

10-25-2024

## Mechanism of thrust fault slip under the disturbance of stress waves induced by coal mining

ZHANG Ningbo

*School of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China, znb444@sina.com*

XU Qianhai

*School of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China*

OUYANG Zhenhua

*School of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China, oyzhua@163.com*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

---

### Recommended Citation

ZHANG Ningbo, XU Qianhai, OUYANG Zhenhua, et al. (2024) "Mechanism of thrust fault slip under the disturbance of stress waves induced by coal mining," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 52: Iss. 10, Article 5.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.24.03.0207

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss10/5>

This Mechanism is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact [380940179@qq.com](mailto:380940179@qq.com).

---

# Mechanism of thrust fault slip under the disturbance of stress waves induced by coal mining

## Authors

ZHANG Ningbo, XU Qianhai, OUYANG Zhenhua, LI Yizhe, SHI Qingwen, QIN Hongyan, and YI Haiyang



移动阅读

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. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.03.0207

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. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.03.0207

## 煤矿开采激发应力波扰动下逆冲断层失稳机理

张宁博<sup>1</sup>, 许乾海<sup>1</sup>, 欧阳振华<sup>1,\*</sup>, 李一哲<sup>2</sup>, 史庆稳<sup>1</sup>, 秦洪岩<sup>1</sup>, 易海洋<sup>1</sup>

(1. 华北科技学院 矿山安全学院, 河北 廊坊 065201; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013)

**摘要:** 【目的】煤矿开采中, 人工爆破、顶板垮断等震源激发应力波易诱发断层失稳并导致冲击地压等灾害。【方法】以河南义马矿区 F16 逆冲断层为研究对象, 通过开展断层动光弹实验、数值模拟实验和理论分析, 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, 探讨了震源位置及能量对逆冲断层滑移的扰动规律, 阐释了应力波扰动下逆冲断层失稳机理和失稳类型。【结果和结论】研究表明: (1) 应力波传播会被断层阻隔, 并造成断层活化加剧、摩擦能迅速增大。(2) 震源应力波能量增大可加强断层自锁效应, 当能量超过一定阈值时断层才会解锁。(3) 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。(4) 初始高水平静载和强应力波扰动是断层失稳的必要条件。研究成果对断层型灾害防控技术发展具有重要的指导意义。

**关键词:** 应力波; 逆冲断层; 动光弹实验; 力学模型; 冲击地压; 煤矿开采

**中图分类号:** TD821 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)10-0036-11

### Mechanism of thrust fault slip under the disturbance of stress waves induced by coal mining

ZHANG Ningbo<sup>1</sup>, XU Qianhai<sup>1</sup>, OUYANG Zhenhua<sup>1,\*</sup>, LI Yizhe<sup>2</sup>, SHI Qingwen<sup>1</sup>, QIN Hongyan<sup>1</sup>, YI Haiyang<sup>1</sup>

(1. School of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China;

2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** [Objective] The seismic sources, such as roof collapse and artificial blasting, in coal mining may induce stress waves, which will cause the surrounding faults lose its stability and thus cause the dynamic disasters such as rockbursts etc. [Methods] The propagation law of stress waves in the fracture structure and the evolution characteristics of friction energy under the action of stress waves were studied through dynamic photoelastic experiment, numerical simulation and theoretical analysis based on the thrust fault F16 in Henan Yima mining area. Meanwhile, the disturbance law of the location of seismic source and energy to the slip of thrust fault was discussed, and the mechanism and type of thrust fault slip under the disturbance of stress waves were elaborated. [Results and Conclusions] The results show that: (1) The propagation of stress waves will be blocked by fault, which will lead to the intensification of fault activation and the rapid rise of friction energy. (2) The increase of source stress wave energy can strengthen the self-locking effect of fault, and the fault will be unblocked when the energy exceeds a certain threshold. (3) The stress waves will disturb the fault by area from top to bottom, thereby resulting in fault slip, and the slip model of a fault is influenced by its initial stress state and the disturbance intensity of stress waves. (4) High initial static stress and strong disturbance of stress waves are the necessary conditions for fault slips. Generally, the research results have important guiding significance for the development of fault disaster prevention and control technology.

**Keywords:** stress wave; thrust fault; photoelastic experiment; mechanical model; rock burst; coal mining

收稿日期: 2024-03-24; 接收日期: 2024-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52274120); 廊坊市科学技术研究与发展计划项目(2023013209, 2023013164); 河北省自然科学基金重点项目(E2024508004)

第一作者: 张宁博, 1989 年生, 男, 河北衡水人, 博士, 助理研究员。E-mail: znb444@sina.com

\*通信作者: 欧阳振华, 1976 年生, 男, 湖南洞口人, 博士, 教授。E-mail: oyzhua@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

逆冲断层指的是滑移量很大的低角度逆断层, 普遍赋存于矿区内部及周边, 例如河南义马矿区 F16 断层、贵州六盘水矿区 F3 断层、河北兴隆矿区 XLT 断层等。逆冲断层周边一般存在较高的水平构造应力, 当煤矿开采活动接近逆冲断层时, 断层活化往往导致冲击地压等动力灾害<sup>[1-2]</sup>。例如河南义马千秋煤矿在开采过程中诱发了 F16 断层活化, 导致了“8·11”“6·5”等多起冲击地压事故, 造成了巨大的人员伤亡和经济损失<sup>[3]</sup>。

在煤炭开采领域, 采动是诱发断层失稳的直接原因, 开采引起的力学效应一般包括两方面, 一是采动引起的准静态卸荷, 二是人工爆破、坚硬顶板垮断等激发的应力波扰动。在准静态卸荷诱发断层滑移机理方面, 学者们认为开采卸荷效应能够改变断层正应力和剪应力, 进而促进断层滑移<sup>[4-5]</sup>, 同时断层正应力和剪应力对采动的敏感性不同, 正应力较剪应力更为敏感<sup>[6]</sup>。开采扰动引起断层滑移可用弹簧-滑块模型表征<sup>[7-9]</sup>, 并分为上行和下行滑移两种模式<sup>[10]</sup>。针对应力波扰动诱发断层滑移理论, 动载引起的超低摩擦效应被认为是断层滑移的原因之一<sup>[11-12]</sup>, 同时学者们也分析了剪应力或正应力扰动以及应力波类型对断层失稳的影响<sup>[13-15]</sup>。对于逆冲断层滑移机理, Hubbert-Rubey 理论认为高孔隙压使得

摩擦力降低甚至消失造成了断层滑移<sup>[16-17]</sup>。总的来说, 已有研究对准静载条件下的断层滑移研究较多, 成果丰富, 但是对于动载(应力波)作用下断层滑移的机理尚未形成统一共识, 尤其对易诱发重大灾害的逆冲断层研究较少。

为深入探索应力波扰动诱发逆冲断层机理, 笔者以义马矿区 F16 逆冲断层为研究对象, 对应力波在断裂结构中的传播规律进行研究, 分析了应力波作用下断层滑移能量演化特征, 阐释了应力波性质对断层失稳的影响规律, 构建了考虑应力波扰动的断层滑移力学模型, 提出了断层失稳应力条件。研究成果对指导断层型动力灾害防治具有重要意义。

## 1 工程背景

F16 逆冲断层位于义马矿区南边界, 走向为近东西向, 倾向为南略偏东, 延展长度约 45 km, 倾角为 15°~75°, 落差为 50~500 m, 断面上陡下缓呈“犁”式。受 F16 逆冲断层影响, 义马矿区下属煤矿在开采过程中曾发生多起冲击地压事故。例如, 2006 至 2015 年间义马矿区发生冲击地压 120 次<sup>[18]</sup>, 其中 90% 以上由 F16 逆冲断层活化诱发, 如图 1 所示, 导致约 10 000 m 巷道破坏, 直接经济损失达数亿元。

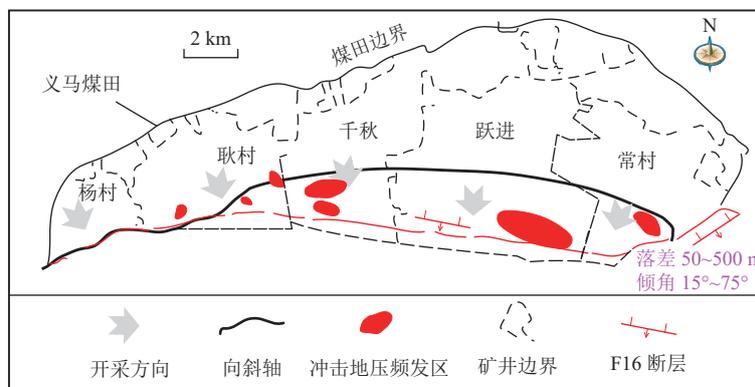


图 1 义马矿区冲击地压分布

Fig.1 Distribution of rockburst events in Yima coal field

煤矿在开采过程中, 坚硬顶板断裂往往会激发大量高能动载荷, 如图 2 所示, 2010 年 7 月至 2011 年 5 月期间, 义马矿区跃进煤矿 25 110 工作面回采期间监测到  $10^7$  J 以上微震事件共计 19 个, 其中 70% 的微震事件位于 F16 断层 200 m 范围内, 这些高能动载荷以应力波的形式携带能量向四周传播, 可能促进 F16 逆冲断层活化进而导致了 2010 年“8·11”和 2011 年“3·1”冲击地压事故。

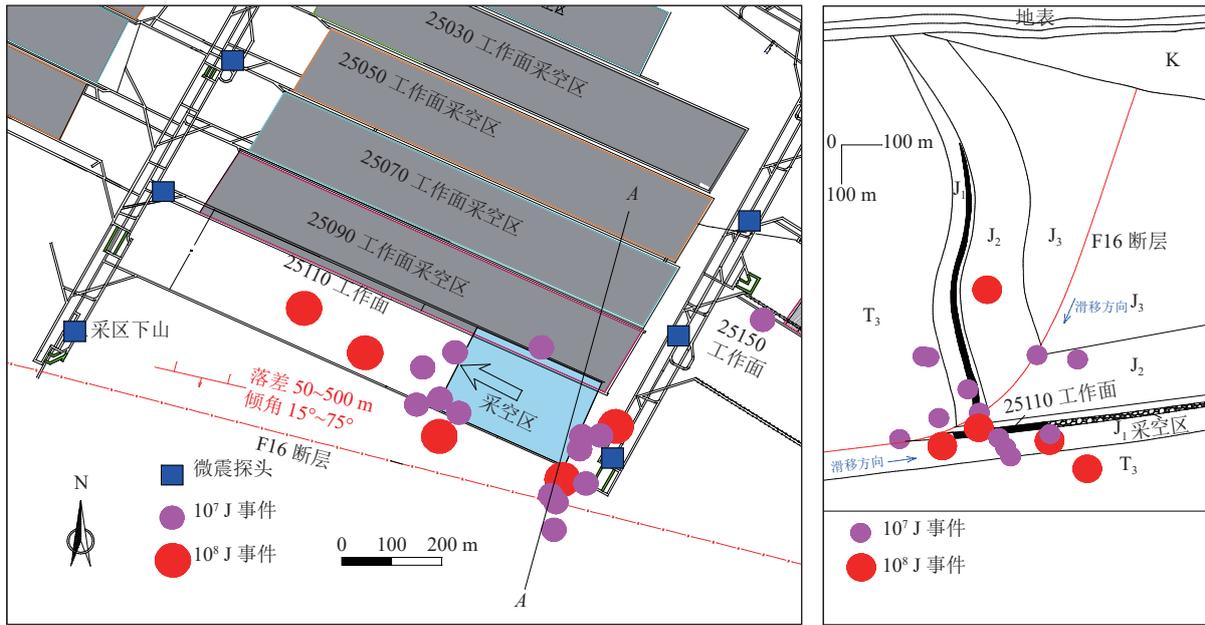
## 2 应力波在含断层结构中的传播规律研究

在地下采矿活动中, 激发应力波的震源一般包含两

类: 一类是自然震源, 主要为顶板断裂、断层滑移、冲击地压等; 另一类为人工震源, 主要包括爆破、机械振动等。震源释放能量并激发出应力波, 应力波携带能量从震源中心出发向远场传播, 并对周边煤岩体产生显著影响。动光弹实验(dynamic photoelastic experiment, DPE)方法能够直观地反映应力波的传播过程, 是分析动载影响断层稳定性的一种有效手段<sup>[19]</sup>。

### 2.1 断层动光弹实验

该实验采用聚甲基丙烯酸甲酯光弹材料(poly-methyl methacrylate, PMMA)模拟围岩, 试样弹性模量  $E=3.21$  GPa, 泊松比  $\nu=0.37$ , 密度  $\rho=1\ 190$  kg/m<sup>3</sup>。将光



(a) 平面图

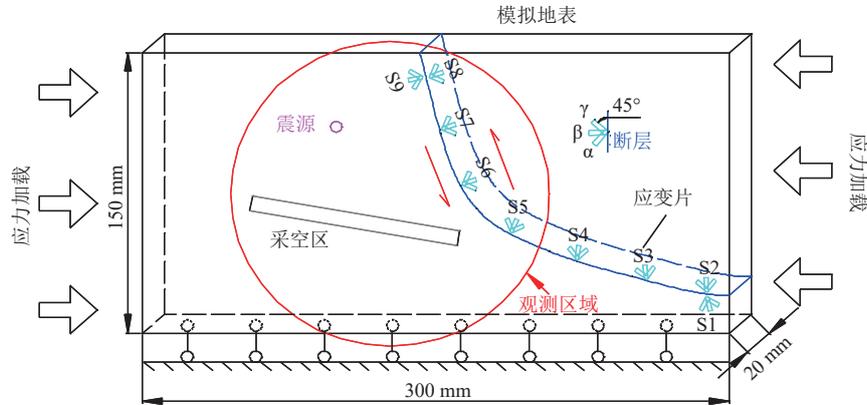
(b) A—A剖面图

图 2 跃进煤矿 25 110 工作面回采时大能量微震事件分布

Fig.2 Distribution of high-energy microseismic events of the No.25110 mining face in Yuejin Coal Mine

弹材料按照实际断层产状进行切割并拼接以模拟断层, 如图 3a 所示。试样尺寸为长×宽×高=300 mm×20 mm×150 mm, 断层试样下盘进行了矩形开挖, 尺寸为

长×宽×高=108 mm×20 mm×8.4 mm, 以模拟采空区。断层两侧共布置 9 组应变花, 布置方式如图 3b 所示, 每组应变花包含 3 个应变片, 互成 45°夹角, 编号分别为  $\alpha$ 、



(a) 试样



(b) 实验系统

图 3 动光弹实验布局

Fig.3 DPE setup in the laboratory

$\beta$ 、 $\gamma$ 。为模拟构造应力，断层试样被置于定制的夹持装置内，并通过旋转手柄施加垂向载荷，初始应力为 0.33 MPa。断层试样顶部为自由边界以模拟地表，底部边界为固定约束，两侧施加均布载荷，由于边界载荷量值较小，故断层试样的屈曲效应可被忽略<sup>[20]</sup>。在断层下盘、采空区上方布置震源孔，在孔内放置电阻丝，通过高压电激发器将电阻丝引爆以模拟坚硬顶板断裂激发的高能动载，经多次测试，实验选用放电电压为 900 V。

实验采用系统主要包括 TST-300 动光弹观测系统、高速摄像系统、动载激发系统和应变采集系统，如图 3b 所示。高速相机采样频率为 100 000 帧/s，图像采集为触发采集，即高压电激发器放电同时，高速相机启动捕捉图像，图像采集范围如图 3a 中红色圆圈所示；应变采集频率为  $5.0 \times 10^5$  Hz，数据采集方式为实时采集。实验开始前，调整光源、偏光镜、夹持器、检偏镜、场视镜、高速相机的相对位置，直至采集到清晰光弹图像；实验开始时，打开图像、应变等数据采集系统，然后启动放电，受到电爆炸激发应力波影响，断层试样发生了

突然滑移，同时施加载荷小幅下降，由 0.33 MPa 降至 0.32 MPa。

### 2.2 应力波传播规律

应力波在光弹材料中以应力条纹的形式自震源向四周传播，采用高速摄像系统捕捉到应力波引起的条纹变化，如图 4 所示。同时，当应力波接近断层时，将引起断层附近应变变化，在断层上部和中部分别选择一组应变片进行分析，由于 S5- $\gamma$ (指 S5 应变花中编号为  $\gamma$  的应变片，其他同)和 S9- $\alpha$  应变片轴线与应力波的传播方向一致，故选用 S5- $\gamma$  和 S9- $\alpha$  应变变化分析应力波的传播特征，上述应变片位置如图 3a 所示，监测到的应变变化如图 5 所示。图 5 中应变轴的正值代表拉应变，负值代表压应变。图 5 中②、③等红色数字对应图 4 中相应的光弹图像。实验中 P 波在 PMMA 介质中的平均传播速度为 2 700 m/s，S 波平均传播速度为 1 345 m/s，P 波条纹将领先于 S 波条纹，但由于实验中应力波引起的 P 波振幅较小、S 波振幅较大，S 波条纹在图 4 中较明显，而 P 波可从图 5 中的应变变化曲线中识别。

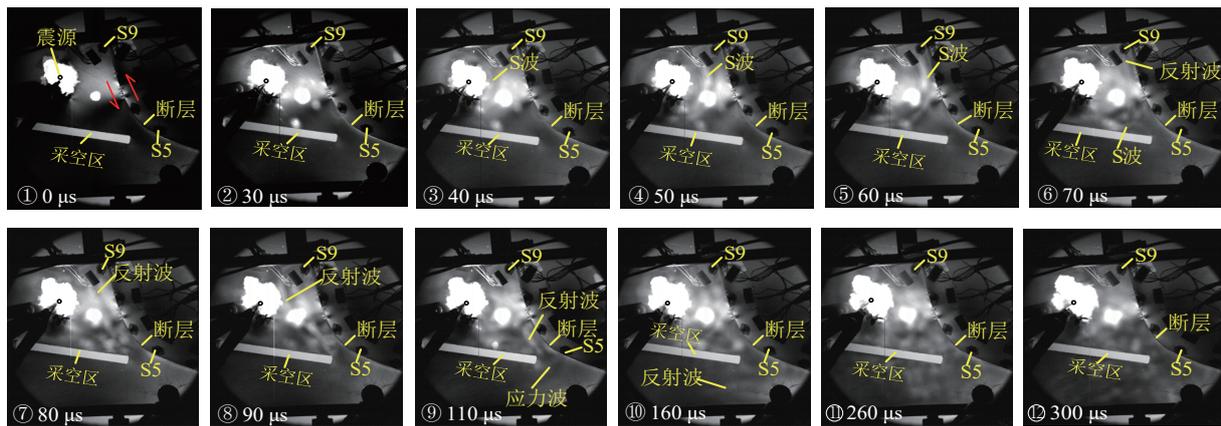


图 4 实验中的应力波传播

Fig.4 Propagation of stress waves in the experiment

如图 5 所示，在放电爆炸 30  $\mu$ s 后 P 波到达断层，S9- $\alpha$  应变片监测到压应变  $4.811 \times 10^{-3}$ ，随后 P 波在断层处反射，由于初始 P 波倾斜入射断层，故其在断层处反射波包括 P 波和 S 波，同时由于断层上下盘之间存在缝隙，反射 P 波由压缩波变为拉伸波，初始压缩 P 波和反射拉伸 P 波发生叠加，使得 S9- $\alpha$  应变在 40 和 50  $\mu$ s 时发生波动(如图 5 中③和④)。在放电后 60  $\mu$ s 时，初始 S 波到达断层(如图 4 中图⑤)，S9- $\alpha$  应变迅速增加至  $7.467 \times 10^{-3}$ (如图 5 中⑤)。在放电后 70 和 80  $\mu$ s，原始 S 波在断层处反射，反射波向震源方向传播(如图 4 中⑥和⑦)，并在到达采空区上边界时继续反射，然后 S 波在模拟断层与采空区上边界之间发生多次反射，使得断层和采空区之间三角区域出现了多条明暗相间应力波条纹(如图 4 中⑧和⑨)。在放电爆炸 80  $\mu$ s 后，由于衰

减应力波能量变得很低，S9- $\alpha$  应变以低幅值发生多次波动(如图 5 中⑨和⑩)。当放电爆炸后 110  $\mu$ s 时，应力波向下穿过断层和采空区之间狭窄区域(如图 4 中⑨)，然后在

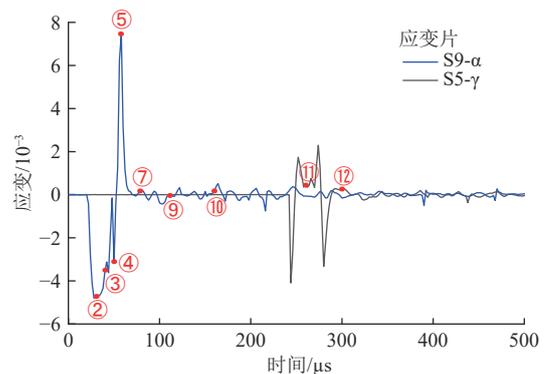


图 5 实验中的应变变化

Fig.5 Strain change in the experiment

夹持装置边框附近发生反射(如图 4 中⑩)。由于断层上盘和下盘之间为非紧密接触,存在局部间隙,故应力波不能直接穿过断层,并影响断层上盘应变片。但应力波可通过夹持装置边框传至断层上盘,并引起上盘应变片数据变化。在放电爆炸后 240  $\mu$ s,应力波开始影响断层上盘应变片 S5- $\gamma$ ,并引起应变的上下波动,但由于传播路径不同,其波形与 S9- $\alpha$  相比具有明显差异。

### 3 动载对逆冲断层滑移的扰动效应研究

相对于室内实验,数值模拟手段具有直观性强、成本低等优点,可对室内实验结果作进一步补充,以深入分析动载对逆冲断层滑移的扰动问题。LS-Dyna 在动力学数值计算方面具有明显的优势,满足本研究的需求,故采用 LS-Dyna 进行断层滑移动力学研究。

### 3.1 数值模型建立及校验

以冲击地压事故频发的 F16 逆冲断层西部剖面图为原型,采用 LS-Dyna 建立断层数值模型如图 6b 所示,模型尺寸为  $x \times y = 3\ 030\ \text{m} \times 100\ \text{m}$ 、 $z \approx 1\ 310\ \text{m}$  并模拟至地表。在不同层位的岩层中设置间距为 200 m 的 4 个震源点,通过炸药爆炸模拟坚硬顶板断裂所激发的应力波。在 F16 断层模型四周,建立空气单元,尺寸为  $x \times y \times z = 3\ 800\ \text{m} \times 800\ \text{m} \times 1\ 800\ \text{m}$ ,用于传播应力波携带的能量。为保证应力波有效传播,炸药和空气单元之间接触采用共节点、多物质耦合方法进行计算。对于模型边界条件, $x$  方向施加一定的水平运动速度  $v_x$  以模拟构造运动, $y$  方向和底部边界节点采用滑动支座,上部为自由边界。断层模型整体设置重力加速度为  $9.8\ \text{m/s}^2$ ,空气单元 6 个界面设置为无反射边界,用于抑制应力波的反射。

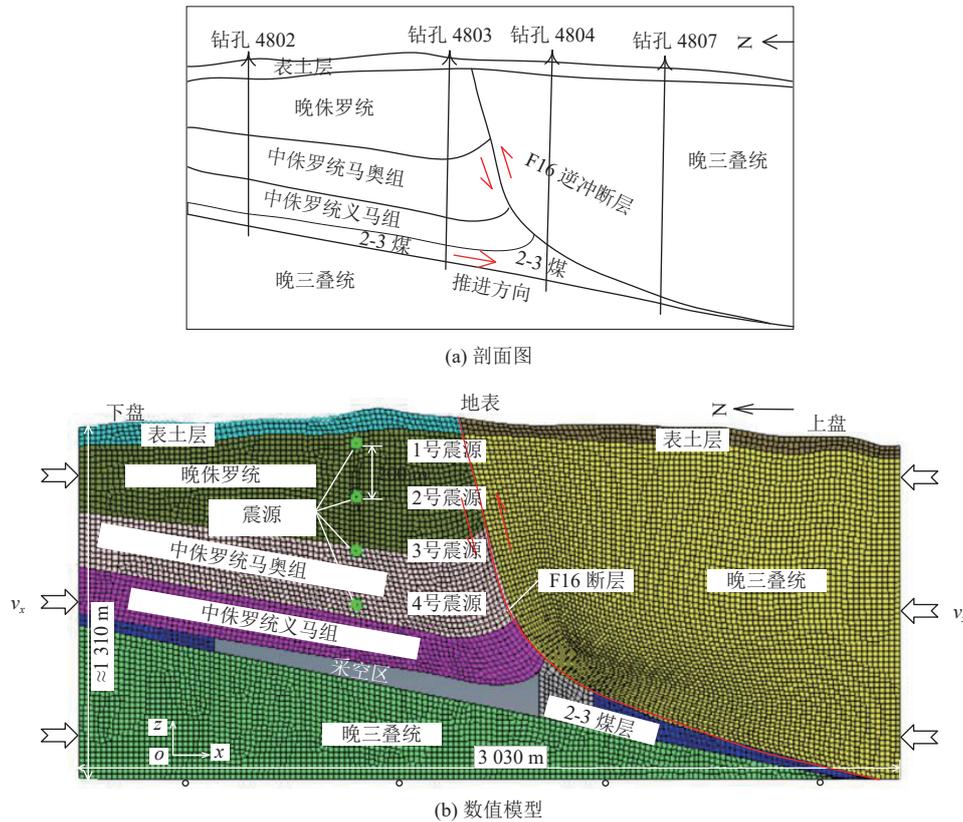


图 6 F16 断层剖面图及数值模型

Fig.6 Cross-section view and numeric model of F16 fault

由于文献 [21] 研究背景与本文相同,故模型煤岩层和断层物理力学参数参考文献 [21] 进行选取,并根据应力量值、分布形态和应力波传播规律等判断标准对试算结果进行了调整,具体见表 1。F16 断层界面接触类型为面面接触,允许两个面之间相对滑动,其力学参数见表 2。炸药爆炸符合 Jones-Wilkins-Lee 状态方程, $a$ 、 $b$  为炸药材料参数, $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为常数,5 个参数决定炸药爆炸能量大小,参数选取见表 3。煤岩体本构

关系采用塑性运动模型,断层滑移符合莫尔库伦破坏准则。

数值模拟过程分为静态和动态计算 2 个步骤,首先进行静态计算,对 2-3 煤层进行了一次性开挖,采用动态松弛方法对模型施加初始应力和  $x$  方向构造运动,直至达到初始应力平衡。静态计算结束后,通过重启动命令进行动态计算,炸药被引爆,计算至终止时间。坚硬厚顶板岩层垮断易产生高能微震,因此,数值模拟中震

表 1 煤岩体物理力学性质  
Table 1 Physical and mechanical properties of coal and rock mass

岩层分类	岩性组成	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	失效应变
表土层	黄土	1 830	20	0.40	5	0.90
中侏罗统岩层	砾岩、粉砂岩	2 600	26	0.15	35	0.90
晚侏罗统岩层	粗砾岩	2 600	42	0.20	52	0.90
2-3煤	煤	1 350	10	0.34	14	0.80
晚三叠统岩层	石英砂岩	2 700	48	0.20	67	0.90

表 2 断层界面性质  
Table 2 Mechanical properties of fault interface

静摩擦 因数	动摩擦 因数	黏性摩擦 系数	黏性阻尼 系数	启动 时间/μs	结束 时间/μs
0.4	0.2	1.5×10 <sup>7</sup>	20	0	1.0×10 <sup>20</sup>

表 3 JWL 方程参数  
Table 3 Parameters in JWL equation

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sub>1</sub>	<i>R</i> <sub>2</sub>	<i>ω</i>	<i>E</i> <sub>0</sub> /J
2.0×10 <sup>11</sup> ~ 1.0×10 <sup>12</sup>	6.710×10 <sup>4</sup>	4.5	1.1	0.35	8.0×10 <sup>6</sup>

表 4 数值模拟实验方案  
Table 4 Numerical simulation scheme

因素分类	方案参数
震源位置	1号震源, 煤层上方800 m
	2号震源, 煤层上方600 m
	3号震源, 煤层上方400 m
	4号震源, 煤层上方200 m
震源能量参数	<i>a</i> =2×10 <sup>11</sup>
	<i>a</i> =4×10 <sup>11</sup>
	<i>a</i> =6×10 <sup>11</sup>
	<i>a</i> =8×10 <sup>11</sup>
	<i>a</i> =1×10 <sup>12</sup>

震源位置设计在晚侏罗统和中侏罗统马奥组岩层中。由于能量参数 *a* 对震源能量影响最大, 通过试算当 *a*=6×10<sup>11</sup> 时, 得到较为理想的数值模拟结果(图 7), 然后考虑震源能量变化, 设计能量参数 *a* 为 5 个等间隔数值, 具体模拟方案见表 4。在动态计算过程中记录压力、断层滑动位移和摩擦能等物理量, 用以分析应力波对断层滑移的扰动影响。

数值模拟结果与实际观测结果的相似性是保证数值模拟可靠性的前提。通过调整模型的各项输入参数并进行多次试算, 然后将每次试算结果与动光弹实验结果进行对比, 选取对比结果近似的算例参数作为实验的理想参数, 所得模拟结果和动光弹实验结果对比如图 7 所示, 图 7 中应力轴正值为拉应力、负值为压应

力, 应变轴正值为拉应变、负值为压应变。由于动光弹和数值模拟实验模型在尺寸和结构上的差异性, 二者结果完全相似是无法实现的, 但从图 7 可以看出, 二者在应力/应变随时间变化规律上是相似的; 同时根据 PMMA 动弹性模量(*E*<sub>d</sub>=5.6 GPa) 计算 S9-α 最大压应力为 26.94 MPa(图 7 中 *I* 点), 与数值模拟最大压应力 28.8 MPa(图 7 中 *J* 点) 相差约为 6.45%, 故二者在应力量值上具有一定相似性, 因此, 认为数值分析结果能够满足研究需要。

### 3.2 断层摩擦能演化特征

当断层上下盘相对错动时, 断层将耗散摩擦能, 摩擦能指的是断层滑移时整体耗散能量, 其大小在一定程度上能够反映断层稳定性。当炸药能量参数 *a*=6×10<sup>11</sup>, 震源位于 2 号孔时, 断层摩擦能变化如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 在应力波扰动作用下, F16 断层摩擦能从 0 逐渐增加到 2.03×10<sup>10</sup> J, 并且摩擦能增加过程大致可分为 3 个阶段: 第一个阶段, 曲线以相对较低的速率上升, 从 0 上升到约 0.1 s, 此时应力波未达到断层, 仅引起断层小范围滑移; 第二阶段, 断层受应力波直接扰动影响, 摩擦能从 1.8×10<sup>9</sup> J 迅速增加至 5.79×10<sup>9</sup> J, 增幅达 2 倍以上, 此时应力波主要影响断层上部; 第三阶段, 摩擦能增加速率较第二阶段降低, 反射应力波多次作用于断层, 使得断层摩擦能从 5.79×10<sup>9</sup> J 缓慢增加到 2.03×10<sup>10</sup> J。由此可知初始应力波直接作用于断层, 可促进 F16 断层滑移, 并且其扰动作用大于反射波。

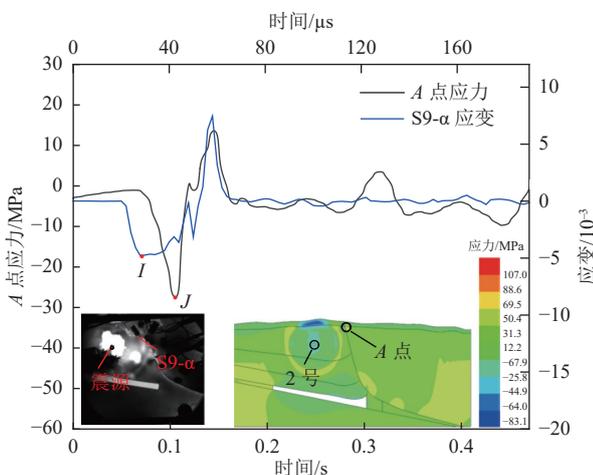


图 7 数值模拟结果与实验室结果对比

Fig.7 Comparison between results of the laboratory experiment and numerical analysis

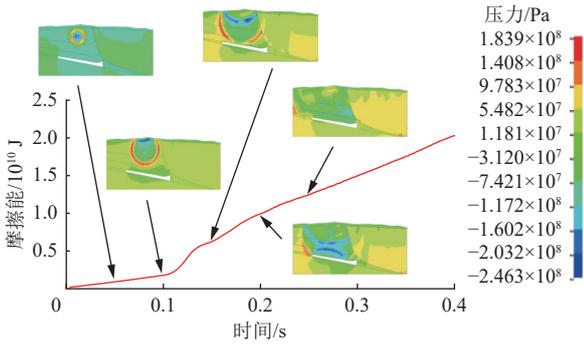


图 8 断层摩擦能变化  
Fig.8 Change of friction energy in fault

### 3.3 动载属性对断层滑移影响规律

对于特定断层,不同动载属性会对断层滑移产生不同的扰动作用,而煤矿坚硬顶板断裂所激发的动载,最重要的 2 个属性为:震源位置和震源能量,因此,本文主要研究震源位置、能量对断层滑移的扰动效应。

#### 3.3.1 震源位置

通过数值模拟实验,得到断层摩擦能和滑移位移随震源位置变化如图 9 所示,由于断层中部滑移对采掘空间稳定性影响较大,故选择断层中部测点 M 作为各物理参量监测点开展研究。从图 9 中可以看出,随着震源位置由高位变为低位,断层滑移位移呈先降低后增加的变化趋势,而断层摩擦能先增大后减小。位于巨厚砾岩层的 2 号震源比其他位置震源耗散更多摩擦能,但 2 号震源引起测点 M 滑移位移却最小,由此可见,应力波对断层滑移的扰动十分复杂。但位于巨厚砾岩层的震源使得 F16 断层滑移释放摩擦能更高、断层更加活跃,由此推断 2 号震源对 F16 断层的扰动程度最高。

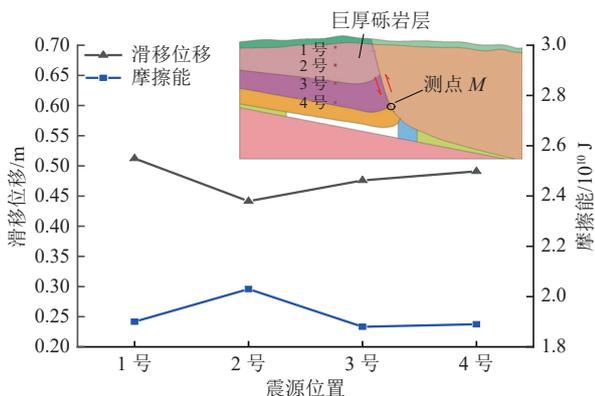


图 9 不同震源位置断层滑移位移和摩擦能变化  
Fig.9 Change in displacement of fault slip and friction energy at different seismic sources

#### 3.3.2 震源能量

图 10 为断层中部测点 M 滑动位移和断层摩擦能随震源能量变化曲线,图 10 中能量参数 a 与震源激发应力波能量成正比。从图 10 可知,随着扰动应力波能

量的增加,断层中部测点 M 的滑移位移呈先减小后增大的变化趋势,可推断应力波能量增大可能抑制断层局部滑移。同时在图 10 中可以看出,断层摩擦能曲线随能量参数 a 的增大而增大,高能量应力波将使断层更加活跃,断层摩擦耗能增加,但应力波扰动下的断层滑移是复杂的,高能量应力波作用下断层并不会产生显著的滑移位移增加,而是先减小后增大。由此可见,当应力波能量较低时,应力波作用可使得断层接触更加紧密,断层自锁效应增强;随着应力波能量进一步增大,断层开始解锁,滑移位移逐步增大。

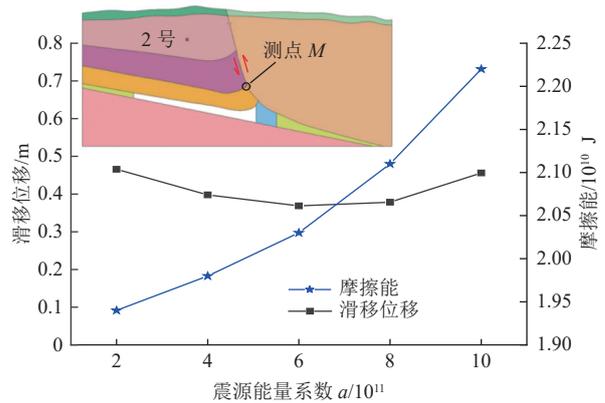


图 10 不同震源能量下摩擦能及滑移位移变化  
Fig.10 Change in friction energy and displacement of fault slip at different seismic sources

## 4 应力波扰动下逆冲断层动力学失稳模型

相比于地震,煤矿采动诱发震源与断层间距较小,受到传播距离的限制,P波、S波等应力波难以分离,断层滑移将受到P波和S波叠加扰动的影 响。以P波为例,由于断层两侧介质波阻抗差异,P波以一定的角度射入断层时,将会在断层发生反射。由于义马矿区坚硬厚顶板垮断释放能量较高,其激发应力波可造成显著的矿震现象,故建立包含“煤层-F16断层-地表”的大范围理论模型,如图 11 所示。由于各岩层之间波阻抗差异比煤层和岩层之间波阻抗差异较小,为简化分析,本模型中应力波在不同岩层界面上反射引起的能量衰减可进行忽略,同时在模型中将 F16 断层简化为一直线。如图 11a 所示,当坚硬厚顶板垮断时,P波自震源 O 点出发,将垂直入射 F16 断层,影响区域为 AB 段。然后入射 P 波在断层处反射,如图 11b 所示,由于断层带内岩石介质较为破碎,其波阻抗  $\rho_1 C_1$  小于下盘围岩波阻抗  $\rho_2 C_2$ ,则反射 P 波为拉伸波。在图 11a 中,P波为垂直入射,故反射波只有 P 波而无 SV 波;当 P 波在断层其他部位反射时,由于入射角度不垂直,反射波不仅包含 P 波,还有 SV 波,但由于入射角度较小( $<45^\circ$ ),反射 P 波幅值较大,故本研究仅考虑反射 P 波,而忽略反射

SV 波的影响。在图 11b 中,入射 P 波传播至地表自由面发生反射,反射 P 波也为拉伸波,此时初始 P 波产生

的反射拉伸波影响断层范围为 CD 段。

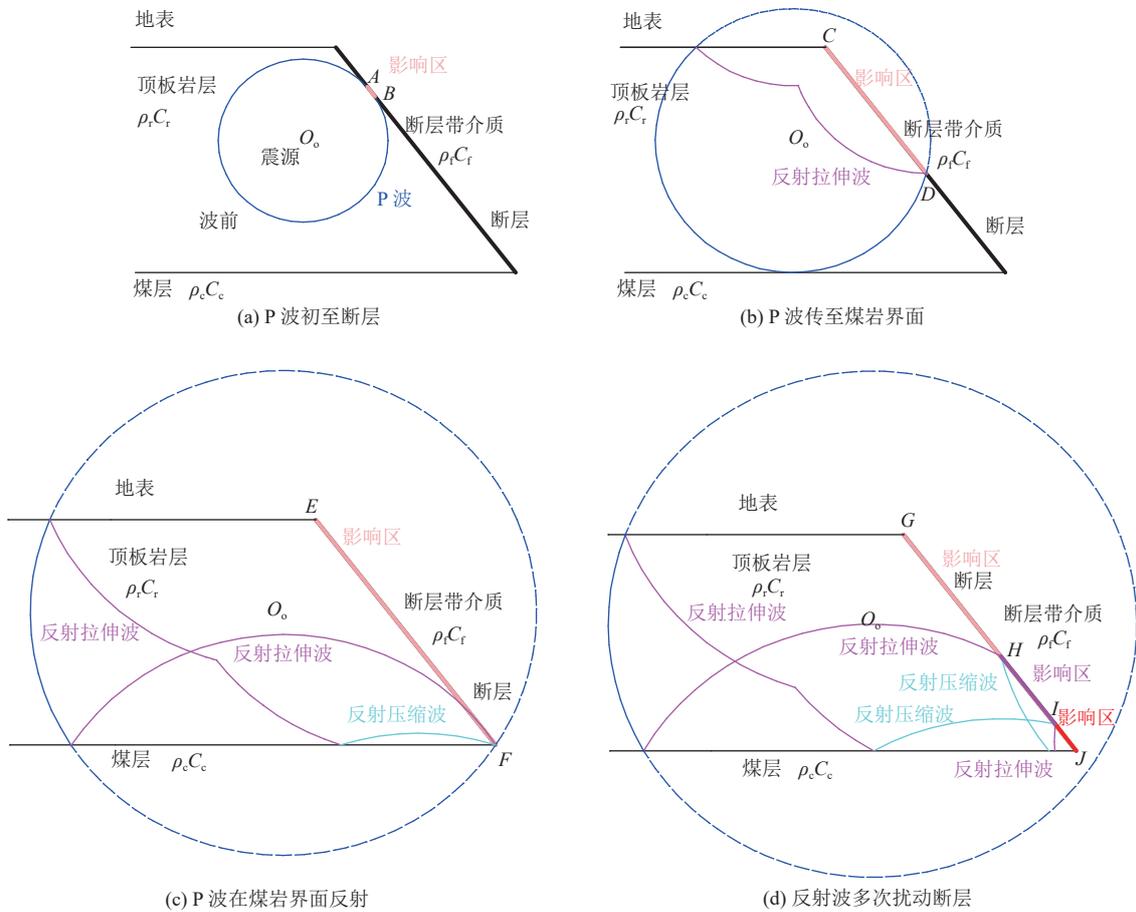


图 11 P 波在断层-围岩系统中的传播过程

Fig.11 Propagation of P-waves in the fault-surrounding rock system

如图 11c 所示,当初始 P 波到达顶板岩层与煤层分界面时,由于分界面两侧介质波阻抗满足 $\rho_r C_r > \rho_c C_c$  ( $\rho_c C_c$  为煤的波阻抗),反射 P 波为拉伸波;同时在断层产生的反射拉伸波传播至煤岩分界面将继续发生反射,由于煤的波阻抗小于顶板岩层,则该反射波为压缩波。此时初始 P 波产生的反射拉伸波对断层的影响范围扩大到 EF 段,在煤岩分界面反射产生的拉伸波开始由 F 端自下而上开始影响断层,同时二次反射产生的压缩波将紧随煤岩界面反射拉伸波影响下部断层(图 11c 中蓝色曲线)。

如图 11d 所示,随着应力波继续传播,煤岩界面反射拉伸波遇到断层继续发生反射,由于 $\rho_r C_r > \rho_f C_f$ ,该反射波为压缩波,影响断层段为 HJ 段,并与初始 P 波二次反射产生的压缩波叠加(图 11d)中两条蓝色曲线),应力幅值为二者最大应力之和。在煤岩界面二次反射压缩波遇到断层则将反射成拉伸波(图 11d 中红色曲线),该应力波将影响断层 JI 段。随着应力波多次反射,应力波幅值逐步衰减至 0。受应力波影响显著区域集中

在断层与煤岩界面之间的三角区,该区域将持续受到压缩波和拉伸波的重复扰动。

笔者以断层-围岩系统为研究对象,结合实验现象和理论分析,构建了应力波扰动下的断层滑移力学模型,如图 12 所示。该模型主要包括两个基本组成部分,即应力波扰动单元(绿色线框)和滑移单元(黑色线框)。滑移单元包括断层带和围岩,其中围岩由杆元件和胡克体构成,杆元件一端连接远场围岩介质,一端连接断层带圣维南体,相邻杆元件之间通过胡克体传递拉或压应力,即围岩视为弹性体。断层带由多个圣维南体组成,单个圣维南体两端分别与断层上盘、下盘杆元件连接,相邻圣维南体之间无连接,圣维南体失稳条件满足式(1)。应力波扰动单元包括 P 波扰动和 S 波扰动,P 波粒子振动方向与传播方向一致,主要对断层正应力造成扰动,S 波粒子振动方向与传播垂直,对剪应力影响较大,应力波扰动单元将从不同的方向直接影响围岩杆元件的受力及变形。

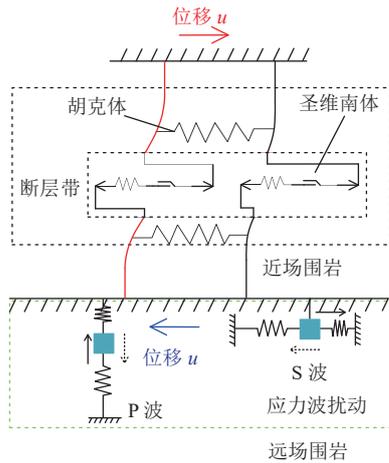


图 12 考虑应力波扰动下的断层滑移力学模型

Fig.12 Mechanical model of fault slips under the disturbance of stress waves

$$\begin{cases} \tau < \tau_s = \sigma f, & \varepsilon = \frac{\tau}{E} \\ \tau \geq \tau_s = \sigma f, & \varepsilon \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1)$$

在 P 波、S 波扰动下，断层近场围岩的杆元件在正应力或剪应力增量作用发生进一步弯曲，在震源位置，杆元件的弯曲挠度最大，积聚能量最多，对摩擦片的拉应力最大，可能造成与之连接的滑移单元最先失稳；然后，该单元失稳将带动邻近单元逐步失稳，从而形成连锁反应，最终导致断层的整体失稳。

假设应力波扰动下断层失稳满足摩尔-库伦准则，断层所受剪应力  $\tau(t)$  为：

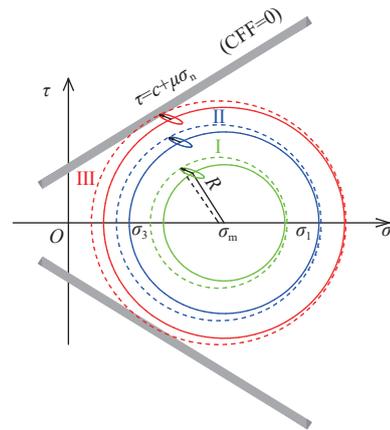
$$\tau(t) = \pm [c + \mu\sigma_n(t)] \quad (2)$$

断层滑移库伦破坏方程  $CFF(t)$ <sup>[22]</sup> 见下式，当  $CFF(t) = 0$  时为库伦纳维尔破坏准则。

$$CFF(t) = |\tau(t)| - [c + \mu\sigma_n(t)] \quad (3)$$

图 13 为应力波扰动条件下的断层应力莫尔圆变化情况及与库伦破坏曲线之间的关系，图 13 中  $\sigma_m$  为平均应力，实线莫尔圆为断层初始应力状态，虚线莫尔圆为应力波扰动下断层应力状态。在图 13 中，在应力波扰动断层前，若断层受到较低水平的静载荷而处于稳定状态，绿色实线莫尔圆在 2 条库伦破坏曲线之间，且距离曲线较远，断层将维持稳定状态；当应力波到达断层时，断层局部应力场受到应力波的扰动，在应力值和方向上均会发生波动，并且会使得莫尔圆的半径  $R$  增大或减小，假设断层应力沿图 13 中的绿色椭圆轨迹进行波动，即使该莫尔圆的半径  $R$  增加到最大，即形成绿色虚线莫尔圆 I，其距离库伦破坏曲线仍较远，断层仍保持稳定。

假设断层处于较高的差应力  $\sigma_1 - \sigma_3$  环境下，其初始应力莫尔圆较大，如图 13 中蓝色实线，且靠近库伦破坏曲线，此时断层处于稳定状态。若断层受到低能量应力波影响，则应力莫尔圆发生波动，最大应力莫尔圆 II



I—低静载-强动载扰动；II—高静载-弱动载扰动；III—高静载-强动载扰动

图 13 影响断层稳定的应力环境类型

Fig.13 Type of stress environment affecting the fault stability

将靠近库伦破坏曲线。此时，断层处于临界失稳状态，可能在两种条件变化时发生失稳：一是断层静载应力逐渐增大，最终与库伦破坏曲线相切；二是外界动载扰动能量增大，断层应力莫尔圆与库伦破坏曲线接触。

假设断层受到较高的静载水平且受到外界强动载扰动，形成应力莫尔圆 III 将与库伦破坏曲线相切或相割，则断层发生非稳定滑移，此应力条件下断层失稳概率大大增加。

由上可知，诱发断层滑移的应力波存在一临界能量，当应力波高于该能量时，断层易发生失稳。明晰断层滑移的应力波临界扰动能量，对指导断层滑移灾害防治具有十分重要的意义。但由于篇幅限制，笔者将在后续工作中作进一步研究。

## 5 结论

(1) 应力波对断层造成显著扰动，继而诱发断层失稳。应力波遇到断层发生反射，并造成断层附近应变激增。同时断层对应力波传播起阻隔作用，导致上盘应变波动远滞后于下盘。

(2) 震源层位和能量对断层滑移具有重要影响。位于巨厚砾岩层的震源使得 F16 断层更加活跃，并且随着应力波能量增大，断层滑移将出现先自锁、后解锁的现象。

(3) 应力波对断层滑移的扰动作用为自上至下的分区式扰动。应力波扰动可造成断层近场围岩进一步变形，震源位置单元失稳，并联动周边单元连锁失稳，最终诱发断层整体滑移。

(4) 断层滑移与初始应力状态、所受应力波扰动强度密切相关。高水平初始静载水平叠加外界强扰动，最易诱发断层失稳。

(5) 本文探讨了应力波扰动诱发断层滑移机制, 对深理解断层失稳、完善相关理论体系有着重要意义, 并有望指导新型断层灾害防控技术的开发, 对解决工程实际问题具有参考价值。然而, 鉴于动力扰动下断层滑移机制的复杂性, 本文仅初步分析了应力波扰动下逆冲断层滑移的规律, 涉及震源与应力波能量变化影响, 未及应力波其他特性、其他类型断层及断层滑移动力学效应, 这些可作为未来研究方向。

### 符号注释:

$a$ 、 $b$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为与炸药能量相关的 5 个参数;  $c$  为断层的黏聚力, MPa; CFF( $t$ ) 为库伦破坏方程;  $E$  为胡克体的弹性模量, GPa;  $E_0$  为爆炸产物初始内能, J;  $f$  为摩擦片的摩擦因数;  $R$  为莫尔圆的半径;  $\varepsilon$  为应变;  $\sigma$  为摩擦片的临界正应力, MPa;  $\sigma_0$  为施加的初始应力,  $\sigma_1$  为第一主应力,  $\sigma_3$  为第三主应力, MPa;  $\sigma_n(t)$  为断层上的有效正应力, MPa;  $\mu$  为断层的摩擦因数;  $\rho_c C_c$  为煤的波阻抗;  $\rho_f C_f$  为断层两侧围岩波阻抗;  $\rho_f C_f$  为断层带介质波阻抗;  $\tau$  为断层带单元受剪应力, MPa;  $\tau_s$  为摩擦片的临界剪应力, MPa;  $\tau(t)$  为断层上剪应力, MPa。

### 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 参考文献(References)

- [1] CAI Wu, DOU Linming, LI Zhenlei, et al. 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)[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(5): 1927-1945.
- [2] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 矿井群冲击地压发生机理与控制技术探讨[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 141-150.  
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Discussion on the mechanism and control of coal bump among mine group[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 141-150.
- [3] 王宏伟, 姜耀东, 邓代新, 等. 义马煤田复杂地质赋存条件下冲击地压诱因研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(增刊 2): 4085-4092.  
WANG Hongwei, JIANG Yaodong, DENG Daixin, et al. Investigation on the inducing factors of coal bursts under complicated geological environment in Yima mining area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(Sup.2): 4085-4092.
- [4] 王浩, 赵毅鑫, 牟宗龙, 等. 综放工作面采动诱发逆断层张剪失稳特征及矿震活动规律分析[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2573-2581.  
WANG Hao, ZHAO Yixin, MU Zonglong, et al. Characteristics of seismic activity and tensile-slip features of fault under stress and displacement disturbance in full-mechanized workface[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2573-2581.
- [5] 王宏伟, 王刚, 张越, 等. 动压影响下断层构造应力场和能量场分布特征[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(10): 183-189.  
WANG Hongwei, WANG Gang, ZHANG Yue, et al. Stress field and energy field distribution characteristics of faults under dynamic pressure[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 183-189.
- [6] 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.
- [7] 潘一山, 王来贵, 章梦涛, 等. 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(6): 642-649.  
PAN Yishan, WANG Laigui, ZHANG Mengtao, et al. The theoretical and testing study of fault rock burst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998(6): 642-649.
- [8] 张宁博, 欧阳振华, 赵善坤, 等. 基于粘滑理论的断层冲击地压发生机理研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(增刊 2): 894-898.  
ZHANG Ningbo, OUYANG Zhenhua, ZHAO Shankun, et al. Research on the occurrence mechanism of fault rock-burst based on the stick-slip theory[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(Sup.2): 894-898.
- [9] 张宁博, 赵善坤, 邓志刚, 等. 动静载作用下逆冲断层力学失稳机制研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(6): 1186-1192.  
ZHANG Ningbo, ZHAO Shankun, DENG Zhigang, et al. Mechanical instability mechanism of thrust fault under static and dynamic loading[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(6): 1186-1192.
- [10] 李振雷, 窦林名, 蔡武, 等. 深部厚煤层断层煤柱型冲击矿压机理研究[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.
- [11] 潘一山, 王凯兴. 岩体间超低摩擦发生机理的摆型波理论[J]. *地震地质*, 2014, 36(3): 833-844.  
PAN Yishan, WANG Kaixing. Pendulum-type waves theory on the mechanism of anomalously low friction between rock masses[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(3): 833-844.
- [12] 李利萍, 李卫军, 潘一山. 冲击扰动对超低摩擦型冲击地压影响分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(1): 111-120.  
LI Liping, LI Weijun, PAN Yishan. Influence of impact disturbance on anomalously low friction rock bursts[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(1): 111-120.
- [13] 黄元敏, 马胜利, 缪阿丽, 等. 正应力扰动对断层滑移失稳影响的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(3): 931-940.  
HUANG Yuanmin, MA Shengli, MIAO Ali, et al. Effect of normal stress perturbation on frictional instability: An experimental study[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(3): 931-940.
- [14] 黄元敏, 马胜利, 缪阿丽, 等. 剪切载荷扰动对断层摩擦影响的

- 实验研究[J]. 地震地质, 2009, 31(2): 276–286.
- HUANG Yuanmin, MA Shengli, MIAO Ali, et al. Effect of shear loading perturbation on frictional behavior: An experimental study[J]. *Seismology and Geology*, 2009, 31(2): 276–286.
- [15] 张宁博, 单仁亮, 赵善坤, 等. P 波、S 波扰动下逆冲断层卸载滑移实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 693–701.
- ZHANG Ningbo, SHAN Renliang, ZHAO Shankun, et al. Experiment study of thrust fault rupture with unloading effect under P-wave and S-wave disturbance[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(4): 693–701.
- [16] SCHOLZ C H. *The mechanics of earthquakes and faulting*[M]. Cambridgeshire, UK: Cambridge University Press, 2018.
- [17] HUBBERT M K. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting, 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1959, 70: 115–166.
- [18] 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.
- [19] 王思维, 李建春. 节理接触面积比对压缩波传播影响的动光弹实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 939–947.
- WANG Siwei, LI Jianchun. Dynamic photoelastic experimental study on the influence of joint contact area ratio on stress wave propagation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(5): 939–947.
- [20] GABUCHIAN V, ROSAKIS A J, BHAT H S, et al. Experimental evidence that thrust earthquake ruptures might open faults[J]. *Nature*, 2017, 545(7654): 336–339.
- [21] LU Caiping, LIU Bin, LIU Biao, et al. Anatomy of mining-induced fault slip and a triggered rockburst[J]. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 2019, 78(7): 5147–5160.
- [22] HILL D P. Dynamic Stresses, Coulomb failure, and remote triggering-corrected[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012, 102(6): 2313–2336.

(责任编辑 郭东琼)