

DOI: 10.11779/CJGE201803004

矿震震动传播与响应规律

杜涛涛^{1, 2}

(1. 天地科技股份有限公司开采设计事业部, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究院开采研究分院, 北京 100013)

摘要: 针对距离震源不同距离的采掘区域冲击地压显现响应程度不同的问题, 采用 ARAMIS M/E 微震监测系统、PASAT-M 便携式微震监测系统和冲击地压多参量过程监测系统开展了矿震发生与响应过程规律研究, 并通过井下爆破激发震动试验研究了震动传播衰减规律。结果表明: ①冲击地压多参量过程监测系统监测到矿震的单参量(煤体应力)、多参量(煤体应力、围岩位移及锚杆受力)的响应过程, 实现了震动与响应信号捕捉与记录; ②矿震单参量响应规律, 响应时间短(368 ms), 响应过程引起距震源 75 m 的煤体应力最大升高 0.9 MPa, 响应终值为煤体应力升高 0.5 MPa, 矿震的响应并非都是多参量同时响应; ③矿震引起多参量响应规律, 响应时间不同步, 响应时间几百毫秒至几分钟不等, 响应过程引起距震源 150 m 的煤体应力整体降低 0.7~0.8 MPa、锚杆受力降低 7~8 kN、顶煤位移增加 4 mm, 且捕捉到矿震发生 10 h 前的岩层位移信息, 持续时间 1000 ms, 位移量最大 24 mm, 可作为矿震前兆信息; ④矿井围岩介质中震动能量传播呈指数 $E=E_0 e^{-\eta D}$ 关系衰减, 距震源 200 m 范围能量衰减快; 震动主频的衰减变化规律也呈指数 $f=f_0 e^{-\eta D}$ 关系。距离震源 200 m 范围的采场、巷道对矿震响应比较显著, 与矿震诱发冲击显现区域比较吻合。矿震发生至响应的传播衰减过程的定量关系研究, 对进一步提高冲击地压监测预警与防治技术水平具有一定的现实意义。

关键词: 矿震; 冲击地压; 震动响应过程; 震动衰减规律

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)03-0418-08

作者简介: 杜涛涛(1984-), 男, 山东枣庄人, 硕士, 助理研究员, 主要从事冲击地压防治研究方面的工作。E-mail: yl_dutt@126.com。

Propagation and response laws of mine seism

DU Tao-tao^{1,2}

(1. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Coal Mining Branch, China
Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to analyze the response degree problem that seismic waves of surrounding rock are different at places with different distances from mine seism source, the ARAMIS M/E microseismic monitoring system, PASAT-M portable microseismic system and rockburst multi-parameter process monitoring system are employed to study the propagation and response laws of mine seism. The results show that: (1) The rockburst multi-parameter process monitoring system can capture variations of single-parameter (coal stress) and multi-parameter (coal stress, displacement of roadway and anchored bolt force) at the moment of mine seism; (2) For the single parameter laws of mine seism, the response time is short (368 ms), the mine seism-induced increase of the maximum coal stress reaches 0.9 MPa, which is 75 m from seism source, the final increase value of coal stress is 0.5 MPa, and not all the response of mine seism is multi-parameter simultaneous response; (3) For the multi-parameter laws of mine seism, the response time is not synchronized and varies from a few hundred milliseconds to a few minutes. At the place 150 m from the seism source, the coal stress decreases by 0.7~0.8 MPa, the anchored bolt force decreases by 7~8 kN, and the top-coal displacement increases by 4 mm. The displacement data of strata within 10 hours before the mine seism is captured with the duration time of 1000 ms and the maximum displacement of 24 mm, and they can be used as the prediction information for mine seism; (4) The attenuation of seismic energy propagation in the surrounding rock of the mine is exponential, that is $E=E_0 e^{-\eta D}$. The energy attenuation is fast, within 200 m range of seism source. The attenuation of main frequency in the surrounding rock is exponential $f=f_0 e^{-\eta D}$.

The response of mining field and roadway within 200 m-range of the seism source is quite obvious, and the area is quite consistent with that of rockburst induced by mine seism. The

基金项目: 国家自然科学基金项目(51704155, 51574149, 51304116);
国家重点研发计划项目(2017YFC0804209, 2017YFC0804204,
2016YFC0801401, 2016YFC0801403); 天地科技开采设计事业部
青年创新基金项目(KJ-2015-TDKC-11)

收稿日期: 2016-03-23

quantitative study on the process of the propagation attenuation of mine seism to the response is important to the further improvement of the monitoring, early warning, prevention and control technology of rockbursts.

Key words: mine seism; rockburst; mine seism response process; attenuation law

0 引言

冲击地压^[1-4]是影响煤矿安全生产的煤岩动力灾害之一,也是学术界研究的重要课题,矿震诱发冲击地压显现越来越多,已引起了许多学者关注。窦林名等^[5]提出了动静载叠加诱发冲击地压的原理,指出矿震强度较大,可能导致煤岩体瞬间冲击破坏,强调控制矿震动载荷就需要降低震源的震动能量;曹安业等^[6]研究了矿震动力扰动下煤岩冲击破坏机理;姜耀东等^[7]分析了放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳的机理;阳生权等^[8]研究了地下结构及其围岩爆破震动效应。上述研究奠定了矿震诱发冲击地压的理论基础,冲击地压发生的突然性、剧烈性和瞬时性,危害性极大,现场多以宏观响应表述,如造成巷道破坏、设备损坏,人员伤亡,而强矿震诱发冲击响应机理,多从动载作用、煤体应力升高超过煤体极限破坏强度等角度定性解释。未评估矿震引起煤体应力等升高大小,也缺少矿震诱发冲击显现的响应过程特征研究。忽略了矿震引起冲击地压显现响应前,工作面的煤体应力、围岩位移和锚杆锚索受力等多参量的变化信息,主要原因是由于缺少能够实现矿震发生前、发生过程、发生后完整过程信息捕捉、记录的监测设备。基于此,文章研究手段克服了监测设备的局限性,解决了捕捉矿震响应过程的多参量信息难点,初步研究了矿震响应规律。

矿震响应不仅与矿震强度有关,还与震动波传播衰减有关。地震波在岩体中的传播规律一直是地球物理和岩土工程领域备受关注的研究课题^[9-15]。目前对震动波传播规律的研究主要采取人为的爆破震动来对震动波传播特性进行实验研究。吴文等^[16]利用现场实验,对不同介质的震动波传播衰减进行了研究。高明仕等^[17-18]利用在浅埋岩土中进行爆破震动实验,研究了震动波在不同介质中的能量衰减指数的差别及衰减特征,试验了巷道断面不同位置的震动效应。叶根喜等^[19]在煤矿现场,利用微震监测系统进行了深部爆破震动波传播规律的试验研究。曹安业等^[20]研究了矿井采动影响下煤岩特性改变对冲击震动波传播微震效应的影响规律。陆菜平等^[21-22]研究了顶板破断诱发冲击前后的震动信号特征,开展了井下爆破试验诱发震动传播与衰减规律研究。上述文献研究取得了大量成果,但受场地、范围、传播路径、介质的复杂性等因素制约,考虑人工诱发震动与自发矿震有一定差别,且文献研究更侧重震动传播与衰减规律的研究,对震动引

起的响应的关注较少,震动的响应研究对冲击地压监测预警与防治的指导意义也很重要,研究成果的应用尚未成熟,为推广应用仍有不少关键问题需要研究。

1 工程背景

如图1所示,矿井布置两个工作面,分别是B₁₊₂工作面和B₃₊₆工作面,开采煤层倾角平均87°,工作面之间岩柱自西向东逐渐变薄,平均厚度80 m,B₁₊₂工作面平均长度37 m,B₃₊₆工作面平均长度49 m,采用水平分层综采放顶煤,B₃₊₆工作面位于B₁₊₂煤层北部。

2014年3月24日,在B₃₊₆工作面轨道巷发生一起冲击地压显现,冲击造成底臌变形,平均底臌量为400 mm;5副U型钢支架受到不同程度的变形,其中3副支架钢箍崩断;冲击显现时伴随巨大声响。冲击地压显现发生时,监测到岩柱发生震级为2.2的矿震,如图1所示。

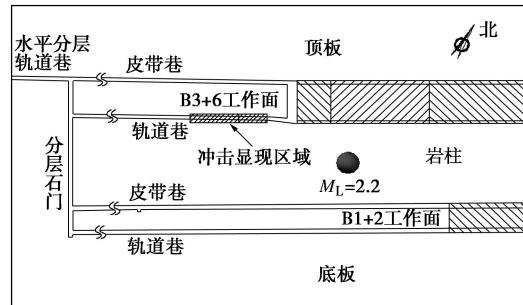


图1 工作面平面布置及冲击显现位置

Fig. 1 Plane layout of working face and position of rockburst

统计分析发现,矿井冲击地压显现除了具有突然性、剧烈性和瞬时性外,还具有以下特点:

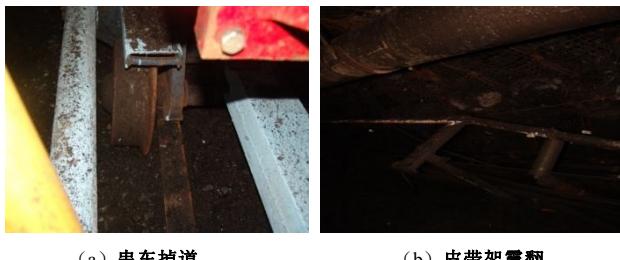
(1) 具有区域性。井下采掘工作面经常听到剧烈的声响,有时地面有震感,微震监测表明,90%以上地面有感矿震发生在两工作面之间的岩柱。

(2) 具有多样性。矿震显现以采掘巷道煤渣掉落,巷道底臌等位移变形,锚杆托盘脱落,螺帽弹射为主,严重时支架立柱折断,巷道严重破坏。图2所示,矿震引起现场响应情况,轨道巷串车掉道,皮带巷皮带被震翻。

(3) 具有差异性。现场发现不同区域响应程度不同,距离震动位置越近,破坏越严重,一定距离后,无法观察响应情况。

不难发现,矿震引起的响应形式具有多样性,可

用位移、受力进行定量化, 采场对矿震的响应程度不同。矿震是因, 响应是果, 矿震响应过程是震动传播至响应的过程。目前, 矿震可以通过微震监测实现定量化, 但由于制约矿震响应的因素复杂, 矿震造成的响应表征则比较困难, 如果能够实现监测矿震响应定量化, 探索矿震发生与响应的关系, 则更有利于现场冲击地压监测预警与防治。



(a) 串车掉道

(b) 皮带架震翻

图 2 矿震响应

Fig. 2 Response of mine seismic

因此, 基于矿井矿震频发, 不同震级的矿震响应不同, 采场不同位置的响应也不同, 很有必要探索它们之间的关系。

2 煤矿矿震响应规律监测分析

2.1 矿震响应监测设备

震动响应表现的宏观显现, 如巷道变形、煤体抛出、设备损坏等, 可以通过人员进行观测, 但微观响应, 如煤体应力变化、围岩位移及支护受力改变等, 则必须通过监测设备进行监测与记录。

矿震发生过程短暂, 能否捕捉到矿震发生过程信息, 取决于监测设备采样频率是否足够高并足以捕捉、记录下矿震发生过程。天地科技股份有限公司开采设计事业部采矿所研发的冲击地压多参量过程监测系统可以实现毫秒级别的信号捕捉与记录, 满足现场矿震响应监测要求, 为研究提供了必要的手段, 如图 3 所示为毫秒数据采集样本。

同时, 利用 ARAMIS M/E 微震监测进行矿山震动定位、震动能量计算。系统构成: 系统信息传输系统(DTSS), 该部分包括: 地面 SP/DTSS 信息收集站, 其由 OCGA 数字信号接收装置、配备 GPS 时钟的 ST/DTSS 传输系统控制模块、主通道切换模块以及 SR 15-150-4/11 I 型配电装置; SN/DTSS 井下分站, 其包括 SPI-70 拾震器以及 NSGA 震动信号发射装置。

2.2 矿震响应监测布置

如图 4 所示, 安装了 6 个钻孔应力计, 编号分别为 1, 2, 3, …, 6。2 号孔距离煤门右帮 5 m 开始施工, 孔深 5 m; 1 号孔孔深 3 m, 与 2 号孔间距 2 m; 3 号孔孔深 5 m, 距轨道巷帮 8 m; 4 号孔孔深 5 m, 与 3 号孔间距 3 m; 5 号孔孔深 5 m, 距轨道巷帮 8 m;

6 号孔孔深 5 m, 与 5 号孔间距 3 m。

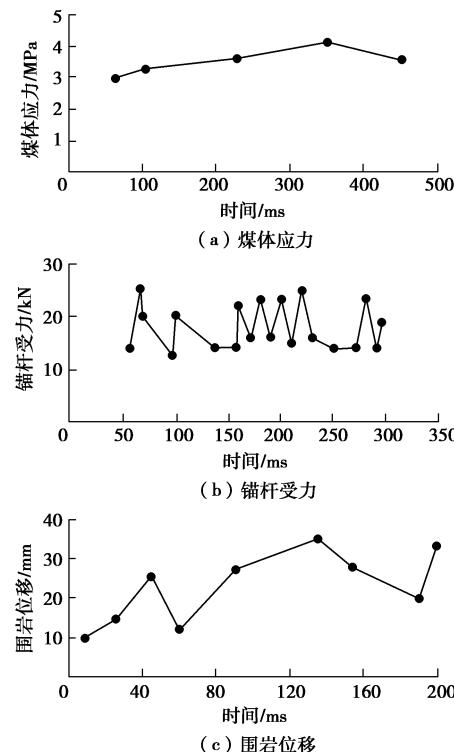


图 3 监测设备毫秒采样

Fig. 3 Millisecond sampling by monitoring device

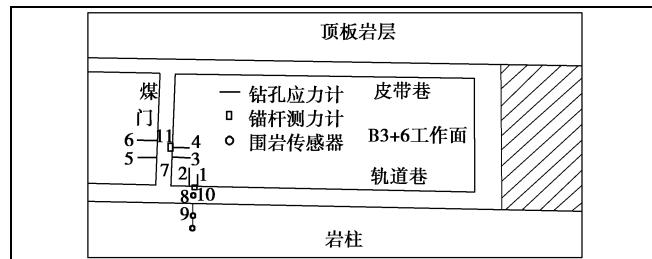


图 4 监测布置

Fig. 4 Arrangement of monitoring points

顶板离层仪编号分别为 7, 8, 9。7 号在煤门中, 距离轨道巷帮 8 m, 8 号孔距煤门 6 m, 深基点深度为 9 m, 浅基点深度为 3 m, 9 号装在岩柱中, 钻孔倾角 10°, 深基点深度为 30 m, 浅基点深度为 15 m。

锚杆测力计编号分别为 10, 11。10 号锚杆测力计安装在轨道巷中, 距离煤门右帮 6 m, 11 号锚杆测力计安装在煤门中。

2.3 矿震响应规律监测分析

(1) 矿震引起单参量响应

捕捉到一次矿震单参量响应过程, 经 ARAMIS M/E 微震监测系统监测与定位, 矿震发生在岩柱, 工作面后方 65 m, 距轨道巷帮 3 m 处, 矿震震源与响应监测位置水平距离为 75 m, 震源埋深为 364 m, 矿震震级为 2 级。

如图 5 所示, 矿震响应引起了煤体应力升高。矿震使距震源 75 m 的煤体应力最大升高 0.9 MPa, 震动

前后煤体应力变化 0.5 MPa。

如图 6 所示。震动发生时刻在 182 ms, 煤体应力响应时刻在 450 ms, 历时 368 ms, 震动传播至响应区域仅需几十毫秒, 因此, 震动发生至响应过程, 经历了震动的传播与煤体应力响应启动。共有效捕捉到 6 次煤体应力响应数值, 记录数据表明一旦煤体应力响应启动, 再次响应的时间大大减少, 响应时间为 3~30 ms, 煤体应力响应变化为升高—降低, 最终表现为煤体应力升高。

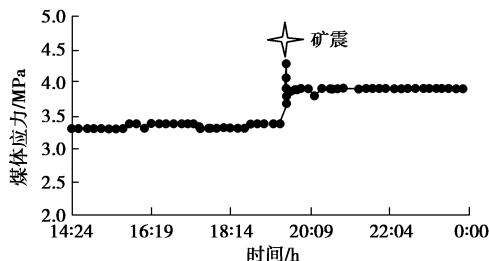


图 5 矿震前后煤体应力响应曲线

Fig. 5 Stress response curves of coal before and after mine seismic

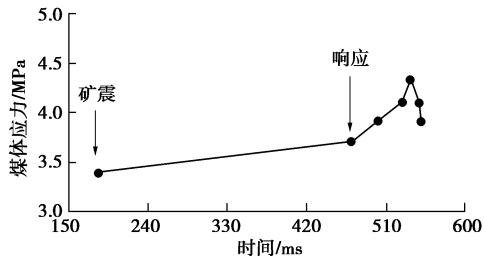


图 6 矿震响应过程

Fig. 6 Response process of mine seismic

通过冲击地压多参量过程监测系统的监测, 矿震并非每一次都会引起多参量同时响应, 本次响应为煤体应力的突然升高, 锚杆受力与围岩位移无响应变化。

(2) 矿震引起多参量响应

捕捉到一次矿震多参量响应过程, 经 ARAMIS M/E 微震监测系统监测与定位, 矿震发生在岩柱, 工作面前方 105 m, 距轨道巷帮 50 m 处, 矿震震源与响应监测位置水平距离为 150 m, 震源埋深为 367 m, 震级为 1.4 级。本次矿震不仅引起煤体应力响应, 同时引起锚杆、围岩位移响应, 受篇幅限制图 7 仅列出部分传感器响应曲线。

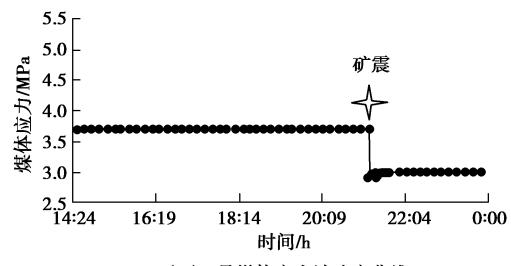
本次监测震动响应不同于上述的毫秒响应。震动发生引起煤体应力整体下降的响应, 但煤体应力响应时间不同, 1, 2 号煤体应力计响应时间为 10 min, 煤体应力降低 0.7 MPa; 4, 6 号煤体应力计响应时间为瞬时, 煤体应力降低 0.7 MPa; 5 号煤体应力计响应时间为 10 min, 煤体应力降低 0.8 MPa, 响应曲线如图 7 (a) 所示。

如图 7 (b) 所示, 矿震引起了顶煤的位移增加, 顶煤位移增加 4 mm, 响应时间 10 min, 顶煤在震动

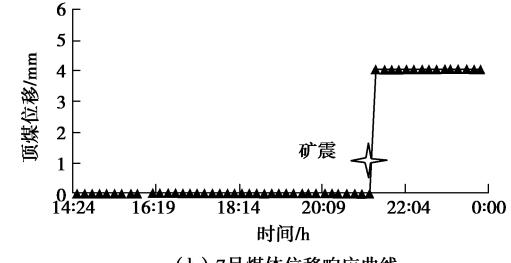
响应后逐渐平稳。

如图 7 (c) 所示, 岩柱发生矿震前, 曾产生岩层移动, 表明矿震的发生与岩柱变形运动有关, 岩层位移造成变形能积聚, 当积聚到一定程度就会释放, 约 10 h 后, 发生了矿震, 图 7 (d) 捕捉的岩层运动信息可作为本次矿震的前兆信号。

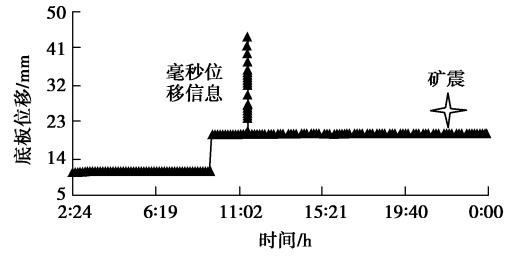
如图 7 (e) 所示, 岩柱矿震发生引起了锚杆受力的整体下降, 1 号锚杆受力响应时间为 10 min, 下降了 8 kN, 2 号锚杆受力响应时间为 10 min, 下降了 7 kN。



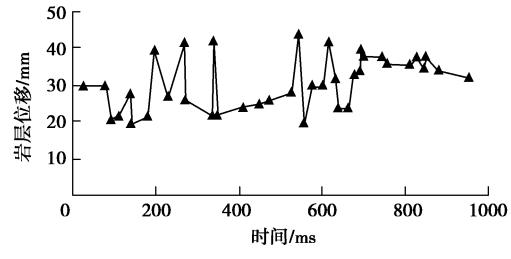
(a) 6号煤体应力计响应曲线



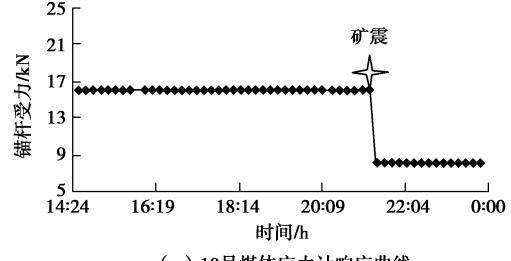
(b) 7号煤体位移响应曲线



(c) 9号底板岩层位移响应曲线



(d) 9号底板岩层毫秒位移信息



(e) 10号煤体应力计响应曲线

图 7 矿震多参量响应曲线

Fig. 7 Multi-parameter response curves of mine seismic

通过矿震响应过程的监测, 煤矿矿震引起采场、巷道响应程度不同, 影响因素众多, 除了与震源能量大小有关, 也与震动波在煤岩介质中传播衰减有关, 为寻找有效表征震动影响的指标, 现场试验研究了震动能量及频率的衰减规律。

3 煤矿矿震传播与衰减规律

3.1 震动能量衰减规律井下爆破试验

采用 ARAMIS M/E 微震监测系统进行研究震动波传播过程能量衰减规律。现场利用爆破诱发围岩震动, 微震监测系统定位和能量计算各爆破点与各微震台站位置震动能量, 进而分析震动波传播过程的衰减特征。

现场爆破试验过程发现, 当震源传播路径有煤层时, 能量传播衰减规律不明显, 表明煤矿井下实际条件与其它试验比较均一介质条件的衰减规律相差大, 也反映了震动能量传播过程衰减后引起的响应的复杂性。基于现场矿震频发区(岩柱)易造成采场严重灾害, 确定以岩柱震动的衰减规律研究为试验目的。

因此, 选择矿井包围该岩层的 4 个微震台站, 分别为 1 号、2 号、3 号和 4 号微震台站, 并在该岩层进行爆破激发震源, 进行了 5 次爆破, 相对位置关系如图 8 所示。微震监测系统有效监测激发震源, 数据分析结果如表 1 所示。

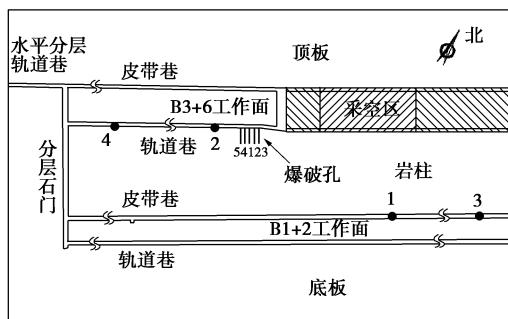


图 8 爆破点和微震拾震器的布置示意图

Fig. 8 Sketch of blasting point and seismic station

利用表 1 的监测分析数据, 进行拟合, 得到震动能量传播随距离的衰减曲线, 如图 9 所示。

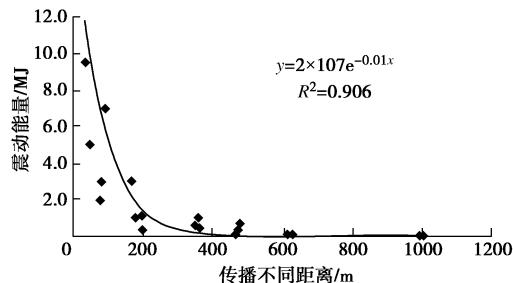


图 9 震动能量传播衰减拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of vibration energy propagation attenuation

表 1 井下爆破试验

Table 1 Underground blasting tests

爆破	台站编号	与震源距离/m	对应能量/J
第 1 炮	1	75	2.1×10^6
	2	370	4.0×10^5
	3	465	1.0×10^5
	4	1005	2.0×10^1
第 2 炮	1	83	3.1×10^6
	2	360	1.0×10^6
	3	475	4.0×10^5
	4	990	3.0×10^1
第 3 炮	1	93	7.0×10^6
	2	352	6.0×10^5
	3	480	7.0×10^5
	4	990	3.0×10^1
第 4 炮	1	50	5.0×10^6
	2	170	3.0×10^6
	3	204	3.0×10^5
	4	615	5.0×10^2
第 5 炮	1	40	9.5×10^6
	2	180	1.0×10^6
	3	200	1.2×10^6
	4	625	2.0×10^3

从能量衰减变化曲线可知, 岩柱震动能量传播过程的衰减规律, 随传播距离增大呈指数关系衰减:

$$E = E_0 e^{-\eta D}, \quad (1)$$

式中, E_0 为爆破震动的能级, D 为传播距离。

实测表明, 初始震动比较剧烈但衰减很快, 大约 200 m 后震动能量明显降低。因此在距震源 200 m 范围内的采场受到的震动效应更为明显, 引起的响应更为剧烈。

3.2 震动主频衰减规律井下爆破试验

微震监测试验研究受限于矿井微震台站监测布置分散, 台站布置距离远, 单纯以震动能量衰减规律研究来进一步研究震动响应过程, 受传播介质不单一、不均匀的影响较大, 用于分析矿震响应局限性也较大。因此, 为寻找更好的反映现场条件的衰减指标, 从震动主频衰减特征角度进行分析。

仍基于震动频发在两煤层之间的岩柱, 以此为研究对象。采用 PASAT-M 便携式微震监测仪进行试验, 布置 7 个接收探头, 分别是 #1、#2、#3、#4、#5、#6、#7, 进行了 6 次爆破激发震动信号。具体布置如图 10 所示。

激发端设计炮孔深 1.5 m、直径 42 mm, 齐腰位置垂直与巷帮打孔, 激发孔装 150 g 炸药, 短断触发, 炮间距约 6 m; 探头技术参数: 采样频率为 2000 Hz, 检波器工作频段 5~10000 Hz, 增益 20 dB, 采样长度 0.6 s, 道间距约 15 m。

通过接收震动波形, 采用 MATLAB 分析软件, 经快速傅里叶变换(FFT) 变为频率域, 得到各震动波形的频谱, 提取震动波形的主频, 当出现 2 个震动

主频值时, 依据最大幅值选取。篇幅有限, 仅列出某一通道波形的频谱分析结果, 如图 11 所示。

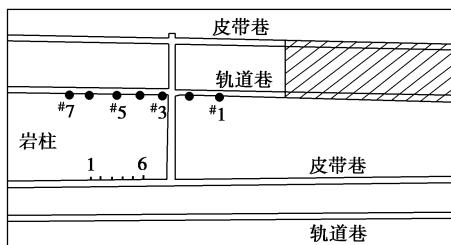


图 10 岩柱爆破试验布置

Fig. 10 Arrangement of rock pillar blasting tests

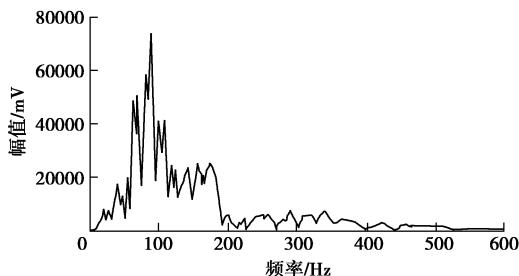
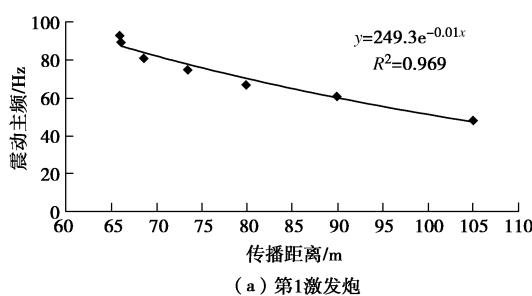


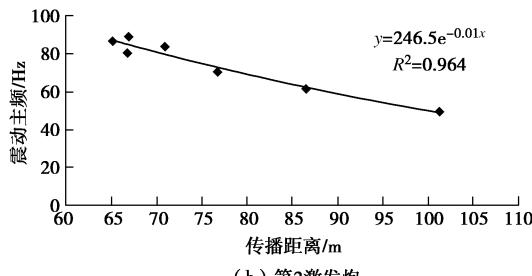
图 11 震动波形频谱

Fig. 11 Vibration waveform spectrum

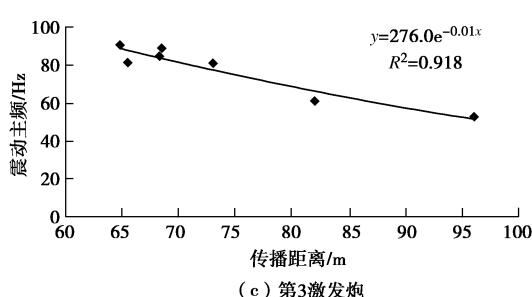
通过对各激发炮引起震动波形频谱与传播距离关系分析, 对震动主频与传播距离进行拟合, 得到各激发炮震动主频衰减拟合曲线, 如图 12 所示。



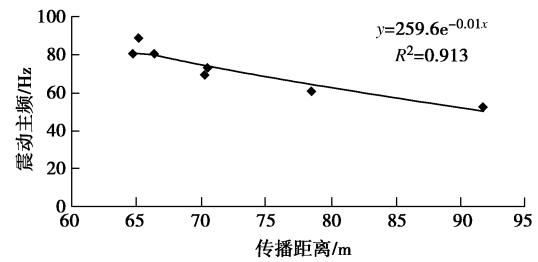
(a) 第1激发炮



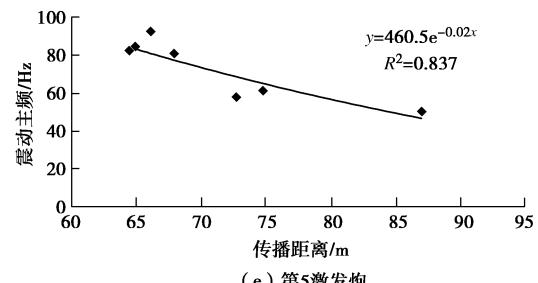
(b) 第2激发炮



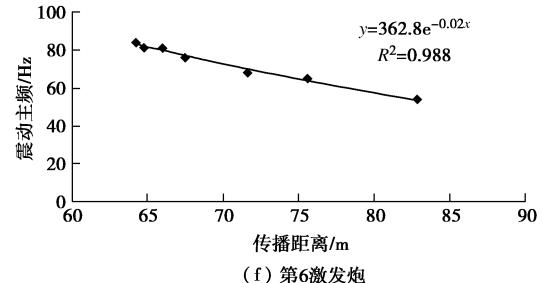
(c) 第3激发炮



(d) 第4激发炮



(e) 第5激发炮



(f) 第6激发炮

图 12 震动主频传播衰减拟合曲线

Fig. 12 Fitting curves of transmission attenuation of frequency

进一步分析求得各激发炮传播不同距离的主频, 进行拟合, 得到拟合曲线, 如图 13 所示。

震动主频的衰减变化规律随震源距离衰减也呈指数关系:

$$f = f_0 e^{\eta D}, \quad (2)$$

式中, f_0 为爆破震动的频率, D 为传播距离。

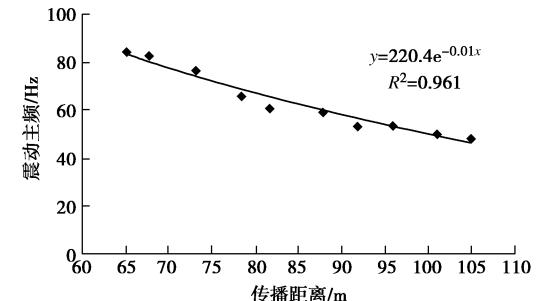


图 13 震动主频与传播距离的拟合曲线

Fig. 13 Fitting curves of frequency and propagation distance

4 探讨

冲击地压多参量过程监测系统有效捕捉到了矿震发生时刻前后的多参量变化信息, 实现了矿震响应的定量化。

根据冲击地压的发生需要满足如下条件^[5]，即

$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{b\min} \quad (3)$$

式中 σ_j 为煤岩体中的静载荷； σ_d 为煤岩体中诱发的动载荷； $\sigma_{b\min}$ 为冲击地压发生时的临界应力。

一般情况下，采掘围岩静载由原岩应力和支承压力组成，即

$$\sigma_j = \sigma_{j1} + \sigma_{j2} = (k + \lambda)\gamma h \quad (4)$$

式中 γ 为上覆岩层的重度； h 为上覆岩层厚度； λ 为构造应力集中系数； k 为支承压力集中系数。

构造应力集中系数可以通过地应力测量获得，支承压力集中系数、动载荷则可以通过冲击地压多参量过程监测系统监测分析得到，最后通过冲击地压显现时响应监测，获得冲击地压发生时临界应力。如果真实而比较准确的确定每个冲击地压矿井的冲击地压发生条件及不同开采时期的应力水平，那么将大大提高冲击地压监测预警与防治水平。

矿震引起动载荷响应的影响因素比较复杂，现场实测分析表明，动载与矿震能量、传播距离、传播路径介质的性质、响应点的能量耗散水平、支护强度有关，即矿震释放能量经传播过程的衰减、响应点的支护体和煤岩体介质状态改变等能量耗散后剩余能量越大动载响应越强烈。因此，矿震发生至响应的传播衰减过程的定量分析，仍需进一步寻找有效的指标参数和关系，需要大量震动、冲击地压多参量过程响应监测案例。

5 结 论

(1) 通过现场矿震响应多参量监测实践证明，冲击地压多参量过程监测系统可以监测矿震的煤体应力、围岩位移及锚杆受力的响应过程，实现毫秒级别震动与响应信号捕捉与记录。

(2) 矿震单参量响应规律，响应时间短，历时 368 ms，响应过程引起距震源 75 m 的煤体应力最大升高 0.9 MPa，响应终值为煤体应力升高 0.5 MPa，且矿震的响应并非都是多参量同时响应。

(3) 矿震引起多参量响应规律，响应时间不同步，响应时间几百毫秒至几分钟不等，响应过程引起距震源 150 m 的煤体应力整体降低 0.7~0.8 MPa、锚杆受力降低 7~8 kN、顶煤位移增加 4 mm，且捕捉到矿震发生 10 h 前的岩层位移信息，持续变形移动 1000 ms，最大位移量 24 mm，可作为矿震前兆信息。

(4) 矿井围岩介质中震动波传播能量随着距离震源的增加呈指数 $E=E_0e^{\eta D}$ 关系衰减，初始震动比较剧烈但衰减很快，大约 200 m 后震动能量明显降低。震动主频的衰减变化规律随传播距离衰减也呈指数

$f=f_0e^{\eta D}$ 关系。可见，矿震对距离震源 200 m 范围的采场响应比较显著，与矿震诱发冲击显现区域比较吻合。

参 考 文 献：

- [1] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Theory and technique of rockburst prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 蓝 航. 浅埋煤层冲击地压发生类型及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 9~13. (LAN Hang. Prevention measures and types of mine strata pressure bump occurred in shallow depth seam[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 9~13. (in Chinese))
- [3] 蓝 航, 齐庆新, 潘俊锋, 等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 11~15. (LAN Hang, QI Qing-xin, PAN Jun-feng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 11~15. (in Chinese))
- [4] 李 铁, 张建伟, 吕毓国, 等. 采掘活动与矿震关系[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2127~2132. (LI Tie, ZHANG Jian-wei, LU Yu-guo, et al. Relationship between mining and mining-induced seismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2127~2132. (in Chinese))
- [5] 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 Lin-ming, HE Jiang, CAO An-ye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469~1476. (in Chinese))
- [6] 曹安业, 范 军, 牟宗龙, 等. 矿震动载对围岩的冲击破坏[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2006~2010. (CAO An-ye, FAN Jun, MU Zong-long, et al. Burst failure effect of mining-induced tremor on roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2006~2010. (in Chinese))
- [7] 姜耀东, 赵毅鑫, 宋彦琦, 等. 放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3131~3136. (JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, SONG Yan-qi, et al. Analysis of blasting tremor impact of roadway stability in coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3131~3136. (in Chinese))
- [8] 阳生权, 周 健, 吕中玉. 地下结构及其围岩爆破震动效

- 应[J]. 工程爆破, 2006, **12**(1): 82 - 86. (YANG Sheng-quan, ZHOU Jian, LÜ Zhong-yu. Blasting seismic effects of underground structure and country rock[J]. Engineering Blasting, 2006, **12**(1): 82 - 86. (in Chinese))
- [9] 张雪亮, 黄数棠. 爆破地震效应[M]. 北京: 地震出版社, 1981. (ZHANG Xue-liang, HUANG Shu-tang. Blasting seismic effect[M]. Beijing: Earthquake Press, 1981. (in Chinese))
- [10] 寇绍金, 虞吉林, 杨根宏. 石灰岩中应力衰减机制的试验研究[J]. 力学学报, 1982, **14**(6): 583 - 588. (KOU Shao-jin, YU Ji-lin, YANG Gen-hong. Testing studies on attenuation mechanics of stress wave in limestone[J]. Journal of Mechanics, 1982, **14**(6): 583 - 588. (in Chinese))
- [11] 郭学彬, 肖正学, 张继春, 等. 论爆破地震波在传播过程中的衰减特性[J]. 中国矿业, 2006, **15**(3): 51 - 53, 57. (GUO Xue-bin, XIAO Zheng-xue, ZHANG Ji-chun, et al. On attenuating characteristic of blasting seismic waves in propagating process[J]. China Mining Magazine, 2006, **15**(3): 51 - 53, 57. (in Chinese))
- [12] 郭履灿, 赵凤竹. 震级与震源参数测定[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1986. (GUO Lu-can, ZHAO Feng-zhu. Earthquake magnitude and earthquake source parameter determination[M]. Beijing: China Science and Technique Press, 1986. (in Chinese))
- [13] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994. (LI Xi-bing, GU De-sheng. Rock impact dynamics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994. (in Chinese))
- [14] GRADY D E, KIPP M E. The micromechanics of impact fracture of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1979, **16**(6): 293 - 302.
- [15] TRUNIN R F. Shock compressibility of condensed materials in strong shock waves generated by underground nuclear explosive[J]. Physics Uspekhi, 1994, **37**(11): 1123 - 1146.
- [16] 吴文, 徐松林, 杨春和, 等. 盐岩冲击特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3613 - 3620. (WU Wen, XU Song-lin, YANG Chun-he, et al. Testing studies on response behaviour of rock salt to impacting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3613 - 3620. (in Chinese))
- [17] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(7): 1365 - 1371. (GAO Ming-shi, DOU Lin-ming, ZHANG Nong, et al. Experimental study on earthquake tremor for transmitting law of rock burst in geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(7): 1365 - 1371. (in Chinese))
- [18] 高明仕, 赵国栋, 刘波涛, 等. 煤巷围岩冲击矿压震动效应的爆破类比试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(4): 637 - 643. (GAO Ming-shi, ZHAO Guo-dong, LIU Bo-tao, et al. Blasting analogical experiment study on the vibration effects of rock burst in coal roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(4): 637 - 643. (in Chinese))
- [19] 叶根喜, 姜福兴, 郭延华, 等. 煤矿深部采场爆破地震波传播规律的微震原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(5): 1053 - 1058. (YE Gen-xi, JIANG Fu-xing, GUO Yan-hua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field microseismic monitoring in a deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 1053 - 1058. (in Chinese))
- [20] 曹安业, LUO Xun, 窦林名, 等. 采动煤岩体中冲击震动波传播的微震效应试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, **28**(4): 530 - 535. (CAO An-ye, LUO Xun, DOU Lin-ming, et al. Experimental research on seismic wave transmission and attenuation associated with underground longwall coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, **28**(4): 530 - 535. (in Chinese))
- [21] LU Cai-ping, DOU Lin-ming, WU Xing-rong, et al. Case study of blast-induced shock wave propagation in coal and rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2010, **47**: 1046 - 1054.
- [22] LU Cai-ping, DOU Lin-ming, ZHANG Nong, et al. Microseismic frequency-spectrum evolutionary rule of rockburst triggered by roof fall[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2013, **64**: 6 - 16.