

文章编号:0253-9993(2013)07-1161-07

# 冲击地压层次化监测及其预警方法的研究与应用

吕进国<sup>1,2</sup>,姜耀东<sup>2,3</sup>,赵毅鑫<sup>2,3</sup>,祝捷<sup>2,3</sup>,高峰<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083;2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;  
3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

**摘要:**为能有效地预警冲击地压灾害,总结了冲击地压常用监测方法及其优缺点,指出了目前冲击地压监测所存在的问题,并以其发生机理为基础,建立了冲击地压层次化监测的应用模型,认为采用互补性较强的层次化监测模式,可综合彼此的特点,弥补各自的不足。结合大同忻州窑煤矿现场实例,认为微震监测技术可在矿井全局范围内实时监测冲击危险区域以及掌握其动态发展情况;通过电磁辐射监测的配合,能动态了解采掘空间近场围岩应力的变化情况,从而确定更小的局部危险区,加上钻屑法的具体地点检测可进一步判定冲击危险程度。并较为全面、深入地研究了微震、电磁辐射及钻屑量预警冲击地压的分析方法。实践证明:具有互补性较强的层次化监测技术能够在空间内形成“全局—区域—局部”的全方位监测,在时间上可达到“实时—连续—动态”的监测目的,能有效预警冲击地压灾害。

**关键词:**冲击地压;层次化监测;预警;微震;危险区域;电磁辐射;钻屑法

中图分类号:TD324

文献标志码:A

## Hierarchical monitoring for coal bumps and its study and application of early warning methods

LÜ Jin-guo<sup>1,2</sup>, JANG Yao-dong<sup>2,3</sup>, ZHAO Yi-xin<sup>2,3</sup>, ZHU Jie<sup>2,3</sup>, GAO Feng<sup>3</sup>

(1. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** To get early warning for coal bumps effectively, the methods commonly used for the monitoring of coal bumps and their advantages and disadvantages were discussed, and monitoring problems of coal bumps currently were showed. Based on the mechanism of coal bumps, the application model of the hierarchical monitoring was established. It is widely considered that hierarchical monitoring mode of highly complementary can merger their respective characteristics and make up for their respective shortcomings. Taking the Xinzhouyao Cola Mine as an example, it shows that the dangerous areas of coal bumps can be real-time monitored and the dynamic development can be mastered by the microseismic technology in the whole mine. By the electromagnetic radiation cooperation the stress variation of surrounding rock of mining space can be mastered continuously and dynamically, and the further dangerous areas can be found. In addition, the detection of drilling cutting can confirm to dangerous degree effectively. The analysis methods of early warning for microseism, electromagnetic radiation and drilling cutting were comprehensively and detailedly researched in this paper. The engineering practice shows “global scope-zone-locality” in the space can be formed, and “real time-continuity-development” in the time can be achieved, and the disasters of coal bumps can be effectively early warned by the hierarchical monitoring technology of the stronger complementarity.

收稿日期:2012-06-14 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226801);国家自然科学基金资助项目(51174213);煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题资助项目

作者简介:吕进国(1984—),男,辽宁阜新人,博士研究生。E-mail:glvjinguo2005@163.com

**Key words:** coal bumps; hierarchical monitoring; early warning; microseism; hazard zones; electromagnetic radiation; drilling cutting

随着开采深度的不断增加和赋存条件的加剧恶化,深部煤炭开采的力学环境、煤岩体的组织结构、基本力学行为以及破坏特征与浅部明显不同<sup>[1-5]</sup>,同时深部大空间快速推采的开采模式导致采动应力场时空关系更加复杂,更易诱发冲击地压、顶板大面积来压、矿震等动力灾害,造成严重破坏和大量的人员伤亡。尤其煤矿冲击地压发生时,具有突发性、瞬时震动性、巨大破坏性的特征,事先难以确定发生的时间、地点和强度。因此,国内外学者在冲击地压的监测上开展了大量的研究工作。其中,主要集中在钻屑法、煤岩体变形测量法、煤岩体应力测量法、电磁辐射法、声发射法和微震法等<sup>[5-10]</sup>。监测手段繁多,发展较快,但效果参差不齐。单纯依靠一种手段难以准确识别冲击危险,存在一定的局限性,如果利用过多的监测手段对全矿井、全煤层实时监测,往往会造成人力、物力以及经济上的损耗,无法做到有的放矢,且过多的手段平行使用,或许可导致结果相异,可能造成重大的决策失误。为了解决上述问题,许多专家学者利用现有的冲击地压监测手段,根据其监测原理的不同,提出了冲击地压危险的多参量预测技术<sup>[4-11]</sup>,并在徐州三河尖煤矿、甘肃华亭砚北煤矿及大同忻州窑煤矿进行现场测试研究,取得了预期效果。但目前大多数矿井对于冲击地压的监测还存在许多问题,例如,在多参量监测手段的选择上,手段过多或过少;联合预警分析方法上,监测数据的分析不够深入,缺乏有效的理论分析手段等。

因此,本文以冲击地压的主控因素和发生机理为基础,采用理论分析结合现场实例,针对冲击地压发生的前兆特征提炼出了冲击地压层次化监测方法,并在此基础上全面、详细、深入地研究了微震、电磁辐射及钻屑法预警冲击地压的分析方法。实践证明:该方法能综合彼此的优点,有效地形成“全局—区域—局部”以及“实时—动态—连续”的层次化监测预警体系。

## 1 冲击地压监测现状及存在的问题

### 1.1 冲击地压监测现状

目前煤矿冲击地压的监测方法主要分为两类<sup>[7-8]</sup>:一类是岩石力学方法,是指借助一定的仪器设备对岩体进行直接的测试,根据实时监测数据及相关指标评价冲击危险性;另一类为地球物理方法,是指通过仪器捕捉岩体变形破裂过程中向外所释放的各种能量信息,预测岩体的受力变形状态,进而评估

冲击危险性,如图1所示。

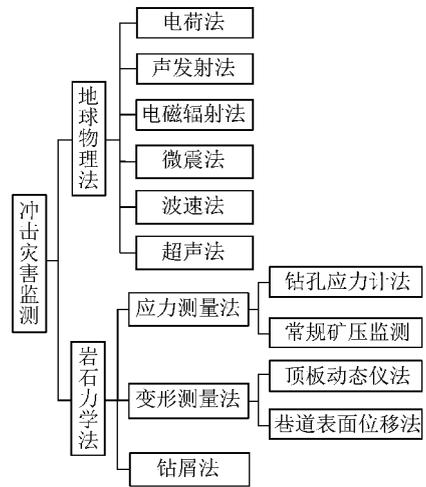


图1 冲击地压监测手段

Fig. 1 Monitoring methods of coal bumps

其中,钻屑法经过大量的现场实践,此方法简单实用,直观性强,已是我国冲击灾害最基本的一种监测手段。但钻孔数量较少,探测范围有限,实际操作中经常出现冲击危险的预测盲区。顶板动态仪法、常规矿压监测及巷道表面位移法的监测结果是用来判定围岩局部高应力集中区及围岩变形稳定情况。简便实用,但监测范围有限,缺点显著,需结合其他方法进行联合分析。钻孔应力计法可连续监测采动应力变化情况,但存在监测盲区。

地球物理方法是众多手段中最具明显优势的监测方法,其中,微震法<sup>[7-11]</sup>具有远程实时连续监测危险源位置及发展趋势,监测区域大,可靠性高。声发射可定位低能、高频的危险源震动信号,但监测区域小,抗干扰能力差,可靠性不高。电磁辐射法可连续动态监测冲击危险,但探测区域有限,一般为数十米。针对国内现场条件,超声法与波速法对冲击危险预警应用有限,电荷法还在试验中。

### 1.2 冲击地压监测存在的问题

冲击地压灾害的突发性和瞬时的巨大破坏性要求监测预警系统具有实时、远程、连续及动态的功能。然而,目前却存在以下问题。

(1)有些矿井仍采用单一钻检方式,此法虽然评价冲击危险性比较可靠,但一点的钻屑值难以说明一定范围内的冲击危险程度,这就需要多点连续监测。由于实际工程中钻孔数量少,预警指标易受主观因素影响,不能实时检验,经常发生漏检。

(2)手工测量配合钻检模式比单一的钻检模式

有所进步<sup>[11]</sup>,依靠手持式电磁辐射仪或安装钻孔应力计,能获得更多的前兆信息,但现场反映手持式电磁辐射仪存在干扰大,不能进行实时监测的问题。简单的钻孔应力计监测范围有限,无法控制全部冲击危险区域。手工测量配合钻检模式仍然存在时间和空间上的盲区。

(3)单参量实时在线监测仍无法满足准确预警的要求。例如,微地震监测能够全面的获取井下震源位置、能量级别、震动原因、影响范围以及发展变化趋势等信息,但难以准确的预测出冲击灾害发生的位置、时间及释放的能级;然而,电磁辐射在线监测系统容易受到井下用电设备的干扰,稳定性较差,有效监测区域较小;声发射监测的现场应用技术不够成熟,仍在完善之中。因此,依靠单参量实时在线监测具有

一定的局限性,无法实现矿井全局的层次性监测。

(4)多参量实时在线联合监测模式是冲击地压监测预警的发展方向,有些矿山虽购买了多种监测系统,得到较为全面的信息,但使用过多手段导致了数据重叠甚至相互矛盾,缺乏有效的预警分析手段,加之没有专人负责而使监测数据分析深度不够,难以实现监测信息的互补,无法形成多参量层次化预警体系。

## 2 冲击地压层次化监测原理

### 2.1 冲击地压发生的主控因素

以往研究<sup>[1]</sup>表明,尽管冲击地压灾害诱因具有多样性和复杂性,但针对不同的冲击灾害,仍能分析出其主要诱因,见表1。

表1 不同矿井冲击地压诱因耦合诱发统计

Table 1 Statistic table of predisposition coupling induction of different mines for coal bumps

矿井名称	典型冲击地压案例	诱因分析
赵各庄矿	2337号工作面冲击事故	冲击倾向性,开采深度,构造应力,采动、放炮等震动,地质构造
老虎台矿	83001号北运输掘进工作面事故	冲击倾向性,开采深度,放炮震动,地质构造,顶板结构,不充分开采
姚桥矿	中央采区回风下山冲击事故	冲击倾向性,开采深度,顶板结构,不规则煤柱,地质构造
忻州窑矿	8727号及8515号煤岩冲击事故	冲击倾向性,煤层赋存不稳定,顶板结构,不充分开采

通过分析不难看出:①多数冲击地压灾害的发生均是多种因素共同作用的结果;②无论深部开采还是浅部开采,坚硬顶板结构、煤层冲击倾向性、地质构造、不完全开采而造成的应力集中等因素均是诱发煤岩冲击地压灾害的重要因素;③放炮、地震等震动也是诱发冲击地压重要的原因之一。

由于多种因素耦合诱发的冲击地压发生机理极为复杂,目前的定量指标评判方法很难准确预测预报冲击地压,主要是由于难以实现开采条件与地质条件下指标的定量描述,评判结果与现场实际情况相差较大。因此,最直接、最经济有效的方法就是选择合适的方法,加大监测力度,掌握科学的预警分析方法,提高冲击地压的预测准确率。

### 2.2 冲击地压层次化监测原理

无论多因素耦合诱发的冲击地压机理多么复杂,但从煤岩变形破坏的机理角度来看,冲击地压<sup>[12]</sup>实质是煤岩体在外力作用下发生变形过程中,煤岩体发生非稳定破坏的动力失稳过程。

在采掘活动影响下,煤岩体的局部区域产生应力集中,应力超过峰值强度后,进入塑性软化阶段,裂纹裂缝贯通并开始发生破坏,出现了包括裂纹裂缝在内的广义应变集中区,区内煤岩介质的性质发生显著变化,即成为“应变弱化”的不稳定介质。由于“应变弱

化”介质抵抗变形的能力降低,因而进一步的变形破坏将首先在应变弱化区附近发生。如果将应变弱化区的煤体视为受载体,周围岩体作为加载体共同组成变形系统,则在外界扰动下,煤岩体变形平衡状态的稳定性存在以下两种情况:

(1)当受到扰动后,能够恢复原平衡状态时,可称为稳定破坏。例如,井下的矿柱、巷道及工作面等周围煤岩体虽然已经破坏,但仍存在承载能力,继续发挥作用;

(2)受到扰动后不能恢复原平衡状态并继续偏离原平衡状态时,称为非稳定的,此时系统将发生失稳,导致煤岩体的突然破坏,猛烈释放能量,从而形成冲击地压灾害。

因此,由冲击地压的发生机理可知:

(1)煤岩体的破裂未必会引发冲击地压,但冲击地压发生前,煤岩体会发生动态破裂,一般是应变弱化区裂纹裂缝进一步发展形成的;

(2)煤岩体的剧烈破坏及高应力集中等现象是冲击地压发生的前兆特征之一;

(3)煤岩层高能动态破裂较为密集的区域是不稳定区域,即为冲击危险区域。

由于破裂集中区可能位于围岩的远场或近场,因而通过煤岩体破裂的信息,采用下井全局监测技术实

时搜寻高能破裂的危险区域。初步确定的危险区,通过近场煤岩体达到极限强度所发出宏观裂缝扩展的信息和煤岩介质各种力学物理参数的动态变化来确定更小的局部危险区域。并对局部危险区域加强监测,判定危险程度,做出危险性预警,实现冲击地压的层次化监测,如图2所示。

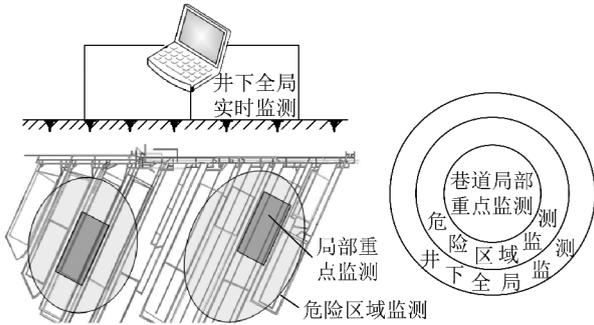


图2 冲击地压层次化监测示意

Fig. 2 Sketch of hierarchical monitoring of coal bumps

### 3 冲击地压层次化监测工程实践

#### 3.1 忻州窑矿井概况

随着开采深度、范围的不断扩展,忻州窑矿冲击地压灾害日趋严重。经实验室试验<sup>[13]</sup>,9号、10号及11号煤层具有中度冲击倾向性,并且都发生过冲击地压,综采工作面发生的频率较多,占到总数的90%,而且大多发生在临采空区的回风巷。仅2005年前两季度,共发生冲击地压22次。其中2005-04-17,该矿西一盘区901区发生冲击地压<sup>[14]</sup>,轨道巷破毁70多米,最宽达到7.3 m。胶带巷破毁150多米,回风巷破毁160多米,顶煤塌落,巷内堆满浮煤。14号煤层胶带巷破毁230 m,此次冲击地压是近年来最严重的一次。据不完全统计,2010年1—10月就发生了31次冲击地压。

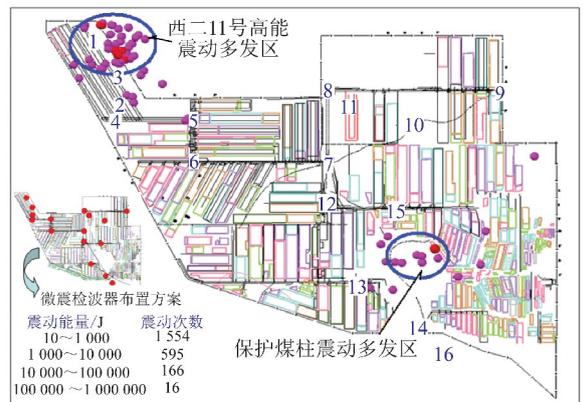
#### 3.2 层次化监测技术及其预警分析

##### 3.2.1 微震全局实时监测及其预警分析

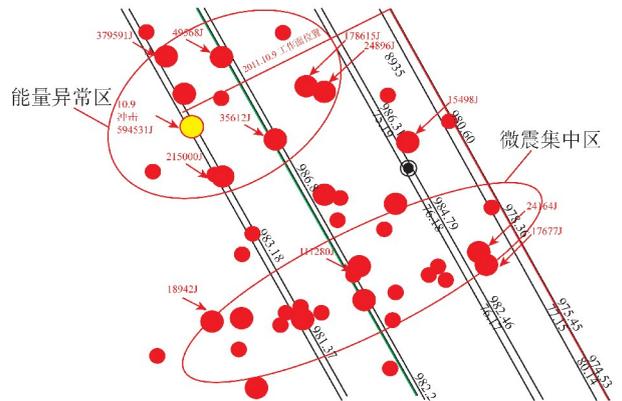
针对目前状况,忻州窑矿引进波兰SOS微震监测系统,实现了整个井田范围多层位连续监测。

图3(a)为2010年10月1—9日内冲击地压发生前的西二8933与8935工作面煤岩层微震事件能量均大于 $10^4$  J的投影平面。可直观的看出,此段时间有2个震动多发区,分别为西二8933及8935工作面与保护建筑物的煤柱区域。由于8933工作面东邻8935工作面(正掘),西邻8931工作面已采,加上受8931工作面采空区应力转移的影响,5933回风巷应力较大,因此,8933工作面及其回采巷道冲击危险性较高。从图3(b)中可看出,在9日前监测到了能量

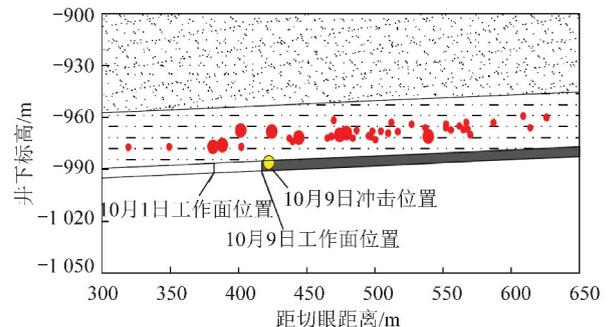
级为 $10^5$  J的多个微震事件且集中在冲击地压发生的位置附近,尤其10月9日上午连续出现2次高能级微震事件,随后在9日22:35微震监测显示西二11号层8935与8933工作面之间的煤柱发生了冲击地压,能量为 $5.9 \times 10^5$  J。从图3(c)可知,高能微震事件基本位于坚硬顶板之上,多次的高能震动诱发了储存在坚硬顶板及煤层中的弹性能急剧释放,从而形成了冲击地压灾害。但6日前高能微震事件较少,基本为微震小事件活动,反映了大断裂活动前的微破裂过程,但较大断裂可导致煤岩体的结构失稳。由此,可根据高能微震活动的时空分布情况来确定冲击危险区域。



(a) 1—9日内井下高能微震事件分布平面



(b) 1—9日内西二采区高能微震事件分布平面



(c) 1—9日内西二采区高能微震事件分布剖面

图3 高能微震事件平面图及剖面

Fig. 3 Plan and profile of microseismic events of high energy

针对忻州窑煤矿西二采区微震监测数据,对一系列微震事件的时空以及能量、频次分布及其变化进行系统地整理分析,获得了微震随时间推移而变化的活动趋势。图 4(a)与(b)分别为 10 月 1—30 日每天微震活动释能大于  $10^4$  J 的能量与频数累计值,其中 9, 21 及 28 日发生了冲击地压。由图可知,在冲击地压发生前,微震事件每日所释放的能量与频次变化显著。通过每日能量、频数累计的实际曲线与各自的拟合曲线可知:

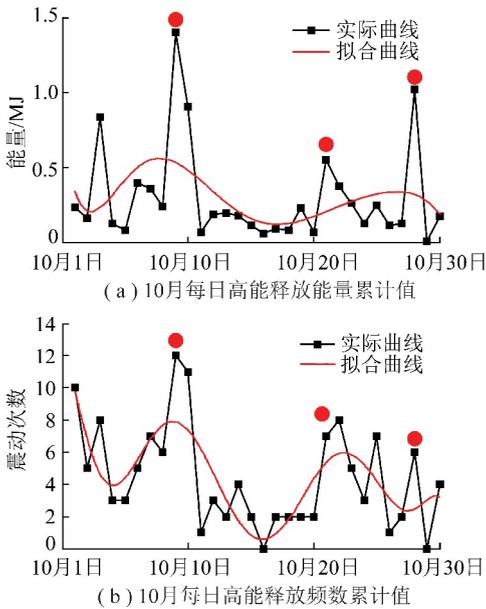


图 4 10 月每日能量与频数累计值

Fig. 4 Accumulated value of energy and frequency daily in October

(1)冲击地压发生前,监测到高能量的微震事件,且某日释放能量急剧增高。虽然每日高能微震频次上下波动,但总体维持较高水平,这种情况容易发生冲击地压;

(2)释放的能量与频次累计值呈现一定的周期性,冲击地压的发生正好处于能量与频次拟合曲线的波峰位置附近。冲击地压的孕育发生,在时序上经历着能量“积聚—能量释放—冲击失稳”的过程;

(3)高能微震事件发生之前,每日释能与频次呈现稳定波动缓慢增长状态,预示着能量不断积聚,直至高能级微震事件的发生,随后进入下一个能量积聚期。

此外,许多研究结果<sup>[4]</sup>表明,由于人类开采活动而诱发的矿震与天然地震之间在震级和频度共同遵循着“G-R”关系式,“G-R”关系中的  $b$  值已作为一项预警冲击地压的重要指标。现以 8935 工作面 10—11 月的微震数据为基础进行分析,震级下限取  $M=0.4$  级,然后计算  $b$  值,计算结果如图 5 所示。通

过  $b$  值的时序特征可知冲击地压灾害大都在  $b$  值水平较低时发生, $b$  值的快速降低很大程度上都会伴随着冲击地压的发生。因此,从这个角度来看, $b$  值的变化趋势可作为预警冲击地压的参数之一。

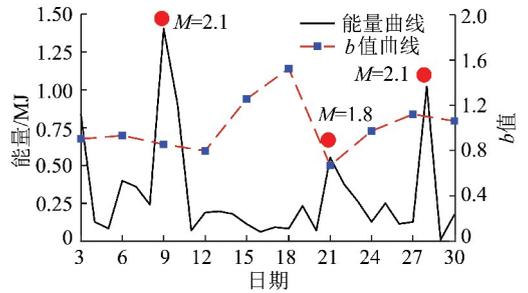


图 5 每日能量累计值及  $b$  值

Fig. 5 Energy value accumulated and  $b$  value daily

### 3.2.2 危险区域电磁辐射动态监测及其预警分析

通过微震实时监测确定危险区域后,可以通过电磁辐射的强度与脉冲数确定局部危险区。一般来讲,冲击地压绝大多数发生在掘进和回采过程中。因此,采掘工作面及回采巷道将成为重点监测区域,图 6 为电磁辐射监测系统的布置示意<sup>[14-15]</sup>。一般每隔 10 m 左右布置一个测点,当某一测点电磁辐射较强时,可在周围加密测点。

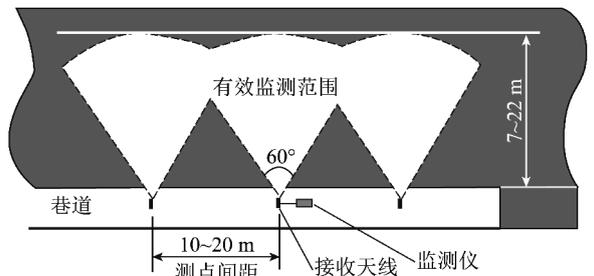


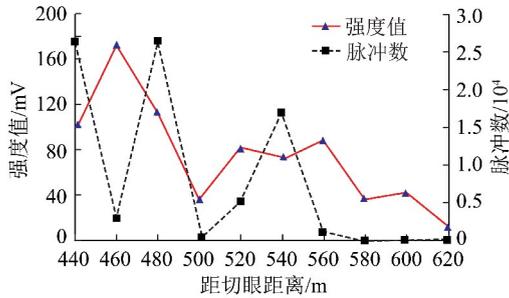
图 6 电磁辐射布置方式

Fig. 6 Layout of electromagnetic radiation

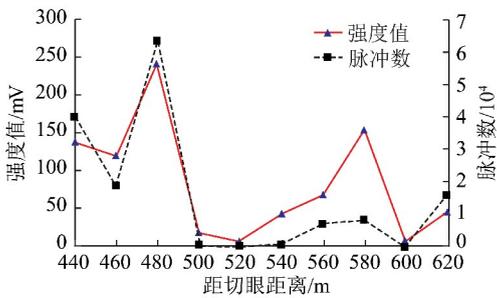
如图 7(a),(b)所示,分别为 2010-08-02 的 8933 工作面 5933 巷西帮与东帮的电磁辐射测试情况。从图中可知,电磁辐射强度和脉冲数可分为 2 个阶段:第 1 阶段距离切眼 440~500 m 范围,电磁强度较高,脉冲数较大;大于 500 m 范围的第 2 阶段电磁强度与脉冲数有所减小,总体呈下降趋势。西帮在距离切眼 460 m 附近,电磁强度值最高达到了 173 mV,440 m 处脉冲数最大达到了 26 651。东帮距切眼 480 m 左右,电磁强度与脉冲数分别达到了最大值。根据以往经验,这已远远超过冲击危险的临界值,即电磁强度 100 mV 及脉冲数 9 000。实际上 8 月 6 日西二 8933 工作面 5933 巷距切眼 440~480 m 区域内发生了冲击地压。

2010-11-22 在 5935 巷东西两帮距离切眼

610~750 m 附近进行了电磁辐射监测。如图 8 所示,此时工作面位于距离切眼 590 m 附近。东帮在 610~790 m 范围内电磁辐射强度较高,脉冲数大幅度升高,说明应力集中程度在逐渐升高。在距离切眼 630~690 m 范围的西帮,电磁辐射强度值和脉冲数波动异常,出现马鞍形的曲线形态,一周后工作面推进至 630 m 处时,距离切眼 630~660 m 范围内发生冲击地压,造成顶板下沉 0.2 m。



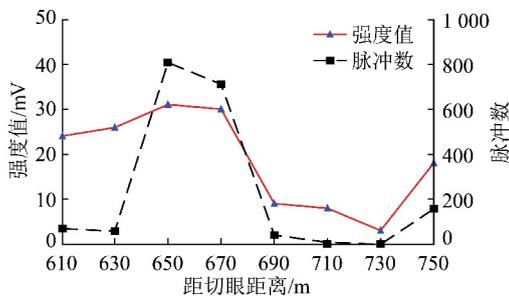
(a) 西二5933巷西帮电磁辐射测试



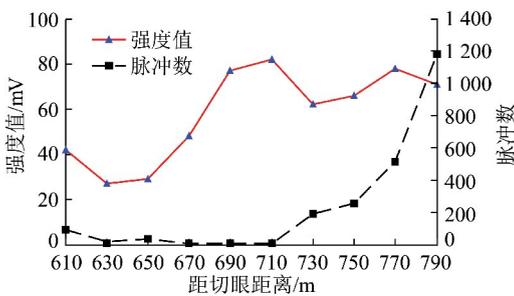
(b) 西二5933巷东帮电磁辐射测试

图7 电磁辐射强度与脉冲数测试

Fig. 7 Electromagnetic radiation intensity and pulse



(a) 西二5935巷西帮电磁辐射测试



(b) 西二5935巷东帮电磁辐射测试

图8 电磁辐射强度与脉冲数测试

Fig. 8 Electromagnetic radiation intensity and pulse

由以上实例可知,电磁辐射对于冲击地压的预警具有一定的前兆意义。若巷道出现电磁辐射强度及脉冲数指标异常,并保持较高水平时,发生冲击地压的危险性较高。尤其指标出现马鞍形的曲线形态时,随后发生冲击地压的几率非常大。

### 3.2.3 局部危险程度的钻屑法检测及其分析

当使用电磁辐射法确定了高应力局部冲击危险区后,可采用钻屑法确定不同地点的冲击危险程度。例如,电磁辐射法监测发现 11 号层 305 盘区 8513 面 5513 巷超前工作面 40 m 处局部地段应力集中,然后用钻屑法在该巷 35 m 处临空侧,距煤壁 3 m 处的钻屑量平均每米达到 18.7 kg,是 11 号层 305 盘区应力稳定区每米正常钻屑量的 9 倍,如图 9 所示<sup>[15]</sup>。

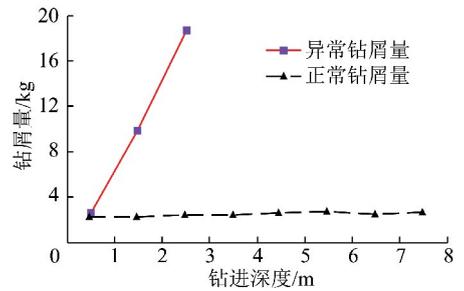


图9 正常区与异常区平均每米钻屑量

Fig. 9 Drilling cutting quantity per meter for normal and abnormal zones

若实际钻粉率达到或超过表 2 中相应的指标或钻进过程中出现动力效应,就可评价此局部危险区域的冲击危险程度。根据具体位置、危险级别等实际情况,针对性地采取防治措施。

表2 11号煤层冲击危险指标

Table 2 No. 11 coal seam indicators of coal bumps

深度(采高的倍数)	煤粉量/(kg·m <sup>-1</sup> )	动力效应
1~1.5	5	钻孔卡死
2	8	有冲击声
2.5	16	跳动
3	25	震动

## 4 结 论

(1)总结了冲击地压监测的常用方法及其存在问题,以冲击地压的主控因素和发生机理为基础,认为冲击地压发生前,煤岩体的动态破裂是由应变弱化区裂纹裂缝进一步发展形成的;煤岩层高能动态破裂较为密集的区域是不稳定区域,即为冲击危险区域;煤岩体的剧烈破坏及高应力集中等现象是冲击地压发生的前兆特征。并针对不同前兆特征提炼出了层次化监测方法及其相应手段。

(2)通过深入研究微震、电磁辐射及钻屑法的预警分析,认为冲击危险区域可根据高能微震活动的时空分布情况来确定。在冲击地压发生前,微震事件每日所释放的能量与频次会变化显著。 $b$ 值变化趋势可作为预警冲击地压的参数之一。若巷道出现过电磁辐射强度及脉冲数异常,尤其两指标出现马鞍形的曲线形态时,发生冲击地压的可能性很高。

(3)现场实践表明,微震监测技术可进行全局实时监测,能够搜索矿井冲击危险区域以及掌握其动态发展情况;通过电磁辐射的配合,可动态掌握采掘空间近场围岩的应力变化情况,从而对煤岩破裂活动的多发区域确定更小的局部危险区,并可采取钻屑法评价此区域的冲击危险程度。彼此之间的相互配合,可有效形成“全局—区域—局部”以及“实时—连续—动态”的层次化监测预警体系。

### 参考文献:

- [1] 姜耀东,赵毅鑫,刘文刚,等.煤岩冲击失稳的机理和实验研究[M].北京:科学出版社,2009.  
Jiang Yaodong, Zhao Yixin, Liu Wengang, et al. Investigation on the mechanism of coal bumps and relating experiments [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 姜耀东.煤炭深部开采中的动力灾害机理与防治基础研究[R].北京:中国矿业大学(北京),2010.
- [3] 赵毅鑫.煤矿冲击地压机理研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2006.  
Zhao Yixin. Investigation on the mechanism of coal mine bumps [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2006.
- [4] 齐庆新,窦林名.冲击地压理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- [5] Mansurov A. Prediction of rockbursts by analysis of induced seismicity data [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6): 893-901.
- [6] Wang J A, Park H D. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 49-57.
- [7] 赵善坤,李宏艳,刘军,等.深部冲击危险矿井多参量预测预报及解危技术研究[J].煤炭学报,2011,36(S2):339-344.  
Zhao Shankun, Li Hongyan, Liu Jun, et al. The research of deep rock burst dangerous mine prediction with multi-parameter and danger re-scission technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 339-344.
- [8] 蓝航,齐庆新,潘俊峰,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 Qingxin, Pan Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China [J]. Coal Science and Technology, 2010, 39(1): 11-15.
- [9] 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,2001:148-151.  
Dou Linming, He Xueqiu. Theory and technology of rock burst prevention [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 148-151.
- [10] 齐庆新,李宏艳,潘俊峰,等.冲击矿压防治的应力控制理论与实践[J].煤炭开采,2011,16(3):114-118.  
Qi Qingxin, Li Hongyan, Pan Junfeng, et al. Stress control theory and practice of rock-burst prevention [J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(3): 114-118.
- [11] 姜福兴,曲效成,于正兴,等.冲击地压实时监测预警技术及发展趋势[J].煤炭科学技术,2011,39(2):59-64.  
Jiang Fuxing, Qu Xiaocheng, Yu Zhengxing, et al. Real time monitoring and measuring early warning technology and development of mine pressure bumping [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(2): 59-64.
- [12] 章梦涛,徐曾和,潘一山,等.冲击地压和突出的统一失稳理论[J].煤炭学报,1991,16(4):48-52.  
Zhang Mengtao, Xu Zenghe, Pan Yishan, et al. A united instability theory on coal (rock) burst and outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(4): 48-52.
- [13] 侯志鹰,王家臣.忻州窑矿两硬条件冲击地压防治技术研究[J].煤炭学报,2004,29(5):550-553.  
Hou Zhiying, Wang Jiachen. Study on prevention and treatment technology of rock burst under the condition of two-hard seam in Xinzhouyao Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(5): 550-553.
- [14] 祁小平.忻州窑矿冲击地压综合防治浅谈[J].科技信息,2009(24):291-292.
- [15] 闫永敢.大同矿区冲击地压防治机理及技术研究[D].太原:太原理工大学,2011.  
Yan Yonggan. Research on the mechanism and technology of rock burst control in Datong coal minning area [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.