

# 冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量响应规律

曹安业<sup>1</sup>, 陈 凡<sup>2</sup>, 刘耀琪<sup>1</sup>, 窦林名<sup>1</sup>, 王常彬<sup>1</sup>, 杨 旭<sup>3</sup>, 白贤栖<sup>1</sup>, 宋士康<sup>4</sup>

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2.大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024;3.中国矿业大学 计算机科学与技术学院,江苏 徐州 221116;4.陕西正通煤业有限责任公司,陕西 咸阳 712000)

**摘 要:**矿震是冲击地压孕育及诱发的重要影响因素,研究矿震震源破裂机制对完善冲击地压致灾机理至关重要。为有效分析矿震震源破裂机制与震源参量响应特征,基于相对矩张量反演原理提出以震源群为单位反演矿震震源机制,并针对煤矿应用背景构建了反演矩阵,推导了反演所需最低射线数与震源数条件,优化了矿震震源破裂类型判别方法,提高了反演精度与效率,统计分析了褶皱构造区、深埋断层构造区以及高应力大巷煤柱区等3个冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量的响应规律。结果表明:矿震震源参量与破裂机制与其地质构造情况、震源层位以及应力环境等相关。褶皱构造区顶板型强矿震以拉张破裂占主导,煤体中强矿震以剪切破裂占主导,拉张型与剪切型矿震的震源破裂强度与应力调整程度差异较小,而拉张型矿震的扰动规模更大;深埋断层构造区拉张型矿震具有更强的破裂强度,剪切型矿震具有更大的扰动规模;高应力大巷煤柱区矿震震源类型以剪切破裂为主导,煤柱(体)极易在顶底板的夹持下沿应力优势方向发生连续性剪切破坏,剪切型矿震震源参量平均值(除视应力)明显高于拉张型矿震,表明剪切型矿震时冲击危险性显著高于拉张型矿震。不同条件下震源参量与破裂机制响应特征可为强矿震的精准判别和力学机制研究提供参考。

**关键词:**冲击地压;矿震;震源机制;震源参量;响应规律

**中图分类号:**TD313 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)02-0722-12

## Response characteristics of rupture mechanism and source parameters of mining tremors in frequent coal burst area

CAO Anye<sup>1</sup>, CHEN Fan<sup>2</sup>, LIU Yaoqi<sup>1</sup>, DOU Linming<sup>1</sup>, WANG Changbin<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>3</sup>, BAI Xianxi<sup>1</sup>, SONG Shikang<sup>4</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Skate Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. School of Computer Science & Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Shaanxi Zhengtong Coal Industry Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

**Abstract:** Mining tremors are the essential factor for the formation and initiation of coal bursts. It is crucial to investigate the fracture mechanism of the mining tremors to integrity the coal burst mechanism. An inversion mechanism based on the source group is proposed based on the relative moment tensor inversion principle to effectively analyze the rupture mechanism and response characteristics of source parameters. Based on the background of the application in coal mines, the inversion matrix is constructed firstly. In addition, the minimum ray number and source number con-

收稿日期:2021-11-30 修回日期:2022-01-26 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.XR21.1880

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51734009);山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY02);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX21\_2350)

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

通讯作者:陈 凡(1995—),男,山西晋城人,博士研究生。E-mail:chenfansince95@163.com

引用格式: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.



移动阅读

ditions are deduced, and the identification method of source rupture type of mining tremors is optimized, which improves the inversion accuracy and efficiency. The mechanism of seismic rupture mechanism and the response law of source parameters in the fold structure area, deep buried fault structure area, and high-stress roadway coal pillar area are analyzed statistically. The results show that the strong mining tremors' focal parameters and rupture mechanism are related to the geological structure, focal layer, and stress environment. The tensile fracture is dominant in the roof, and the shear fracture is prevalent in the coal mass belonging to the fold structure area. The difference of source rupture strength and stress adjustment degree between tensile-type and shear-type is slight, while the disturbance scale of tensile-type is more extensive. The tensile-type has more muscular rupture strength, and the shear-type has a larger disturbance scale. Seismic source types in high-stress area coal pillar dominated by shear fracture are easily along the coal pillar under the roof, and floor of the clamping stress along the edge direction occurs shear damage continuity. The average shear source parameters (in addition to the apparent stress) significantly higher tensile-type mining tremors show that shear when mining tremors risk is considerably higher than tensile-type mining tremors. Source parameters and rupture mechanism characteristics under different conditions can provide a reference for accurate identification and mechanical mechanism research of strong mining tremors.

**Key words:** coal burst; mining tremors; focal mechanism; source parameters; response characteristics

冲击地压作为一种煤矿中强烈动力现象,其发生时往往伴随矿震的产生,如我国历史上曾发生过摧毁巷道 500 余米,矿震震级可达 4.3 级的冲击地压<sup>[1]</sup>。近年来我国煤矿矿震现象以前所未有的频度、强度和复杂性开始表现出来,2020 年底以来,榆林金鸡滩煤矿、山东星村煤矿、滕东煤矿、内蒙古石拉乌素煤矿、红庆河煤矿等区域陆续发生强矿震现象(最大震级 3.1 级),仅鄂尔多斯矿区 2021 年先后发生 6 次 2.0 级以上矿震事件,导致矿震成为敏感话题甚至引起社会恐慌。强烈矿震活动不仅易引起井下冲击地压等动力显现,甚至导致地表晃动、塌陷以及建筑物损毁等后果<sup>[2]</sup>。目前,科学界和工程界对矿震现象的孕育演化机制、响应信息特征等认识不清,亟需从新的角度和更本质的层面对矿震破裂与力学机制进行系统研究。

矿震的破裂与致灾机制研究方面,国内外学者已进行了初步尝试。窦林名等<sup>[2]</sup>将矿震划分为采动破裂型、巨厚覆岩型与高能矿震型,并开展了采空区矿震衰减规律研究。尚晓光等<sup>[3]</sup>提出采用地面直井水压致裂防治巨厚硬岩运动型矿震。朱斯陶等<sup>[4]</sup>对隔离煤柱区冲击地压和矿震的发生机理进行研究,提出冲击地压-矿震协同控制的隔离煤柱宽度设计方法。丁鑫等<sup>[5]</sup>进行了不同夹矸和原始裂隙煤岩单轴压缩声发射试验,分析了声发射信号频率、幅值与裂纹表征的定性关系。曹安业等<sup>[6]</sup>理论分析了采动煤岩在剪切、拉伸等破裂模式下的能量辐射与应力降特征。ORLECKA 等<sup>[7]</sup>研究了矿井同一区域发生的 2 次强矿震引起的静载荷应力转移对后续矿震活动的影响。RUDZINSKI 等<sup>[8]</sup>研究了矿震震源位置和震源机制与

坍塌隧道上方地表变形间的内在联系。MENDECKI 等<sup>[9]</sup>研究了强矿震发生前工作面前方的微震能量释放规律。

随着微震监测系统在冲击地压矿井的广泛部署与应用,基于微震全波形的矩张量反演理论在矿震破裂机制研究方面得到快速发展。陈栋等<sup>[10]</sup>基于 Brune 模型求解了千秋煤矿震源参数,并分析了千秋煤矿微震震源参数以及震源机制特征。井广成等<sup>[11]</sup>在优化震动波位移以及破裂面产状求解方法的基础上,分析了褶皱构造区冲击地压震源破裂机制。李楠等<sup>[12]</sup>提出在煤矿微震监测系统引入三分量传感器收集高信噪比的 P/S 波信号,进一步提高矩张量反演精度。明华军等<sup>[13]</sup>采用矩张量反演法分析了锦屏二级水电站深埋隧洞典型岩爆孕育以及岩石破裂演化机制。DAHM 等<sup>[14]</sup>基于人工合成信号提出了岩石破裂的相对矩张量反演方法,并探索了该方法应用于地震和声发射事件破裂机制反演的可能。STEC K 等<sup>[15]</sup>通过对震源机制参数的分析确定了引起高能量矿震的力学条件。上述研究证明了矩张量理论用于矿震和岩石破裂机制反演的可能性,但是目前的矩张量反演方法多由地震或声发射等领域引入,若直接应用于煤矿矿震反演仍存在一定局限性,如在地震领域使用较为成熟的绝对矩张量反演法要求构建精确的地层波速结构模型以及足够数量(至少 6 个)的高信噪比远场波形等,而受困于煤矿复杂的采掘环境与不断挪移的微震台站,绝对矩张量反演在煤矿中的反演条件苛刻,并且精度有限,甚至对于低能量矿震或者台站稀疏的情况下难以进行反演;同时求得矿震震源机制解后如何将其应用于矿震破裂类型的分析仍缺

乏充足研究。

针对目前矩张量反演法在煤矿应用条件苛刻,反演效率低等问题,笔者在分析矩张量反演矿震震源破裂机制原理的基础上,提出以震源群为单位进行反演,针对煤矿微震台站稀疏、有效远场波形少的问题提出以台站为对象构建反演矩阵,并推导反演所需最低射线数与震源数条件,优化矿震震源破裂类型判识方法,并计算相应的震源力学参量。同时,以褶皱构造区、深埋断层区以及高应力大巷煤柱区等冲击地压频发区强矿震记录为基础,反演求解了强矿震震源破裂机制以及震源参量,并系统分析了震源类型与力学参量响应规律,以期矿震震源破裂力学机制分析提供新的途径。

## 1 矿震震源破裂机制的相对矩张量反演方法

### 1.1 矩张量反演震源破裂机制原理

矩张量反演是震源机制反演的一种方法,目的是利用震源破裂时监测到的远场位移和描述介质响应特征的脉冲函数来计算震源破裂的等效力<sup>[16]</sup>。经过不断发展,等效力模型由单力模型到集中力偶再到目前广泛接受的双力偶模型。该模型用一个二阶张量表示震源破裂所受的力,笛卡尔坐标系下 9 个矩张量分量如图 1 所示,矩张量  $\mathbf{M}$  可表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

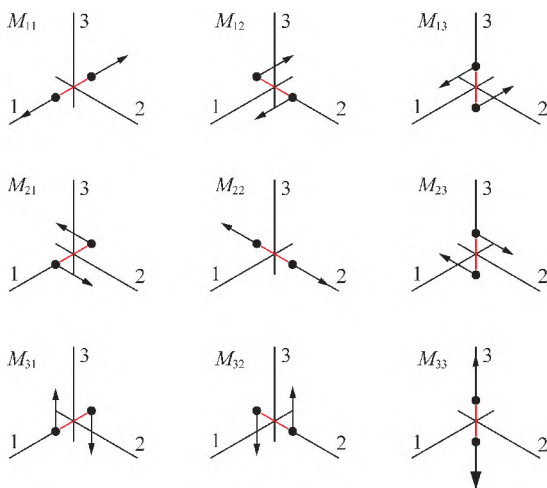


图 1 笛卡尔坐标系下的 9 个矩张量分量示意

Fig.1 Schematic diagram of nine moment tensor components in Cartesian coordinate system

矩张量反演需满足一定的假设:当震源尺寸远小于观测距离和地震波波长时可将震源假设为点源<sup>[17]</sup>,才可用矩张量表示震源的受力状态;此外根据

同步震源假设,在监测端  $i$  产生的远场位移振幅<sup>[18]</sup>可表示为

$$u_i(x, t) = \mathbf{M}_{jk} \mathbf{G}_{i,jk}(x, x_0, t) \quad (j, k = 1, 2, 3) \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{G}_{i,jk}$  为格林函数,表示震源  $x_0$  和监测点  $x$  之间介质的脉冲响应;  $\mathbf{M}_{jk}$  为矩张量分量,下标  $j, k$  分别代表张量的作用方向和指向(图 1)。式(2)的矩阵形式为

$$\mathbf{u} = \mathbf{G} \mathbf{M} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{u}$  为远场位移矩阵;  $\mathbf{G}$  为格林函数矩阵。研究证明<sup>[11]</sup>低频位移幅值可作为震动的远场位移值  $\mathbf{u}$ , 计算方法<sup>[19]</sup>为

$$\begin{cases} S_{D2} = 2 \int_0^{\infty} D^2(t) dt \\ S_{v2} = 2 \int_0^{\infty} V^2(t) dt \\ \Omega_0 = 2 \sqrt{4S_{D2}^{3/2} S_{v2}^{-1/2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $S_{v2}$ ,  $S_{D2}$  分别为速度平方谱和位移平方谱时域积分结果;  $\Omega_0$  为波形低频位移幅值。

远场位移初动方向需同时考虑震源和台站的相对位置,判断方法<sup>[20]</sup>为

- 取正, 传感器位于震源上方, 且波形初动向上
- 取负, 传感器位于震源上方, 且波形初动向下
- 取正, 传感器位于震源下方, 且波形初动向下
- 取负, 传感器位于震源下方, 且波形初动向上

矩张量反演的任务是根据式(3)的关系求得  $\mathbf{M}$  的解,并对  $\mathbf{M}$  进行分解以对震源破裂机制做出解释。根据对格林函数的处理方式矩张量反演可分为绝对、相对以及混合反演法<sup>[16]</sup>。

绝对矩张量反演原理如图 2 所示(图中  $G_{Ai}$  或  $G_{Bi}$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ) 为描述震源 A 或 B 与不同台站间介质响应特征的格林函数,  $i$  为台站编号)。绝对矩张量法反演主要取决于格林函数的精度,混合矩张量法虽通过反复迭代降低了噪声影响,但反演原理与绝对法相同。目前的格林函数多基于各向同性假设,而由于煤岩介质的非均质性以及各向异性影响,构建适用于煤矿介质的格林函数较困难,且我国冲击地压矿井建设的微震监测系统多为单分量探头,或导致获得的有效波形较少,多数情况下难以构建反演矩阵。相对矩张量反演方法在一定程度上克服了上述缺点,为煤矿矿震震源机制高精度反演提供了思路。

### 1.2 相对矩张量反演原理与反演矩阵构建

相对矩张量反演法最早由德国学者 DAHM 提出<sup>[14]</sup>,其核心理念是根据震动波射线传播理论对格林函数进行转化,避免直接求解格林函数,一定程度上降低了介质各向异性以及非均质性对构建格林函数的影响。

相对矩张量法采用震源群为单位进行反演,其假



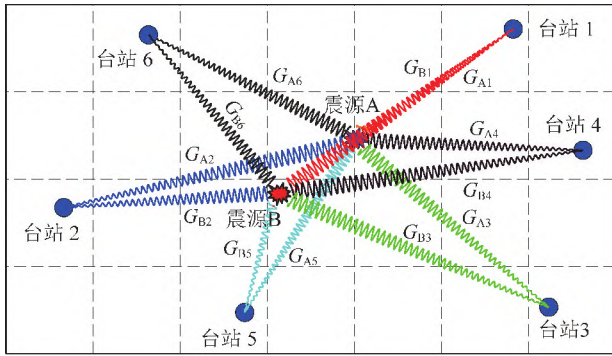


图 2 绝对矩张量反演法原理示意

Fig.2 Schematic diagram of absolute moment tensor inversion

设对于某一区域内所有震源的传播路径相似,震动波对传播介质的响应作用相同<sup>[16]</sup>。如图 3 所示,假设震源 A, B, C 属于同一震源群,则其传播路径上介质的格林函数  $G$  是近似相同的,即满足  $G_A \approx G_B \approx G_C$ ,进一步地,格林函数  $G$  在射线理论的限制下可简化为由射线权重部分( $a_{qkr}$ )和线性部分( $I_{qk}^n$ )组成<sup>[14]</sup>,参与构建矩阵的第  $p$  个震源被第  $q$  个台站监测到第  $k$  个震相在方向  $n$  的位移  $u$  可表示为

$$u_{pqk}^n = I_{qk}^n \sum_{r=1}^6 m_{rp} a_{qkr} \quad (5)$$

式中,  $m_{rp}$  为矩张量分量  $M$  的线性组合;  $a_{qkr}$  为震源的辐射花样部分,共分为 P, SH 和 SV 三种辐射花样,  $r(r=1, 2, \dots, 6)$  为矩张量  $M$  的 6 个主轴方向<sup>[14, 17]</sup>。

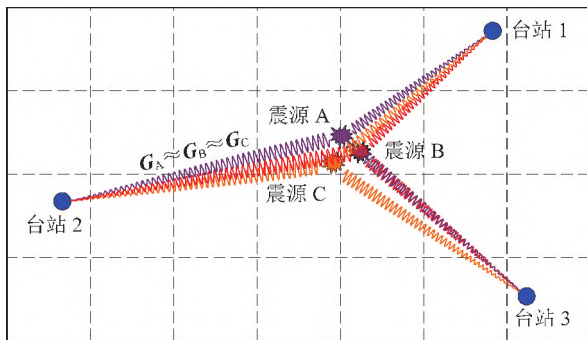


图 3 相对矩张量反演法原理示意

Fig.3 Schematic diagram of relative moment tensor inversion

通过构建合理的反演矩阵,可将式(5)中震动波传播的线性部分( $I$ 项)消除。当认为震源群内所有震源具有相同的精度,并以台站为对象构建矩阵  $G$  时,可得

$$\begin{pmatrix} 0^1 \\ 0^2 \\ 0^3 \\ \vdots \\ 0^{m-1} \\ 0^m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G^1 \\ G^2 \\ G^3 \\ \vdots \\ G^{q-1} \\ G^q \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S^1 \\ S^2 \\ S^3 \\ \vdots \\ S^{z-1} \\ S^z \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中,  $G^q$  为根据第  $q$  个台站所构建的矩张量反演系数矩阵( $n_m(n_m - 1)/2$  行,  $6z$  列,  $n_m$  为第  $q$  个台站接收的震源总数);  $S^z$  为震源群内第  $z$  个震源矩张量构成的列矩阵;  $G^q$  任一行具体的形式为

$$G_{\alpha\beta}^q = (0^{\alpha\alpha} \quad B^{\alpha\beta} \quad 0^{q\alpha\beta} \quad B^{\beta\alpha} \quad 0^{\alpha\beta}) \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  与  $\beta$  均为被台站  $q$  所接收到的震源编号;  $0^{\alpha\alpha}$ ,  $0^{q\alpha\beta}$  与  $0^{\alpha\beta}$  为单行零矩阵,其列数分别等于  $6(\alpha - 1)$ ,  $6(\alpha + \beta - 1)$  与  $6(\omega - \beta)$ ,  $\omega$  为震源总数;  $B^{\alpha\beta}$  的具体形式为

$$B^{\alpha\beta} = (u_{\alpha qk}^n a_{11q} \quad u_{\alpha qk}^n a_{12q} \quad \cdots \quad u_{\alpha qk}^n a_{16q}) \quad (8)$$

### 1.3 反演条件核算

#### 1.3.1 射线与震源数条件

假设反演过程中共有  $q$  个台站、 $\theta$  个震源参与计算,并且各台站监测到的最少射线数为  $x_{\min}$ ,  $\theta$  个震源构建的  $G$  矩阵行数必然大于  $6\theta$ ,则单台站射线数条件需满足的条件为

$$x_{\min}^2 - x_{\min} > 12\theta \implies x_{\min} > \frac{1 + \sqrt{1 + 48\theta}}{2} \quad (9)$$

同时,要求单台站射线数不大于震源数  $\theta$ <sup>[21]</sup>,则有

$$\theta > \frac{1 + \sqrt{1 + 48\theta}}{2} \implies \theta > 13 \quad (10)$$

联立式(9), (10)可得反演所需的最低射线与震源数条件为

$$\begin{cases} x_{\min} > \frac{1 + \sqrt{1 + 48\theta}}{2} \\ \theta > 13 \end{cases} \quad (11)$$

#### 1.3.2 远场条件

矿震矩张量反演的前提为震源与台站需满足远场假设。文献[22]指出在不考虑矩张量前提下,矿震震源激发的震动波位移场传播时其近、中、远场项  $u_n : u_i : u_f$  近似有

$$u_n : u_i : u_f = 0.5r_0^{-2}(v_s^{-2} - v_p^{-2}) : (v_p r_0)^{-2} :$$

$$v_p^{-3} r_0^{-1} \pi f_c = 1 : 1 : \pi r_0 f_c v_p^{-1} \quad (12)$$

其中,  $r_0$  为震动波传播距离;  $f_c$  为拐角频率,且  $f_c = 1/(2\tau)$ ;  $v_p$ ,  $v_s$  分别为 P 波及 S 波波速;  $\tau$  为震动波具有最大振幅的单个脉冲宽度。大能量事件的  $f_c$  通常小于 40 Hz,假设  $f_c = 40$  Hz,  $v_p = 3\,000$  m/s,当  $r_0 = 500$  m 时,  $u_n : u_i : u_f \approx 1 : 1 : 21$ ,远场位移占主导,近、中场项基本可忽略,因此将矿震震源与台站距离大于 500 m 作为远场条件。

#### 1.3.3 求解方法

当完成矿震震源群筛选以及反演矩阵构建后,需进一步求解反演矩阵以获得矩张量。式(6)的矩阵

形式为  $R = GS$ 。由于矩阵  $G$  并非方阵,无法直接对其求逆,因此需对其进行转化:

$$G^T R = G^T G S \implies S = [G^T G]^{-1} G^T R \quad (13)$$

因此,可将求  $G^{-1}$  转化为求  $[G^T G]^{-1}$ ,可采用奇异值分解的方法进行求解。对  $G^T G$  进行奇异值分解可得

$$G^T G = V E V^T \quad (14)$$

其中,  $E, V$  为维度为  $C$  的方阵,因此  $[G^T G]^{-1}$  的求解可转化为

$$S = [G^T G]^{-1} G^T R \implies S = V [E]^{-1} V^T G^T R \quad (15)$$

由于  $V$  为正交矩阵,式(15)进一步可转化为

$$[G^T G]^{-1} = V [E]^{-1} V^T \quad (16)$$

将式(16)代入式(13)可得

$$S = [G^T G]^{-1} G^T R \implies S = V [E]^{-1} V^T G^T R \quad (17)$$

因此将求  $G^{-1}$  转化为求方阵  $[G^T G]^{-1}$  的特征值和特征向量,进一步求解式(17)可获得矿震震源群的矩张量  $M$ 。

## 2 矿震震源机制解与震源参量

矿震震源机制解包括震源破裂类型以及破裂面产状。求得震源矩张量  $M$  后,进一步对  $M$  后处理可用于判别震源破裂类型,目前最常用的方法其一为根据矩张量中双力偶 ( $M_{DC}$ )<sup>[23-24]</sup> 的占比进行划分:  $M_{DC} \geq 60\%$  为剪切破裂,  $40\% < M_{DC} < 60\%$  为混合破裂,  $M_{DC} \leq 40\%$  为拉张破裂;其划分准则为 OHTSU

$$M = DA \begin{bmatrix} (\lambda + \mu) u \cdot \varphi - \mu & 0 & 0 \\ 0 & \lambda u \cdot \varphi & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda + \mu) u \cdot \varphi + \mu \end{bmatrix} \implies M = DA \begin{bmatrix} (\lambda + \mu) \sin \alpha - \mu & 0 & 0 \\ 0 & \lambda \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda + \mu) \sin \alpha + \mu \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中,  $\lambda, \mu$  分别为体积模量和剪切模量;  $D$  为破裂面的错动量;  $A$  为破裂面的错动面积。由式(19)可得

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{M_1 + M_3 - 2M_2}{M_3 - M_1} \right) \quad (20)$$

式中,  $M_1, M_2$  和  $M_3$  分别为矩张量  $M$  本征值化后的最大、中间以及最小特征值。

文献[21]研究表明采用位错夹角  $\alpha$  用作判别准则时需考虑判别对象的强度关系(单轴抗压强度、抗剪强度以及抗拉强度)。为得出基于  $\alpha$  的一般判别标准,笔者假设煤岩体的抗压强度  $\approx 3$  倍抗剪强度  $\approx 10$  倍抗拉强度,进而可得出基于  $\alpha$  的煤矿矿震破裂类型的判别准则:

$$\begin{cases} \alpha \in (14^\circ, 90^\circ) & \text{拉张破裂} \\ \alpha \in (-72^\circ, 14^\circ) & \text{剪切破裂} \\ \alpha \in [-90^\circ, -72^\circ) & \text{压缩破裂} \end{cases} \quad (21)$$

根据室内声发射试验总结得出,在煤矿中的适用性仍有待考量。此外,明华军等<sup>[13]</sup>提出利用位错夹角  $\alpha$  作为判别依据,但其提出的  $\alpha$  角判别准则研究对象为隧道开挖,将其直接用于煤矿开采的矿震破裂类型判别是不可取的,因此有必要建立适用于煤矿矿震破裂类型  $\alpha$  角判别准则。

### 2.1 矿震震源破裂类型判别

当煤岩体发生破裂后,破裂面将产生错动,图4为简化后的震源位错模型示意。其中  $\Sigma$  代表破裂面(法向量  $\varphi$ 、倾角  $\theta$  与滑动角  $\gamma$  均为0);  $u$  代表破裂面错动向量( $u_s$  为剪切位移;  $u_t$  为拉张(压缩)位移);  $\alpha$  为破裂面  $\Sigma_1$  和  $\Sigma_2$  间的位错夹角。

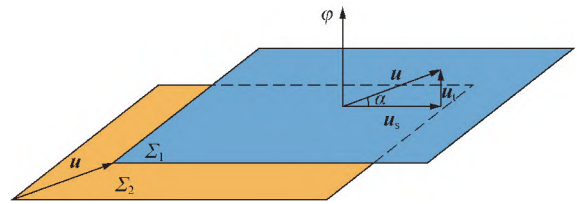


图4 简化的位错模型示意

Fig.4 Schematic diagram of simplified dislocation model

$u, \varphi$  与错动位移向量在破裂面的投影向量  $\kappa$  为

$$u = \varphi \sin \alpha + \kappa \cos \alpha \quad (18)$$

其与矩张量  $M$  的关系为

### 2.2 矿震破裂面产状求解

将矩张量本征值化可得到破裂面  $u$  和  $\varphi$  与  $M_1, M_2$  和  $M_3$  的对应关系:

$$\begin{cases} u = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_1 + \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_3 \\ \varphi = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_1 - \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_3 \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $e_1, e_3$  分别为矩张量最大和最小特征值对应的单位特征矢量,满足  $e_1 \perp e_3$ 。通过对破裂面的  $u$  和  $\varphi$  进一步分解可获得破裂面产状,包括破裂面的走向角、倾向角以及滑动方向。

### 2.3 震源力学参量计算

震源力学参量是表征矿震发生前后震源处应力调整和状态改变的物理量。不同的震源参量分别可表征震源的破裂强度、扰动规模以及应力调整。常见的震源参量及其物理含义见表1。

表 1 常见震源参量以及物理含义

Table 1 Common source parameters and physical meanings

震源参量	物理含义	计算方法(Brune 模型)	备注
拐角频率	初步判断地震(矿震)规模的大小,规模越大,频谱的低频成分越丰富	双对数坐标下震源振幅谱高频渐进趋势和低频水平的交点所对应的频率	
地震矩	表征震源强度(双力偶震源模型)	$M_0 = \frac{4\pi\rho c^3 R \Omega_0}{F}$	$\rho$ 为震源处的密度; $c$ 为震源处的波速; $R$ 为震源和台站的距离; $\Omega_0$ 为基于 Brune 模型的远场低频位移幅值; $F$ 表示辐射模式(P 波取 0.52,S 波取 0.63); $\eta$ 为 Brune 模型的模型系数; $E_s$ 为震源辐射能量
震源半径	表征震源破裂的影响范围	$r_c = \frac{\eta c}{2\pi f_c}$	
视体积	表征震源处非弹性变形的体积	$V_a = \frac{M_0^2}{2\mu E_s}$	
应力降	表征矿震前后应力降低的水平	$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r_c^3}$	
视应力	表征矿震发生后震源处的应力水平	$\sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0}$	

### 3 褶皱构造区矿震震源破裂机制与震源参量响应规律

以甘肃某矿为例,如图 5 所示,该矿主采 5 号煤,煤厚为 17.58~48.01 m,平均 37.51 m,具有强冲击倾

向性。其中 250105 工作面位于该矿最东部,背向斜褶皱构造发育,采深为 500~700 m,受复杂褶曲构造与大埋深等影响,250105 工作面 2014-03—2015-05 回采期间发生冲击显现 34 次,并伴有大量事件产生。

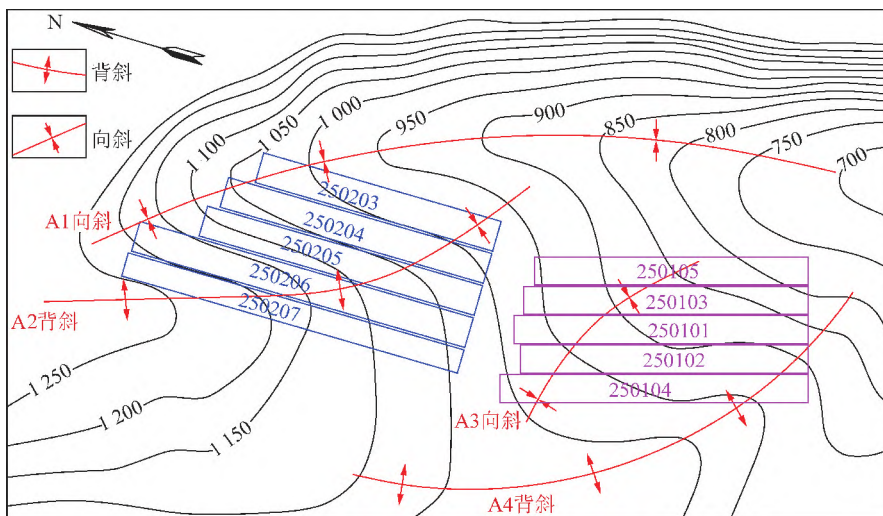


图 5 甘肃某矿煤层等高线

Fig.5 Coal seam contour of a coal mine in Gansu Province

该矿 250105 工作面回采期间监测到的典型强矿震波形如图 6 所示。由图 6 可知该次强矿震造成个别通道(如 1 号、2 号、13 号与 16 号通道)超限;而其余距离震源较远的台站监测到的波形则持续时间较长,衰减速度慢,说明该矿强矿震扰动剧烈,危险性高。

图 7 为 250105 工作面 34 次冲击型矿震震源机制与震源参量分布特征。如图 7(a)所示,250105 工作面回采期间 34 起冲击地压事件中拉张破裂占 20

次,剪切破裂占 14 次,表明拉张破裂占主导;此外,拉张破裂震源主要位于顶板及煤层之中,而剪切破裂则主要位于煤层附近;由此可见工作面回采过程中高、低位顶板的离层与张性破断是顶板型强矿震的主要原因;而高水平构造应力下底板的屈曲剪切破坏是强矿震显现的主要因素。

如图 7(b)所示,冲击型矿震活动的破裂面走向无明显趋势,多数拉张型矿震破裂面倾角小于 30°,而剪切型矿震倾角多大于 30°,表明强矿震破裂面产



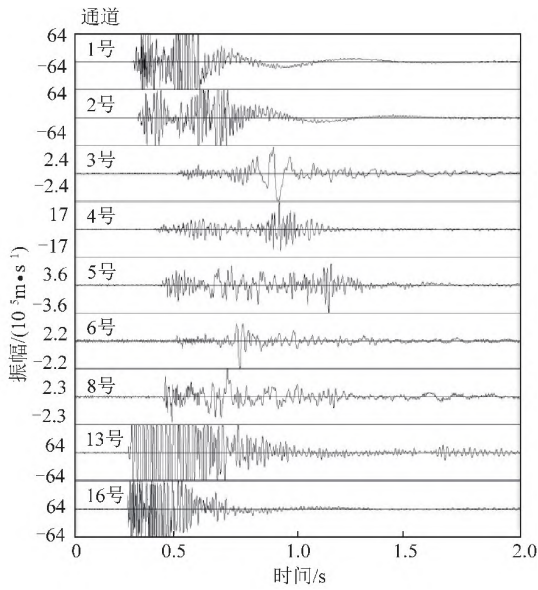
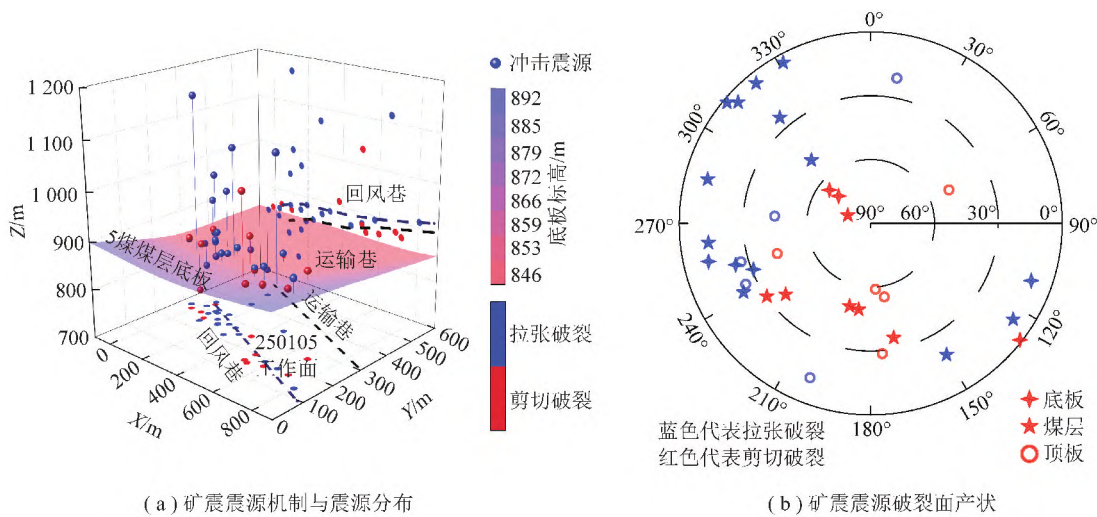


图6 甘肃某矿典型强矿震波形

Fig.6 Typical seismic waves of the strong tremor in a coal mine of Gansu Province

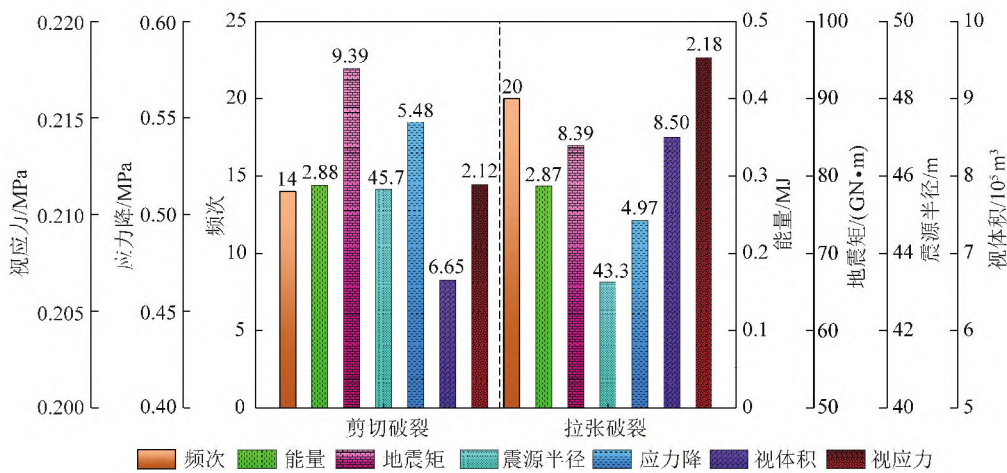
状与破裂类型关系密切;此外,位于顶板中的拉张型矿震与煤层中相比具有更大的破裂面倾角,而底板中的矿震破裂面倾角则均大于 60°,表明强矿震破裂面产状与震源层位密切相关。

图7(c)为34起冲击型矿震事件平均震源参量与破裂类型对比结果,由震源破裂强度来看(辐射能量和地震矩),拉张型矿震与剪切型矿震的辐射能量相差较小,剪切型矿震的地震矩仅比拉张型矿震高出12%左右,表明2种破裂机制在震源强度方面差距较小;从震源扰动程度来看(震源半径和视体积),2者的震源半径差距极小,而拉张型矿震的视体积为剪切型矿震的1.28倍,表明褶皱构造区拉张型矿震具有更大的扰动规模;对于震源的应力调整情况(应力降和视应力),2者的视应力差距不明显,而剪切型矿震的应力降比拉张型矿震高10%左右,表明强矿震破裂类型对震源处应力调整幅度的影响较小。



(a) 矿震震源机制与震源分布

(b) 矿震震源破裂面产状



(c) 褶皱构造区矿震平均震源参量与破裂类型对比结果

图7 褶皱构造区冲击型矿震震源机制与震源参量响应特征

Fig.7 Focal mechanism and response characteristics of focal parameters of coal burst tremors in fold structure area

#### 4 深埋断层构造区矿震震源破裂机制与震源参量响应规律

如图8所示,山东某矿3302工作面埋深可达1 200 m,静载水平较高,并且工作面中部受断层切割,构造应力水平较高。3302工作面2015年6—8月回采期间连续监测到35起大能量矿震事件(包括多起冲击地压显现),这里以该35起大能量矿震事件为对象探究深埋断层构造区矿震震源破裂机制与震源参量响应规律(图8中序号①~⑦表示震源能量6次方以上的事件震源定位)。

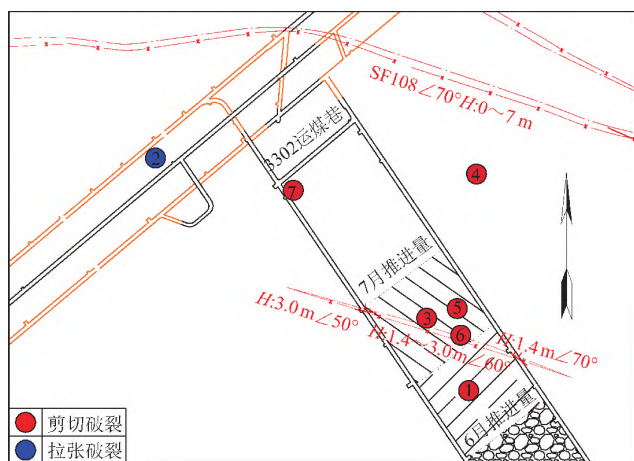


图8 山东某矿3302工作面冲击型矿震震源平面定位结果  
Fig.8 Location of several coal burst tremors at LW3302 of a coal mine in Shandong Province

3302工作面回采期间监测到的典型强矿震波形如图9所示。由图9可知该矿强矿震同样可造成若干通道超限,同时其震动主频较高,极易诱发煤岩体产生破坏。

图10为深埋断层构造区矿震震源机制与震源参量分布特征。从震源的层位分布来看,其主要分布于煤层或低位顶板中,部分位于高位顶板中(图10(a));其中高低位顶板破裂震源均为拉张破裂,而煤体中的矿震震源以剪切破裂为主,剪切破裂源主要集中于工作面周围。说明在深埋断层构造区开采时,工作面强扰动易诱发断层活化,断层附近的煤岩体容易产生滑移破裂,矩张量中剪切成分占主导;同时由于断层活化容易导致采空区顶板破断失稳,产生拉张型破裂模式。

如图10(b)所示,不论是拉张破裂还是剪切破裂型震源其方位角约为 $150^\circ$ 或 $300^\circ$ ,与工作面推进方向近似平行;此外,大部分矿震震源的倾角小于 $40^\circ$ ,只有个别震源倾角大于 $60^\circ$ ,表明深埋断层构造区开采时强矿震破裂产状与工作面推进方向以及断层方

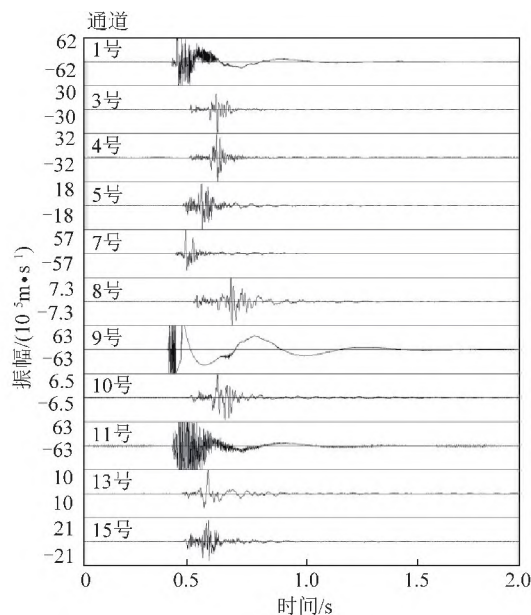


图9 山东某矿3302工作面典型强矿震波形  
Fig.9 Typical seismic waves of the strong tremor of LW3302 in a coal mine of Shandong Province

位联系密切。

由图10(c)可知,拉张型矿震的辐射能量显著高于剪切型矿震,而剪切型矿震的地震矩则明显高于拉张型矿震。这说明顶板破断自身释放的能量大,且由于顶板较为致密,传播过程中衰减少,而断层处煤岩体较为破碎,破裂产生的能量衰减较为迅速;同时由于断层附近剪切破裂产生的错动面积大,造成其地震矩明显高于拉张型矿震。

从扰动规模来看,2类矿震的震源半径相差较小,而视体积差距较大,剪切型矿震的平均视体积约为拉张型矿震的3倍,表明断层构造区异常的应力分布可加剧震源破裂的扰动规模。

从应力调整程度来看,2类矿震的应力降差距较小,而拉张型矿震的视应力显著高于剪切型矿震;表明矿震发生后顶板处仍可能具有较高的应力集中水平,而断层附近应力可得到充分的释放。

#### 5 高应力大巷煤柱区矿震震源破裂机制与震源参量响应规律

彬长矿区某矿主采4煤层,平均煤厚9.43 m,埋深为800~1 000 m。矿井自2014年7月揭煤以来,受大埋深、巷道密集以及大面积采空等影响,该矿一盘区大巷掘进和使用期间发生多起冲击动力显现,冲击显现区域如图11所示。这里选取该矿2018年8—10月期间大巷煤柱区发生的5起冲击



型矿震事件和45起大能量矿震事件为对象,探究高应力大巷煤柱区矿震震源破裂机制与震源参量

响应规律。

该矿某次强矿震波形如图12所示。由图12可

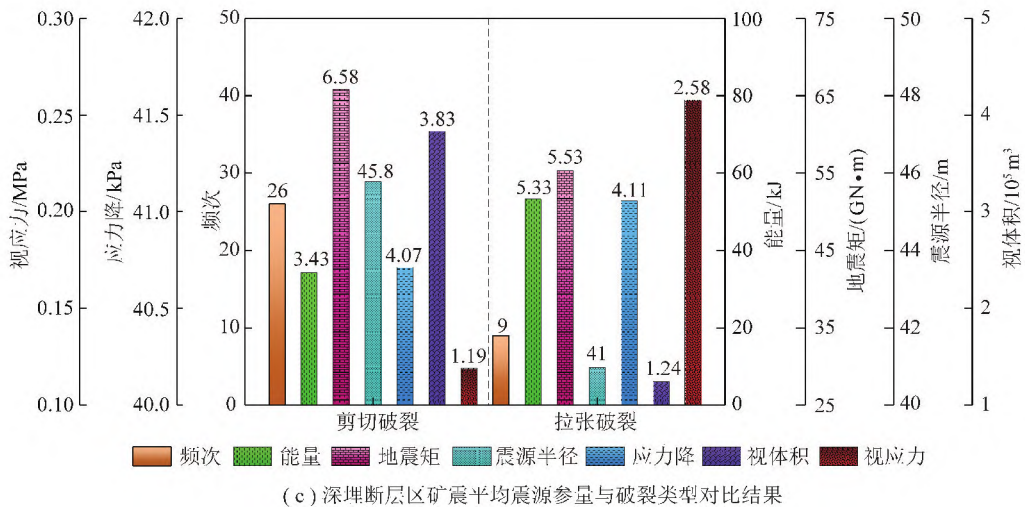
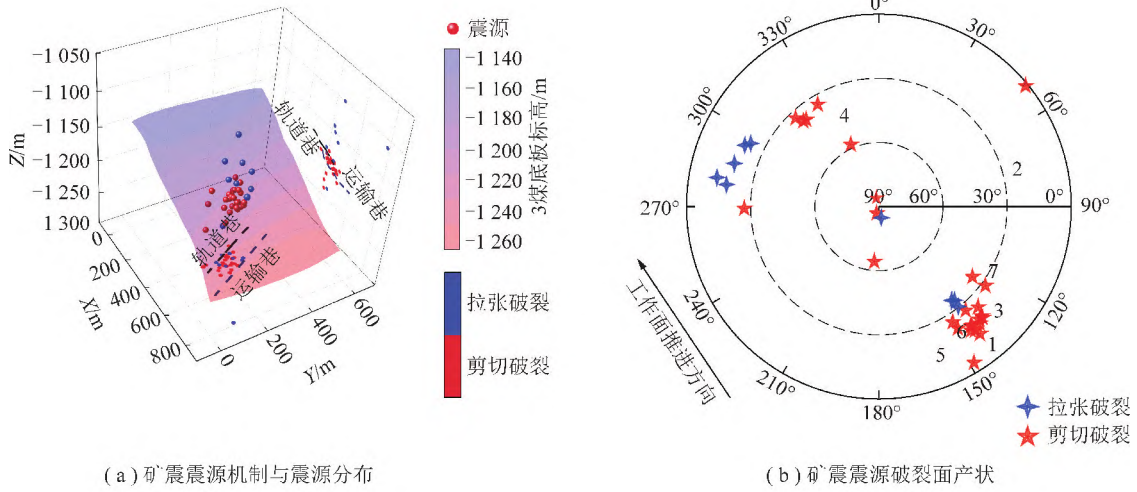


图10 深埋断层区矿震震源机制与震源参量响应特征

Fig.10 Focal mechanism and response characteristics of focal parameters of mining tremors in deep fault area

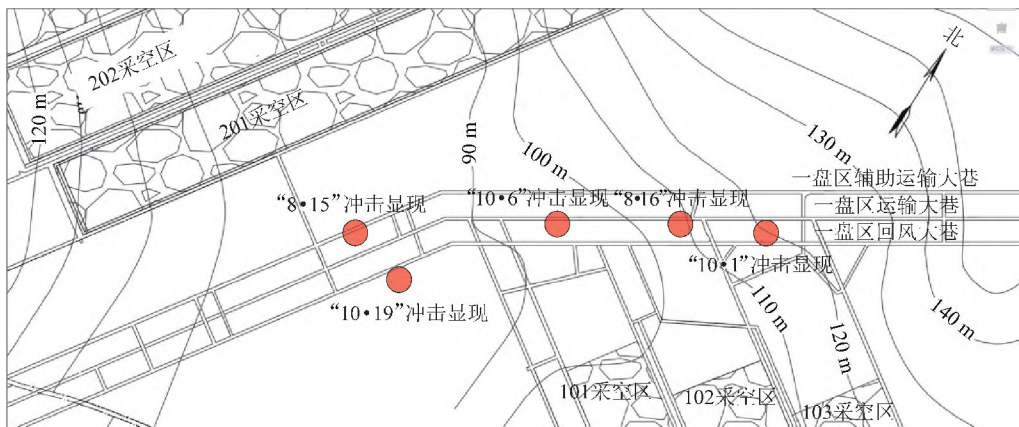


图11 彬长矿区某矿大巷布置与冲击显现区域示意

Fig.11 Schematic diagram of roadway layout and coal burst area of a coal mine in Binchang mine area

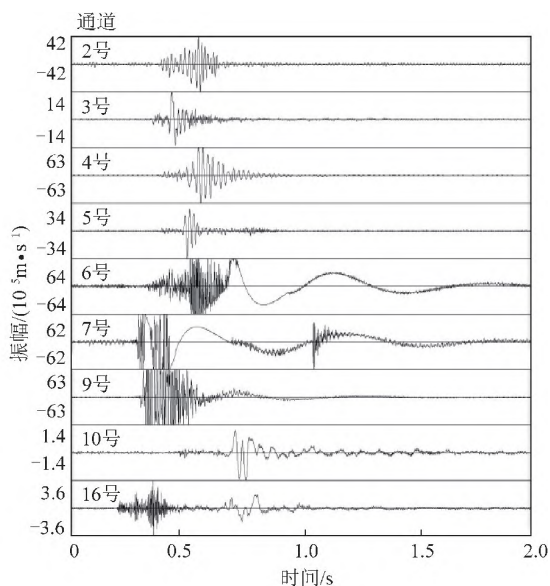
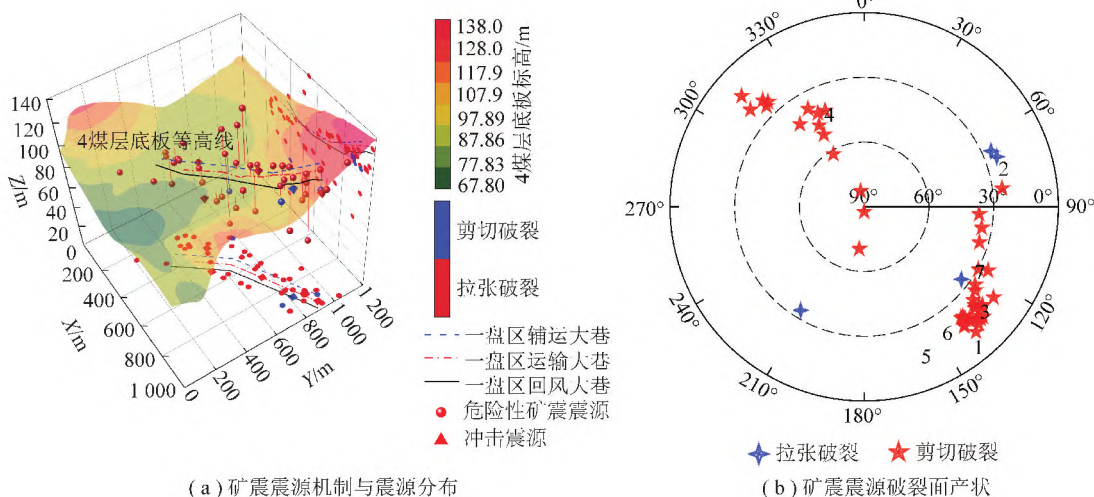


图 12 彬长矿区某矿强矿震典型波形

Fig.12 Typical seismic waves of the strong tremor of a coal mine in Binchang mine area

知该矿强矿震波形具有震动幅值大,衰减缓慢的特点,侧面说明强矿震发生前震源区域应力水平高,煤岩体积蓄了大量弹性能,震源破裂诱发冲击的可能性也越高。

图 13 为高应力大巷煤柱区矿震震源机制与震源参量分布特征。由图 13(a)可知,50 起强矿震事件中剪切破裂占 46 次,拉张破裂仅占 4 次,剪切破裂占主导。此外,5 个冲击震源的水平投影均位于大巷煤柱区,垂向上位于煤层或临近煤层,说明在高应力影响下,煤柱由于原生裂隙的存在,极易沿裂隙发生剪切失稳。此外由图 13(b)可知,强矿震破裂面的走向角多集中于 120°~150°与 310°~330°,倾角多小于 60°,结合巷道所处的地质背景可知,煤柱区高静载应力(大埋深、孤立煤柱等)、巷道密集布置等原因影响下,煤柱极易在顶底板的夹持作用下沿应力优势方向发生连续性剪切破坏。



(a) 矿震震源机制与震源分布

(b) 矿震震源破裂面产状

(c) 高应力大巷煤柱区矿震平均震源参量与破裂类型对比结果

图 13 高应力大巷煤柱区矿震震源机制与震源参量响应特征

Fig.13 Focal mechanism and response characteristics of focal parameters of mining tremors in high stress roadway pillar area



由图 13(c)可知,除视应力外,剪切型矿震震源参量平均值均明显高于拉张型矿震,表明当高应力巷道发生剪切型矿震时冲击危险性显著高于拉张型矿震。

## 6 结 论

(1)提出采用相对矩张量法反演煤矿开采矿震破裂机制,并针对煤矿背景构建了反演矩阵,推导了最低射线数与震源数条件,优化了震源破裂类型判识方法,提高了反演精度与效率。

(2)典型褶皱构造区开采顶板中矿震以拉张破裂占主导,煤体中矿震以剪切破裂占主导;矿震破裂面产状与震源层位关系密切;拉张型与剪切型矿震的震源破裂强度与应力调整程度差异较小,而拉张型矿震的扰动规模更大。

(3)深埋断层构造区开采高低位顶板震源均为拉张型破断,剪切破裂源主要集中于工作面周围;拉张型矿震具有更高的辐射能量而剪切型矿震则地震矩更高;两者震源半径相差较小,而剪切型矿震的视体积约为拉张型矿震的3倍;2类矿震的应力降差距较小但拉张型矿震的视应力明显高于剪切型矿震,表明矿震发生后顶板处仍存在应力集中,而断层附近应力可得到有效释放。

(4)高应力大巷煤柱区强矿震以剪切破裂为主导,高应力条件下煤柱原生裂隙极易在顶底板的夹持下沿应力优势方向发生连续性剪切破坏;剪切型矿震震源参量平均值(除视应力)明显高于拉张型矿震。

(5)特殊构造与采掘环境下矿震的孕育破裂机制与震源参量特征显著不同。震源破裂前所处的地质构造情况,应力环境以及震源层位等影响突出,不同条件下矿震震源参量与破裂机制特征可为强矿震精准判识和力学机制及冲击地压预测研究提供依据。

## 参考文献(References):

[1] 丛利,曹安业,周远宏,等.基于动静载冲击地压危险叠加的综合预警方法[J].采矿与安全工程学报,2020,37(4):767-776.  
CONG Li, CAO Anye, ZHOU Yuanhong, et al. The comprehensive pre-warning method of rock burst hazard based on theory of dynamic and static combined loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 767-776.

[2] 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 shock waves [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 23-31.

[3] 尚晓光,朱斯陶,姜福兴,等.地面直井水压致裂防控巨厚硬岩运动型矿震试验研究[J/OL].煤炭学报:1-13[2022-02-26].

DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.0503.

SHANG Xiaoguang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Experimental study on the prevention and control of mine earthquake by high pressure water fracturing of huge thick strata in vertical shaft [J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-13 [2022-02-26]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.0503.

[4] 朱斯陶,王博,姜福兴,等.基于冲击地压-矿震协同控制的隔离煤柱合理宽度研究[J].煤炭科学技术,2021,49(6):102-110.  
ZHU Sitao, WANG Bo, JIANG Fuxing, et al. Study on reasonable width of isolated coal pillar based on rock burst-mineearthquake coordinated control [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 102-110.

[5] 丁鑫,肖晓春,吕祥锋,等.煤岩破裂过程声发射时-频信号特征与演化机制[J].煤炭学报,2019,44(10):2999-3011.  
DING Xin, XIAO Xiaochun, LÜ Xiangfeng, et al. Characteristics and evolution mechanism of acoustic emission time-frequency signal during coal failure process [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 2999-3011.

[6] 曹安业,窦林名,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. Characteristic of energy radiation and stress drop in different failure models of mining-induced coal-rock mass [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 350-355.

[7] ORLECKA-SIKORA B, LASOCKI S, LIZUREK G, et al. Response of seismic activity in mines to the stress changes due to mining induced strong seismic events [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 53: 151-158.

[8] RUDZINSKI L, MIREK K, MIREK J. Rapid ground deformation corresponding to a mining-induced seismic event followed by a massive collapse [J]. Natural Hazards, 2019, 96(1): 461-471.

[9] MENDECKI MJ, WOJTECKI L, ZUBEREK WM. Case studies of seismic energy release ahead of underground coal mining before strong tremors [J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(8): 3487-3508.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 李楠,王恩元,葛兆晨.微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J].煤炭学报,2017,42(S1):83-96.  
LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines: Present status and future prospects [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 83-96.

[13] 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 rock-burst mechanism for deep tunnel based on moment tensor[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 163-172, 181.
- [14] DAHM T. Relative moment tensor inversion based on ray theory: Theory and synthetic tests[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 124(1): 245-257.
- [15] 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.
- [16] 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, CHENG Fan, et al. Moment tensor inversion of rock failure and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 1-18.
- [17] AKI K, RICHARDS P. *Quantitative Seismology Theory*[M]. San Francisco: W.H. Freeman, 2002: 37-59.
- [18] 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: 23-26.
- 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 & Technology, 2009: 23-26.
- [19] URBANCIC T, TRIFU C, MERCER R, et al. Automatic time-domain calculation of source parameters for the analysis of induced seismicity[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86: 1627-1633.
- [20] 明华军, 冯夏庭, 张传庆, 等. 基于微震信息的硬岩新生破裂面方位特征矩张量分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1716-1722.
- MING Huajun, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Moment tensor analysis of attitude characterization of hard rock newborn fracture surface based on microseismic informations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1716-1722.
- [21] 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: 41-42.
- CHEN Fan. Failure mechanism of mining induced tremor and response law of its source mechanics parameters[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019: 41-42.
- [22] FUJII Y, ISHIJIMA Y, DEGUCHI G. Prediction of coal face rock-bursts and microseismicity in deep longwall coal mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(1): 85-96.
- [23] FITCH T, MCCOWAN D, SHIELDS M. Estimation of seismic moment tensor from teleseismic body wave data with application to intraplate and mantle earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(B7): 3817-3828.
- [24] KNOPOFF L, RANDALL M. The compensated linear-vector dipole: a possible mechanism for deep earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(26): 4957-4963.