



移动扫码阅读

潘俊锋,冯美华,卢振龙,等.煤矿冲击地压综合监测预警平台研究及应用[J].煤炭科学技术,2021,49(6): 32-41.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.004

PAN Junfeng, FENG Meihua, LU Zhenlong, et al. Research and application of comprehensive monitoring and early warning platform for coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 32-41.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.004

## 煤矿冲击地压综合监测预警平台研究及应用

潘俊锋<sup>1,2,3</sup>,冯美华<sup>1,2,3</sup>,卢振龙<sup>1,2,3</sup>,夏永学<sup>1,2,3</sup>,徐刚<sup>1,2,3</sup>,马宏源<sup>1,2,3</sup>,王元杰<sup>1,2,3</sup>,张健<sup>1,3</sup>

(1.中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;

3.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013)

**摘要:**为了全面提高煤矿冲击地压监测预警精度,提升日常监测的自动化水平,以冲击地压发生载荷条件为切入点,提出对冲击启动载荷源开展分源监测的思路,开发了煤矿冲击地压分源权重综合监测预警平台。结果表明,以现场监测数据为基础,为每种预警指标赋予属性权重和等级权重,进而得到可随冲击危险性动态变化的综合权重,采用冲击地压分源权重综合预警方法,可解决人为定权易造成主观误差的问题,回避固定权重中部分指标被中和的情况,预警结果更加客观可靠;开发了集成接口融合、格式转化、统计分析、指标优先、权重计算、等级预警等功能为一体的冲击地压综合预警平台,实现了对微震、地音、应力、钻屑等多参量、多尺度预警信息的深度开发与警情智能发布,大幅提高了预警效率及效果,在多座典型冲击地压矿井进行了成果应用。

**关键词:**冲击地压;综合预警;多参量评价;预警平台

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)06-0032-10

### Research and application of comprehensive monitoring and early warning platform for coal mine rock burst

PAN Junfeng<sup>1,2,3</sup>, FENG Meihua<sup>1,2,3</sup>, LU Zhenlong<sup>1,2,3</sup>, XIA Yongxue<sup>1,2,3</sup>, XU Gang<sup>1,2,3</sup>,  
MA Hongyuan<sup>1,2,3</sup>, WANG Yuanjie<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jian<sup>1,3</sup>

(1.CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2.State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;

3.Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to comprehensively improve the accuracy of monitoring and early warning of rock bursts in coal mines and improve the automation level of daily monitoring, taking the load conditions of rock bursts as the starting point, the idea of carrying out separate source monitoring for the load source of rock burst was proposed, and a comprehensive monitoring and early warning platform for the weight of separate source of rock burst in coal mine was developed. The results show that, based on the field monitoring data, attribute weights and grade weights were assigned to each early warning index, and then the comprehensive weights that can dynamically change with the impact risks were obtained. The comprehensive early warning method of rock burst source weight can solve the problem of subjective error caused by artificial weighting, avoid the neutralization of some indexes in the fixed weight, and the early warning results were more objective and reliable. A comprehensive early warning platform for rock burst has been developed, which integrated the functions of interface fusion, format conversion, statistical analysis, index priority, weight calculation and grade early warning. The comprehensive early warning platform for rock bursts has realized the in-depth development and intelligent release of multi parameter and multi-scale early warning information such as microseisms, ground noise, stress and drilling cuttings, etc. and the intelligent release of warning information, which greatly improved the efficiency and effect of early warning. The results have been applied in the bump-prone mines.

**Key words:** rock burst; comprehensive early warning; multi parameter evaluation; early warning platform

收稿日期:2021-02-28;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金国家重大科研仪器研制资助项目(51927807);科技助力经济 2020 重点专项资助项目(SQ2020YFF0426364);国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804204)

作者简介:潘俊锋(1979—),男,陕西旬邑人,研究员,博士。E-mail:panjunfeng@yeah.net

## 0 引言

冲击地压监测预警是开展冲击地压解危工作的必要前提,而监测预警水平的高低直接决定了解危工程实施的时空精准度,进而影响灾害治理效果。近几年,我国冲击地压监测预警由微震法<sup>[1-2]</sup>、地音法<sup>[3]</sup>、电磁辐射法<sup>[4]</sup>、应力计法<sup>[5-7]</sup>等单一手段监测逐渐转变为多参量<sup>[8-11]</sup>、多尺度综合监测<sup>[12-15]</sup>,预警效能不断提升。即便如此,该领域仍存在诸多亟须解决的问题<sup>[16-18]</sup>,如监测手段的选择与匹配缺乏科学的理论指导,导致监测设备的优选、匹配、布置等不尽合理;不同监测设备给出的预警结果可能相互矛盾,最终危险状态难下定论;各监测设备数据库彼此独立,数据意义、格式差别大,而没有可供数据转换、规律分析及等级预警的统一平台,导致日常监测预警任务重、难度大、耗时长、误差率高。

笔者以冲击地压发生载荷源为切入点,提出对冲击启动载荷源开展分源监测的理论。开发了集成接口融合、格式转化、统计分析、指标优先、权重计算、等级预警等功能为一体的冲击地压综合预警平台,实现了对微震、地音、应力、钻屑等多参量、多尺度预警信息的深度开发与警情智能发布,提高了预警效率及效果,并在多座典型冲击地压矿井进行了应用。

## 1 煤矿冲击地压监测预警主要任务

冲击地压监测预警极其复杂,从发生原理、围岩结构、区域环境、采动响应等角度考虑,难以采用某种技术或设备包揽,因此,植入不同技术的设备以及多信息量的综合监测与预警,是煤矿提高冲击地压预警准确度的主要趋势。研究表明,冲击地压实现综合监测预警需要包括以下主要内容。

1) 基于冲击地压发生条件的基础理论。以结果性的灾害显现特征为监测目标,无法做到灾前预警。只有从冲击地压发生机理角度来考虑诱发冲击地压的载荷来源,以全面监测载荷源突变前兆信息为目标,方可推进冲击地压灾害综合预警。

2) 设计源头减少误差。冲击地压预警不能简单提出“综合监测”,“强监测”,不能是简单的组合,没有考虑冲击地压不同载荷源在空间及尺度上分布的差异,易产生盲区,无的放矢。冲击地压监测预警模式设计需要做到分源、空间层次化。除此之外,提高监测设备本身精度也必须的。目前有关冲击地压监测预警的手段也不少,还有新的手段在不断推出。但实际上现有手段研究还没有结束,修正算法、降低误差、提高精度是首要工作。

3) 客观科学的警情矛盾处置。多种监测系统同时运用,既有本系统的系列指标,又有综合预警指标,结果都是要表明危险等级,难免会出现各类预警结果互相矛盾时,各预警指标权重如何选择,难以判断,将无法指导现场抢险避灾决策。

4) 先进快速的警情信息推送。将所有监测传感器数据汇聚于软件平台,可实时动态查看各监测区域当前班的危险状态及历史危险评价结果,当某一区域危险状态达到预警级别时,发出危险预警(声音提示+弹出对话框),提醒监测人员进行处理,并自动生成多参量联合预警单(包含预警时间、预警位置、预警等级等关键信息)。

## 2 冲击地压综合监测理论基础

### 2.1 冲击地压发生条件特征

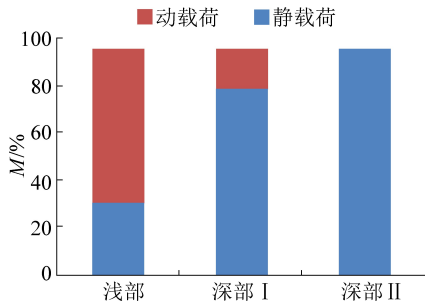
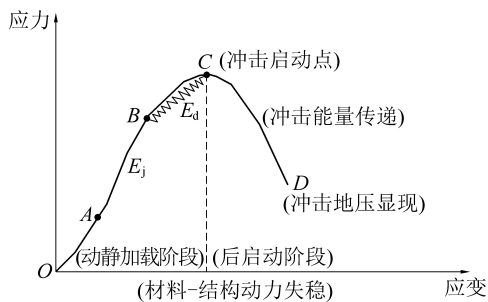
煤层在开采过程中发生冲击地压宏观上需要具备3个条件:①所开采的煤岩层具备冲击倾向性;②发生冲击地压的采掘空间围岩载荷局部化集中,并且达到煤岩体结构系统冲击式失稳载荷极限;③煤体中高度局部化集中的载荷有释放空间,造成采掘空间煤岩体、设备、人员受损的过程就是高集中载荷释放的过程,此种情况,如果不开采,不形成空洞等释放空间,就不会发生冲击地压。3个条件中,煤岩具有的冲击倾向性固有属性,难以改变;第3个条件(存在能量释放的采掘空间),凡是有开采活动就不可避免,所以冲击地压防治研究的重点应该放在如何避免或减少采掘围岩的载荷局部化集中程度,使其不足以发生冲击地压。

通过冲击地压诱发因素统计,深度归纳总结,得到影响冲击地压发生的外围因素复杂多变,但都归结于为冲击启动提供载荷源,有的提供集中静载荷、有的提供集中动载荷。从该角度可从埋深角度对冲击地压进行分类。如图1所示( $M$ 为动静载叠加与冲击临界载荷的比值),浅部矿井因埋深浅,重应力等基础静载荷相对不足,主要靠动载荷补充,即动、静载叠加冲击型;深部矿井因埋深大,重应力、水平应力等基础静载荷相对充足,达到冲击临界值对载荷增量要求较低,主要存在2种冲击形式:微动载冲击型、纯静载冲击型。

### 2.2 分源综合监测理论

图2描述了冲击地压发生物理过程, $OB$ 阶段为区域环境载荷对巷道开挖响应,静载荷局部化集中,为诱发冲击启动的基础静载荷。自 $B$ 点起,达到冲击启动点 $C$ 有2种途径,1种途径是采掘围岩微单元 $dx$ 继续获得静载荷增量,比如邻近掘进巷道了或

者回采工作面过来造成的静载荷  $E_j$  迁移、叠加;另一种途径是微单元  $dx$  获得静载荷没有变化,而是获得周边外界动载荷  $E_d$  增量的扰动、加载,常见的是顶板断裂、爆破震动等。微单元  $dx$  通过2种途径满足冲击启动条件后,冲击地压进入发生历程,依次经历冲击启动-冲击能量传递-冲击地压显现。

图1 冲击地压发生条件与开采深度的关系<sup>[19]</sup>Fig.1 Relationship between rock burst conditions and mining depth<sup>[19]</sup>图2 冲击地压启动载荷条件<sup>[19]</sup>Fig.2 Loading path of rockburst start-up<sup>[19]</sup>

由以上分析知,诱发冲击地压启动具有2大途径,①动、静载荷叠加途径;②纯静载荷叠加途径,而对于历时几秒钟的冲击地压发生过程,上述2种途径主要作用在冲击启动条件形成阶段,不是后启动阶段。因此冲击地压发生前监测预警应针对其发生条件中的动、静载荷来源进行分源监测。同时考虑载荷空间特性,采用微震监测系统来监测大范围高位坚硬厚岩层断裂所产生的动载荷;采用地音监测系统来监测小范围低位坚硬厚岩层断裂所产生的动载荷;采用煤体应力监测系统来监测采动围岩中产生的静载荷(图3)。

### 3 冲击地压分源综合预警平台

#### 3.1 平台架构设计

冲击地压综合预警平台,应全面展示矿井冲击地压监测信息,主体框架将由数据采集层、数据存储层、办公业务层、综合结果展示层等4个层次组成(图4)。其中数据采集层:采集各类冲击地压监测数据,涵盖不同尺度、不同物理意义、不同格式等。

数据存储层:建立统一的冲击地压多参量监测数据管理中心,统筹各类型数据。办公业务层:基于统计学、地球物理学及工程相关性,对多参量数据进行规律性分析。结果展示层:将结论性分析成果,以适当的格式和便捷的途径传递给阅读方。

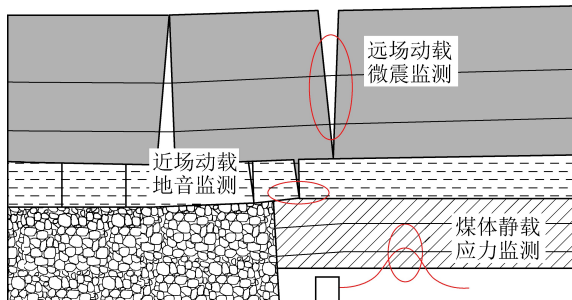


图3 冲击地压分源监测示意

Fig.3 Schematic diagram of rock burst monitoring by different sources

#### 3.2 分源监测设备配置

基于冲击地压发生的动静载荷条件,开展分源监测,动载荷主要采用微震、地音等地球物理方法,静载荷主要采用应力在线、钻屑法等岩石力学方法。

##### 3.2.1 远场动载微震监测布置

井下煤岩体是1种应力介质,当其受力变形破坏时,将伴随着能量的释放过程,微震是这种释放过程的物理效应之一,即煤岩体在受力破坏过程中以较低频率( $f < 150$  Hz)震动波的形式释放变形能所产生的震动效应。对于冲击地压矿井来说,采购先进的微震监测系统,主要针对高位顶板活动监测,科学布置监测网点非常重要的。

以国际上最先进的波兰 ARAMIS M/E 微震系统为例,该系统的信号检波器分为探头传感器和拾震器2种,图5为2种传感器井下安装示意。微震检波器布置应遵循如下原则:

1) 微震监测需要获得震动信息的三维坐标  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  和震动发生的时间  $T$ ,要实现对1个区域的有效监测,至少保证4个检波器能接收到该区域的震动信息,台网布置时应考虑这一点。

2) 微震检波器有2种,拾震器版和探头版,拾震器的优点是监测灵敏度高,监测距离远,缺点是需要铺设水泥基础,挪动不方便;探头的优点是直接安装在锚杆上,挪动及安装便捷,缺点是灵敏度低、监测距离较短。最优方案为拾震器和探头进行组合监测,固定区域的监测用拾震器,采掘工作面等需要经常挪动检波器的区域采用探头,能达到比较好的效果。

3) 检波器间距越小,定位精度越高,尽可能地增加检波器数量,尽量使检波器围绕重点监测区域



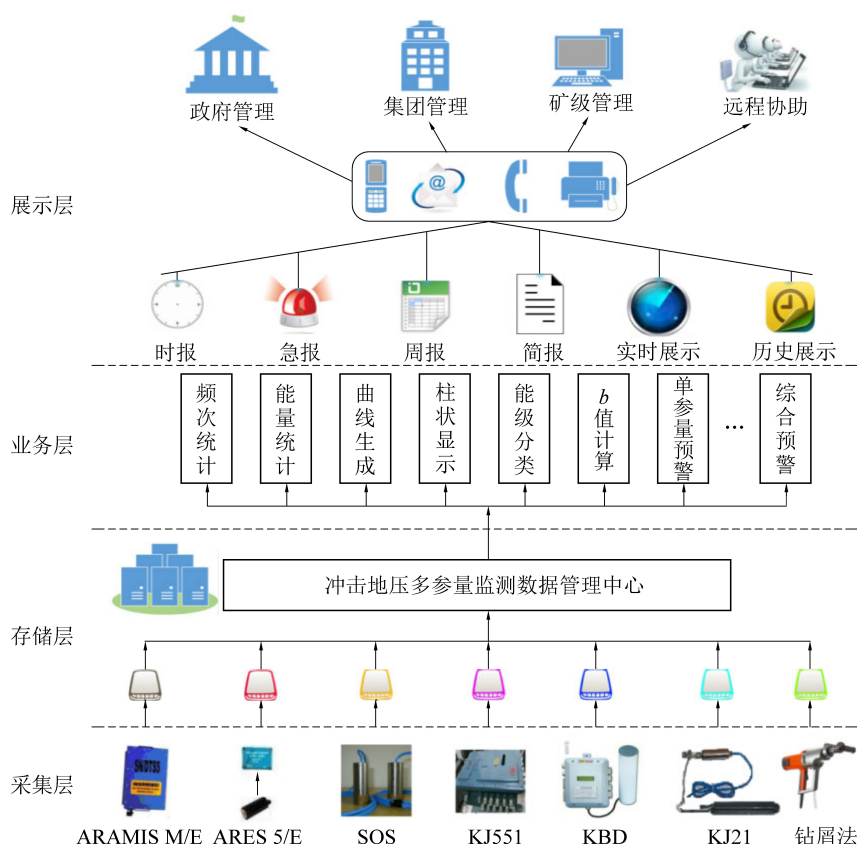


图4 冲击地压监测预警平台框架

Fig.4 Framework of rock burst monitoring and early warning platform

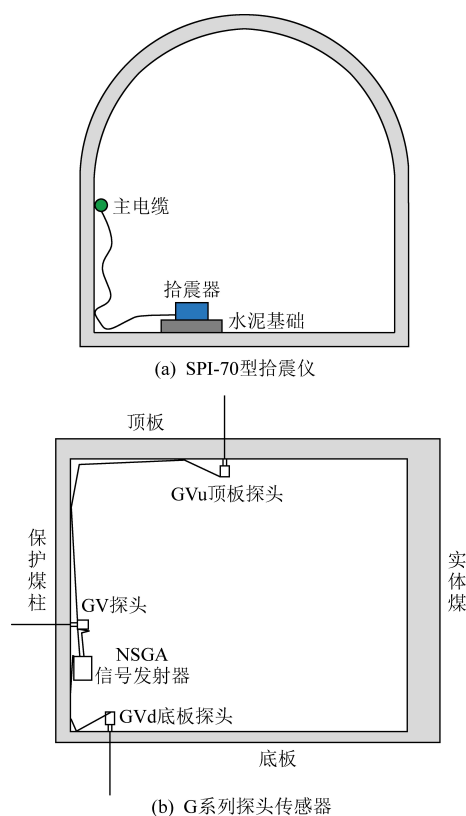


图5 ARAMIS M/E微震监测系统2种传感器井下安装示意  
Fig.5 Underground installation diagram of two kinds of sensors of ARAMIS M/E microseismic monitoring system

均匀分布,保证多数站可以获得记录信息,避免定位站数量不足,影响精度和可靠性。

4) 检波器尽量在垂直方向有一定落差,宜采用空间立体形式,近水平煤层需要采用井上下联合联合布置监测网点(图6),以提高垂直方向的定位精度,同时也有利于避免出现“病态”方程,得不到正确的震源位置或使得方程组解发散。

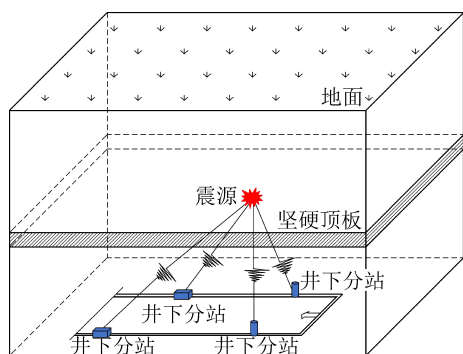
5) 根据矿井生产实际,要使微震监测系统构成1个空间网络,拾震器的布置要确保当前开采区域和其他重点监测区域处于监测网络的中心。检波器尽可能接近待测区域,避免大断层及破碎带的影响,也要远离机械和电气的干扰等。

图7为近水平煤层井上下微震联合监测数据对比,其中图7a为井下波兰 ARAMIS M/E微震系统监测微震事件岩层剖面示意。图7b为井下 ARAMIS M/E微震系统联合波兰 ARP2018型地面微震监测系统监测到的微震事件岩层剖面示意,垂直方向事件数量增多,高度上升明显。

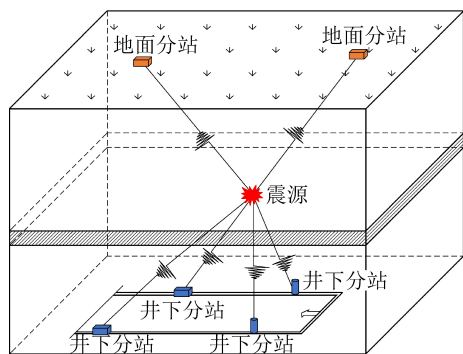
### 3.2.2 近场动载地音监测布置

地音是由地下开采活动诱发的,其震动能量一般为 $0 \sim 10^3$  J;震动频率高,为 $150 \sim 3\,000$  Hz。相比微震现象,地音为1种高频率、低能量的震动。冲击





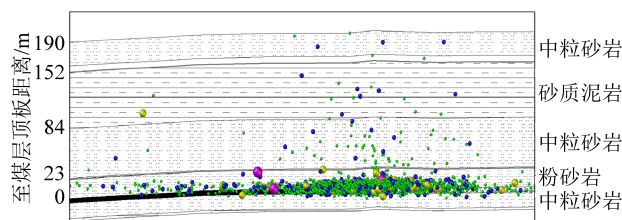
(a) 微震传感器井下布置



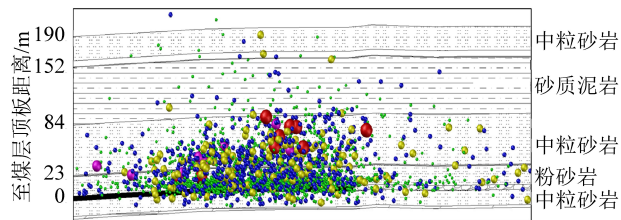
(b) 微震井上下联合布置

图6 近水平煤层井上下联合监测

Fig.6 Upper and lower joint monitoring of flat seam well



(a) 微震传感器井下布置



(b) 微震井上下联合布置

●  $0 < E \leq 10^2$  J    ●  $10^2$  J  $< E \leq 10^3$  J    ●  $10^3$  J  $< E \leq 10^4$  J  
 ●  $10^4$  J  $< E \leq 10^5$  J    ●  $10^5$  J  $< E \leq 10^6$  J

图7 近水平煤层井上下联合监测数据对比

Fig.7 Comparison of upper and lower joint monitoring data of near horizontal coal seam wells

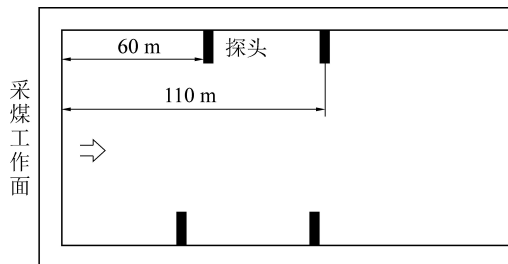
地压矿井主要用来监测采掘空间近场围岩活动。地音传感器安装在锚杆端部,需要遵循以下4点原则。

1) 地音探头一般布置在冲击危险性比较高区域,如:采、掘工作面影响范围。

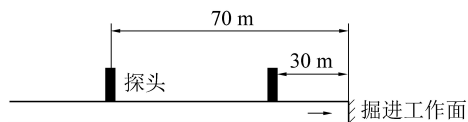
2) 地音探头的安装地点必须保证能够接收到

监测区域的地音信号,因此安装地点与监测区域间不得存在干扰弹性波传播的地质破碎区。

3) 每个监测区域至少有2个地音探头,当工作面长度小于200 m时,探头与回采工作面的距离应当在30~110 m,当工作面长度大于200 m时,探头距回采工作面40~200 m;探头应安装在掘进头后方30~110 m;工作面条件允许时,探头应当尽可能远离噪声源(图8)。



(a) 采煤工作面地音传感器布置



(b) 掘进工作面地音传感器布置

图8 采掘工作面地音传感器布置

Fig.8 Ground sound sensor layout of mining face

4) 为确保探头与岩体接触牢靠,应当将探头安装在孔底,也可以安装在锚杆钻孔的露头位置,安装在锚杆露头处的探头应当用吸声材料(如海绵、毛毡等)密封探头,锚杆应该全程锚固,与岩体形成1个整体。

### 3.2.3 采动围岩静载荷应力监测布置

冲击地压应力在线监测系统,通过在采掘空间围岩埋设高精度应力传感器,实时监测采动围岩近场系统内集中静载荷的积聚及变化,从冲击地压发生的内因角度监测并警示应力或能量状态,从而为减灾避灾提供指导。冲击地压应力在线监测传感器布置,需要遵循以下4点原则。

1) 布置区域。在传感器数量有限的情况下,应依据冲击危险性预评价结果,重点布置在冲击危险区域范围内。

2) 传感器深度。传感器应深入到巷道围岩应力集中区范围,且埋设深度应有区别。帮部传感器最大深度一般不小于巷道宽度的2倍。

$n$  为巷道宽度,帮部传感器具有2~3种深度,浅部传感器埋深一般位于  $n \sim 2n$ ,深部传感器埋深一般位于  $2n \sim 3n$ 。对于巷帮塑性区宽度较大,应力集中区远离巷帮的巷道,应适当增大埋深,如图9所示。

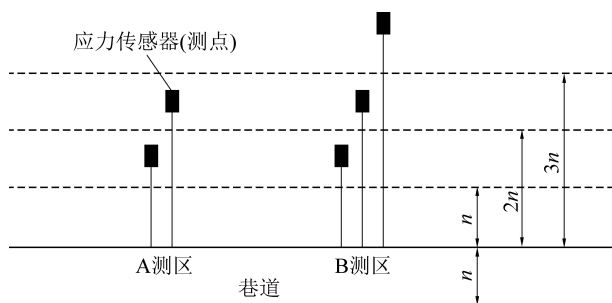


图9 巷道帮部传感器布置示意

Fig.9 Schematic of sensor layout in roadway side

3) 传感器间距。传感器间距的设置应综合考虑冲击危险区域分布、实际地质及开采条件等因素。在冲击危险等级较高、地质或开采条件变化显著的区域,应适当缩小传感器间距,增加监测点密度。

4) 钻孔应力计安装时需要尽可能地保证两压

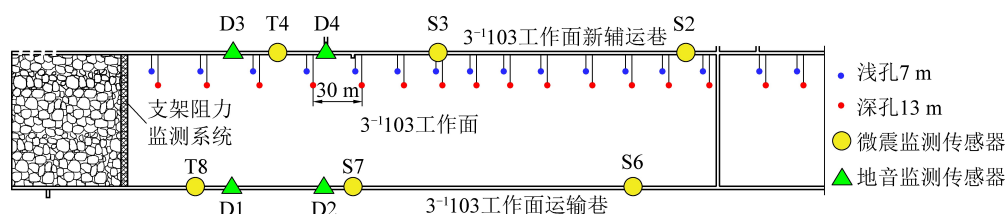


图10 冲击地压综合预警单元

Fig.10 Comprehensive early warning unit of rock burst

### 3.3.2 指标与权重

煤岩体具有各向异性、非线性,冲击地压在煤岩体中发生难以建立理想的本构模型,与其采用非常理想化的数学计算,不如采用数据统计。因此,冲击地压动载荷预警指标主要包括2个方面:①借助地震学领域指标,采用能定量描述岩体应力变化和危险趋势的地震学参数,如事件数、能量、矩震级、地震级-频度关系的偏离程度 $\eta$ 、缺震程度 $M_m$ 等;②采用能紧密体现矿山微震活动与开采响应关系的指标,例如:探寻采矿爆破、开采速度、井下工程结构和岩体结构变化等对矿山冲击危险的影响规律,建立起它们之间的相关关系,可实现更为准确的预测预报。

冲击地压静载荷预警指标,综合考虑应力大小、应力增速、应力分布梯度、测点安装深度、煤层强度、测点与采掘工作面相对距离等因素。由于冲击地压发生机理及启动条件的复杂性,目前难以确定具有普适性的精确量化冲击危险预警指标,需要结合矿井自身条件及统计规律不断摸索。一般认为,应力大小和应力增速与冲击危险呈正相关性,可根据现场发生冲击地压或强矿震前的应力状态及变化情况制定及修正相关指标。

由于对矿井冲击危险性评价涉及多种监测手

力枕接触面为水平方向,以能够较好地反映垂直应力的变化,因此在安装时要严格控制压力枕的位态,保证良好的监测效果。

目前用于煤体应力监测的传感器所获得的应力都是相对应力而不是绝对应力,因此不能单纯的依靠应力大小进行危险性的判断,同时根据煤体应力监测评价冲击危险性也是相对的。

### 3.3 警情综合与发布

#### 3.3.1 综合预警单元

即使是同一矿井,采掘活动区域也不止一个,冲击地压综合预警的目标区域,必须是各类传感器监测范围的交集,否则没有意义。如图10所示,在3-103工作面新辅运巷一长一短布置的为应力传感器,本工作面就可以作为1个综合预警单元。

段,多个评价指标,将不同的评价指标综合反映目标区域冲击危险,就必然对每个指标赋予权重。然而,权重设定后,无论采用哪种算法,特别危险的某1~2种评价指标,很可能被其他危险指数低的指标中和,从而降低了总体评价的危险程度。

为此,预警算法增加变权综合评价方式,其权重大小除了本身对冲击地压发生的贡献率之外,还将受指标危险等级的影响,如果其中某一项指标危险等级较高,其对诱发冲击贡献率又大,其权重便随之增大,来回避其他安全性指标中和。对于权重的确定,先确定指标的属性权重与等级权重,然后采用拉格朗日算子将属性权重和等级权重综合为组合权重,最后建立冲击地压监测评价的相对变权模型<sup>[20]</sup>。

#### 3.3.3 警情发布

处于实时监测状态的冲击地压预警平台,能够自动计算并显示当班危险状态,如图11所示,为龙家堡煤矿2020年4月引进冲击地压综合预警平台后,513工作面监测预警情况。预警平台能够“一键生成”日报表,自动生成预警单,自动输出预警区域图像,并且可以通过雷达图综合展示多个工作面综合预警结果。当某一区域危险状态达到预警级别时,可通过监控室发出声响危险预警,弹出对话框,



图 11 矿井回采工作面预警结果

Fig.11 Early warning results of mining face

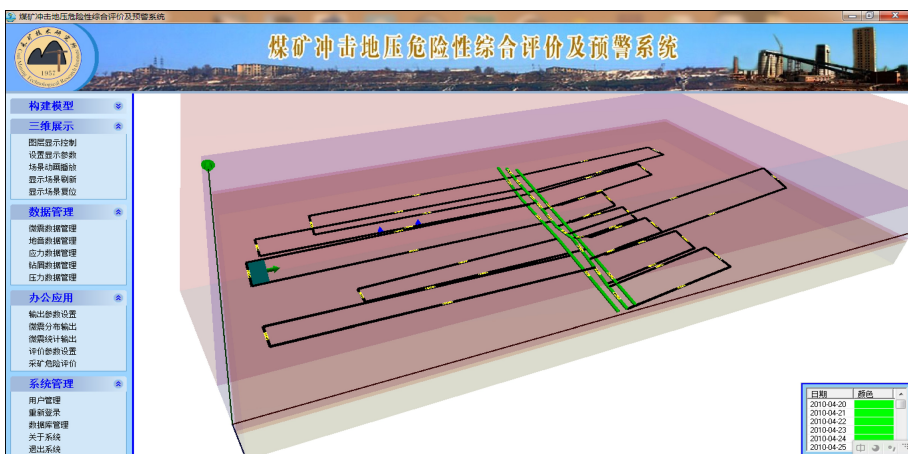
并自动生成多参量联合预警单(包含预警时间、预警位置、预警等级等关键信息)。相关人员手机 APP 也会得到信息推送警示。

## 4 应用实践

2010 年至今,中煤科工开采研究院采矿所持续研究煤矿冲击地压综合监测预警平台已历时十余年,平台至今先后经过了数次改革与优化,革命性的版本实践应用可分为 3 代。

### 4.1 第 1 代综合监测预警平台应用

第 1 代煤矿冲击地压综合监测预警平台,自 2010 年立项开始探索,命名为“煤矿冲击地压危险性综合评价及预警系统”,也是国内首套综合预警平台。系统包括了 5 大模块,分别为:三维模型构建、模型及监测三维展示、监测数据管理、办公应用、系统管理。主要特点在于地层、构造及微震真三维建模,首次采用分源权重综合评价算法。平台界面如图 12 所示。

图 12 煤矿冲击地压危险性综合评价及评价系统主界面<sup>[20]</sup>Fig.12 Main interface of burst risk comprehensive evaluation and early warning system of coal bump<sup>[20]</sup>

自 2012 年 3 月 1 日开始,采用平台对千秋煤矿 21141 工作面范围内的冲击地压进行监测,共进行了 608 d 的应用验证,效果良好。例如:2013-02-07,微震评价等级为 c 级,地音评价等级为 a 级,应力监测评价等级为 d 级,权重综合 3 种评价结果,平台自动确定 2 月 7 日冲击危险等级为 d 级(图 13),预警了冲击地压发生风险。21141 工作面于 2 月 8 日 15 时 48 分发生冲击,释放能量  $1.63 \times 10^7$  J。

### 4.2 第 2 代综合监测预警平台应用

受甘肃华亭煤业集团委托,第 2 代冲击地压综

合监测预警平台于 2016 年开始研发。界面比较简洁,大部分内容包含在下拉菜单里。如图 14 所示,主要应用于华亭煤田砚北、华亭、山寨、陈家沟及东峡等煤矿。主要特点包括:①模块组合基于现场装备配置,可添加、可定制,不受限,更为灵活。②预警算法基于预警区域现场开采条件、有效数据的种类自动选择,差异化对待,更为科学。③可覆盖所有常规数据处理、分析功能,便于现场技术人员日常应用,更为全面。④平台留有接口,便于后期个性化、定制化的深度分析模块开发,更为开放。



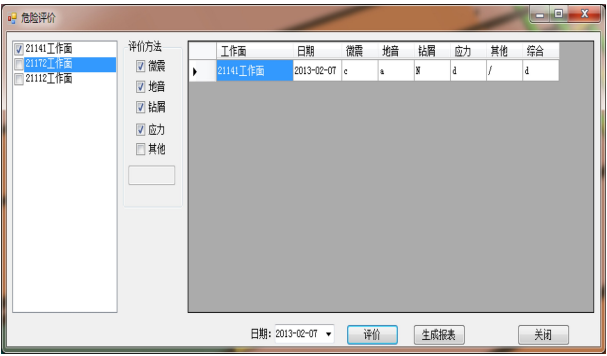


图 13 2月7日评价系统评价结果<sup>[20]</sup>

Fig.13 Results of evaluation in February 7th<sup>[20]</sup>

以砚北煤矿为例,采用预警平台对 250202 工作面范围内的冲击地压进行预警测试,自 2019 年 6 月正式投入使用,截止到 2019 年 10 月 16 日,共进行了 139 d 的有效预警验证。在此期间,井田范围内共发生 5 次方以上高能事件 9 次,预警软件共发出班次危险预警 41 次,验证冲击地压或高能事件 7 次,漏报 2 次。通过长期现场效果检验表明,采用冲击地压预警平台,在报警率为 29%的条件下,报准率达到了 77.8%,发震概率为 74.1%,相对于 5.8%的背景概率,其效益增益达到了 12.8 倍,验证效果良好。

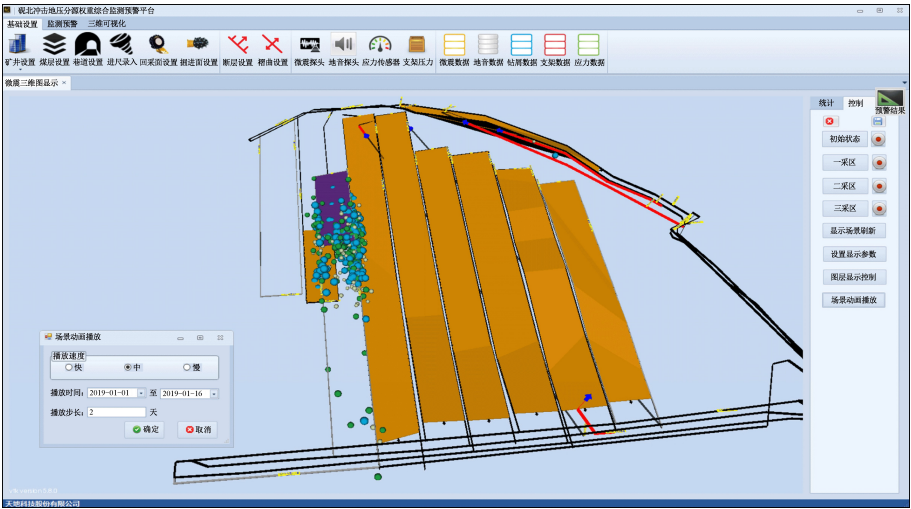


图 14 第 2 代冲击地压预警平台主界面

Fig.14 Main interface of the second generation rock burst warning platform



图 15 第二代冲击地压预警平台预警界面

Fig.15 Early warning interface of the second generation rock burst early warning platform

4.3 第 3 代综合监测预警平台应用

第 3 代冲击地压综合监测预警平台于 2019 年着手革新,界面进行了全面变革,主要特点为:①对预警算法进行了大的优化修改,增加掘进工作面评价算法。②增加了动、静态危险区域实时显示功能及历史危险状态播放功能。③优化平台主界面,预警结果雷达图展示(图 16),增加掘进工作面快捷入口。④开发了基于 mapgis 的单矿终端网页版平台及网页版集团、全国终端(图 17),实现了微震波形实时传输及存储。⑤开发了冲击地压预警平台信息手机 APP。主要应用于陕西孟村矿、小庄矿、大佛

寺矿、胡家河矿、文家坡等煤矿。

以文家坡矿为例,预警平台于 2020 年 10 月开始投入使用,其中对 11 月 14 日一次 4 次方事件进行了准确预警。预警过程如下:11 月 13 日晚班开始,综合预警等级由 b 级(弱冲击危险)上升至 c 级(中等冲击危险),持续 2 个班后上升至 d 级(强冲击危险),继续持续 2 个班至 11 月 14 日晚班,此时微震、应力监测为 b 级,地音监测为 d 级(图 18、图 19),预警了冲击地压发生风险。4105 工作面于 11 月 14 日 17 时 49 分发生一次动力显现,释放能量  $2.80 \times 10^4$  J。

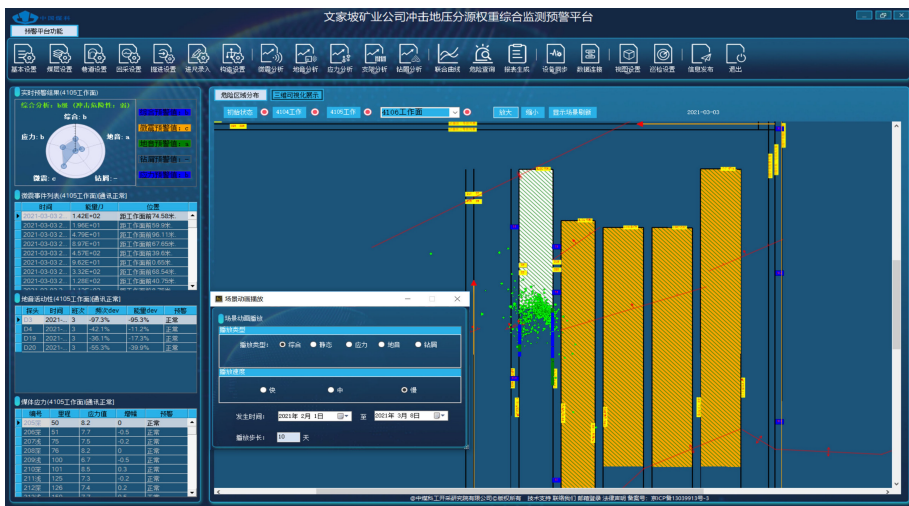


图 16 第三代冲击地压预警平台主界面

Fig.16 Main interface of the third generation rock burst warning platform

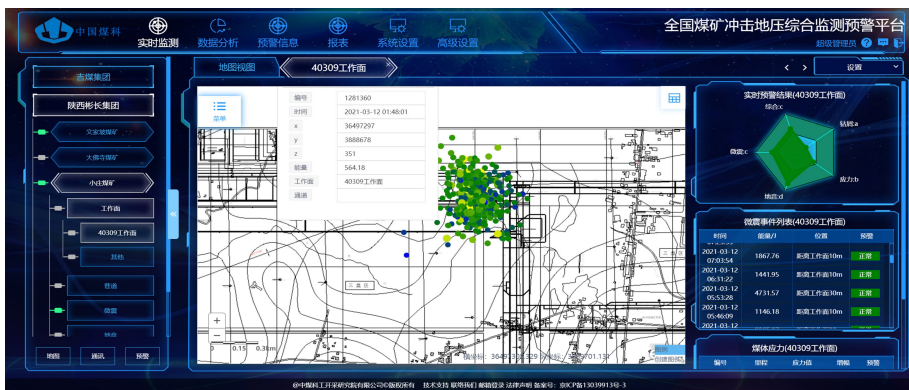


图 17 全国煤矿冲击地压预警平台界面

Fig.17 Main interface of national coal mine rock burst early warning platform



图 18 预警结果列表界面

Fig.18 Warning result list interface

## 5 结论

1) 植入不同技术的设备以及多信息量的综合监测与预警,是煤矿提高冲击地压预警准确度的主要趋势。从诱发冲击地压启动的载荷条件出发,以动静载荷源为靶点,开展分源监测是冲击地压监测设备选型与方案设计的理论基础。

2) 以现场监测数据为基础,为每种预警指标赋予属性权重和等级权重,进而得到可随冲击危险性动态变化的综合权重,采用冲击地压分源权重综合预警方法,可解决人为定权易造成主观误差的问题,回避固定权重中部分指标被中和的情况,预警结果

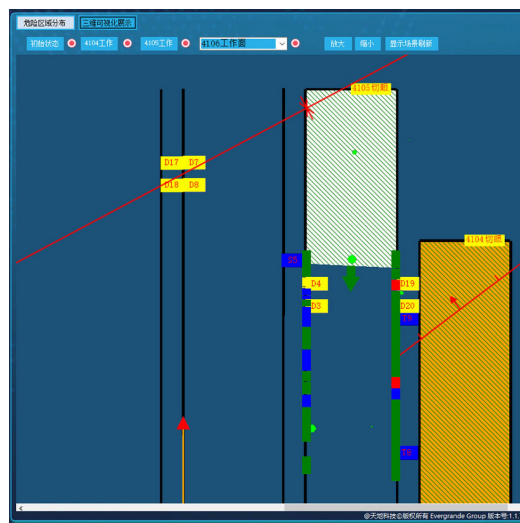


图 19 预警结果实时显示界面

Fig.19 Real-time display interface for warning results

更加客观可靠。

3) 开发了集成接口融合、格式转化、统计分析、指标优先、权重计算、等级预警等功能为一体的冲击地压综合预警平台,实现了对微震、地音、应力、钻屑

等多参量、多尺度预警信息的深度开发与融合,大幅提高了预警效率及效果。

4) 煤矿开采最显著的特点是条件一直处于变化过程中,用来监测冲击地压的装备存在多处误差,并且监测的都是间接信息,建立在过去条件的指标来预警未来条件,表明冲击地压监测预警研究任重道远。

#### 参考文献 (References):

- [1] 曹安业, 窦林名, 李志华, 等. 高应力区微震监测信号特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 146-149, 154.  
CAO Anye, DOU Linming, LI Zhihua, *et al.* Characteristic of microseismic monitoring signal in high stressed zone[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(2): 146-149, 154.
- [2] DOU Linming, CHEN Tongjun, GONG Siyuan, *et al.* Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workplace[J]. Safety Science, 2011, 50(4): 736-740.
- [3] 夏永学, 蓝航, 魏向志. 基于微震和地音监测的冲击危险性综合评价技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S2): 354-359.  
XIA Yong xue, LAN Hang, WEI Xiang zhi. Study of comprehensive evaluation technology for coal bump hazard based on microseismic and underground sound monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 354-359.
- [4] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 366-369.  
WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhen tang. Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application[J]. China Safety Science Journal. 2003, 28(4): 366-369.
- [5] 谭云亮, 张明, 徐强, 等. 坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 166-172.  
TAN Yunliang, ZHANG Ming, XU Qiang, *et al.* Study on occurrence mechanism and monitoring and early warning of rock burst caused by hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 166-172.
- [6] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2346-2351.  
QU Xiaocheng, JIANG Fuxing, YU Zhengxing, *et al.* Rockburst monitoring and precaution based on equivalent drilling research and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2346-2351.
- [7] 刘金海, 翟明华, 郭信山, 等. 震动场、应力场联合监测冲击地压的理论及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 353-363.  
LIU Jinhai, ZHAI Minghua, GUO Xinshan, *et al.* Theory of coal burst monitoring using technology of vibration field combined with stress field and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 353-363.
- [8] 王超. 基于未确知测度理论的冲击地压危险性综合评价模型及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [9] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 煤样失稳破坏的多参量监测试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 667-674.  
JIANG Yaodong, LYU Yukai, ZHAO Yixin, *et al.* Multi-parameters monitoring experiments for the instability coal samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 667-674.

- [10] 张修峰, 曲效成, 魏全德. 冲击地压多维度多参量监控预警平台开发与应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1): 69-78.  
ZHANG Xiufeng, QU Xiaocheng, WEI Quande. Development and application of multi dimension and multi parameter monitoring and early warning platform for rock burst[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 69-78.
- [11] 王永, 刘金海, 王颜亮, 等. 煤矿冲击地压多参量监测预警平台研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(4): 19-21.  
WANG Yong, LIU Jinhai, WANG Yanliang, *et al.* Research on multi parameter monitoring and early warning platform for coal mine rock burst[J]. Coal Engineering, 2018, 50(4): 19-21.
- [12] 潘俊锋, 蓝航, 毛德兵, 等. 冲击地压危险源层次化辨识理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2843-2849.  
PAN Junfeng, LAN Hang, MAO Debing, *et al.* Study on hierarchical recognition theory of hazard source in coal bump[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2844-2849.
- [13] 张拴才, 韩泽鹏, 陈润合, 等. 冲击地压实时监测预警 GIS 云平台[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 243-247.  
ZHANG Shuancui, HAN Zepeng, CHEN Runhe, *et al.* Real time monitoring and early warning GIS cloud platform for rock burst[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 243-247.
- [14] 夏永学. 冲击地压动-静态评估方法及综合预警模型研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
- [15] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1557-1566.  
YUAN Liang. Research progress on risk identification, monitoring and early warning technology of typical power disasters in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557-1566.
- [16] 蒋国华. 煤矿动力灾害本源预警方法关键技术与展望[J]. 内蒙古煤炭经济, 2020(4): 132-133.  
JIANG Guohua. Key technology and prospect of coal mine power disaster source early warning method[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2020(4): 132-133.
- [17] 王渊, 杨志全, 周宗红, 等. 冲击地压综合监测预警平台在常村煤矿的应用[J]. 软件, 2019, 40(2): 133-137.  
WANG Yuan, YANG Zhiqian, ZHOU Zonghong, *et al.* Application of comprehensive monitoring and early warning platform of rock burst in Changcun coal mine[J]. Software, 2019, 40(2): 133-137.
- [18] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术“十三五”研究进展[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(1): 1-8.  
YUAN Liang. Risk identification, monitoring and early warning of typical coal mine dynamic disasters during the 13th Five-Year Plan period[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(1): 1-8.
- [19] 潘俊锋. 煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 173-182.  
PAN Junfeng. Research on rock burst starting theory and complete set of technical system in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 173-182.
- [20] 潘俊锋, 秦子晗, 王书文, 等. 冲击危险性分源权重综合评价方法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2327-2335.  
PAN Junfeng, QIN Zihan, WANG Shuwen, *et al.* Comprehensive evaluation method of impact risk source weight[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2327-2335.