



袁健博,万晓,刘志刚,等.深部工作面上盘开采的断层煤柱应力演化特征分析[J].矿业安全与环保,2024,51(6):106-111.

YUAN Jianbo, WAN Xiao, LIU Zhigang, et al. Analysis of stress evolution characteristic of fault coal pillar in upper mining of deep working face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(6): 106-111.

扫码阅读下载

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230702

## 深部工作面上盘开采的断层煤柱应力演化特征分析

袁健博<sup>1</sup>, 万晓<sup>2</sup>, 刘志刚<sup>1,3</sup>, 贾海宾<sup>2</sup>, 尚文政<sup>1</sup>, 杨田田<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 采矿工程研究院, 山东 泰安 271019; 2. 山东新巨龙能源有限责任公司, 山东 菏泽 274900; 3. 山东科技大学 省部共建矿山岩层智能控制与绿色开采国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

**摘要:**为了研究断层煤柱应力演化特征,确定断层应力阻隔影响范围,采用理论分析、数值模拟和现场监测的方法,分别研究了断层煤柱应力、断层煤柱应力的演化特征和微震演化特征。研究结果表明,2304工作面受超前支承应力影响的塑性区范围为40.68m;断层构造应力与工作面超前支承应力叠加,回采2304工作面距FL6断层40m处出现明显应力集中现象;FL6断层存在明显应力阻隔现象,下盘煤层距离FL6断层附近出现6~8m的应力降低区;断层区域实施诱能爆破,在诱能期间FL6断层附近监测到小能量事件,FL6断层内部能量得到充分释放;2304工作面回采期间并未出现大能量事件,断层区域诱能爆破和大直径钻孔卸压措施起到了预卸压作用,保证了2304工作面安全生产。

**关键词:**深部工作面;上盘开采;断层煤柱;应力演化;应力阻隔;微震演化;爆破诱能

**中图分类号:**TD324

**文献标志码:**A

**文章编号:**1008-4495(2024)06-0106-06

### Analysis of stress evolution characteristic of fault coal pillar in upper mining of deep working face

YUAN Jianbo<sup>1</sup>, WAN Xiao<sup>2</sup>, LIU Zhigang<sup>1,3</sup>, JIA Haibin<sup>2</sup>, SHANG Wenzheng<sup>1</sup>, YANG Tiantian<sup>2</sup>

(1. Institute of Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China; 2. Shandong Energy Group Xinjulong Co., Ltd., Heze 274900, China; 3. State Key Laboratory Breeding Base of Strata Intelligent Control and Green Mining Co-Founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** To study the stress evolution characteristic of fault coal pillar and determine the influence range of fault stress resistance, the stress of fault coal pillar, the stress evolution characteristics of fault coal pillar and the microseismic evolution characteristics were studied by theoretical analysis, numerical simulation and field monitoring. The results show that the range of plastic zone affected by advance abutment stress in the 2304 working face is 40.68 m. The fault tectonic stress is superimposed with the advance support stress of the working face, and an obvious stress concentration occurs at 40 m from the FL6 fault in 2304 working face. There is an obvious stress resistance phenomenon in the FL6 fault, and a stress-relaxed area of 6 m to 8 m near the FL6 fault in footwall coal seam. Induced energy blasting was carried out in the fault area, and small energy events were monitored near the FL6 fault during the induced energy period. The energy inside the FL6 fault was fully released. There was no large energy event during the mining of 2304 working face, and the induced energy blasting in fault areas and the pressure relief measures of large diameter drilling played a pre-pressure relief effect, which ensured the safe production of 2304 working face.

**Keywords:** deep working face; upper mining; fault coal pillar; stress evolution; stress resistance; microseismic evolution; blasting induced energy

收稿日期:2023-08-15;2023-10-09 修订

**作者简介:**袁健博(1999—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为煤矿动力灾害防治。E-mail: yuanjianbo3006@163.com。

**通信作者:**刘志刚(1985—),男,山东淄博人,博士,副教授,主要研究方向为煤矿动力灾害防治。E-mail: 15865721818@163.com。

随着煤矿井下开采深度的增加、开采强度的增大,井下地质环境越来越复杂<sup>[1-2]</sup>。在煤矿工作面回采过程中会遇到各种复杂的地质构造,特别是在回采末期接近断层<sup>[3-4]</sup>等软弱结构区域,对煤矿安全开

采造成严重威胁。

诸多学者针对断层附近应力分布及卸压措施开展了大量的研究工作。孙延斌等<sup>[5]</sup>研究了断层异形煤柱巷道高应力区的切顶卸压方案,结果表明钻孔切顶卸压效果明显;盛凯华等<sup>[6]</sup>模拟了下盘工作面回采遇大断层倾角时,采场易发生煤柱高静载失稳型冲击;王联合等<sup>[7]</sup>分析了“断层—褶皱”构造区域静载应力影响特征,断层倾角是影响“断层—褶皱”构造应力的重要因素;周洋等<sup>[8]</sup>研究了正断层断裂带宽度与断层带影响范围之间的关系;谭云亮等<sup>[9]</sup>模拟了断层“隔震”的作用,其中断层倾角和断层破碎带厚度影响较大。

针对现场监测出现的断层应力阻隔现象的研究较多,解决断层内积聚能量的研究较少,断层附近的防冲措施有待进一步研究。基于此,笔者以新巨龙煤矿 2304 工作面为例,研究断层煤柱应力演化特征及断层应力阻隔影响范围,提出合理的断层区域诱能处理方案,通过现场微震数据对诱能措施进行效果检验。

## 1 工程背景

### 1.1 矿井概况

山东新巨龙能源有限责任公司新巨龙煤矿位于山东省菏泽市,2304 工作面位于二采区。2304 工作面煤层厚度约 3 m,平均埋深超过 800 m,其中 2304 上平巷埋深为 931.6~951.6 m,2304 下平巷埋深为 899.6~955.6 m。2304 工作面以西为 2303 采空区,2304 上平巷南段与 2303 工作面采空区留设煤柱 5.8~6.0 m,北段与 2303 工作面采空区留设煤柱 4.0 m。2304 上平巷布置导向点 G1 距离 FL6 断层 10 m,2304 下平巷布置导向点 W1 距离 FL6 断层 76 m。2304 工作面及周围采空区分布情况如图 1 所示。



图 1 2304 工作面及周围采空区分布情况  
Fig. 1 Distribution of 2304 working face and surrounding goaf

## 1.2 地质构造

根据二采区三维地震勘探结果及 2304 上、下平巷实际揭露资料,FL6 断层属于正断层,断层倾角 70°,落差 0~15 m。FL6 断层将 2304 工作面区域切割成断层煤柱区。FL6 断层倾斜剖面示意图如图 2 所示。

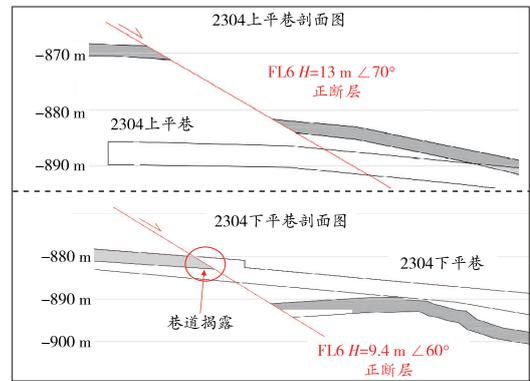


图 2 FL6 断层倾斜剖面示意图  
Fig. 2 The schematic diagram of FL6 fault dip section

## 2 断层煤柱应力计算

断层上盘工作面开采时,可将采场覆岩视为砌体梁承载结构。断层煤柱力学结构示意图如图 3 所示。

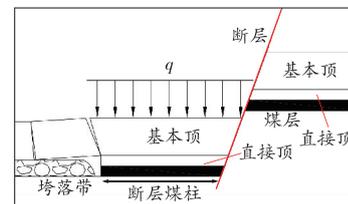


图 3 断层煤柱力学结构示意图  
Fig. 3 Mechanical structure diagram of fault coal pillar

采空区暴露基本顶形成的力学结构位于断层面、断层煤柱和垮落带上方,其承受的荷载由断层面、断层煤柱和垮落带共同承担。

在垂直方向上,断层煤柱受到原岩应力及采空区侧向支承应力作用。若断层煤柱要整体失稳,则煤柱边沿塑性区宽度要大于煤柱最小宽度。2304 工作面受超前支承应力影响,塑性区<sup>[10]</sup>宽度计算公式如下:

$$X_1 = \frac{M(1+\sin\varphi)}{2f(1-\sin\varphi)} \ln \frac{(K\gamma H + \tau_0 \cot\varphi)(1-\sin\varphi)}{\tau_0 \cot\varphi(1+\sin\varphi)} \quad (1)$$

式中: $X_1$  为塑性区宽度, m;  $M$  为煤层厚度, 取 3 m;  $\varphi$  为内摩擦角, 取 21°;  $f$  为煤层与顶底板间的摩擦因数, 取 1.1;  $K$  为最大应力集中系数, 取 1.1;  $\gamma$  为覆岩平均重度, 取 1 500 N/m<sup>3</sup>;  $H$  为煤层埋深, 取 800 m;  $\tau_0$  为黏聚力, 取 19.0 MPa。

通过计算得出,2304 工作面受超前支承应力影响,其塑性区范围为 40.68 m。随着 2304 工作面持续回采,超前支承应力逐步向前转移,断层煤柱区域构造应力与支承应力叠加会造成应力集中。

### 3 断层煤柱应力演化特征数值模拟

为了研究 2304 工作面回采期间 FL6 断层应力阻隔的影响范围,通过 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件分析断层煤柱应力演化特征。

#### 3.1 模型建立

建立尺寸为 750 m×650 m×50 m 的有限元数值模型,根据现场钻孔信息,对模型进行相对简化处理。采用弱化带模拟 FL6 断层,FL6 断层产状按照实际倾角 70°、断层落差 15 m 建立。为了更加准确地研究断层煤柱应力演化特征及 FL6 断层应力阻隔影响范围,模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型<sup>[11]</sup>。模型构建如图 4 所示。

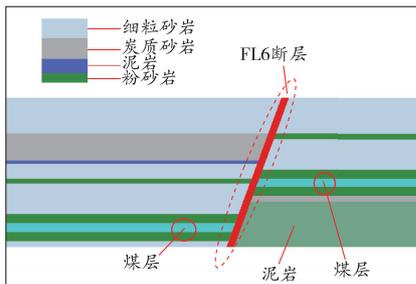


图 4 模型构建  
Fig. 4 Model construction

模拟开挖的工作面宽度 260 m,煤层埋深 800 m。2304 工作面煤层顶、底板力学参数见表 1。

表 1 2304 工作面顶、底板力学参数  
Table 1 Roof and floor mechanical parameters of 2304 working face

岩层类别	体积模量/GPa	切变模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa
泥岩	5.800	8.800	15.000	38.4	2560	0.92
中粒砂岩	12.000	11.000	23.000	25.6	2550	1.11
炭质泥岩	5.800	8.800	15.000	38.4	2580	1.00
细粒砂岩	12.800	10.300	27.000	24.3	2561	1.20
煤层	2.900	3.000	12.000	19.0	1500	0.34
粉砂岩	12.000	10.300	27.000	26.6	2550	0.98
断层	0.001	0.003	0.001	5.0	2000	0.04

#### 3.2 断层煤柱应力演化规律

在工作面回采过程中,2304 工作面和 FL6 断层

间的断层煤柱产生明显的应力集中。2304 工作面回采期间垂直应力分布云图如图 5 所示。

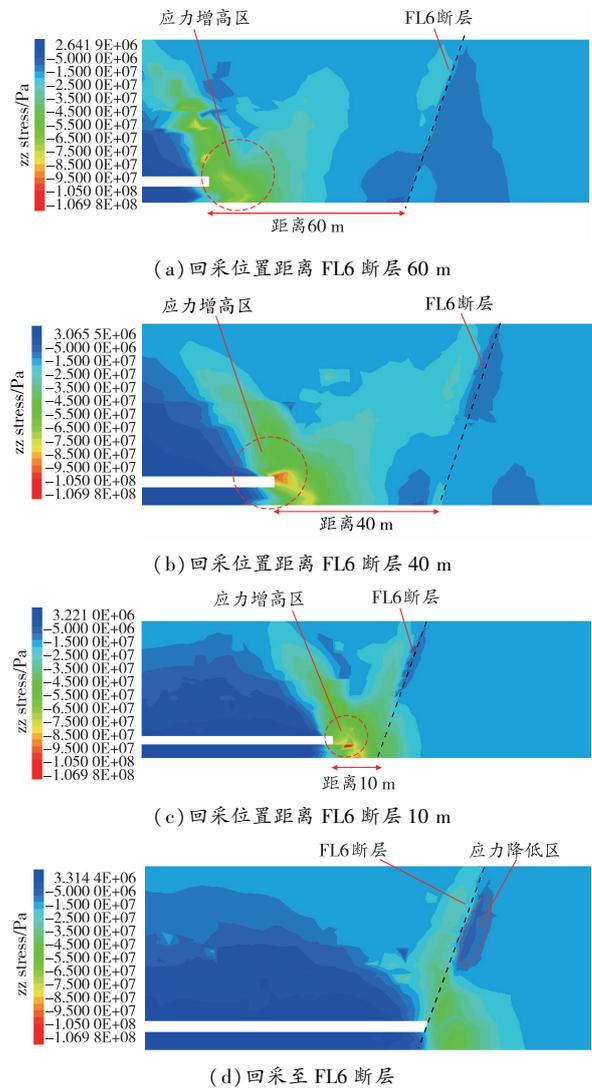


图 5 2304 工作面回采期间垂直应力分布云图  
Fig. 5 The vertical stress distribution cloud map of 2304 working face during mining

由图 5 可知,当 2304 工作面回采至距离 FL6 断层 40 m 时,2304 工作面前方出现较为明显的应力增高区,应力峰值约为 75 MPa;当 2304 工作面回采至距离 FL6 断层 10 m 时,FL6 断层的应力阻隔范围约为 8 m。

综上所述,2304 工作面回采接近断层时,受 FL6 断层地质构造影响,断层煤柱区域出现明显的应力增高区,而在 FL6 断层下盘煤层出现明显应力降低区。受 FL6 断层地质构造影响,FL6 断层存在应力阻隔现象,应力降低区的范围大致在断层附近 6~8 m。

### 4 断层区域微震演化特征分析

断层的存在会改变局部应力场,阻碍工作面采动应力的传播,导致断层上下盘应力分布呈现特殊

性<sup>[12]</sup>。为了进一步分析断层应力阻隔的影响范围,根据现场微震数据分析,研究断层区域微震空间演化特征。

#### 4.1 断层区域微震空间演化规律分析

2304 工作面回采期间微震事件主要发生在工作面前方,并且多以能量小于  $1 \times 10^3$  J 的微震事件为主。2304 工作面回采期间微震事件分布如图 6 所示。

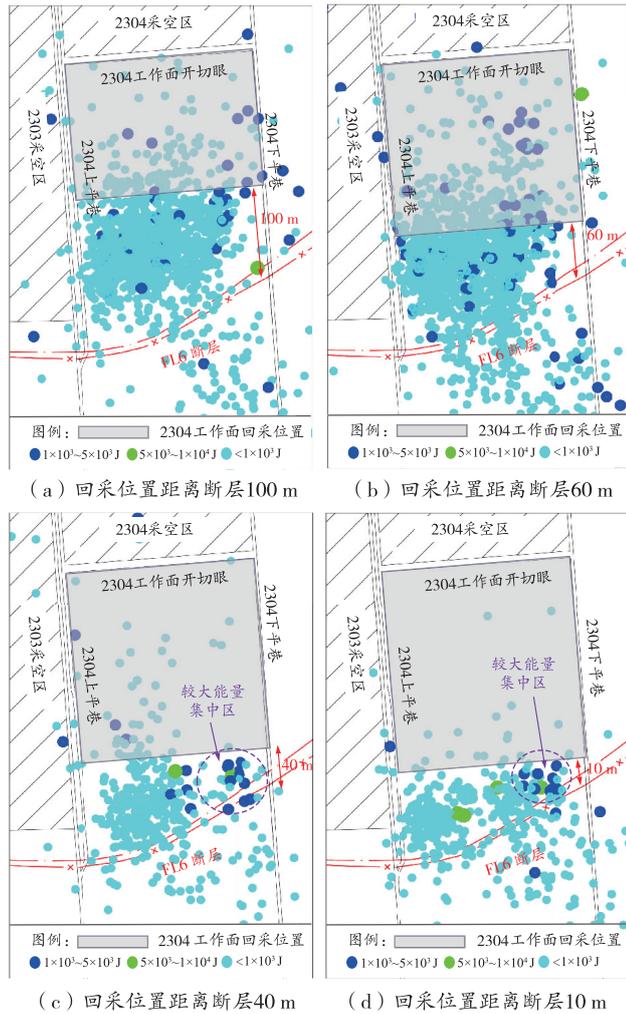


图 6 2304 工作面回采期间微震事件分布图

Fig. 6 Distribution of microseismic events during mining of 2304 working face

由图 6 可知,随着 2304 工作面不断回采,微震事件主要集中分布在 FL6 断层上盘区域,而断层下盘微震事件数量少且分散。由于受 FL6 断层应力阻隔影响,能量小于  $1 \times 10^3$  J 的微震事件集中分布在断层上盘和工作面前方。该微震事件分布与数值模拟结果相比较,受 FL6 断层影响的应力降低区范围大致相符。

#### 4.2 断层区域诱能爆破

由于 2304 工作面向 FL6 断层回采期间,断层区

域存在应力集中情况,且 2304 工作面回采末期距离 FL6 断层越近,冲击地压危险性<sup>[13-14]</sup>越高,容易造成 FL6 断层内部积聚的能量释放。为了降低 FL6 断层黏聚力<sup>[15-16]</sup>的影响,在 2304 工作面距离 FL6 断层 200 m 处采用深孔爆破<sup>[17-18]</sup>措施进行断层预卸压处理,使 FL6 断层内积聚的应力提前释放,以缓解 2304 工作面回采末期应力集中现象。

在 2304 上、下平巷施工断层预卸压爆破孔。在 2304 上平巷、下平巷分别各施工 3 个顶板爆破孔,封孔长度不小于孔深的  $1/3$ ,钻孔直径 75 mm,装药量线密度 3.3 kg/m。FL6 断层区域顶板爆破孔施工示意图如图 7 所示。

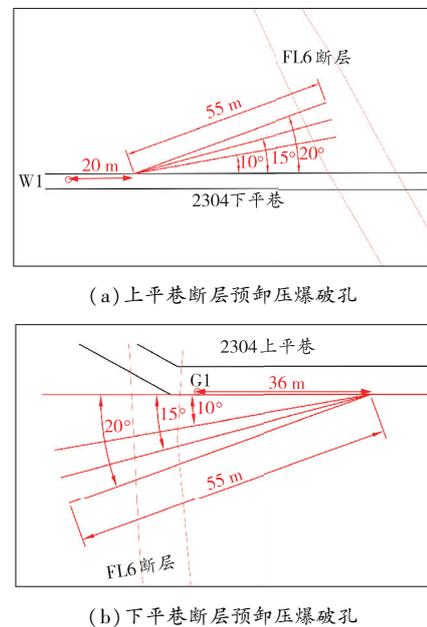


图 7 FL6 断层区域顶板爆破孔施工示意图

Fig. 7 The schematic diagram of roof blasting hole construction in FL6 fault

深孔爆破施工期间微震监测数据见表 2,微震事件分布如图 8 所示。

表 2 深孔爆破施工期间微震监测数据  
Table 2 Microseismic monitoring datas during deep hole blasting construction

序号	日期	时刻	能量/J	位置
1	2022-12-03	19:39:12	7 097.07	2304 下平巷
2	2022-12-03	19:49:58	6 962.68	2304 下平巷
3	2022-12-03	20:49:33	4 089.68	2304 下平巷
4	2022-12-03	20:59:58	8 567.18	2304 上平巷
5	2022-12-03	23:56:11	4 530.12	2304 上平巷
6	2022-12-04	00:32:07	4 473.86	2304 上平巷

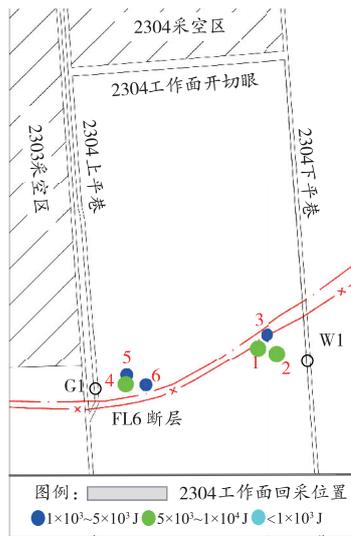


图 8 深孔爆破期间微震事件分布  
Fig. 8 Distribution of microseismic events during deep hole blasting

由表 2 和图 8 可知,从爆破期间监测到的微震事件分析,爆破期间释放了最大不超过  $1 \times 10^4$  J 的能量,说明 FL6 断层内部本身未积聚太多的能量,实施深孔诱能爆破实现了 FL6 断层内部能量的初步释放。

在完成深孔诱能爆破之后,连续对 FL6 断层附近进行微震数据监测,并收集了 3 日内的微震数据,如图 9 所示。

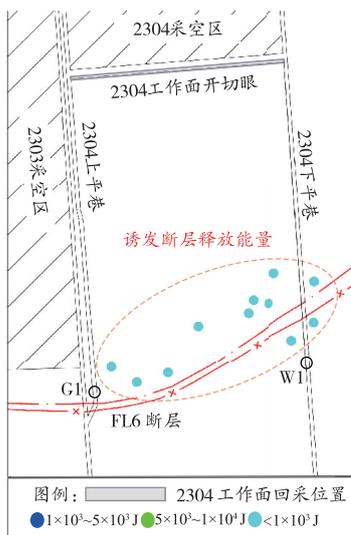


图 9 FL6 断层附近微震事件分布(3 日内)  
Fig. 9 Distribution of microseismic events near FL6 fault (within 3 days)

由图 9 可知,在实施深孔诱能爆破之后的 3 日内,FL6 断层附近诱发能量小于  $1 \times 10^3$  J 的微震事件,说明直至 FL6 断层受到工作面回采扰动之前,诱能爆破措施诱发了 FL6 断层内部残余能量的释放,

导致 2304 工作面回采末期 FL6 断层附近的冲击风险性降低。

### 4.3 大直径卸压钻孔

为了缓解断层附近应力集中现象,在 2304 工作面回采之前,在断层煤柱区域还采取了大直径卸压钻孔<sup>[19]</sup>措施进行卸压,钻孔布置在距离 FL6 断层 150 m 的上盘工作面断层煤柱。在 2304 上平巷南部东侧和 2304 下平巷南部西侧面面向 2304 工作面内施工卸压钻孔,钻孔直径 150 mm,孔口距底板 0.5~1.5 m。钻孔施工方向垂直于巷道轴向且仰角为  $3^\circ \sim 5^\circ$ ,终孔位于煤层中。

在 2304 工作面回采期间,微震事件以能量小于  $1 \times 10^3$  J 的事件居多,未出现能量大于  $1 \times 10^4$  J 的微震事件。综上微震事件能量大小和频次分析,断层区域诱能爆破和大直径钻孔卸压措施防治效果明显,保证了 2304 工作面的安全生产。

## 5 结论

1) 2304 工作面微震事件分布主要受 FL6 断层影响,研究发现 FL6 断层存在较为明显的应力阻隔现象。断层上盘主要集中分布微震事件,断层下盘微震事件分布数量相比上盘较少且较为分散。

2) 综合理论计算、数值模拟结果和微震数据分析表明:2304 工作面受超前支承应力影响,其塑性区范围为 40.68 m;FL6 断层应力降低区的范围在断层附近 6~8 m。

3) 现场通过在断层区域实施诱能爆破,提前释放了 FL6 断层内部积聚的能量,诱能爆破措施进一步释放 FL6 断层残余能量。断层煤柱区域诱能爆破和大直径钻孔卸压措施确保了 2304 工作面回采期间未出现  $1 \times 10^4$  J 大能量事件,实现了工作面安全回采。

### 参考文献 (References):

[1] 曹安业, 姜林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1894-1918.  
CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1894-1918.

[2] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861-1874.  
QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861-1874.

[3] 高琳, 蒋金泉, 张培鹏, 等. 工作面向正断层推进支承应力演化规律[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 44-47.  
GAO Lin, JIANG Jinquan, ZHANG Peipeng, et al. Evolution laws of

- abutment pressure in the period of working face heading to normal fault[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(1): 44-47.
- [4] 牛向东,侯克鹏,孙华芬. 断层穿过上覆围岩巷道破坏力学机理及控制技术研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(4): 60-67.  
NIU Xiangdong, HOU Kepeng, SUN Huafen. Research on failure mechanics mechanism and control technology of fault passing through overlying surrounding rock of roadway [J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(4): 60-67.
- [5] 孙延斌,宋厚武,彭向锋. 沿断层异形区段煤柱密集钻孔卸压护巷技术研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(3): 36-40.  
SUN Yanbin, SONG Houwu, PENG Xiangfeng. Dense drilling pressure relief in irregular district pillar along fault [J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(3): 36-40.
- [6] 盛凯华,王璐,柳研青,等. 不同断层倾角下采场冲击危险性数值模拟研究[J]. *矿业安全与环保*, 2020, 47(4): 45-50.  
SHENG Kaihua, WANG Lu, LIU Yanqing, et al. Numerical simulation of the impact risk in stope under different fault slope[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2020, 47(4): 45-50.
- [7] 王联合,曹安业,郭文豪,等. “断层-褶皱”构造区巷道冲击地压机理及失稳规律[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(1): 69-81.  
WANG Lianhe, CAO Anye, GUO Wenhao, et al. Rock burst mechanism and characteristics of roadway in “fault-fold” structure area[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(1): 69-81.
- [8] 周洋,舒龙勇,刘学,等. 不同形式正断层采动应力及瓦斯赋存规律研究[J]. *煤炭技术*, 2023, 42(6): 179-184.  
ZHOU Yang, SHU Longyong, LIU Xue, et al. Study on mining stress and gas occurrence law of different normal faults [J]. *Coal Technology*, 2023, 42(6): 179-184.
- [9] 谭云亮,谭涛,张修峰,等. 正断层两盘动力灾害显现差异性及其机制[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.
- [10] 鲁岩,樊胜强,邹喜正. 工作面超前支承压力分布规律[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(2): 184-187.  
LU Yan, FAN Shengqiang, ZOU Xizheng. Distributing law of advanced abutment pressure in working face[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2008, 27(2): 184-187.
- [11] 李楠,马丹,张吉雄,等. 断层带破碎岩体采动剪切变形与渗透性演化规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(8): 150-160.  
LI Qiang, MA Dan, ZHANG Jixiong, et al. Mining-induced shear deformation and permeability evolution law of crushed rock mass in fault zone [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(8): 150-160.
- [12] 郭长升,王学滨,薛承宇,等. 正断层上盘开采断层附近应力时空分布数值模拟[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(3): 61-67.  
GUO Changsheng, WANG Xuebin, XUE Chengyu, et al. Numerical simulation of spatiotemporal distributions of stresses in vicinity of normal fault due to mining within hanging wall [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(3): 61-67.
- [13] 代进,蒋金泉. 上下盘开采顺序对断层煤柱采动应力的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(1): 35-41.  
DAI Jin, JIANG Jinquan. Influence of mining sequence of hanging wall and foot wall on mining-induced stress of fault coal pillar[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(1): 35-41.
- [14] 杨洋,郝生雷,秦瑞. 基于不规则煤柱应力场特征的冲击地压防治研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(5): 111-115.  
YANG Yang, HAO Shenglei, QIN Rui. Prevention and control of rock burst based on stress field characteristics of irregular coal pillars[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(5): 111-115.
- [15] 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.
- [16] 殷帅峰,李娅琪,李昊,等. 沿空煤巷过断层破碎带围岩控制技术研究[J]. *矿业安全与环保*, 2022, 49(5): 102-108.  
YIN Shuaifeng, LI Yaqi, LI Hao, et al. Study on surrounding rock control technology of gob-side entry passing through fault fracture zone[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2022, 49(5): 102-108.
- [17] 秦阳,赵凯,崔广甲,等. 基于深孔预裂爆破的坚硬顶板卸压研究[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(5): 31-34.  
QIN Yang, ZHAO Kai, CUI Guangjia, et al. Research on pressure relief of hard roof based on deep hole pre-splitting blasting [J]. *Coal Technology*, 2022, 41(5): 31-34.
- [18] 刘志刚,曹安业,朱广安,等. 不耦合爆破技术在高应力区域卸压效果[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 390-396.  
LIU Zhigang, CAO Anye, ZHU Guang'an, et al. Stress relieving effect of non-coupling blasting technique on high stress area [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 390-396.
- [19] 盖德成,李东,姜福兴,等. 基于不同强度煤体的合理卸压钻孔间距研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 578-585.  
GAI Decheng, LI Dong, JIANG Fuxing, et al. Reasonable pressure-relief borehole spacing in coal of different strength [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 578-585.

(责任编辑:樊淑兰)