

井广成,曹安业,窦林名,等.煤矿褶皱构造区冲击矿压震源机制[J].煤炭学报,2017,42(1):203-211. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0951

Jing Guangcheng, Cao Anye, Dou Linming, et al. Focal mechanism of rockburst in folded region in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 203-211. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0951

煤矿褶皱构造区冲击矿压震源机制

井广成^{1,2,3}, 曹安业^{1,2,3}, 窦林名³, 王常彬^{1,2,3}, 刘志刚^{1,2,3}, 吴芸^{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 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 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)

摘 要: 为实现对褶皱构造区冲击矿压震源机制的有效分析,基于震源机制矩张量反演方法,在优化震动波远场位移及破裂面产状求解方法的基础上,对甘肃华亭矿区砚北煤矿 250204 工作面回采期间冲击矿压震源破裂类型、破裂面产状及视应力等地震学参量进行系统分析,揭示了砚北煤矿褶皱构造区冲击矿压震源机制。研究结果表明:工作面回采扰动影响下,褶皱构造区冲击矿压震源破裂类型以拉张破裂为主,其矩张量以非双力偶部分占主导,表现为水平挤压构造应力、超前支承压力共同作用下煤岩体的应力释放;震源破裂面产状有明显分化趋势,小倾角($<35^\circ$)震源破裂面走向多垂直工作面推进方向,而大倾角($>35^\circ$)震源破裂面走向多平行于工作面推进方向且倾向实体煤一侧;褶皱构造区冲击矿压震源辐射能量和地震矩基本分布在一包络线内,随震源辐射能量增大,其地震矩大小分布更加集中;通过震源视应力计算,得到了回采扰动下工作面及其周边应力演化情况,与冲击矿压震源时空分布及巷道冲击显现结果基本吻合。

关键词: 褶皱构造; 冲击矿压; 震源机制; 矩张量; 视应力

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2017)01-0203-09

Focal mechanism of rockburst in folded region in coal mine

JING Guang-cheng^{1,2,3}, CAO An-ye^{1,2,3}, DOU Lin-ming³, WANG Chang-bin^{1,2,3}, LIU Zhi-gang^{1,2,3}, WU Yun^{1,2,3}

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. State Key Laboratory of Coal Resource and Mine Safety, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Exploitation in longwall 250204 at Yan-bei coal mine within fold region had led to the occurrence of very high seismic activity, where 50 rockbursts took place from April 2011 to May 2013. To determine the cause of rockburst in fold region, the research employed the method of seismic moment tensor inversion which provides the parameters of focal mechanism (percentage share of its components: isotropic, uniaxial compression or tension, shear component; trend and dip of nodal planes, etc.) based on the analysis of geological and mining conditions. The test showed that the type of ruptures were all distinguished as tensile failure which represented that the stress-release of loaded coal and rock mass was caused by the multi-effect of horizontal tectonic stress and abutment pressure. The joints occurrence of ruptures had an obvious tendency of differentiation, and the trends of ruptures with dip angle below 35° were almost normal to the advancing direction of working face, while the other ruptures with angle above 35° were more or less parallel to advancing direction. The seismic moment and radiated energy of rockbursts were all distributed in an envelope,

收稿日期: 2016-07-09 修回日期: 2016-10-31 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51674253); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801403); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35)

作者简介: 井广成(1989—),男,山东滕州人,硕士研究生。E-mail: guangchengjing@126.com

and the value of seismic moment had an obviously distributing center with radiated energy growth. The distribution of apparent stress was consistent with the actual situation of mined area which high-stress region concentrated in the axial part of syncline structure.

Key words: fold; rockburst; focal mechanism; moment tensor; apparent stress

煤矿地下开采打破了煤岩体原始平衡状态,尤其在复杂褶皱构造环境中,受构造应力影响,易诱发冲击矿压事故,如抚顺矿务局老虎台矿、甘肃华亭砚北煤矿、陕西彬长胡家河煤矿等均处于褶皱构造发育区域,在工作面推进至褶曲轴部前后,矿震数量和能级倍增,导致巷道严重破坏和人员伤亡。

相关研究表明,构造型冲击事故是采矿活动与区域构造应力综合作用的结果,不仅与煤岩强度参数、采掘区域应力重新分布有关,还与构造应力分布相关,目前国内对褶皱构造区冲击矿压事故分析主要集中在现场数据调研和数值模拟方面,如贺虎等^[1]通过研究褶曲构造区冲击矿压震源时空演化特征,对向背斜轴部矿震频次、能量和频谱特征进行了系统分析,为预测构造区冲击矿压提供了一定理论依据;陈国祥等^[2]采用 FLAC 数值模拟软件反演了褶曲的形成过程及应力演化规律,分析了褶曲不同部位的应力状态;姜福兴等^[3]通过分析微地震监测到的构造活化现象,将构造控制型冲击矿压分为增压型和减压型两类。尽管如此,目前对褶皱构造区冲击矿压孕育机理的研究仍不甚明晰。

高能量矿震活动源自高应力环境下的煤岩体破裂^[4],其破裂过程可由震源机制参数描述,随着煤矿矿震台网的建立和完善,以及矩张量反演理论的发展,利用矿震数据反演矿震震源机制的方法得到了较快发展^[5-6],如曹安业等^[7-8]理论比较分析了煤岩体在剪切、拉伸等破裂模式下的应力降及应变能释放特征,揭示了采动影响下煤岩体不同破裂模式下的冲击危险差异,并对采场顶板破断型震源机制进行了分析;柴金飞等^[9]对某磷矿异常矿震事件展开系统分析,通过判识震源破裂类型、破裂面方位初步确定了突水危险区域范围;Krystyna 等^[10-11]基于矩张量反演方法对工作面回采过程中冲击震源进行了系统分析,初步确定了工作面复合应力场分布特征;Krystyna 等^[12]对某煤矿工作面回采期间冲击矿压震源机制展开研究,得出覆岩变形及采场煤岩体应力集中程度是巷道冲击破坏的主要影响因素。

虽然如此,现有矩张量反演方法及其结果判别中仍有矿震远场位移识别不精确、矩张量分解物理意义不明确、适用性有限等缺点。为此,本文以华亭矿区砚北煤矿为研究背景,以褶皱构造区开采的 250204

工作面为例,在优化震动波远场位移及破裂面产状求解方法的基础上,对褶皱构造区冲击矿压震源矩张量、破裂面方位、破裂类型等细观参数及地震矩、视应力等地震学参量进行系统分析,并结合冲击震源与工作面相对空间位置等宏观参数判识砚北煤矿褶皱构造区冲击矿压震源机制。

1 矿震震源机制矩张量反演原理

1.1 震动波远场位移求解优化

砚北煤矿已安装 SOS 微震监测系统,采用单分量速度记传感器,根据弹性波理论及位移表示定理^[13]可以得出震源远场位移:

$$u_p = \frac{\gamma_3 \gamma_i \gamma_j}{4\pi\rho v_p^2 r} \dot{M}_{ij} \left(t - \frac{r}{v_p} \right) \quad (1)$$

式中 v_p 为 P 波传播速度; r 为震源到微震记录仪的距离; ρ 为岩石密度; γ_i 为震源至微震记录仪的震动波射线对应于各坐标轴的分量,即 $\gamma_i = (x_i - x_{0i}) / r$ (x_i 为微震记录仪各坐标分量, x_{0i} 为震源各坐标分量, $i = 1, 2, 3$); M_{ij} 为作用于震源的矩张量。

由于 P 波比 S 波的传播速度快,传感器先接收到单纯的 P 波(含有少量背景噪声),而后接收到的 S 波中可能含有部分 P 波成分,较为复杂,故本文主要利用 P 波波形数据进行反演。另外,因传感器距震源远近不同,仅通过 P 波初振幅值计算其远场位移误差较大,而矿震波形低频振幅计算无需任何源模型假设,且矿震波形双对数频率域振幅在低频部分是相对平直的常数,大小正比于地震标量矩,因此本文采用矿震波形低频位移幅值表示煤岩破裂的远场位移。

受井下复杂工程环境影响,应力波在传播过程中会产生一定衰减,因此在计算波形远场位移前需要对波形进行衰减修正,首先采用傅里叶时频变换将时间-振幅谱转化为频率-振幅谱:

$$A^{\text{new}}(f) = A(f) \exp\left(\frac{\pi f D}{v Q}\right) \quad (2)$$

其中 $A(f)$ 为时域速度谱; f 为相应频率; v 为 P 波速度; Q 为衰减因子。

相比于地震监测,煤矿震源到传感器一般较近,可视为近震源观测情况,在波形衰减修正的基础上,可用 Brune 圆盘模型^[14]计算波形震源参数,求解低频段位移:

$$D_0^2(f) = \frac{v_0^2(f)}{(2\pi f)^2} \quad (3)$$

$$S_{v2} = 2 \int_0^\infty V_0^2(f) df \quad (4)$$

$$S_{D2} = 2 \int_0^\infty D_0^2(f) df \quad (5)$$

$$u_p = \lambda \sqrt{\frac{4S_{D2}^{3/2}}{S_{v2}^{1/2}}} \quad (6)$$

其中, $V_0^2(f)$ 为考虑自由面影响乘以 1/4 的修正速度功率谱; $D_0^2(f)$ 为对应的位移功率谱; λ 为坐标分量上 P 波初动方向, 取值 1 或 -1; u_p 为波形低频位移。

1.2 震源破裂类型及破裂面产状求解

确定震源事件矩张量后, 可以对其进行分解进而确定震源破裂类型。相关研究表明^[15-16], 矩张量可分解为各项同性 (MISO)、补偿线性矢量偶极子 (MCLVD) 以及双力偶 (MDC) 3 个部分, 其中: 补偿线性矢量偶极子主要表征单轴压缩破坏和拉张破坏, 具体表现为发生在高静水压力区域及保护煤岩柱区域的岩体破坏; 双力偶部分主要描述剪切破裂, 具体表现为巷道顶板破断及发生在断层区域的大能量矿震。如式 (7) 所示, 通过计算双力偶部分所占比例可定量确定震源破裂类型^[10]。

$$\begin{cases} \text{PDC} \geq 60\% & \text{剪切破裂} \\ \text{PDC} \leq 40\% & \text{拉张破裂} \\ 40\% < \text{PDC} < 60\% & \text{混合破裂} \end{cases} \quad (7)$$

震源事件矩张量蕴含信息丰富, 对其进行进一步分析可获得震源破裂面产状。根据 Aki 和 Richards 的理论^[17], 震源矩张量可用破裂面位置与运动矢量表示为

$$M_{ij} = uS [\lambda v_k n_k \delta_{ij} + \mu (v_i n_j + v_j n_i)] \quad (8)$$

式中, i, j, k 为空间坐标系下的 3 个方向; M_{ij} 为矿震矩张量形式; u 为破裂面运动方向的位移量; S 为破裂面表面积; λ 和 μ 为拉梅常数; v 为破裂面运动方向, v_i, v_j, v_k 表示破裂面运动矢量在各坐标系方向上的分量; n 为破裂面法向方向。

将式 (8) 矩张量本征值化可得到破裂面运动方向 n 和法向方向 v 与矩张量最大、最小特征值 (M_1 和 M_3) 对应特征矢量的关系:

$$n = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_1 + \sqrt{\frac{M_2 - M_3}{M_1 - M_3}} e_3 \quad (9)$$

$$v = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_1 - \sqrt{\frac{M_2 - M_3}{M_1 - M_3}} e_3 \quad (10)$$

式中, e_1, e_2, e_3 分别为矩张量的最大、中间和最小特征值对应的特征矢量, 满足 $e_1 \perp e_2 \perp e_3$ 。根据破裂面法向方向的空间矢量可以得到破裂面的几何方程表

达式, 进而可以确定破裂面产状。

1.3 震源信息的地震学参量

视应力表征单位地震矩上地震释放能量的大小, 它和煤岩层断裂速度、断面驱动力、断面摩擦力及滑动停止条件等多种因素有关^[18], 相比于应力降, 视应力物理意义比较明确, 计算结果也更加稳定, 本文主要通过分析冲击矿压震源视应力空间分布特征研究采场及其周边应力分布演化情况, 其计算方法^[19]如下:

$$M_0 = \left(\frac{\sum M_i^2}{2} \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$\sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (12)$$

式中, M_0 为地震矩; M_i 为震源矩张量本征值; σ_{app} 为视应力; μ 为震源介质剪切模量; E_s 为地震波辐射能量。

2 工程背景

2.1 砚北煤矿褶皱构造分布

如图 1 所示, 甘肃华亭矿区砚北煤矿地处六盘山东麓, 所处地质构造位于鄂尔多斯地块 (陕甘宁盆地) 西南缘, 因长期受南西—北东向以及东西向的挤压作用, 经燕山运动后煤田构造形态基本定形, 为一个大体上呈北北西—南南东向展布的“S”型复式不对称向斜构造。

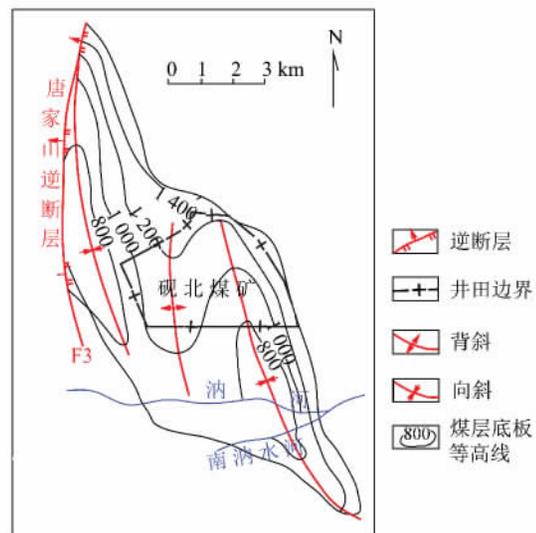


图 1 华砚煤田地质及矿区分布情况

Fig. 1 Geological condition and mining area distribution in Huayan Coalfield

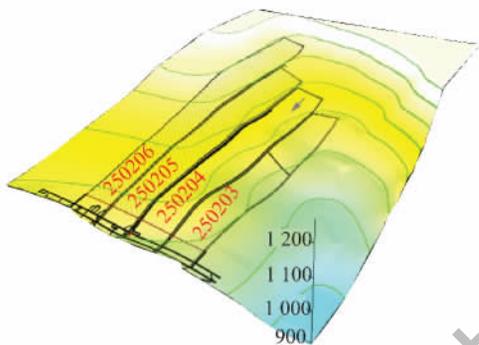
砚北煤矿地应力实测数据显示, 该区域最大主应力值介于 11.40~33.04 MPa, 最大主应力方向基本与

褶曲向背斜轴向方向垂直,与水平面夹角均小于 18° ,说明井田地应力中水平构造应力占据主导。同时根据煤岩冲击倾向性实测,砚北煤矿5号煤层属于III类,具有强冲击倾向性,部分区域原岩应力已接近甚至超过煤体强度极限,在回采扰动下,工作面具有较强冲击危险。

2.2 250204 工作面开采地质条件

砚北煤矿主采 2502 采区,地表平均标高 1 556 m,采区标高+1 171 ~ +860 m,南北走向约 2 600 m。2502 采区 5 号煤层厚度 18.2~54.5 m,平均 31.0 m,采用分层综放采煤工艺,目前回采上层,采高 3.0 m,放煤高度 9.0 m。

图 2 为 2502 采区工作面及覆岩分布情况,04 综



(a) 砚北2502采区工作面分布

煤岩名称	柱状	厚度/m	岩性描述
油页岩		3.0	深灰色,中部夹薄层植物碎屑
细砂岩		12.2	灰白,深灰色以砂岩为主,往下料粒度较粗,而局部呈硬质砂岩,砂质泥岩呈深灰色
砂质泥岩		15.5	灰-深灰色致密,较坚硬,含砂量较低,层理明显,底部0.10 m细砂岩
细砂岩		12.5	细砂岩灰绿色,较致密,含植物碎屑,细砂岩局部为中砂岩,灰白色
砂质泥岩		16.8	灰白,深灰色以砂岩为主,往下料粒度较粗,而局部呈硬质砂岩,砂质泥岩呈深灰色
炭质泥岩		1.8	黑色,中夹3层煤线,总厚0.54 m
煤5		31.0	黑色,坚硬,块状,含黄铁矿较多,伪结构1.25(0.45)1.02(0.18)4.20(0.12)26.26,夹矸均为炭质泥岩
砾质粗砂岩		9.1	灰-灰白色,上部灰色,含泥质胶结多,向下渐变为灰白-白色,泥质胶结,砾径一般3-5 mm
砂质泥岩		8.2	灰绿色,粉砂岩,含泥质,具缓波状层理,砂质泥岩较致密,含植物化石碎片,下部具紫红色晕斑

(b) 2502采区覆岩分布

图 2 砚北煤矿 2502 采区工作面及其覆岩情况

Fig. 2 Geologic and mining situation in the area of longwall 2502 in Yanbei Coalmine

放工作面自 2011 年 4 月开始回采,至 2013 年 5 月回采结束,在此期间共发生 50 起冲击矿压事件,图 3 为巷道冲击破坏情况,巷道变形严重,尤其以底板冲击显现为主。



(a) 巷道底板严重处



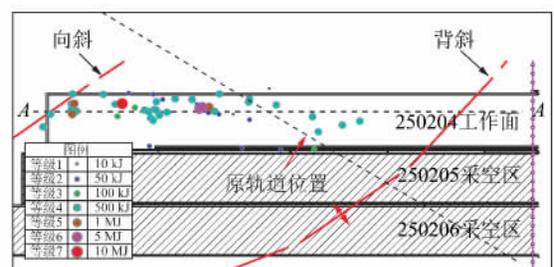
(b) 设备列车被推翻,管道被扯断

图 3 巷道冲击破坏情况

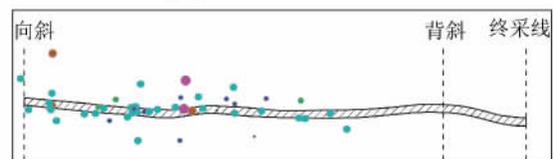
Fig. 3 Destruction status in roadway

2.3 冲击矿压震源时空演化规律

图 4 为 250204 工作面回采期间冲击矿压震源(简称冲击震源)空间分布,表 1 为部分冲击震源参量统计,由图 4 可知:冲击震源主要分布在向斜轴部附近,且多定位于煤层中,高位覆岩及底板分布较少,工作面推进至背斜轴部后,冲击震源数量锐减甚至消失。



(a) 冲击震源水平面投影



(b) 冲击震源A—A剖面投影

图 4 冲击震源空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of rockburst source

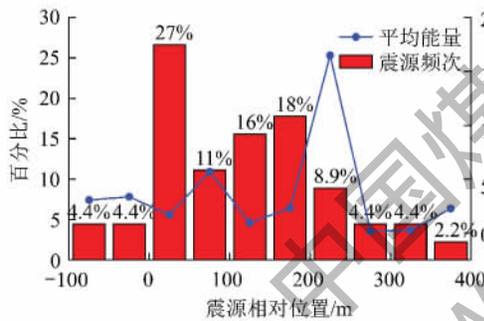
为进一步分析冲击震源空间位置及能量释放情况,本文从工作面推进方向和垂直方向展开统计分

析 结果如图 5 所示,由图 5 可知震源事件主要分布

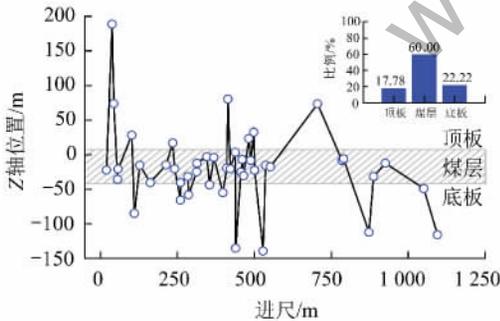
表 1 部分冲击震源统计

Table 1 Statistics of some analyzed rockburst sources

序号	日期	X/m	Y/m	Z/m	能量/MJ
1	2011-05-01	5 652.4	6 154.6	1 074.5	0.577
2	2011-05-11	5 645.2	6 194.4	1 282.6	0.819
3	2011-05-18	5 447.7	6 196.2	1 060.8	5.30
4	2011-06-07	5 650.2	6 233.3	1 121.0	0.316
5	2011-06-10	5 634.0	6 164.7	1 012.2	0.395
6	2011-06-15	5 656.2	6 169.9	1 081.4	0.354
7	2011-07-21	5 305.3	6 167.3	1 052.1	0.453
8	2011-09-25	5 319.1	6 128.6	1 066.9	0.332
9	2011-10-07	5 307.6	6 201.9	931.3	0.214
10	2011-10-16	5 068.2	6 164.3	1 108.2	0.360
11	2011-10-24	5 047.5	6 235.8	1 062.3	0.488
12	2011-10-31	5 093.4	6 181.1	1 055.8	0.940
13	2011-11-19	5 125.7	6 176.3	1 060.5	1.12
14	2011-11-24	4 815.9	6 189.0	1 054.6	0.225
15	2012-02-15	4 927.0	6 204.1	1 149.8	0.315
16	2012-04-20	4 922.6	6 216.4	1 044.4	0.245



(a) 工作面推进方向震源定位



(b) 震源垂直方向定位

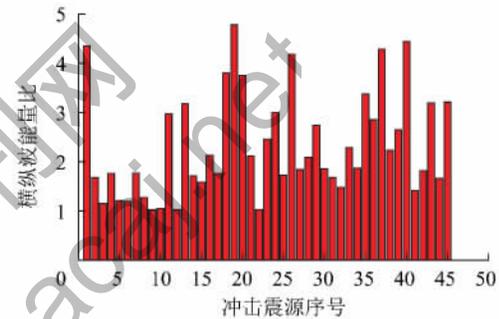
图 5 冲击震源位置统计

Fig. 5 Location of rockburst sources

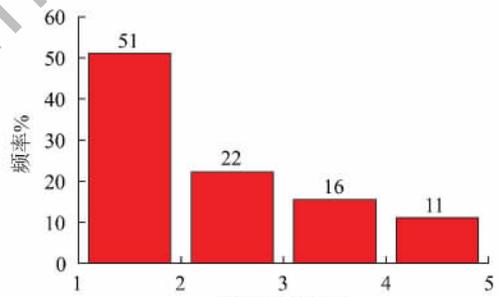
于回采工作面前方 250 m 范围内,且在工作面前方 50 m 范围内发生频率较大,占总事件的 27%,冲击矿压释放能量在工作面前方 50~100,200~250 m 相对较大,分别达到 0.57 MJ 和 1.65 MJ。在垂直方向上(Z=0 为巷道顶板位置),震源主要分布在-75~+

50 m 范围内,60.00% 冲击震源发生在煤层中,22.22% 分布于煤层底板。可初步认为,工作面推进过程中超前支承压力是诱发巷道冲击的直接原因,在构造应力、侧向支承压力与超前支承压力共同作用下,工作面前方煤岩体在高静载环境下破裂,引发冲击矿压。

为初步判断 250204 工作面回采期间冲击震源破裂特征,本文对筛选的 45 起冲击震源波形的横纵波能量比(E_s/E_p)^[20]进行了统计分析(图 6),如图所示 45 起冲击震源的 E_s/E_p 值均不超过 5,且 50% 以上冲击震源 E_s/E_p 值在 2 以下,基于此可初步判断 250204 工作面回采期间震源破裂类型以拉伸破裂为主,这与地震、采动影响下的断层活化、厚硬覆岩剪切失稳及滑移失稳有明显区别。



(a) 横纵波能量比演化



(b) 横纵波能量比频率分布

图 6 横纵波能量比演化及其频率分布

Fig. 6 Evolution and frequency distribution of E_s/E_p

3 褶皱构造区冲击矿压震源机制分析

为进一步分析褶皱构造区冲击矿压震源机制,采用矩张量反演方法对震源波形展开定量分析。

3.1 典型冲击矿压震源机制分析

图 7 为 2011-11-24T22:16 监测到的冲击矿压波形,该震源定位结果如图 8 所示,选择 2,5,9,10,11,12,13,14,15 九个通道波形数据进行矩张量反演,各通道波形低频段位移(远场位移)见表 2。

进一步分析可知,该冲击震源 MDC(双力偶部分)所占比例为 2.76%,可判定该冲击震源以张拉破

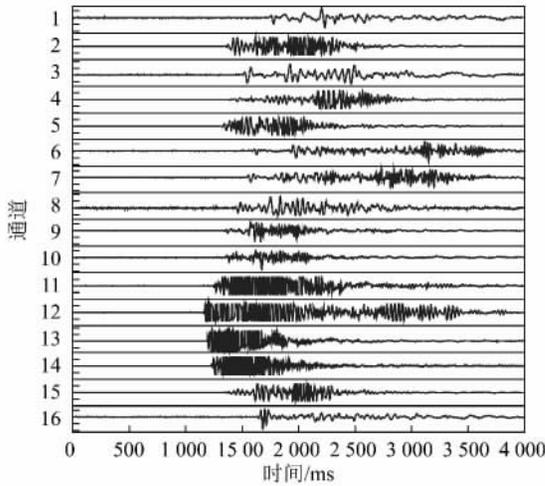


图7 典型冲击矿震源波形

Fig. 7 Waveform of analyzed rockburst

裂为主,具体震源机制参数如图9所示。

3.2 褶皱构造区冲击矿震源机制规律分析

3.2.1 震源破裂类型

通过筛选矿震波形,本文对45起冲击矿震源机制进行统计分析,如图10所示为震源矩张量各部分所占比例,MDC所占比例介于0.01%~27.64%,冲击震源全部表现为拉张破坏,图11为基于矩张量

反演得到的震源机制上半球投影。

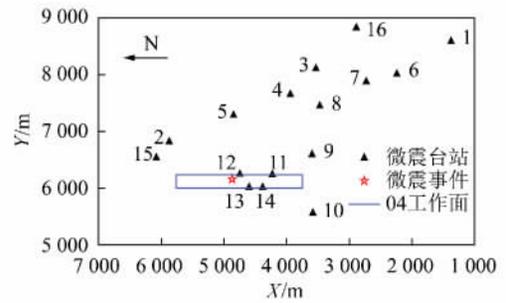


图8 震源事件相对位置示意

Fig. 8 Spatial distribution of the analyzed rockburst (pentagram) along with the seismic stations (triangles)

表2 各通道波形远场位移

Table 2 Far field displacement of each channel

通道	低频位移/ μm	通道	低频位移/ μm
2	-33.1	12	48.9
5	45.6	13	-49.5
9	35.0	14	-27.7
10	50.36	15	-41
11	-28.1		

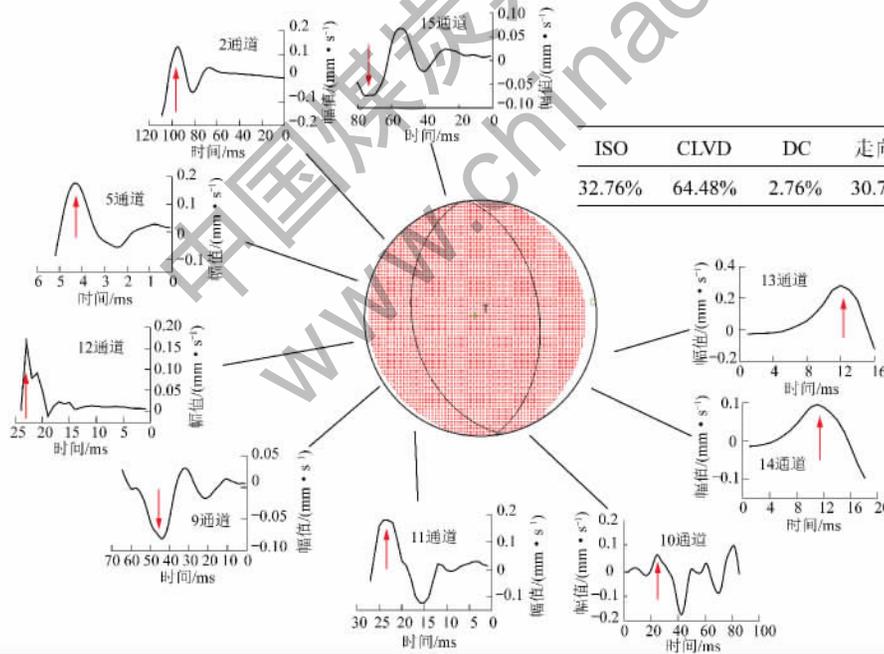


图9 震源球及通道波形示意(箭头表示P波初振方向)

Fig. 9 Focal mechanism of analyzed rockburst(the red arrow stands for initial vibration direction of P wave)

据前文所述,砚北煤矿实测地应力中水平构造应力占主导,发生在煤层中的冲击震源,接近90%定位于巷道底板煤层中,结合巷道冲击破坏情况,建立如图12所示褶皱构造区巷道破坏模型,主要表现为巷道底板煤层的拉张性破坏。

3.2.2 震源破裂面产状

为方便统计,本文将冲击矿震源破裂面产状由赤平极射投影表示,如图13所示,其破裂面产状存在明显分化趋势,绝大多数破裂面倾角较小(图中Poles-2倾角均小于35°,平均8°),震源破裂面走向

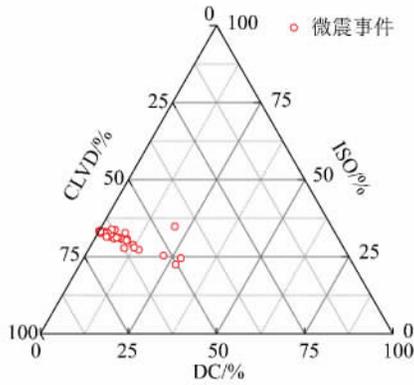


图 10 破裂参数统计

Fig. 10 Result of the focal mechanisms determination indicating crack type

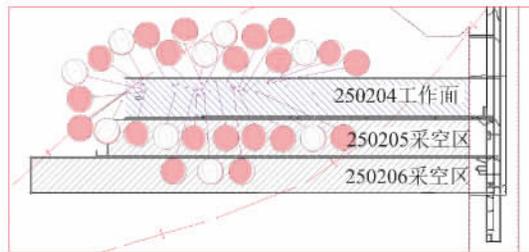


图 11 冲击矿压震源机制球统计

Fig. 11 Statistical result of rockburst focal mechanism described by beach balls

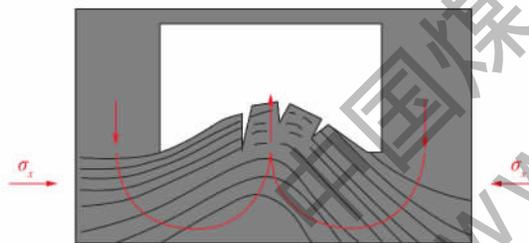


图 12 巷道底板煤层的张性断裂

Fig. 12 Extensional fracture in coal seam floor of roadway

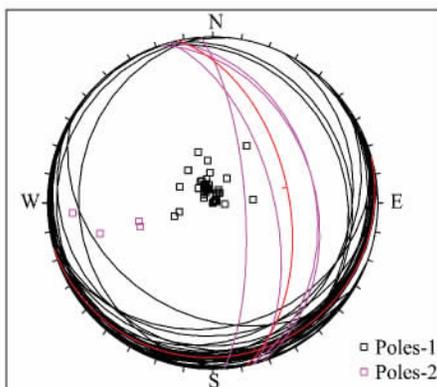


图 13 破裂面产状统计

Fig. 13 Statistical analysis of occurrence based on stereographic projection

WSW-ENE, 与工作面推进方向大致垂直; 同时, 也存在部分大倾角冲击震源(图中 Poles-1 倾角超过 35° , 平均 52°) 其破裂面走向介于 $340^\circ \sim 350^\circ$, 基本与工作面推进方向平行, 进一步分析可知, 大倾角冲击震源全部分布在煤层内, 位于工作面前方 $30 \sim 100 \text{ m}$ 范围内, 加之震源靠近且破裂面倾向实体煤侧, 可以推断这与高应力环境下受载煤体向巷道自由面扩容有关。

3.2.3 褶皱构造区冲击矿压地震学参量分析

(1) 冲击矿压释放能量和地震矩的关系

大部分地震学者认为地震释放能量与地震矩成正比, 但目前对煤矿开采尺度下冲击矿压释放能量与其地震矩之间的关系还未有过相关研究, 以视北煤矿 250204 工作面回采期间冲击事件为例(图 14), 大能量冲击事件地震矩分布相对集中, 其释放能量 E_s 和地震矩 M_0 基本分布在一包络线内, $\ln E_s = -8.8 + 24.6 \exp[-(\ln M_0 - 38.8)^2 / 121.68]$ ($R^2 = 0.9$)。

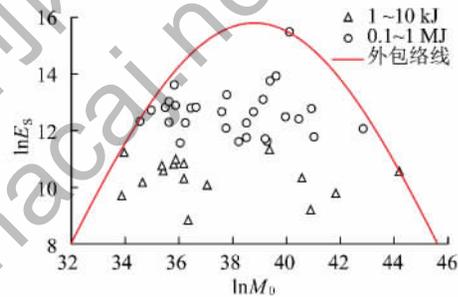


图 14 冲击震源释放能量与地震矩的关系

Fig. 14 Relation between rockburst energy and seismic moment

(2) 冲击震源视应力演化情况

早在 1970 年, Max Wyss 等用传统地震学方法计算了南美海沟系统的 37 个地震视应力, 后期 Choy GL 等利用 NETIC 和 CMT 结果, 估计了全球地震视应力分布; 夏永学等^[21]通过矿震波形分析及反演, 以视应力描述工作面超前支承压分布特征, 视应力分布结果与工作面实际情况较吻合。

本文以工作面回采期间冲击矿压震源视应力描述构造应力和采动应力综合影响下工作面及其周边围岩的应力分布特征。为真实反映回采区域应力分布情况, 对视应力数值进行归一化处理式(13), 得到的工作面及其周边视应力演化如图 14 所示。

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i - \min(\sigma)}{\max(\sigma) - \min(\sigma)} \sigma_k \quad (13)$$

其中 σ_i 为理论计算视应力结果; σ_k 为实测地应力背景值; σ_i^* 为归一化处理后的应力值。

由图 15(a) 可知, 250204 工作面回采初期, 高视

应力区域主要集中在向斜轴部,最高值达到 24.0 MPa;工作面回采中期(图 15(b)),高视应力区域虽有所转移,但仍集中在向斜轴部与背斜轴部之间,视应力最高值达到 23.2 MPa;随着工作面回采远离向斜轴部(图 15(c)),构造应力对工作面影响相对降低,高视应力区域集中分布在推进面前后,此时

工作面超前支撑压力开始占据主导,且最高视应力值降至 14.0 MPa。以上应力分布结果与实测情况基本吻合,水平构造应力在该区域原岩应力中占据主导,向斜轴部为高应力集中区域,近向斜区域冲击危险程度较高,随工作面推进远离向斜轴部,工作面冲击危险性有所降低。

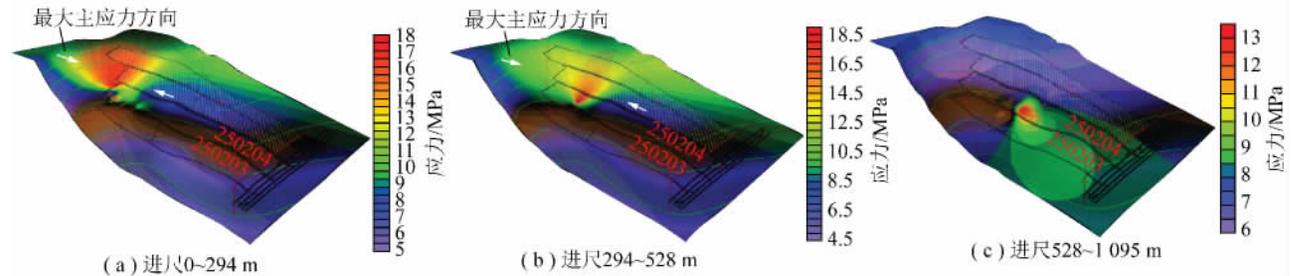


图 15 2502 采区视应力分布

Fig. 15 Apparent stress distribution in 2502 mining area

图 16, 17 为 50 起冲击矿压发生时间间隔及释放能量情况、巷道底臃量统计,由图可知,随工作面回采远离向斜轴部,冲击矿压发生时间间隔快速增大、释放能量快速减小、巷道底臃量逐渐降低,说明随工作面回采远离向斜轴部,煤岩体达到临界冲击应力的时间增长、冲击释放的能量减小、冲击破坏程度降低,工作面冲击危险性相对降低。冲击震源时空分布及巷道冲击显现结果与视应力分布情况较吻合,说明通过冲击震源视应力反演工作面应力分布具有一定可行性。

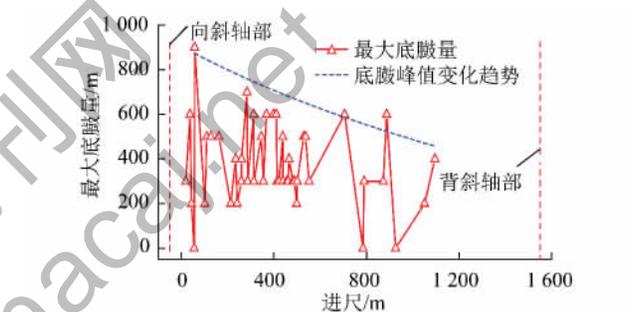


图 17 工作面底臃量统计

Fig. 17 Statistics of floor heave

面走向多垂直工作面推进方向,而大倾角($>35^\circ$)震源破裂面多倾向实体煤侧,且其走向多平行于工作面推进方向。

(3) 褶皱构造区冲击矿压震源辐射能量和地震矩基本分布在一包络线内,随震源辐射能量增大,其地震矩大小分布更加集中;通过冲击震源视应力统计,得到了工作面周边应力分布演化情况,与现场冲击震源时空分布及冲击显现结果拟合较好,说明通过冲击矿压震源视应力反演工作面应力分布具有一定可行性。

(4) 对褶皱构造区冲击矿压震源机制进行了初步探索,本文提出的褶皱构造区冲击矿压震源机制分析方法及其结果对类似褶皱构造环境中采掘扰动下煤岩体破坏特征、冲击矿压及其孕育机制的研究有一定参考价值。

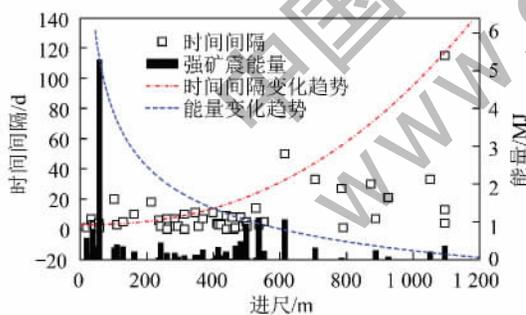


图 16 冲击矿压时间间隔、释放能量与工作面进尺的关系

Fig. 16 Relationships between rockburst occurrence time interval, rockburst energy and footage

4 结论和讨论

(1) 褶皱构造区工作面回采扰动下冲击矿压震源破裂类型全部表现为拉张破裂,主要表现为水平挤压构造应力作用下,高静载区域煤岩体的应力释放,该破裂类型明显区别于断层活化引起的煤岩体破裂,震源矩张量以非双力偶部分占主导。

(2) 受褶皱构造及工作面采动影响,冲击震源破裂面产状有明显分化趋势,小倾角($<35^\circ$)震源破裂

参考文献(References):

[1] 贺虎, 袁林名, 巩思源, 等. 高构造应力区矿震规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 7-13.
He Hu, Dou Linming, Gong Siyuan, et al. Study of mining shock

- in high tectonic stress zones [J]. *Journal of China University of Mining and Technology* 2011, 40(1): 7-13.
- [2] 陈国祥. 最大水平应力对强矿震的作用机制及其应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
Chen Guoxiang. Mechanism research of the maximum horizontal stress on rockburst and its application [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [3] 姜福兴, 苗小虎, 王存文, 等. 构造控制型冲击地压的微地震监测预警研究与实践 [J]. *煤炭学报* 2010, 35(6): 900-903.
Jiang Fuxing, Miao Xiaohu, Wang Chunwen, et al. Prediction research and practice of tectonic controlled coal burst by microseismic monitoring [J]. *Journal of China Coal Society* 2010, 35(6): 900-903.
- [4] Drzewiecki J, Kabiesz J. Dynamic events in roof strata-occurrence and prevention [J]. *Coal Science & Technology Magazine* 2008(1): 55-58.
- [5] McGarr A. Energy budgets of mining-induced earthquake and their interactions with nearby stopes [J]. *Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 2000, 37: 437-443.
- [6] Luo X, Hatherly P, Wang S. Mapping of tensile failures in longwall mining through new microseismic procedures [R]. Australia: Acarp Project, 2001.
- [7] 曹安业, 奚林名. 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(S2): 3833-3839.
Cao Anye, Dou Linming. Analysis of focal mechanism caused by rupture of stope roof [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2008, 27(S2): 3833-3839.
- [8] 曹安业, 奚林名, 江衡, 等. 采动煤岩不同破裂模式下的能量辐射与应力降特征 [J]. *采矿与安全工程学报* 2011, 28(3): 350-355.
Cao Anye, Dou Linming, Jiang Heng, et al. Characteristics of energy radiation and stress drop in different failure modes of mining-induced coal-rock mass [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering* 2011, 28(3): 350-355.
- [9] 柴金飞, 金爱兵, 高永涛, 等. 基于矩张量反演的矿山突水孕育过程 [J]. *工程科学学报* 2015, 37(3): 267-274.
Chai Jinfei, Jin Aibing, Gao Yongtao, et al. Water inrush inoculation process in mines based on moment tensor inversion [J]. *Chinese Journal of Engineering* 2015, 37(3): 267-274.
- [10] Stec K. Focal mechanisms of mine-induced seismic events an explanation of geomechanical process in the area of longwall 6 seam 510 in hard coal mine Bobrek-Centrum [J]. *Archives of Mining Sciences* 2002, 57(4): 871-886.
- [11] Stec K. Geomechanical conditions of causes of high-energy rock mass tremors determined based on the analysis of parameters of focal mechanisms [J]. *Journal of Sustainable Mining* 2015, 14(1): 55-65.
- [12] Krystyna Stec, Jan Drzewiecki. Mine tremor focal mechanism: an essential element for recognizing the process of mine working destruction [J]. *Acta Geophysica* 2012, 60(2): 449-471.
- [13] Aki Keiiti, Richards Paul G. *Quantitative Seismology. Theory and methods* [M]. San Francisco: W.H. Freeman, 1980.
- [14] Brune J N. Tectonic stress and spectra of seismic shear wave from earthquake [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(136): 4997-5009.
- [15] Knopoff L, Randall M J. The compensated linear-vector dipole: A possible mechanism for deep earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1970, 75(26): 4957-4963.
- [16] Fitch T J, McCowan D W, Shields M W. Estimation of seismic moment tensor from teleseismic body wave data with application to intraplate and mantle earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1980, 85(B7): 3817-3828.
- [17] Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology*. 2nd ed [M]. Sausalito, CA: University Science Book, 2002.
- [18] Zutani Y. Radiated energy from the mid Niigata Japan earthquake of October 23, 2004, and its aftershocks [J]. *Geophys. Res.* 2005, 32: L21313.
- [19] Silver P G, Jordan T H. Optimal estimation of scalar seismic moment [J]. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1982, 70: 755-787.
- [20] 曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
Cao Anye. Research on seismic effort of burst and failure of coal-rock mass associated with mining and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [21] 夏永学, 蓝航, 毛德兵, 等. 基于微震监测的超前支承压力分布特征研究 [J]. *中国矿业大学学报* 2011, 40(6): 868-873.
Xia Yongxue, Lan Hang, Mao Debing, et al. Study on the lead abutment pressure distribution based on microseismic monitoring [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2011, 40(6): 868-873.