

文章编号: 1673-3363-(2022)02-0215-12

厚硬顶板覆岩冲击矿震影响的远近场效应研究

高明仕^{1,2,3}, 徐东^{1,2,3}, 贺永亮^{1,2,3}, 张治高^{1,4}, 俞鑫^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学冲击岩爆巷道支护研究中心, 江苏 徐州 221116; 4. 山东新巨龙能源有限责任公司, 山东 菏泽 274918)

摘要 针对厚硬顶板覆岩破断释放冲击能量影响采场安全性等问题, 基于材料力学及冲击动力学, 建立了冲击震源层破断力学模型, 研究了覆岩冲击震源层初次破断和周期破断产生的冲击能量大小以及冲击震动波在传播过程中的能量耗散机理, 分析了厚硬顶板覆岩冲击震源层位能级对下伏采掘空间冲击矿震影响的远近场效应。研究发现: 冲击震源层破裂释放能量与采高、冲击震源层破裂尺度、冲击震源层初次破断步距以及周期破断步距呈正比, 与冲击震源层的层位高度成反比。冲击震动波能量随传播距离增大呈幂指数降低, 且不同岩性对冲击能量的耗散能力不同。动载冲击波的作用时间分为冲击压缩区、动荡反射区及能量衰减区, 下伏采掘空间围岩质点震动速度随冲击震源层位距离增大呈指数型衰减, 随冲击震动能量的增大呈指数型增大, 采掘空间上方厚硬顶板, 均存在一临界冲击能量和临界冲击距离, 近场的小能量不一定发生弱冲击, 远场的大能量也不一定发生强冲击, 冲击灾害程度主要取决于能量与距离的比值。采用能距比 ξ 来近似描述这种影响效应, 通过典型冲击事件统计分析发现: 当能距比 $\xi \in (0 \sim 10^2)$ 无冲击, $\xi \in (10^2 \sim 10^3)$ 弱冲击, $\xi \in (10^3 \sim 10^4)$ 中等冲击, $\xi \in (10^4 \text{ 及以上})$ 强冲击。厚硬顶板覆岩层位对矿井冲击矿震影响具有显著的远近场效应, 分别会带来采面、采区、矿井、矿区不同区域不同程度的冲击地压显现甚至矿震等灾害, 厚硬顶板覆岩层位的存在也为冲击矿震防治提供了靶点部位, 可采取地面-井下高低位立体协同对向压裂破岩释能从源头防冲。

关键词 冲击矿震; 震源层位; 能级; 远近场效应; 立体协同防冲

中图分类号 TD 235

文献标志码 A

DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0117

Investigation on the near-far field effect of rock burst subject to the breakage of thick and hard overburden

GAO Mingshi^{1,2,3}, XU Dong^{1,2,3}, HE Yongliang^{1,2,3}, ZHANG Zhigao^{1,4}, YU Xin^{1,2,3}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resource and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Institute of Rock Burst Roadway Support Research, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 4. Shandong New Dragon Energy Limited Liability Company, Heze, Shandong 274918, China)

Abstract The breakage of thick and hard overburden strata are generally associated with the suddenly release of the impact energy, threatening the safe mining of underground coal seam. The fracture mechanics model of shock source layer was firstly established, on the basis of materials- and impact-me-

收稿日期: 2021-03-10

责任编辑: 侯世松

基金项目: 国家自然科学基金项目(51564044); 华能集团总部科技项目——能源安全技术专项项目(HNKJ20-H87); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX21_2365)

作者简介: 高明仕(1970—), 男, 甘肃省靖远县人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 从事巷道围岩控制、冲击地压灾害防治方面的研究。

通信作者: 徐东

E-mail: cumtxudong@cumt.edu.cn.

Tel: 18717325232

chanics. The value of the impact energy released during the first and periodic fracture of shock source layer and the energy dissipation mechanism of the shock wave within this process were then evaluated, followed by the analysis of the near- and far-field effects of rock burst attributed to the breakage of the thick and hard overburden on the driving and excavation of the underlying strata. It is apparent that the released energy is directly proportional to the mining height, the scale of the shock source layer breakage, the initial- and the periodic breakage of the shock source layer. Whereas, it is inversely proportional to the distance apart from the shock source layer. The energy of the shock wave decreases exponentially with the increase of propagation distance and the dissipation capacity of shock energy is sensitive to the lithology. In addition, the action time of dynamic shock are classified into the shock compression zone, turbulent reflection zone and energy attenuation zone. The particle vibration velocity of surrounding rock in the underlying mining space decreases exponentially with the increase of the distance from the shock source layer, while it increases exponentially with the impact vibration energy. In particular, there is a threshold value of the critical impact energy and the impact distance. That is, the weak rock burst will not be caused by the small energy in the near-field and vice versa. The serious of the impact disaster mainly depends on the ratio between the energy and distance (ξ). Based on the statistical analysis of typical rock burst accidents, it is indicated that: if $\xi \in (0 \sim 10^2)$, there is no rock burst risk. When $\xi \in (10^2 \sim 10^3)$, the weak impact event will be occurred. While $\xi \in (10^3 \sim 10^4)$ and $\xi > 10^4$, the medium and the strong impact event will be potentially occurred. Moreover, the near- and far-field of rock burst is significantly obvious for the coal seam with the thick and hard overburden strata. In this case, the potential rock burst and even the mine shock disasters will be generated in different areas such as the longwall, mining zone and mining area, respectively. Even though, the existence of thick and hard overburden strata provides a target for the prevention and controlling of rock burst. The three-dimensional collaborative fracturing method is strongly recommended to release energy, which is believed to be the initial and effective method in preventing the rock burst.

Key words rock burst; impact source horizon; energy level; near-far field effect; three-dimensional coordinated anti-impact

随着采深的增大,顶板冲击动力灾害成为威胁煤矿安全高效开采的主要因素,赋存于煤层上方的坚硬顶板具有强度高、厚度大、整体性强且不易自然垮落的特点,极易积聚大量弹性能,形成冲击震源层,破断时释放巨大能量产生冲击矿震,诱发回采作业空间煤层冲击动力灾害。华亭煤业陈家沟煤矿、彬长孟村煤矿及山东能源华丰煤矿等均存在厚层坚硬顶板,如图 1 所示。陈家沟煤矿回采 8513 工作面时没有明显的冲击地压显现,但是回采相邻的第 2、第 3 个工作面时,冲击地压显现异常强烈。彬长孟村煤矿回采首采盘区 401101 工作面时冲击动载显现不明显,但是在回采相邻的 401102 工作面时,邻近的中央大巷及本工作面动载显现异常明显。现场监测分析表明,这些矿井冲击动力灾害显现均是由煤层上方厚硬顶板破断释能诱发所致,并且厚硬顶板覆岩下首采工作面回采冲击危险性较小,但是回采相邻的工作面及采区时将会有不同等级的冲击动力灾害发生,由此可见不同层位厚硬顶板覆岩破断对下伏工作面冲击矿震存在远近场效应。

鉴于厚硬顶板破断产生的危害,众多学者对此进行了大量研究。在顶板破断结构特征方面,贺虎等^[1-2]研究了煤矿覆岩空间顶板结构 OX-F-T 演化规律,分析了顶板的破断诱冲机制。王存文等^[3]研究了“S”型覆岩空间结构的岩层组成、运动规律、应力分布特征,探索了基于覆岩空间结构理论的冲击地压预测方法。朱卫兵、于斌等^[4-8]研究了大空间采场上覆远场关键层破断形式及其失稳机理,提出大空间采场覆岩远场关键层“横 O-X”破断的“三角板”结构力学模型。潘俊峰等^[9]建立了深部工作面临空巷道、采场顶板“双 F、大 L”力源结构模型,给出了临空巷道、采场大 L 型力源区域冲击地压启动判据算法。杨俊哲等^[10]研究了厚硬顶板覆岩破断特征,提出了低位关键层“悬臂梁”回转破断促使动静叠加载荷过灾害阈值而引发冲击动力灾害发生。在顶板破断致冲机理方面,杨培举等^[11]采用固支梁及薄板理论研究了距煤层不同距离巨厚岩层破断对回采工作面产生的冲击动载效应。王平等^[12]通过建立高位厚硬顶板断裂力学模型,分析了高位

厚硬顶板断裂与矿震之间的作用关系。曹安业等^[13]建立了坚硬顶板断裂震动等效点源模型,揭示了坚硬顶板断裂的震源机制。魏东等^[14]基于关键层理论,研究了工作面开采过程中相邻采空区震动机理,分析了不同关键层破断震动规律。李一哲等^[15]研究了巨厚砾岩和逆冲断层控制作用下相邻矿井开采诱冲机制,提出井间以阻断高位砂砾互层为核心的弱链增耗防冲方法。王家臣等^[16]建立了老顶动力断裂失稳折迭突变模型,揭示了高强度采动影响下顶板动载冲击效应。李新华等^[17]建立了坚硬直接顶超前工作面破断力学模型,分析了直接顶的破断释能及冲击致灾机理。杨胜利等^[18-19]根据能量守恒和动量定理推导出基本顶结构不同失稳类型条件下冲击用时和冲击作用力的解析表达式,揭示了动载效应产生机理。王恩元等^[20-21]基于地震学位错震源理论,研究了坚硬顶板断裂引发的远场震动效应,建立了适用于分析煤矿特征尺度下坚硬顶板断裂过程的震源模型。牟宗龙等^[22-23]研究了顶板岩层的物理、几何属性及运动状态对煤体冲击危险性的影响,提出了顶板岩层诱发冲击的冲能原理。

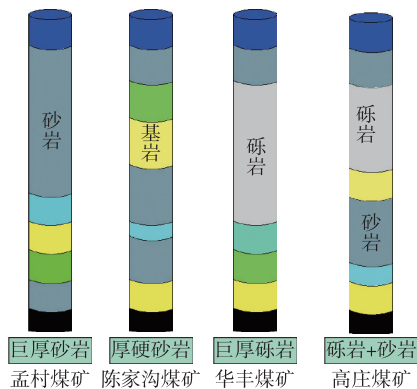


图 1 典型冲击矿井煤岩综合柱状图
Fig. 1 Coal and rock synthesis column map in typical impact mine

综上所述,厚层坚硬顶板为矿井冲击震源层,其蓄能破断是产生冲击矿震的基础性源头问题,不同层位冲击震源层破断将产生不同能级释放能量,对工作面产生不同冲击作用危害。但是目前关于冲击震源层位能级对冲击矿震影响的远近场效应研究还比较少。本文通过研究冲击震源层的破断释能以及冲击震动波的能量耗散机理,分析冲击震源层位能级的远近场效应,针对性的采取井上下立体协同对向压裂卸压技术以及冲击震源层远近场围岩监测预警技术可为矿井冲击地压的防治提供新思路,有效预防冲击矿震灾害的发生。

1 覆岩冲击震源层破断释能耗散机理

工作面顶板覆岩冲击震源层破断释放能量形成冲击震动波,动载冲击波传递到工作面与工作面集中静载应力作用相叠加,诱发工作面煤岩冲击灾害。

冲击震源层初次破断可简化为固支梁力学模型进行受力分析,如图 2 所示。

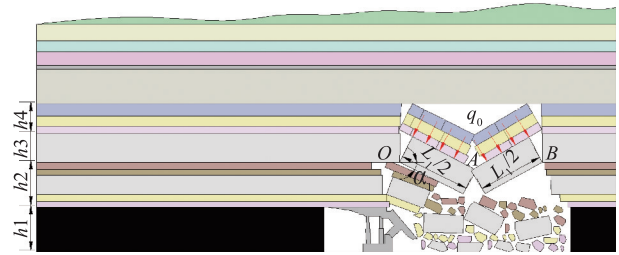


图 2 冲击震源层初次破断力学模型图
Fig. 2 Mechanical model diagram of primary fracture of shock source layer

由材料力学可知固支岩梁两端上任意截面上的弯矩 $M(x)$ 为:

$$M(x) = \frac{q_0}{12} (6L_1x - 6x^2 - L_1^2) \quad (1)$$

式中: L_1 为冲击震源层初次破断步距, m; q_0 为冲击震源层上部的均匀载荷, N/m; μ 为泊松比。

固支梁破断的弯曲应变能为:

$$U_1 = \int_0^{L_1} \frac{M^2(x)}{2EI} dx \quad (2)$$

式中: E 为冲击震源层弹性模量, Pa; I 为冲击震源层的破断截面惯性矩。

由式(2)积分可得冲击震源层的弯曲应变能为:

$$U_1 = \frac{L_1^5 q_0^2}{120Eh_3^3} \quad (3)$$

冲击震源层及其上覆随动岩层破坏所带来的回转动能为:

$$U_2 = \frac{1}{4} \left(\rho_3 h_3 + \sum_{i=1}^m \rho_{4i} h_{4i} \right) g L_1^2 \sin \alpha_1 \quad (4)$$

$$\sin \alpha_1 = 2[h_1 + h_2(1 - K)]/L_1 \quad (5)$$

式中: h_1 为煤层厚度, m; h_2 为煤层与冲击震源层间岩层的厚度, m; h_3 、 h_{4i} 分别为冲击震源层和上覆随动岩层的各层厚度, m; ρ_3 、 ρ_{4i} 分别为冲击震源层及其上覆随动岩层的各层密度, kg/m³; m 为随动岩层的层数; K 为岩石的碎胀系数; α_1 为冲击震源层顶板初次破断的回转角度, (°)。

单位宽度的冲击震源层初次破断释放能量 U_c 为:

$$U_c = \frac{L_1^5 q_0^2}{120Eh_3^3} + \frac{1}{2}gL_1 \left(\rho_3 h_3 + \sum_{i=1}^m \rho_{4i} h_{4i} \right) \cdot [h_1 + h_2(1-K)] \quad (6)$$

冲击震源层周期破断可简化为悬臂梁力学模型进行受力分析,如图 3 所示。

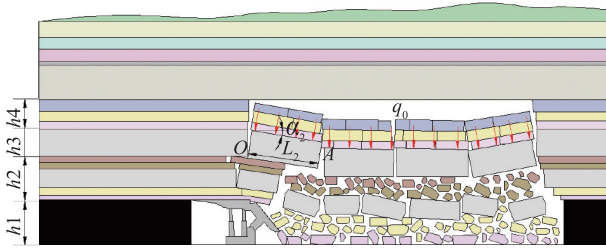


图 3 冲击震源层周期破断力学模型图

Fig. 3 Mechanical model of periodic fracture of shock source layer

由材料力学可知悬臂梁任意截面上的弯矩 $M(x)$ 为:

$$M(x) = -\frac{q_0}{2}(L_2 - x)^2 \quad (7)$$

式中 L_2 为冲击震源层周期破断步距, m。

悬臂梁的弯曲应变能为:

$$U_1 = \frac{3L_2^3 q_0^2}{10Eh_3^3} \quad (8)$$

悬臂梁弯曲破断及其上覆随动岩层破坏所带来的回转动能为:

$$U_2 = \frac{1}{2} \left(\rho_3 h_3 + \sum_{i=1}^m \rho_{4i} h_{4i} \right) g L_2^2 \sin \alpha_2 \quad (9)$$

$$\sin \alpha_2 = [h_1 + h_2(1-K)]/L_2 \quad (10)$$

冲击震源层初次破断传递到工作面的能量为:

$$U_s = \eta \left\{ \frac{L_1^5 q_0^2}{120Eh_3^3} + \frac{1}{2}gL_1 \left(\rho_3 h_3 + \sum_{i=1}^m \rho_{4i} h_{4i} \right) [h_1 + h_2(1-K)] \right\} e_j \sum_{j=1}^n \frac{2\pi f_j}{v_j Q_j} \quad (13)$$

冲击震源层周期破断传递到工作面的能量为:

$$U_s = \eta \left\{ \frac{3L_2^3 q_0^2}{10Eh_3^3} + \frac{1}{2}gL_2 \left(\rho_3 h_3 + \sum_{i=1}^m \rho_{4i} h_{4i} \right) [h_1 + h_2(1-K)] \right\} e_j \sum_{j=1}^n \frac{2\pi f_j}{v_j Q_j} \quad (14)$$

由式(13)(14)可知,随着震源震动波传播距离增大,震源能量耗散增大,且不同岩性对能量的耗散能力不同,软弱岩层一般对震源能量的耗散能力较大,坚硬岩层较小。

2 覆岩震源层位冲击矿震影响的远近场效应模拟

巷道围岩冲击主要为动静载叠加作用,覆岩冲

式中 α_2 为冲击震源层顶板周期破断的回转角, ($^\circ$)。

单位宽度的冲击震源层发生周期性破断时释放能量 U_z 为:

$$U_z = \frac{3L_2^3 q_0^2}{10Eh_3^3} + \frac{1}{2}gL_2 \left(\rho_3 h_3 + \sum_{i=1}^m \rho_{4i} h_{4i} \right) \cdot [h_1 + h_2(1-K)] \quad (11)$$

由式(6)和(11)可知,工作面冲击震源层破断产生冲击震动能量主要是由于顶板的挠曲变形能和回转运动产生的动能构成。冲击震源破裂释放能量与采高 h_1 、冲击震源层破裂尺度 h_3+h_4 以及冲击震源层初次破断步距 L_1 、周期破断步距 L_2 成正比,与冲击震源层的破裂层位高度 h_2 成反比。采高越大,冲击震源层回转空间越大,顶板释放能量越大。冲击震源层的破裂层位 h_2 越高,释放能量越小,这主要是由于冲击震源层位高度增大,采空区下方垮落充填密实,冲击震源层回转运动空间减小,顶板释放能量降低。

由于煤岩体的非均匀性和各向异性介质特征,震动波在不同岩层的传播过程中将发生能量耗散,产生衰减。根据 Gibowicz S J 研究,震动波的衰减呈指数衰减规律,可得震动波能量随传播距离 l_j 的能量衰减规律为:

$$U_s = \eta U e_j \sum_{j=1}^n \frac{2\pi f_j}{v_j Q_j} \quad (12)$$

式中: η 为震动波能量占到总能量的比值; U 为震源层破断释放能量, J; f_j 为第 j 层岩层的震动波频率, Hz; v_j 为第 j 层岩层的震动波传播波速, m/s; Q_j 第 j 层岩层的品质耗散因子; n 为煤层与冲击震源层间岩层数量。

击震源层破断释放的动载往往为诱发因素。因此为研究覆岩震源层位冲击矿震影响的远近场效应,根据孟村矿钻孔综合柱状图,采用 FLAC^{3D} 建立 105 m×100 m×130 m 的三维数值模型,分别模拟不同震源强度 σ_d 以及不同震源距离 H 作用下的回采巷道冲击动载响应特征。① 不同震源距离模拟:冲击震源强度为 60 MPa 时,分别模拟冲击震源距离回采巷道顶部 20、30、40 及 50 m 时的冲击震动效应;

② 不同震源强度模拟：冲击震源距离回采巷道上方 30 m 时，分别模拟冲击震源强度为 60、90、120 以及 150 MPa 时的冲击震动效应。冲击震动波震动频率 50 Hz，动载形式为余弦波，动载作用 3 个周期。

由图 4 可知：冲击震源层破断释放冲击震动波，随着传播距离增大，冲击震动波以球形波形式向四周空间传递能量，不同波阵面处质点产生不同震动

速度，在巷道顶板软弱岩层（泥岩）中质点震动速度小，厚硬致密岩层（砂岩）中质点震动速度大，且能量耗散较小。不同岩层特性引起冲击震动波产生不同能量耗散，且随着传播距离的增大，能量耗散增大。冲击震动波到达巷道围岩表面结构产生反射，波的传播减少，因而巷道围岩结构顶部和帮部受冲击动载作用明显，底部受冲击动载作用不明显。

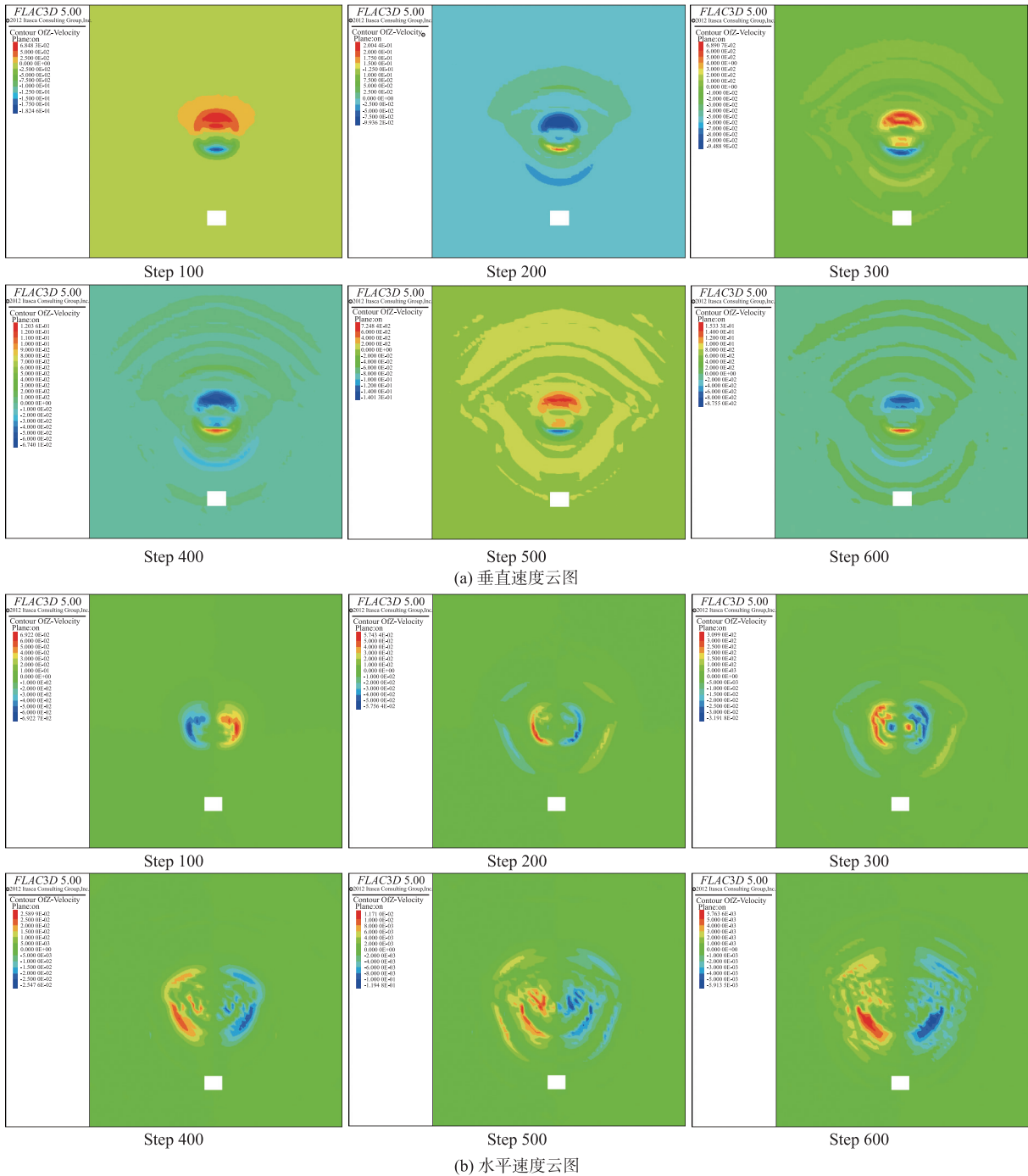


图 4 冲击动载作用下的巷道速度云图 ($\sigma_d = 60 \text{ MPa}$, $H = 20 \text{ m}$)

Fig. 4 Cloud chart of velocity of roadway under dynamic load ($\sigma_d = 60 \text{ MPa}$, $H = 20 \text{ m}$)

由图 5、6 监测质点震动速度发现，动载冲击波的作用时间分为 3 个区，即：冲击压缩区、动荡反射

区及能量衰减区。从冲击震源破裂释放冲击震动波到达巷道表面这一时间段,产生的冲击震动波为压缩震动波,巷道围岩质点产生压缩。压缩波到达巷道表面产生反射,产生拉伸应力波,拉伸应力波往巷道内部传播一定距离与压缩震动波相交,产生

冲击震荡区,该区域质点产生拉伸压缩交替作用。冲击震源破裂释放能量结束,冲击震动波在煤岩体里面能量耗散,产生能量衰减区,巷道围岩质点速度减小趋于零。且冲击震源点距离巷道表面距离越近,冲击压缩区作用时间越短。

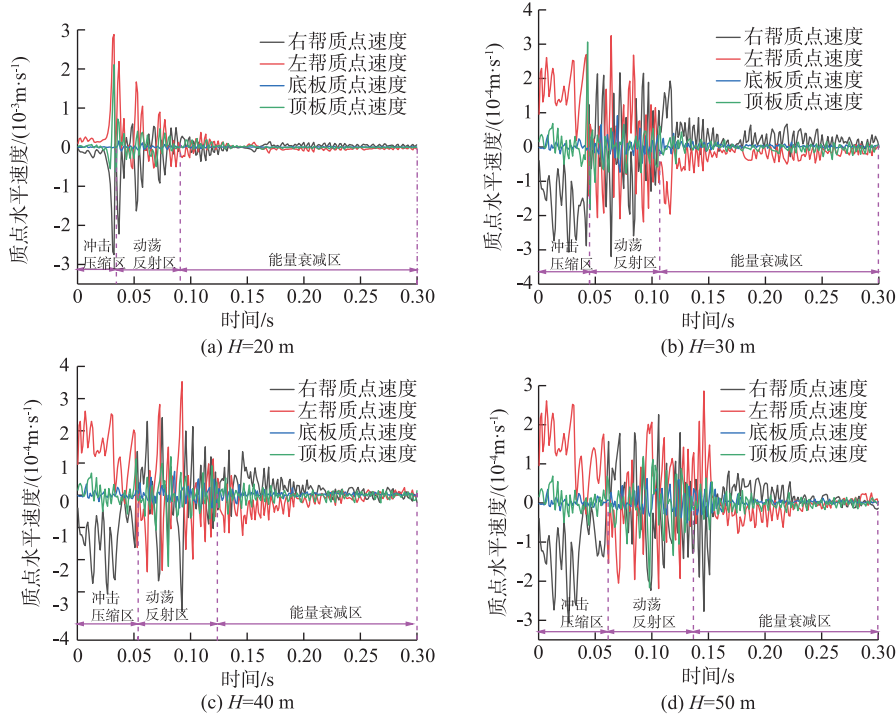


图 5 震源强度相同不同震源距离下巷道质点速度图 ($\sigma_d = 60 \text{ MPa}$)

Fig. 5 Particle velocity map of roadway with same source intensity and different source distance ($\sigma_d = 60 \text{ MPa}$)

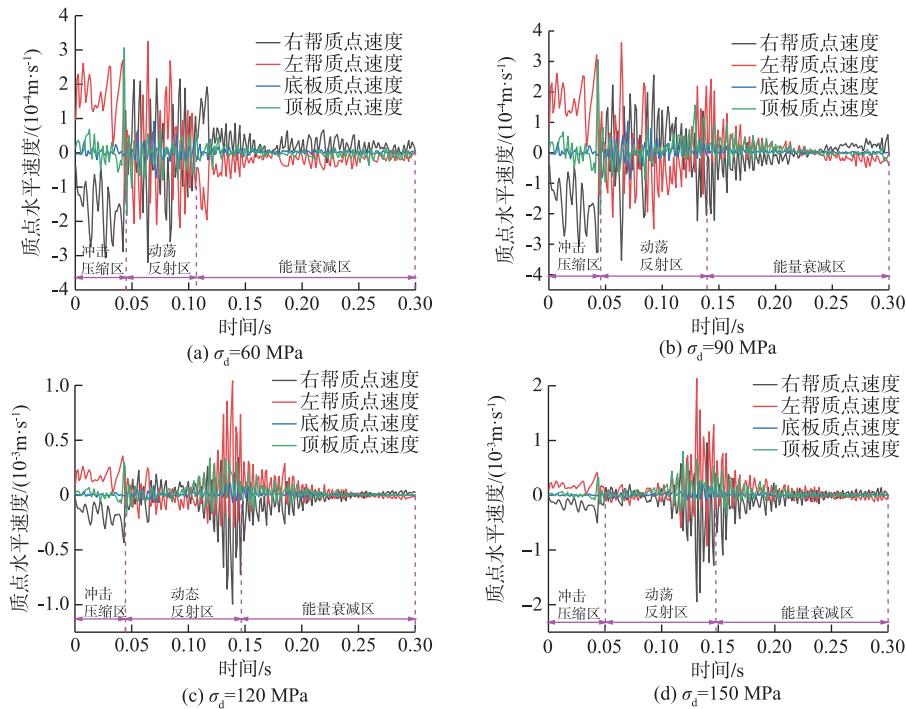


图 6 震源距离相同不同震源强度作用下巷道质点速度图 ($H = 30 \text{ m}$)

Fig. 6 Particle velocity map of roadway with the same source distance and different source intensity ($H = 30 \text{ m}$)

冲击震源距离巷道顶部 20、30、40 及 50 m 的巷道帮部质点震动速度分别为 2.88、0.38、0.36、0.31 mm/s，巷道顶部质点震动速度分别为 2.11、0.31、0.22、0.21 mm/s，分析可知：随着冲击震源距离巷道表面距离的增大，巷道围岩表面质点震动速度呈指数型衰减，如图 7 所示。

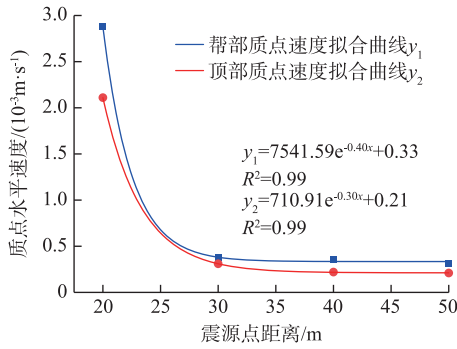


图 7 不同震源距离下巷道质点速度拟合曲线图
Fig. 7 Fitting curve of particle velocity in roadway with different source distances

且冲击震源距离巷道小于 30 m 时，巷道质点震动速度增大较快，大于 30 m 时，巷道质点震动速度变化不大，说明在冲击震源能量一定的情况下，巷道的破坏存在一临界冲击距离，位于临界冲击距离内的巷道质点震动速度大，破坏严重。冲击震源能量为 150、120、90 及 60 MPa 的巷道帮部质点震动速度分别为 1.95、0.99、0.39、0.38 mm/s，巷道顶部质点震动速度分别为 0.80、0.34、0.32、0.31 mm/s，分析可知：随着冲击震源能量的增大，巷道围岩表面质点震动速度呈指数型增大形式，如图 8 所示。且冲击震源能量大于 120 MPa 时，巷道质点震动速度增大较快，小于 120 MPa 时，巷道质点震动速度变化不大，说明在冲击距离一定的情况下，存在一临

界冲击能量，大于该临界冲击能量，巷道将受到明显冲击破坏。

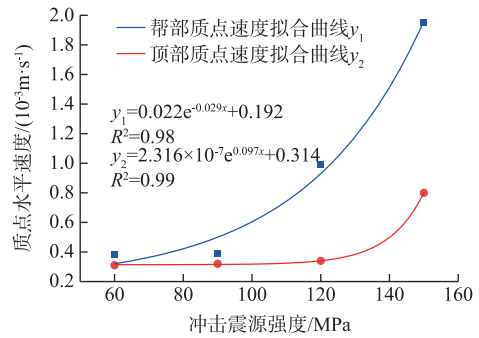


图 8 不同震源能量下巷道质点速度拟合曲线图
Fig. 8 Fitting curve of particle velocity in roadway with different source energy

基于数值模拟临界冲击距离和临界冲击能量的研究，统计现场冲击地压事件（见表 1）发现，巷道的冲击动载显现等级与冲击震源能量大小和冲击震源与巷道的距离也存在一定关系，为此提出“能距比 ξ ”的概念，来反应巷道的冲击破坏等级，即冲击震源的能量与冲击震源距巷道距离的比值。统计研究表明：当能距比 $\xi \in (0 \sim 10^2)$ 量级时为无冲击， $\xi \in (10^2 \sim 10^3)$ 量级时为弱冲击， $\xi \in (10^3 \sim 10^4)$ 量级时为中等冲击， $\xi \in (10^4 \text{ 及以上})$ 量级时为强冲击。

同时根据现场厚硬覆岩层位与井下工作面开采对应关系统计表明：厚硬覆岩层位对煤矿开采“面-区-井-地”冲击矿震影响存在远近场效应，厚硬覆岩层位在开采煤层 100 m 以内时就对第一个工作面产生冲击矿震效应，位于 200 m 内时对第 2~3 个面冲击影响较大；位于 300 m 左右及以上时对整个采区、矿井后期、甚至整个矿区矿震影响较大。

表 1 冲击事故统计分析表

Table 1 Statistical analysis of impact accidents

序号	冲击事件	监测能量/J	冲击震源层	距离煤层高度/m	能距比	冲击显现及灾害结果	冲击等级
1	义马千秋 2011. 11. 3 冲击	3.5×10^8	380 m 巨厚砾岩	500~1 000	3.5×10^5	75 人被困井下，10 人遇难	强冲击
2	吉林龙家堡 2019. 6. 9 冲击	第 1 次冲击： 1.8×10^8 ； 第 2 次冲击： 1.17×10^7	放顶煤诱发 F13 断层 (H=2 m)活化	第 1 次冲击：178； 第 2 次冲击：231	1.0×10^6 ； 5.1×10^4	造成 9 人遇难，10 人受伤，巷道破坏 220 m	强冲击
3	新巨龙龙垵 2020. 2. 22 冲击	4.2×10^7	278 m 砂质黏土、 18~40 m 砂岩复合顶板	160	2.6×10^5	4 人被困井下，后遇难； 420 m 巷道变形、破坏	强冲击
4	龙鄂煤矿 2018. 10. 20 冲击	2.2×10^5	顶板 11.6 m 厚细砂岩	5	4.4×10^4	巷道破坏 370 m；造成 21 人死亡、1 人受伤	强冲击
5	彬长孟村 2020. 5. 24 冲击	2.37×10^5	25 m 中粒砂岩	10.0	2.4×10^4	巷道破坏 160 m；造成 3 人重伤、3 人轻伤	强冲击
6	开滦唐山 2019. 8. 2 冲击	2.0 级(地震台)	联络巷煤柱	—	—	造成 7 人死亡、5 人 受伤	强冲击

续表

序号	冲击事件	监测能量/J	冲击震源层	距离煤层高度/m	能距比	冲击显现及灾害结果	冲击等级
7	彬长胡家河 2015. 7. 6 冲击	10^3	28 m 粗砂岩	32. 0	$3. 1 \times 10^1$	中央胶带大巷现场出现冒顶情况	无冲击
8	彬长胡家河 2013. 12. 27 冲击	$1. 6 \times 10^7$	23. 7 m 粉砂岩	5. 95	$2. 7 \times 10^6$	401102 回风平巷 100 m 区段出现底鼓, 约 500 mm, 皮带架散架; 401102 泄水巷 90 m 区段底鼓约 500 m, 超过 10 m 皮带架散架、掀翻	强冲击
9	新汶华丰 1996. 4. 27 冲击	$1. 0 \times 10^7$	500 m 巨厚砾岩	500~600	$1. 7 \times 10^4$	造成 10 人重伤、1 人轻伤, 损坏巷道 100 余米	强冲击
10	抚顺老虎台 2009. 12. 11 冲击	2. 3 级	断层	—	—	1 人死亡	中等冲击
11	抚顺老虎台 2001. 1. 06 冲击	2. 7 级	25. 81~362. 35 m 油页岩层	—	—	5 人死亡, 运输平巷 200 m 巷道不同程度损坏	中等冲击
12	徐州三河尖 2000. 4. 17 冲击	3 级	3 m 粉砂岩+14 m 中粒砂岩	1. 0	—	工作面超前两条材料道 90m 破坏	中等冲击
13	中煤门克庆 2018. 4. 8 冲击	$3. 3 \times 10^7$	80 m 厚砂岩层	60	$5. 5 \times 10^5$	回风巷超前工作面 90 m 区段单体受损、木垛摧垮、支护破坏、煤体抛出、巷道堵塞, 底鼓 300 m	强冲击
14	中煤葫芦素 2017. 11. 18 冲击	未配备监测系统	区段煤柱过大	—	—	21103 回采工作面回风巷超前 60 m 范围破坏, 30 根锚杆、15 根锚索断裂, 机尾出口被堵, 损坏单体 10 根	中等冲击
15	神新乌东 2013. 2. 27 冲击	$8. 43 \times 10^7$	100 m 厚粉砂岩	100	$8. 4 \times 10^5$	工作面支架安全阀开启, 两条平巷严重损坏, 串车掉道, 皮带机掀翻, 地面出现明显裂缝	强冲击
16	神新乌东 2015. 3. 13 冲击	5×10^6	100 m 厚粉砂岩	100	$5. 0 \times 10^4$	工作面煤壁向东 75 m 的 B3 巷道出现大变形损毁现象	强冲击
17	兖矿金鸡滩 2020. 12. 15 冲击	2. 6 级	19. 55 m 厚细砂岩	2. 91	—	地表出现裂缝, 房屋有损坏	中等冲击
18	山东济宁星村矿 2020. 12. 23 冲击	2. 4 级($1. 9 \times 10^6$)	3302 采空区上覆岩层垮落	—	—	井下现场安全, 人员及设备均无影响, 地面无塌陷, 无地面建(构)筑物和人员财产损失	弱冲击

3 井上下覆岩冲击震源层立体协同压裂防冲技术

厚硬顶板覆岩层位的存在为冲击矿震防治提供了靶点部位, 为实现工作面的安全高效回采, 基于厚硬顶板覆岩冲击矿震影响的远近场效应研究, 提出了地面-井下高低位立体协同对向压裂卸压技术以及冲击震源层层位破断监测预警技术。

1) 地面-井下高低位立体协同对向压裂卸压技术

根据冲击震源层距离地表远近程度以及对矿井冲击影响作用范围不同, 可采用地表压裂与井下

压裂相结合的对向压裂卸压技术。当冲击震源层距离地表较近, 且冲击影响作用范围在整个矿井影响较大, 则可采用水平井体积压裂技术从地面打钻至煤层上方高位冲击震源层实施压裂, 通过压裂降低厚硬冲击震源层的强度和完整性, 减弱高位厚硬冲击震源层突然失稳断裂时对采场围岩形成强烈的动载扰动, 实现对冲击地压的有效控制。当厚硬冲击震源层距离工作面煤层较近, 冲击震源层周期破断释放动载能量较大, 对本工作面回采及掘巷产生明显冲击动压现象, 巷道冲击破坏严重, 则可采用井下分段压裂技术, 破坏冲击震源层厚度及完整性, 减小冲击震源层位破断长度, 减弱冲击能量释

放量,从而保证巷道的顺利掘进及本工作面的安全

回采,如图 9 所示。

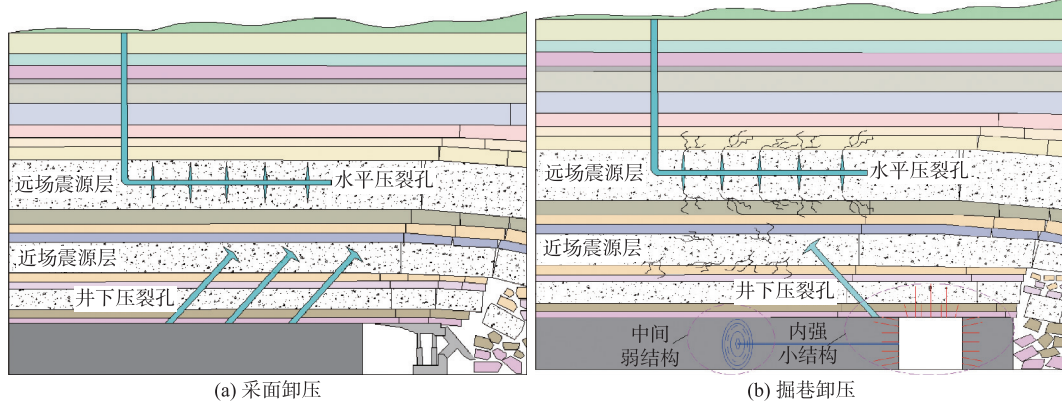


图 9 冲击震源层地面-井下高低位立体协同对向压裂卸压技术

Fig. 9 Three dimensional collaborative opposite fracturing pressure relief technology for surface and underground high and low layers of shock source layer

2) 冲击震源层层位破断监测预警技术

研究工作面覆岩冲击震源层层位,精确定位工作面在不同开采程度下覆岩冲击震源层的破裂位置及释放能量,对于确定工作面开采时的冲击危险性具有重要意义。

微震监测系统能够获得区域大范围内的岩层活动相关信息,属于区域大范围内(矿井或采区)的监测手段[24-27]。微震监测的对象主要是震动比较强烈的、震动频率通常小于 150 Hz 的事件,一般为大范围裂隙贯通并产生破坏的现象,因而适用于远场冲击震源层的冲击效应监测。地音监测能够获得煤岩体微破裂信息,但监测范围小,属于局部小范围内(工作面、掘进面)的监测手段,地音(AE)监测的对象主要是能量比较弱的,通常为煤岩体在受力过程中,煤岩裂隙扩张或产生局部破坏的现象,相比于微震现象,地音监测为小范围内煤岩破坏前兆性的监测,因而适用于近场冲击震源层的冲击效应监测。冲击震源远近场监测预警技术如图 10 所示。



图 10 冲击震源层远近场监测预警技术

Fig. 10 Early warning technology of far and near field monitoring of shock source layer

煤岩体动力破坏存在一个由近及远的过程,在煤岩破坏的初始及发展阶段,大量的微裂隙的形成

将不断将释放高频地音信号,可由地音系统进行监测,实现动力破坏的近场预警;当冲击震源层破坏发展到高位岩层释放低频微震信号,则可由微震系统进行监测,实现冲击震源层远场长期危险趋势预测。采用地音系统与微震系统协同监测技术,可实现顶板覆岩远近场冲击震源层层位破断的精准监测预警。

4 工程应用

彬长矿区孟村煤矿主采 4#煤层,煤层厚度为 18~23.9 m,平均埋深 700 m,煤层顶板存在多层硬厚砂岩层,经鉴定煤层具有强冲击倾向性,顶板具有弱冲击倾向性,工作面回采过程中井下冲击矿震频发,“2020. 5. 24”冲击事件造成 3 人重伤,6 人轻伤,严重影响井下安全生产。为此提出井上下立体协同对向压裂技术对孟村矿进行卸压防冲。选取 401102 工作面为试验工作面,如图 11 所示,在 401102 工作面东西侧各布置 1 口 L 型水平井,工作面中部布置一口参数井,压裂目标层为距离煤层顶板较远的安定组底部、属矿井中位震源层,井场开口位置距离目标层 600 m、终孔位置距离开口 1 500 m。井下在工作面两平巷沿推采方向施工顶板预裂钻孔组,每组两孔,组间距 20 m,钻孔直径 75 mm,该预裂孔用于切割低位震源层,预防坚硬顶板悬顶长度过大,突然破断产生冲击。

分别统计井上下立体协同压裂卸压前后各 15 d 的微震及地音监测数据,如图 12 所示,研究发现:立体协同压裂前井下微震监测呈现低频高能量分布特征,冲击危险等级较高,立体协同压裂之后,井下

微震监测呈现高频低能量分布特点,冲击危险等级明显下降,说明井上下协同压裂破坏了覆岩顶板冲击震源层完整性,冲击震源层集聚弹性能力下降。立体协同压裂之后工作面回采过程中的地音监测能量较压裂之前变化幅度不大,但是地音频次明显升高,说明压裂之后近场冲击震源层破坏程度加剧,单次释放能量明显减小,冲击危险性明显降低。综合分析表明,针对厚硬顶板覆岩冲击震源层采用井上下立体协同对向压裂卸压技术,可有效降低工作面冲击危险性,确保井下安全生产。

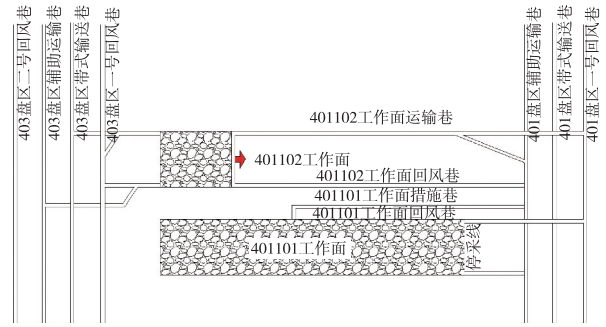


图 11 401102 工作面平面图

Fig. 11 The plan of 401102 working face

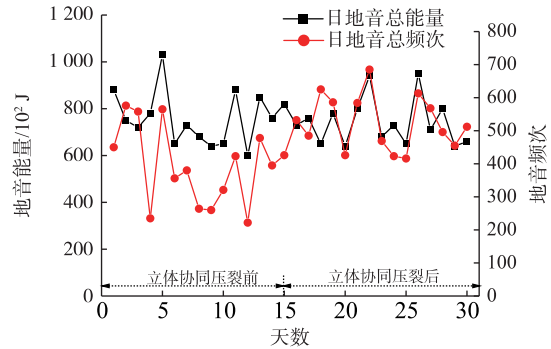
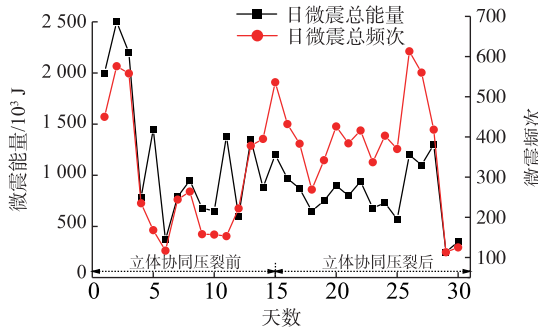


图 12 卸压前后微震及地音监测数据对比分析

Fig. 12 Comparative analysis of microseismic and geoaoustic monitoring data before and after pressure relief

5 结 论

1) 建立了厚硬顶板覆岩破断冲击矿震力学模型,分析了厚硬顶板的破断释能以及冲击震动波能量传播耗散机理。研究表明:工作面冲击震源层破断产生冲击震动能量主要是由于顶板的挠曲变形能和回转运动产生的动能构成。冲击震源破裂释能能量与采高 h_1 、冲击震源层破裂尺度 h_3+h_4 以及冲击震源层初次破断步距 L_1 、周期破断步距 L_2 成正比,与冲击震源层的破裂层位 h_2 成反比。随着冲击震源震动波传播距离增大,震源能量呈幂指数型衰减,且不同岩性对能量的耗散能力不同。

2) 对覆岩震源层位的冲击矿震影响远近场效应模拟研究表明:动载冲击波的作用时间分为 3 个区,即:冲击压缩区、动荡反射区及能量衰减区,且冲击震源点距离巷道表面距离越近,冲击压缩区作用时间越短。巷道围岩质点震动速度随冲击震源点距离巷道距离的增大呈指数型衰减,随冲击震动能量的增大呈指数型增大。

3) 在巷道顶板的各冲击震源层,均存在一临界冲击能量与临界冲击距离,小于该临界冲击距离,大于该临界冲击能量,巷道将发生明显冲击破坏。通过典型冲击事件统计分析发现:当能距比 $\xi \in$

($0 \sim 10^2$) 量级时无冲击, $\xi \in (10^2 \sim 10^3)$ 量级时弱冲击, $\xi \in (10^3 \sim 10^4)$ 量级时中等冲击, $\xi \in (10^4$ 及以上) 量级时强冲击。

4) 厚硬顶板覆岩冲击震源层对煤矿开采“面-区-井-地”冲击矿震影响存在远近场效应,厚硬顶板在开采煤层 100 m 以内时就对第一个工作面产生冲击地压效应,位于 200 m 内时对第 2~3 个面冲击影响较大;位于 300 m 左右及以上时对整个采区、矿井后期,甚至整个矿区矿震影响较大。

5) 厚硬顶板覆岩层位的存在为冲击矿震防治提供了靶点部位,可采取微震与地音监测相结合的远近场围岩监测预警技术以及地面-井下高低位立体协同对向压裂破岩释能从源头防冲,实现工作面安全高效回采。

参考文献:

[1] 贺虎. 煤矿覆岩空间结构演化与诱冲机制研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1245-1246.
HE Hu. Research on the evolution mechanism of spatial structure of overlying strata and rockburst inducing in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1245-1246.

[2] 窦林名, 贺虎. 煤矿覆岩空间结构 OX-F-T 演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3):

- 453-460.
DOU Linming, HE Hu. Study of OX-F-T spatial structure evolution of overlying strata in coal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 453-460.
- [3] 王存文, 姜福兴, 孙庆国, 等. 基于覆岩空间结构理论的冲击地压预测技术及应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 150-155.
WANG Cunwen, JIANG Fuxing, SUN Qingguo, et al. The forecasting method of rock-burst and the application based on overlying multi-strata spatial structure theory [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 150-155.
- [4] 朱卫兵, 于斌. 大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 99-104.
ZHU Weibing, YU Bin. Breakage form and its effect on strata behavior of far field key stratum in large space stope[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 99-104.
- [5] 朱卫兵, 于斌, 鞠金峰, 等. 采场顶板关键层“横 U-Y”型周期破断特征的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 36-43.
ZHU Weibing, YU Bin, JU Jinfeng, et al. Experimental study on horizontal “U-Y” periodical breakage characteristics of key strata in stope roof[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 36-43.
- [6] 于斌, 朱卫兵, 李竹, 等. 特厚煤层开采远场覆岩结构失稳机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2398-2407.
YU Bin, ZHU Weibing, LI Zhu, et al. Mechanism of the instability of strata structure in far field for super-thick coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2398-2407.
- [7] 于斌, 高瑞, 孟祥斌, 等. 大空间远近场结构失稳矿压作用与控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1134-1145.
YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, et al. Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1134-1145.
- [8] 于斌, 朱卫兵, 高瑞, 等. 特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 571-580.
YU Bin, ZHU Weibing, GAO Rui, et al. Strata structure and its effect mechanism of large space stope for fully-mechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 571-580.
- [9] 潘俊锋, 刘少虹, 高家明, 等. 深部巷道冲击地压动静载分源防治理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1607-1613.
PAN Junfeng, LIU Shaohong, GAO Jiaming, et al. Prevention theory and technology of rock burst with distinguish dynamic and static load sources in deep mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1607-1613.
- [10] 杨俊哲, 郑凯歌, 王振荣, 等. 坚硬顶板动力灾害超前弱化治理技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3371-3379.
YANG Junzhe, ZHENG Kaige, WANG Zhenrong, et al. Technology of weakening and danger-breaking dynamic disasters by hard roof [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3371-3379.
- [11] 杨培举, 何焯, 郭卫彬. 采场上覆巨厚坚硬岩浆岩致灾机理与防控措施[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2106-2112.
YANG Peiju, HE Ye, GUO Weibin. Disaster-causing mechanism and control measures of extremely thick and hard magmatic rock above working face [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2106-2112.
- [12] 王平, 姜福兴, 冯增强, 等. 高位厚硬顶板断裂与矿震预测的关系探讨[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 618-623.
WANG Ping, JIANG Fuxing, FENG Zengqiang, et al. Relationship between fracture of high-position thick and hard roof and mine quake forecast [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 618-623.
- [13] 曹安业, 窦林名. 采场顶板破断型震源机制及其分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2): 2833-2839.
CAO Anye, DOU Linming. Analysis of focal mechanism caused by rupture of stope roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup 2): 2833-2839.
- [14] 魏东, 贺虎, 秦原峰, 等. 相邻采空区关键层失稳诱发矿震机理研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1957-1962.
WEI Dong, HE Hu, QIN Yuanfeng, et al. Study on mechanism of mining tremor induced by key strata instability in the gob beside the working face [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1957-1962.
- [15] 李一哲, 赵善坤, 齐庆新, 等. 井间高位岩层联动诱冲机制及防冲方法初探[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1681-1690.
LI Yizhe, ZHAO Shankun, QI Qingxin, et al. Preliminary study on coal bump mechanism induced by co-movement of higher strata and coal bump control method between two mines [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1681-1690.
- [16] 王家臣, 王兆会. 高强度开采工作面顶板动载冲击效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 3987-3997.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Impact effect of dynamic load induced by roof in high-intensity mining face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

- ing, 2015, 34(Sup 2): 3987-3997.
- [17] 李新华, 张向东. 浅埋煤层坚硬直接顶破断诱发冲击地压机理及防治[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 510-517.
LI Xinhua, ZHANG Xiangdong. Mechanism and prevention of rock-burst induced by immediate roof breakage in shallow-buried coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 510-517.
- [18] 杨胜利, 王兆会, 吕华永. 大采高采场周期来压顶板结构稳定性及动载效应分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 315-322.
YANG Shengli, WANG Zhaohui, LYU Huayong. Analysis of structure stability of main roof and dynamic loading effect during periodic weighting in a large mining height stope [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 315-322.
- [19] 杨胜利, 王家臣, 杨敬虎. 顶板动载冲击效应的相似模拟及理论解析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 335-343.
YANG Shengli, WANG Jiachen, YANG Jinghu, et al. Experimental study on rock burst induced by dynamic load [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 335-343.
- [20] 王恩元, 冯俊军, 孔祥国, 等. 坚硬顶板断裂震源模型及应力波远场震动效应[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 787-794.
WANG Enyuan, FENG Junjun, KONG Xiangguo, et al. A hard roof fracture source model and its far-field seismic impact by stress wave [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 787-794.
- [21] 王恩元, 冯俊军, 张奇明, 等. 冲击地压应力波作用机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 100-110.
WANG Enyuan, FENG Junjun, ZHANG Qiming, et al. Mechanism of rockburst under stress wave in mining space [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 100-110.
- [22] 牟宗龙, 窦林名, 倪兴华, 等. 顶板岩层对冲击矿压的影响规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 40-44.
MU Zonglong, DOU Linming, NI Xinghua, et al. Research on the influence of roof strata on rock burst risk [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 40-44.
- [23] 牟宗龙. 顶板岩层诱发冲击的冲能原理及其应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 149-150.
MU Zonglong. Study of the burst-energy principle of rock burst induced by roof stratum and its application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 149-150.
- [24] 田向辉, 李振雷, 宋大钊, 等. 某冲击地压频发工作面微震冲击前兆信息特征及预警方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2471-2782.
TIAN Xianghui, LI Zhenlei, SONG Dazhao, et al. Study on microseismic precursors and early warning methods of rockbursts in a working face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2471-2782.
- [25] 欧阳振华, 孔令海, 齐庆新, 等. 自震式微震监测技术及其在浅埋煤层动载矿压预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(增刊1): 44-51.
OUYANG Zhenhua, KONG Linghai, QI Qingxin, et al. Self-shocking microseismic monitoring technology and its application in prediction of dynamic pressure in shallow coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(Sup 1): 44-51.
- [26] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 覆岩关键层运动诱发冲击的规律研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1260-1265.
HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Rock burst rules induced by cracking of overlying key stratum [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1260-1265.
- [27] 朱斯陶, 姜福兴, 刘金海, 等. 复合厚煤层巷道掘进冲击地压机理及监测预警技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1659-1670.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, LIU Jinhai, et al. Mechanism and monitoring and early warning technology of rock burst in the heading face of compound thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1659-1670.