

基于震源机制解析的巨厚覆岩矿震破裂机制

白贤栖¹, 曹安业¹, 刘耀琪¹, 王常彬², 杨旭³, 赵迎春⁴, 杨耀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 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116; 4. 内蒙古昊盛煤业有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:鄂尔多斯矿区侏罗系煤层覆岩中常见巨厚层状砂岩组, 为了解释和量化巨厚覆岩下煤层开采矿震破裂机制与顶板破断特征, 基于震动波 P 波辐射位移场与相对矩张量反演方法, 提出了以震源群为单位、微震台站为对象构建反演矩阵进行煤矿矿震震源机制反演, 提高了反演效率与准确性, 求解了巨厚覆岩下实体煤段与临空段工作面回采诱发大能量矿震事件的震源机制, 定量分析了顶板破裂演化特征与震动波辐射影响方位。结果表明: 巨厚覆岩下临空段工作面回采白垩系巨厚砂岩层开始产生破断, 地表沉降量快速上升, 开始出现 100 kJ 以上的矿震事件, 矿震分布较实体煤阶段更为密集; 大部分大能量矿震事件位于采空区后方, 与煤层上方厚层顶板破断、滑移密切相关; 巨厚覆岩下煤层开采诱发的震源顶板张拉破裂占比 85% 以上, 临空段回采期间震源有向上扩展的趋势, 剪切滑移破裂相对实体煤回采阶段有所增加; 破裂面走向方向大致与工作面推进方向一致或与工作面推进方向成“X”夹角, 但临空回采阶段相较实体煤阶段走向“X”夹角由 30° 增加至 45°; 震源破裂面倾角 0°~30°, 占比 50% 左右, 顶板以水平离层张拉、顶板回转压缩失稳为主, 产生的 P 波大多向下方采空区传播, 对工作面回采影响较小; 仅部分顶板断裂张拉与剪切滑移失稳产生的 P 波向周围采场传递, 可能对工作面影响较大。巨厚覆岩型矿震的防治思路可从弱化巨厚覆岩的整体性、使巨厚覆岩结构分层破断的角度出发, 降低巨厚覆岩整体破断诱发矿震对工作面冲击危险性的影响。

关键词: 巨厚覆岩; 矿震; 震源机制; 矩张量反演; 破裂面产状

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)11-4024-12

Mine earthquake mechanism of extremely thick strata based on focal mechanism analysis

BAI Xianxi¹, CAO Anye¹, LIU Yaoqi¹, WANG Changbin², YANG Xu³, ZHAO Yingchun⁴, YANG yao¹

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Exploration and Intelligent Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Inner Mongolia Haosheng Coal Industry Co., Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: In the Ordos mining area of North China, the Jurassic coal seam is commonly overlain by extremely thick cretaceous sandstone strata. Based on the seismic displacement field and relative moment tensor inversion method, this paper investigates the mine earthquake mechanism and roof fracture characteristics of coal seams under extremely thick strata. In

收稿日期: 2022-11-25 修回日期: 2023-01-21 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1731

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274098, U21A20110); 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3004603)

作者简介: 白贤栖 (1995—), 男, 重庆酉阳人, 博士研究生。E-mail: baixianxi@cumt.edu.cn

通讯作者: 曹安业 (1982—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师。E-mail: caoanye@163.com

引用格式: 白贤栖, 曹安业, 刘耀琪, 等. 基于震源机制解析的巨厚覆岩矿震破裂机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4024-4035.

BAI Xianxi, CAO Anye, LIU Yaoqi, et al. Mine earthquake mechanism of extremely thick strata based on focal mechanism analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4024-4035.



移动阅读

this study, by using seismic source groups as units and microseismic stations as objects, the source mechanism of mine earthquakes is inverted by constructing an inversion matrix, which greatly improves the inversion efficiency and accuracy. The focal mechanism of large-energy mine earthquakes located in solid coal section and goaf section under extremely thick strata is calculated. The characteristics of roof fracture evolution and the influence of vibration wave radiation are quantitatively analyzed. The results show that the extremely thick strata of Cretaceous goaf start to break when the panel below retreats along goaf. During this period, the surface subsidence increases rapidly, and the significant mine earthquakes with energy above 100 kJ begin to occur, and the mine earthquake distribution is more concentrative than that in the solid coal stage. Most of the large-energy mine earthquakes are located behind the goaf, which is closely related to the breakage and slide of the thick roof. Roof tension rupture accounts for more than 85% of the mine earthquakes. During mining along goaf, the seismic sources tend to expand upward, and more shear slip ruptures are presented compared with that in the solid coal mining stage. The strike of the fracture surface has a similar direction or an angle of “X” with the advancing direction. However, compared with that in the solid coal stage, the angle of “X” during mining along goaf increases from 30° to 45°. For the source rupture surface, the dip angle of between 0°–30° accounts for about 50% of the total. The failure type of roof is dominated by horizontal separation tension and roof rotation compression. The generated P waves mostly propagate to the goaf below, which causes a minor influence on the mining face. Only a small part of the P waves propagate to the surrounding working face, which may pose a great impact on the working face. The prevention and control strategy on the extremely-thick-strata type mine earthquakes can be conducted by weakening the integrity of thick strata and making thick strata break in tiers, aiming to reduce the rockburst risks to the working face induced by the breakage of the whole thick strata.

Key words: extremely thick strata; mine earthquake; focal mechanism; moment tensor inversion; distribution of fracture surface

鄂尔多斯盆地侏罗纪煤层是我国西部煤炭开发重要的主采煤层^[1],其上覆岩层中常见巨厚层状砂岩组,巨厚覆岩下煤层开采大能量矿震事件频发,2021年鄂尔多斯矿区先后发生6次地震震级2.0级以上的强矿震,严重制约了矿井的正常生产^[2]。同时,由于煤系地层非均质性强且多变,矿震震源的破裂过程与震动波响应特征难以明晰^[3],如何准确判识大能量矿震的产生机制、破裂面信息、震动波传播特征等已成为鄂尔多斯矿区安全高效开采的重要难题。因此,深入研究巨厚覆岩下煤层开采矿震源破裂机制,是保障我国西部煤炭资源安全高效开采的重大需求。

针对采矿诱发煤岩体破裂机制的研究,国内外学者做了较多积极的探索,早期 GIBOWICZ 等^[4]通过研究波兰煤矿与铜矿的矿震震源机制,发现矿山煤炭破裂与天然地震的震源机制具有一定的相似性,高能级矿震事件主要由断层面剪切滑移破裂引起; MC-GARR 等^[5]通过进一步研究采场附近的矿震事件,认为拉伸、内爆等非剪切破裂方式与板状矿山开采更为密切相关;井广成等^[6]研究了褶皱构造区冲击地压震源破裂机制,得到褶皱构造区受水平挤压应力影响大多表现为张拉破裂;陈栋等^[7]基于 Brune 模型研究了千秋煤矿矿震震源破裂机制,受断层滑动影响千秋煤矿典型矿震事件基本均为剪切滑移破裂;WU 等^[8]研

究了巨厚红层破断诱发强矿震机制,发现巨厚红层剪切、张拉破裂均会诱发强矿震,但剪切滑移破裂更容易诱发地面有震感的强矿震;HE 等^[9]研究了厚硬顶板不同位置破断诱发强矿震机制,得到工作面中部采空区顶板破断极易发生张拉破裂。上述研究证明了矩张量理论用于矿震破裂机制反演的可能性,但以上仅简单给出了震源的破裂类型,对于震源破裂过程、破裂面信息等缺乏定量描述。

同时,上述研究均采用绝对矩张量反演方法求解,受震动波传播介质的影响难以准确求解格林函数,反演精度较低^[10]。为了消除过分依赖格林函数的缺点,德国学者 DAHM^[11]提出了相对矩张量反演方法。MANTHEI 等^[12]对比分析了 P 波和 S 波的绝对矩张量法、相对矩张量法对盐岩水力压裂声发射事件的震源机制反演结果;陈凡^[13]提出了适用于煤矿矿震震源机制的相对矩张量反演算法,优化了矩张量反演矩阵的构建;曹安业等^[2]等基于相对矩张量反演原理提出以震源群为单位进行震源机制反演计算,并优化了矿震震源破裂类型判识方法。以上研究表明针对煤矿地层条件复杂、微震台站挪移频繁等特点,采用相对矩张量反演煤矿震源机制具有反演精度高、计算效率快等优点。

因此,笔者以相对矩张量反演方法为基础,结合

震动波 P 波辐射位移场,提出以微震台站为对象构建反演矩阵进行煤矿矿震震源机制反演,并采用顶板爆破数据,验证了该方法的适用性。同时,求解了巨厚覆岩下实体煤段与临空段工作面回采诱发大能量矿震事件的震源机制,定量分析了顶板破裂演化特征与震动波辐射影响方位;基于巨厚覆岩破断诱发强矿震机制,给出了巨厚覆岩型矿震的防治思路。以期为巨厚覆岩下煤层开采矿震的预测预报、危险性评估以及灾害治理等提供参考。

1 工程背景

1.1 巨厚覆岩分布情况

鄂尔多斯某矿位于内蒙古东胜煤田呼吉尔特矿区东南部,矿井从老到新发育有三叠系上统延安组(T_{3y})、侏罗系中下统延安组(J_{1-2y})、侏罗系中统直罗组(J_{2z})、侏罗系中统安定组(J_{2a})、白垩系下统志丹群(K_{1zh})和第四系(Q),其中,含煤地层为侏罗系中下统

延安组。通过排查全井田勘探钻孔资料,发现井田范围内存在一层距煤层约 300 m,层厚为 250~350 m 的白垩系砂岩层,该岩层以中砂岩、细砂岩、粉砂岩等厚层砂岩为主,局部夹薄层泥质砂岩,具有单层厚度大、整体性好、层理较发育等特点。矿井白垩系砂岩厚度等值线如图 1 所示。

矿井 SOS 微震监测系统与工作面布置如图 1 所示,采用南北两翼开采,其中南翼 221_上08 工作面开采 2-2 煤层,煤层埋深 640~660 m,平均厚度 9.26 m,采用综合放顶煤开采,煤层及顶底板均具有弱冲击倾向性。根据 221_上08 工作面地表钻孔探测情况^[14],实体煤段工作面回采时,白垩系岩层完整性较好、无裂隙产生,白垩系岩层下方产生裂隙;临空段工作面回采时,白垩系岩层内套管断开,开始产生裂隙。表明工作面进入临空段回采,随采空区面积增加,采空区低位岩层不断破断,顶板破裂高度逐渐扩展至高位白垩系砂岩层。

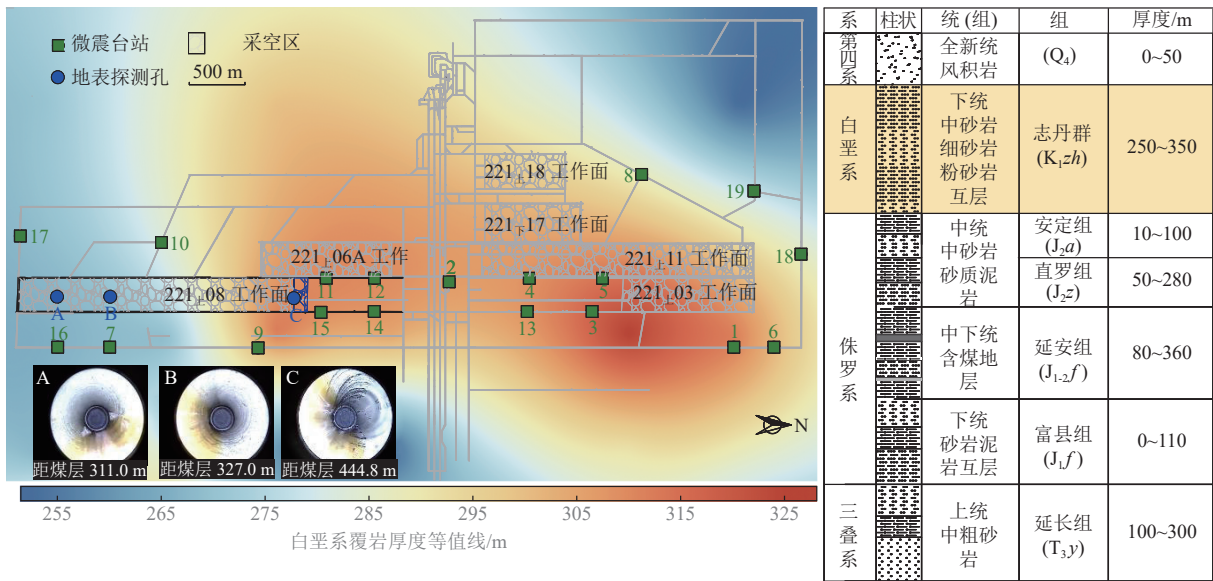


图 1 鄂尔多斯某矿工作面布置及白垩系巨厚覆岩厚度分布等值线

Fig.1 Contour map of working face layout and thickness distribution of Cretaceous extremely thick strata in Ordos Mine

1.2 矿震活动情况

221_上08 工作面 2019 年 12 月开始回采,2021 年 4 月进入 221_上06A 采空区段回采,截至 2021-12-31,工作面回采期间地表沉降与矿震监测情况如图 2 所示。工作面回采前段四周均为实体煤,地表沉降量较为稳定,维持在 0.2 m 左右;工作面进入临空段回采后,临空段地表沉降量开始增加,2021-08-19,临空段地表沉降量增加至 0.4 m,开始出现地面有震感的强矿震;随后临空段地表沉降量迅速增加,在 221_上08 采空区后方达到 0.9 m。

同时,矿震分布情况与地表沉降监测重合度较高,

实体煤回采阶段,均以 1×10^5 J 以下的矿震事件为主,在地表沉降最大的区域,矿震分布较为密集;临空回采阶段,大能量矿震分布较实体煤阶段更为密集,并且地震台网开始监测到 2.0 级以上的强矿震事件,社会影响剧烈。根据矿震剖面定位图可知,221_上08 工作面回采期间大部分大能量矿震位于工作面垮落带区域,高位顶板分布较少;但临空回采阶段大能量矿震事件有向高位扩展的趋势,并且高位巨厚砂岩层破断,开始出现地面有震感的强矿震。

统计工作面回采期间矿震数据与相对工作面推进位置关系^[15],如图 3 所示。实体煤段工作面回采矿

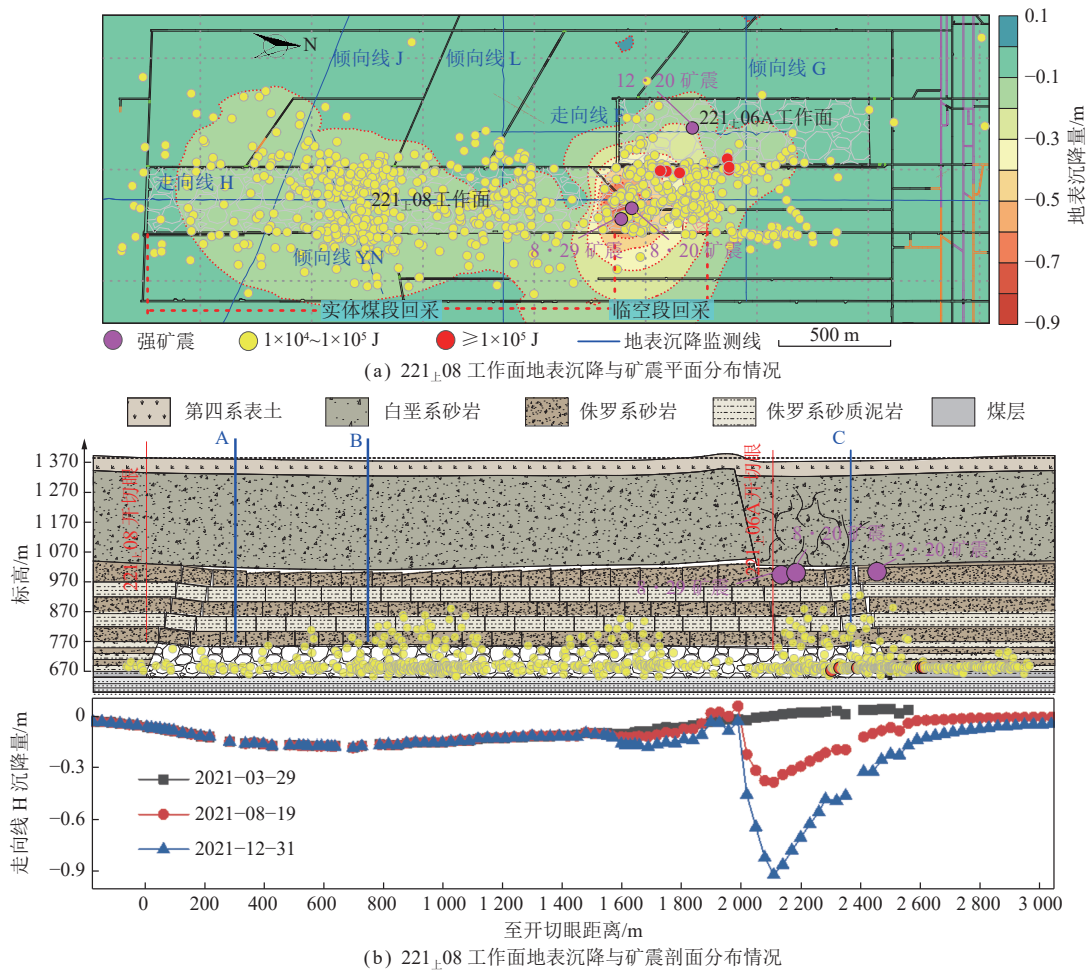


图 2 221_上08 工作面回采期间地表沉降与矿震分布

Fig.2 Map of surface subsidence and mine earthquake distribution during mining of 221_{upper}08 working face

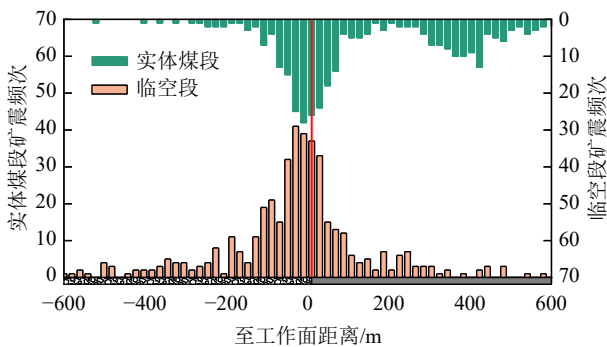


图 3 工作面相对推进位置矿震统计

Fig.3 Microseismic statistics map of relative advance position of working face

震事件大多位于-160~80 m, 其中工作面后方矿震频次占比 57%; 临空段工作面回采矿震事件主要位于-100~60、300~420 m 两个区间, 其中 300~420 m 的矿震事件大多为顶板爆破诱发, 占比约 21%, 其余位于工作面后方的矿震频次占比 60%。

221_上08 工作面地质构造较为简单, 断层、褶曲等构造不发育, 仅煤层上方存在多层厚层砂岩层, 其中

白垩系砂岩层累计厚度达 250 m 以上。工作面回采期间大能量矿震事件频发, 统计发现大部分矿震事件由采空区后方顶板破断诱发, 同时当工作面进入临空段回采时, 大能量矿震事件更密集, 顶板破断高度向上扩展。因此, 工作面回采期间大能量矿震事件与工作面后方采空区顶板破断、滑移密切相关, 但巨厚覆岩下开采顶板破断诱发大能量矿震事件的破裂机制、破裂面信息等尚不明确。

2 矿震震源破裂机制求解方法

2.1 矿震震源破裂辐射模式

震源破裂的过程较为复杂, 但大多数破裂可以描述为震源在平面上的滑动, 因此可以用破裂面的走向角、倾向角和沿破裂面的滑动角、拉伸角来描述震源^[16], 如图 4 所示。

破裂面方位由正北向顺时针测量的走向角 $\phi(0^\circ\sim 360^\circ)$ 和破裂面的倾角 $\theta(0^\circ\sim 90^\circ)$ 确定; 破裂面运动方向由上盘相对下盘运动的任意位移矢量 Δu 表示, n 为垂直破裂面的标准矢量, d 为破裂面的滑动矢

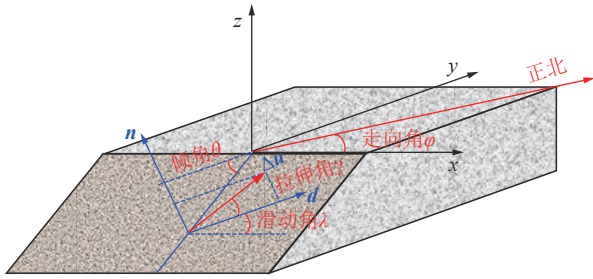


图 4 震源破裂几何学

Fig.4 Source fault geometry

量,滑动定义为破裂面沿走向逆时针测量的滑动角 $\lambda(-180^\circ\sim 180^\circ)$,与滑动矢量至位移矢量夹角的拉伸角 $\gamma(0^\circ\sim 90^\circ)$, 0° 为纯剪切破裂, 90° 为纯张拉破裂)。

破裂面滑动时,破裂面两侧将向相反的方向移动,当破裂面一侧向监测台站移动时,则第一运动为压缩变形;远离台站的一侧为张拉变形,这在微震传感器上分别对应初动向上或向下的运动,如图 5 所示^[17]。图中,破裂面上的 2 个箭头分别表示破裂面的相对滑动方向,同时箭头也可认为是驱动运动的力,震源力的辐射花样可用力偶来描述。

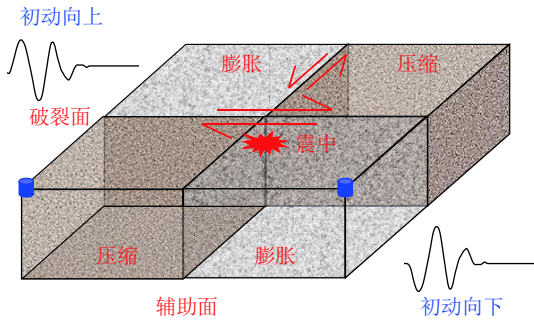


图 5 不同方向上相对破裂面的第 1 次运动

Fig.5 First motion of observed at different directions relative to the fault plane for a strike-slip fault

煤岩体在震源力的作用下将产生 2 种变形,分别以 2 种不同的波进行传播,即纵波(P 波)和横波(S 波,分为垂直剪切横波 SV 波、水平剪切横波 SH 波),其波速分别为 v_p 和 v_s 。其中 P 波振动方向与传播方向平行,质点产生水平压缩运动,对煤岩体向外突出影响较大;S 波振动方向与传播方向垂直,质点产生纵向剪切运动,对煤岩体破碎滑移影响较大。在各向同性、无界、均匀的弹性介质中,远场位移场由力源 $f(r, t)$ 产生的位移^[18]为

$$\begin{cases} u^P = \frac{1}{4\pi\rho v_p^3 r} f' \left(t - \frac{r}{v_p} \right) r^P \boldsymbol{\gamma} \\ u^{SV} = \frac{1}{4\pi\rho v_s^3 r} f' \left(t - \frac{r}{v_s} \right) r^{SV} \boldsymbol{\theta} \\ u^{SH} = \frac{1}{4\pi\rho v_s^3 r} f' \left(t - \frac{r}{v_s} \right) r^{SH} \boldsymbol{\phi} \end{cases} \quad (1)$$

式中, u^P 、 u^{SV} 、 u^{SH} 分别为 P 波、SV 波、SH 波的远场位移; ρ 为密度; r 为震源与监测点之间的距离; $f(t)$ 为矿震的点源作用力; t 为时间; r^P 、 r^{SV} 、 r^{SH} 分别为 P 波、SV 波、SH 波的远场项辐射花样; $\boldsymbol{\gamma}$ 、 $\boldsymbol{\theta}$ 、 $\boldsymbol{\phi}$ 均为球坐标系统的单位矢量,其中, $\boldsymbol{\gamma}$ 为震源与监测点的径向方向, $\boldsymbol{\theta}$ 为正切于子午线方向, $\boldsymbol{\phi}$ 为正切于在 z 方向上无向量分量的平行线,即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\gamma} = [\sin \theta \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta] \\ \boldsymbol{\theta} = [\cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi & -\sin \theta] \\ \boldsymbol{\phi} = [-\sin \varphi & \cos \varphi & 0] \end{cases} \quad (2)$$

当巨厚覆岩结构破断以水平张拉破裂为主时,主要在 x 方向产生一对水平拉力,在破裂面为 (x, z) 平面(走向角 $\varphi=0^\circ$,倾角 $\theta=90^\circ$),P 波、S 波($u^S = \sqrt{(u^{SV})^2 + (u^{SH})^2}$)的震动位移场辐射花样如图 6(a)、(b) 所示;当巨厚覆岩结构以剪切滑移破裂为主时,主要产生 2 对相互正交的双力偶,以近水平岩层层间滑移为例,P 波、S 波的震动位移场辐射花样如图 6(c)、(d) 所示。

不同顶板破裂方向下震动波产生的位移场辐射花样不同^[19]。通过确定震源、台站位置,判别 P 波初动方向及震动波位移振幅,可确定震源破裂类型及破裂面产状。顶板张拉破裂产生向外压的压缩 P 波,对应的 P 波初动方向均为“+”;顶板剪切滑移破裂产生对称的压缩波与膨胀波,对应的 P 波初动方向在空间上呈四象限分布(P 波初动方向“+”表示震源位于监测台站上方、且波形初动方向向上,或震源位于监测台站下方、且波形初动方向向下;反之则为“-”^[20])。

2.2 矿震震源破裂机制求解

矿震主要由高应力环境下煤岩体突然破裂产生,通常采用一个等效力模型来近似描述震源。随着地震学的发展,双力偶模型逐渐得到了普遍的认可^[21],该模型用 9 组力与力臂方向的组合来表达震源破裂的等效力,这 9 项力偶矩构成的集称为震源的矩张量。同时,该震源等效力所产生的位移则为各个力偶所产生的位移总和,AKI 等^[22]研究表明,监测记录的远场位移与矩张量之间满足如下线性关系:

$$u_k(x, t) = M_{ij} [G_{k,ji}^n * s(t)] \quad (3)$$

式中, $u_k(x, t)$ 为 t 时刻在点 x 产生的远场位移; M_{ij} 为矩张量分量; $G_{k,ji}^n$ 为格林函数,表示模型介质的单位脉冲响应,描述了介质对震动波传播效应的影响; $s(t)$ 为震源时间函数;* 表示卷积运算。

由于低频位移振幅的计算无需任何源模型的假设,且振幅是相对平直的常数,其大小正比于震动波

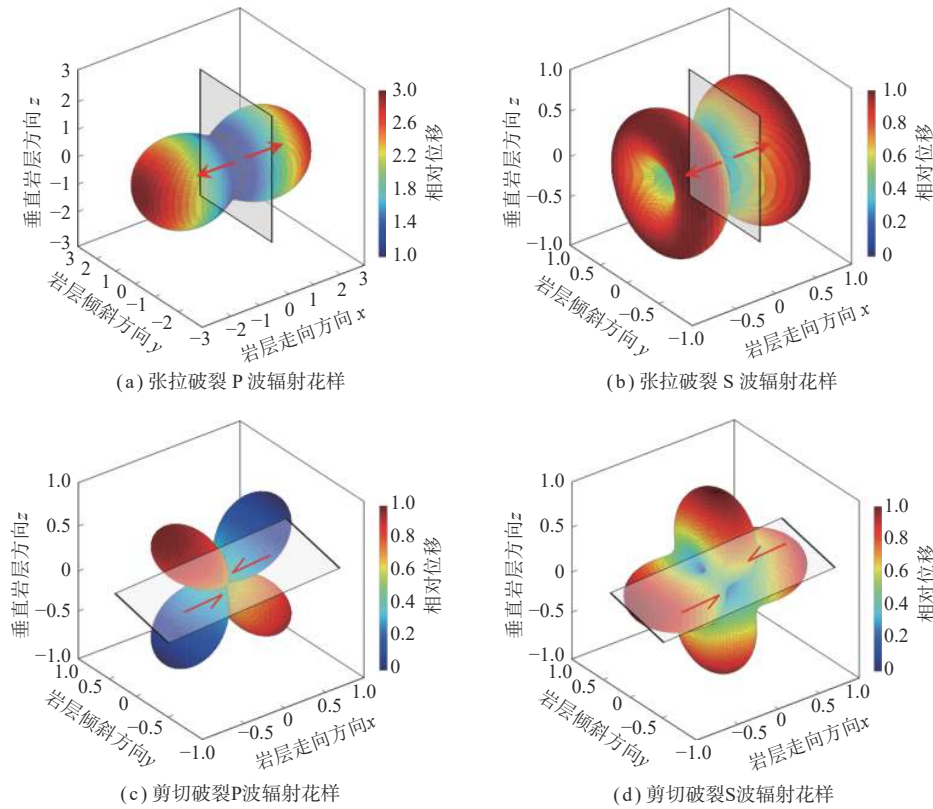


图 6 矿震震源位移场辐射花样

Fig.6 Source displacement field radiation pattern of mine earthquake

标量矩, 因此, 可采用低频位移振幅来表征煤岩破裂的远场位移^[23], 计算公式为

$$S_{V2} = 2 \int_0^\infty V_0^2(f) df \quad (4)$$

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

$$u = \kappa \sqrt{\frac{4S_{D2}^{3/2}}{S_{V2}^{1/2}}} \quad (6)$$

式中, S_{D2} 、 S_{V2} 分别为度平方谱和位移平方谱时域积分结果; $V_0^2(f)$ 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; u 为监测记录波形的低频位移; κ 为 P 波初动方向, 初动方向为“+”取值+1, 初动方向为“-”则为-1。

根据格林函数的求解方式不同, 可将矩张量求解分为绝对、相对以及混合矩张量反演。相对矩张量反演认为震源群内各震源传播到同一台站的线性部分是相同的, 通过消除格林函数中的线性部分, 以微震台站为对象构建反演矩阵求解^[24]。相对矩张量反演原理为

$$\begin{cases} u_{ij}^n = I_j^n \sum_{R=1}^6 m_{Ri} a_{jR,i} \\ \frac{u_{1j}^n}{\sum_{R=1}^6 m_{R1} a_{jR,1}} = I_j^n = \frac{u_{2j}^n}{\sum_{R=1}^6 m_{R2} a_{jR,2}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, u_{ij} 为第 i 个震源被第 j 个台站观测到的 n 方向位移, i 为震源编号, j 为台站编号, $n=1,2,3$; I_j 、 $a_{jk,i}$ 分别为格林函数简化的线性部分和射线权重部分, 其中 $a_{jR,i}$ 由射线的离源角和方位角决定; m_{Ri} 为震源矩张量分量的线性组合; R 为矩张量的 6 个主轴方向。

之后, 以微震台站为对象构建 G 矩阵

$$\begin{pmatrix} \mathbf{0}^1 \\ \mathbf{0}^2 \\ \mathbf{0}^3 \\ \vdots \\ \mathbf{0}^{j-1} \\ \mathbf{0}^j \\ \mathbf{1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}^1 \\ \mathbf{G}^2 \\ \mathbf{G}^3 \\ \vdots \\ \mathbf{G}^{j-1} \\ \mathbf{G}^j \\ \mathbf{1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{S}^1 \\ \mathbf{S}^2 \\ \mathbf{S}^3 \\ \vdots \\ \mathbf{S}^{i-1} \\ \mathbf{S}^i \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, \mathbf{G}^j 为 j 台站接收震源所构成的矩张量反演系数矩阵, 为 $i_j(i_j-1)/2 \times 6i$ 矩阵; \mathbf{S}^i 为震源群内 i 震源矩张量构成的列矩阵。

根据上述反演方法得到震源等价矩张量矩阵后, 为进一步确定震源的破裂成分和破裂特征, 需对矩张量矩阵进行分解。相关研究表明, 矩张量矩阵 \mathbf{M} 可分解为各项同性 (ISO) 部分、补偿线性矢量偶极子 (CLVD) 部分和双力偶 (DC) 部分:

$$M = P \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(ISO) (CLVD) (DC)

其中, P 、 C 、 D 分别为各项同性 (ISO) 部分、补偿线性矢量偶极子 (CLVD) 部分和双力偶 (DC) 部分的特征值。各项同性 (ISO) 部分表征震源的体积变化量, 即膨胀 (压缩); 补偿线性矢量偶极子 (CLVD) 部分主要表征煤岩体单轴压缩和张拉破坏; 双力偶 (DC) 部分则为震源的剪切破裂成分, 具体表现为断层滑移或顶板错动滑移破裂。根据双力偶部分所占比例可定量确定震源的破裂类型^[25]:

$$\begin{cases} P_{DC} \geq 60\%, \text{ 剪切破裂} \\ P_{DC} \leq 40\%, \text{ 拉张破裂} \\ 40\% < P_{DC} < 60\%, \text{ 混合破裂} \end{cases} \quad (10)$$

同时, 震源事件的矩张量可用破裂面位置与运动矢量表示^[26], 即

$$M = wS [\lambda_1 v_o l_o \delta_{pq} + \mu(v_p n_q + v_q l_o)] \quad (11)$$

式中, M 为矿震矩张量形式; o, p, q 为空间坐标系下的 3 个方向; w 为破裂面运动方向的位移量; S 为破裂面表面积; λ_1 和 μ 为拉梅常数; v 为破裂面运动方向; l 为破裂面法向方向。

将矩张量矩阵本征化, 可得到破裂面产状与矩张量特征值的关系

$$\begin{cases} l = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_1 + \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_3 \\ v = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_1 - \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_3 \end{cases} \quad (12)$$

其中, M_1 、 M_2 、 M_3 为矩张量的最大、中间和最小特征值; e_1 、 e_3 分别为矩张量的最大、最小特征值对应的特征矢量。根据破裂面的空间矢量, 可进一步获得破裂面的产状信息, 包括破裂面走向角、倾向角以及滑动角等。

2.3 顶板爆破信号震源机制验证

221_上08 工作面为降低顶板破断诱发大能量矿震对工作面的冲击扰动效应, 在工作面超前 300 m 外两巷道施工顶板爆破孔, 孔深 70 m、倾角 70°、装药 35 m、装药量 3 kg/m, 顶板爆破孔倾向布置如图 7 所示。为验证相对矩张量反演方法对巨厚覆岩下煤层开采震源破裂机制的适用性, 选取 221_上08 工作面进入临空

回采阶段后, 两巷道顶板爆破数据进行震源机制求解 (共 60 个), 两巷道顶板爆破震源沙滩球分布情况如图 8 所示。

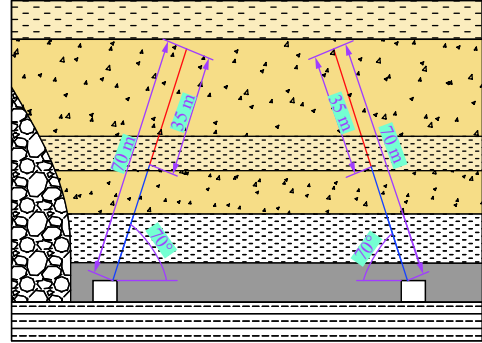


图 7 顶板爆破孔倾向布置

Fig. 7 Layout of roof blasting hole inclination

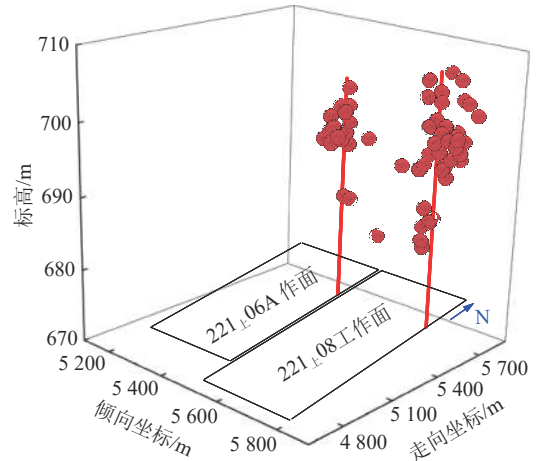
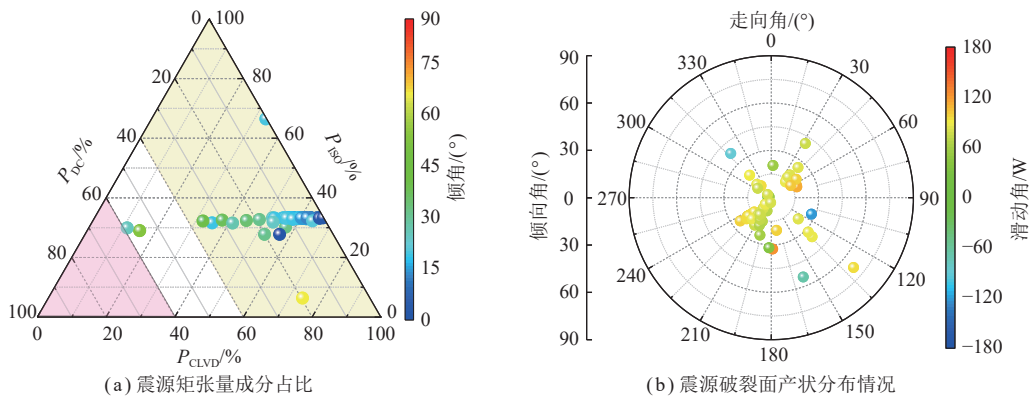


图 8 顶板爆破震源沙滩球分布情况

Fig. 8 Distribution of beach balls in roof blasting source

图 9 为顶板爆破事件的震源机制求解情况, 大部分爆破事件的 CLVD 成分占比较大, 仅有 2 次爆破事件的 DC 部分在 40%~60%, 表明煤岩体主要以爆破产生的张拉破裂为主, 震源位移场向外辐射; 结合破裂面产状信息可知, 爆破震源的走向角各方位均有分布, 但破裂面倾角大多在 30°以下, 表明顶板爆破后破裂面沿钻孔向四周扩散, 但破裂面倾角一般与水平面成 0°~30°。

以爆破震源的平均破裂面产状做震动波辐射花样, 如图 10 所示。顶板爆破孔倾角为 70°, 破裂面平均倾角与水平面成 19.0°, 大致与爆破孔垂直; P 波位移场沿破裂面向外辐射, 在爆破孔倾向方向存在最大值, S 波最大位移方向与爆破孔成 ±45°。因此, 顶板爆破产生的裂纹一般与钻孔方向垂直, 采用相对矩张量求解震源破裂机制与爆破裂纹扩张的实际情况较为吻合。



注: P_{DC} 、 P_{ISO} 、 P_{CLVD} 分别为震源破裂 DC、ISO、CLVD 部分的占比。

图 9 爆破信息震源机制解

Fig.9 Focal mechanism solution of moment tensor of roof blasting information

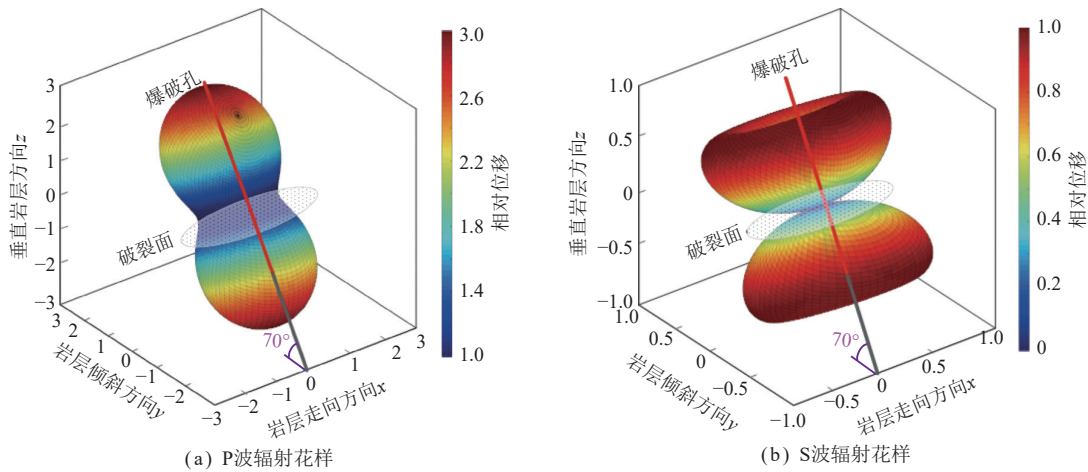


图 10 顶板爆破震动波辐射花样

Fig.10 Roof blasting vibration wave radiation pattern

3 巨厚覆岩下开采矿震震源机制分析

3.1 实体煤段回采矿震震源机制分析

221_上08 工作面实体煤回采阶段,工作面推进约 1 000 m 范围,工作面附近共发生大能量矿震事件 193 起,其空间分布及震源机制求解情况如图 11 所示,大能量矿震大多位于顶板上方 30 m 范围内。统计各震源的破裂类型,得到约 85.5% 的震源 DC 部分 $\leq 40\%$,属于张拉破裂,并且其中 69.1% 为压缩震源;12.5% 的震源 DC 部分在 40%~60%,为混合破裂;仅 2.0% 的震源 DC 部分 $> 60\%$,为剪切破裂,表现为顶板错动滑移。

根据震源破裂面产状分布情况可知,震源破裂面走向角在 30°、90°、150°、210°、330°附近分布较为密集;倾向方向大多分布在 0°~30°,占比约 47.2%,60°~90°以上的占比 20.2%;破裂面滑动角分布较为

均匀,55.4% 的震源具有向下滑动的趋势。表明实体煤回采阶段诱发的大能量矿震事件,大多以顶板张拉破裂、回转压缩为主,仅存在少量剪切滑移破裂;并且破裂面走向方向大致与工作面推进方向一致或与工作面推进方向成约 30°的“X”型分布。

3.2 临空段回采矿震震源机制分析

221_上08 工作面临空段回采期间,工作面推进约 400 m,共发生大能量矿震事件 170 起,其空间分布及震源机制求解情况如图 12 所示,大能量矿震相对实体煤回采阶段分布更密集,有向更高位顶板发育的趋势。

根据震源破裂类型可知,临空段回采期间,震源 DC 部分 $\leq 40\%$ 的占比 85.3%,DC 部分在 40%~60% 的占比 8.2%,DC 部分 $> 60\%$ 的占比大致为 6.5%,相对实体煤回采阶段剪切滑移破裂有所增加。根据震源破裂面产状分布情况可知,震源破裂面走向角在 45°、90°、135°、225°附近分布较为密集,相对实体煤回采阶段走向夹角有所增加;倾向方向上 0°~30°占

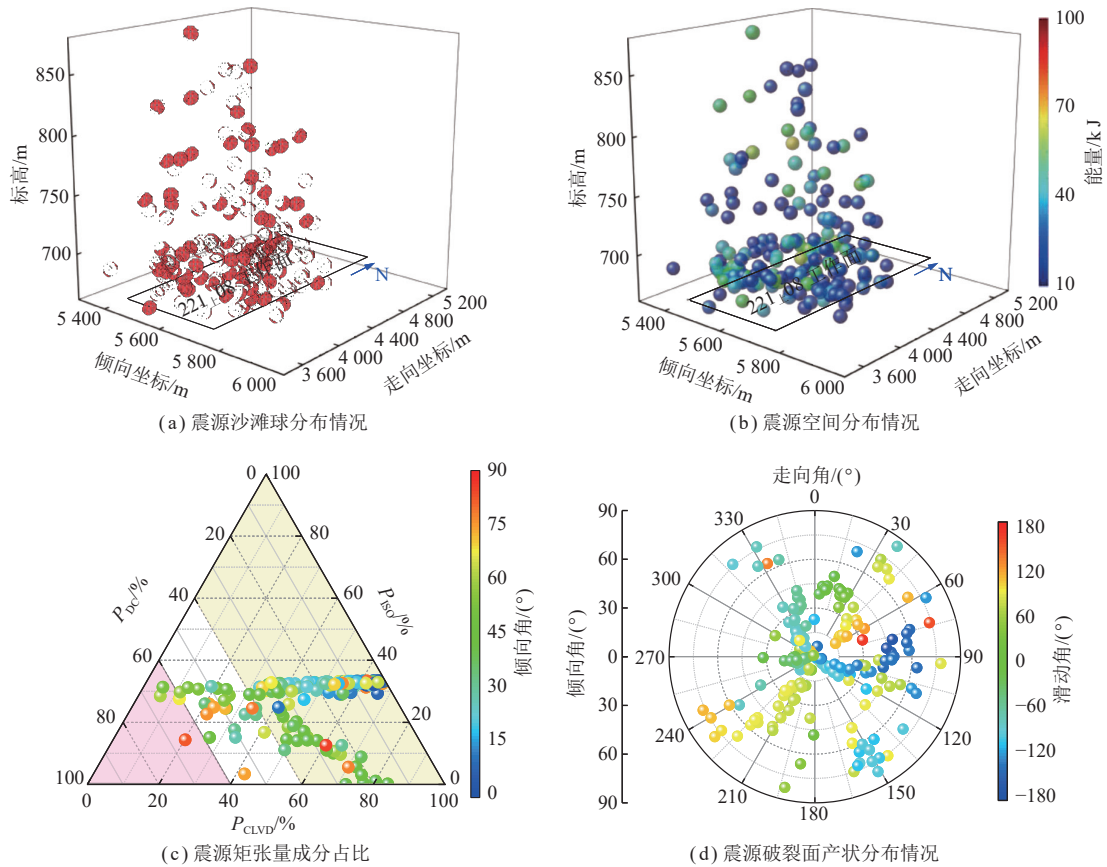


图 11 实体煤段回采矿震震源机制解

Fig.11 Focal mechanism solution of mining earthquake in solid coal section

比为 48.2%， $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的震源占比为 23.5%；破裂面滑动角与实体煤段分布较为相似，53.5% 的震源具有向下滑动的趋势。

综上可知，临空段回采期间诱发的大能量矿震事件有向上扩展的趋势，大多以顶板张拉破裂、回转压缩为主，同时剪切滑移破裂相对实体煤回采阶段有所增加；破裂面产状分布情况与实体煤段回采较为相似，但走向方向“X”夹角有所增加。

同时 221_上08 工作面临空段回采期间多次发生地震震级 2.0 级以上的强矿震，强矿震均位于较高位顶板。“8·29”矿震 DC 部分占比较大，为剪切破裂；“8·20”矿震、“12·20”矿震 CLVD 部分占比较大，表现为煤岩体张拉破坏；并且“8·20”矿震、“8·29”矿震破裂面产状相近，走向角均在 135° 左右，倾角大致为 65° ；“12·20”矿震破裂面走向角大致为 335° ，倾角为 85° 。

4 巨厚覆岩下开采矿震破裂过程解析

煤层地下开采将引起上覆岩层的破断垮落，当采空区宽度较小时顶板破断高度较小，低位亚关键层发生破断；当采空区宽度较大时，随工作面继续推采，顶板破断高度向上扩展，巨厚覆岩结构暴露宽度增加，

达到极限跨距时开始产生破断现象，震源破裂面走向破坏特征如图 13(a)、(b) 所示。巨厚覆岩下顶板破断主要包含顶板剪切滑移、顶板断裂张拉、顶板离层张拉以及顶板回转压缩 4 种失稳模式，高位巨厚覆岩破断产生强矿震以顶板断裂张拉、顶板剪切滑移失稳为主。

矿震震源 P 波位移场辐射花样如图 13(c) 所示，剪切滑移破裂的破裂面倾角较大，大多在 60° 以上，P 波最大位移振幅与破裂面成 $\pm 45^{\circ}$ ，位于空间四象限内，向外传播压缩波与膨胀波，对采场周围煤岩体影响较大；顶板断裂张拉的破裂面倾角较大，P 波最大位移振幅大致与水平方向平行，向外传递压缩波，可能对工作面前方煤岩体造成影响；顶板离层张拉破裂的破裂面倾角大致与水平面平行，P 波最大位移振幅与水平方向垂直，向外传递压缩波，仅对采空区内煤岩体造成影响，对工作面影响较小；顶板回转压缩破裂，破裂面倾角同样大致与水平面平行，P 波辐射花样与离层张拉破裂类似，但传播方向为向内传递膨胀波。

巨厚覆岩下开采顶板破裂演化规律如图 13(d) 所示。实体煤段工作面开采时，低位顶板呈“O-X”型破断，顶板破裂面走向角为以 30° 、 90° 、 150° 等为主；工作面进入临空回采阶段时，采空区宽度增加，根据关

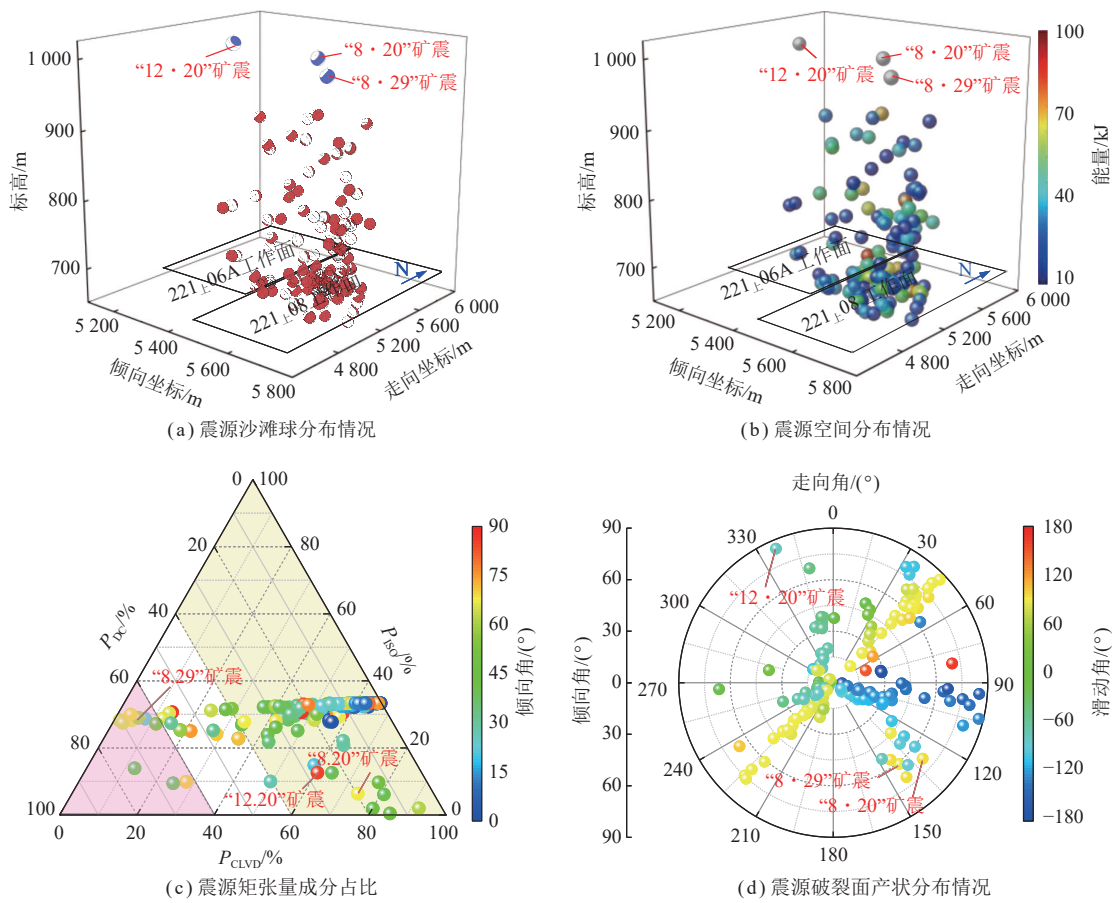


图 12 临空段工作面回采矿震震源机制解

Fig.12 Focal mechanism solution of mining earthquake on one side of the goaf

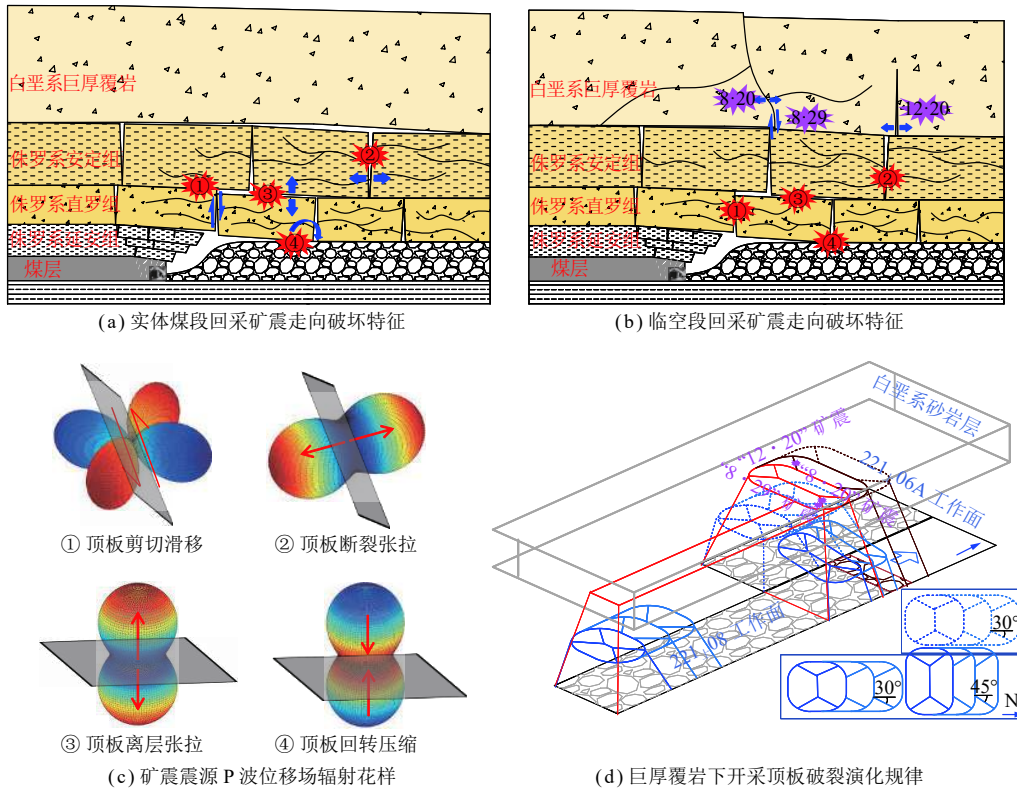


图 13 巨厚覆岩下开采顶板破断特征

Fig.13 Fracture characteristics of mining roof under extremely thick strata

键层破断理论^[27], 达到关键层破断的面宽条件时, 随关键层暴露宽度增加, 岩层破断步距逐渐减小, 因此同一岩层破裂面走向角增加, 以 45°、90°、135°等为主, 与现场实际情况较为吻合。

综上, 巨厚覆岩下开采顶板以水平离层张拉、顶板回转压缩失稳为主, 顶板断裂张拉与顶板剪切滑移失稳占比较少。表明巨厚覆岩下开采顶板破裂产生的 P 波大多向下方采空区传播, 对工作面回采影响较小; 仅少量顶板断裂张拉与剪切滑移失稳产生的震源可能对工作面影响较大。这也印证了 221_上08 工作面回采期间虽然频繁发生大能量矿震事件, 但工作面大多无明显变化。

同时, 结合强矿震发生位置与巨厚覆岩破断情况可得, “8·20”矿震为高位巨厚覆岩初次破断诱发; 并且高位巨厚覆岩发生初次破断后, 仍处于不稳定状态, 高位巨厚覆岩再次发生剪切滑移破裂诱发了“8·29”矿震, 因此“8·20”矿震、“8·29”矿震破裂面产状类似; “12·20”矿震为随工作面继续推进, 高位巨厚覆岩发生周期性破断诱发。并且强矿震破裂面倾角普遍较大, 震动波具有向四周煤岩体传播的趋势, 可能对工作面影响较大。因此, 巨厚覆岩型矿震的防治思路可从弱化巨厚覆岩的整体性、使巨厚覆岩结构分层破断的角度出发, 降低巨厚覆岩整体破断诱发矿震对工作面冲击危险性的影响。

5 结 论

(1) 221_上08 工作面实体煤回采阶段白垩系砂岩层未发生破断, 地表沉降较小, 均以 1×10^5 J 以下的矿震事件为主; 临空回采阶段白垩系砂岩层开始产生破断, 地表沉降量快速上升, 开始出现 1×10^5 J 以上的矿震事件, 矿震分布较实体煤阶段更为密集, 并且多次发生 2.0 级以上强矿震; 同时, 大部分矿震由采空区后方顶板破断诱发, 与煤层上方厚层顶板破断、滑移密切相关。

(2) 利用震动波辐射位移场与相对矩张量反演方法, 构建了以煤矿微震台站为对象的反演矩阵; 采用顶板爆破微震信号求解了爆破震源的破裂类型及破裂面产状信息, 验证了该方法对巨厚覆岩下煤层开采震源破裂机制求解的适用性。

(3) 巨厚覆岩下煤层开采诱发的震源大多以顶板张拉破裂为主, 临空段回采期间震源有向上扩展的趋势, 剪切滑移破裂相对实体煤回采阶段有所增加; 并且破裂面走向方向大致与工作面推进方向一致或与工作面推进方向成“X”夹角, 但临空回采阶段走向“X”夹角有所增加。

(4) 巨厚覆岩下开采震源破裂面倾角 $0^\circ \sim 30^\circ$ 占比较大, 顶板以水平离层张拉、顶板回转压缩失稳为主, 产生的 P 波大多向下方采空区传播, 对工作面回采影响较小; 仅部分顶板断裂张拉与剪切滑移失稳产生的 P 波向周围采场传递, 可能对工作面影响较大。

(5) 采用震源机制解析对巨厚覆岩下煤层开采矿震破裂过程进行了初步探索, 矿震破裂过程与现场实际情况较为吻合, 结论对进一步研究类似条件下矿震的预测预报、危险性评估以及灾害治理等有一定的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 董书宁, 姬亚东, 王皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367–2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367–2375.
- [2] 曹安业, 陈凡, 刘耀琪, 等. 冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量响应规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 722–733.
CAO Anye, CHEN Fan, LIU Yaoqi, et al. Response characteristics of rupture mechanism and source parameters of mining tremors in frequent coal burst area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 722–733.
- [3] 窦林名, 曹晋荣, 曹安业, 等. 煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 23–31.
DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shockwaves[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 23–31.
- [4] GIBOWICZ S J. The mechanism of large mining tremors in Poland[C]// GAY N C, WAINWRIGHT E H. Rockbursts and seismicity in mines. Johannesburg: Balkema, 1984: 17–28.
- [5] MCGARR A. An implosive component in the seismic moment tensor of mining induced tremor[J]. Geophysical Research Letters, 1993(19): 1579–1582.
- [6] 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.
JING Guangcheng, CAO Anye, DOU Lingming, et al. Focal mechanism of rockburst in folded region in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 203–211.
- [7] 陈栋, 王恩元, 李楠. 千秋煤矿微震震源参数特征以及震源机制分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2011–2019.
CHEN Dong, WANG Enyuan, LI Nan. Analysis of microseismic source parameters and focal mechanism in Qianqiu Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2011–2019.
- [8] WU Kunbo, ZOU Junpeng, JIAO Yuyong, et al. Focal mechanism of strong ground seismicity induced by deep coal mining[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(1): 779–795.
- [9] HE Zhilong, LU Caiping, ZHANG Xiufeng, et al. Numerical and field investigations of rockburst mechanisms triggered by thick-hard

- roof fracturing [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(11): 6863-6886.
- [10] 吴顺川, 黄小庆, 陈钊, 等. 岩体破裂矩张量反演方法及其应用[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 1-18.
WU Shunchuan, HUANG Xiaoqing, CHEN Fan, et al. Moment tensor inversion of rock failure and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 1-18.
- [11] DAHM T. Relative moment tensor inversion based on ray theory: Theory and synthetic tests[J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 124(1): 245-257.
- [12] MANTHEI G, JÜRGEN EISENBLÄTTER, DAHM T. Moment tensor evaluation of acoustic emission sources in salt rock[J]. *Construction and Building Materials*, 2001, 15(5): 297-309.
- [13] 陈凡. 煤矿矿震破裂机制及其震源力学参量响应规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
CHEN Fan. Failure mechanism of mining induced tremor and response law of its source mechanics parameters[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [14] 白贤栖, 曹安业, 杨耀, 等. 高位巨厚覆岩运移规律及矿震触发机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(3): 10-20.
BAI Xianxi, CAO Anye, YANG Yao, et al. Study on movement law of extremely thick strata and triggering mechanism of mine earthquakes[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(3): 10-20.
- [15] 曹安业, 白贤栖, 蔡武, 等. 覆岩厚度变化应力异常机制及冲击矿压诱发机理[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(3): 512-520.
CAO Anye, BAI Xianxi, CAI Wu, et al. Inducing mechanism of stress abnormal and coal burst in roof strata thickness variation zone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(3): 512-520.
- [16] OU Gwobin. Seismological studies for tensile faults[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2018, 19: 463-471.
- [17] SETH Stein, MICHAEL Wyssession. An introduction to seismology, earthquakes and earth structure[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2003.
- [18] 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(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.
- [19] GRZEGORZ Kwiatek, YEHUDA Benzion. Assessment of P and S wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118: 3630-3641.
- [20] 明华军, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 基于矩张量的深埋隧洞岩爆机制分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1): 163-172, 181.
MING Huajun, FENG Xiating, CHEN Bingrui, et al. Analysis of rockburst mechanism for deep tunnel based on moment tensor[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 163-172, 181.
- [21] 刘培洵, 陈顺云, 郭彦双, 等. 声发射矩张量反演[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(3): 858-866.
LIU Peixun, CHEN Shunyun, GUO Yanshuang, et al. Moment tensor inversion of acoustic emission[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 858-866.
- [22] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: Theory and methods[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1980.
- [23] BRUNE J N. Tectonic stress and spectra of seismic shear wave from earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(136): 4997-5009.
- [24] CAO Anye, LIU Yaoqi, CHEN Fan, et al. Focal mechanism and source parameters analysis of mining-induced earthquakes based on relative moment tensor inversion[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(12): 7352-7375.
- [25] 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.
- [26] 王笑然, 李楠, 王恩元等. 岩石裂纹扩展微观机制声发射定量反演[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(7): 2627-2643.
WANG Xiaoran, LI Nan, WANG Enyuan, et al. Microcracking mechanisms of sandstone from acoustic emission source inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(7): 2627-2643.
- [27] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.