

文章编号:1671-251X(2019)08-0025-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17464

煤与瓦斯突出预警技术研究现状及发展趋势

宁小亮^{1,2}

(1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037;
2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)



扫码移动阅读

摘要:从煤与瓦斯突出灾害预警理论、预警信息采集途径、预警指标与模型、预警软件系统4个方面对煤与瓦斯突出预警技术的研究成果进行了综合梳理和详细分析,指出了现有煤与瓦斯突出预警技术存在的问题:部分预警信息获取的时效性和可靠性有待进一步提高,预警模型未实现信息有效深度挖掘等;提出了煤与瓦斯突出预警技术的发展趋势:高自动化水平、高精度的突出预警信息监测采集技术及装备研发,基于大数据的突出预警指标与模型研究,基于云技术的突出预警软件系统开发。

关键词:煤与瓦斯突出;煤与瓦斯突出预警;预警理论;预警信息采集;预警指标;预警模型;预警软件系统

中图分类号:TD713 文献标志码:A

Research status of early warning technology of coal and gas outburst and its development trend

NING Xiaoliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China; 2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: Research achievements of early warning technology of coal and gas outburst were summarized and analyzed in detail from four aspects: early warning theory of coal and gas outburst, acquisition means of early warning information, early warning index and model and early warning software system. The main problems of existing early warning technology of coal and gas outburst were pointed out, for example, timeliness and reliability of part early warning information acquisition needed to be further improved, early models could not realize effective and deep data mining, etc. Development trend of early warning technology of coal and gas outburst was put forward, including development of early warning information monitoring and acquisition technology and equipment with high automation level and precision, research of early warning index and model based on big data, and development of early warning software system based on cloud technology.

Key words: coal and gas outburst; early warning of coal and gas outburst; early warning theory; early warning information acquisition; early warning index; early warning model; early warning software system

0 引言

煤与瓦斯突出(以下简称“突出”)是发生在煤矿井下采掘过程中一种极其复杂的瓦斯动力现象,会

破坏井下设施、设备和通风系统,影响正常生产秩序,并可造成人员被煤岩掩埋、因瓦斯窒息,甚至引发瓦斯燃烧或爆炸事故,造成大量人员伤亡,是煤矿井下最严重的自然灾害之一。随着采深和开采强度

收稿日期:2019-06-17;修回日期:2019-07-15;责任编辑:李明。
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808305)。
作者简介:宁小亮(1984—),男,江西南城人,副研究员,硕士,主要从事瓦斯灾害预测预警技术及装备研发工作,E-mail:nxl@foxmail.com。
引用格式:宁小亮.煤与瓦斯突出预警技术研究现状及发展趋势[J].工矿自动化,2019,45(8):25-31.
NING Xiaoliang. Research status of early warning technology of coal and gas outburst and its development trend[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(8): 25-31.

的增大,突出灾害日益严重^[1-3]。预知采掘工作面的突出危险性、及时掌握防突工作中各种隐患是有效防突的前提。目前突出日常预测大量使用钻屑量 S 、钻孔瓦斯涌出初速度 q 、瓦斯解吸指标 K_1 或 Δh_2 、瓦斯放散指数 ΔP 、煤体普氏系数 f 、瓦斯压力 p 等钻孔静态预测方法,是突出灾害防治的重要手段,为遏制灾害发生发挥了重要作用。但是上述方法在预测过程中要施工一定的钻孔,占用一定工作时间,且由于时空不连续、指标较为单一且融合性不高,在突出危险性预测方面存在一定的局限性。突出预警技术正是在上述方法基础上发展而来。

突出预警技术是以事故致因、突出防治、计算机科学等基础理论为指导,利用矿井安全监控系统、矿井计算机网络、矿井安全管理机构及人员体系,并以预警软件系统为载体,集突出灾害信息监测与采集、危险性分析与评价、预警结果发布与响应为一体的综合技术体系。目前突出预警技术及相关系统与装备在煤矿现场已得到一定应用,有效促进了对突出隐患监测、分析和管理水平的提升,对突出事故的防范起到了积极作用。笔者通过对近年来中国突出预警技术相关资料的搜集与整理,对目前突出灾害预警理论、预警信息采集途径、预警指标及模型、预警软件系统等方面取得的成果进行了综合梳理,并提出了突出预警技术的发展趋势。

1 突出灾害预警理论

预警理论是预警技术的基础,对整个预警技术与应用具有指导作用。文献[4-5]指出信息论、系统论、控制论、安全科学理论是灾害预警的理论基础,并给出了突出预警的定义;结合突出灾害特点,从预警范围、超前时间、采用的指标等角度,将突出预警分别划分为“宏观、中观和微观预警”、“长期、短期和紧急预警”、“单因素和综合预警”类型;在煤矿事故特点和致因分析基础上,提出了突出灾害预警的实质和要求,以及突出预警的逻辑结构、预警系统构成要素,并阐述了突出灾害预警的基本原理、实现途径、基本步骤及效果评价方法。文献[6]立足瓦斯灾害,从管理对象、目标体系和基本内容 3 个方面分析了瓦斯灾害预警系统组成,并提出了瓦斯灾害预警机制、预测机制、矫正机制和免疫机制,同时指出瓦斯灾害预警系统应该满足系统相对独立性、指标有效性、系统结构完整性、信息传递及时性和信息甄别有效性等要求。上述研究指出了突出灾害预警的理论基础,给出了突出灾害预警的科学定义和基本原理、分类、预警机制和要求、逻辑结构、实现途径与基本步骤等,基本形成了突出灾害预警的理论框架,为

预警指标和模型构建及预警软件系统的开发提供了理论指导。

2 突出预警信息采集途径

及时、可靠、完整的信息是预警的前提,如何对其进行有效、快速采集和获取,并存储至预警数据库是预警的第一个环节。从信息采集手段和途径的角度分类,与突出灾害相关的信息主要包括瓦斯含量(压力)信息、钻屑解吸指标信息、钻屑量指标信息、地质构造信息、人工观测信息等探测、预测、观测类非在线监测信息,以及瓦斯浓度、矿压、抽采、钻孔轨迹、声发射、微震、电磁辐射等井下在线监测信息。上述两类突出预警信息的采集途径主要有以下方式。

对于非在线监测信息,文献[5,7]通过人工收集整理相关信息,在地面利用相关软件系统进行录入,并借助办公环网传输至预警数据库。该方法实现了非在线监测信息的有效获取,但时效性不高,受人工干扰大。为此,针对钻屑解吸指标信息、钻屑量指标信息和人工观测信息,文献[8]通过在突出参数仪中增加 WiFi 无线通信模块,并利用防爆手机,实现了相关信息井下动态采集与上传。针对瓦斯含量信息,文献[9]介绍了一种瓦斯含量快速测定方法和装置,文献[10-11]在此基础上开发了瓦斯含量采集软件,实现了瓦斯含量信息动态获取。针对地质构造信息,文献[12-13]开发了从 CAD 格式的地质构造探测信息文件中直接读取相关数据到瓦斯预警数据库的方法,减少了人工在预警系统中绘制地质构造的环节。

对于在线监测信息中瓦斯浓度和抽采信息的获取,文献[14-22]主要通过开发的数据采集器直接从矿井安全监控系统和抽采系统中实时读取数据并存入预警数据库。对于矿压信息的获取主要有 2 种方式,一种是从矿压监测系统数据库中直接实时读取,另一种是从存储介质中动态获取^[23-25]。对于声发射、微震和电磁辐射信息的获取主要是通过布置监测传感器,通过分站采集相关信息,利用井下环网将信息实时传输至地面^[26-47]。

上述突出预警信息采集途径研究成果为突出预警的实现提供了支撑,但部分数据获取的时效性及可靠性仍有待进一步提升,许多数据的噪声大,未得到有效过滤,给预警分析带来了困难,甚至会导致错误的预警结果。

3 突出预警指标及模型

突出预警指标是对突出灾害预警要素、危险源、

征兆及预警对象危险状态的刻画和描述;预警模型是根据预警指标进行警情分析和警度确定的方法、准则、规则和算法^[5]。预警指标和模型是进行预警分析的核心,科学的指标和模型是准确预警关键所在。

目前主要从瓦斯涌出、防突措施缺陷、瓦斯地质、微震、声发射、电磁辐射、与危险源的空间距离等角度研究单因素预警指标和模型,根据指标的多少,单因素预警又可分为单指标预警和多指标预警。文献[48]通过对大量矿井在不同突出危险区域及突出事故发生前后瓦斯涌出差异进行分析,基于瓦斯涌出数据,从瓦斯量、瓦斯解吸、瓦斯波动及瓦斯发展趋势4个方面建立了17个突出预警指标,并确定了相应预警准则。文献[49]提出了基于工作面瓦斯浓度监控数据的瓦斯涌出峰值、上升梯度、下降梯度和超限时间4个指标,并利用人工神经网络分析方法,实现延时突出预警。文献[50]在分析瓦斯涌出时间序列的基础上,建立了基于星空、线图及移动平均线的突出预警指标及模型。文献[51]以瓦斯监控数据为基础,采用K线原理建立了简单移动均线、指数移动均线、指数平滑异动移动均线、相对强弱指标、偏离率5个预警指标,并依此建立了突出危险K线诊断准则,实现了突出实时评估分析及预警。文献[52]在分析防突措施缺陷类型的基础上,从保护层开采、预抽煤层瓦斯、超前钻孔3个方面建立了10个基于措施缺陷分析的突出预警指标及相应预警准则和模型。文献[53]从瓦斯地质角度建立了包含地质构造特征、煤层参数、瓦斯参数的预警指标,运用极值确定原则,构建了突出风险判识预警模型。文献[54-55]在分析突出的微震前兆特征基础上,从能率和事件率等方面建立了预警指标,并以指标数值及其变化率来判识突出危险性。文献[36]在对现场进行大量考察基础上,应用事件数、能量和事件增加率等声发射指标进行突出危险性预测预警,与采用常规方法进行预测的结果一致性较好。文献[56]通过分析掘进工作面应力影响模式,将工作面与应力叠加带的距离作为预警指标,并设置了相应的预警规则。文献[57]从危险源安全距离控制角度出发,将工作面与瓦斯富集区、地质构造带、应力集中区、物探异常区的空间距离作为预警指标,并确定了基于采掘进度监测的突出预警准则。文献[41]在实验研究煤岩破坏电磁辐射规律的基础上,建立了电磁辐射强度、脉冲数等预警指标,该指标与常规突出危险指标有较好的相关性,并依此建立了相关预警准则。

在多因素综合预警指标和模型方面,主要是从

影响突出事故发生的多方面因素及反映突出灾害的多类征兆出发进行指标和模型构建。文献[58]从软分层厚度、煤厚变化系数、普氏系数、煤层埋深、断层与褶皱数量、顶钻、夹钻、喷孔百次出现次数、钻屑瓦斯解吸指标等方面建立了预警指标集,并采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定了各指标权重,以关联函数作为计算模型,建立了可拓预警模型。文献[59]以余吾煤矿为背景,建立了包括构造复杂程度系数、瓦斯体积分数均值、瓦斯压力等指标的预警指标体系及基于AHP和可拓理论的预警模型。文献[60]针对“三软”煤层,采用事故树分析方法确定了导致突出的各因素重要性排序,建立了预警指标体系,并利用AHP确定各预警指标的权系数,然后基于事故树分析中基本事件的临界重要度确定预警指标的权系数,将二者合成为综合权系数,构建了基于可拓理论和综合权系数的可拓综合预警模型。文献[61-62]从煤体、煤层、瓦斯、地质、作业、管理等方面构建了预警指标体系,采用模糊AHP确定权重,并以三区域套下不确定型初等关联函数构造方法和模糊AHP建立了预警模型。文献[63]建立了包括瓦斯涌出的方差、自相关系数、瓦斯含量、声发射及电磁辐射的突出实时预警指标体系,提出了费歇判别与模糊综合预测相结合的协同耦合预警模型与方法。文献[33]以义忠煤矿为背景,根据声发射、电磁辐射、瓦斯3种实时监测手段,提出了超限、趋势、波动3种预警指标,并利用模糊数学方法分别求出了其三级预警临界值。文献[64]从地压显现、瓦斯涌出、煤层变化3个方面构建了预警指标体系,并从突出危险性的历史因素、现实因素、实时因素考虑,建立了基于运用数量化理论的瓦斯突出综合预警模型。文献[65]针对瓦斯灾害在线辨识中的不确定性和不精确性问题,分别建立了基于Bayes Network和证据理论的煤矿瓦斯灾害特征级融合模型及算法,并建立了基于AHP-可拓理论、粗糙集理论、遗传算法的瓦斯灾害预警模型。文献[66]应用粗糙集理论,通过对采集的突出数据进行属性约简,实现了特征指标的优选,并在定义不同突出强度分级评价集划分基础上,建立了基于支持向量机的突出预警模型,可对突出类型、强度和煤量进行预测预警。文献[67]基于模式识别原理,采用特征提取和分类相结合的方法建立了突出判识模型。文献[68]从煤层赋存参数、瓦斯赋存、煤体结构、地质构造等方面建立突出危险性评价指标体系,并采用模糊综合评判方法建立了突出危险性评价模型,根据评价结果对工作面突出危险性进行预报预警。文献[7]通过对突出事故致因分析,从工作面客

观危险性(瓦斯地质、采掘生产、瓦斯涌出、日常预测)、防突措施重大缺陷(措施控制范围、措施空白带大小、超采超掘情况)、管理重大隐患(信息传输失误、违章作业、未绘制施工图)3 个方面建立了突出综合预警指标体系框架,并结合现场实际建立了一种在煤矿得到广泛应用的多指标逐级判别综合预警模型。

上述预警指标和模型从突出致因角度主要分为单因素和多因素综合预警,为准确预警提供了基础支撑,其区别主要体现在 2 个方面:一是指标反映的突出危险因素类型及数量不同,且反映同一因素的指标及其数量也有差异;二是运用了不同方法、准则、规则和算法,建立了不同的警情分析模型。多因素较单因素能更全面地反映突出危险性,但目前往往很多因素难以实现动态监测与获取,预警时效性不高;同时,现有预警模型尤其是综合模型尚未实现信息的有效深度挖掘,很多指标及融合算法的实用性还不高,模型相对固化,适应能力和泛化能力弱,普适性不高,有待现场进一步验证和完善。

4 突出预警软件系统

预警软件系统是预警技术的载体和展现方式。数据采集、传输与存储,指标和模型设置,预警分析计算及结果发布都需要通过软件来实现。目前预警软件系统较多,架构方式有基于 B/S 模式、C/S 模式,也有混合模式。但不管应用哪种设计模式,且不管采用单指标还是多指标预警,软件系统从功能设计上都基本类似,主要包括数据库、信息采集模块、分析预警模块、发布查询模块、预警响应模块等。目前能够达到实用化的预警软件系统并不多,大多系统实际应用较少,甚至仅处于研究测试阶段,难以满足煤矿现场复杂环境要求;系统复杂度上也有较大区别,部分系统仅基于少量数字或符号等结构化数据进行预警计算,而有些系统为适应现场应用要求,需要对海量地图数据甚至半结构及非结构化数据进行分析处理,并可实现二维甚至三维图形展现,数据采集、存储及计算量上均有较大差别。中煤科工集团重庆研究院有限公司研发的突出综合监控预警系统^[7,11]和中国矿业大学研究团队开发的声电瓦斯突出实时监测预警软件^[42]是突出预警软件系统的典型代表,尤其是前者在煤矿现场得到了广泛应用。突出综合监控预警系统采用 C/S 和 B/S 混合架构模式、组件式设计思路,并基于地理信息系统进行开发,包括突出预警综合数据库、地质测量管理系统、瓦斯地质动态分析系统、动态防突管理及分析系统、采掘生产进度管理系统、瓦斯涌出动态分析系统、矿

压动态分析系统、措施缺陷分析系统等子系统及突出综合监控预警管理平台。各子系统可单独运行,也可联合运行,实现了突出多参量信息的动态监测与采集、在线分析与预警和结果的及时发布。声电瓦斯突出实时监测预警软件主要包括声发射、电磁辐射、瓦斯等实时数据显示、历史数据查询和突出危险预警三大功能:实时或历史数据可通过折线图或柱状图方式显示,反映实时或历史数据变化情况,为人工分析提供便捷;预警模块主要包括临界值设置和预警窗口显示,每个传感器可打开各自的实时预警窗口,当满足综合预警准则时弹出报警窗口。

5 突出预警技术发展趋势

借助矿山物联网,采用新型信息传感传输、信息、大数据、网络、人工智能等技术,研发突出智能预警技术及系统,实现突出灾害全要素动态监测与采集、深度挖掘与智能分析、实时预警与发布及即时响应,是今后突出预警技术的总体发展趋势与目标,具体包括以下 3 个方面。

(1) 高自动化水平、高精度的突出预警信息监测采集技术及装备研发。发展非接触式及连续在线监测技术,对突出相关信息进行全面、动态监测采集,同时对数据进行有效滤噪,提高突出灾害相关信息采集的全面性、及时性和可靠性,为预警提供海量、高质量的数据基础。

(2) 基于大数据的突出预警指标与模型研究。采用大数据甚至人工智能技术,在事故致因分析基础上,建立更完善的预警指标体系,并构建突出智能预警模型,提高模型的动态自主优化能力和泛化能力,实现准确预警。

(3) 基于云技术的突出预警软件系统开发。采用云技术,尤其是发挥公有云的优势,开发基于服务模式的突出预警系统,实现通过不同系统平台、多终端对预警结果进行实时发布与查询,提高系统运维的便捷性,提升系统可靠性和稳定性。

以上述技术为支撑,应尽快形成中国突出灾害预警相关标准和法规,为预警技术发展和全面推广提供保障。

6 结语

突出预警技术在中国煤矿现场得到了一定应用,但由于突出灾害致因复杂、不同矿井及区域差异大等,在实际应用过程中仍存在一定局限,信息监测的自动化水平,预警模型的智能化水平,预警软件系统的稳定性、可靠性和便捷性,以及预警准确率等仍有待进一步提升。研发高自动化水平及高精度的突

出预警信息监测采集技术及装备、构建基于大数据的突出预警指标及智能预警模型、开发基于云技术的高可靠性预警软件系统,形成突出智能预警技术及系统,是今后的发展趋势,具有广阔的应用前景。

参考文献 (References):

[1] 胡千庭. 预防煤矿瓦斯灾害新技术的研究[J]. 矿业安全与环保,2006,33(5):1-7.

[2] 李学来,刘见中. 瓦斯灾害治理新技术[J]. 中国安全科学学报,2004,14(7):101-104.

LI Xuelai, LIU Jianzhong. New achievements of gas control technology[J]. China Safety Science Journal, 2004,14(7):101-104.

[3] ZHAO Xusheng, HU Qianting, NING Xiaoliang. Research on comprehensive early-warning technology of coal and gas outburst[J]. Procedia Engineering, 2011,26:2376-2382.

[4] 赵旭生,宁小亮,张庆华,等. 煤与瓦斯突出预警方法探讨[J]. 工矿自动化,2018,44(1):6-10.

ZHAO Xusheng, NING Xiaoliang, ZHANG Qinghua, et al. Discussion on early warning methods of coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2018,44(1):6-10.

[5] 赵旭生. 煤与瓦斯突出综合预警方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学,2012.

[6] 杨玉中,吴立云,何俊,等. 煤矿瓦斯重大灾害预警理论及应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,2010.

[7] 文光才,宁小亮,赵旭生. 矿井煤与瓦斯突出预警技术及其应用[J]. 煤炭科学技术,2011,39(2):55-58.

WEN Guangcai, NING Xiaoliang, ZHAO Xusheng. Coal and gas outburst early warning technology and application in coal mine [J]. Coal Science and Technology,2011,39(2):55-58.

[8] 谈国文,李冰杭,李明建. 矿井瓦斯突出参数自动处理系统研究[J]. 工矿自动化,2018,44(1):21-25.

TAN Guowen, LI Binghang, LI Mingjian. Research on automatic processing system of gas outburst parameters in coal mine [J]. Industry and Mine Automation,2018,44(1):21-25.

[9] 张宪尚,隆清明,吕贵春,等. 瓦斯含量快速测定技术应用研究[J]. 工业安全与环保,2017,43(11):38-40.

ZHANG Xianshang, LONG Qingming, LYU Guichun, et al. The application research on the rapid determination technology for gas content[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2017, 43(11):38-40.

[10] 马国龙. 乌兰煤矿瓦斯含量数据获取方法[J]. 矿业安全与环保,2017,44(4):73-75.

MA Guolong. Data acquisition method of gas content in Wulan Coal Mine [J]. Mining Safety &

Environmental Protection,2017,44(4):73-75.

[11] 宁小亮. 煤与瓦斯突出灾害监控预警技术[J]. 中国安全生产,2016,11(9):50-51.

[12] 周浩,吴正鹏. 基于 FME 实现 CAD 向 GIS 数据转换的关键技术研究[J]. 测绘与空间地理信息,2019, 42(5):119-120.

ZHOU Hao, WU Zhengpeng. Key technology research of CAD to GIS data conversion based on FME [J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2019,42(5):119-120.

[13] 杨义辉,崔俊飞,李明建. GIS 空间数据与 DXF 格式相互转换时颜色匹配研究[J]. 北京测绘,2010(1): 38-40.

YANG Yihui, CUI Junfei, LI Mingjian. Issue about transform color from GIS spatial data to DXF data [J]. Beijing Surveying and Mapping,2010(1):38-40.

[14] 张吉林,徐雪战,邹云龙. 矿井瓦斯抽采达标在线评价技术研究[J]. 能源与环保,2017,39(5):51-54.

ZHANG Jilin, XU Xuezhan, ZOU Yunlong. Research on online evaluation technology of mine gas drainage standard [J]. China Energy and Environmental Protection,2017,39(5):51-54.

[15] 邓敢博,邹云龙,唐韩英. 基于监控数据的瓦斯涌出特征突出预警系统设计[J]. 煤炭技术,2016,35(7): 204-206.

DENG Ganbo, ZOU Yunlong, TANG Hanying. Design of outburst early warning system based on gas emission features monitoring data [J]. Coal Technology,2016,35(7):204-206.

[16] 邓敢博,邹云龙. 瓦斯抽采达标在线评价系统建设及应用[J]. 煤炭技术,2016,35(5):201-202.

DENG Ganbo, ZOU Yunlong. Establishment and application of online evaluation system of gas drainage reach standards[J]. Coal Technology, 2016, 35(5): 201-202.

[17] 覃木广,邹云龙. 瓦斯涌出特征突出预警技术的应用研究[J]. 能源技术与管理,2015,40(4):15-17.

[18] 宋爽. 掘进工作面煤与瓦斯突出实时预警技术研究 [D]. 西安:西安科技大学,2015.

[19] 谈国文. 汪家寨煤矿基于瓦斯涌出特征的煤与瓦斯突出预警指标确定方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2015,42(3):34-37.

TAN Guowen. Research on determination method for early warning indicators of coal and gas outburst based on gas emission characteristics in Wangjiazhai Coal Mine [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2015,42(3):34-37.

[20] 孙建政,邹云龙,李明建,等. 矿井工作面瓦斯涌出动态特征突出预警系统的设计与实现[J]. 西南大学学报(自然科学版),2014,36(12):201-206.

SUN Jianzheng, ZOU Yunlong, LI Mingjian, et al.

- Design and implementation of an early warning system for gas emission in heading face dynamic coal and gas outburst[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2014, 36(12): 201-206.
- [21] 石记红. 煤与瓦斯突出实时诊断系统在突出矿井中的应用[C]//第九届全国煤炭工业生产一线青年技术创新文集, 长沙, 2014: 290-294.
- [22] 史华荣, 张吉林, 弓美疆, 等. 矿井瓦斯涌出特征预警技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 70-73.
SHI Huarong, ZHANG Jilin, GONG Meijiang, et al. Early warning technology of gas emission features and application[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 70-73.
- [23] 肖丹, 蒲阳, 张庆华. 回采工作面煤与瓦斯突出实时预警系统设计[J]. 煤炭技术, 2015, 34(8): 127-130.
XIAO Dan, PU Yang, ZHANG Qinghua. Design of real time early-warning system of coal and gas outburst at coalface [J]. Coal Technology, 2015, 34(8): 127-130.
- [24] 宁小亮, 蒲阳. 基于矿压监测动态特征的瓦斯突出预警系统设计[J]. 工矿自动化, 2015, 41(3): 10-13.
NING Xiaoliang, PU Yang. Design of early-warning system of gas outburst based on dynamic characteristics of pressure monitoring [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3): 10-13.
- [25] 崔俊飞. 基于矿压监测的煤与瓦斯突出实时预警技术研究及应用[J]. 煤炭技术, 2014, 33(9): 15-17.
CUI Junfei. Study and application of coal and gas outburst real-time pre-warning technology based on mine pressure monitoring[J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 15-17.
- [26] LI Jiangong, HU Qianting, YU Minggao, et al. Acoustic emission monitoring technology for coal and gas outburst [J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(2): 443-456.
- [27] 刘璐璐. 基于声发射多参数的煤与瓦斯突出风险预测研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2018.
- [28] 刘汀. 基于电磁辐射法的煤与瓦斯突出研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
- [29] 邱黎明, 李忠辉, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出远程智能监测预警系统研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(1): 17-21.
QIU Liming, LI Zhonghui, WANG Enyuan, et al. Research on remote intelligent monitoring and early warning system for coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(1): 17-21.
- [30] 王雨虹, 刘璐璐, 付华, 等. 基于声发射多参数时间序列的瓦斯突出预测[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 129-134.
WANG Yuhong, LIU Lulu, FU Hua, et al. Research on acoustic emission multi-parameter time series based prediction of gas outburst [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 129-134.
- [31] LI Hui, FENG Zengchao, ZHAO Dong, et al. Simulation experiment and acoustic emission study on coal and gas outburst[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(8): 2193-2205.
- [32] 赵晶, 王栓林. 掘进工作面突出危险性声发射预测技术[J]. 中国煤炭, 2016, 42(7): 79-82.
ZHAO Jing, WANG Shuanlin. Prediction technology of outburst-hazard acoustic emission at driving work faces[J]. China Coal, 2016, 42(7): 79-82.
- [33] 班擎宇. 义忠煤矿突出危险声-电-瓦斯前兆规律及预警技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [34] 王庆利. 微震监测在煤与瓦斯突出预测中的应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [35] 赵旭生. AE声发射监测煤与瓦斯突出的滤噪技术研究[C]//中国煤炭学会煤矿安全专业委员会 2004 年学术年会论文集, 三亚, 2004: 15-19.
- [36] 邹银辉, 赵旭生, 刘胜. 声发射连续预测煤与瓦斯突出技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(6): 61-65.
ZOU Yinhui, ZHAO Xusheng, LIU Sheng. Research on sound transmitted continued prediction technology for coal and gas outburst [J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(6): 61-65.
- [37] 邱黎明. 煤巷掘进突出危险性的声电瓦斯监测预警研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [38] 王恩元, 刘晓斐, 李忠辉, 等. 煤岩电磁辐射技术及在矿山动力灾害预测的应用[C]//2014 年中国地球科学联合学术年会——专题 2: 电磁地球物理研究应用及其新进展论文集, 北京, 2014: 42-45.
- [39] WANG Wencai, ZHAO Hui, ZHAO Hongyu, et al. Characters of electromagnetic radiation in coal and its application in forecast of coal and gas outburst[J]. Advanced Materials Research, 2014 (962/963/964/965): 1051-1055.
- [40] 石鲁宁, 胡圣波. 用于煤与瓦斯突出的 3D 电磁辐射探测系统[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2014, 32(1): 91-95.
SHI Luning, HU Shengbo. The 3D electromagnetic radiation detection system for coal and gas bursting [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2014, 32(1): 91-95.
- [41] 王恩元, 李忠辉, 何学秋, 等. 煤与瓦斯突出电磁辐射预警技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 53-57.
WANG Enyuan, LI Zhonghui, HE Xueqiu, et al. Application and pre-warning technology of coal and gas outburst by electromagnetic radiation [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 53-57.
- [42] 陆智斐. 九里山矿煤与瓦斯突出实时监测及预警技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.

- [43] 张续文. 基于电磁辐射实现对煤矿的实时监测预报[J]. 煤炭技术, 2013, 32(1): 120-121.
ZHANG Xuwen. Achieve real-time monitoring and forecasting of coal-based electromagnetic radiation[J]. Coal Technology, 2013, 32(1): 120-121.
- [44] 王恩元, 刘晓斐, 李忠辉, 等. 电磁辐射技术在煤岩动力灾害监测预警中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 642-645.
WANG Enyuan, LIU Xiaofei, LI Zhonghui, et al. Application of electromagnetic radiation technology in monitoring and warning on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, 31(5): 642-645.
- [45] 何学秋, 聂百胜, 王恩元, 等. 矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警技术[J]. 煤炭学报, 2007(1): 56-59.
HE Xueqiu, NIE Baisheng, WANG Enyuan, et al. Electromagnetic emission forecasting technology of coal or rock dynamic disasters in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007(1): 56-59.
- [46] 张剑英, 马姗姗, 陈治国. 煤与瓦斯突出电磁辐射的监测及应用[J]. 数据采集与处理, 2004, 19(1): 91-94.
ZHANG Jianying, MA Shanshan, CHEN Zhiguo. Monitoring and application of electromagnetic emission produced by coal and gas outbursts[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2004, 19(1): 91-94.
- [47] 谢和平. 电磁辐射法预测煤岩动力灾害技术及装备[J]. 设备管理与维修, 2003(9): 49-50.
- [48] 张庆华, 文光才, 邹云龙, 等. 瓦斯涌出预警指标及其临界值优选方法[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(1): 23-27.
ZHANG Qinghua, WEN Guangcai, ZOU Yunlong, et al. Optimization method for early warning indicators of gas emission and its critical values[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2014, 41(1): 23-27.
- [49] 杨飞, 罗新荣, 张爱然, 等. 神经网络理论在延时煤与瓦斯突出预警中的应用[J]. 黑龙江科技学院学报, 2007, 17(1): 30-32.
YANG Fei, LUO Xinrong, ZHANG Airan, et al. Application of neural network in prediction of delay coal and gas outbursts[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2007, 17(1): 30-32.
- [50] 邓明. 煤与瓦斯突出早期辨识与实时预警技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010.
- [51] 梁伟. 基于K线原理的矿井瓦斯异常诊断及预警研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [52] 张庆华, 宁小亮. 基于措施缺陷分析的煤与瓦斯突出预警指标及准则建立[J]. 能源技术与管理, 2014, 39(6): 1-3.
- [53] 覃木广, 赵旭生, 张庆华, 等. 基于瓦斯地质特征的突出预警模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 138-144.
QIN Muguang, ZHAO Xusheng, ZHANG Qinghua, et al. Study on outburst early warning model based on gas geological features[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 138-144.
- [54] 朱南南. 煤与瓦斯突出的微震前兆特征与预警模型研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.
- [55] 朱南南, 张浪, 范喜生, 等. 基于微震监测技术的突出危险性预警模型[J]. 煤矿安全, 2018, 49(2): 155-158.
ZHU Nannan, ZHANG Lang, FAN Xisheng, et al. Early warning model of outburst danger based on micro-seismic monitoring technique[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(2): 155-158.
- [56] 宁小亮. 基于应力影响模式的掘进工作面突出预警方法及系统[J]. 煤矿安全, 2015, 46(6): 160-163.
NING Xiaoliang. Early-warning method and system of coal and gas outburst in heading face based on stress effect mode[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(6): 160-163.
- [57] 康建宁, 马国龙. 基于采掘进度监测的煤与瓦斯突出预警方法和系统[J]. 煤矿安全, 2017, 48(4): 103-106.
KANG Jianning, MA Guolong. Coal and gas outburst early-warning method and system based on mining progress monitoring[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(4): 103-106.
- [58] 姜鹏鹏, 吕品. 基于可拓理论的煤与瓦斯突出预警模型研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(9): 172-174.
JIANG Pengpeng, LYU Pin. Study on early warning model of coal and gas outburst based on extension theory[J]. Coal Technology, 2017, 36(9): 172-174.
- [59] 郭德勇, 胡杰, 王彦凯. 煤与瓦斯突出层次-可拓预警技术及应用[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(1): 88-92.
GUO Deyong, HU Jie, WANG Yankai. Coal and gas outburst early-warning technology and application based on AHP and extension theory[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(1): 88-92.
- [60] 吴立云. “三软”煤层瓦斯参数变化特征及突出预警模型研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- [61] 边晓菲. 可拓关联函数的构造及其在煤与瓦斯突出预警中的应用[D]. 哈尔滨: 黑龙江科技大学, 2017.
- [62] 母丽华, 边晓菲, 陈孝国, 等. 基于可拓理论的煤与瓦斯突出预警模型[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2017, 33(1): 66-70.
MU Lihua, BIAN Xiaofei, CHEN Xiaoguo, et al. Coal and gas outburst early warning model based on extension theory[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2017, 33(1): 66-70.
- [63] 陈亮. 掘进工作面煤与瓦斯突出实时监测预警技术研

究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.

[64] 牛聚粉. 基于 MapX 的煤与瓦斯突出预警技术研究 [D]. 北京:中国地质大学(北京),2009.

[65] 彭泓. 基于数据挖掘与信息融合的瓦斯灾害预测方法研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.

[66] 黄为勇. 基于支持向量机数据融合的矿井瓦斯预警技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.

[67] 周骏,曲云尧,周文涛,等. 煤与瓦斯突出模式识别预测软件的设计原理[J]. 山东矿业学院学报,1996, 15(1):61-66.

ZHOU Jun, QU Yunyao, ZHOU Wentao, et al. Design principles of coal and gas outburst pattern recognition and prediction software [J]. Journal of Shandong Institute of Mining and Technology, 1996,15(1):61-66.

[68] 赵涛. 基于多因素概率预测的瓦斯突出预警方法研究 [D]. 成都:成都理工大学,2007.