



采矿与岩层控制工程学报
Journal of Mining And Strata Control Engineering
ISSN 2096-7187,CN 10-1638/TD

《采矿与岩层控制工程学报》网络首发论文

题目: 深部开采强动载波形分类特征及震源参量响应规律
作者: 李家卓, 邱航, 窦林名, 王剑, 刘舜, 马衍坤
DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1491
收稿日期: 2024-12-31
网络首发日期: 2025-04-09
引用格式: 李家卓, 邱航, 窦林名, 王剑, 刘舜, 马衍坤. 深部开采强动载波形分类特征及震源参量响应规律[J/OL]. 采矿与岩层控制工程学报.
<https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1491>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

李家卓, 邱航, 窦林名, 等. 深部开采强动载波形分类特征及震源参量响应规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, xxxx, x(x): xxxxxx.

LI Jiazhao, QIU Hang, DOU Linming, et al. Classification characteristics of strong motion-carrying waveforms for deep mining and seismic source parametric response law[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, xxxx, x(x): xxxxxx.

深部开采强动载波形分类特征及震源参量响应规律

李家卓^{1,2}, 邱航¹, 窦林名^{2,3}, 王剑⁴, 刘舜¹, 马衍坤⁵

(1. 安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001; 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 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 山东能源鲁西矿业有限公司, 山东 菏泽 274700; 5. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了揭示深部开采过程中强动载震源机制及震源参量响应规律, 以古城煤矿 3105 工作面为工程背景, 分析了开采期间强动载事件分布特征与震源机制, 并采用 HHT 方法对不同类型的强动载波进行了时频特征分析, 定量计算了 3 类动载的震源参量, 揭示了不同类型动载的能量释放特征与破裂模式。研究表明: 强动载可分为顶板运动型、煤柱失稳型和断层错动型。断层区域动载断层两侧应力出现变化, 发生压缩破坏; 顶板区域动载受顶板破坏机制影响, 主要发生压缩破坏和剪切破坏; 煤柱区域动载主要发生压缩破坏。断层型强动载倾向角范围主要为 30°~45°, 顶板型强动载为 10°~65°, 煤柱型强动载为 40°~50°。3 类动载波在频率分布、能量分布上存在较大差异, 其震源破裂时能量释放特征各不相同。顶板型强动载波边际谱呈单峰分布, 频率主要集中在 50~90 Hz; 断层型强动载波边际谱呈双峰分布, 频率主要集中在 0~50 Hz; 煤柱型强动载波边际谱呈宽频谱分布, 频率主要集中在 10~100 Hz。煤柱型强动载的地震矩最大, 其次为顶板型, 断层型最小。在震源半径相同的情况下, 断层型动载的非弹性变形导致体积增大程度最大, 煤柱型强动载次之, 顶板型强动载最小。研究结果可为冲击地压矿井分源防控提供一定的理论参考。

关键词: 冲击地压; 深部开采; 强动载; 时频特征; 震源机制

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(XXXX)00-XXXX-17

Classification characteristics of strong motion-carrying waveforms for deep mining and seismic source parametric response law

LI Jiazhao^{1,2}, QIU Hang¹, DOU Linming^{2,3}, WANG Jian⁴, LIU Shun¹, MA Yankun⁵

(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. National Key Laboratory of Fine Exploration and Intelligent Development of Coal, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Shandong Energy Luxi Mining Co., Ltd., Heze 274700, China; 5. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to reveal the seismic source mechanism of strong dynamic loads and the corresponding law of

收稿日期: 2024-12-31

修回日期: 2025-03-14

责任编辑: 付玉凯

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1491

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3004603); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助项目 (U21A20110)

作者简介: 李家卓 (1986—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师, 主要从事冲击地压发生机理与防控技术等方面的研究工作。E-mail: jiazhao312@126.com

通信作者: 窦林名 (1963—), 男, 青海平安人, 教授, 博士生导师, 主要从事冲击地压发生机理与防控技术等方面的研究工作。E-mail: lmdou@126.com

seismic source parameter in the deep mining process, the distribution characteristics of strong dynamic loads and the seismic source mechanism during the mining period were analyzed with the working face of Gucheng Mine 3 105 as the engineering background, and the time-frequency characterization of different types of strong dynamic loads was carried out with the method of HHT, and the seismic source parameter of the three types of dynamic loads was quantitatively calculated, which reveals the energy release characteristics and rupture patterns of different types of dynamic loads. The energy release characteristics and rupture modes of different types of dynamic loads are revealed. The results show that the strong dynamic loads can be divided into roof motion type, coal column instability type and fault misalignment type. The dynamic load in the fault area changes the stresses on both sides of the fault and causes compression damage; the dynamic load in the roof area is affected by the roof damage mechanism and mainly causes compression damage and shear damage; the dynamic load in the coal pillar area mainly causes compression damage. The inclination angle of fault-type strong dynamic load mainly ranges from 30° to 45° , that of roof-type strong dynamic load from 10° to 65° , and that of coal pillar-type strong dynamic load from 40° to 50° . The three types of dynamic load waves differ greatly in frequency distribution and energy distribution, and the energy release characteristics of the rupture of their seismic sources are different. The marginal spectrum of the top-plate strong dynamic wave shows a single-peak distribution, and the frequency is mainly concentrated in 50~90 Hz; the marginal spectrum of the fault-type strong dynamic wave shows a double-peak distribution, and the frequency is mainly concentrated in 0~50 Hz; the marginal spectrum of the coal-column-type strong dynamic wave shows a broadband spectrum distribution, and the frequency is mainly concentrated in 10~100 Hz. The coal-column-type strong dynamic wave has the largest seismic moment, followed by top-plate type, and the smallest one of the fault-type; the non-seismic moment of the fault-type dynamic wave has the largest seismic moment, and the non-seismic moment of the fault-type dynamic wave has the largest seismic moment. In the case of the same radius of the seismic source, the inelastic deformation of the fault-type dynamic load leads to the largest volume increase, followed by the coal pillar-type strong dynamic load, and the roof-type strong dynamic load has the smallest scale. The results of this study can provide some theoretical references for the prevention and control of sub-sources in impact ground pressure mines.

Key words: rock burst; deep mining; strong dynamic loading; time-frequency characteristics; seismic source mechanism

基于我国“缺气、少油、相对富煤”的资源禀赋特征,煤炭一直处于能源结构中的主导地位。随着煤炭开采进入深部,开采环境也日益复杂,在高应力、高地温、高渗透压等极端条件下,岩体的力学行为发生显著变化,导致动力灾害频发。矿震是由工作面开采导致煤岩体快速释放弹性能所造成的震动现象,在满足一定条件的情况下,可能导致冲击地压或其他动力灾害的发生^[1-2]。冲击地压是采矿诱发的矿井地震,一般认为是由煤岩所受动静载叠加诱发的一种自然灾害^[3-5]。例如:2007年8月,美国犹他州煤矿发生一起由煤柱内爆诱发的3.9级地震事件,造成一定人员伤亡^[6-7];2011年11月,中国义马千秋煤矿21221工作面临近F16大型逆断层

掘进时发生冲击地压,造成大量人员伤亡^[8]。鉴于冲击地压灾害的复杂性和破坏性,识别和分类动载波形对于灾害预警和响应至关重要。动载波形的分类特征和震源参量是理解动载成因、评估动载危险性和制定防治措施的关键。波形分类特征反映了动载波在时域和频域上的特性,而震源参量则定量描述了动载源的物理过程,包括地震矩、应力降和震源半径等。这些参数对于揭示动载的破裂机制、能量释放和传播特性至关重要。

为了深入了解矿震发生机理,从而对矿震源头进行准确识别分类,许多专家学者在矿震波形特征、震源参量分析等方面进行了诸多研究。谷雪斌等^[9]以冲击地压矿井南屯煤矿为工程背景,划分了矿震、

爆破、煤岩体破裂、敲击和噪音 5 种类型微震信号, 建立了 5 种信号类型的样本数据库, 分析了最大振幅、持续时间、主频等微震特征参数, 建立了微震事件类型的 BP 神经网络判识模型, 发现矿震事件与煤层上方高位坚硬岩层破断有关, 其能量一般不低于 10^5 J, 表现出较高的最大振幅和平均振幅特征; LI Xuelong 等^[10]应用 Hilbert-Huang 变换分析了天然矿震和爆破波形特征, 认为天然矿震主导频率为 20 Hz, 瞬时能量持续时间较长, 峰值能量到达时间较早, 衰减速率较慢, 峰值较低; 陆菜平等^[11]通过煤矿微震监测系统揭示了顶板破断过程中的微震活动规律, 发现软弱顶板破断之前, 微震信号主频开始向低频段移动, 但前兆主频均大于 20 Hz, 来压之后主频又开始向高频段移动。除此之外, 其他学者也通过时频分析方法对矿震、天然地震和冲击地压波形进行了分类识别^[12-14], 并取得了一定成果。在震源波形特征研究基础上, 诸多学者运用数值模拟、Brune 模型求解等方法对震源参量响应进行了大量研究。曹安业等^[15]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 个冲击地压频发区的矿震破裂机制与震源参量响应规律, 发现剪切型矿震震源参量平均值 (除视应力外) 明显高于拉张型矿震, 剪切型矿震时冲击危险性显著高于拉张型矿震; 陈栋等^[16]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; BOETTCHER 等^[17]基于南非 Tau Tona 矿地震网络以及南非矿山自然地震实验室网络确定了 100 次采矿诱发地震的矩张量范围。

我国学者对冲击地压发生机理^[18-22]进行了大量研究, 并提出了针对性的防治对策, 但以上研究大多是针对诱发煤岩体冲击地压的动载。大量工程现场证明因动载源不同, 作用到煤岩体上的动载表现出差异性, 而对于动载源头识别方面的研究相对较少。古城煤矿因地质条件复杂, 动载源头多样, 笔者收集了古城煤矿工作面开采期间的动载震动波形事件, 通过 Hilbert 变换求解其边际谱、时频谱和瞬时能量谱, 研究煤柱型、顶板型、断层型强动载波形时频特征。同时, 采用矩张量反演方法, 计算不同类型强动载的震源参量和震源机制, 并对动载事件的破裂类型进行判断, 从而对比得出不同类型强动载波形特征和震源参量响应规律上的差异性,

以期为我国深部煤矿开采强动载分源防控提供理论依据。

1 基于微震监测的动载事件分布特征

1.1 工程概况

古城煤矿位于山东省济宁市, 31 采区位于矿井南部, 处于 -1 030 m 水平, 煤层赋存深度在 1 030~1 100 m 之间, 平均埋深 1 065 m, 3105 工作面位于 31 采区西翼, 最大采深位于 -1 100 m 水平。3 号煤为 31 采区主采煤层, 平均厚度 8.6 m。3105 工作面走向长度 860.7 m, 倾向长度 172.7 m, 煤层倾角 0~15°, 直接顶和直接底为粉砂岩, 基本顶和基本底为细砂岩, 基本顶细砂岩厚度 12.06 m, 属于坚硬顶板。3105 工作面掘进及开采期间揭露 12 条断层, 且位于 31 采区边界处存在落差为 0~25 m 的大断层, 工作面两侧均留有超过 120 m 保护煤柱。动载数据来源于古城煤矿 SOS 微震监测系统, 工作面位置分布及其顶底板岩性如图 1 所示。

1.2 强动载事件分布特征

从古城煤矿微震事件分布情况出发, 分析其强动载聚集区域, 并指出 3 类动载分布范围。已有研究表明, 通过 SOS 微震监测系统获得的微震事件能量大于 10^4 J 时具有较大危险性, 认为该事件为强动载事件; 当能量大于 10^5 J 时易诱发冲击地压^[15, 23-24]。2020 年 4 月至 2020 年 5 月, 对 3105 工作面微震能量大于 10^3 J 的事件进行统计和分析, 微震事件分布如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 受超前支承压力和侧向支承压力的影响, 3105 工作面前方 300 m 范围内及两翼强动载事件较为聚集, 此时 3105 工作面已开采至临近 3106 工作面采空区不规则煤柱区域, 动载事件在顶板和煤柱区域较为密集。工作面后方顶板受周期破断影响, 强动载事件出现不同程度的离散分布; 过断层区域顶板较为破碎, 顶板活动主要体现在小能量事件积聚, 而出现较少的强动载事件。除此之外, 在远离开采工作面数百至数千米区域内的软弱岩层或断层区域也可能由于开采活动导致岩层破断或出现断层滑动^[25], 3105 工作面开采期间周边采区无采掘活动, 但在离工作面较远的 3DF243 断层区域同样出现了少数强动载事件, 这说明此处断层出现了活化。根据现场 SOS 微震监测系统监测结果, 深部强动载事件可分为 3 类, 分

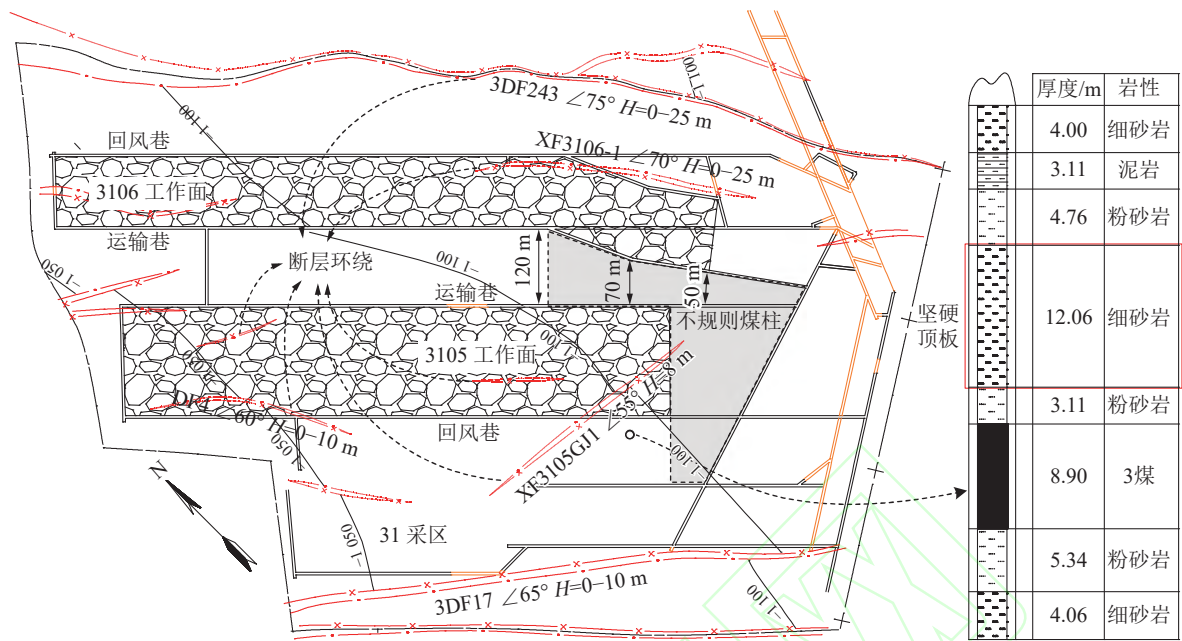


图 1 3105 工作面位置分布及顶底板岩性柱状

Fig. 1 3105 working face location distribution and top and bottom plate lithology columns

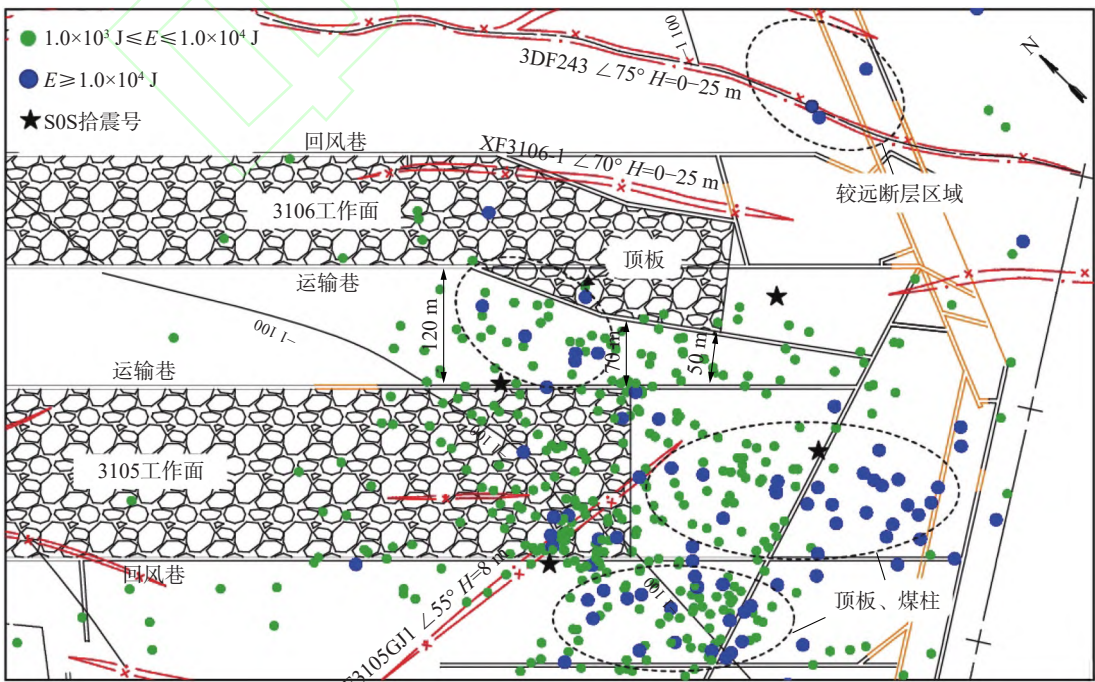
别为顶板运动型、煤柱失稳型和断层错动型。

2 不同类型强动载波形时频特征

2.1 强动载波形数据处理

为了深入了解各类强动载的波形特性,选择强动载事件遵循 3 个基本原则 (图 2(a)): (1) 所有选定的强动载事件在时空分布和震源机制上具有相似性; (2) 考虑到拾震器通常安装在巷道内,所记录的

波形信号已经历一定程度的衰减,在选择动载事件时,尽可能选择与拾震器距离相近通道的数据,以保留波形信号的原始特性; (3) 选择的通道数据尚未失真及超限。共选取 3 种类型、9 个强动载事件用于波形时频分析,9 个强动载微震事件基本信息见表 1,其中断层区域事件为 F1、F2 和 F3,顶板区域事件为 R1、R2 和 R3,煤柱区域事件为 C1、C2 和 C3。



(a) 平面图

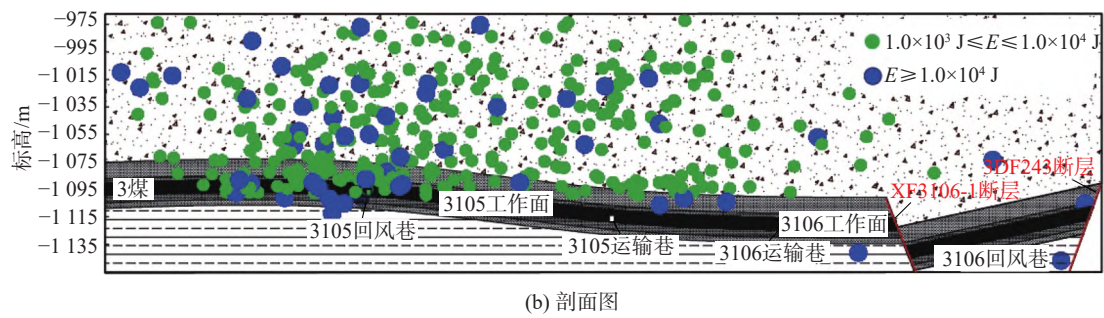


图2 3105工作面动载平剖面分布
Fig. 2 3105 working face ore quake flat profile distribution

表1 微震事件基本信息
Table 1 Basic information on microseismic events

序号	能量/ 10^4 J	分布区域	破裂类型	命名
1	2.30	断层	压缩破坏	F1
2	1.00	断层	压缩破坏	F2
3	1.30	断层	压缩破坏	F3
4	1.70	顶板	压缩破坏	R1
5	1.40	顶板	压缩破坏	R2
6	3.60	顶板	压缩破坏	R3
7	3.30	煤柱	压缩破坏	C1
8	2.00	煤柱	压缩破坏	C2
9	1.70	煤柱	压缩破坏	C3

考虑到原始波形数据存在冗余信息干扰,掩盖或扭曲真实的信号特征,采取小波阈值去噪方法^[26-27]对选取的9个微震事件进行重构并降噪。降噪后各微震事件波形如图3所示,3类动载波持续时间均接近1s,其中 T_{Start} 和 T_{End} 分别为动载波到达时刻和结束时刻,选取位于 T_{Start} 和 T_{End} 时刻范围内的有效信号进行时频分析。

2.2 不同类型强动载波时频特征分析

2.2.1 HHT 分析理论

HHT方法主要分为两部分,为经验模态分解EMD和Hilbert变换。首先通过经验模态分解,根据不同幅值尺度将原始信号分解为 n 阶固有模态

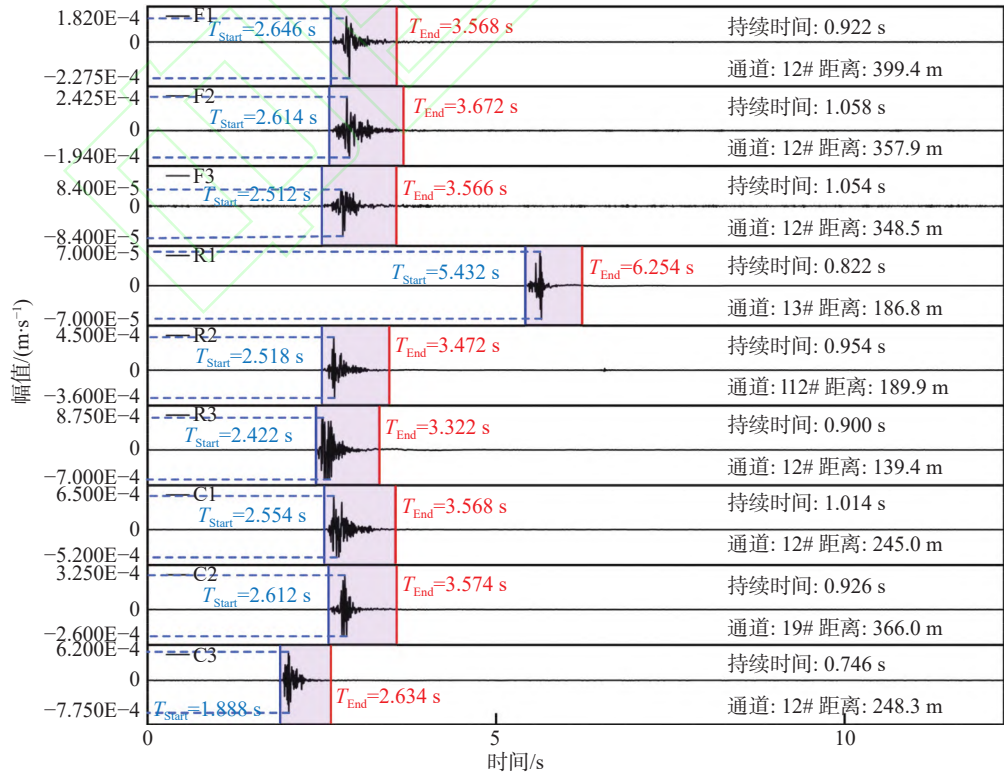


图3 降噪后不同类型强动载波波形
Fig. 3 Waveforms of different types of strong mining earthquakes after noise reduction

函数 IMF, 然后对 n 阶 IMF 进行 Hilbert 变换。基于 HHT 方法, 对原始波形信号进行经验模态分解, 得到 n 阶 IMF 分量, 进行 Hilbert 变换并求解其边际谱、时频谱和瞬时能量谱等, 可进一步研究动载信号更多特性^[28-30]。

目前煤矿监测台站普遍使用单分量拾震器, 对于单分量传感器拾取的波形, EMD 分解首先求出输入信号 $X(t)$ 的极大值和极小值点, 并拟合出上、下包络线, 求出其均值 $m_1(t)$ 。两式相减, 得到剩余信号为

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t) \quad (1)$$

IMF 必须满足以下两个条件: 第一, 信号的极值点等于过零点的数量或最多相差 1 个; 第二, 局部极值点定义的上下包络之间的平均值为零。如果 $h_1(t)$ 满足上述 2 个条件, 则 $h_1(t)$ 是 IMF。否则, 重复筛选过程 k 次, 直到 $h_{1k}(t)$ 成为某个 IMF。

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (2)$$

获得第一阶 IMF, 其表示数据序列 $X(t)$ 的最高频率。新的数据序列 $r_1(t)$ 可以通过从 $X(t)$ 中减去 $c_1(t)$ 来构造。

$$r_1(t) = X(t) - c_1(t) \quad (3)$$

$r_1(t)$ 已经执行了上述分解, 以获得第 2 阶 IMF, 并且重复该过程, 直到最后的数据序列 r_n 不能被分解为止。此时, r_n 表示数据序列 $X(t)$ 的趋势。

通过信号 $X(t)$ 的 EMD 分解获得多个 IMF 分量, 并且对每个 IMF 分量进行希尔伯特变换。

$$H[c(t)] = \frac{1}{\pi} C \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c(t')}{t-t'} dt' \quad (4)$$

其中 C 为 Cauchy 主值, 然后构造分析信号 $Z(t)$

$$z(t) = \alpha(t) e^{j\varphi(t)} \quad (5)$$

$$\alpha(t) = \sqrt{c^2(t) + H^2[c(t)]} \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{H[c(t)]}{c(t)} \quad (7)$$

其中 $\alpha(t)$ 为振幅函数, $\varphi(t)$ 为相位函数。

信号的瞬时频率定义为

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (8)$$

进而可求得 Hilbert 谱为

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) e^{i \int \omega_i(t) dt} \quad (9)$$

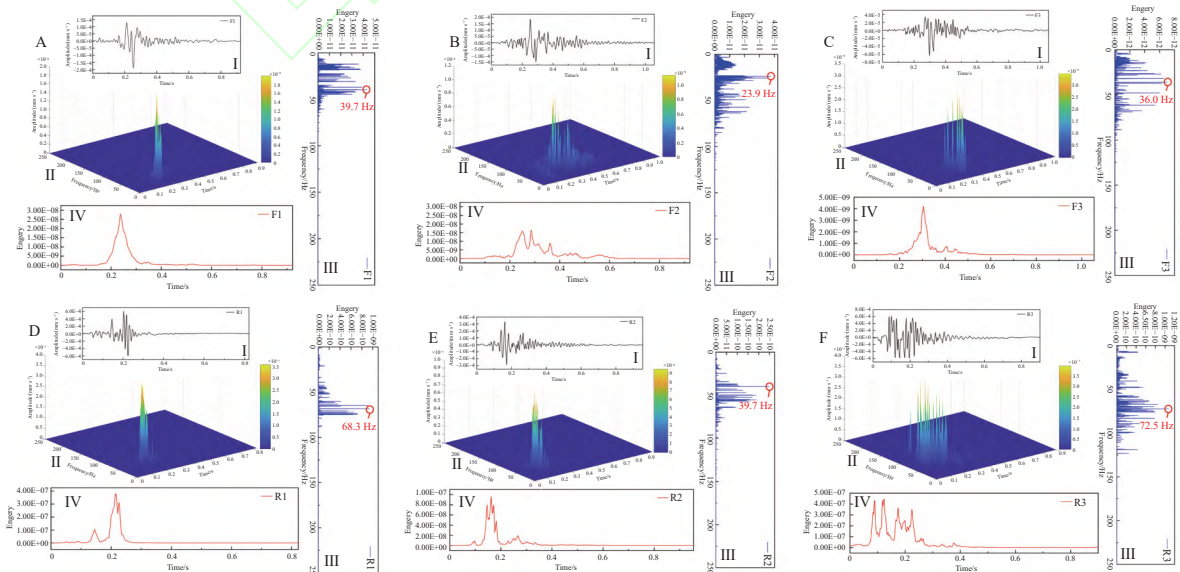
Hilbert 边际能量谱 $E(\omega)$ 和 Hilbert 瞬时能量谱 $IE(t)$ 可以通过分别在时域和频域中对 $H(\omega, t)$ 的平方进行积分来获得。

$$E(\omega) = \int_0^t H^2(\omega, t) dt \quad (10)$$

$$IE(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) dt \quad (11)$$

2.2.2 不同类型强动载波时频特征分析

基于 HHT 方法分析 3 类强动载波形信号, 得到其原始波形 I、Hilbert 谱 II、边际谱 III 和瞬时能量谱 IV, 如图 4 所示, 其中图 4(A)、(B) 和 (C) 分别为断层区域事件 F1、F2 和 F3; 图 4(D)、(E) 和 (F) 分别为顶板区域事件 R1、R2 和 R3; 图 4(G)、(H) 和 (I) 分别为煤柱区域事件 C1、C2 和 C3。



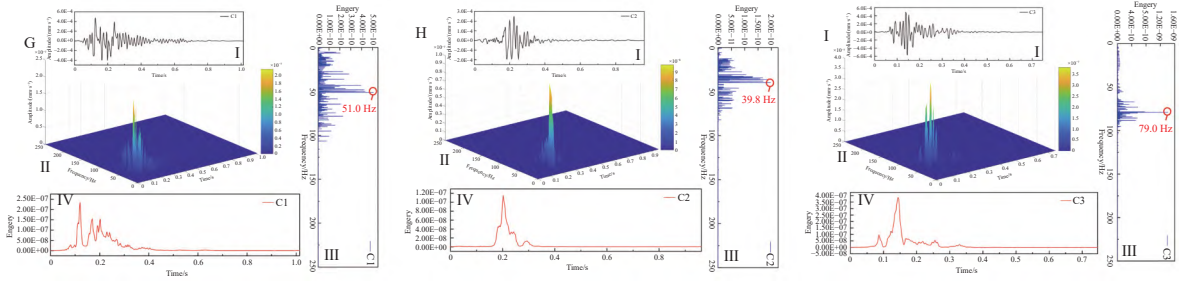


图4 不同类型动载波的 HHT 频谱图

Fig. 4 HHT spectra of different types of mineral seismic waves

边际谱反映了信号能量随频率的分布情况, 3类动载的主频分布各不相同, 其频率集中范围存在一定差异。断层型动载能量与频率呈现双峰分布, 频率主要集中在 0~50 Hz 范围内; 顶板型动载能量与频率呈现单峰分布, 频率主要集中在 50~90 Hz 范围内; 煤柱型动载能量与频率呈现能量呈宽频带分布, 集中在 10~100 Hz 范围, 幅值整体平缓但局部波动显著。

在震源破裂后, 断层型动载的瞬时能量逐渐升至峰值, 然后缓慢下降, 能量通过震动波向周围的煤岩体传播并释放, 没有出现过多的尾部峰值, 显示出单峰分布的特征。上述研究结果表明这些动载事件是由逆断层滑移引起的, 在受到远处工作面开采影响后, 逆断层在水平方向上受到挤压, 导致煤岩体破裂, 但煤岩结构很快趋于稳定; 顶板型动载在震源破裂后, 瞬时能量达到峰值前后, 存在多个密集的小能量峰值, 这表明在原岩应力和采动应力的共同作用下, 顶板在受到压缩破坏后, 积聚的能量连续且密集地释放; 煤柱型动载在震源破裂后, 瞬时能量迅速达到峰值, 然后快速下降, 并在之后出现小能量峰值, 这与煤柱型动载波边际谱幅值整体平缓但局部波动显著相吻合, 表明受开采影响, 煤柱内部应力状态发生变化, 导致压缩内爆破裂, 煤体积聚的能量瞬间释放, 同时周边煤体也伴随着小规模的破裂。

3 强动载震源机制及震源参量响应规律

3.1 矩张量反演动载震源机制方法

地震矩张量是用于表征作用在地震震源上等

效力的数学工具, 它在分析煤矿中的动载载荷震源破裂活动时被广泛应用。随着地球物理学的逐步发展, 双力偶模型^[15, 31]逐步被用于描述震源特性。在一定假设条件下, 当震源尺寸远小于观测距离和地震波波长时, 可将真实震源假设为点震源^[32], 以此来采用矩张量反演方法求解震源受力状态, 其求解公式为

$$u = GM \quad (12)$$

式中, u 为远场位移矩阵; G 为格林函数矩阵; M 为矩张量矩阵。

研究表明, 低频位移幅值^[33]可用于表示远场位移 u , 其计算方法为

$$\begin{cases} S_{D2} = 2 \int_0^\infty D^2(t) dt \\ S_{v2} = 2 \int_0^\infty V^2(t) dt \\ \Omega_0 = 2\lambda \sqrt{4S_{D2}^{\frac{3}{2}} S_{v2}^{-\frac{1}{2}}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $V(t)$ 为速度谱, 即 SOS 监测波形的速度与时间关系; $D(t)$ 为位移谱, 通过 $v-t$ 积分求得; S_{D2} 为位移平方谱时域积分; S_{v2} 为速度平方谱时域积分; Ω_0 为低频位移幅值。

其中 λ 取 1 或 -1, 主要取决于震源、拾震器和波形初动方向之间的相对关系, 其判断方法为

$$\lambda = \begin{cases} -1, & \text{波形初动向下, 传感器在震源上方} \\ 1, & \text{波形初动向上, 传感器在震源上方} \\ -1, & \text{波形初动向上, 传感器在震源下方} \\ 1, & \text{波形初动向下, 传感器在震源下方} \end{cases} \quad (14)$$

矩张量 M 可进一步分解为 3 个分量, 分别为各向同性成分 ISO、双力偶成分 DC 和补偿线性矢量偶极子成分 CLVD^[34]。求解 3 种成分的不同比例, 可描述震源破裂类型, 其比例求解公式为

$$\begin{aligned}
P_{\text{ISO}} &= \frac{2(M_1 + M_2 + M_3)}{|2(M_1 + M_2 + M_3)| + |4(M_1 + M_3 - 2M_2)| + 3(M_1 - M_3 - |M_1 + M_3 - 2M_2|)} \\
P_{\text{DC}} &= \frac{3(M_1 - M_3 - |M_1 + M_3 - 2M_2|)}{|2(M_1 + M_2 + M_3)| + |4(M_1 + M_3 - 2M_2)| + 3(M_1 - M_3 - |M_1 + M_3 - 2M_2|)} \\
P_{\text{CLVD}} &= \frac{4(M_1 + M_3 - 2M_2)}{|2(M_1 + M_2 + M_3)| + |4(M_1 + M_3 - 2M_2)| + 3(M_1 - M_3 - |M_1 + M_3 - 2M_2|)} \quad (15)
\end{aligned}$$

式中, M_1 、 M_2 、 M_3 为矩张量 M 的特征值, 其中 $M_1 \geq M_2 \geq M_3$; $P_{\text{DC}} \geq 60\%$ 时为剪切破坏; $P_{\text{DC}} \leq 40\%$ 且 $P_{\text{ISO}} > 0$ 时为张拉破坏; $P_{\text{DC}} \leq 40\%$ 且 $P_{\text{ISO}} < 0$ 时为压缩破坏; $40\% < P_{\text{DC}} < 60\%$ 且 $P_{\text{ISO}} > 0$ 时为张拉-剪切破坏; $40\% < P_{\text{DC}} < 60\%$ 且 $P_{\text{ISO}} < 0$ 时为压缩-剪切破坏。

煤岩体破裂过程可使用位错模型^[35] 进行描述, 其破裂面走向角、倾向角及滑移角可通过滑动向量 n 和破裂面法向量 v 分解求得, 计算方法为

$$\begin{cases} n = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_1 + \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_3 \\ v = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_1 - \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} e_3 \end{cases} \quad (16)$$

式中, e_1 、 e_3 为矩张量 M 最大和最小特征值 M_1 、 M_3 对应的单位特征向量, 且 $e_1 \perp e_3$ 。

3.2 不同类型强动载震源机制参数

3105 工作面附近共布置了 6 个测站 (测站 6、测站 12、测站 13、测站 15、测站 18 和测站 19), 测站 6 布置于 3105 工作面运输巷靠近停采线附近; 测站 12 布置于 3105 工作面停采线右侧附近; 测站 13 布置于 3105 工作面回风巷靠近停采线附近; 测站 15 布置于 3DF243 断层附近; 测站 18 布置于 3DF17 断层上盘附近; 测站 19 布置于 3106 工作面停采线附近。通过测站内部拾震器接收的动载速度-时间信号, 由式 (13) 进行计算, 可获得各类动载事件的低频位移, 采用矩张量反演方法, 对震源参数和震源机制进行计算, 来判断不同类型强动载事件的破裂类型。根据上述 2.1 节选取的强动载波形数据, 考虑到顶板初次破断、周期破断、回转失稳、滑移失稳 4 类破裂形式, 在 2.1 节选取的 9 个强动载事件基础上对发生在图 2 圈定区域内的 25 个强动载事件求解震源机制, 得到其震源沙滩球分布如图 5 所示, 红色区域表示张拉, 白色区域表示压缩。求解得到震源破裂机制参数见表 2。

从图 5 和表 2 来看, 选取的 25 个微震事件中, 压缩破坏 12 起, 占比 48%; 张拉破坏 4 起, 占比 16%; 剪切破坏 6 起, 占比 24%; 压缩-剪切破坏 2 起占比 8%; 张拉-剪切破坏 1 起, 占比 4%。这表

明 3105 工作面开采期间强动载震源机制主要为压缩破坏。结合强动载的空间分布特征可以看出, 较远的逆断层区域和工作面宽煤柱侧的强动载事件主要以压缩破坏为主, 而顶板区域则主要表现为剪切破坏和压缩破坏。如强动载事件 1、2、3 的走向角与断层面几乎平行, 滑移角接近 90° , 显示出逆断层滑移的特征。此外, 在 3105 工作面开采期间, 周围没有其他工作面进行开采, 因此可以推测, 3105 工作面开采所引起的应力激活了远处的 3DF243 断层, 导致断层附近的煤岩体发生滑移破裂, 倾向角范围为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。

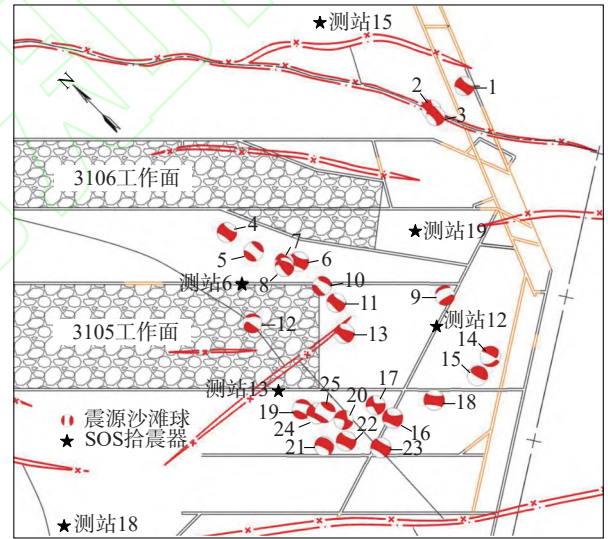


图 5 3105 工作面强动载震源机制分布

Fig. 5 Distribution of strong mining earthquake source mechanism in 3105 working face

在工作面顶板的前后区域, 强动载事件主要表现为剪切破坏, 表明顶板在这些区域大多数发生了剪切滑移, 如强动载事件 13、16、19 和 20; 而在工作面两侧的煤柱上方, 顶板则主要表现为压缩破坏, 这可能是由于煤柱的高集中应力所致, 如强动载事件 5、6、7、9、11、12 和 16。在顶板区域, 动载事件的倾向角范围为 $10^\circ \sim 85^\circ$ 。此外, 事件 21、22、23 和 25 发生在煤柱内部, 主要表现为压缩破坏和剪切破坏, 其倾向角范围为 $45^\circ \sim 50^\circ$ 。

3.3 强动载破裂面产状分析

表 2 3105 工作面强动载震源破裂机制参数

Table 2 Parameters of the rupture mechanism of the strong mining earthquake source in the 3105 working face

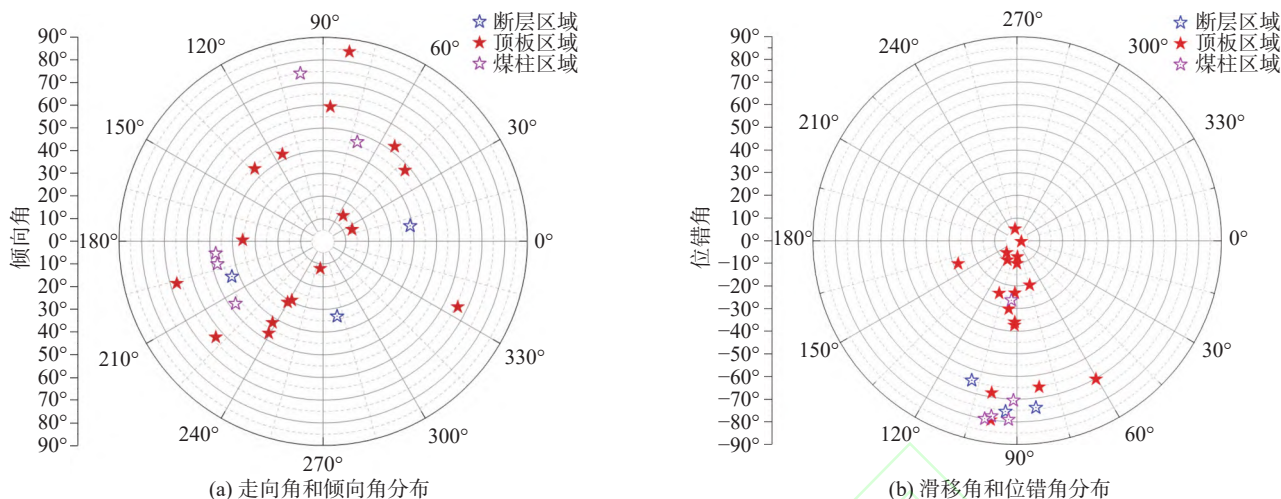
强动载事件	破裂面产状			位错角/(°)	$P_{ISO}/\%$	$P_{DC}/\%$	$P_{CLVD}/\%$	分布区域	震源破裂类型
	走向角/(°)	倾向角/(°)	滑移角/(°)						
1	10.10	38.93	96.40	-74.21	-32.69	1.92	-65.39	断层	压缩破坏
2	201.08	43.13	86.11	-75.67	-32.77	1.58	-65.65	断层	压缩破坏
3	280.51	33.63	72.04	-64.84	-31.95	4.96	-63.09	断层	压缩破坏
4	115.05	42.48	81.62	-80.04	-12.82	42.15	-45.03	顶板	压缩-剪切破坏
5	133.27	44.02	-81.50	65.34	-32.91	0.91	-66.18	顶板	压缩破坏
6	179.04	35.45	80.51	-68.11	-32.40	2.93	-64.67	顶板	压缩破坏
7	86.93	59.48	71.20	-24.51	-33.02	1.05	-65.93	顶板	压缩破坏
8	239.68	31.05	89.66	-10.14	33.05	0.78	66.17	顶板	张拉破坏
9	334.04	65.96	-158.59	27.89	-32.90	0.76	-66.34	顶板	压缩破坏
10	238.04	42.21	-92.47	23.14	31.77	4.78	63.45	顶板	张拉破坏
11	239.36	47.09	88.19	-37.43	-31.91	3.75	-64.34	顶板	压缩破坏
12	263.75	12.02	-116.41	9.62	-26.10	37.99	-35.91	顶板	压缩破坏
13	40.98	47.74	105.83	-20.36	-10.76	69.45	-19.79	顶板	剪切破坏
14	52.22	14.35	-12.79	1.85	22.84	35.52	41.64	顶板	张拉破坏
15	82.14	84.40	100.58	5.22	19.20	43.36	37.44	顶板	张拉-剪切破坏
16	221.75	63.42	83.00	-30.4	-22.28	25.35	-52.37	顶板	压缩破坏
17	196.04	67.12	90.71	-7.13	8.98	71.81	19.21	顶板	剪切破坏
18	53.02	52.40	119.59	-70.3	-26.35	43.04	-30.61	顶板	压缩-剪切破坏
19	241.93	29.41	-91.63	35.97	14.44	81.92	3.64	顶板	剪切破坏
20	22.37	13.79	48.60	-7.03	4.73	84.05	11.22	顶板	剪切破坏
21	97.76	74.73	84.53	-26.41	-21.20	33.31	-45.49	煤柱	压缩破坏
22	215.45	47.39	87.26	-79.1	-0.09	84.02	-15.89	煤柱	剪切破坏
23	71.10	46.32	88.68	-70.55	-31.61	3.05	-65.35	煤柱	压缩破坏
24	192.05	47.69	81.67	-78.31	23.82	26.29	49.89	煤柱	张拉破坏
25	186.39	47.65	-100.30	79.92	17.46	69.60	-12.94	煤柱	剪切破坏

强动载事件的破裂面产状具有一定的规律性,不同成因和破裂形态导致了强动载破裂面走向角、倾向角、滑移角和位错角的分布差异,同时为了使滑移角和位错角分布更加直观,对部分滑移角负值进行角度转换,绘制分布雷达图如图 6 所示。

断层区域动载事件的倾向角大多位于 30°~45°之间。由于受工作面开采产生的应力影响,3DF243 断层的倾角有所减小,滑移角接近 90°,这表明动载导致了断层两侧应力的变化,水平应力的挤压作用使得断层两侧发生产状变形,并引发了压缩破坏。顶板区域大多数事件的倾向角范围在 30°~70°之间。对于发生压缩破坏的事件,其大部分倾向角大于 40°;而发生剪切破坏的事件,其倾向角则在 10°~50°之间。倾向角大小与顶板的破坏机制密切相关,倾向角越大,说明破裂面在垂直方向上的运

动趋势越明显。顶板的压缩破坏主要是由于上覆岩层的运动导致垂直应力水平升高,而剪切破坏则主要是由于水平应力的变化导致顶板发生剪切滑移。煤柱区域动载事件的倾向角主要集中在 47°左右,以压缩破坏为主。

滑移角和位错角与不同动载类型也呈现出一定的关联性。断层区域受采动应力激活,滑移方向与断层走向平行,力学过程单一,角度分布集中,滑移角接近 90°,断层受水平挤压作用发生逆冲滑移;顶板区域破坏受原岩应力与采动应力双重作用,破裂模式多样,滑移角离散程度大 (-158.59°~119.59°),位错角主要为负值且分散 (-80.04°~65.34°),顶板破坏机制复杂,包括剪切滑移和垂直压缩,剪切破坏时位错角大多趋近于 0°,而压缩破坏时趋近于负值;煤柱区域高集中应力引发瞬时效

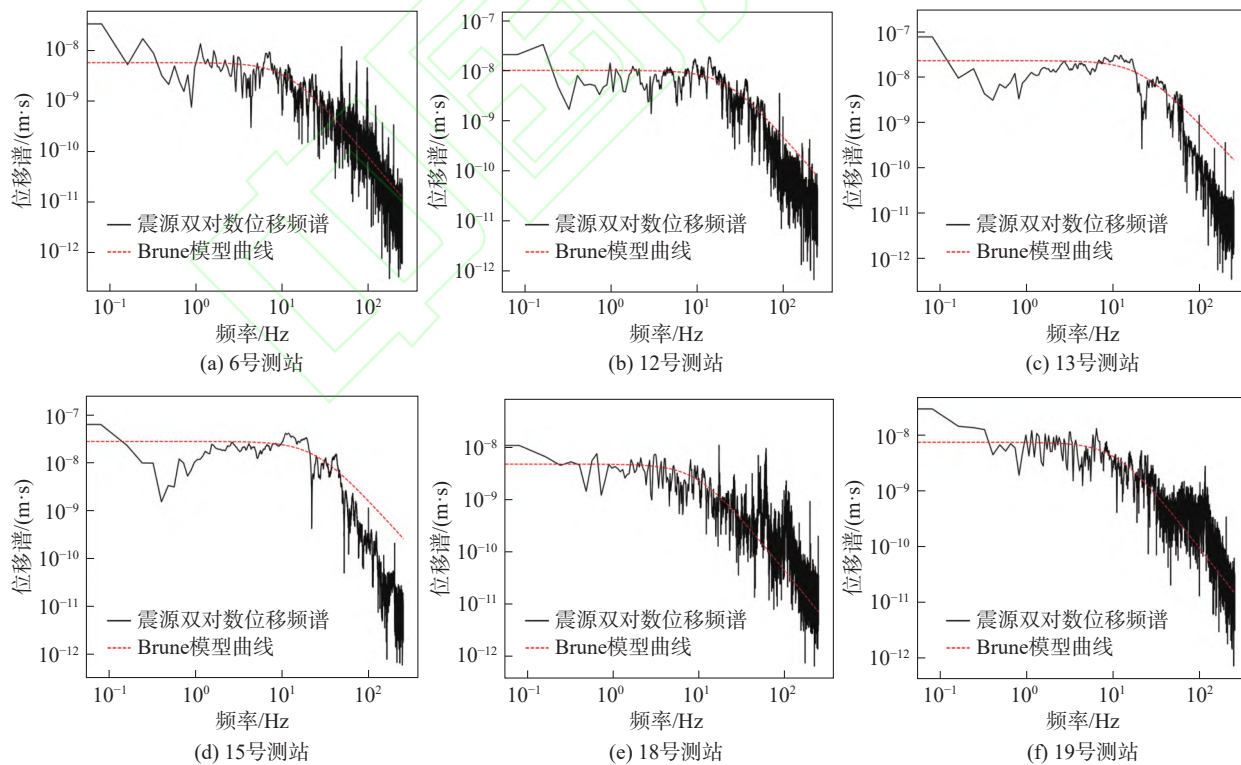


量释放, 滑移角集中在 80° 左右, 煤柱内应力突变导致多方向破裂, 位错角集中在 -80° 左右, 呈现出压缩内爆破裂。

3.4 强动载震源参量响应规律

震源参量可多方面表征震源力学特征, 为了对强动载震源机制进一步分类, 采用快速傅里叶变换

对上述 25 个强动载波形求解震源双对数位移频谱图, 并基于 Brune 模型进行拟合, 由于强动载事件数量偏多, 断层、顶板、煤柱区域部分强动载震源谱如图 7、8、9 所示, 求解得到的各个事件的低频位移和拐角频率见表 3。



根据震源参量求解方法, 对上述典型强动载震源参量进行计算, 其中震源处介质密度 $\rho=2500$

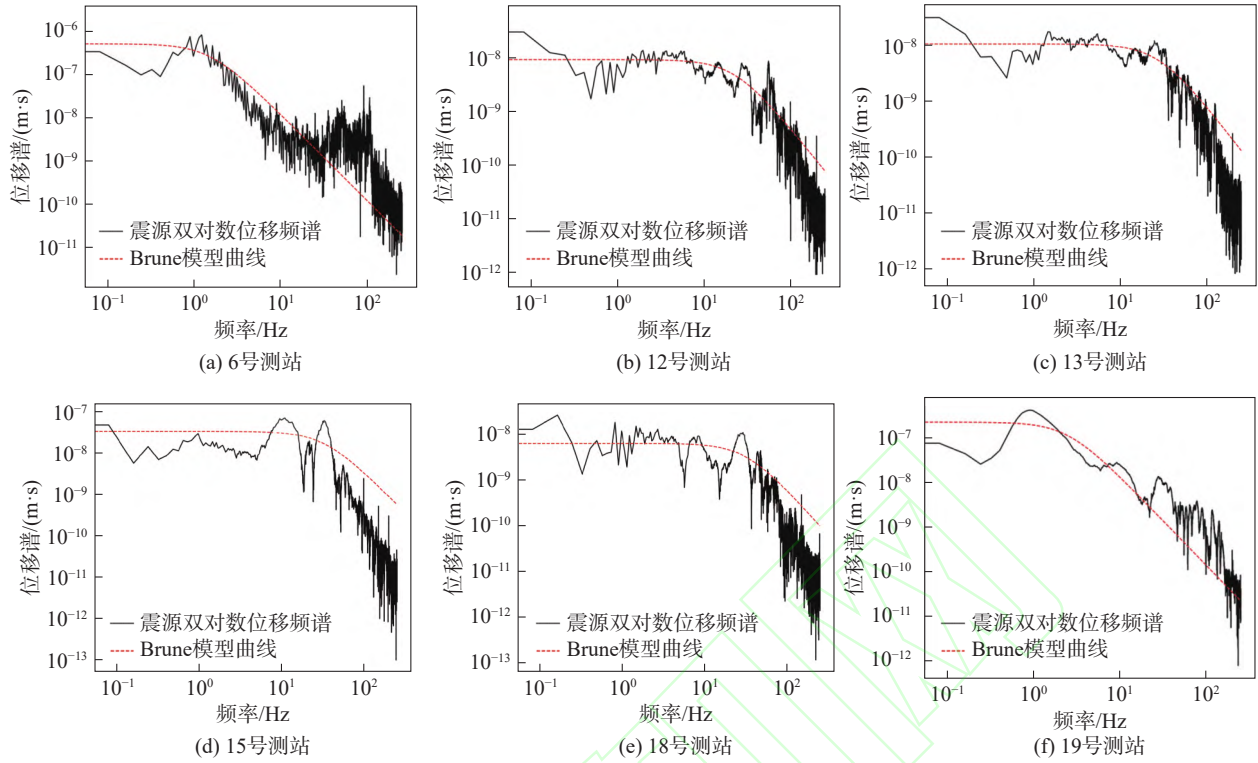


图8 顶板区域动载事件的实测震源谱与 Brune 模型谱

Fig. 8 Measured source spectra and Brune model spectra of mining earthquake events in the top plate region

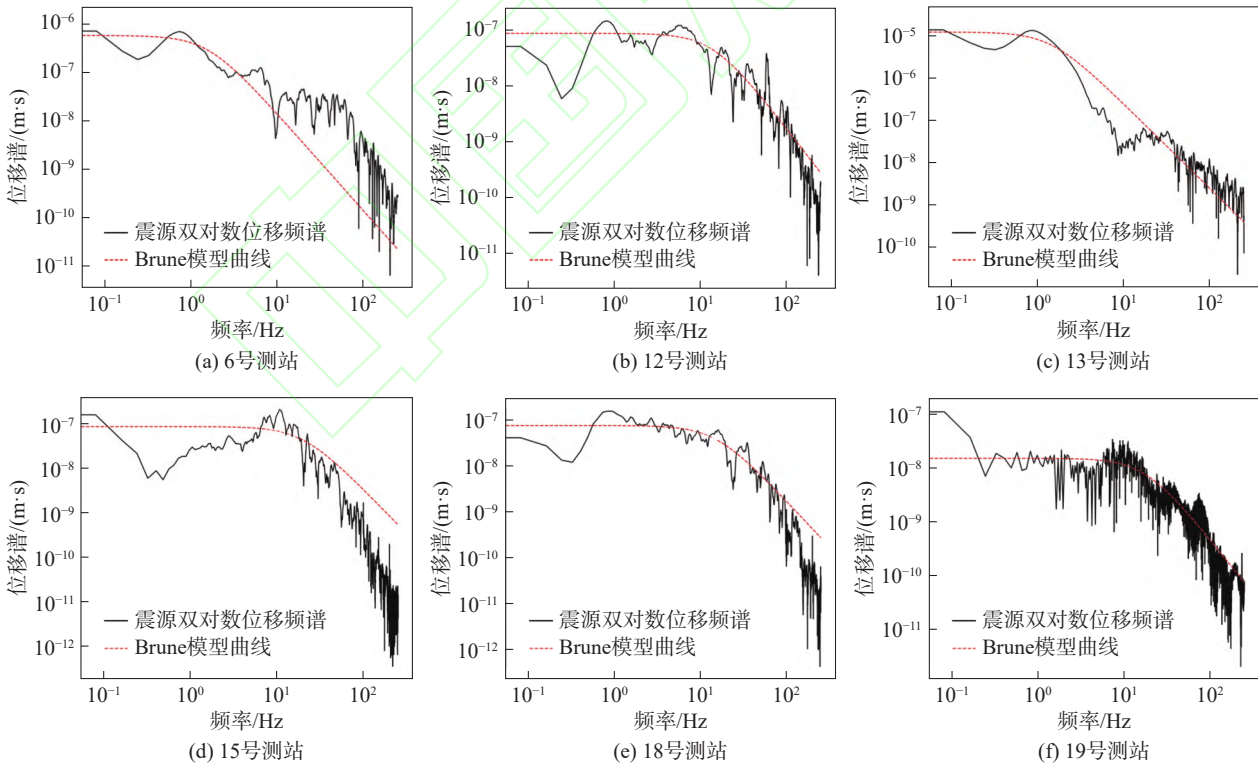


图9 煤柱区域动载事件的实测震源谱与 Brune 模型谱

Fig. 9 Measured source spectra and Brune model spectra of mining seismic events in the coal pillar region

kg/m^3 , 主要依据 P 波信息进行求解, P 波波速 $v_p=3\,000$ m/s, P 波辐射系数 $F_c=0.52$, P 波或 S 波振幅自由表

面放大系数 $R_c=1.0$, 震源介质剪切模量一般取 $\mu=3.0\times 10^4\text{MPa}$ 。求解得到典型强烈动载震源参量见

表 3 典型强动载低频位移和拐角频率统计

Table 3 Statistics of low-frequency displacement and corner frequency of a typical strong mining earthquake

事件	低频位 移 $\Omega_0/(10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s})$	拐角频率 f_0/Hz	事件	低频位 移 $\Omega_0/(10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s})$	拐角频率 f_0/Hz
1	0.254	22.31	14	2.929	11.46
2	2.135	19.54	15	0.350	26.70
3	1.390	14.31	16	0.829	16.17
4	2.541	2.84	17	8.207	2.04
5	5.911	4.76	18	2.031	12.66
6	4.187	3.63	19	3.816	9.76
7	1.652	12.26	20	2.442	21.91
8	0.202	13.49	21	3.890	4.58
9	0.669	22.64	22	5.762	5.21
10	1.397	13.43	23	3.433	30.55
11	1.287	13.94	24	0.293	30.89
12	2.865	25.10	25	8.242	2.30
13	1.291	14.22	--	--	--

表 4, 断层、顶板、煤柱区域典型强动载震源参量对比结果如图 10 所示。

根据表 4 和图 10 统计结果可以得出, 各类强动载事件地震矩均介于 $10^{10}\sim 10^{12} \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间, 且地震矩与辐射能量成正相关关系。在辐射能量相同条件下, 煤柱型强动载地震矩最大, 其次为顶板型强动载, 断层型强动载最小, 说明煤柱震源破裂强度更大, 结合其震源破裂类型可知, 煤柱区域发生的多为压缩内爆破坏, 顶板型强动载由于破坏形式多变, 破裂强度累积之后仍表现为较高水平, 而断层型强动载破裂强度较小, 断层面在应力环境改变后

表 4 典型强动载震源参量统计

Table 4 Statistics of typical strong mining earthquake source parameters

事件	地震矩/ $(10^{11} \text{ N}\cdot\text{m})$	辐射能量/ (10^4 J)	震源半径/ m	视体积/ (10^8 m^3)	应力降/ MPa	视应力/ MPa
1	0.21	2.30	7.12	0.003	28.847	0.278
2	1.49	1.00	28.74	0.372	43.555	0.420
3	0.98	1.30	29.71	0.122	17.711	0.171
4	0.62	1.10	78.69	0.058	1.150	0.011
5	4.21	5.10	37.92	0.579	8.079	0.078
6	1.49	3.80	49.19	0.098	0.962	0.009
7	0.88	1.60	24.22	0.081	18.761	0.181
8	0.11	1.00	34.91	0.002	2.992	0.029
9	0.21	1.00	20.02	0.007	33.999	0.328
10	0.74	3.50	11.83	0.026	20.443	0.197
11	0.52	1.70	35.54	0.027	32.415	0.313
12	1.46	1.60	37.72	0.223	27.263	0.263
13	0.37	1.10	39.85	0.021	7.483	0.072
14	1.93	1.90	51.93	0.326	56.074	0.541
15	0.30	3.80	6.25	0.004	73.957	0.713
16	0.60	1.40	30.77	0.043	26.088	0.252
17	4.81	2.10	81.94	1.840	0.697	0.007
18	0.79	3.60	18.50	0.029	37.262	0.359
19	0.68	1.60	36.19	0.048	13.373	0.129
20	2.04	3.20	29.94	0.216	51.408	0.496
21	1.80	2.20	53.65	0.246	2.864	0.028
22	2.04	3.30	58.88	0.210	4.467	0.043
23	0.11	2.00	5.16	0.001	35.555	0.343
24	0.16	2.00	6.48	0.002	99.452	0.959
25	2.95	2.30	69.09	0.632	0.382	0.004

发生小尺度滑移或破裂。震源半径和视体积均可体现震源破裂尺度, 在相同震源半径条件下, 断层

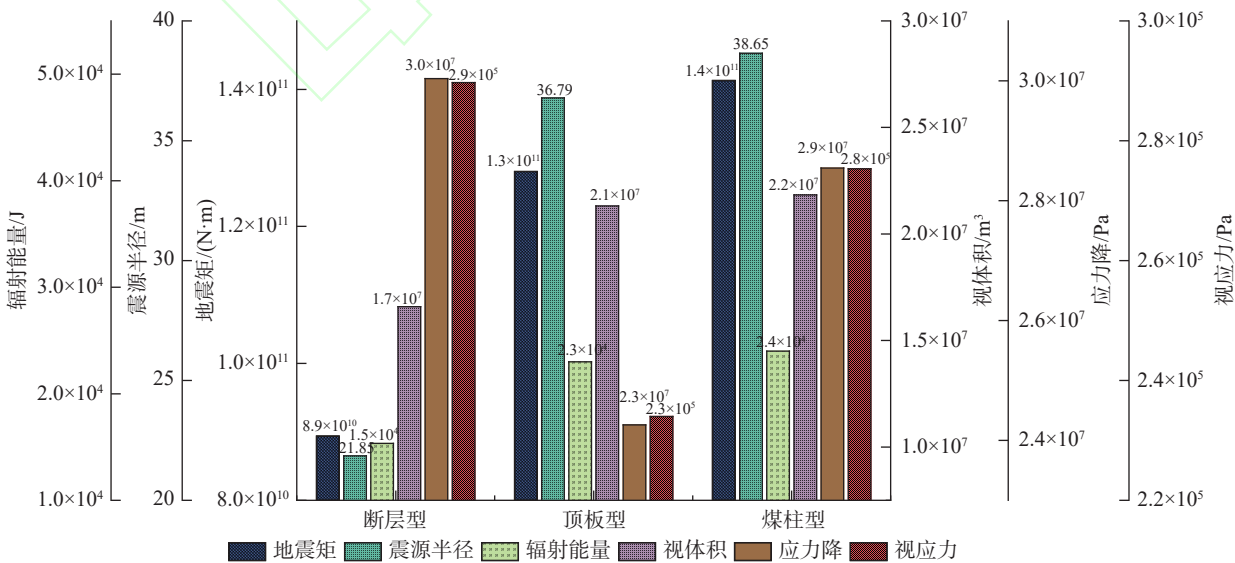


图 10 不同破裂类型强动载震源参量对比

Fig. 10 Comparison of source parameters of strong mining earthquakes with different rupture types

型强动载震源发生非弹性变形导致的煤岩体体积增大程度最大, 煤柱型强动载次之, 顶板型强动载尺度最小。整体来看, 断层型强动载破裂强度和尺度均为最小, 但其应力降较高, 应力水平调整或释放幅度最大, 煤柱型强动载次之, 顶板型强动载最小。

3.5 深部开采强动载特征及对矿井安全的影响

3.5.1 深部开采强动载前兆特征识别

上述分析了 3 种类型强动载时频的差异, 以及 3 种强动载的震源参量差异, 要实现不同类型强动载的预测预警和深部开采动力灾害的分源防控, 需要对强动载发生前兆信息进行识别, 基于此选取了 3 类强动载前天发生的动载事件, 计算出各动载事件地震矩、应力降、视应力、辐射能量 4 个参量, 并绘制出 3 类震源参量变化趋势如图 11、图 12 和图 13 所示。

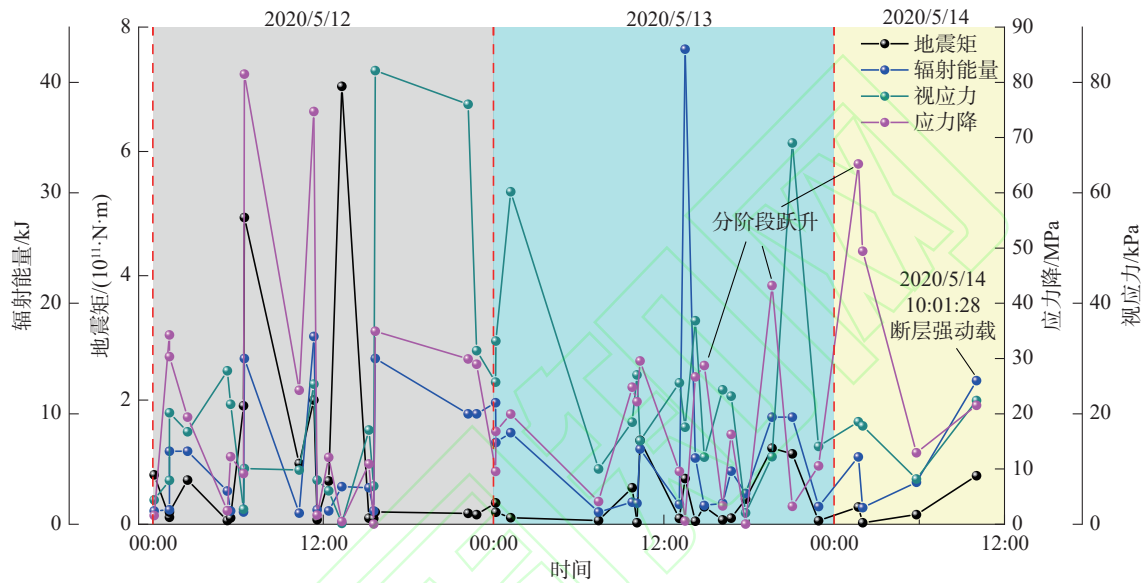


图 11 断层型强动载出现前两天各震源参量变化趋势

Fig. 11 Trends in source coefficients two days before the onset of fault-type strong-motion loading

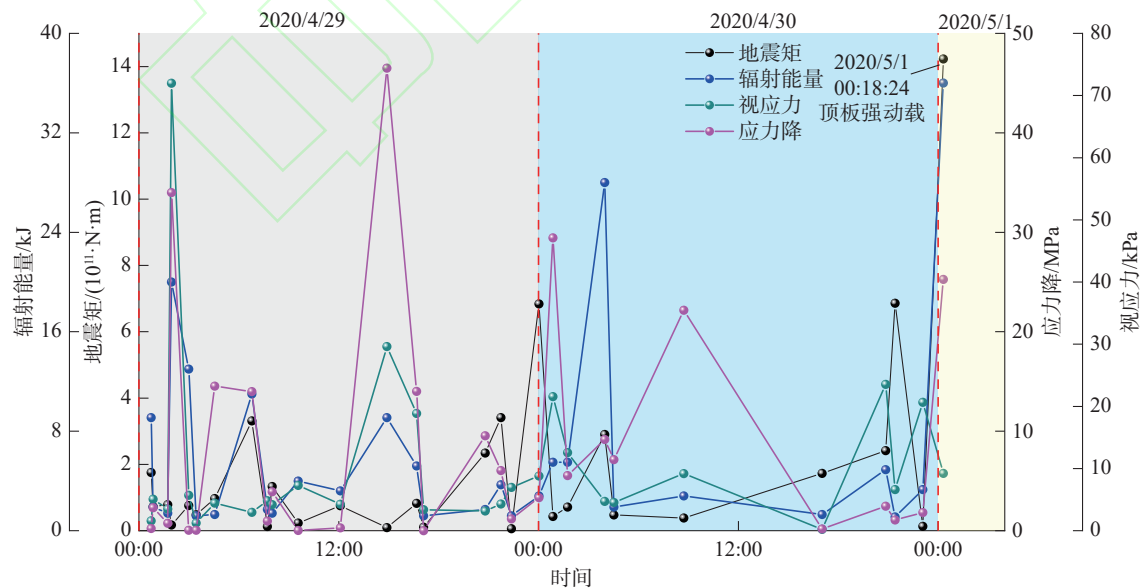


图 12 顶板型强动载出现前两天各震源参量变化趋势

Fig. 12 Trend of seismic source coefficients in the two days before the appearance of strong dynamic loads of the top plate type

从图 11、12 和 13 可以看出, 不同类型强动载 在大能量事件来临前其震源参量展现出不同的特

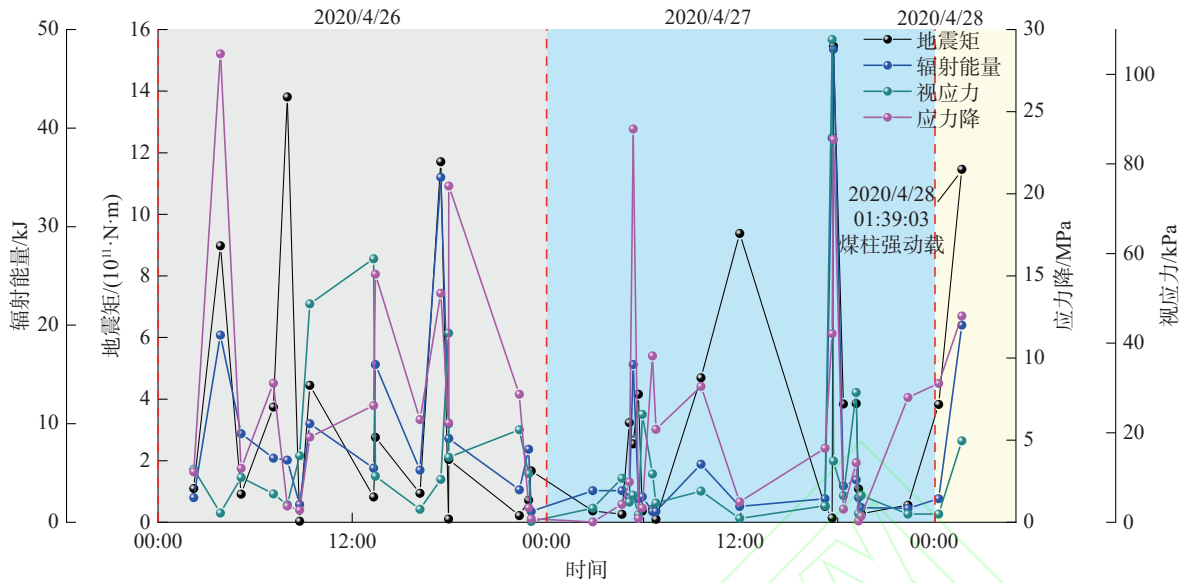


图 13 煤柱型强动载出现前两天各震源参量变化趋势

Fig. 13 Trend of each seismic source parameter in the two days before the appearance of strong dynamic loading of coal column type

征, 断层型强动载发生前一天, 生产班和检修班发生的动载事件地震矩、辐射能量和应力降均呈现逐步升高趋势, 且应力降阶段大幅跃升, 反映出采动应力驱动下构造应力频繁调整转移导致断层滑移的渐进失稳过程; 顶板型强动载发生前一天, 生产班和检修班发生的动载事件表现为地震矩波动上升、高能辐射间歇性爆发、应力降阶梯式增长以及视应力平缓后骤升, 反映出顶板弯曲断裂过程; 煤柱型强动载事件来临前则以地震矩剧增、辐射能量呈指数增长、应力降剧烈震荡和视应力短时突增为特征, 反映出应力超载引发的脆性破坏。基于这些前兆特征差异性, 可为强动载类型识别和冲击地压矿井分源防控提供一定参考。

3.5.2 3类强动载波形特征与震源参量的内在联系

基于上述分析结果来看, 强动载波形特征与震源参量存在一定的内在联系。顶板区域强动载的波形特征反映出其能量释放较为连续且密集, 这与较大的地震矩和破裂尺度相对应, 表明顶板在受到压缩破坏后, 积聚的能量能够较为充分地释放。应力降较小反映出应力变化相对缓慢和煤岩体体积变化较小, 这与波形中未出现过多尾部峰值、能量释放相对稳定的特点相对应; 煤柱区域强动载能量释放迅速, 并且范围相对集中, 与其具备最大的地震矩和较大的破裂尺度结果相一致, 反映出煤柱内部应力状态在发生变化后, 产生压缩内爆破裂, 煤

体积聚的能量瞬时释放。应力降处于中等水平代表着随着应力调整能够引起一定程度的煤岩体体积变化, 与波形中出现小能量峰值, 周边煤体也伴随着小规模破裂的情况相吻合; 断层区域强动载能量释放较为缓慢且集中于低频段, 与其具备较小的地震矩和破裂尺度相对应, 表明断层面在应力环境改变后发生小尺度滑移或破裂, 且能量释放相对有限。而应力降较高则意味着其应力调整较为剧烈, 能够引起较大的煤岩体体积变化, 这与波形中没有过多尾部峰值, 能量释放后煤岩结构很快趋于稳定的特点相一致。

3.5.3 强动载能量释放及破裂模式对矿井安全的影响

从能量释放角度上来看, 顶板型强动载能量释放连续且密集, 不会导致很大的煤岩体体积变化, 而其破裂尺度较大, 形成较大的破坏区域, 影响顶板的稳定性, 增加顶板垮落的风险, 对矿井支护系统和作业人员的安全构成威胁; 煤柱型强动载能量释放迅速且集中, 瞬间释放大量能量可能导致煤柱区域煤体发生剧烈的破坏和位移, 对相邻工作面巷道、设备和人员造成严重的冲击破坏和伤害; 断层型强动载能量释放较为缓慢且集中于低频区段, 破裂尺度较小, 而应力降较高, 可能会引起断层两侧煤岩体应力重分布, 导致断层发生活化和滑移, 进而影响矿井的开采布局和巷道的稳定性, 增加矿井

发生动力灾害的风险。

从破裂模式角度上来看, 顶板型强动载主要发生压缩破坏和剪切破坏, 这种破裂模式会导致顶板的完整性受到破坏, 降低顶板的承载能力, 增加工作面的支护难度, 容易引发冒顶事故; 煤柱型强动载多为压缩内爆破坏, 煤柱内部的煤体发生破碎和位移, 导致煤柱失稳, 进而可能引发煤柱的坍塌, 对相邻工作面巷道造成破坏; 断层型强动载的破裂模式呈现出断层在应力作用下会发生一定程度的滑移, 可能会导致断层两侧的煤岩体发生错动, 矿井的地质构造和应力环境发生变化, 增加矿井发生动力灾害的可能性。

综上所述, 3 类强动载能量释放特征和破裂模式对矿井安全有着显著的影响, 原理如图 14 所示。因此, 在矿井深部开采过程中, 需要加强对不同类型强动载的监测和预警, 采取针对性的防治措施, 如采取锚杆和锚索组合支护来加强顶板支护、在断层附近进行预裂爆破来提前释放应力等措施来防控深部开采不同类型强动载诱发的冲击地压, 保障矿井的安全生产。

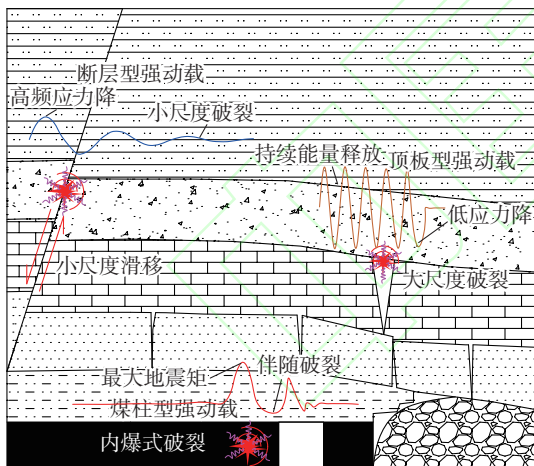


图 14 3 种类型强动载示意

Fig. 14 Schematic diagram of three types of strong dynamic loads

4 结 论

(1) 深部开采强动载震源机制主要以压缩破坏为主。断层区域动载断层两侧应力出现变化, 发生压缩破坏; 顶板区域动载受顶板破坏机制影响, 主要发生压缩破坏和剪切破坏; 煤柱区域动载主要发生压缩破坏。断层型强动载倾向角范围主要为

30°~45°, 顶板型强动载为 10°~65°, 煤柱型强动载为 40°~50°。

(2) 3 类动载波在频率分布、能量分布上存在较大差异, 其震源破裂时能量释放特征各不相同。断层型强动载波边际谱呈双峰分布, 频率集中在 0~50Hz; 顶板型强动载波边际谱呈单峰分布, 频率集中在 50~90Hz; 煤柱型动载能量与频率边际谱呈宽频带分布, 集中在 10~100Hz 范围, 幅值整体平缓, 但局部波动显著。

(3) 各类强动载地震矩与辐射能量成正相关关系, 在辐射能量相同条件下, 煤柱型强动载地震矩最大, 其次为顶板型强动载, 断层型强动载最小; 在相同震源半径条件下断层型强动载震源发生非弹性变形导致煤岩体体积增大程度最大, 煤柱型强动载次之, 顶板型强动载尺度最小; 断层型强动载破裂强度和尺度均为最小, 但其应力降较高, 应力水平调整或释放幅度最大, 煤柱型强动载次之, 顶板型强动载最小。

参考文献 (References):

- [1] 姜福兴, 张翔, 朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 203-213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key issues in coal mine impact ground pressure control system[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203-213.
- [2] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. Mechanism and prevention of impact ground pressure in coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 39(2): 205-213.
- [3] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Principle of dynamic and static load superposition of coal mine impact mine pressure and its prevention and control[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [4] 朱斯陶, 姜福兴, 刘金海, 等. 我国煤矿整体失稳型冲击地压类型、发生机理及防治[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3667-3677.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, LIU Jinhai, et al. Type, occurrence mechanism and prevention of overall destabilizing impact ground pressure in coal mines in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3667-3677.
- [5] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机

- 理及防治研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1844–1851.
- PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Research on the distribution, type, mechanism and prevention of impact ground pressure in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1844–1851.
- [6] Dreger, D S, Ford, S R, Walter, W R. Source analysis of the Crandall Canyon, Utah, mine collapse[J]. *Science*, 2008, 321(5886): 217.
- [7] Pechmann, J C, Arabasz W I, Pankow, K L, et al. Seismological report on the 6 August 2007 Crandall Canyon Mine collapse in Utah[J]. *Seismological Research Letters*, 2008, 79(5): 620–636.
- [8] CAI W, DOU L, LI Z, et al. Mechanical initiation and propagation mechanism of a thrust fault: a case study of the Yima Section of the Xiashi-Yima Thrust (North Side of the Eastern Qinling Orogen, China)[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48: 1927–1945.
- [9] 谷雪斌, 张呈国, 郭伟耀, 等. 冲击地压矿井典型微震信号特征及其辨识研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(S2): 694–713.
- GU Xuebin, ZHANG Chengguo, GUO Weiyao, et al. Characteristics of typical microseismic signals and their identification in impact ground pressure mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S2): 694–713.
- [10] LI X, LI Z, WANG E, et al. Analysis of natural mineral earthquake and blast based on Hilbert–Huang transform (HHT)[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 128: 79–86.
- [11] 陆菜平, 窦林名, 王耀峰, 等. 坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(2): 450–456.
- LU Caiping, DOU Linming, WANG Yaofeng, et al. Microseismic effects of hard roof-induced impact damage in coals[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(2): 450–456.
- [12] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年: 理论与技术体系的建立与思考[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(9): 1–40.
- QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. 70 years of development of coal mine impact ground pressure in China: establishment and thoughts on theory and technical system[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 1–40.
- [13] 朱建波, 马斌文, 谢和平, 等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3396–3409.
- ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. A preliminary study on the difference and connection between coal mine earthquake and shock ground pressure and the induced shock of mine earthquake disturbance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3396–3409.
- [14] 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 the types of coal mine earthquakes and the propagation law of vibration waves in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 23–31.
- [15] 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. Rupture mechanism and seismic source parameter response law of mining earthquake in the area of frequent shock ground pressure incidence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 722–733.
- [16] 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. Characterization of microseismic seismic source parameters and analysis of seismic source mechanisms in the Chiaki coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 2011–2019.
- [17] BOETTCHER M S, KANE D L, MCGARR A, et al. Moment tensors and other source parameters of mining-induced earthquakes in Tau Tona mine, south Africa[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(3): 1576–1593.
- [18] 李振雷, 窦林名, 王桂峰, 等. 坚硬顶板孤岛煤柱工作面冲击特征及机制分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(4): 519–524.
- LI Zhenlei, DOU Linming, WANG Guifeng, et al. Rock burst characteristics and mechanism induced within an island pillar coalface with hard roof[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2014, 31(4): 519–524.
- [19] 何江, 窦林名, 曹晋荣, 等. 急倾斜特厚煤层水平分段综放开采冲击矿压机理[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1701–1709.
- HE Jiang, DOU Linming, CAO Jinrong, et al. Mechanism of rock burst in steep and extremely thick coal seam using horizontal section top-coal caving[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1701–1709.
- [20] 王春秋, 蒋邦友, 顾士坦, 等. 孤岛综放面冲击地压前兆信息识别及多参数预警研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(12): 3523–3530.
- WANG Chunqiu, JIANG Bangyou, GU Shitan, et al. Study of precursor information recognition and multiparameter early warning before rockburst of island fully mechanized caving face[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(12): 3523–3530.
- [21] 魏全德, 姜福兴, 姚顺利, 等. 特厚煤层下山煤柱区巷道

- 冲击危险性实时监测预警研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4): 530–536.
- WEI Quande, JIANG Fuxing, YAO Shunli, et al. Real-time monitoring and early warning of rock burst risk in dip coal pillar area of extra-thick coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(4): 530–536.
- [22] 赵善坤, 黎立云, 吴宝杨, 等. 底板型冲击危险巷道深孔断底爆破防冲原理及实践研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(4): 636–642.
- ZHAO Shankun, LI Liyun, WU Baoyang, et al. Theory and application of deep hole floor-break blasting in floor rock burst coal mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(4): 636–642.
- [23] GIBOWICZ S J, KIJKO A. An introduction to mining seismology[M]. New York: Academic Press, 1994.
- [24] 李志华, 窦林名, 管向清, 等. 矿震前兆分区监测方法及应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(5): 614–618.
- LI Zhihua, DOU Linming, GUAN Xiangqing, et al. Methods and applications of zonal monitoring of mine-seismic precursors[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 614–618.
- [25] 窦林名, 王盛川, 巩思园, 等. 冲击矿压风险智能判识与监测预警云平台[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2248–2255.
- DOU Linming, WANG Shengchuan, GONG Siyuan, et al. Cloud platform for intelligent identification, monitoring and early warning of impact mine pressure risks[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2248–2255.
- [26] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences, 1998, 454: 903–906.
- [27] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31(1): 417–457.
- [28] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903–995.
- [29] PENG Z K, PETER W T, CHU F L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis[J]. Journal of sound and vibration, 2005, 286(1–2): 187–205.
- [30] LI X, LI Z, WANG E, et al. Extraction of microseismic waveforms characteristics prior to rock burst using Hilbert-Huang transform[J]. Measurement, 2016, 91: 101–113.
- [31] 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. Rock fracture moment tensor inversion method and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 1–18.
- [32] AKI K, RICHARDS P. Quantitative seismology theory[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 2002.
- [33] 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 Linming, et al. Mechanism of seismic source of impact mineral pressure in coal mine folded tectonic zone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 203–211.
- [34] 赵永, 文鑫, 薛斌, 等. 基于波形主成分提取与混合矩张量的岩石破裂机制反演及其应用[J/OL]. 岩土工程学报 [2024-10-30]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20241029.2014.004>.
- ZHAO Yong, WEN Xing, XUE Bin, et al. Inversion of rock fracture mechanism based on waveform principal component extraction and mixed moment tensor and its application[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering [2024-10-30]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20241029.2014.004>.
- [35] 冯俊军, 王恩元, 沈荣喜, 等. 煤体压剪破裂震源模型及远场震动特征[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 483–489.
- FENG Junjun, WANG Enyuan, SHEN Rongxi, et al. Seismic source modeling and far-field vibration characteristics of compression-shear rupture of coal bodies[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 483–489.