

文章编号: 1673-3363-(2022)01-0036-09

临地堑开采冲击地压发生机制及主控因素研究

曹安业^{1,2}, 刘耀琪¹, 蒋思齐¹, 胡阳¹, 彭雨杰¹

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 为研究临地堑开采条件下冲击地压的致灾机制,采用数值模拟、理论推导剖析了临地堑开采与正常开采条件下应力、位移和能量场的异同,分析了“顶板-煤体-底板”协同作用下能量释放机制,揭示了临地堑开采冲击地压发生机制,并比较分析了主控因素影响权重差异。研究结果表明:临地堑开采特殊的顶板结构阻碍工作面侧向支承压压力向岩体深部转移,造成断层处应力集中,同时特殊的采场结构导致系统刚度降低,系统整体刚度低造成煤柱区易集聚弹性性能,并且较正常条件回采,能量聚集程度更高,冲击危险性更大。临地堑开采条件下的冲击地压治理应从合理布置工作面和加强监测卸压两方面进行。宜将采高控制在6 m以下,保护煤柱宽度大于50 m,回采期间加强监测,必要时采取深孔爆破等手段进行提前卸压。

关键词 地堑构造; 冲击机制; “三场”分布; 正交试验; 主控因素

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0214

Occurrence mechanism and main control factors of coal burst near graben mining

CAO Anye^{1,2}, LIU Yaoqi¹, JIANG Siqu¹, HU Yang¹, PENG Yujie¹

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract To investigate occurrence mechanism and main control factors of coal burst in mining near graben, similarities and diversities of stress, displacement, and energy field between mining near graben and that under normal mining conditions were investigated through numerical simulation and theoretical derivation; mechanism of energy release under synergistic action of “roof-coal-floor” was analyzed, mechanism of coal burst occurrence during mining near graben was revealed, and weight difference of controlling factors were examined and compared. Results have shown that special roof structure inhibits working face lateral abutment pressure from transferring to deep rock mass during mining near graben, which leads to stress concentration near fault areas; meanwhile, special mining structure causes system stiffness to decrease, giving rise to easier gathering of elastic energy in coal pillars, whose concentration level and burst risk is higher than that under normal conditions. Treatment of coal burst during mining near graben should be carried out from two aspects: rational arrangement of the working face and the

收稿日期: 2021-05-07

责任编辑: 侯世松

基金项目: 国家自然科学基金项目(51734009); 山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY02); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX21_2350)

作者简介: 曹安业(1982—),男,江苏省盐城市人,教授,博士生导师,从事冲击地压机理及防治方面的研究。

通信作者: 刘耀琪

E-mail: lyqumt@foxmail.com

Tel: 15651467098

strengthening of the pressure relief monitoring. Specifically, the mining height shall be controlled below 6 m, and the width of protection coal pillars more than 50 m. During the mining period, monitoring shall be strengthened, and measures such as deep hole blasting shall be taken if necessary.

Key words graben structure; mechanism of coal burst; “three field” distribution; orthogonal experiment; main control factors

我国煤矿地质条件复杂,开采难度大,其中发生在地质构造区的冲击地压占比达70%以上^[1]。地质构造区斑杂的构造形态,开采造成的复杂应力分布与动力响应给冲击地压的预测及防治带来极大挑战^[2]。

针对断层型冲击地压,李振雷等^[3]分析了深部厚煤层断层煤柱型冲击地压机制,发现断层解锁与其应力分布、断层摩擦强度及倾角密切相关。蔡武等^[4]研究发现开采扰动静载引起的侧压系数降低和动载引起的超低摩擦效应是诱发断层活化的重要原因,煤柱高静载与断层活化动载共同导致冲击地压的发生。张宁博等^[5]研究发现开采引起裂隙扩展并与断层带贯通是断层活化的重要原因,并且开采对断层扰动呈现明显分区性。朱广安等^[6]研究发现断层滑移速率呈阶梯式跃增和线性增长是临断层孤岛工作面回采强矿震和冲击显现的重要信息,断层滑移速率可作为评价断层滑移失稳的重

要指标。Brace等^[7]研究发现断层滑动的稳定性与其应力降密切相关,并用断层黏滑机制解释地震的产生。Islam等^[8]发现采动应力导致断层区域产生显著变形,局部区域应力集中明显。

综上所述,前人对断层型冲击地压进行了一定研究,但研究对象仅限于单个断层,未考虑断层间(复合构造)的相互作用。然而调研发现近期发生的重大、较大冲击地压事故(表1),如山东龙堙(2020年2月22日,4人遇难)、河北唐山(2019年8月2日,7人死亡、5人受伤)、吉林龙家堡(2019年6月9日,9人死亡、12人受伤)、山东龙郛(2018年10月20日,21人死亡、4人受伤),复合构造在其中起关键作用,特别山东龙堙煤矿“2·22”冲击地压事故调查报告^[9]指出大区域构造应力叠加开采扰动,诱发地堑区断层滑移是其主要原因,因此复合构造影响下的冲击地压的发生机制及规律研究必须引起重视。

表1 近期部分冲击地压事故统计

Table 1 Statistics of recent several coal burst accidents

事故名称	事故主要原因(部分)	伤亡情况	主要影响因素
山东龙堙矿“2·22”冲击地压事故(2020年2月22日)	FD8断层与工作面形成三角区,FD8与FD6断层形成楔形地堑结构,大区域构造应力调整及工作面开采扰动,诱发楔形地堑区断层滑移导致事故发生。	4人死亡	断层切割、楔形地堑结构、断层滑移
开滦唐山矿“8·2”冲击地压事故(2019年8月2日)	事故区域地质构造复杂,位于井田边界断层附近;处于煤层短轴向斜构造轴部,局部构造应力集中。	7人死亡、5人受伤	断层、褶曲
吉煤龙家堡矿“6·9”冲击地压事故(2019年6月9日)	原始地应力与采动应力叠加,使应力水平进一步上升;放顶煤采动诱发断层活化导致弹性能突然释放。	9人死亡、12人受伤	不规则断层切割
山东龙郛“10·20”冲击地压事故(2018年10月20日)	井田处于“井”字形中间区内,构造特征为断块型,开采区位于八里庄断层与田桥断层控制的地垒,该区域构造应力集中,断裂构造活动频繁。	21人死亡、4人受伤	“井”字型断块构造、地垒、断裂构造频繁
义马千秋煤矿“3·27”冲击地压事故(2014年3月27日)	大煤柱孤岛高应力区,临近F3-7和F3-9断层,采矿扰动、上覆巨厚砾岩层活动的作用下诱发事故发生。	6人死亡、13人受伤	多条断层、巨厚顶板

本文从复合构造角度出发,以工作面临地堑开采为研究背景,将“顶板-煤体-底板”假设为一整体,解释了临地堑开采冲击地压的发生机制,并对其主控因素进行分析,拟为类似条件下冲击地压治理提供一定理论指导。

1 临地堑开采的冲击地压发生机制

1.1 临地堑开采模型的提出

笔者统计了近期发生的部分冲击地压事故原因及主要影响因素(见表1),从中可发现致灾因素复杂,为多种因素共同作用的结果。其中断层型复

合构造起主要作用,如山东龙垵“楔形地堑结构”、山东龙郓“井字型构造、地垒结构”、义马千秋“多断层切割”等。

由于“复合构造”中相互组合、变化的构造类型众多,如地堑、地垒、多断层切割等,限于篇幅,本文仅针对地堑构造下的冲击地压机制进行分析。

临地堑开采可分为两种情况:当工作面推进方向与断层走向一致时,煤柱位于区段巷道和断层之间,煤柱宽度不随开采发生变化;当工作面推进方向垂直或与断层存在夹角时,煤柱宽度随开采而发生变化。两种情况下冲击地压发生机制均具有特殊性,本文选取第一种情况进行分析,其模型示意图见图 1。

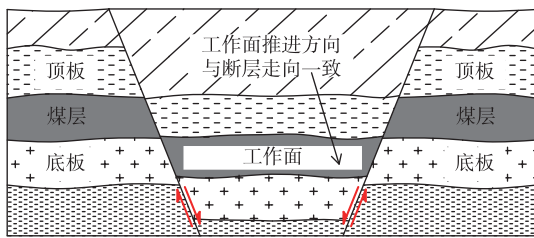


图 1 临地堑开采模型示意

Fig. 1 The diagram of a graben mining model

1.2 临地堑开采冲击地压发生机制

对图 1 中临地堑开采模型进行适当简化,采用 FLAC^{3D} 建立临地堑开采数值模型(见图 2),并同时建立无地堑开采数值模型(工作面两侧无断层)作为对比,研究工作面在有、无地堑结构下采场“三场”(应力场、位移场、能量场)的异同,并基于此对其冲击地压发生机制进行讨论。

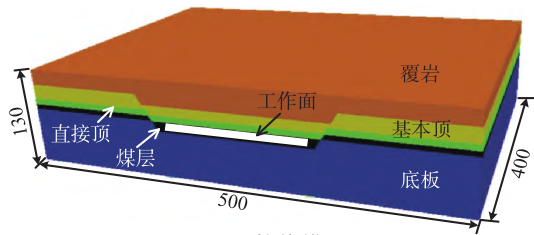


图 2 地堑数值模型 (m)

Fig. 2 The numerical model of graben

1.2.1 数值模型建立

模型长 500 m,宽 400 m,高 130 m,模型底部埋深 600 m,开挖时工作面四周各留 50 m 以消除边界效应,煤层标高方向上全部挖空模拟一次采全高,每次开挖 5 m 运算至平衡。采用 Interface 命令模拟断层,Interface 法向、切向刚度取值参照下式^[10]:

$$k_n = k_s \approx 10 \max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

其中 K 和 G 分别为岩体的体积模量和剪切模量, Δz_{\min} 为 Interface 周围单元体的最小宽度。在模型顶部施加均布载荷模拟上覆岩层载荷和岩石自重,固定底部边界和 4 个侧面垂向位移,本构模型采用应变软化模型,通过软化系数法^[10]模拟岩石峰后强度特性,并考虑模型的尺度效应。由于未进行实验室实测,因此数值模拟中所用力学参数取自文献^[11],如表 2 所示。

表 2 模型力学参数

Table 2 Model mechanical parameters

岩性	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	密度/ (kg·m ⁻³)
覆岩	1.31	0.42	0.30	33	2 500
基本顶	2.30	1.52	1.70	38	2 700
直接顶	1.31	0.42	0.30	33	2 500
煤层	0.15	0.08	0.11	25	1 400
底板	1.97	1.14	0.40	35	2 600
Interface	内聚力=2.0 MPa,摩擦角=30°, $k_n = k_s \approx 2.16 \times 10^{10}$ Pa/m				

1.2.2 临地堑开采应力响应特征

研究表明,工作面“见方”期间矿压显现剧烈,为冲击地压高发时期^[12],因此本文侧重选取工作面“见方”期间的数据进行分析。

有、无地堑结构开采侧向支承压力分布(测线取工作面超前 10 m 处)见图 3、4。从中可知无地堑开采时应力峰值为 20.93 MPa,有地堑开采时应力峰值为 27.70 MPa,相比增加 6.77 MPa(32%),同时有地堑开采时断层附近出现应力二次“跃迁”现象,表明由于断层的存在阻碍了断层煤柱两侧的应力传递,造成断层处产生应力集中。该区域同时处于高应力与高应力差状态下,极易产生高能震动^[3,13],引起断层活化,为冲击地压的高风险区域。

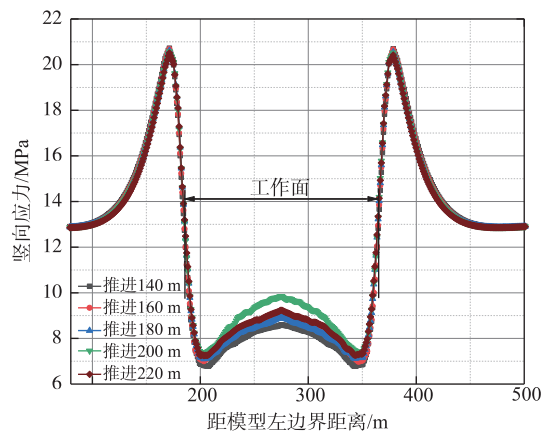


图 3 无地堑开采侧向支承压力分布

Fig. 3 Distribution of abutment pressure in mining away from graben

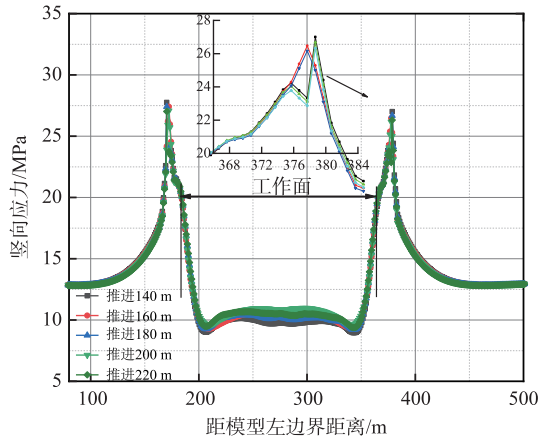


图 4 有地堑开采侧向支承压力分布

Fig. 4 Distribution of abutment pressure in mining near graben

1.2.3 临地堑开采位移响应特征

有、无地堑结构开采的位移场分布见图 5、6(切片取自滞后工作面 30 m)。由图可知,有地堑开采位移量明显高于无地堑开采(无地堑开采最大位移量为 212 mm,有地堑开采最大位移量为 302 mm)。根据图 4 中位移包络线显示,有地堑开采采动影响跨度与高度远大于无地堑开采,另外受两侧断层影响,顶板位移场呈现由断层向工作面中部运移的趋势。

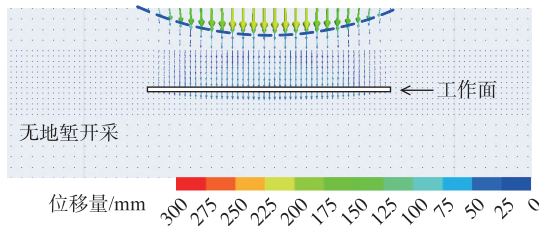


图 5 无地堑开采工作面位移矢量云图

Fig. 5 Displacement vector cloud map in mining away from graben

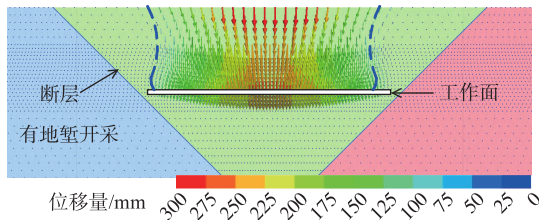


图 6 有地堑开采工作面位移矢量云图

Fig. 6 Displacement vector cloud map in mining near graben

当工作面顶板位移量较大时,意味着由顶板、煤体、底板组成的围岩系统刚度较低^[14]。由冲击地压发生的刚度理论可知,围岩系统的刚度越低,顶板变形过程中越容易积蓄能量,更易引起不稳定冲击破坏。对应到临地堑开采条件下,由于两侧断层

的存在,降低了“顶板-煤体-底板”整体结构的刚度,受到采动影响后顶板位移明显增加,这也导致了工作面两侧煤柱储存了大量的弹性能,更容易引起煤柱内爆型失稳。

1.2.4 临地堑开采能量响应特征

岩体变形释放的弹性能可用下式计算^[15-16]:

$$W_E = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)}{2E} \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为岩体单元的 3 个主应力; μ 和 E 分别为岩体的泊松比和弹性模量。采用 Fish 语言依照式(1)计算了工作面开挖过程中单元体可释放的弹性能,有、无地堑开采的能量分布云图如图 7、8 所示(切片取自工作面超前 30 m)。

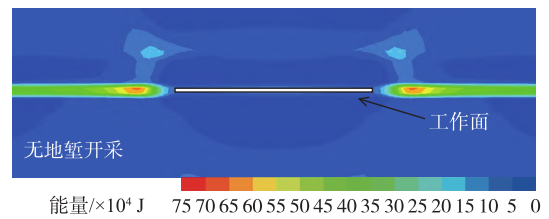


图 7 无地堑开采工作面能量云图

Fig. 7 Energy cloud map in mining away from graben

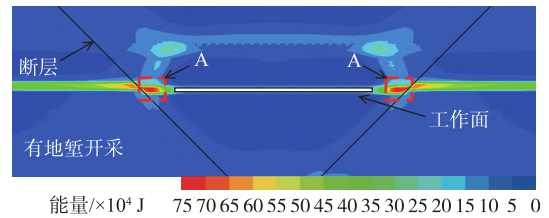


图 8 有地堑开采工作面能量云图

Fig. 8 Energy cloud map in mining near graben

由图可知受侧向支承压力影响,有、无地堑开采煤柱区均产生能量集聚,其中无地堑开采能量峰值为 5×10^5 J,有地堑开采能量峰值为 7.5×10^5 J。有地堑开采时比无地堑开采能量集中区范围更大,能量峰值区更靠近巷道表面,该种情况下受局部高应力、巷道局部支护薄弱、地质弱面等的影响,该区域极易因巷道瞬间失稳释放大量弹性能,诱发冲击地压的发生。

由冲击地压发生的最小能量原理^[15]可知,冲击地压发生需满足的能量条件为 $W_c = E_3 - E_{min} > 0$,其中 W_c 为岩体破坏时的弹性余能, E_3 为岩体三向状态下储存的弹性能,等价于式(2)中的 W_E , E_{min} 为岩体破坏需要的最低能量,计算公式为 $E_{min} = \sigma_c^2/2E$,此处 σ_c 取 20 MPa,弹性模量 E 取 2 GPa,计算得 $W_c = 2 \times 10^5$ J。图 8 地堑模型中煤柱区域(图中

A 区域)能量介于 $6.5 \sim 7.5 \times 10^5 \text{ J}$,明显高于冲击发生的最低能量条件 W_c ,再次说明临地堑开采时煤柱区为冲击地压高风险区域。

1.3 冲击地压发生的力学机制

根据顶底板及煤体的力学行为,可将顶底板假设为线弹性体,煤体假设为具有应变软化行为的非线性材料^[17]。无地堑等构造时,随着工作面推进,煤体承受的支承压力为 σ_s ,其应力-应变关系如图 9 右所示,顶底板变形行为如图 9 左所示。

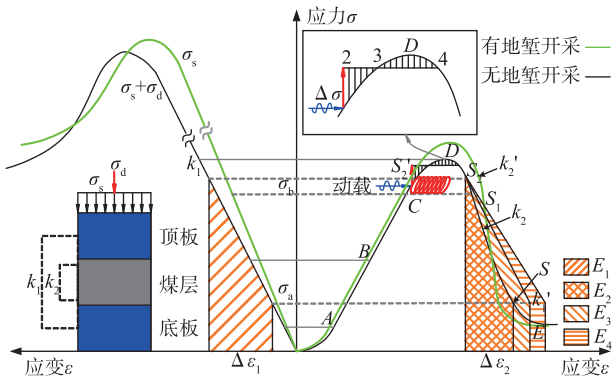


图 9 临地堑开采的冲击地压发生机制示意图

Fig. 9 Schematic diagram of coal burst in the face of graben mining

煤体处于准静态时,其受力后产生应变 $\Delta \varepsilon_2$,顶底板协同变形产生的应变量为 $\Delta \varepsilon_1$,满足关系:

$$k_1 \Delta \varepsilon_1 = k_2 \Delta \varepsilon_2 \quad (3)$$

式中: k_1 为顶底板的加载刚度; k_2 为煤体的卸载刚度。“顶板-煤体-底板”系统的应变可表示为 $\Delta \varepsilon$:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2 = \frac{k_1 + k_2}{k_1} \Delta \varepsilon_2 \Rightarrow \frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta \varepsilon} = \frac{1}{1 + k_2/k_1} \quad (4)$$

从中可发现,当 $k_1 + k_2 = 0$ 时, $\Delta \varepsilon_2/\Delta \varepsilon \rightarrow \infty$,意味着“顶板-煤体-底板”结构处于极不稳定状态,受到动载扰动时,极易诱发冲击地压。随着“顶板-煤体-底板”系统变形增加及能量释放,整体逐渐趋于稳定(对应于点 S),整个过程对应冲击发生的完整过程。该过程整个系统遵循热力学第一定律,即顶底板释放的弹性能(E_1)等于煤体变形消耗的能量(E_2)加上向外释放的弹性能(E_3),从中可发现, E_3 的大小直接决定了冲击地压的剧烈程度,三者的关系可表述为:

$$E_3 = E_1 - E_2 \approx - \frac{k_1 + k_2}{2k_1} (\sigma_b + \sigma_a) \Delta \varepsilon_2 = \frac{k_1 + k_2}{2k_1 k_2} (\sigma_b^2 - \sigma_a^2) \quad (5)$$

式中: σ_b 、 σ_a 分别为冲击发生前后(分别对应图中

点 S_1 和 S) 煤体的应力。其中 $k_1 + k_2 < 0$ 时, $E_3 > 0$,与强度和刚度理论的结论一致^[18]。当“顶板-煤体-底板”受到动载扰动(顶板破断、断层滑移等)时,可认为外部对其施加能量 E_4 ,此时煤体应力状态由点 S_1 上升到点 S_2 ,此时更接近于煤体的峰值强度,失稳时释放能量更多,发生冲击地压时强度也越大。另外,当煤体处于图中 S'_2 时,此时虽然未超过峰值强度,由于煤体的应变软化行为或受到动载扰动时^[18-19],变形随时间增加,进入峰值强度后的变形阶段(到达点 S_1 或 S_2),诱发冲击地压。

由 1.2.2 节可知,由于地堑的存在工作面两侧煤柱应力明显增加,造成“顶板-煤体-底板”系统的应力水平显著增加(如图 9 中绿色曲线所示)。此外,地堑结构的存在造成“顶板-煤体-底板”整体刚度降低(见 1.2.3 节),意味着顶底板的刚度与煤体的卸载刚度显著增加(顶底板刚度由 k_1 上升到点 k'_1 ,煤体的卸载刚度由 k_2 上升到 k'_2)。由式(5)可知,在顶底板加载刚度与煤体卸载刚度同时增加时,“顶板-煤体-底板”失稳时释放的弹性能将大幅增加(1.2.4 节中能量场分布也充分证明了这一点),最终造成冲击的发生,且释放能量更多。

因此,临地堑开采条件下冲击地压的发生为“顶板-煤体-底板”共同作用的结果。地堑构造特殊的顶板结构阻碍了工作面侧向支承压力向岩体深部转移,造成断层处应力集中,同时特殊的采场结构导致系统刚度降低,系统整体刚度低造成煤柱区易集聚弹性能,并且较正常条件回采,能量聚集程度更高,冲击危险性更大。

2 不同开采条件对冲击的影响

2.1 基于动静载力源的冲击失稳判别指标

采动煤岩体的主应力变换形式有 3 类(见图 10):①莫尔圆大小不变,位置发生平移,即 $|\sigma_1 - \sigma_3|$ 不变;②莫尔圆位置不变,大小发生改变,即 σ_1 、 σ_2 变大或变小, $|\sigma_1 - \sigma_3|$ 改变;③摩尔圆大小和位置均发生变化,即 σ_1 和 σ_3 同时变大或缩小, $|\sigma_1 - \sigma_3|$ 改变;根据单结构面的摩尔-库伦强度准则,当莫尔圆与强度曲线发生相交或相切时岩体发生破坏,断层整体失稳,进一步推断出莫尔圆变化过程中与强度曲线的距离越小,岩体稳定性越差,越容易发生冲击。

庞义辉等^[20]考虑三向主应力变换,提出完整岩体的失稳判据 k_{3d} :

$$k_{3d} = \left| \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right| \frac{2c \cot \varphi + \sigma_1 + \sigma_3}{2c \cot \varphi + \sigma'_1 + \sigma'_3} \quad (6)$$

式中： σ_1 、 σ_3 分别为岩体初始最大、最小主应力； σ'_1 、 σ'_3 分别为变换后的岩体最大、最小主应力； c 为岩体内聚力； φ 为岩体内摩擦角。 k_{3d} 值越大意味着图 10 主应力改变后越接近或超过强度极限，围岩受扰动状态越强，冲击危险性越高。

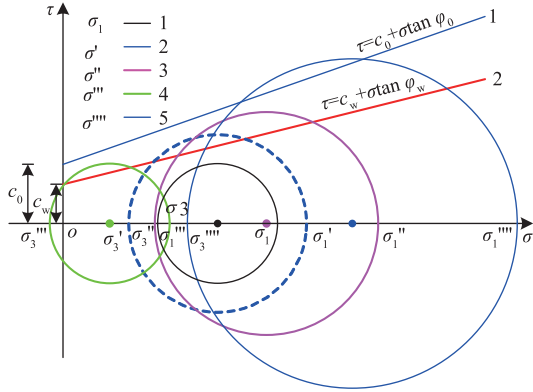


图 10 不同主应力变换形式下破坏类型
Fig. 10 Failure types under different principal stress transformation forms

由图 1 及 1.3 节的分析可知，断层处主应力变换过程中主应力与断层面向同时断层越容易滑移（意味着整体结构刚度越低），考虑上述影响，本文提出修正系数 f_{sin} 作为对 k_{3d} 的修正，进一步将修正后的 K_{cb} 作为临地堑开采的失稳判别指标：

$$K_{cb} = k_{3d} f_{sin} \quad (7)$$

式中 f_{sin} 为围岩某一点最大主应力方向与断层面法向量的正弦值。

同时由 1.3 节可知，临地堑开采条件下断层活化产生的动载为诱发冲击的主要动载力源，断层滑移速度越快，短时内产生动载越大，冲击效应越强，因此采用断层滑移速率（本文使用 Interface 模拟断层，可使用 fish 语言编程直接记录断层面的最大滑移速率）可评价断层活化的程度^[21-22]。根据冲击发生的动静载叠加原理^[23]，考虑冲击发生的静载和动载力源，本文采用改进的采动失稳判别指标 K_{cb} 和断层最大滑移速率 I_v 综合评价其冲击危险性。

2.2 断层落差、倾角对冲击的影响

建立不同落差的数值模型（模型参数同表 3），同样选取工作面“见方”期间的数据进行分析，计算 K_{cb} 和 I_v 的数据均取自开挖过程中围岩各节点的最大值，后文中数值模型仅要讨论的参数不同，其余参数均与图 2 相同。

由图 11 可知 K_{cb} 和 I_v 随落差均先增加后降低，当落差处于 6~8 m 时 K_{cb} 和 I_v 均达到极值，此后随落差增加， K_{cb} 迅速降低并趋于稳定（落差达到 10 m

时），先增加后逐渐趋于稳定（落差达到 6 m 时）。可发现落差处于 4~10 m 时， K_{cb} 处于较高水平，意味着此时工作面周围的静载较高，落差达到 6 m 后 I_v 的变化趋于稳定，意味着由断层落差变化产生的动载有限。

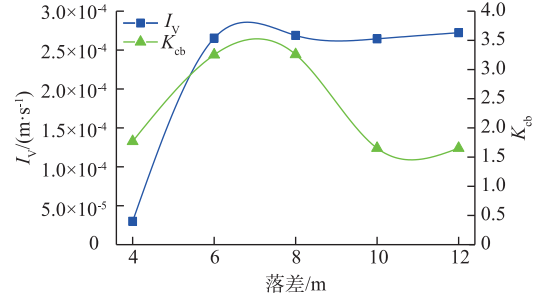


图 11 不同落差下 K_{cb} 及 I_v 的变化
Fig. 11 Changes of K_{cb} and I_v under different drops

由图 12 可知，随倾角增加， I_v 先增加后减小，倾角处于 55° 时 I_v 达到最大值，与平面应变假设下断层最易滑移的角度 $(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ ，此处 φ 取 25° 一致。断层倾角达到 65° 后 K_{cb} 迅速上升，意味着断层倾角增大后，将造成断层煤柱应力集中程度急剧增加。

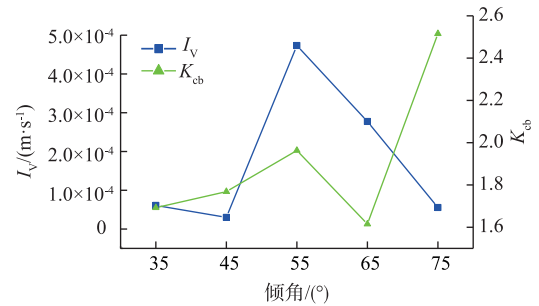


图 12 不同倾角下 K_{cb} 及 I_v 的变化
Fig. 12 Changes of K_{cb} and I_v under different dips

2.3 采高、煤柱宽度对冲击的影响

如图 13 所示，随采高的增加， K_{cb} 和 I_v 均呈现明显上升趋势。

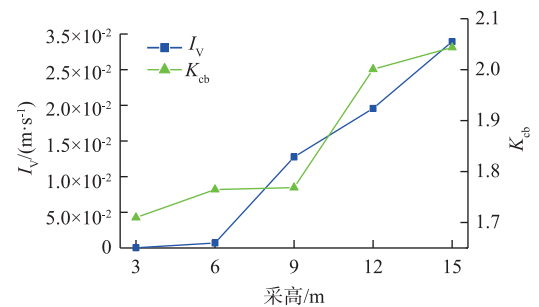


图 13 不同采高下 K_{cb} 及 I_v 的变化
Fig. 13 Changes of K_{cb} and I_v under different mining height

意味着随采高增加,工作面的静载和断层滑移产生的动载都将大幅增加,冲击危险性升高,对安全回采不利。此外,采高分别达到 6 m 和 9 m 时, I_v 与 K_{cb} 变化率出现拐点(拐点后 K_{cb} 和 I_v 均大幅上升),为保证工作面安全回采,应尽量将采高控制在 6 m 以下。

如图 14 所示,随煤柱宽度增加, K_{cb} 和 I_v 均呈先增加后减小的趋势,其中煤柱宽度处于 20~40 m 时 K_{cb} 和 I_v 处于极高水平,意味着此时冲击危险极高。为保证安全回采,临地堑开采时煤柱宽度应尽量大于 50 m。

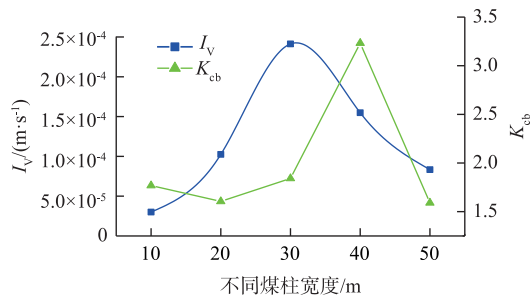


图 14 不同煤柱宽度下 K_{cb} 及 I_v 的变化

Fig. 14 Changes of K_{cb} and I_v under different pillar width

3 临地堑开采冲击危险主控因素分析

3.1 正交试验设计

经前文分析,落差、倾角、采高、煤柱宽度均对临地堑开采冲击的发生起重要影响,为进一步确定上述因素对冲击地压的影响权重,引入正交试验法^[24-25]对落差、倾角、采高与煤柱宽度变化时的冲击危险性进行讨论。

本文考虑的影响因素有 4 个,因此选择 4 因素 3 水平的正交表 $L_9(3^4)$ (见表 3),并且不考虑因素水平间的相互作用,不同因素选取具有代表性的参数作为该水平的取值,最终确定试验方案如表 4 所示,建立类似于图 2 的数值模型,各模型除落差、倾角、采高、煤柱宽度服从正交试验设计,其余参数均保持一致。

表 3 正交试验因素水平表

Table 3 Orthogonal tests factor level table

水平	因素			
	A 落差/m	B 倾角/度	C 采高/m	D 煤柱宽度/m
1	4	45	3	10
2	8	60	6	40
3	12	75	9	70

表 4 正交试验方案设计表

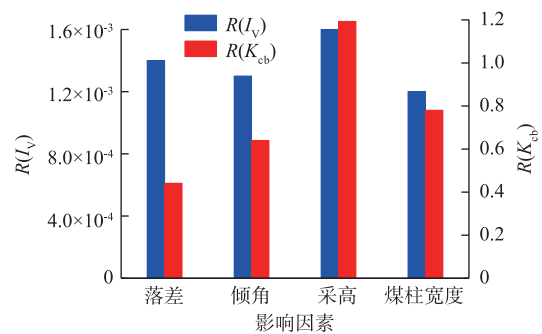
Table 4 Design tables of orthogonal test scheme

试验方案	A 落差/m	B 倾角/度	C 采高/m	D 煤柱宽度/m	K_{cb}	$I_v / (10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	4	45	3	10	1.77	3.00
2	4	60	6	40	2.16	9.40
3	4	75	9	70	2.05	7.70
4	8	45	6	70	2.44	14.60
5	8	60	9	10	1.71	27.70
6	8	75	3	40	1.85	4.10
7	12	45	9	40	2.27	138.00
8	12	60	3	70	1.96	5.20
9	12	75	6	10	2.18	11.90

3.2 冲击危险主控因素排序

9 种模拟方案下的失稳判别指标 K_{cb} 和断层最大滑移速率 I_v 如表 4 所示。

如图 15 所示,通过比较不同水平下 K_{cb} 和 I_v 的极差可发现,各因素对 K_{cb} (静载)的影响程度排序为采高→煤柱宽度→断层倾角→断层落差;对 I_v (动载)影响因素程度排序为采高→断层倾角→断层落差→煤柱宽度。因此,临地堑开采条件下冲击地压的治理首先应控制采高,留设合理保护煤柱,同时回采期间加强地堑两侧断层倾角、落差的提前勘测,辅以微震监测等手段监测断层附近微震活动水平,必要时采取深孔爆破等手段提前破碎断层围岩,降低应力水平。



注:极差 R 为任一列水平号相同时所对应的结果之和,其值越大代表对结果的影响所占权重越高。

图 15 不同影响因素极差值

Fig. 15 The range distribution of different influencing factors

经上述分析可知临地堑开采下,不同致灾因素影响权重差异显著,制定防冲对策时应以工作面优化布置(合理采高和煤柱宽度设计)为出发点,以提高工作面整体稳定性(加强监测和提前卸压)为切入点。

4 工程案例

山东龙垆矿 2305S 工作面位于-810 m 水平二采区中东部,所采 3 煤层及其顶底板具有弱冲击倾向性,工作面采高 3.6 m,放煤高度 5.6 m;工作面西部受 FD6、FD8 断层切割,为典型的地堑构造区,断层最大落差可达 15 m。图 16(a) 为 2305S 工作面“2·22”冲击前微震平面定位,图 16(b) 为 2305S 工作面地堑结构示意图[图 16(a) 中 A-A 剖面]。如图 16(a) 所示,2020 年 2 月 22 日 2305S 工作面临近见方期间发生一起微震能量达 4.2×10^7 J 的冲击事件,造成 2305S 上平巷自端头 10 m 以外 420 m,三联巷 66 m,共 486 m 巷道损毁。事故区域埋深可达 985~1 010 m,原岩应力水平较高;此外该区域受 FD8 与 FD6 断层切割形成楔形地堑结构,工作面推进过程中地堑结构区三角煤柱面积逐渐减小,造成煤体应力进一步升高;其次煤层上方 60 m 范围内存

在厚度 18~40 m 的砂岩复合顶板,易造成采空区大范围悬顶。

受煤岩体自重应力、地堑结构切割形成的不规则煤柱应力与采空区大范围悬顶造成的超前支承压力叠加影响,冲击发生前煤岩体集聚了大量弹性能;此外 2305S 工作面一次采高可达 9.2 m,对周围煤岩体扰动强烈(回采期间产生大量能量 $>10^3$ J 的微震事件可说明这一点),当工作面临近见方时开采强扰动进一步导致采空区悬顶剧烈活动,释放大量动载(如分布于楔形地堑结构区的能量 $>10^5$ J 的微震事件),对煤岩体扰动强烈,最终诱发此次显现。

因此,为有效降低临近地堑开采工作面危险性,应提前规划布置,尽量避免形成不规则煤柱;并降低采高以减小开采扰动;此外可通过深孔爆破对坚硬厚顶板以及地堑构造区断层围岩提前进行爆破,减弱其集聚能量的能力,进一步降低冲击危险性。

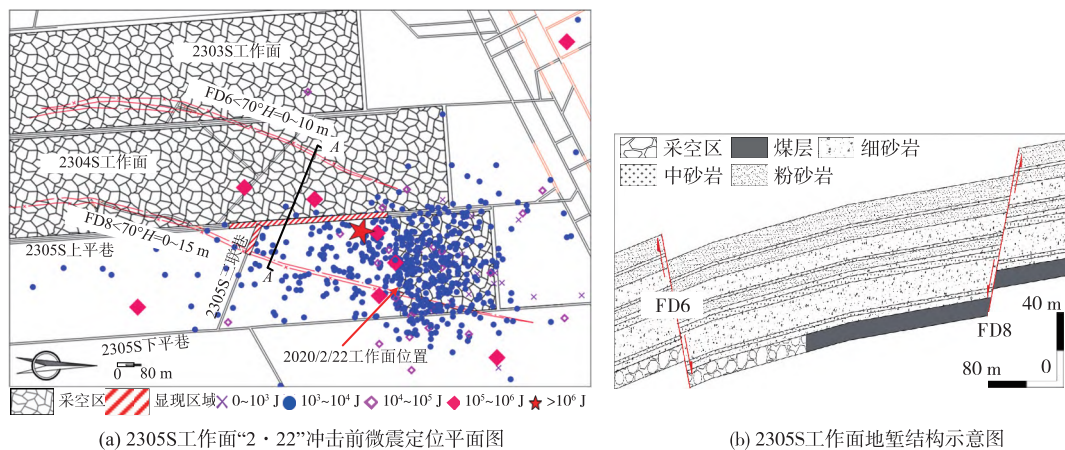


图 16 2305S 工作面“2·22”冲击前微震定位

Fig. 16 Microseismic location of 2305S working face “2·22” before coal bursting

5 结论

1) 对比有、无地堑开采条件下“三场”(应力场、位移场、能量场)分布特征发现,临地堑开采冲击机理更为复杂,为“顶板-煤体-底板”共同作用的结果。

2) 临地堑开采特殊的顶板结构阻碍工作面侧向支承压力向岩体深部转移,造成断层处应力集中,同时特殊的采场结构导致系统刚度降低,系统整体刚度低造成煤柱区易集聚弹性能,并且较正常条件回采,能量聚集程度更高,冲击危险性更大。

3) 临地堑开采条件下的冲击地压治理应从合理布置工作面 and 加强监测卸压两方面进行。采高宜控制在 6 m 以下,保护煤柱宽度尽量大于 50 m,

回采期间加强监测,必要时采取深孔爆破等手段进行提前卸压。

参考文献:

- [1] 王存文,姜福兴,刘金海. 构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊 2): 263-268.
WANG Cunwen, JIANG Fuxing, LIU Jinhai. Analysis on control action of geologic structures on rock burst and typical cases[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Sup 2): 263-268.
- [2] 齐庆新,潘一山,舒龙勇,等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1801-1810.
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, et al. Theory and technical framework of prevention and

- control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43 (7): 1801-1810.
- [3] 李振雷, 窦林名, 蔡武, 等. 深部厚煤层断层煤柱型冲击矿压机制研究[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.
- [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] 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.
- [6] 朱广安, 窦林名, 王红胜, 等. 临断层孤岛面冲击危险与断层滑移数值反演: 以朝阳煤矿 3108 工作面为例[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 533-541.
ZHU Guang'an, DOU Linming, WANG Hongsheng, et al. Back analysis of rock burst risk and fault slip due to mining in the island panel along fault: a case study of island panel 3108 in Chaoyang coal mine. [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 533-541.
- [7] BRACE W F, BYERLEE J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes [J]. *Science*, 1966, 153 (3739): 990-992.
- [8] ISLAM M R, 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 [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 79(4): 115-130.
- [9] 山东新巨龙能源有限责任公司“2.22”冲击地压事故调查报告[EB]. (2020-04-21). <http://www.sdcoal.gov.cn/articles/ch00190/202004/47b8a7d9-f749-4c33-a32b-df6791e258f7.shtml>.
- [10] BOARD M. FLAC (fast lagrangian analysis of continua) version 2.20 [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1989.
- [11] 朱广安, 窦林名, 刘阳, 等. 采动影响下断层滑移失稳的动力学分析及数值模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(1): 27-33.
ZHU Guang'an, DOU Linming, LIU Yang, et al. Dynamic analysis and numerical simulation of fault slip instability induced by coal extraction[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45 (1): 27-33.
- [12] 李东, 姜福兴, 王存文, 等. “见方效应”与“应力击穿效应”联动致灾机理及防治技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(5): 1014-1021.
LI Dong, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. Study on the mechanism and prevention technology of “square position” and “stress breakdown effect” inducing rock-burst [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(5): 1014-1021.
- [13] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49 (5): 1511-1516.
JIANG Fuxing, YANG Shuhua, CHENG Yunhai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49 (5): 1511-1516.
- [14] MANOUCHEHRIAN A, CAI M. Numerical modeling of rockburst near fault zones in deep tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 80: 164-180.
- [15] 赵阳升, 冯增朝, 万志军. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22 (11): 1781-1783.
ZHAO Yangsheng, FENG Zengchao, WAN Zhijun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1781-1783.
- [16] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3003-3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24 (17): 3003-3010.
- [17] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses [J]. *Engineering*, 2021, 7 (5): 687-700.
- [18] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104086.
- [19] 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 1987, 6(3): 197-204.
ZHANG Mengtao. Theory and numerical simulation of rockburst in-stability[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1987, 6(3): 197-204.

(下转第 53 页)

- 孔安全参数研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 122-128.
- LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, ZHU Zhijie, et al. Study on safety parameters of pressure relief borehole in rockburst coal seam[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 122-128.
- [18] 沈才华, 古文博, 李鹤文, 等. 基于损伤扩容理论的圆形隧洞围岩松动圈位移计算方法[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(1): 40-47.
- SHEN Caihua, GU Wenbo, LI Hewen, et al. Calculation method for displacement of loose circle of circular tunnel surrounding rock based on theory of damage and dilation [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(1): 40-47.
- [19] 刘少虹. 动载冲击地压机理分析与防治实践[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.
- [20] 李骏. 特厚复合顶板巷道变形破坏机理及影响因素研究[J]. 煤矿现代化, 2018(5): 53-56.
- LI Jun. Study on deformation failure mechanism and influencing factors of roadway with ultra thick composite roof[J]. Coal Mine Modernization, 2018(5): 53-56.

(上接第 44 页)

- [20] 庞义辉, 王国法, 李冰冰. 深部采场覆岩应力路径效应与失稳过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 682-694.
- PANG Yihui, WANG Guofa, LI Bingbing. Stress path effect and instability process analysis of overlying strata in deep stopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 682-694.
- [21] DUNHAM E M, BHAT H S. Attenuation of radiated ground motion and stresses from three-dimensional supershear ruptures[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2008, 113(B8): B08319.
- [22] BIZZARRI A. Rupture speed and slip velocity: what can we learn from simulated earthquakes? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 317/318: 196-203.
- [23] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
- DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [24] 刘志刚, 曹安业, 井广成. 煤体卸压爆破参数正交试验优化设计研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 931-939.
- LIU Zhigang, CAO Anye, JING Guangcheng. Research on parameters optimization of stress relief blasting in coal roadway using orthogonal experiment [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5): 931-939.
- [25] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.