

刘泉伸, 王普, 丁希阳, 等. 一种典型的煤岩冲击破坏的微震前兆模式[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 200–205. [LIU Quanshen, WANG Pu, DING Xiyang et al. A Typical Microseismic Precursor Model of Coal-rock Impact Failure[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 200–205. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.030.]

一种典型的煤岩冲击破坏的微震前兆模式^{*}

刘泉伸¹, 王 普¹, 丁希阳², 柳研青³, 张中腾³, 陈文韬¹

(1. 山东科技大学 资源学院, 山东 泰安 271019; 2. 汶上义桥煤矿有限责任公司, 山东 济宁 272500; 3. 兖矿能源公司 鲍店煤矿, 山东 济宁 273513)

摘 要: 基于跃进煤矿 23130 工作面硬顶板破裂诱发的强岩爆灾害的微震监测结果, 发现了典型的煤岩岩爆破坏的 MS 效应规律, 即“前兆冲击-静期-主震”模式。通过小波去噪和傅里叶变换, 详细揭示了岩爆不同阶段的 MS 频谱演化规律。研究表明: 岩爆破坏前, 前兆 MS 信号的优势频率开始下降, 中心频率小于 25 Hz; 频谱分布呈单峰型, 振幅较大。静期 MS 信号幅值突然减小, 同时大量微裂缝压裂产生的高频分量开始明显增加, 频谱分布呈现多峰型; 这一阶段被称为静储能阶段, 大量的弹性应变能开始在煤岩材料中积累。当煤岩材料中累积的总弹性能达到极限储存能时, 触发岩爆, 且主震信号的中心频率小于 10Hz, 同时振幅达到峰值, 通过煤岩组合试样变形, 断裂和岩爆破坏的 MS 效应实验, 验证了岩爆现场实测结论, 该研究结论为利用 MS 监测系统对岩爆危险性评价和预警提供了有益的尝试。

关键词: 煤岩冲击; 岩爆; 前兆效应; 前震-静周期-主震; 频谱演化; 煤矿

中图分类号: TD712; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)01-0200-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.030

深部煤炭资源开发的一个主要特点就是高地应力作用, 深井开采的关键技术问题之一即是高地应力环境诱致的矿压问题, 包括采场矿压和井巷矿压问题, 难采难支护、甚至诱发岩爆和矿震等煤岩动力灾害已成为深部、高地应力煤矿开采的基本矿压显现特征。微震监测技术作为一种先进的和行之有效的矿压监测手段, 在国外的深井矿山和高地应力矿山的安全监测中得到了广泛的应用, 已成为深部矿压研究和管理的一个基本手段。

煤岩破裂过程中的微震是一种极为复杂的随机振动, 丰富的频谱成份揭示了煤岩层内部裂隙从扩展破裂直至破坏的断裂动态过程^[1]。研究煤岩破裂过程中的微震活动规律, 特别是前兆效应对于监测预报煤岩动力灾害具有极其重要的意义。

通过大量文献的检索, 发现国内外对于煤岩层破断的微震效应已经进行了大量的研究。例如姜福兴^[2-3]、成云海^[4-5]研究表明, 微地震监测技术能够准确定位煤层上覆顶板的破断位置及其方式, 在空间上展示了顶板、底板、煤体的破裂形态及其与应力场分布的关系, 证实了三面采空孤岛工作面老顶上方形成 C 型的空间结构。国外 SHEN 等^[6]发现微震较位移、应力更能揭示顶板垮落的过程, 并研究了顶板垮落时的微震前兆信息。BRADY 等^[7]发现顶板垮落过程中, 微震一开始首

先增加, 当顶板岩层破断前兆, 微震产生突降。FEID 等^[8]发现顶板垮落前超过 1 h 监测到异常高频的电磁辐射信号, 较低频微声发射信号提供了明显的时间优势。MANOJ 等^[9]通过实验室研究发现, 随着岩石试样变形破裂过程中弹性应变能的释放, 微震事件的频率不断降低。ALBER 等^[10]通过对采深 1 100 m 的长壁工作面开采中记录的微震事件, 分析了至少 3 种不同类型微震事件的力学破坏机理。KAREL 等^[11]提出利用极限振动速度 (PPV) 以及微震主频 2 项指标评价冲击矿压对地表建筑物的影响, 并发现 P 波为宽高频, S 波呈现窄低频。ANDRZEJ 等^[12]提出了一种基于微震事件的时-空聚类技术评价煤矿冲击矿压的危险性。KRAY 等^[13]提出了一种利用微震三维速度的层析成像技术解释深井长壁工作面采动过程中的应力再分布, 以及揭示冲击矿压的诱发机制。HE 等^[14]通过深井石灰石样品冲击破坏实验, 发现当在相对较低的压力下, 微声发射信号的特点是高频、低幅度。随着压力的增加, 微声发射信号会转向高振幅、低频率。冲击破坏前兆, 观测到更高的幅度和低频事件。

本文通过深部煤矿高地应力集中区域发生的

^{*} 收稿日期: 2022-04-15 修回日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(52104092); 山东省自然科学基金项(ZR2020QE120)

第一作者简介: 刘泉伸(1997-), 男, 汉族, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事灾害预测与防治研究。E-mail: 1148927936@qq.com

通信作者: 王普(1990-), 男, 汉族, 山东单县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事矿山压力与岩层控制、冲击地压预测与防治等科研工作。E-mail: 15854848872@163.com

一起强冲击矿压灾害, 基于监测到的冲击前后微震信号的频谱分析, 结合实验室的测试结果, 发现了一种典型的煤岩冲击破坏的微震前兆效应规律, 而且实验揭示绝大多数强冲击倾向性的组合煤岩试样冲击破坏时具备这种前兆模式。

1 工程背景

河南省义马煤业集团跃进煤矿在深部 25 采区、23 采区采掘过程中, 曾多次发生冲击矿压事故。该矿主采煤层为 2-1 煤, 煤层平均厚度 8 m, 倾角 11° , 经冲击倾向性鉴定为强冲击危险煤层。其中 23130 工作面平均采深为 845 m, 属深部高应力区域, 是 23 下山采区的第 3 个工作面。井下四邻关系: 东为矿井边界煤柱, 西为 23 采区下山保护煤柱, 北为 23110 工作面(上分层已于 2006 年 6 月回采结束), 南为 23150 工作面(未采)。该工作面上覆 40 m 处存在一层平均厚度达 182.8 m 的粗砾岩层。

河南省义马煤业(集团)有限责任公司隶属下的跃进煤矿在深部 25 采区、23 采区采掘过程中, 曾多次发生冲击矿压事故, 其中 2007 年“6.19”事故是跃进煤矿冲击矿压最严重的一次, 涉及巷道近 300 m, 累计冲出煤量达 $3\,700\text{ m}^3$, 造成运输系统瘫痪, 导致工作面被迫停产, 直接经济损失达千万元。23130 工作面下巷于 2009 年 11 月 8 日 03:03 发生一起冲击矿压, 此次冲击造成下巷从 340~640 m 段受到不同程度的变形, 其中从 460~610 m 段变形最为严重, 巷道断面明显缩小, 净高从 4 m 缩至 1.4 m, 净宽从 6 m 缩至 2.3 m。“O”型棚上帮棚梁发生错动、张开、折断, 部分连接卡具失效, 冲击使巷道内的各种设备崩翻。微震监测系统测定此次冲击能量达到 $2.17 \times 10^7\text{ J}$ 。图 1 为此次冲击矿压发生的位置示意图。图 2 为冲击造成巷道支护系统的破坏情况。

表 1 23130 工作面来压统计

日期	累计平均回采进尺/m	来压情况
6 月 26 日	63	初次来压
7 月 2 日	74	周期来压
7 月 11 日	95	周期来压
7 月 14 日	100	周期来压
7 月 20 日	114	周期来压
7 月 24 日	122	周期来压
7 月 30 日	132	周期来压
8 月 3 日	140	周期来压
8 月 21 日	164	周期来压(开始进入工作面见方阶段)
8 月 31 日	185	周期来压
9 月 10 日	205	周期来压
9 月 23—26 日	230	周期来压
10 月 8—10 日	259	周期来压(开始进入工作面见方阶段)
11 月 8 日	310	双工工作面见方发生冲击事件

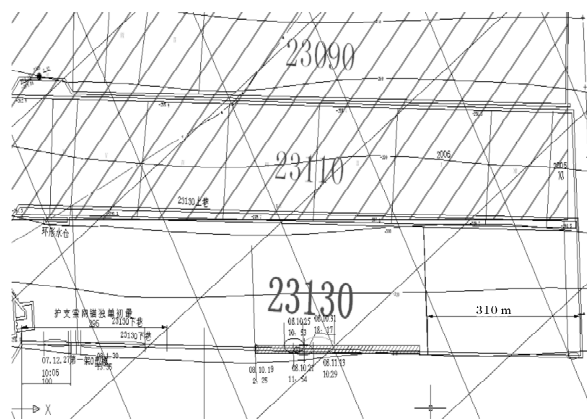


图 1 冲击矿压发生的位置示意图



图 2 冲击造成支护系统的破坏

2 煤岩冲击破坏的微震前兆效应

2.1 微震监测系统简介

为了监测跃进煤矿上覆顶板岩层破断对高应力集中区域的煤体产生强烈的震动并诱发冲击矿压灾害, 为此, 矿方引进安装了加拿大的 ESG 微震监测系统。该系统能够实现包括微震事件的三维定位坐标、震级大小、能量变化、误差范围以及地震波形等微震信息分析。针对 ESG 系统的特点, 考虑到噪声的种类以及该煤矿井下生产的实际情况, 在数据接收软件 HNAS 的触发窗口将 STA/LTA 阈值值设置为 3, 此阈值可以根据接受事件的多少和噪声事件的个数等监测情况而重新设置。

首先由传感器采集并进行信号的前置放大, 经由信号电缆传至井下数据交换中心, 经 A/D 转换后的数字信号和光信号再经由光缆传至地表监测站内的微地震数据采集仪, 然后由与地震数据采集仪相连接的计算机进行实时显示, 并进行各种分析。该系统主要包括: 主机数据分析系统; 数据采集系统; 传感器等。图 3 为 ESG 微震监测系统的组成及井下安装照片。

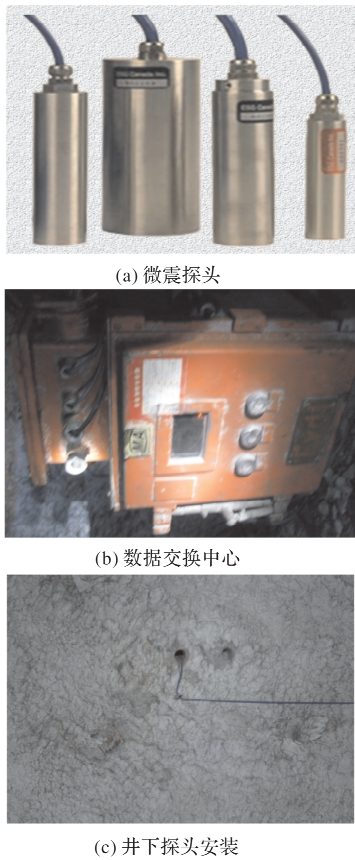


图3 ESG微震监测系统

2.2 微震前兆效应规律

根据微震定位系统的监测结果,对2009年11月8日03:03在23130工作面下巷发生的冲击矿压事件进行了分析。该冲击事件前后共记录到8次微震信号,此次冲击矿压发生前10 min发生了一次能量为 2.31×10^5 J的微震事件。由表2根据冲击矿压前后微震事件的能量以及定位结果,发现第3、6事件定位于23130工作面下巷的顶板岩层中,第5事件定位于深部底板岩层。从宏观效应来看,此次冲击矿压存在一个明显的前兆信号,即微震事件3,随后微震活动进入平静蓄能期,如微震事件5,最后在上覆巨厚砾岩形成的“O”型支撑压力圈的作用下,双工作面见方(23130工作面的推进距离大于等于23110和23130两个工作面的宽度之和)导致23110工作面上分层采空区顶板的再次破断诱发23130工作面下巷局部高应力集中区域发生了此次冲击矿压,即微震事件6。

表2 冲击前后8次微震信号记录

序号	时间	x	y	标高/m	能量/J	备注
1	02:18:35	401	81 191	-266	6.10×10^3	
2	02:41:07	356	81 515	112	3.83×10^2	
3	02:53:19	106	81 393	-338	2.31×10^5	
4	02:59:19	404	81 367	82	5.83×10^2	冲击
5	03:02:09	506	81 244	-680	2.15×10^2	矿压
6	03:03:58	102	81 566	-316	2.17×10^7	
7	03:08:25	167	81 591	-747	8.07×10^7	
8	03:31:55	418	81 090	-309	5.18×10	

根据冲击矿压前后微震事件的能量以及定位结果,发现第3、6事件定位于23130工作面下巷的顶板岩层中,第5事件定位于深部底板岩层。从宏观效应来看,此次冲击矿压存在一个明显的前兆信号,即微震事件3,随后微震活动进入平静蓄能期,如微震事件5,最后在上覆巨厚砾岩形成的“O”型支撑压力圈的作用下,双工作面见方(23130工作面的推进距离大于等于23110和23130两个工作面的宽度之和)导致23110工作面上分层采空区顶板的再次破断诱发23130工作面下巷局部高应力集中区域发生了此次冲击矿压,即微震事件6。

为了揭示此次冲击矿压的主要诱发因素及机制,选择最接近巷道冲击地点的1#、4#传感器采集的微震信号进行频谱分析,侧重分析第2、3、5、6、7五个事件,得到冲击前兆的微震效应规律。图4为1#传感器采集的冲击前后微震事件的频谱演变曲线。图5为各微震事件的频谱分布。

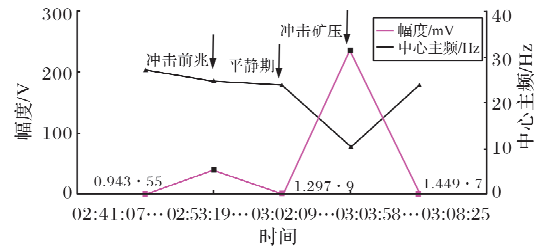


图4 冲击前后微震事件的频谱演变(1#传感器)

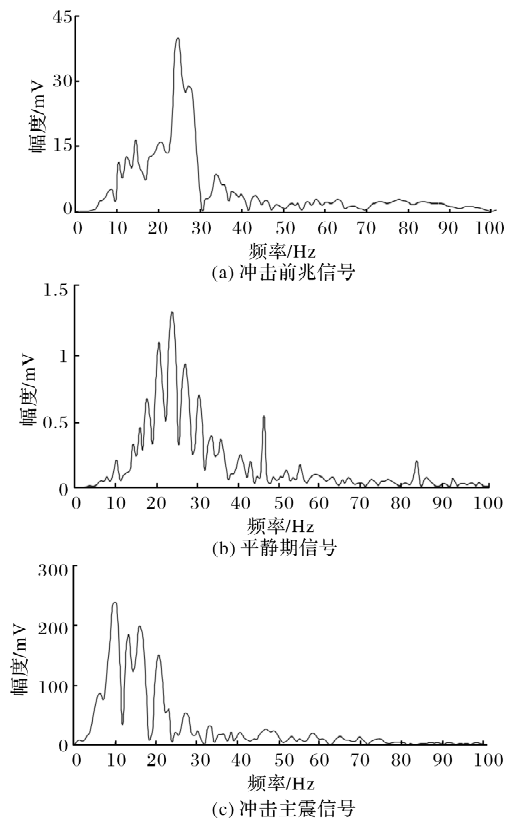


图5 微震事件的频谱分布(1#传感器)

图6所示为4#传感器采集的冲击前后微震事件的频谱演变曲线。图7所示为各微震信号的频谱分布。

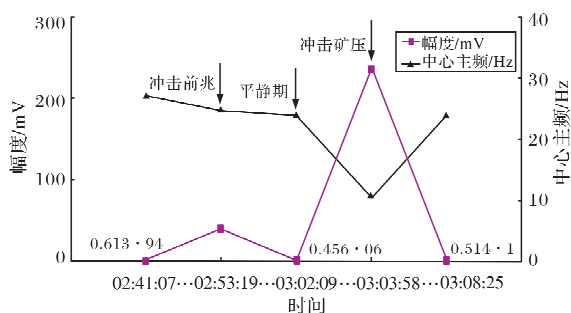
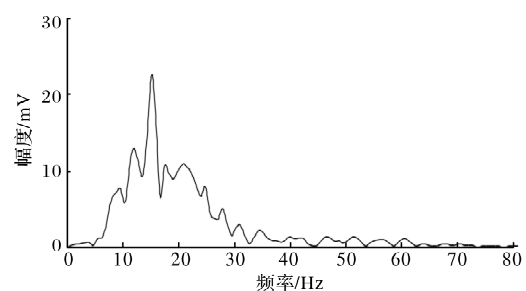
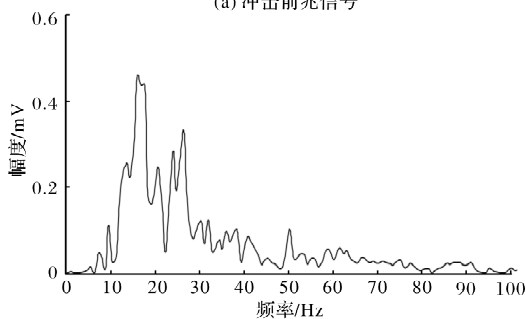


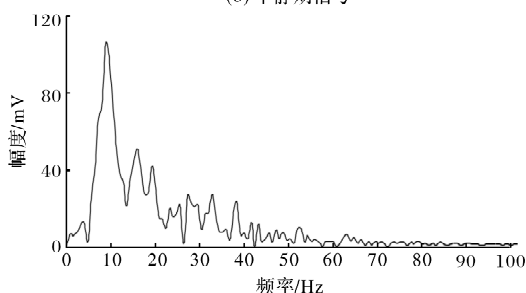
图6 冲击前后微震事件的频谱演变(4# 传感器)



(a) 冲击前兆信号



(b) 平静期信号



(c) 冲击主震信号

图7 微震事件的频谱分布(4# 传感器)

由图7可知,此次冲击矿压发生的微震前兆效应表现为“前震—平静—主震”模式。冲击之前,微震事件的主频率不断降低,特别是前兆信号的中心主频低于25 Hz,且能量高达 2.31×10^5 J。平静期微震信号的振幅突降,频谱中高频成份增多。冲击主震信号的中心主频降至10 Hz以下,同时振幅达到极值。

从微震事件的频谱分布可知,前兆信号的主频为5~30 Hz,且表现为单一峰值型,可以判断为23110工作面上分层采空区顶板破裂所致。平静期微震信号的频谱表现为多峰型,且高频成份增多,主要为顶板破裂与煤体的微观破裂所致。冲击主震信号中0~10 Hz的低频成份明显增多,主

要是采空区顶板的宏观破断所致,同时高频成份表现为多峰型,为冲击后造成煤岩体的微裂纹萌生、扩展所致^[15-16]。

2.3 实验室测试验证

采用TDS-6微震采集系统,实验室测定了组合煤岩试样变形破裂直至冲击破坏过程中的微震信号,发现冲击倾向性较强的试样,冲击破坏过程中的微震信号序列绝大多数表现为“前震—平静—主震”的前兆模式。

图8为某强冲击危险矿区组合煤岩试样变形破裂直至冲击破坏过程中采集的微震信号振幅—时间的波形图。

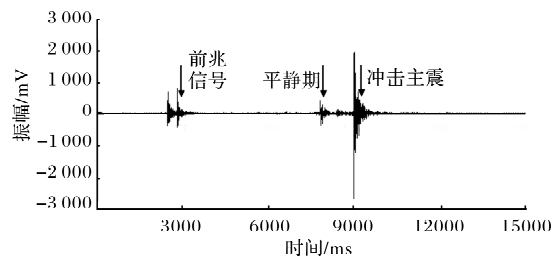
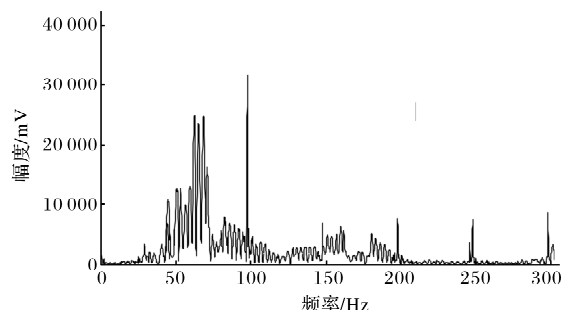
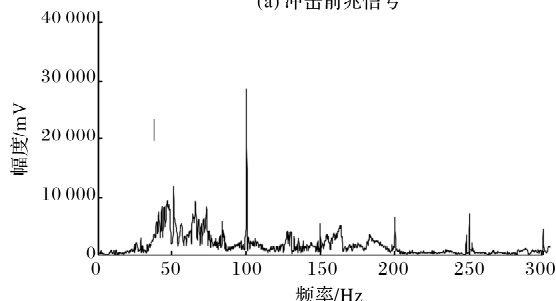


图8 微震事件的振幅—时间波形

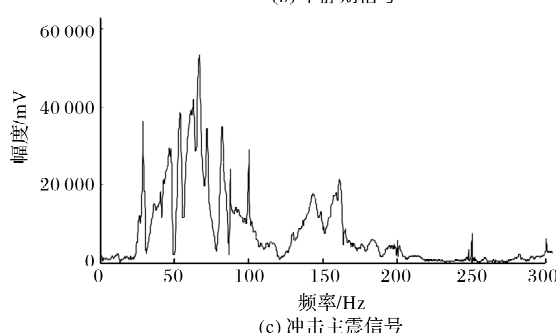
图9为微震前兆、平静以及主震信号的频谱分布。



(a) 冲击前兆信号



(b) 平静期信号



(c) 冲击主震信号

图9 煤岩冲击破坏微震事件的频谱分布

由图9可知,组合煤岩试样冲击破坏前兆,微震信号的主频为40~75 Hz,随着载荷的不断增大,试样内部积聚的弹性能逐渐上升,但没有出现明显的变形破坏,微震活动进入平静蓄能期,此时微震信号的振幅较低,且高频成份增多。当试样内部积聚的弹性能达到该应力状态下的极限储存能时,试样瞬间发生冲击式破坏。此时,微震信号的振幅达到极值,20~50 Hz的低频成份明显增多。

综上,通过深部高应力区域冲击矿压前后微震事件的频谱分析,以及实验室测定组合煤岩试样变形破裂直至冲击破坏过程中微震信号的谱分析,发现试样冲击破坏前兆,微震表现为高振幅、单一峰值型的低频特性;随着载荷的增加,试样内部的微裂纹出现自组织临界现象,微震活动进入平静蓄能阶段,此时微震呈现低振幅、多峰值型的高频特性;试样冲击破坏时,观测到较高振幅、极低频的微震事件。

3 结 论

(1) 现场实测和实验研究发现,强冲击倾向性的煤岩体冲击破坏时具备“前震—平静—主震”前兆模式。

(2) 煤岩体冲击破坏前兆,微震信号表现为高振幅、单一峰值型的低频特性;平静期微震呈现低振幅、多峰值型的高频特性;冲击矿压时,微震信号振幅达到极值、频谱以低频为主,中心频率低于10 Hz。

(3) 上述研究结论可为利用微震监测系统评价煤矿冲击矿压的危险性提供定性的指导意义。

参考文献:

- [1] 姜福兴,杨淑华,成云海,等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1511-1516.
- [2] 姜福兴, XUN Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23-25.
- [3] 姜福兴, 杨淑华, XUN Luo. 微地震监测揭示的采场围岩空间破裂形态[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 357-360.
- [4] 成云海, 姜福兴, 张兴民, 等. 微震监测揭示的C型采场空间结构及应力场[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 102-107.
- [5] 成云海, 姜福兴, 程久龙, 等. 关键层运动诱发矿震的微震探测初步研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 273-277.
- [6] SHEN B, KING A, GUO H. Displacement, stress and seismicity in roadway roofs during mining-induced failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2007, 45(5): 672-688.
- [7] BRADY B, LEIGHTON F. Seismicity anomaly prior to a moderate rock burst: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract, 1977, 14(3): 127-132.
- [8] FRID V, VOZOFF K. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64: 57-65.
- [9] MANOJ N Bagde, VLADIMIR Petros. Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 200-209.
- [10] ALBER M, FRISTCHEN R, BISCHOFF M, et al. Rock mechanical investigations of seismic events in a deep longwall coal mine[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 408-420.
- [11] KAREL Holub, VLADIMIR Petroš. Some parameters of rockbursts derived from underground seismological measurements[J]. Tectonophysics, 1995, 245: 67-73.
- [12] ANDRZEJ Les'niak, ZBIGNIEW Isakow. Space-time clustering of seismic events and hazard assessment in the Zabrze-Bielszowice coal mine, Poland[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 918-928.
- [13] KRAY Luxbacher, ERIK Westman, PETER Swanson. a Three-dimensional time-lapse velocity tomography of an underground longwall panel[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45: 478-485.
- [14] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.09.003.
- [15] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 519-525.
- [16] 陆菜平, 窦林名, 曹安业, 等. 深部高应力集中区域矿震活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2302-2308.

A Typical Microseismic Precursor Model of Coal-rock Impact Failure

LIU Quanshen¹, WANG Pu¹, DING Xiyang³, LIU Yanqing²,
ZHANG Zhongteng², CHEN Wentao¹

(1. College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China;

2. Baodian Coal Mine, Yanzhou Energy Group Co, Ltd, Jining 273513, China;

3. Wenshang Yiqiao Coal Mine Group Co, Ltd, Jining 272500, China)

Abstract: Based on microseismic (MS) monitoring results of a strong rockburst disaster induced by hard roof fracture in 23130 working face of Yuejin coal mine, a typical MS effect rule of coal and rock rockburst failure is found, that is “precursor shock – quiet period – mainshock” model. By wavelet de-noising method and the Fourier transform, the MS frequency-spectrum evolution laws of different stages of rockburst are revealed in detail. Research results show that: (1) The predominant frequency of precursory MS signals began to decrease before

rockburst failure and the center frequency was less than 25 Hz. The frequency-spectrum distribution showed a single – peak type and the higher amplitude. (2) In the quiet period, the amplitude of MS signals reduced suddenly, the high – frequency components produced simultaneously by lots of micro-fissure fracturing began to increase obviously, and the frequency-spectrum distribution showed a multi-peak type. This period is called as a quiet storage energy stage, a great number of elastic strain energy began to accumulate in coal and rock materials. (3) When the total accumulated elastic energy in coal and rock material reached to the limit storage energy, rockburst was triggered, and the center frequency of mainshock signals was less than 10 Hz, simultaneously the amplitude reached to the peak value. By MS effect experiments of combined coal and rock samples deformation, fracture and rockburst failure, the testing results verified the on – situ measured conclusions of rockburst. This research conclusion will provide a useful effort for evaluating and warning rockburst danger with MS monitoring system.

Keywords: coal rock impact; rockburst; precursory effect; foreshock – quiet period – mainshock; frequency-spectrum evolution; coal mine

+++++

(上接第 192 页)

Preliminary study on Evaluation System of Control Effect of Ecological Measures for Debris Flow

ZHANG Wentao^{1,2,3}, LIU Jinfeng^{1,2}, YOU Yong^{1,2}, SUN Hao^{1,2,3},
YANG Huaquan^{1,2,3}, WANG Dongwei^{1,2,3}

(1. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; 2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: At present, the prevention and control of debris flow disaster is mainly based on geotechnical control measures, supplemented by ecological control measures, ignoring the important role of ecological prevention and control measures in debris flow control. By analyzing the impact of ecological control measures on the formation conditions of debris flow, including the water source conditions and material source conditions of debris flow, and considering the role of the project's own factors, a treatment effect evaluation system is constructed, in which the first – class evaluation index includes 3 debris flow material source factors and the second – class evaluation index includes 10 interception effect ratios. combined with the Wenchuan investigation area, through the combination of field investigation and indoor experiment, the selected evaluation indexes are quantitatively calculated. Taking Dengxi gully and Banzi gully as examples, the results of the evaluation indexes can better reflect the actual situation of the site, verify the rationality of the selection of evaluation indexes, and provide reference for the disaster prevention and reduction of debris flow in this area.

Keywords: debris flow; ecological control measures; control effect; evaluation index; evaluation system