

采矿与井巷工程

基于云计算的煤矿冲击地压监控预警技术研究

姜福兴¹, 曲效成^{2,3}, 王颜亮^{2,3}, 魏全德^{1,2,3}, 刘 军⁴, 赵庆民⁵, 刘维信⁶

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 北京安科兴业科技股份有限公司, 北京 100083; 3. 北京安科兴业矿山安全技术研究院有限公司, 北京 102299; 4. 义马煤业集团股份有限公司, 河南 义马 472300; 5. 山东能源淄博矿业集团有限责任公司, 山东 淄博 255120; 6. 山东东山王楼煤矿有限公司, 山东 济宁 272072)

摘要:为研究冲击地压各监测参量之间的相互关系,提高冲击地压监测预警的准确性,通过对冲击地压发生机理、各监测手段的监测原理进行分析,运用大数据分析方法和云平台技术,开发了一种多参量联合监测的冲击地压监控预警平台。研究表明:该平台提高了各监测参量的兼容性和同步性,实现监测数据深度挖掘和远程分析;平台可对矿井进行分区分级预警,对回采工作面、掘进工作面、无明显采动扰动区域采用不同的监测方法和预警指标,提高预警的针对性和准确性;预警算法中各指标、各参量所占比重,均可根据冲击地压类型、影响因素、监测指标活跃程度等调整,提高预警算法对采掘和地质复杂环境的适应性,经 10 余个矿井现场应用表明,该系统能有效提高监测数据对安全生产的指导作用。

关键词:冲击地压;多参量;监控预警平台;大数据分析;云平台

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2018)01-0199-08

Study on monitoring & control and early warning technology of mine pressure bump based on cloud computing

JIANG Fuxing¹, QU Xiaocheng^{2,3}, WANG Yanliang^{2,3}, WEI Quande^{1,2,3}, LIU Jun⁴, ZHAO Qingmin⁵, LIU Weixin⁶

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Anke Xingye Science and Technology Company Limited, Beijing 100083, China; 3. Beijing Anke Xingye Research Institute Company Limited of Mine Safety Technology, Beijing 102299, China; 4. Yima Coal Industry Group Corporation Limited, Yima 472300, China; 5. Shandong Energy Zibo Mining Group Corporation Limited, Zibo 255120, China; 6. Shandong Dongshan Wanglou Coal Mining Corporation Limited, Jining 272072, China)

Abstract: In order to study an interrelation between the each monitored and measured parameter of mine pressure bump and to improve the accuracy of mine pressure bump monitoring, measuring and early warning, with the analysis conducted on the mine pressure bump occurred mechanism and the monitoring and measuring principle of each monitoring and measuring means, the big data analysis method and the cloud platform technology were applied and a mine pressure bump monitoring, measuring and early warning platform with the multi-parameters combined monitoring and measure was developed. The study results showed that the platform could improve the compatibility and synchronism of each monitoring and measured parameter and could realize the deep digging and remote analysis on the monitoring and measured data. The platform could make the block and grading early warning of the mine. The different monitoring and measuring method and the early warning index were applied to the coal mining face, mine roadway heading face and no obvious mining disturbance area in order to improve the pertinence and accuracy of the early warning. Each index and the specific gravity taken by each parameter in the early warning algorithm could be adjusted according to the mine pressure bump type, influence factor, monitoring and measuring index activity degree and others. The early warning algorithm could be improved to the adaptability of the mining and geological complicated environment. The site applications in over 10 mines showed that the system could effectively improve the effect of the monitoring and measured data to the mine safety production.

Key words: mine pressure bump; multi-parameters; monitoring, control and early warning platform; big data analysis; cloud platform

收稿日期:2017-12-08;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.01.028

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801408);国家自然科学基金资助项目(51674014);国家自然科学基金重点资助项目(51634001)

作者简介:姜福兴(1962—),男,江苏常州人,教授,博士生导师,博士。E-mail:jiangfuxing1@163.com

引用格式:姜福兴,曲效成,王颜亮,等.基于云计算的煤矿冲击地压监控预警技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(1):199-206,244.

JIANG Fuxing, QU Xiaocheng, WANG Yanliang, et al. Study on monitoring & control and early warning technology of mine pressure bump based on cloud computing[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 199-206, 244.

0 引言

煤矿冲击危险性实时监测预警是冲击地压治理体系中的重要环节^[1]。由于发生冲击地压的原因很多,只有针对性地进行监测和预警,才能取得理想的效果^[2]。经过近十多年的研究和实践,我国煤矿已经逐步形成了以“应力场-震动场”信息为核心的冲击危险性实时监测预警体系^[3],以及以钻屑法^[4-5]、电磁辐射法^[6-7]等信息为基础的检验技术,基本保障了冲击地压矿井的防冲需求。

然而,由于我国煤矿冲击地压类型复杂,防冲技术水平发展不均衡^[8-10],冲击危险性监测预警技术从手工测量、单参量监测等方式到多参量实时监测方式同时存在^[11-12]。许多冲击地压矿井的监测存在共同问题:安装了很多监测系统,获得了海量的数据,但是预警的准确性仍无法满足现场需要,而煤矿企业缺乏专业数据分析人员,导致监测系统不能发挥应有的作用^[13-14]。针对我国冲击地压的监测预警现状,经理论研究、硬件开发与软件开发,形成了冲击地压多参量联合监测预警系统,即冲击地压监控预警平台系统。该平台系统已在我国山东、河南、陕西、内蒙古等10余个冲击地压矿井应用。笔者主要介绍平台系统多参量联合监测预警方法及现场应用情况。

1 冲击地压监测预警技术发展

1.1 冲击地压监测技术发展情况

经过近10多年的研究和发展,冲击地压监测预警的理论逐步由传统的“据微震预报何时发生冲击”的理念转化成“据应力场和震动场预警冲击危险区和危险程度”的实用方法上来,我国煤矿按照这一理念,冲击地压矿井基本都安装了微震监测系统和应力动态在线监测系统^[15-16],实现了“区域监控-局部监测预警-现场检测”三层次的监测预警体系,基本实现了冲击地压矿井在时间和空间上的无缝监测^[17]。

“根据应力场和震动场预警冲击危险区和危险程度”的基本理念是监测和预警“低应力和低扰动”,并检验高应力区域内的煤岩体是否处于“低密度”状态,这是保障防冲安全的“三低”预警原则。

“低应力”监测预警的理论基础是基于当量钻屑法预警冲击危险性原则^[18]:受冲击威胁的区域在发生冲击地压之前,采动应力将逐步增加。通过研究煤岩冲击倾向性和物理力学性质,可以确定其可

能发生冲击的临界应力值,实现应力超标预警。实际应用中,通过在线监测采动应力场的变化,并设置冲击危险程度的预警值,实现冲击地压局部危险区和危险程度的实时监测预警和预报。“低应力”预警的工程涵义是:应力低于临界值就不会发生冲击。

“低扰动”监测预警的理论基础是基于采掘活动破坏了围岩的应力平衡,导致围岩破裂和应力转移,严重时诱发冲击原则”。因此,通过监测区域性围岩震动及其发展趋势,可以预测采掘活动的影响范围和发展趋势。保持较低的扰动水平,将有利于减轻冲击危险性。可见,震动与冲击危险性相关,但是否引起冲击,还要取决于围岩的冲击倾向性和应力水平。

因此,将应力场和震动场联合监测,并保持在“低应力”和“低扰动”状态,是当前我国煤矿冲击危险性实时预警的主要理论和技术依据。

“低应力”和“低扰动”状态下是否具有冲击危险性的检验方法主要是钻屑法或电磁辐射法^[19-20]。

“低密度”是通过排粉,在围岩中形成空间,当发生冲击或大变形时,能够将冲击能量和冲出体吸收在围岩中,从而保护巷道和采场免受冲击^[21]。

1.2 冲击地压联合监测急需解决的问题

煤矿安全规程规定:必须建立区域与局部相结合的冲击地压危险性监测制度。大多数冲击地压矿井已装备了煤层应力、微地震、锚杆锚索支护力、支架阻力、地音等实时在线监测预警系统,但冲击地压发生机理复杂,准确预警的难度较大,实际应用过程中大部分矿井仍停留在“应力阈值”和“震动阈值”的简单预警水平。根据笔者所在研究团队对国内数10座矿井冲击地压治理的体会,在冲击地压监测方面仍然存在如下3个问题。

1) 监测数据未得到充分挖掘和有效利用。例如煤层应力监测系统多采用划定临界预警应力值的简单方法进行实时预警,忽略了其增幅、增速等有效指标;微震系统只是简单用于发生震动后确定位置和能量大小,几乎没有和提前预警挂钩;监测系统多用作采掘时的监测预警,历史数据的规律性研究、归档等大数据分析工作开展较少。

2) 多系统实时联合监测效果差。各监测系统监测参量单一且独立,矿井虽然装备了多种监测系统,但各系统监控室不在一起,监测结果很难进行有效的联合分析。例如:水文资料在地测科、矿压资料在技术科、冲击地压监测在防冲科、瓦斯监测在通防

科,实际上动力灾害是相互影响的,这些参数都可能是很好地冲击地压前兆信息,需要把它们集成到一个监控平台上一起进行联合分析,提高预警的准确性。

3)数据分析效率低,导致冲击地压监管效率低。冲击地压监测数据涵盖了煤层应力、微震、地音、钻屑量、锚杆锚索支护力等多种类型,冲击地压监测已进入数据结构复杂、数据量巨大的大数据时代。矿井使用的多参量监测数据大多为人工定时分析,监测数据实时共享性差,联合分析的时效性差,这是目前影响冲击地压多参量联合监测水平提升的主要问题,急需通过冲击危险性预警理论的研究及云计算的应用,研制相应的预警软件,实现“以计算机智能预警为主、人工预警为辅”的冲击危险性预警模式。

1.3 解决问题的思路

1)将多参数监测系统集成到一个监控平台上,实现联合监测。

2)根据动力灾害类型和区域,建立不同的危险性预警方法和预警指标,实现分区分类预警。

3)根据预警结果,指导井下采掘作业进度,决定卸压解危乃至撤人等安全技术措施。

4)根据井下采掘工作面不断变化的条件,研究和修正动力灾害预警方法和指标,最终实现高精度预测和高可靠性预警的目标。

2 分区分类多参量联合预警的实践

2.1 矿井分区监测原理

合理确定各类区域多参量监测预警方法及各子系统权重,是保证联合监测预警准确性的基础。冲击地压监控预警平台系统着眼于矿井整体监测监控,将重点监测区域划分为巷道掘进影响区域、工作面回采影响区域、无明显采动扰动影响区域。

1)巷道掘进影响区域:掘进工作面采掘空间相对较小,应力转移和变化量较小,但煤岩体原始应力状态破坏过程中产生的地音和微震现象活跃。由此,掘进工作面采用“震动监测为主,应力监测为辅,钻屑检验”的监测理念。

2)工作面回采影响区域:回采工作面由于顶板活动范围较大,区域内应力转移程度较高,应力监测尤为重要。因此,回采工作面监测预警以“应力监测为主,微震监测为辅,钻屑检验”为基本理念。

3)无明显采动扰动影响区域:无明显采动扰动

影响的区域多指开采末期的大巷、采区上下山等,其长期处于高应力作用下,围岩塑性变形与蠕变变形交替进行,经过一定时间的发展,导致巷道围岩应力与强度达到冲击条件,从而发生冲击地压。该类型冲击地压采取“应力监测和巷道围岩变形监测为主,震动监测为辅,钻屑检验”的监测理念。

2.2 多参量联合预警机制

矿井采动扰动引起应力环境失衡和转移的过程中,通常同时伴随着应力、震动、支护等多种可监测信号的变化。不同的应力转移过程导致可监测信号的强弱程度不同,单参量的监测手段难以准确地达到整体监控预警要求。冲击地压综合监测平台系统可实现多参量综合监测预警。系统在准确把握重点监测区整体危险等级的同时,实现监测区内局部危险位置和危险等级的划分,指导钻检和卸压解危技术等现场工作,为冲击地压矿井安全生产提供保障。

2.2.1 巷道掘进影响区域预警机制

将掘进工作面划分为2个监测区域:动态演化区和蠕变隐患区。其中,动态演化区为自掘进工作面至后方60 m左右的范围,蠕变隐患区为自掘进工作面后方60 m至后方260 m左右的范围,如图1所示。2个监测区域由于扰动程度不同,监测的重点也不同:动态演化区处于巷道开挖初期应力调整和重新分布阶段,煤岩体破裂及应力重新分布过程中产生的地音信号和媒体应力信号较其他监测信号变化更为显著;蠕变隐患区围岩应力与支护结构逐渐趋于相对稳定状态,巷道在高应力环境作用下仍会发生蠕变,媒体应力信号和锚杆锚索监测信号较其他监测信号变化更为显著。

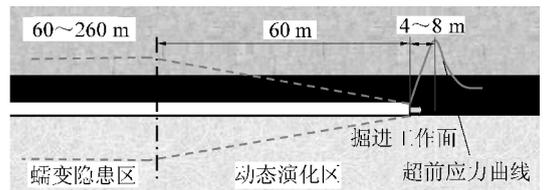


图1 掘进巷道分区监测

Fig1 Zoning monitoring of excavation roadway

将所获取的媒体应力监测预警指标、地音和微震监测预警指标、锚杆锚索应力监测预警指标分别赋予一定的权重(K_1 、 K_2 、 K_3)并累加,得到动态演化区的综合预警指标和蠕变隐患区的综合预警指标。根据不同区域内冲击机理的不同,采用不同权重,发挥了各监测系统的优势,提高预警结果的准确性,预警机制如图2所示,监测效果如图3所示。

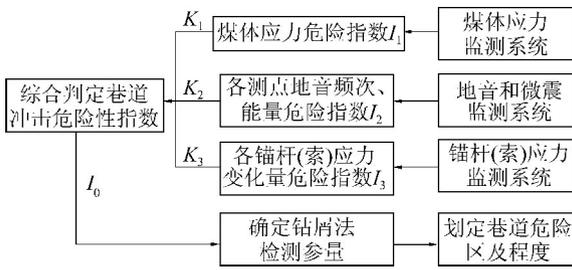


图2 掘进巷道预警机制

Fig. 2 Early-warning mechanism of excavation roadway

2.2.2 回采工作面无明显采动扰动区预警机制
区域最终预警指数 I_p 取决于单系统指标和综合

指标,取两者较大值,即单系统危险表征和多系统危险表征均有可能触发系统预警。

其中,单系统危险性指标计算过程中,权重(如 $K_{Y1} \sim K_{Y3}$ 、 $K_{W1} \sim K_{W4}$)为可调整参数;综合指标计算过程中,各监测系统权重 $K_1 \sim K_n$ 值,也可根据区域内的冲击地压影响因素、监测指标活跃程度等分析确定,提高预警算法对复杂环境的适应性。对于回采工作面影响区、无明显采动扰动影响区两类型区域,系统采用了相同的预警机制,但在权重参数选择上有所区分,系统监测预警原理如图4所示,无明显采动扰动影响区监测效果如图5所示。

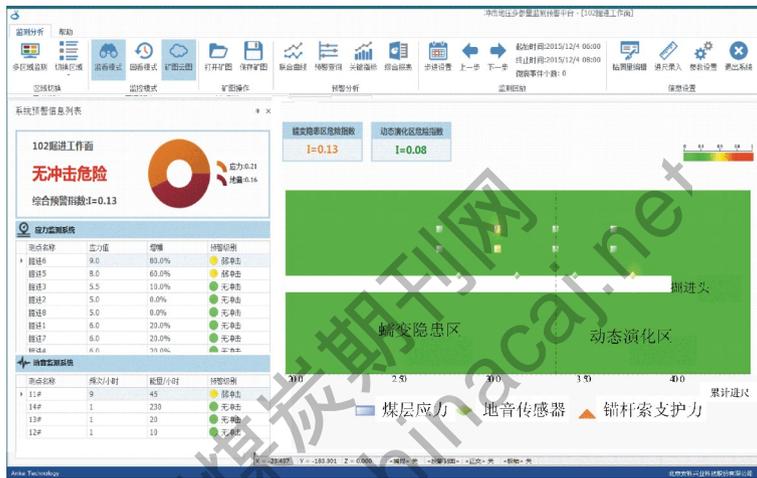


图3 巷道掘进监测效果

Fig. 3 Monitoring effect of roadway excavation

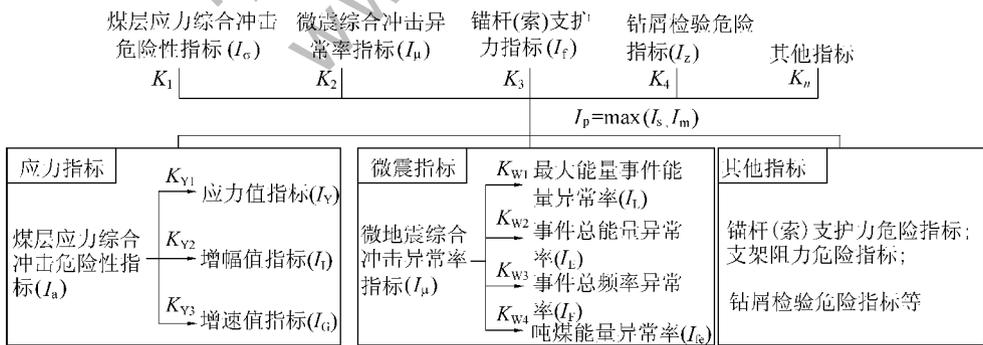


图4 回采工作面、无明显采动扰动区预警机制

Fig. 4 Early-warning mechanism of stope face and inconspicuous excavation disturbance zone

3 煤矿冲击地压监控预警平台系统开发

开发一种能够兼容已有冲击地压监测装备,并实现其联合监测预警的监控平台系统,是提高冲击地压监测预警准确性的必由之路。研究团队基于冲

击地压多参量联合监测预警方法、大数据分析方法和云平台技术,开发了冲击地压监控预警平台系统(简称监控平台系统,或系统)。

系统实现了多种类监测数据自动接入与存储、联合分析、实时预警。采用了“云平台技术”,实现

了原始数据与分析结果的云实时同步存储,实践了“矿井—集团—远程数据分析团队和政府监管部门”多级监控、管理与协作体系建设,为矿山“大数据”监测预警奠定了基础,系统主要功能如下:

钻屑量等)监测系统数据的自动采集、存储,采集软件如图6所示。

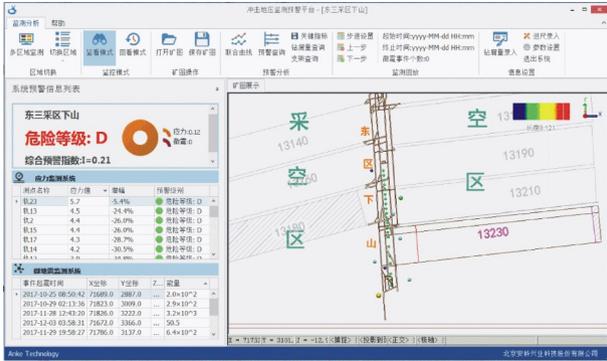


图5 无明显采动扰动影响区监测效果

Fig. 5 Monitoring effect of inconspicuous mining disturbance affected zone

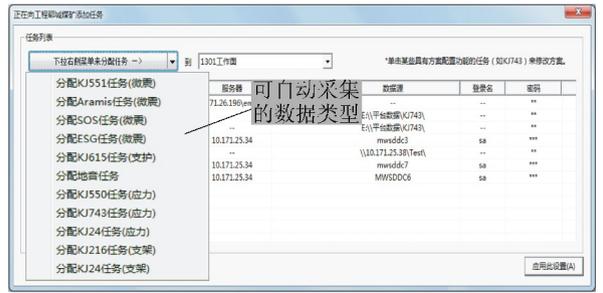


图6 数据采集软件

Fig. 6 DAQ assistant software

1) 数据集成同步性与兼容性:实现了多种类型(包括煤层应力、微震、锚杆索支护力、支架阻力、

2) 分区监测与实时多参量智能预警:矿井按照冲击地压采掘影响等因素的不同,可划分重点监测区,区域内实现多参量实时监测与智能预警。

3) 监测数据深层挖掘与分析:系统具有多参量联合曲线查询、预警趋势发展曲线查询、一键报表等联合分析功能,增强监测数据处理综合化、精细化与自动化,软件界面如图7所示。

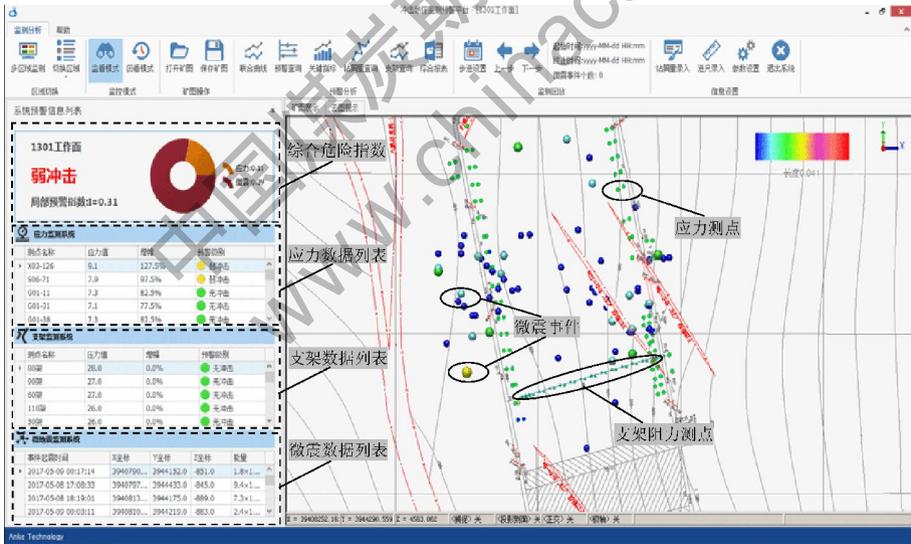


图7 多参量预警结果及综合展示软件

Fig. 7 Multi-parameter early-warning result and comprehensive display software

4) 基于云处理技术的数据存储与远程传输:云计算为冲击地压监测大数据的存储、快速处理和分析挖掘提供技术保障,支撑平台的快速稳定运行。平台在各矿井海量历史数据信息中进行数据清洗、过滤和建模,自动挖掘有效信息。根据计算结果,实时反馈调整预警权重系数,反演计算区域超前预警信息,提高监测预警准确率,数据处理流程如图8所示。

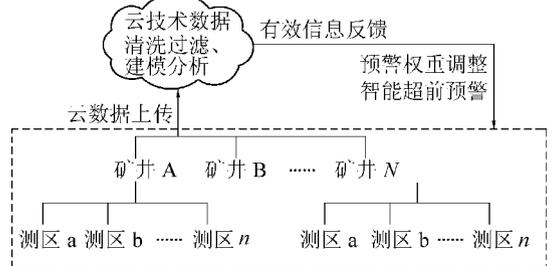


图8 云数据处理线路

Fig. 8 Circuit diagram of cloud data processing

基于云技术,监控平台系统实现了监测数据处理与传输的信息化。应用数据云存储技术实现冲击地压监测数据的远程 web 访问、手机端访问等功能,提高了冲击地压监管效率,如图 9 所示。



图 9 手机 App 及短信报警功能

Fig. 9 Mobile App and message for warning function

4 冲击地压监控预警平台系统现场实践

4.1 多参量联合监测预警案例

唐口煤矿 6307 工作面 2017 年 6 月 27 日晚发生一次动压显现事件。经微震监测系统定位,震源能量为 1.7×10^3 J,震源位置与 6307 轨道巷平面距离仅有 8 m,事件发生时附近巷道有煤炮、扬尘、巷道变形等动力显现情况,微震事件位置等信息如图 10 所示。

监控平台的预警结果如图 11 所示,通过事件发生前后“应力—微震”联合曲线的查询(图 12),事件发生前,其周围的应力测点数据几乎无变化,发生后工作面外侧的 F19 测点应力有增高趋势,而靠近工作面的 F20 测点则出现应力下降。由此可见,大能量微震事件造成了应力场重新分布,其集中位置由 F20 应力测点向外侧的 F19 应力测点转移。

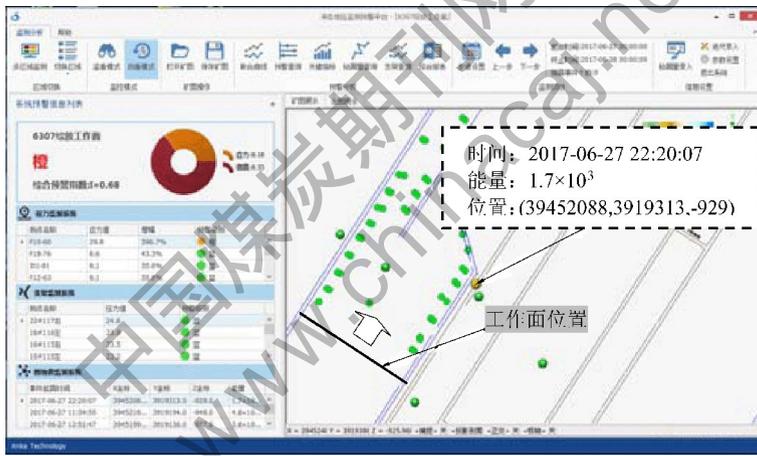
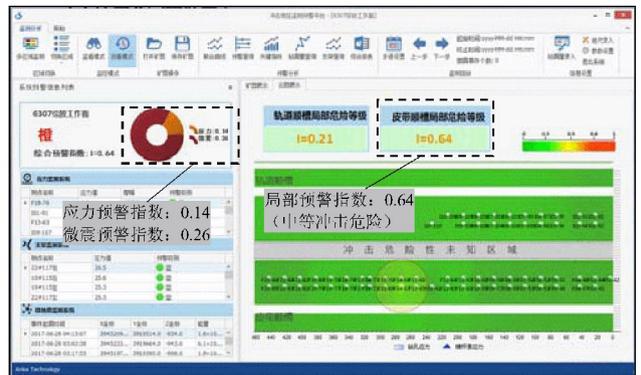


图 10 显现时刻对应微震定位结果

Fig. 10 Corresponding microseism location when event happening



(a) 事故发生前预警状态



(b) 事故发生后预警状态

图 11 事故发生前后危险等级云图变化

Fig. 11 Hazard-level variety before and after event

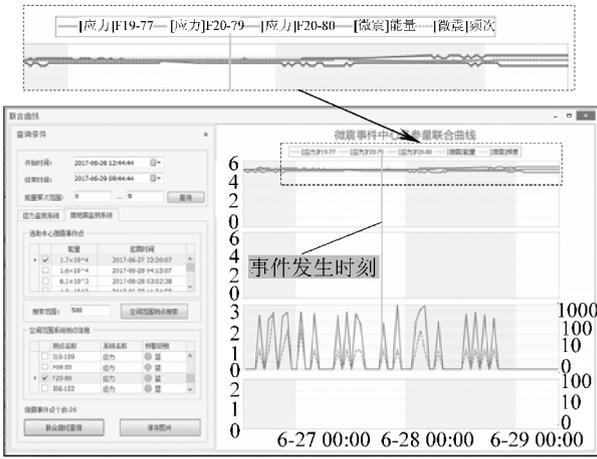


图 12 事件发生前后联合曲线查询结果

Fig. 12 Search results of joint curves before and after events

据此建议:持续关注 F19 组测点应力变化情况,必要时安排在钻孔附近进行钻检,若出现钻屑量超标的情况及时安排解危工作。

综合上述,以监控预警平台为基础,分析得到了唐口煤业 6307 工作面一次动压显现事件的发生过程、监测数据在事故前后的变化规律等,在矿井监测

数据的综合预警、分析等方面发挥着积极的作用。

4.2 基于监测平台的多参量综合分析案例

监控平台系统设计了“多参量指标查询”功能,可对监测区内近期的危险趋势走向曲线进行查询。

如图 12 所示,为山东王楼煤矿 12307 工作面 2016 年 7 月中旬至 8 月初的危险趋势走向曲线。通过该曲线可直观了解近期此监测区的危险等级发展趋势,指导调整工作面合理进尺。

由联合曲线可直观反映出:①危险指数变化随进尺起伏而有相似规律的变化;②工作面日进尺控制在 1.5~3.5 m 时,工作面综合危险指数小于 0.3(弱冲击危险以下);③工作面日进尺增大到 5.1 m 时,微震预警等级明显增加,工作面综合危险指数达到 0.3(弱冲击危险)以上。

由以上分析,为保证工作面安全生产提出以下 2 点建议:①尽量保持工作面匀速推进;②工作面日进尺尽量控制在 5 m 以内。系统已在多个矿井现场实践,在各矿冲击地压监测预警工作中发挥了积极作用。

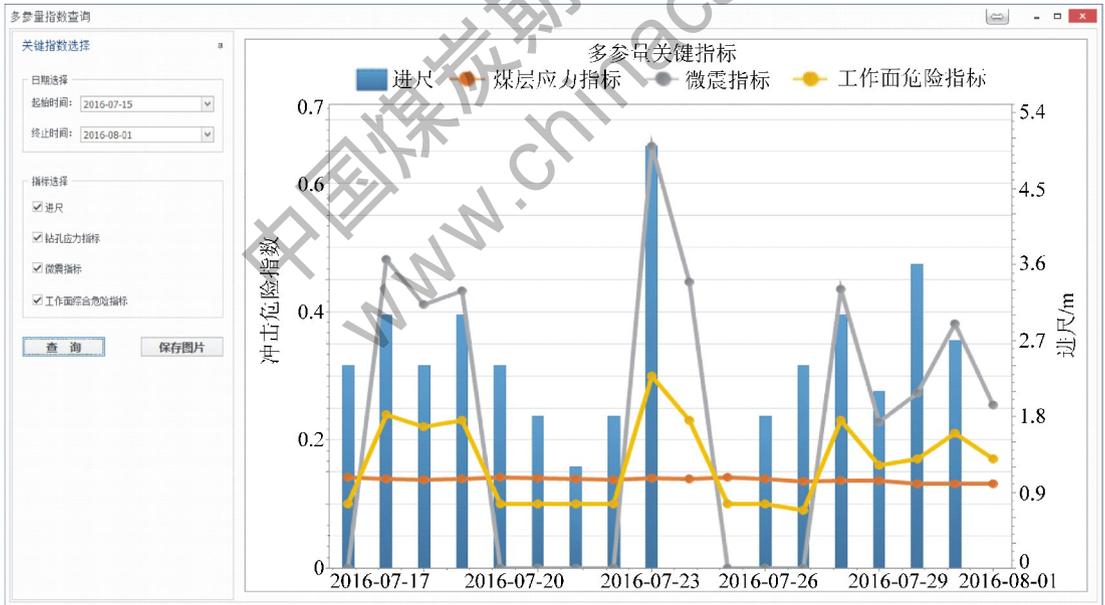


图 13 多参量指标曲线查询

Fig. 13 Search for multi-parameter index curves

5 结 论

通过对冲击地压监测理论、技术现状分析,总结了当前冲击地压监测存在的主要问题。提出了一种冲击地压分区多参量联合监测的新方法,并基于这种监测方法、大数据分析方法和云平台技术,开发了

平台系统,改进了以往冲击地压联合监测实时性差、预警参数权重指标划分差异性大等突出问题,提高了冲击地压的监测预警水平。

1)提出了矿井冲击地压分区联合监测理念,将矿井重点监测区划分为 3 种类型:工作面回采影响区域、巷道掘进影响区域和无明显采动扰动影响区

域。根据区域类型特点,区域内采用不同的预警算法体系,提高了监测预警准确率。

2)研究了一种多参量监测预警方法:预警算法中各指标、各参量所占比例,均可根据冲击地压类型、影响因素、监测指标活跃程度等调整,提高预警算法对采掘和地质复杂环境的适应性。

3)开发了冲击地压监控预警平台系统,经现场实践,提高了现场冲击地压监测预警的时效性和准确性,为应用矿井节省了监测人员的人力成本。

4)应用了冲击地压监控预警平台系统的矿井,虽然其监测预警准确性有所提高,但是,考虑冲击地压的复杂性,平台系统的核心算法和关键指标,仍需要在今后实践中不断探索与改进。

参考文献 (References):

- [1] 姜福兴,魏全德,姚顺利,等.冲击地压防治关键理论与技术分析[J].煤炭科学技术,2013,41(6):6-9.
JIANG Fuxing, WEI Quande, YAO Shunli, *et al.* Key theory and technical analysis on mine pressure bumping prevention and control [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 6-9.
- [2] 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.
- [3] 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 & Safety Engineering, 2015, 32(4): 530-536.
- [4] 潘一山,徐连满.钻屑温度法预测冲击地压的试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(12):2228-2232.
PAN Yishan, XU Lianman. Experimental investigation on temperature of drilling cuttings to predict rock burst [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2228-2232.
- [5] 何学秋.含瓦斯煤岩流变动力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1995.
- [6] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等.受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1473-1477.
WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, *et al.* Study on electromagnetic emission characteristics of loaded rock and its applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1473-1477.
- [7] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.

- HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, *et al.* Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [8] 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.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [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.
- [10] 姜福兴,姚顺利,魏全德,等.矿震诱发型冲击地压临场预警机制及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3372-3380.
JIANG Fuxing, YAO Shunli, WEI Quande, *et al.* Study of site forearm mechanism of rock burst induced by shock bump its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3372-3380.
- [11] 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.
- [12] 潘俊锋,毛德兵,蓝航,等.我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2013,41(6):21-25,41.
PAN Junfeng, MAO Debing LAN Hang, *et al.* Study status and prospects of mine pressure bumping control technology in china [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 21-25, 41.
- [13] 鞠文君,潘俊锋.我国煤矿冲击地压监测预警技术的现状与展望[J].煤矿开采,2012,17(6):1-5.
JU Wenjun, PAN Junfeng. Status and prospect of rock-burst monitoring and alarm technology in Chinese coal mine [J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(6): 1-5.
- [14] 窦林名,李振雷,张敏.煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):41-46.
DOULinming, LI Zhenlei, ZHANG Min, *et al.* Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 41-46.
- [15] 潘俊锋,宁宇,毛德兵,等.煤矿开采冲击地压启动理论[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):586-596.
PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, *et al.* Theory of rock burst start-up during coal mining [J]. Chinese Journal of Rock 2012, 31(3): 586-596.
- [16] 李楠,王恩元,葛兆晨.微震监测技术及其在煤矿的应用现状及展望[J].煤炭学报,2017,42(S1):83-96.
LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Micro-seismic monitoring technique and its applications at coal mines present status and future prospects [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 83-96.
- [17] 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与应用[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.

(下转第244页)

- plant of coal dust prevention and control [J]. *Coal Mine Machinery*, 2013, 34(7): 202-204.
- [12] 程经权, 孙景杨. 露天贮煤场煤尘污染与防治研究[J]. *煤矿环境保护*, 1992(1): 23-28.
CHENG Jingquan, SUN Jingyang. Research on pollution and control of coal dust in open storage coal fields[J]. *Environmental Protection of Coal Mine*, 1992(1): 23-28.
- [13] 王传兴, 惠中良. 选煤厂煤尘及其防治[J]. *环境科学与技术*, 2010, 14(5): 83-89.
WANG Chuanxing HUI Zhongliang. Coal dust and its prevention and control in coal preparation plant[J]. *Coal Preparation Technology*, 2010, 14(5): 83-89.
- [14] 周双云, 蒋晶, 高龙燕, 等. 不同浓度 CaCl_2 对盐胁迫下巴西蕉幼苗生理的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(3): 449-454.
ZHOU Shuangyun, JIANG Jing, GAO Longyan, *et al.* Effects of CaCl_2 concentration on physiology of Brazil banana seedling under NaCl stress [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(3): 449-454.
- [15] 张艳允, 李玉银. 喷洒 CaCl_2 溶液对烧结矿冶金性能影响的实验研究[J]. *钢铁研究*, 2011, 39(1): 1-3.
ZHANG Yanyun, LI Yuyin. Effect of spraying CaCl_2 solution on sinter metallurgical properties [J]. *Research on Iron and Steel*, 2011, 39(1): 1-3.
- [16] 孙家良, 杨建坤, 周立新. 矿用降尘剂及配套自动添加泵的研制与应用[J]. *煤炭科技*, 2015(2): 80-81.
SUN Jialiang, YANG Jiankun, ZHOU Lixin. Research and application of mine dust suppressant and its supporting[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2015(2): 80-81.
- [17] 黄本斌, 王德明, 时国庆, 等. 泡沫除尘机理的理论研究[J]. *工业安全与环保*, 2008(5): 13-15.
HUANG Benbin, WANG Deming, SHI Guoqing, *et al.* Research status and development trend for foam dust control technique in underground coal mines [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2008(5): 13-15.
- [18] 冀盛全, 刘超. 基于 S7-1200 的胶带防冻粘喷洒控制系统的设计[J]. *露天采矿技术*, 2013(9): 78-80.
JI Shengquan, LIU Chao. Design of belt anti-freezing adhesive spraying control system based on S7-1200 [J]. *Opencast Mining Technology*, 2013(9): 78-80.
- [19] 葛少成, 樊海涛, 张忠温, 等. 输煤皮带机尾粉尘污染及气动射雾除尘[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2015, 34(4): 459-463.
GE Shaocheng, FAN Wentao, ZHANG Zhongwen, *et al.* Dust pollution and air-driving shooting-fog dust control of coal conveyer belt tailpiece [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2015, 34(4): 459-463.
- [20] 高建川. 屯兰选煤厂煤尘治理研究与实践[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(8): 199-202.
GAO Jianchuan. Study and practices on coal dust control in Tunlan Coal Preparation Plant [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(8): 199-202.
- [20] 窦林名, 何学秋, 王恩元. 冲击矿压预测的电磁辐射技术及应用[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(4): 396-399.
DOU Linming, HE Xueqiu, WANG Enyuan. Electro-magnetic mission technique of monitoring rock burst and its application [J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(4): 396-399.
- [21] 朱斯陶, 姜福兴, 史先锋, 等. 防冲钻孔参数确定的能量耗散指数法[J]. *岩土力学*, 2015, 36(8): 2270-2276.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, SHI Xianfeng, *et al.* Energy dissipation index method for determining rock burst prevention drilling parameters [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2270-2276.
- (上接第 206 页)
2014, 39(2): 353-363.
- [18] 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 technology based on equivalent drilling research and its applications [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(11): 2346-2351.
- [19] 潘一山. 钻屑法预测指标的理论研究[J]. *阜新矿业学院学报*, 1985(S1): 25-28.
PAN Yishan. Theoretical study on forecast indexes of method of drilling bits [J]. *Journal of Fuxin Mining Institute*, 1985(S1): 25-28.