用中还存在剪切滑移和破坏。

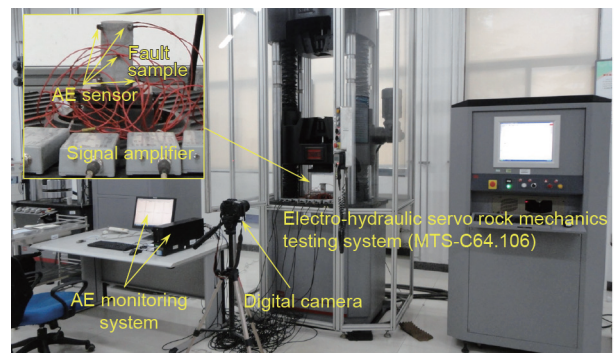


图5. 采动应力主导型断层活化验证实验装置。



本次实验采用佳能TD数码相机实时摄像获取数字图像，后期处理采用PhotoInfor软件[31]进行分析。选取断面滑移较为明显（未达到破坏）的某一时刻图像与实验加载之前的图像做比较，最终获得观测区域网格的变形形态，进一步获得如图7所示的各参数计算结果。由图可知，随着位移的加载，MTS压力机底座向上平移，在此情况下，断面试样下盘可视为主动盘，上盘视为被动盘。位移矢量图[图7 (a)]明显指示出，下盘向上移动，遇到断面后产生向右移动的趋势，上盘在下盘的挤压作用下产生沿断面向左滑移的趋势，最终两盘之间产生明显的剪切滑移。位移云图[图7 (b)]显示，作为主动盘的下盘产生的位移明显大于上盘。由最大剪应变云图[图7 (c)]和y方向应变云图[图7 (d)]可知，断面上明显形成一条剪切带，且剪切带上的应变数值呈非均匀分布，并存在多处明显的应变集中区，这主要是由于断面用沙的非均质性使得断面所受摩擦力呈非均

匀分布。

如图8 (a) 所示为断面滑移过程中的受力示意图，从图中可以看出，断面滑移过程中任意质点处均受到方向相反的切应力 $\sigma_{xy}$ 和摩擦应力 $\tau_f$ ；由于断面粗糙度呈非均匀性，即断面静摩擦系数 ( $\mu_s = \tan\phi_f$ ) 也呈非均匀分布，根据库仑摩擦定律可得出断面上的最大静摩擦力  $\tau_{f-max} = \mu_s \sigma_{yy} + c$ 。同时摩擦力 $\tau_f$ 满足：

$$\tau_f = \begin{cases} \sigma_{xy}, & \sigma_{xy} < \tau_{f-max} \text{ fault lock} \\ \mu_d \sigma_{yy}, & \sigma_{xy} \geq \tau_{f-max} \text{ fault unlock} \end{cases} \quad (12)$$

式中， $\mu_d$ 为动摩擦系数。

如图8 (b) 所示为断面试样加载到某一时刻 ( $\sigma_1$ 为一定值) 时非均匀粗糙断面上各应力分布示意图，由图可知，断面局部存在多处闭锁和解锁区域，此时一旦断面上局部最大应力差大于断面围岩的抗拉强度，即满足  $\max\{\Delta\tau = \sigma_{xy} - \tau_f\} \geq \sigma_t$  [如图8 (b) 中所示的AA'CC'劈

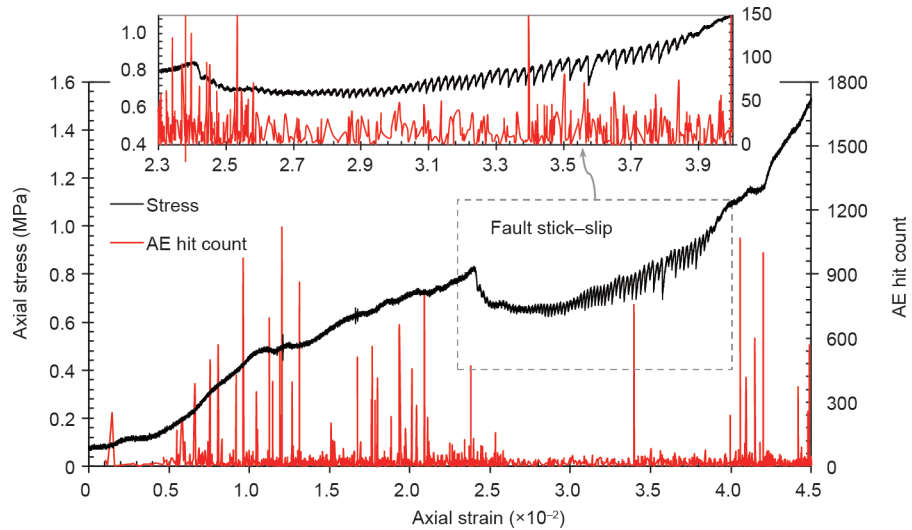


图6. 断层黏滑过程中应力-应变与声发射撞击数之间的关系。

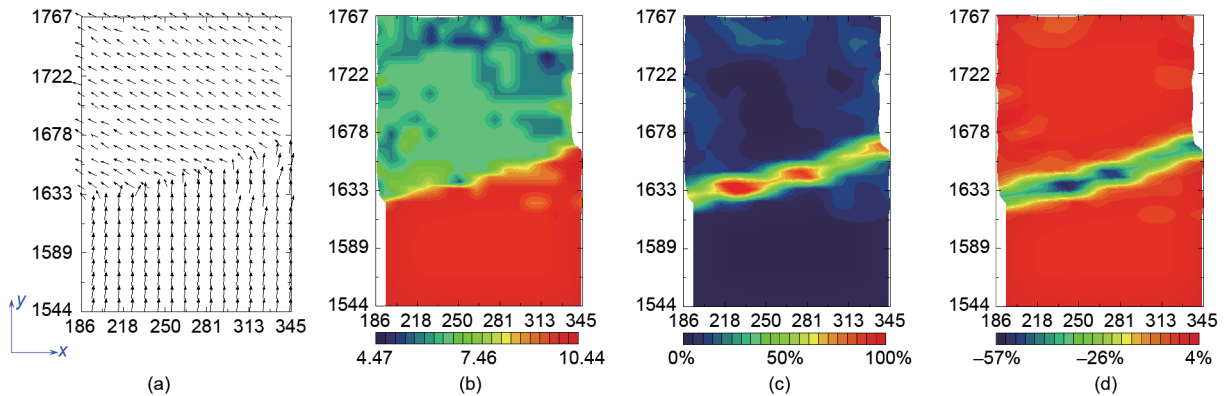


图7. 数字照相量测处理结果 (图中尺寸单位为像素)。(a) 位移矢量；(b) 位移；(c) 最大剪切应变；(d) y方向应变。

裂点], 围岩便产生拉破坏[图8 (c)]。根据断裂力学理论, 图8 (c) 所示的应力状态及其赋存的端部竖直拉裂纹可视为I型裂纹扩展, 因此, 按照最大周向应力准则, 裂纹将进一步沿着竖直拉裂纹尖端扩展, 最终形成垂直于断面的宏观破坏裂纹, 其劈裂位置与图7 (c) 中所示的局部应变集中位置对应一致。

为了进一步研究断面滑移过程中的剪切带和等效劈裂破坏特征, 将声发射活动分为峰前和峰后阶段, 并对其空间分布进行分析, 如图9所示。由图可知, 整个加载期间, 声发射事件主要沿断面分布, 且分布不均匀, 与如图7 (c) 所示的断面剪切带吻合较好。此外, 还观测到垂直于断面的另一个声发射事件空间集中区, 该集中区开始出现于峰前阶段[图9 (a)], 并在峰后阶段

[图9 (b)]进一步扩展, 与图9 (c) 显示的等效劈裂破坏裂纹吻合较好。

综上所述, 断层活化引起的无震 (aseismic) 或有震 (seismic) 事件可以直接由断面自身滑移产生或间接由断面围岩产生的等效劈裂 (适应主断面滑移位移变化) 引起。其中, 断面滑移过程中产生等效劈裂破坏的力学机制主要由摩擦应力和断面围岩的抗拉强度控制, 具体由摩擦系数 (或粗糙度)、断面倾角及其围岩抗拉强度控制, 详细可从如下4个方面进行讨论:

(1) 当断面粗糙度及断面倾角一定时, 断面围岩强度越大, 围岩越不容易产生等效劈裂破坏, 极端情况下 (应力差 $\Delta\tau$ 远小于围岩的抗拉强度), 当断面产生解锁滑移时, 断面-围岩系统释放的能量以解锁滑移释放的能

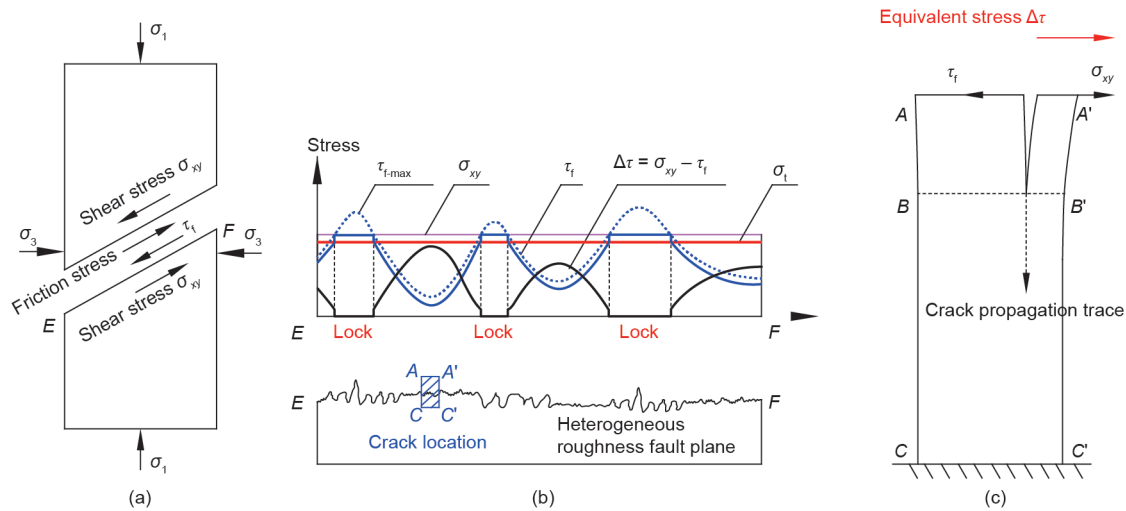


图8. 断面试样等效劈裂破坏力学机制分析。(a) 断面试样加载受力分析; (b) 非均匀粗糙断面受力分析; (c) 劈裂点断裂力学分析。

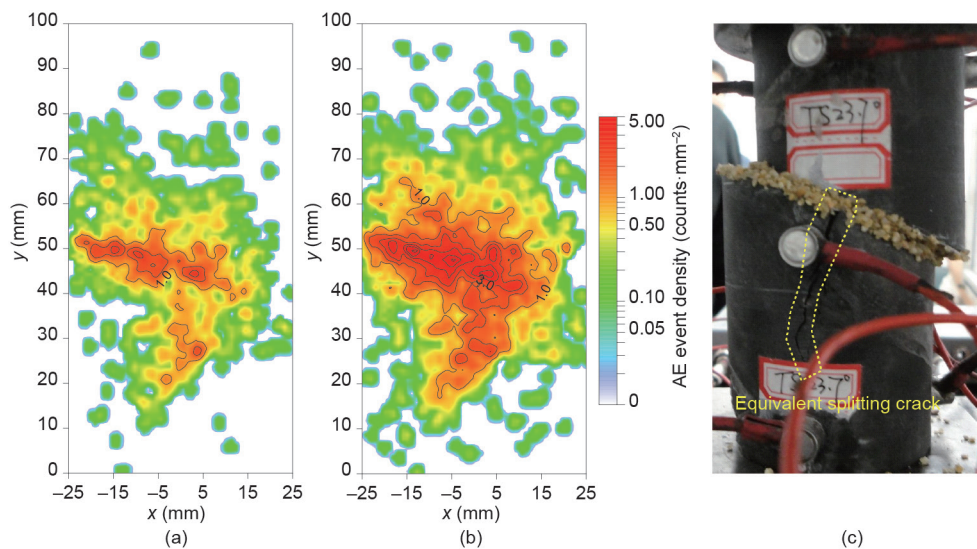


图9. 断面滑移过程中等效劈裂破坏与声发射分布特征。(a)、(b) 分别为峰前和峰后AE事件的空间密度分布; (c) 等效劈裂破坏试样。



量为主；反之，围岩容易产生等效劈裂破坏，断面-围岩系统释放的能量以围岩产生拉破坏释放的能量为主。

(2) 当断面围岩强度及断面倾角一定时，断面粗糙度越大，围岩越容易产生等效劈裂破坏，极端情况下断面永久闭锁，直至产生等效劈裂破坏；反之，容易产生解锁滑移。

(3) 当断面粗糙度及断面围岩强度一定时，断面倾角越大，围岩越不容易产生等效劈裂破坏，极端情况下，断面解锁滑移，围岩不发生破坏，断面-围岩系统极其不稳定；反之断面闭锁，最终产生等效劈裂破坏。

(4) 当断面粗糙度和围岩强度较大、断面倾角较小时，断面-围岩系统既不容易产生解锁滑移也很难产生等效劈裂破坏，这种情况下，断面-围岩系统极易积聚弹性能，系统一旦解锁或劈裂破坏，释放的能量将是毁灭性的，极易引起灾难性事故。因此，通过降低断层附近围岩的强度可在一定程度上破坏断面-围岩系统积聚能量的条件，从而达到预防动力灾害的目的，如预防冲击地压。

### 3.1.2. 矿震动载主导型断层活化验证

以图1(d)所示的矿震动载主导型断层活化模型为研究对象，基于自主研发的冲击力可控式冲击地压物理相似模拟平台，开展动载作用下的断层活化相似模拟实验。本次实验主要由静载加载系统、动载加载系统、高速数据采集系统、应力与声发射监测系统组成，如图10所示，动载由一个20 kg的摆锤突然释放撞击滑块

装置施加，其中，滑块装置由一个外套和一个内滑块杆以及一个放置在巷道壁上的冲击板组成，详细介绍可参见作者已发表文献[32]；静载由实验装置顶梁上预先安置的液压装置产生；声发射采用8通道PCI-2声发射监测系统监测，模型正背面对应各布置4个探头（响应频率为1~100 kHz），如图11所示，采样频率设置为1 MHz，其中，声发射探头标示处括号中的编号（如S1）表示模型背面对应位置布置的探头编号；应力监测采用两组应力盒，并分别置于煤层和顶板位置，每组由两个应力盒组成，分别置于断层及其附近的岩层层面上，动载过程的应力数据监测采用DHDAS动态信号采集器进行采集。具体模型参数与实验过程见文献[33]。

如图12所示为动载作用下的声发射监测结果，由图可知，此次动载作用不仅使巷道围岩产生了少量微破裂事件，同时还诱发了断层活化事件。进一步由图13可知，动载扰动作用下，断层面上的切应力增加，正应力减小，其中，切应力增加幅度较小，正应力急剧降低，甚至由压应力变为拉应力，表明动载作用主要通过改变断层正应力状态使断层面承受瞬间的张拉作用，此时断层两盘岩层间的相对压紧程度消失，断层面的摩擦强度达到超低，最终产生超低摩擦效应，断层极易活化。因此，动载扰动可改变断层应力状态，尤其是显著降低断层正应力数值甚至改变其作用方向，使得断层上下盘岩层间相对压紧程度降低，甚至由最初的压应力状态变为拉应力状态，从而使得断层在某一时刻出现摩擦“消失”现象，进而容易产生矿震动载主导型断层活化诱冲事件，其

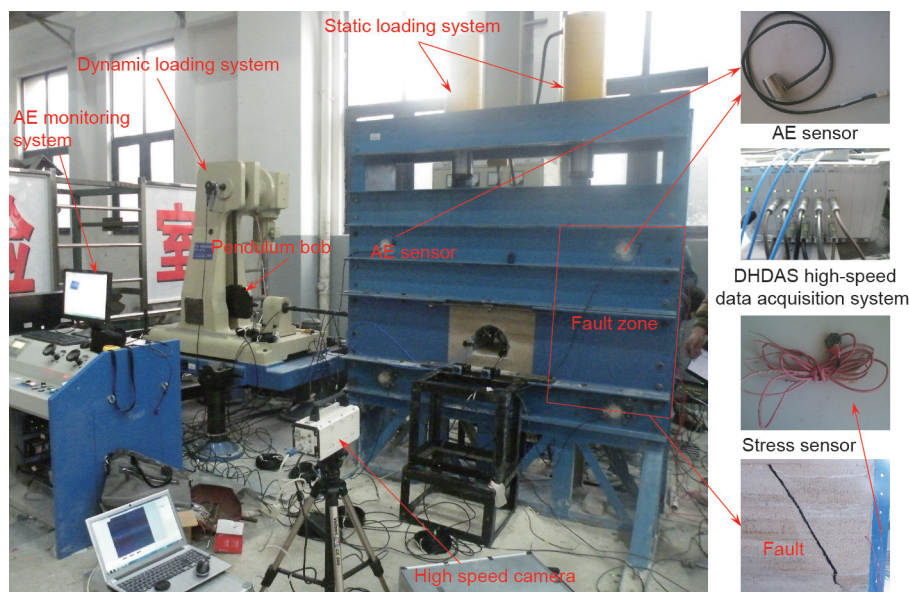


图10. 矿震动载主导型断层活化验证实验装置。

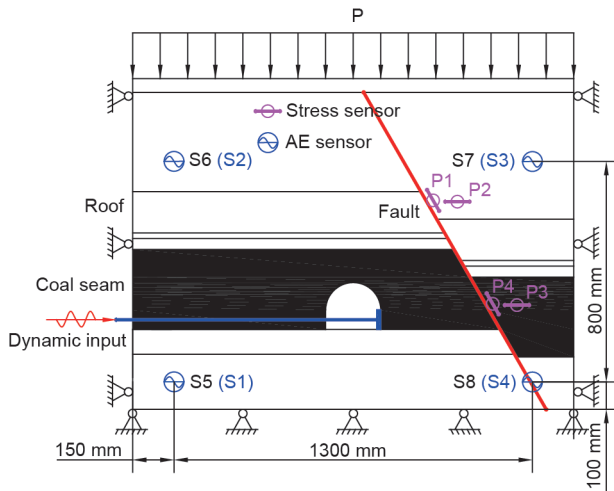


图11. 动载作用下断层活化相似模型实验设计。

中，动载扰动作用产生的断层超低摩擦效应是矿震动载主导型断层活化的力学本质。

### 3.2. 数值模拟与微震监测验证

河南义马跃进煤矿25110工作面采深1000 m左右，为25采区东翼第一个综放工作面，平均采高11 m，主采2号煤层。该煤层平均厚度为11.5 m，平均倾角为12°，煤层上方依次为18 m泥岩直接顶、1.5 m厚1-2煤、4 m泥岩和190 m巨厚砂砾岩老顶；下方依次为4 m泥岩直接底和26 m砂岩老底。井下四邻关系（图14）：东为23采区下山保护煤柱，南为25区下部未采煤层，东南部接近F16逆冲断层，西为25采区下山保护煤柱，北为大采空的25采区。其中，25110上巷（轨道平巷）布置于25090工作面采空区下方煤层中，下巷（运输平巷）接近F16逆冲断层，并与F16断层的最小平面距离约66 m，工作面中部被3条小断层切割。F16断层上盘岩层在逆冲推覆作用下以断层面为支点发生翻转，最后呈现出直立（或倒转）形态，其断面几何形状呈犁式，浅部倾角75°，深部倾角15°~35°，落差50~450 m，水平错距120~1080 m。截至2011年，25010、25030、25050、25070和25090工作面均已开采完毕，并在研究区域相关位置开展了地应力测试，其测点及结果如图14所示：垂直应力 $\sigma_1 = 25.28$  MPa，N82°W水平应力 $\sigma_2 = 17.92$  MPa，以及N8°E水平应力 $\sigma_3 = 10.31$  MPa。

为了监测跃进煤矿采掘期间的微震事件，现场安装了加拿大ESG微震监测系统，包括安装在采区上山和大巷的11个固定台站（实心三角形），以及安装在工作面两巷的4个临时台站（实心正方形），其中，临时台站可

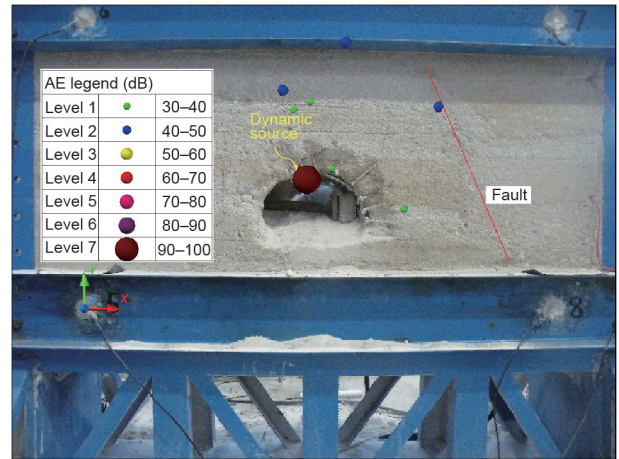


图12. 实验过程及其声发射监测结果。

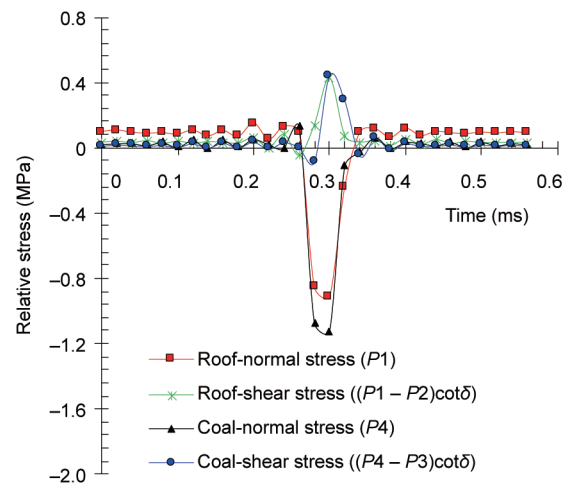


图13. 动载作用下的断层活化的力学响应。

随着工作面的回采推进向前移动。如图14所示为25110工作面掘进期间 $10^5$  J能量以上的微震事件分布。由图可知，微震事件主要分布在皮带巷一侧，且大部分微震事件集中沿断层面分布或垂直于断层面上盘聚集，这与如图9所示的断层围岩等效劈裂破坏位置的声发射事件分布一致。因此，断层滑移产生的微震事件可发生在断层面位置或断层围岩破裂位置。

采用FLAC-3D数值软件对义马跃进煤矿适当简化后的25大采区模型进行模拟，详细模型参数见表1。如图15所示的数值计算模型，其尺寸为1365 m × 1050 m × 350 m（长×宽×高），共267 936个单元。对于重点研究区域（煤层巷道开挖区域）的单元采取细化处理。

本文断层模型采用接触面单元进行模拟。由于实际断层面物理力学性质很难真实测量，因此在模拟中通常采用在合理取值范围内进行试算以达到与实际地应力



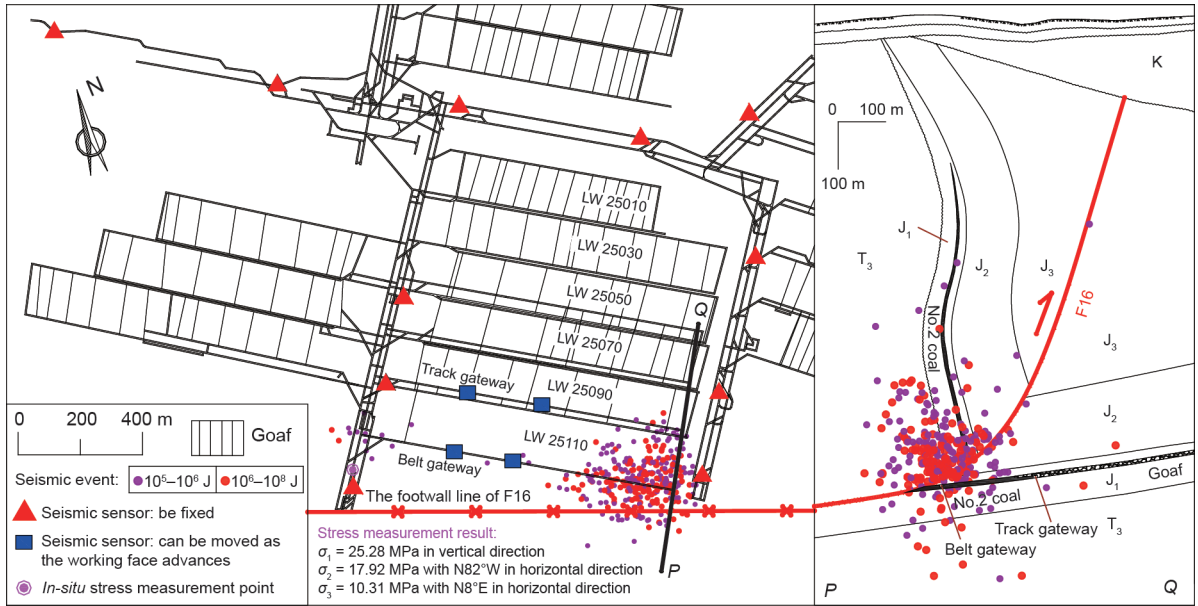


图14. 跃进煤矿采掘工程平面图、地质剖面图、微震监测系统台网布置以及25110工作面掘进期间105 J能量以上微震事件分布。地质剖面图：T<sub>3</sub>为上三叠纪，J<sub>1</sub>为早侏罗纪，J<sub>2</sub>为中侏罗纪，J<sub>3</sub>为晚侏罗纪，K为白垩纪；微震监测系统台网布置：实心正方形表示临时台站，可随着工作面的回采推进向前移动，实心三角形表示固定台站。

表1 数值模型中断层和地层物理力学参数

Items	Thickness (m)	Tensile strength (MPa)	Bulk module (GPa)	Shear module (GPa)	Cohesion (MPa)	Internal friction angle (°)	Density (kg·m <sup>-3</sup> )
Conglomerate	Caprock	5.2	3.7	3.4	18.4	37	2600
Sandy mudstone	4.00	3.5	3.5	3.2	15.2	36	2600
Coal seam	2.00	1.4	1.5	0.8	1.2	25	1300
Mudstone	18.00	2.0	2.0	1.6	4.5	32	2200
Coal seam	11.00	1.4	1.5	0.8	1.2	25	1300
Mudstone	4.00	2.0	2.0	1.6	4.5	32	2200
Sandstone	Basement	6.7	3.9	3.6	20.0	39	2700
Fault structure <sup>a</sup>	—	—	—	—	—	—	—
Goaf structure <sup>b</sup>	—	—	—	—	—	—	—

<sup>a</sup> Interface element in FLAC-3D: interfacial cohesion = 2.0 MPa, interfacial friction angle = 30°, normal stiffness = shear stiffness =  $9.0 \times 10^{11}$  Pa·m<sup>-1</sup>.

<sup>b</sup> Null model represented. The associated roof was weakened into 0.2 times the initial input values, and the floor was strengthened into 5 times.

条件相匹配的方法来确定，取值见表1：接触面黏结力= 2.0 MPa，接触面摩擦角= 30°，法向刚度 ( $k_n$ ) = 剪切刚度 ( $k_s$ ) =  $9.0 \times 10^{11}$  Pa·m<sup>-1</sup>。其中， $k_n$ 和 $k_s$ 预估取值为相邻最坚硬位置等效刚度的10倍以上：

$$k_n = k_s \approx 10 \max \left[ \frac{K + 4G/3}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (13)$$

式中， $K$ 和 $G$ 分别为体积模量和剪切模量； $\Delta z_{\min}$ 为接触面法线方向上单元的最小宽度。

Anderson断裂机制表明[34]，逆断层的最小主应力 ( $\sigma_3$ ) 方向为垂直方向，最大主应力 ( $\sigma_1$ ) 和中间主应

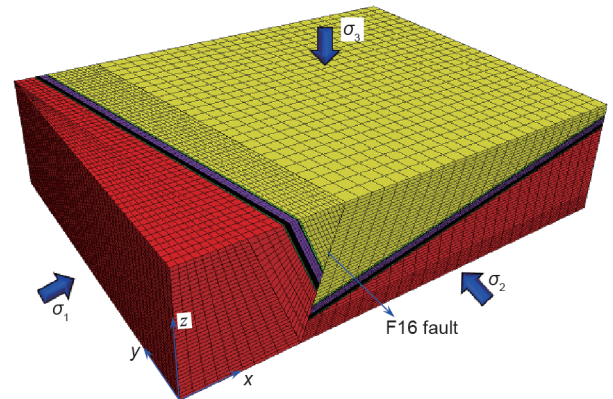


图15. 跃进煤矿25采区数值模型。



力( $\sigma_2$ )方向为水平方向,受力形式如图15所示。因此,模型应力条件除了需要匹配后期现场地应力条件之外,还应考虑初始模型的边界条件:底部固定,最大水平主应力 $\sigma_1=29$  MPa,中间水平主应力 $\sigma_2=24$  MPa,最小主应力 $\sigma_3=20.5$  MPa,与此同时, $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 在垂直方向上按0.025 MPa的应力梯度值增加。

根据现场实际开采顺序,依次开采25010、25030、25050、25070、25090工作面。在此过程中,采空区的模拟通过赋值空模型null实现,顶板冒落采用弱化体积模量、剪切模量、黏结力和抗拉强度至初始值的0.2倍实现,采空区压实采用强化上述参数至初始值的5倍实现。如图16所示为25110工作面回采前应力及断层侧面侧压系数 $\lambda$ 分布,图中 $\lambda = SXX/SZZ$ 。由图可知,25010、25030、25050、25070、25090工作面开采完后现场地应力测试位置处的数值模拟结果( $SZZ = 25.0$  MPa,  $SYY = 17.5$  MPa和 $SXX = 11.0$  MPa)与实际测量结果( $\sigma_1 = 25.28$  MPa,  $\sigma_2 = 17.92$  MPa和 $\sigma_3 = 10.31$  MPa)基本一致,因此,可验证数值模型有效。

由于煤层大面积采空后引起上覆岩层弯曲下沉,所有应力分量( $SZZ$ 、 $SXX$ 和 $SYY$ )在断层煤柱区域(25110工作面计划开采区域)出现了应力集中。然而, $SXX$ 在断层顶部区域出现了下降,甚至由压应力转变为拉应力状态,从而导致断层侧面侧向应力系数降低[图16(d)],此时容易引起断层活化。

综上所述,煤层采空造成上覆顶板的弯曲下沉,与断层耦合作用形成断层煤柱集中应力;断层附近工作面采掘扰动引起的局部应力场变化导致断层侧面侧压系数( $\lambda$ )减小,进而造成采动应力主导型断层解锁活化。其中,断层煤柱上的集中应力是静载,断层活化是动载,两者叠加构成了断层冲击地压的主要机理。

### 3.3. 断层冲击地压监测与防治策略

由上述断层冲击地压的动静载叠加机理可知,断层冲击地压的监测与防治也应主要从如何监测表征(图17)和控制弱化(图18)断层煤柱高静载与断层活化动载两方面着手。

断层煤柱高静载监测方面:可采用钻屑[35]、钻孔应力[36]、电磁辐射[37]、声发射[38]、位移等常规监测方法直接获取断层煤柱区的应力分布信息;采用微震[39-41]及其震动波速度层析成像[42]监测获知断层煤柱区域的微破裂分布及其应力分布情况;采用支架工作阻力[43]监测推断顶板活动与结构状态信息,间接获取断

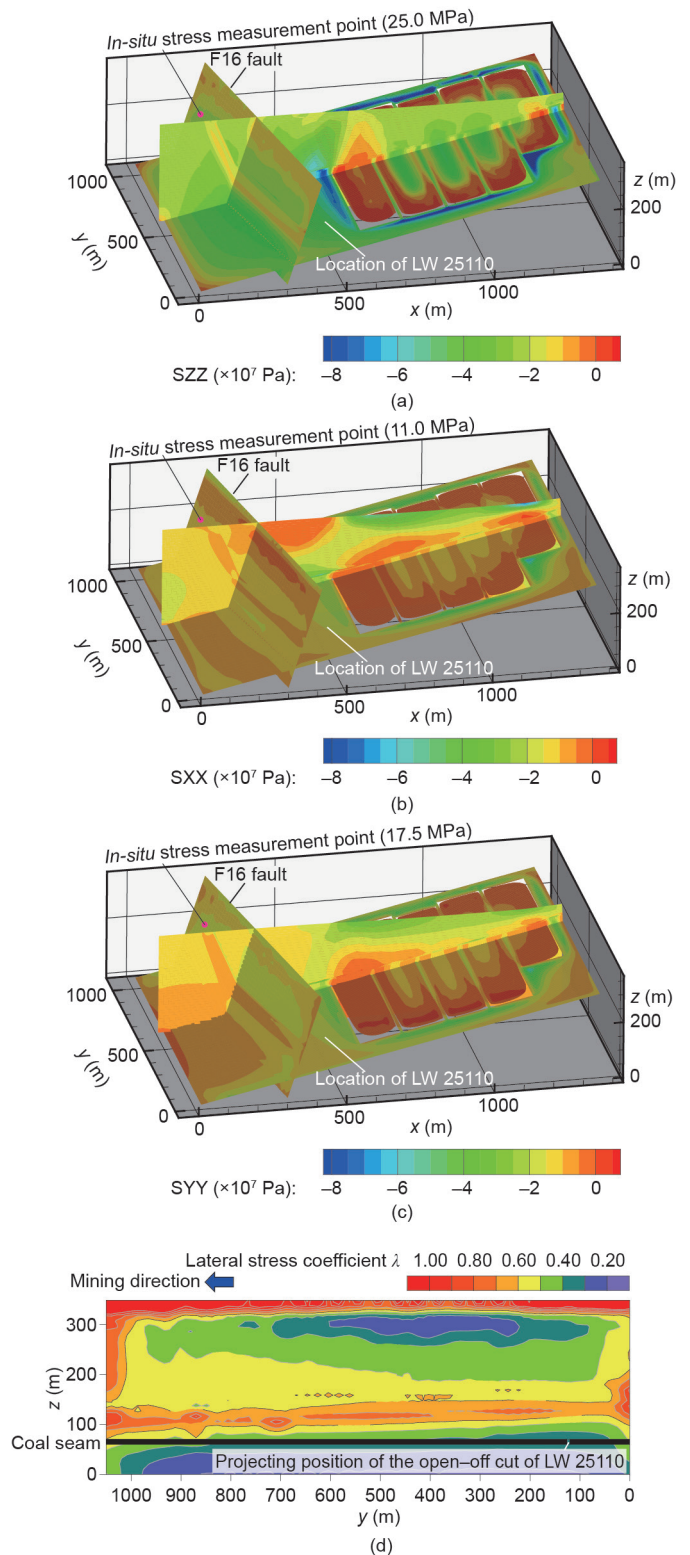


图16. 25110工作面回采前应力及断层侧面侧压系数分布。(a)垂直应力 $SZZ$ ; (b)x方向水平应力 $SXX$ ; (c)y方向水平应力 $SYY$ ; (d)侧压系数 $\lambda = SXX/SZZ$ 。

层、顶板结构双重作用下的断层煤柱应力情况。

断层活化动载监测方面:主要采用微震监测与顶板

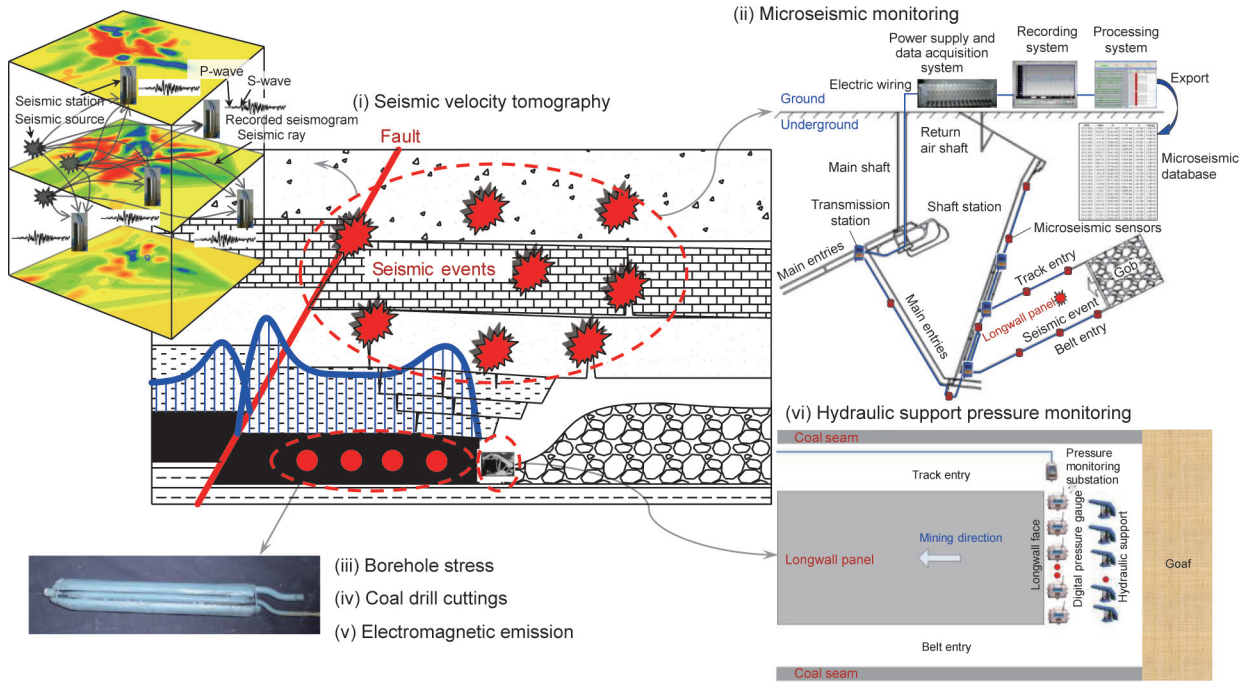


图17. 断层冲击地压监测体系。

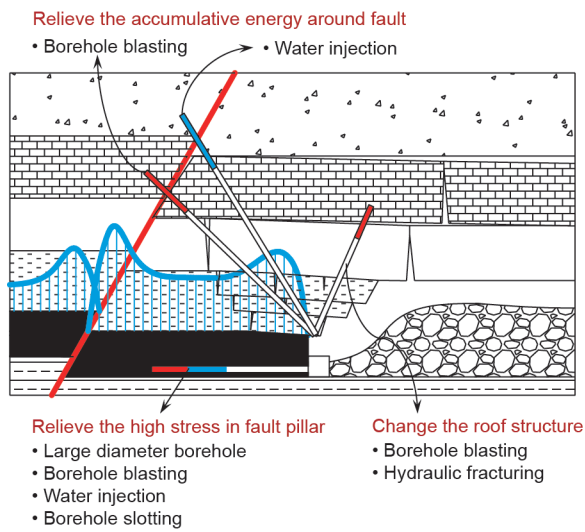


图18. 断层冲击地压防治策略。

离层监测获取断层活化信息。

断层煤柱高静载防治方面：可采用煤层注水、爆破、大直径钻孔等常规卸压方法[44-46]弱化断层煤柱区域煤体，降低断层煤柱应力；采用顶板爆破、水力致裂等方法[47]改变顶板结构，通过弱化断层与顶板结构的双重作用降低断层煤柱静载应力；采用工作面斜交过断层的方法，避免断层煤柱宽度整体性减小而引起的突然失稳。

断层活化动载防治方面：采用深孔爆破、注水等方

法直接减小断层面黏结力 $c$ 、摩擦角 $\varphi_f$ 以及增大断层区域孔隙压力 $p$ ，从而弱化断层活化动载的强度；控制工作面推进速度，避免最小主应力 $\sigma_3$ 的急剧降低而造成断层的突变失稳，同时可减小开采活动产生的矿震动载对断层活化的影响。

值得强调的是，虽然这些防治策略是基于概念模型与理论分析提出，但是当中有关采取爆破弱化断层应力和降低断层煤柱集中应力的防治策略分别在朝阳煤矿[17]和跃进煤矿[5]获得了成功应用。

## 4. 结论

通过调研总结煤层采掘活动与断层赋存状态之间的概念模型，提出了采动应力主导型与矿震动载主导型两种断层活化类型的力学机制及其动静载叠加诱冲机理，并探讨了断层冲击地压的监测与防治方法及策略，最后结合数值模拟、相似材料模型实验以及微震监测给予了验证。主要结论如下：

(1) 提出了煤层采掘扰动作用下采动应力主导型与矿震动载主导型两种断层活化力学机制。断层活化主要与断层面黏结力、断层摩擦角、断层倾角、最小主应力、孔隙压力有关，且开采扰动引起的水平采空侧卸载和垂直方向加载，即侧压系数降低，是采动应力主导型断层活化的力学本质；动载扰动作用产生的断层超低摩擦效



应是矿震动载主导型断层活化的力学本质。

(2) 提出了断层冲击地压的发生机理是由断层煤柱高静载与断层活活动载叠加诱发, 其中断层煤柱高静载是断层、顶板结构双重作用导致, 断层活活动载是由采动应力主导型局部解锁活化和矿震动载主导型超低摩擦效应组成。同时, 从如何监测表征和控制弱化断层煤柱高静载和断层活活动载两方面着手, 探讨了断层冲击地压的监测与防治方法及策略。

(3) 采动应力主导型断层活化的数值模拟验证表明, 煤层采空引起顶板弯曲下沉, 与断层耦合作用形成断层煤柱集中应力; 顶板下沉引起断层上端水平应力减小, 甚至变为拉应力状态, 进而导致断层面侧压系数减小; 数值模拟结果揭示的断层煤柱应力集中区和低侧压系数区与微震的主要集中分布区对应一致。

(4) 矿震动载主导型断层活化的相似材料模型实验验证表明, 动载扰动可改变断层应力状态, 尤其是显著降低断层正应力数值甚至改变其作用方向, 使得断层上下盘岩层间相对压紧程度降低, 甚至由最初的压应力状态变为拉应力状态, 从而使得断层在某一时刻出现摩擦“消失”现象, 进而产生超低摩擦效应。

## 致谢

本研究由国家自然科学基金(51604270、51874292和51804303)、中央高校基本科研业务费专项资金(2017QNA26)、江苏省自然科学基金(BK20180643)、中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLCRSM15X04)以及中国博士后国际交流计划派出项目(20170060)资助, 特此感谢。

## Compliance with ethics guidelines

Wu Cai, Linming Dou, Guangyao Si, and Yawei Hu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Pan YS. Study on rock burst initiation and failure propagation [dissertation]. Beijing: Tsinghua University; 1999. Chinese.
- [2] Cai W, Dou LM, Li ZL, He J, He H, Ding YL. Mechanical initiation and propagation mechanism of a thrust fault: a case study of the Yima section of the Xiashi-Yima Thrust (north side of the eastern Qinling Orogen, China). *Rock Mech Rock Eng* 2015;48(5):1927–45.
- [3] Lu CP, Liu Y, Zhang N, Zhao TB, Wang HY. *In-situ* and experimental investigations of rockburst precursor and prevention induced by fault slip. *Int J Rock Mech Min Sci* 2018;108:86–95.
- [4] Cai W, Dou LM, Li ZL, Liu J, Gong SY, He J. Microseismic multidimensional information identification and spatio-temporal forecasting of rock burst: a case study of Yima Yuejin Coal Mine, Henan, China. *Chin J Geophys* 2014;57(8):2687–700.
- [5] Li ZL, Dou LM, Cai W, Wang GF, He J, Gong SY, et al. Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars. *Int J Rock Mech Min Sci* 2014;70:192–200.
- [6] Michalski A. Assessment of rock burst hazard in the approach of a caved longwall to a fault. *Przeegl Gorn* 1977;23:387–97.
- [7] Qi QX, Liu TQ, Shi YW. Mechanism of friction sliding instability of rock burst. *Ground Pressure Strata Control* 1995;21(3–4):174–7.
- [8] Li ZH. Research on rockburst mechanism induced by fault slip during coal mining operation [dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology; 2009. Chinese.
- [9] Li ZL, Dou LM, Cai W, Wang GF, Ding YL, Kong Y. Mechanical analysis of static stress within fault-pillars based on a voussoir beam structure. *Rock Mech Rock Eng* 2016;49(3):1097–105.
- [10] Zuo JP, Chen ZH, Wang HW, Liu XP, Wu ZP. Experimental investigation on fault activation pattern under deep mining. *J China Coal Soc* 2009;34(3):305–9.
- [11] Kong P, Jiang L, Shu J, Wang L. Mining stress distribution and fault-slip behavior: a case study of fault-influenced longwall coal mining. *Energies* 2019;12(13):2494.
- [12] Ji HG, Ma HS, Wang JA, Zhang YH, Cao H. Mining disturbance effect and mining arrangements analysis of near-fault mining in high tectonic stress region. *Saf Sci* 2012;50(4):649–54.
- [13] Jiang JQ, Wu QL, Qu H. Evolutionary characteristics of mining stress near the hard-thick overburden normal faults. *J Min Saf Eng* 2014;31(6):881–7.
- [14] Zhang NB. Mechanism and engineering practice of fault rockburst [dissertation]. Beijing: China Coal Research Institute; 2014. Chinese.
- [15] Li T, Mu Z, Liu G, Du J, Lu H. Stress spatial evolution law and rockburst danger induced by coal mining in fault zone. *Int J Min Sci Technol* 2016;26(3):409–15.
- [16] Jiang YD, Wang T, Zhao YX, Wang WJ. Experimental study on the mechanisms of fault reactivation and coal bumps induced by mining. *J Coal Science Eng* 2013;19(4):507–13.
- [17] Zhu GA, Dou LM, Liu Y, Su ZG, Li H, Kong Y, et al. Dynamic behavior of fault slip induced by stress waves. *Shock Vib* 2016;2016:4386836.
- [18] Luo H, Li ZH, Wang AW, Xiao YH. Study on the evolution law of stress field when approaching fault in deep mining. *J China Coal Soc* 2014;39(2):322–7. Chinese.
- [19] Islam MR, Shinjo R. Mining-induced fault reactivation associated with the main conveyor belt roadway and safety of the Barapukuria Coal Mine in Bangladesh: constraints from BEM simulations. *Int J Coal Geol* 2009;79:115–30.
- [20] Sainoki A, Mitri HS. Simulating intense shock pulses due to asperities during fault-slip. *J Appl Geophys* 2014;103:71–81.
- [21] Sainoki A, Mitri HS. Effect of slip-weakening distance on selected seismic source parameters of mining-induced fault-slip. *Int J Rock Mech Min Sci* 2015;73:115–22.
- [22] Brace WF, Byerlee JD. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science* 1966;153:990–2.
- [23] Song YM, Ma SP, Yang XB, Jiang YD. Experimental investigation on instability transient process of fault rockburst. *Chin J Rock Mech Eng* 2011;30(4):812–7.
- [24] Cui YQ, Ma SL, Liu LQ. Effect of lateral stress perturbation on frictional behavior: an experimental study. *Seismol Geol* 2005;27(4):645–52.
- [25] Xie H, Zhao X, Liu J, Zhang R, Xue D. Influence of different mining layouts on the mechanical properties of coal. *Int J Min Sci Technol* 2012;22(6):749–55.
- [26] Jaeger JC, Cook NG, Zimmerman R. *Fundamentals of rock mechanics*. Washington: John Wiley & Sons; 2009.
- [27] Guo LL, Liu LQ, Ma J. The magnitude estimation in stick-slip experiments and analysis of stress drop. *Chin J Geophys* 2014;57(3):867–76.
- [28] Ma TH, Tang CA, Tang SB, Kuang L, Yu Q, Kong DQ, et al. Rockburst mechanism and prediction based on microseismic monitoring. *Int J Rock Mech Min Sci* 2018;110:177–88.
- [29] Cai W, Dou L, Si G, Cao A, He J, Liu S. A principal component analysis/fuzzy comprehensive evaluation model for coal burst liability assessment. *Int J Rock Mech Min Sci* 2016;100(81):62–9.
- [30] Zubelewicz A, Mroz Z. Numerical simulation of rock burst processes treated as problems of dynamic instability. *Rock Mech Rock Eng* 1983;16(4):253–74.
- [31] Li Y, Tang X, Yang S, Chen J. Evolution of the broken rock zone in the mixed ground tunnel based on the DSCM. *Tunn Undergr Space Technol* 2019;84:248–58.
- [32] Wang GF, Gong SY, Dou LM, Cai W, Jin F, Fan CJ. Behaviour and bursting failure of roadways based on a pendulum impact test facility. *Tunn Undergr Space Technol* 2019;92:103042.
- [33] Cai W. Fault rockburst induced by static and dynamic loads superposition and its monitoring and warning [dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology; 2015. Chinese.
- [34] Anderson EM. The dynamics of faulting. *Trans Edinburgh Geol Soc* 1905;8(3):387–402.
- [35] Bräuner G. *Rockbursts in coal mines and their prevention*. Rotterdam: AA Balkema Publishers; 1994.



- [36] Konicek P, Waclawik P. Stress changes and seismicity monitoring of hard coal longwall mining in high rockburst risk areas. *Tunn Undergr Space Technol* 2018;81:237–51.
- [37] Li XL, Wang EY, Li ZH, Liu ZT, Song DZ, Qiu LM. Rock burst monitoring by integrated microseismic and electromagnetic radiation methods. *Rock Mech Rock Eng* 2016;49(11):4393–406.
- [38] Dou LM, He XQ. Theory and technology of rock burst prevention. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press; 2001. Chinese.
- [39] Feng XT, Liu J, Chen B, Xiao Y, Feng G, Zhang F. Monitoring, warning, and control of rockburst in deep metal mines. *Engineering* 2017;3(4):538–45.
- [40] Cai W, Dou LM, Zhang M, Cao WZ, Shi JQ, Feng LF. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring. *Tunn Undergr Space Technol* 2018;80:232–45.
- [41] Si G, Durucan S, Jamnikar S, Lazar J, Abraham K, Korre A, et al. Seismic monitoring and analysis of excessive gas emissions in heterogeneous coal seams. *Int J Coal Geol* 2015;149:41–54.
- [42] Cai W, Dou LM, Cao AY, Gong SY, Li ZL. Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: a case study of Yima mining area, Henan, China. *J Appl Geophys* 2014;109:140–9.
- [43] Li ZL, Dou LM, Cai W, Wang GF, Ding YL, Kong Y. Roadway stagger layout for effective control of gob-side rock bursts in the longwall mining of a thick coal seam. *Rock Mech Rock Eng* 2016;49(2):621–9.
- [44] Konicek P, Soucek K, Stas L, Singh R. Long-hole destress blasting for rockburst control during deep underground coal mining. *Int J Rock Mech Min Sci* 2013;61:141–53.
- [45] Durucan S, Cao W, Cai W, Shi JQ, Korre A, Si G, et al. Monitoring, assessment and mitigation of rock burst and gas outburst induced seismicity in longwall top coal caving mining. In: *Proceedings of the 2019 Rock Dynamics Summit*; 2019 May 7–11; Okinawa, Japan; 2019.
- [46] Si G, Durucan S, Shi J, Korre A, Cao W. Parametric analysis of slotting operation induced failure zones to stimulate low permeability coal seams. *Rock Mech Rock Eng* 2019;52(1):163–82.
- [47] He H, Dou LM, Fan J, Du TT, Sun XL. Deep-hole directional fracturing of thick hard roof for rockburst prevention. *Tunn Undergr Space Technol* 2012;32:34–43.