

文章编号: 1671-251X(2024)07-0055-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024050077

高应力断层构造区巷道冲击破坏特征研究

王飞¹, 李明利¹, 武轶凡², 蔡东²

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315;

2. 中煤科工集团信息技术有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 断层构造区静动载应力耦合作用加剧了井下断层区围岩冲击危险性, 断层构造区巷道围岩应力分布规律及冲击动载响应特征存在显著特殊性。目前对于断层构造区的冲击研究主要集中于工作面采场附近, 但对于断层构造区巷道冲击破坏鲜有研究。以陕西某矿深埋高应力断层构造区巷道为工程背景, 分析了断层构造区巷道围岩变形破坏力学特征: ① 断层面存在明显应力阻隔效应, 正断层附近存在上盘应力集中区和下盘应力降低区 2 个特殊应力区。巷道由于断层面影响, 巷帮静载集中应力呈现非对称分布特征, 远离断层面侧应力集中程度大于靠近断层面侧, 该侧巷道围岩冲击破坏危险程度增大。② 断层面对于应力波传递产生明显阻隔作用, 正断层上盘动载响应大于下盘动载响应, 由于巷道两帮应力非对称分布特征, 右帮动载响应明显大于左帮。基于上述特征, 提出了断层构造区巷道围岩“卸(大直径钻孔卸压)-支(梯次加固成层式吸能防冲支护)”协同防冲控制技术, 工程试验结果表明: ① 巷道围岩采取“卸-支”协同防冲处理措施后, 巷道两帮应力集中区往围岩深部转移 3~5 m, 应力峰值降低 18.5%~20.3%, 巷道帮部围岩应力集中程度显著降低。② 采用“卸-支”协同防冲处理措施前, 巷道顶底板及两帮变形量分别为 856, 334, 325, 567 mm, 巷道围岩变形破坏严重, 采用“卸-支”协同防冲处理措施后, 巷道围岩变形量降低 35.69%~62.03%, 巷道围岩稳定性增强。③ 钻孔煤粉量显著低于临界粉煤量, 巷道围岩动力显现降低。

关键词: 高应力断层构造区; 冲击地压; 断层面; 巷道围岩; 巷道防冲; 大直径钻孔卸压; 梯次加固成层式吸能防冲支护

中图分类号: TD353

文献标志码: A

Research on the features of impact damage in roadways in high stress fault structure areas

WANG Fei¹, LI Mingli¹, WU Yifan², CAI Dong²

(1. CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu 719315, China; 2. CCTEG Information Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The coupling effect of static and dynamic stress in fault structure areas exacerbates the risk of rock impact in underground fault areas. The stress distribution law and impact dynamic load response features of roadway surrounding rock in fault structure areas have significant peculiarities. At present, research on the impact of fault structures mainly focuses on the vicinity of the working face, but there is little research on the impact damage of roadways in fault structures. Taking the roadway in a deep buried high stress fault structure area of a mine in Shaanxi Province as the engineering background, the mechanical features of deformation and failure of the roadway surrounding rock in the fault structure area are analyzed. ① There is a significant stress barrier effect on the fault plane, and there are two special stress zones near the normal fault, namely the stress concentration

收稿日期: 2024-05-27; 修回日期: 2024-07-26; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52104081); 河北省自然科学基金项目(E2022402031); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2023080)。

作者简介: 王飞(1986—), 男, 内蒙古临河人, 工程师, 现从事煤矿智能化建设和机电管理方面的工作, E-mail: 309195710@qq.com。

引用格式: 王飞, 李明利, 武轶凡, 等. 高应力断层构造区巷道冲击破坏特征研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(7): 55-63.

WANG Fei, LI Mingli, WU Yifan, et al. Research on the features of impact damage in roadways in high stress fault structure areas[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(7): 55-63.



扫码移动阅读

zone in the hanging wall and the stress reduction zone in the lower wall. Due to the influence of the fault plane, the static load concentration stress of the roadway side shows an asymmetric distribution feature. The stress concentration on the side far from the fault plane is greater than that on the side near the fault plane, and the risk of impact damage to the surrounding rock of the roadway on this side increases. ② The fault plane has a significant barrier effect on the transmission of stress waves, and the dynamic load response of the hanging wall of the normal fault is greater than that of the lower wall. Due to the asymmetric distribution of stress on the two sides of the roadway, the dynamic load response of the right side is significantly greater than that of the left side. Based on the above features, a collaborative anti impact control technology of "unloading (large diameter drilling pressure relief) - support (stepped reinforcement into layered energy absorption and anti impact support)" is proposed for the surrounding rock of the fault structure area roadway. The engineering test results show the following points. ① After adopting the "unloading support" collaborative anti impact treatment measures for the roadway surrounding rock, the stress concentration areas of the two sides of the roadway are transferred to the deep part of the surrounding rock by 3-5 meters. The stress peak value is reduced by 18.5%-20.3%, and the stress concentration degree of the roadway surrounding rock is significantly reduced. ② Before the implementation of the "unloading support" collaborative anti impact treatment measures, the deformation of the roadway roof, floor, and two sides are 856, 334, 325, and 567 mm, respectively. The deformation and damage of the roadway surrounding rock are severe. After adopting the "unloading support" collaborative treatment measures, the deformation of the roadway surrounding rock decreases by 35.69%-62.03%, and the stability of the roadway surrounding rock is enhanced. ③ The coal powder content in the borehole is also significantly lower than the critical coal powder content, and the dynamic power of the roadway surrounding rock is reduced.

Key words: high stress fault structure area; rock burst; fault plane; roadway surrounding rock; roadway anti-impact; large diameter drilling for pressure relief; ladder reinforcement into layered energy absorption and anti impact support

0 引言

随着我国煤炭资源开采强度增大,煤炭开采深度以年均 8~12 m 的速度增加^[1],煤炭开采逐渐进入深部地层。深部煤炭开采存在“三高一扰动”特征^[2-3],其中断层作为深部煤炭资源开采常见地质构造,易引起高应力与强冲击,导致矿井生产系统变形,矿压显现明显,严重影响矿井安全高效生产。

许多学者围绕断层构造区围岩应力分布特征与冲击破坏机理进行了研究。蔡武等^[4]揭示了断层冲击地压是由断层附近围岩高静载与采动应力主导型或矿震动载主导型断层活活动载叠加诱发所致。魏向志^[5]研究发现断层逆冲滑移产生的高水平应力和巨厚砾岩大面积悬顶产生的高垂直应力为冲击地压孕灾提供了力源条件。郭长升等^[6]研究了采动条件下断层及其附近煤层应力时空分布规律,分析了断层各处力学状态全貌。孟祥军等^[7]揭示了覆岩结构运移演化规律及采动应力传递形成机制,提出了高应力突变致灾宏观判别准则。魏世明等^[8]模拟了逆断层上下盘开采时应力变化及断层活化过程,分析了工作面在断层不同区域冲击危险性。荣海等^[9]计算了井田构造应力,研究了断层构造对冲击地压的

宏观控制作用。王宏伟等^[10]研究了断层覆岩失稳突变效应,探讨了覆岩运移和断层滑移失稳关联耦合力学机制。王志强等^[11]研究了临近断层工作面采动诱冲机制,分析了断层冲击影响因素。吴振华等^[12]分析了地堑构造区域覆岩运动特征与应力演化规律,揭示了地堑区域冲击诱发机理。潘立友等^[13]建立了断层诱发冲击力学模型,分析了断层夹持型不规则工作面冲击地压成因。王爱文等^[14]基于覆岩空间结构失稳与断层活化耦合致灾原理,研究了巨型逆冲断层影响下巨厚坚硬顶板易冲击煤层冲击显现特征。李振雷等^[15]建立了断层闭锁与解锁滑移力学模型,理论推导了断层上行解锁和下行解锁判定公式。王同旭等^[16]分析了断层面应力场与位移场演化规律,探讨了断层活化失稳面积变化趋势及能量分布特征。林远东等^[17]研究了采动影响下断层稳定性问题及系统参量对断层稳定性的影响,提出了控制系统稳定性方法。谭云亮等^[18-19]和谭彦等^[20]研究了断层两盘活动差异性,分析了断层区域冲击地压影响因素及孕灾机制。张翔等^[21]研究了深厚表土综放采场断层煤柱整体失稳型冲击地压机制,提出了分级承载多层卸压防冲技术。综上所述,断层构造区静动载应力耦合作用加剧了井下断层区域围岩冲击

危险性,目前对于断层构造区的冲击研究主要集中于工作面采场附近,但对于断层构造区的巷道冲击破坏鲜有研究。巷道作为煤矿井下主要运输系统,断层构造区的巷道围岩应力分布规律及冲击动载响应特征存在显著特殊性,因此迫切需要开展断层构造区巷道冲击破坏特征研究,提高断层构造区巷道围岩稳定性。

本文以陕西某矿深埋高应力断层构造区巷道为工程背景,通过分析断层构造区巷道围岩应力分布规律、冲击动载应力波传播过程及巷道围岩动力响应特征,揭示高应力断层构造区巷道围岩冲击变形破坏特征,提出相应防冲技术措施,为类似巷道防冲设计提供参考依据。

1 巷道地质概况

401102回风巷位于401盘区4煤中部,平均埋深为720 m,为全煤巷道,4煤平均厚度为27 m,煤层倾角为3°,巷道周围存在DF29正断层,断层落差 H 为18 m,倾角为60~65°,属于典型深埋高应力构造区巷道。巷道断面尺寸为5.5 m×3.75 m,北侧为401102工作面,南侧为401101采空区,巷道直接顶为泥岩,基本顶为厚36 m的中砂岩,顶板破断动载扰动强。位于DF29正断层面上盘附近5~30 m区间的巷道围岩出现顶板下沉和两帮非对称移近现象,严重影响矿井安全高效生产。401102回风巷平面布置如图1所示。

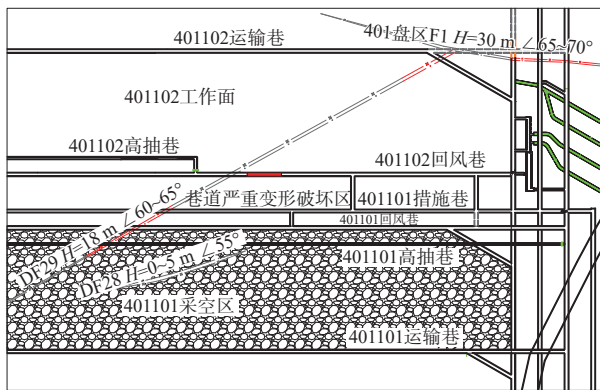


图1 401102回风巷平面布置

Fig. 1 401102 return air roadway layout

2 断层构造区巷道冲击破坏力学分析

根据井下断层构造区巷道空间与地层分布特征,建立断层构造区巷道冲击破坏模型,如图2所示。

由于巷道开挖,采掘扰动破坏地层原岩应力平衡状态,巷道周围出现静载应力集中。厚硬顶板受回采扰动影响,顶板破断释放集聚弹性能,形成冲击震源。顶板动载应力波以震源为中心,向四周进行

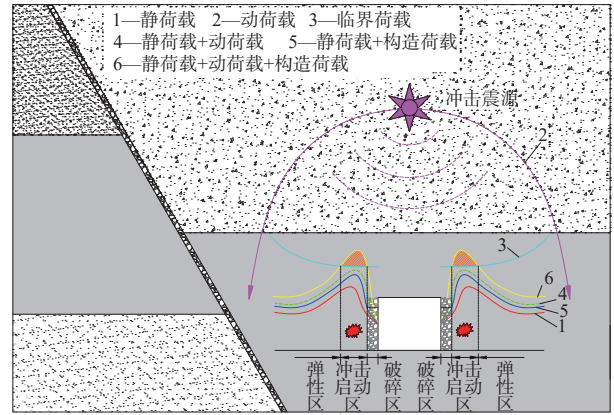


图2 断层构造区巷道冲击破坏模型

Fig. 2 Model of impact damage in roadway in fault structure areas
传递,当顶板动载应力与巷帮周围高静载集中应力叠加大于巷道临界应力时,巷道围岩将发生冲击动力破坏,即

$$\sigma_s + \sigma_d \geq \sigma_{bmin} \quad (1)$$

式中: σ_s 为巷道静荷载应力,MPa; σ_d 为巷道动荷载应力,MPa; σ_{bmin} 为巷道发生冲击破坏临界荷载应力,MPa。

由于岩层阻尼效应,巷道顶板破断冲击动载随传播距离增大,呈幂函数衰减,即

$$\sigma_d = E_0 \prod_{i=1}^n L_i^{-\lambda_i} \quad (2)$$

式中: E_0 为顶板冲击震源强度,MPa; λ_i 为第 i 种介质的衰减系数; n 为介质总数; L_i 为应力波在第 i 种介质中的传播距离,m。

基于最小能量原理可得,巷道发生冲击破坏临界荷载应力为

$$\sigma_{bmin} = E_c \quad (3)$$

式中 E_c 为煤岩体单轴抗压强度,MPa。

在常规地质条件下,巷道围岩发生冲击动力破坏判据为

$$\sigma_s + E_0 \prod_{i=1}^n L_i^{-\lambda_i} \geq E_c \quad (4)$$

深埋巷道周围往往存在断层等地质构造,由于断层影响,断层构造区存在构造荷载应力 σ_g ,巷道开挖之后静载应力与构造荷载应力叠加,导致巷道周围出现高静载应力集中。顶板破断产生冲击动载,巷道周围高静载集中应力与动载应力叠加,叠加后的静动载应力显著高于巷道冲击临界应力,巷道周围形成冲击启动区,冲击启动区集聚高能量瞬时释放,推动巷帮破坏区煤岩体出现动力破坏,因此在断层构造影响下,巷道冲击破坏判据为

$$\sigma_s + \sigma_g + E_0 \prod_{i=1}^n L_i^{-\lambda_i} \geq E_c \quad (5)$$

由式(5)可知,断层构造区的构造应力增大了巷道围岩静载能量集聚,较小冲击能量即可诱发巷道围岩冲击破坏,且断层构造区顶板活动较常规地质段更加活跃,顶板破断及断层滑移易产生不同强度冲击动载,动静载叠加导致断层构造区巷道围岩冲击危险性显著增大。

3 断层构造区巷道冲击破坏特征模拟研究

由断层构造区巷道冲击破坏力学分析可知,断层构造应力增大了巷道围岩冲击危险性,因此研究断层构造区巷道围岩应力分布特征及动静载叠加巷道围岩动力响应特征,可为巷道防冲设计提供依据。

3.1 数值模型

由于断层上盘区域巷道冲击破坏严重,所以根据 401102 回风巷地质条件和煤岩力学参数,采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件,建立 110 m×75 m×50 m(长×宽×高)三维数值模型,回风巷布置于上盘区域煤层中部,如图 3 所示。模型采用莫尔库仑准则,水平和垂直方向分别施加 24.3、15.2 MPa 荷载,模型四周边界固定。

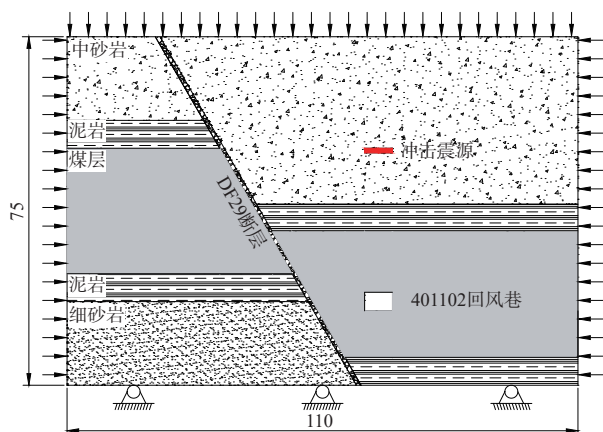


图 3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical calculation model

模型采用静力模块和动力模块依次加载,根据现场微震监测数据及震源定位,在距巷道顶板 30 m 的中砂岩位置设置冲击震源。动载施加采用余弦波,频率为 50 Hz,冲击动载作用时间为 0.06 s,震源强度分别为 10、30、60、100 MPa,动载参数见表 1,动力计算时间为 0.3 s。模拟研究断层构造区巷道围岩静载应力分布特征及不同冲击强度作用下巷道围岩动力响应特征。

3.2 巷道围岩静载应力分布特征

在断层构造区及巷道位置布置水平测线,监测断层构造区及巷道围岩垂直应力分布特征,如图 4—图 7 所示。

由图 4 和图 6 可看出,以断层面为界线,正断层

表 1 动载参数

Table 1 Dynamic load parameters

序号	施加荷载/MPa	能量/J	波速/(m·s ⁻¹)	最大峰值速度/(m·s ⁻¹)
1	10	10 ³ ~10 ⁴	4 850	0.88
2	30	10 ⁴ ~10 ⁵	4 850	2.63
3	60	10 ⁵ ~10 ⁶	4 850	5.26
4	100	10 ⁶ ~10 ⁷	4 850	8.77

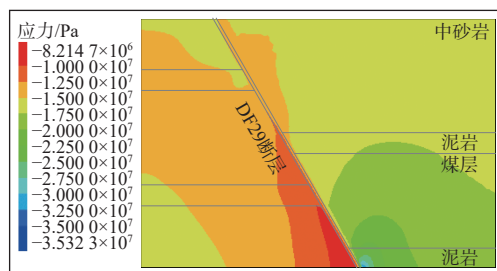


图 4 断层构造区垂直应力分布云图

Fig. 4 Vertical stress distribution cloud map in fault structure areas

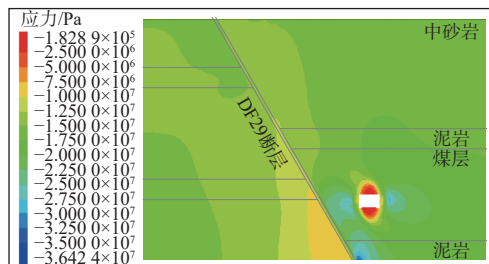


图 5 巷道开挖垂直应力分布云图

Fig. 5 Vertical stress distribution cloud map during roadway excavation

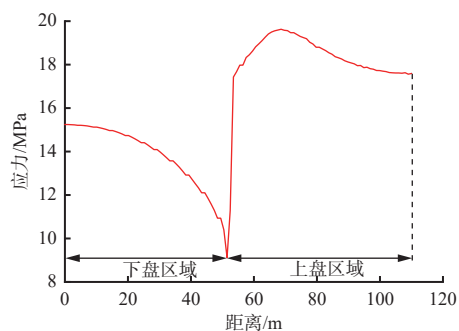


图 6 断层构造区垂直应力分布曲线

Fig. 6 Vertical stress distribution curve of fault structure areas

上盘作为滑动主动盘,受到重力作用及断层面之间的相互作用,正断层上盘应力较下盘应力高,上盘应力达 19.62 MPa,下盘应力达 15.24 MPa,上盘应力较下盘应力高 4.38 MPa,正断层上盘存在应力增高区,未受采动影响的上盘煤体具有高静载应力特征,且应力影响范围可达 40 m。

由图 5 和图 7 可看出,巷道开挖后,巷道两帮出现静载应力集中,由于断层影响,巷道两帮集中应力呈现非对称分布特征,右帮应力集中区偏向顶板,左

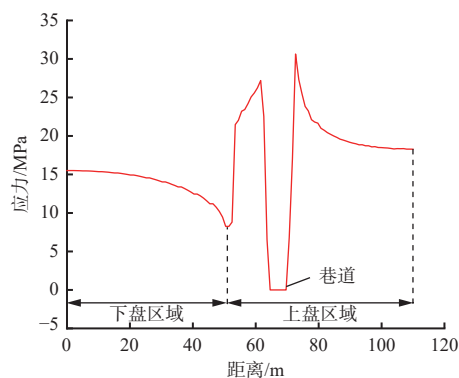


图7 巷道开挖垂直应力分布曲线

Fig. 7 Vertical stress distribution curve during roadway excavation
帮应力集中区偏向底板,左右帮应力值分别为27.19、30.64 MPa,右帮应力较左帮高3.45 MPa。在高应力作用下,巷道右帮更易破坏,这与巷道实际破坏情况相符,即远离断层面的巷道帮部变形量较靠近断层面侧的巷道帮部变形量大,巷道帮部变形呈现非对称特征。

综上所述可知,断层面存在明显应力阻隔效应,正断层附近存在上盘应力集中区和下盘应力降低区2个特殊应力区。巷道由于断层面影响,巷帮静载集中应力呈现非对称分布特征,远离断层面侧应力集中程度大于靠近断层面侧,该侧巷道围岩冲击破坏危险程度增大。

3.3 巷道围岩动载应力分布特征

模拟冲击动载作用下应力波传播规律,监测巷道围岩动载响应特征,如图8、图9所示。其中左帮、右帮和顶板质点振动速度拟合曲线分别为 V_z 、 V_y 、 V_r ,拟合系数为 R^2 , $V_z=0.096\exp(x/118.164)-0.103$, $R^2=0.998$, $V_y=0.426\exp(x/186.115)-0.452$, $R^2=0.994$, $V_r=1.728\exp(x/312.130)-1.780$, $R^2=0.998$ 。

由图8可看出,冲击动载应力波以震源为中心,以球形形式往外传递;0~0.01 s为应力起始振动期,该期间震源破裂释放能量,往围岩四周进行传递,引起围岩开始振动;0.01~0.07 s为应力波动期,震源破裂释放能量,引起巷道围岩开始振动;0.07~0.30 s为应力衰减期,震源残余能量通过围岩质点慢速振动,快速消耗其能量。巷道周围存在DF29正断层,断层面为软弱破碎带,由于介质两侧波阻抗差异,断面对动载应力波传递产生明显阻隔作用,应力波传递主要集中于断层上盘区域,下盘区域应力波传递较少,所以上盘区域受动载扰动明显大于下盘区域。

由图9可看出,随着冲击强度增大,巷道围岩质点振动速度呈指数型增大,顶板质点振动速度显著大于帮部质点振动速度,这主要是由于冲击震源位于顶板,应力波传递到巷道顶板较帮部距离短,所以顶板动载响应更为剧烈。其中右帮质点振动速度显

著大于左帮,这主要是由于受断层构造影响,巷道两帮应力呈现非对称分布特征,右帮应力集中程度较左帮大,所以在冲击动载作用下,右帮动载响应更为强烈,巷道右帮冲击危险性显著大于左帮。

综上所述,断层面对于应力波传递产生明显阻隔作用,正断层上盘动载响应大于下盘动载响应。由于巷道两帮应力非对称分布特征,右帮动载响应明显大于左帮。

4 断层构造区巷道围岩稳定性控制技术

根据断层构造区巷道冲击破坏机理及数值模拟研究,提出断层构造区巷道围岩“卸-支”协同防冲控制技术。

4.1 大直径钻孔卸压技术

由于断层构造应力影响,巷道两侧应力呈非对称分布特征,为巷道围岩冲击提供了先决条件,所以可在巷道两帮布置大直径钻孔,其卸压原理如图10所示。通过强排煤粉在巷道帮部构建松散层断裂带,转移巷道围岩高静载于围岩深部,降低巷道帮部静载能量集聚。由于远离断层面侧巷帮应力集中程度大,所以在远离断层面可设计直径为113~153 mm、长度为15~20 m、间距为0.8~1 m的卸压孔;靠近断层面设计直径为113~153 mm、长度为15~20 m、间距为1.5~2 m的卸压孔。两侧卸压孔根据巷道围岩实际应力分布特征呈非对称设计,实现巷道围岩有效卸压。

4.2 巷道围岩补强加固技术

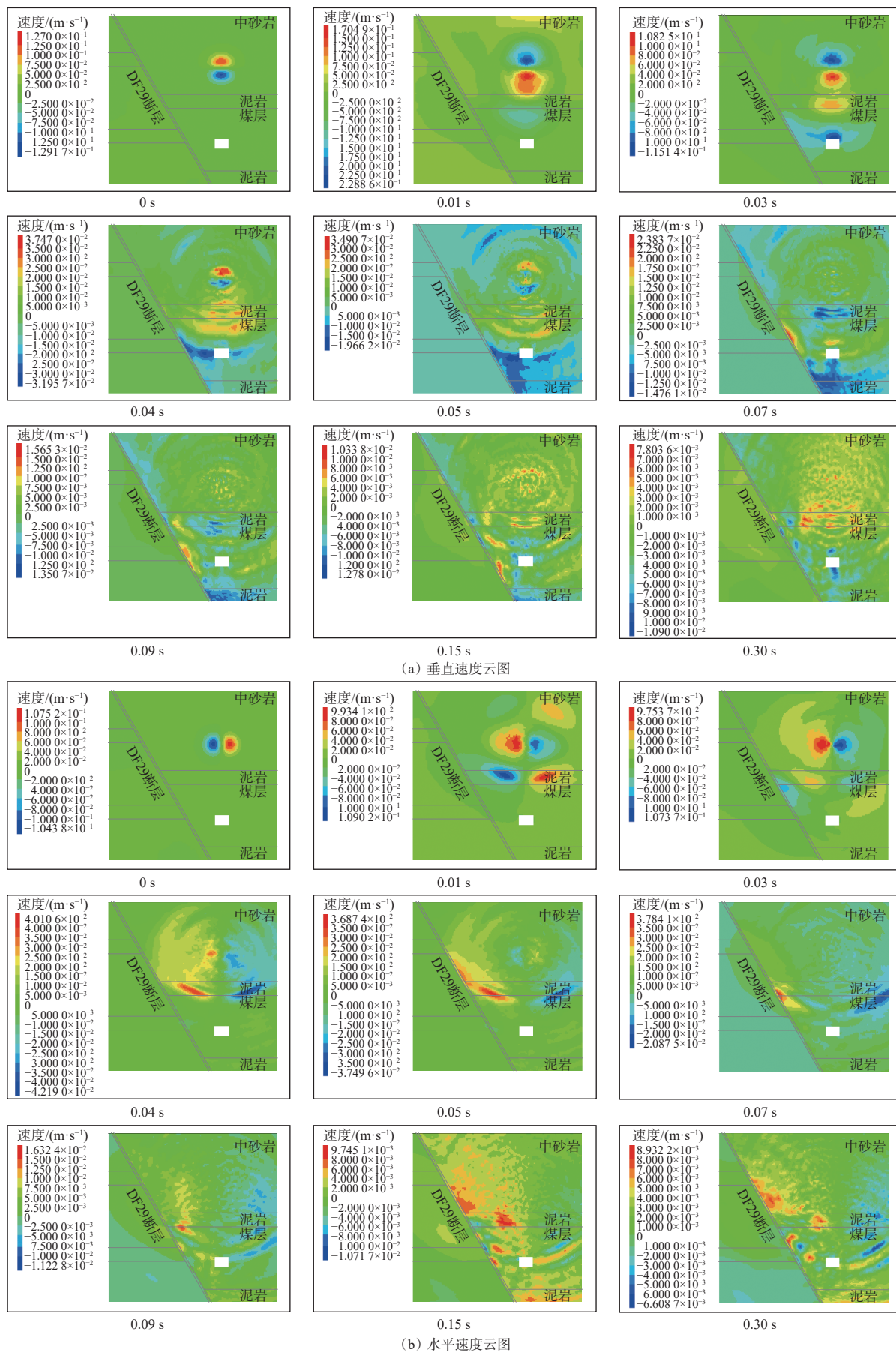
断层构造区受高静载应力和强动载影响,巷道浅表裂隙发育,采用常规锚网支护易出现冒顶及锚杆支护失效等情况,巷道围岩控制难度大。基于此,提出梯次加固成层式吸能防冲支护技术,原理如图11所示。利用长短锚杆索及吸能构件在巷道围岩内部构建一阶补强加固支护层(锚杆)、二阶抗冲强化层(中锚索)与三阶悬吊吸能支护层(长锚索+吸能构件),利用三阶协同支护在巷道围岩内部构建成层式吸能支护壳。通过优化支护参数设计,充分发挥锚网索主动支护防冲性能,提高深部巷道围岩稳定性。

5 工程试验

依据巷道围岩稳定性控制技术对DF29正断层上盘断层面区域50 m进行了围岩钻孔卸压与支护补强加固处理,通过分析围岩变形量、应力分布特征与煤粉监测数据,验证“卸-支”协同防冲技术效果。

5.1 试验方案

1) 大直径钻孔卸压。远离断层面侧位于401102回风巷道煤柱侧,静载应力集中高,在距离巷

图 8 冲击动载作用下的巷道围岩振动速度云图($\sigma_d=30$ MPa)Fig. 8 Cloud map of roadway surrounding rock vibration velocity under impact dynamic load($\sigma_d=30$ MPa)

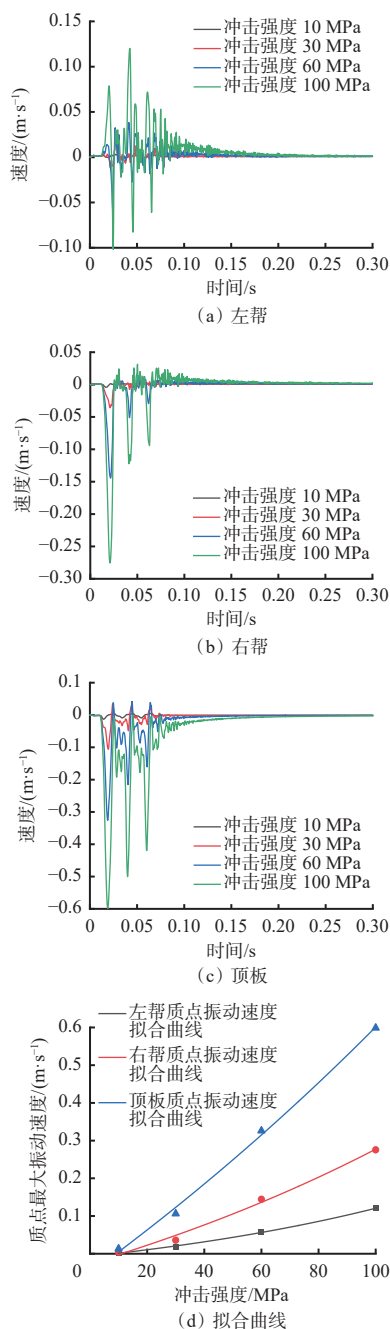


图9 不同冲击强度作用下巷道围岩质点振动速度曲线

Fig. 9 Vibration velocity curves of roadway surrounding rock particles under different impact intensities

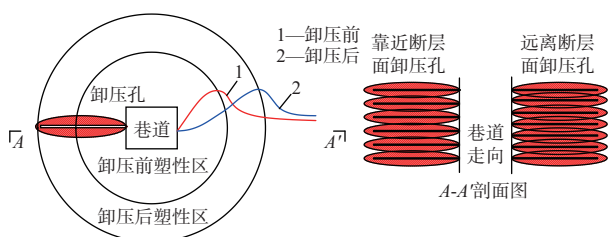


图10 大直径钻孔卸压原理

Fig. 10 Principle of large diameter drilling for pressure relief

道底板1.5 m位置处布置直径为153 mm的大直径钻孔,钻孔间距为1 m、长度为15 m。靠近断层侧面位于401102回风巷道实体煤侧,在距离巷道底板高度

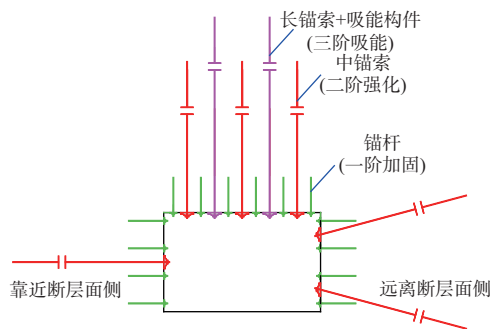


图11 梯次加固成层式吸能防冲支护原理

Fig. 11 Principle of ladder reinforcement into layered energy absorption and anti impact support

1.2 m处布置直径为113 mm的大直径钻孔,钻孔间距为1.5 m、长度为20 m。

2) 围岩补强加固。401102回风巷断面尺寸为5.5 m×3.75 m,原支护方案采用锚网支护,顶板锚杆为 $\phi 22\text{ mm}\times 2\,500\text{ mm}$,间排距为700 mm×700 mm,预紧力为150 kN。锚索为 $\phi 21.8\text{ mm}\times 7\,100\text{ mm}$,间排距为1 200 mm×1 400 mm,预紧力为200 kN。帮部锚杆为 $\phi 22\text{ mm}\times 2\,500\text{ mm}$,间排距为700 mm×700 mm,预紧力为150 kN。考虑到原有支护方案强度低,锚杆和锚索抗冲性能差,顶板采用8.3 m长锚索+让压管进行吸能支护,帮部采用7.1 m中锚索进行补强加固支护,在巷道周围形成梯次加固成层式吸能防冲支护壳。补强支护方案:顶板长锚索为 $\phi 21.8\text{ mm}\times 8\,300\text{ mm}$,间排距为1 500 mm×1 400 mm,预紧力为300 kN,每根长锚索装配让压管;帮部中锚索为 $\phi 21.8\text{ mm}\times 7\,100\text{ mm}$,靠近断层面侧垂直巷帮布设1根,距离底板高度为1 500 mm,排距为1 400 mm;远离断层面侧中锚索间排距为1 500 mm×1 400 mm,中锚索预紧力为250 kN。补强支护整体方案如图12所示。

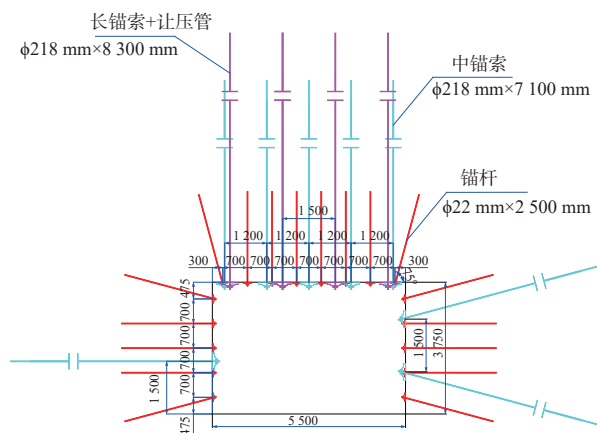


图12 巷道补强支护方案

Fig. 12 Strengthening support scheme for roadway

5.2 试验效果

现场监测巷道围岩“卸-支”协同前后围岩控制效果,如图13—图15所示。

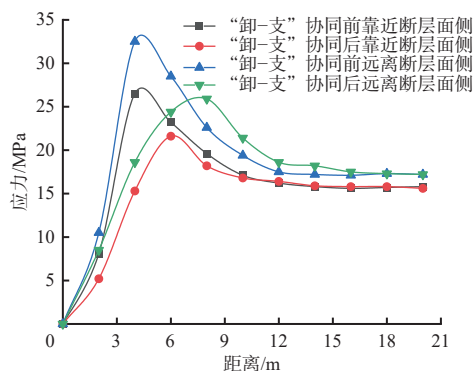


图 13 巷道围岩应力变化特征

Fig. 13 Stress variation curve of roadway surrounding rock

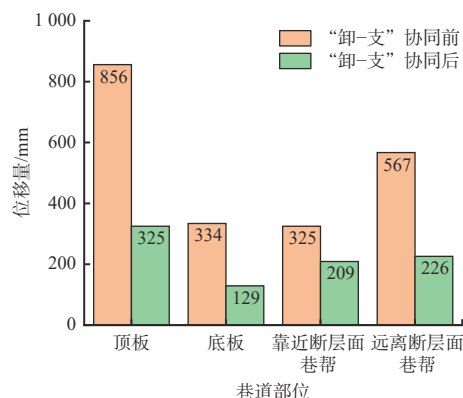


图 14 巷道围岩位移变化量

Fig. 14 Displacement variation of roadway surrounding rock

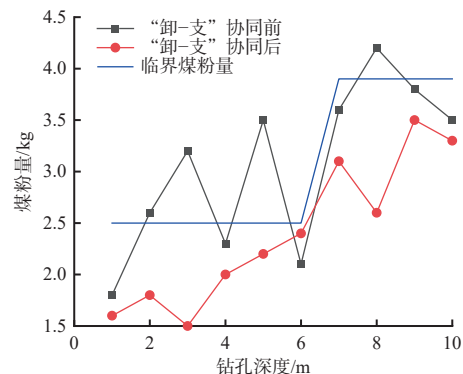


图 15 巷道帮部煤粉量变化曲线

Fig. 15 Variation curves of coal powder quantity in the roadway side

由图 13 可看出,巷道围岩采取“卸-支”协同防冲处理措施后,巷道两帮应力集中区往围岩深部转移 3~5 m,应力峰值降低 18.5%~20.3%,巷道帮部围岩应力集中程度显著降低。由图 14 可看出,采用“卸-支”协同防冲处理措施前,巷道顶底板及两帮变形量分别为 856, 334, 325, 567 mm,巷道围岩变形破坏严重;采用“卸-支”协同防冲处理措施后,巷道围岩变形量降低 35.69%~62.03%,巷道围岩稳定性增强。由图 15 可看出,采用“卸-支”协同防冲处理措施后,钻孔煤粉量显著低于临界煤粉量,巷道围岩动力显现降低。

6 结论

1) 分析了断层构造区巷道围岩变形破坏力学特征,断层构造区构造集中应力增大了巷道围岩静载能量集中程度,叠加较小冲击动载,即可诱发巷道围岩冲击破坏,增强巷道围岩冲击危险性。

2) 断层面具有应力阻隔效应,由于断层面影响,断层面上盘存在应力集中现象,且位于上盘区域的巷道帮部应力呈现非对称分布特征,增强了帮部非对称冲击变形破坏。

3) 断面对动载应力波传递具有阻断效应,位于上盘区域的巷道受冲击动载影响较大,且随着冲击能量增大,巷道围岩动力响应加剧,远离断层面侧巷帮破坏程度较靠近断层面侧巷帮破坏严重。

4) 提出了断层构造区巷道围岩“卸-支”协同防冲控制技术,采用大直径钻孔卸压和梯次加固成层式吸能防冲支护技术,可降低断层构造区巷道冲击危险性,提高巷道围岩稳定性。采用“卸-支”协同措施后,巷道围岩应力峰值降低 18.5%~20.3%,变形量降低 35.69%~62.03%,钻孔煤粉量低于临界值,巷道围岩稳定性增强。

参考文献(References):

- [1] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,2024,49(1):75-99.
HE Manchao, WU Yiyi, GAO Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99.
- [2] 翟成,丛钰洲,陈爱坤,等.中国煤矿瓦斯突出灾害治理的若干思考及展望[J].中国矿业大学学报,2023,52(6):1146-1161.
ZHAI Cheng, CONG Yuzhou, CHEN Aikun, et al. Reflection and prospect on the prevention of gas outburst disasters in China's coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1146-1161.
- [3] 单仁亮,洪道余,全潇,等.九龙矿深部巷道管索组合结构支护技术研究[J].煤炭技术,2023,42(9):8-12.
SHAN Renliang, HONG Daoyu, TONG Xiao, et al. Research on support technology of anchor cable with c-shaped tube in deep roadways of Jiulong Coal Mine[J]. Coal Technology, 2023, 42(9): 8-12.
- [4] 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.
- [5] 魏向志.逆冲断层和巨厚砾岩耦合作用诱冲机制研究[J].煤炭工程,2019,51(9):106-111.
WEI Xiangzhi. Analysis of rock burst mechanism induced by coupling effect of thrust fault and huge thick

- conglomerate[J]. Coal Engineering, 2019, 51(9): 106-111.
- [6] 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.
- [7] 孟祥军, 张广超, 李友, 等. 深厚表土覆岩结构运移演化及高应力突变致灾机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1919-1931.
- MENG Xiangjun, ZHANG Guangchao, LI You, et al. Migration evolution laws of overburden structure with deep-lying thick surface soil and disaster mechanism induced by high stress mutation[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1919-1931.
- [8] 魏世明, 王富莹, 张泽升. 逆断层上下盘开采冲击危险性模拟及实验研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 124-130.
- WEI Shiming, WANG Fuying, ZHANG Zesheng. Modeling and experimental analysis of rockburst risk of mining in hanging wall or footwall of reverse fault[J]. Coal Engineering, 2022, 54(11): 124-130.
- [9] 荣海, 魏世龙, 张宏伟, 等. 井下断层活动的定量监测及其对冲击地压的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 10-22.
- RONG Hai, WEI Shilong, ZHANG Hongwei, et al. Research on quantitative monitoring of underground fault activity and its influence on rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 10-22.
- [10] 王宏伟, 田政, 王晴, 等. 采动诱发断层覆岩耦合失稳的突变效应[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 2961-2975.
- WANG Hongwei, TIAN Zheng, WANG Qing, et al. Investigation on the mutation effect induced by the coupled destabilization of fault and overburden rock strata during coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 2961-2975.
- [11] 王志强, 黄鑫, 苏泽华, 等. 临近断层工作面采动诱冲规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(5): 67-72.
- WANG Zhiqiang, HUANG Xin, SU Zehua, et al. Research on laws of mining-induced rock burst in working face near fault[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(5): 67-72.
- [12] 吴振华, 潘鹏志, 潘俊锋, 等. 地堑构造区冲击地压发生机制及矿震活动规律[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2225-2238.
- WU Zhenhua, PAN Pengzhi, PAN Junfeng, et al. Analysis of mechanism of rock burst and law of mining induced events in graben structural area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2225-2238.
- [13] 潘立友, 李彩荣, 陈理强. 断层夹持型不规则工作面冲击地压成因与防控[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 45-50.
- PAN Liyou, LI Cairong, CHEN Liqiang. Causes and prevention of rock burst from irregular face clamped with fault[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 45-50.
- [14] 王爱文, 潘一山, 李忠华, 等. 断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2486-2492.
- WANG Aiwen, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Similar experimental study of rockburst induced by mining deep coal seam under fault action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2486-2492.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 林远东, 涂敏, 付宝杰, 等. 采动影响下断层稳定性的力学机理及其控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 158-165.
- LIN Yuandong, TU Min, FU Baojie, et al. Study on mechanics mechanism and control of fault stability under mining-induced influence[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 158-165.
- [18] 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.
- [19] 谭云亮, 张修峰, 肖自义, 等. 冲击地压主控因素及孕灾机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 367-379.
- TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367-379.
- [20] 谭彦, 郭伟耀, 王浩, 等. 不同倾角断层滑移失稳机制试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4): 749-758.
- TAN Yan, GUO Weiyao, WANG Hao, et al. Experimental study on sliding instability mechanism of faults with different dip angles[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(4): 749-758.
- [21] 张翔, 朱斯陶, 张修峰, 等. 深厚表土综放采场断层煤柱整体失稳型冲击地压机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 713-727.
- ZHANG Xiang, ZHU Sitao, ZHANG Xiufeng, et al. Research on the mechanism of overall instability type rock burst of fault coal pillars in deep topsoil fully mechanized top coal caving mining area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 713-727.