我国煤与瓦斯突出预测与预警研究现状

梁运培[1,2], 郑梦浩[1,2], 李全贵[1,2], 毛树人[1,2], 栗小雨[1,2], 李建波[1,2], 周俊江[1,2]

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆　400044; 2. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆　400044)

摘　要: 煤与瓦斯突出是制约煤矿安全生产的重大灾害之一。我国煤层赋存环境复杂多变。针对时有发生的突出灾害事故，为了进一步提高突出预测和预警的准确率。梳理了突出发生机理的研究进展，指出地应力、瓦斯、煤体物理力学性质仍是防治突出的关键三要素，预测和预警的指标仍以此为基础；总结了突出预测的发展现状，指出预测的方法主要有单指标法、综合指标法和多属性指标法。主要存在预测位置局部、预测时间不连续、适应性差等不足；分析了突出预警的关键进展，指出基于突出孕育过程中的地应力、瓦斯、煤体演化机理，主要有声发射监测、电磁辐射监测、微震监测、瓦斯浓度时序监测，以及声电瓦斯综合监测预警方法。由于监测数据精度低、预警结果准确率低等不足而影响现场应用效果。基于当前突出预测和预警现状，以及煤矿安全智能化的需求，提出未来研究展望：突出预测应在启动判据与强度预测上，同时发展精细化、可量化指标；突出预警应跟踪指标的非线性变化，发展基于理论指标的趋势预警，基于事故经验的匹配预警，以及基于监控数据挖掘的前兆预警。通过组合预警模型，将定性与定量预警相结合，形成基于理论-经验-数据多重驱动组合预警模型，进一步提高预警准确率。同时发展矿山数字孪生建设，形成整体、连续、准确的煤矿突出灾害可视化智能预警。

关键词: 煤与瓦斯突出; 突出机理; 突出预测; 突出预警; 煤体物理力学性质

中图分类号: TD713;TD76　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-9993(2023)08-2976-19

A review on prediction and early warning methods of coal and gas outburst

LIANG Yunpei[1,2], ZHENG Menghao[1,2], LI Quangui[1,2], MAO Shuren[1,2], LI Xiaoyu[1,2], LI Jianbo[1,2], ZHOU Junjiang[1,2]

(1.*State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control*, *Chongqing University*, *Chongqing*　400044, *China*; 2.*School of Resources and Safety Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing*　400044, *China*)

Abstract: Coal and gas outburst is one of the major disasters that restrict the safe production of coal mine. The coal seam occurrence environment in China is complex and changeable. Outburst disasters occur from time to time. In order to further improve the accuracy of outburst prediction and early warning, some progresses in the mechanisms of outburst were reviewed, and the three key elements, which are gas, crustal stress and coal mechanics, for the prevention of outburst were pointed out. The development status of outburst prediction was summarized. The prediction methods mainly include single index method, comprehensive index method and multi-attribute index method. The main shortcomings of prediction methods are small prediction range, non-continuous prediction, poor adaptability, etc. The key progress of outburst early warning was analyzed. Based on the changes of crustal stress, gas and coal in the process of outburst preparation, the early warning methods of outburst mainly include acoustic emission (AE), electromagnetic radiation (EMR), micro-seismic

收稿日期: 2022-06-27　**修回日期:** 2022-10-02　**责任编辑:** 郭晓炜　**DOI:** 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0965

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52174166)

作者简介: 梁运培 (1971—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: liangyunpei@cqu.edu.cn

通讯作者: 李全贵 (1986—), 男, 河南民权人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: liqg@cqu.edu.cn

引用格式: 梁运培, 郑梦浩, 李全贵, 等. 我国煤与瓦斯突出预测与预警研究现状[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 2976-2994.

LIANG Yunpei, ZHENG Menghao, LI Quangui, et al. A review on prediction and early warning methods of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 2976-2994.

移动阅读

(MS), gas concentration, and AE-EMR-Gas comprehensive monitoring and early warning methods. The purpose of real time early warning is realized by judging the dangerous values of monitoring parameters. At present, the field application effect is affected by the low accuracy of monitoring data and the low reliability of early warning results. Based on the current situation of outburst prediction and early warning, as well as the demand for intelligent coal mine safety, the future research prospects were proposed. The outburst prediction should develop fine and quantifiable indexes about starting criteria and intensity prediction. Outburst early warning should track the nonlinear changes of indicators, develop trend early warning models based on theoretical indicators, empirical early warning models based on accident matching, and precursor recognition early warning models based on monitoring data mining. Through combining early warning models, combining qualitative and quantitative early warning methods, a combined early warning model based on theory, experience, and data was formed to further improve the accuracy of early warning. At the same time, the digital twin construction of mines should be developed to form an integrated, continuous and accurate visual intelligent early warning of coal mine outburst disasters.

Key words: coal and gas outburst; outburst mechanisms; outburst prediction; outburst early warning; coal mechanies

煤与瓦斯突出 (以下简称为“突出”) 是一种在煤炭开采过程中极易发生的灾害, 是指采掘空间周围煤岩体内的大量煤岩携带大量瓦斯突然抛向采掘空间形成的矿井瓦斯动力现象。它严重威胁着煤炭行业的发展与工人的安全。世界上主要的采煤国家都发生过突出事故[1]。我国是世界上突出最严重的国家之一, 突出矿井有 600 余座, 主要分布在西南、中部与东部地区, 如贵州、湖南、河南、山西、黑龙江等省份[2-3]。

减少煤矿井下的作业人员, 发展智能化采矿技术, 实现井下的无人或者少人值守是减少事故伤亡的有效手段。目前, 智能化矿山建设已进入加快发展阶段。智能化矿山是一个多系统、多层次、多技术、多专业相互融合的复杂系统工程, 是保证煤炭行业安全快速高质量发展的必由之路[4]。在矿井智能化建设中, 突出灾害的智能防治必不可少, 其中准确可靠的预测与预警是防治突出的关键。

针对突出灾害的预测与预警, 我国学者做了大量的现场实验与科学研究。在预测方面, 我国经历了局部预测为主区域预测为辅阶段, 局部预测区域预测并重阶段, 到目前的区域预测为主局部预测补充阶段, 形成了区域煤层和局部工作面“四位一体”的综合防治突出技术体系[5]。在预警方面, 针对局部工作面采掘工作进行时的突出危险, 发展了实时监测预警理论方法与技术, 对多种参量预警突出的可行性进行了实践研究与探索[6-8]。前人的研究促进了突出预测和预警理论方法的发展与进步, 但由于煤层赋存条件以及煤矿井下实际采掘工作环境的复杂性, 井下现场突出预测与预警的准确率仍急需提高[9]。

笔者在对现有的突出机理与突出的预测和预警方法进行综合叙述分析的基础上, 从指标的选择及利用方面对现有的突出预测和预警方法进行分类, 详述了不同方法的内容、原理及实现过程, 并分析阐述了其优缺点。最后以现有突出预测和预警理论技术为基础, 笔者提出一种基于理论–经验–数据多重驱动的突出可视化智能预警理念, 使预测与预警有效结合与互补, 实现突出危险预测和预警的整体性、连续性、准确性, 旨在为煤矿的突出灾害防治提供支撑。

1　突出机理研究进展

近年来, 我国煤矿安全生产形势明显转好, 但近 5 a, 突出事故仍时有发生 (图 1)。突出预测和预警技术的基础是突出机理的探究, 即通过总结突出发生规律, 对突出现象、发生的原因、条件、能量来源及发展过程进行解释, 以此为突出的预测和预警提供理论依据。

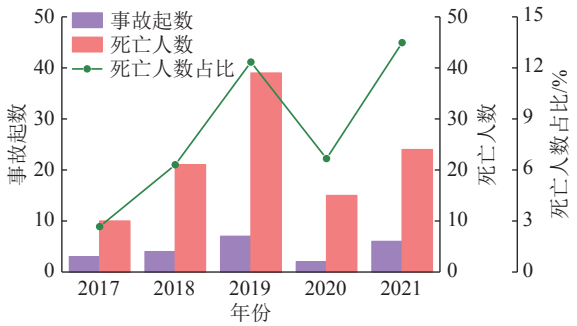


图 1　2017—2021 年我国突出事故发生起数、死亡人数及其占煤矿事故总死亡人数的比例

Fig.1　Number of outburst accidents, deaths and their proportion in the total deaths of coal mine accidents in China from 2017 to 2021

1.1　突出发生的影响因素

自 1834 年, 法国发生世界上第 1 起有记载的突出事故以来, 国外研究人员最先开始了对突出机理的研究, 并提出了众多的理论[10-12], 其中的综合作用理

论目前得到了业内广大学者的认同，认为突出是由地应力、瓦斯、煤的物理力学性质共同决定的 (图 2)。地应力使煤体发生破裂并引起裂隙的扩展；高含量瓦斯由于煤体裂隙扩展和破碎生成的新鲜表面而加快解吸和涌出；煤的结构决定了煤的强度，煤对应力的抵抗作用，瓦斯的释放速度及瓦斯在突出中可释放的势能[13]。

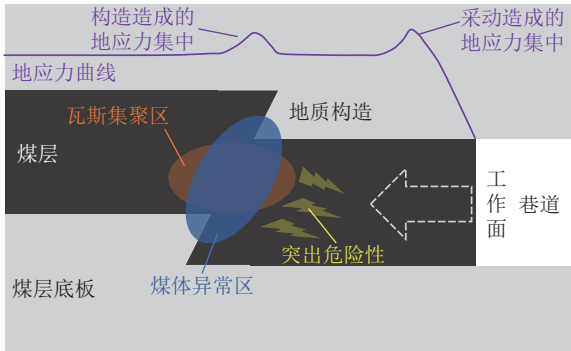


图 2 基于综合作用假说的突出机理

Fig.2 Outburst mechanism based on hypothesis of comprehensive effect

我国自 1950 年鸡西发生突出以来，通过历史资料、现场观测与试验探索逐渐开展了突出机理研究。于不凡[10] 通过总结国外多种突出机理与国内突出案例，认为地应力 (特别是残余构造应力) 是突出发动的主要动力，瓦斯压力既是动力又会使煤的强度降低，煤体中发育的裂隙决定煤的强度。上述因素的不同配合可引起不同的动力现象，如煤的突然压出是以地应力为主，打钻时的小型突出是以瓦斯压力为主。林柏泉[14] 分析了突出与非突出煤层瓦斯含量的差异，认为较高的瓦斯含量与瓦斯吸附量是突出发生的重要条件。突出发生前，主要是地压和游离瓦斯起破碎煤体的作用。周世宁、何学秋[15] 研究了含瓦斯煤的流变特性，认为时间同样是影响突出的因素之一。此外，吕绍林、何继善[16] 通过考虑突出发生的地质背景与条件，提出了“关键层–应力墙”突出机理。郑哲敏[17] 认为瓦斯能量大和煤层强度低是突出的根本原因。张玉贵等[18] 认为构造煤的存在是突出的必要条件。上述研究揭示了地应力、瓦斯与煤体的物理力学性质 3 方面要素在导致突出时的作用，增进了学者们对突出发生机理的认识与理解，同时也推动了学者们关于突出发生过程的探索。

1.2 突出发生的过程及诱因研究

一般来说，任何事物都会经历一个孕育、发生、发展和终止的过程，突出也不例外。在突出综合作用机理认识的基础上，学者们同时研究了突出随时间演化中各阶段的致灾过程，有利于更清晰合理的对突出实施预测预警措施。突出综合作用代表性理论“能量假说”[19]，最早将突出的演化发展划分为 3 个阶段，① 在静、动载荷作用下煤的破碎；② 在煤变形潜能和瓦斯压力作用下煤的移动；③ 瓦斯由已破碎的煤中解吸、膨胀并带出悬浮于瓦斯流中的煤。

我国学者于不凡[10] 将突出全过程划分为发动 (准备)、发生及停止 3 个阶段。地应力及瓦斯压力破坏煤体导致裂缝扩展，瓦斯解吸与煤破坏连续交替进行，随着能量的积累，煤体被抛出并形成瓦斯–粉煤流，当突出能量释放后，煤粒沉降瓦斯扩散，突出停止。丁晓良等[20] 通过分析突出模拟实验发现，破坏以薄片状多层开裂的方式向煤体内部扩展。周世宁、何学秋[15] 提出的突出“流变假说”，认为突出往往发生于煤岩体流变的加速变形阶段，该理论很好地解释了延期突出现象 (图 3(a)，其中，t_1、t_2、t_3 分别为煤岩的流变时间，$t_1 < t_2 < t_3$)。梁冰等[21] 认为突出是一种含瓦斯煤体在在局部发生迅速、突然破坏的现象，并提出了“固流耦合失稳理论”。郭德勇等[22] 在流变假说的基础上，提出了突出的黏滑机理，认为突出过程可视为摩擦滑动过程，在这一过程中发生黏滑失稳现象，并伴随有声发射等物理现象。蒋承林、俞启香[23] 提出突出的球壳失稳理论认为在突出过程中地应力首先破坏煤体，使煤体产生裂纹，形成球盖状煤壳，然后煤体向裂隙内释放并积聚起高压瓦斯，瓦斯使煤体裂纹扩张并使形成的煤壳失稳破坏并抛向巷道空间，使应力峰值移向煤体内部，继续破坏后续的煤体，形成一个连续发展的突出过程 (图 3(b)，其中，a、b、c 分别为不同破坏状态的球盖状煤壳；σ_0 为原始应力；σ_θ 为切向应力；σ_γ 为径向应力；v 为突出阵面的推进速度；P_θ 为原始瓦斯压力)。胡千庭等[1] 通过对突出全过程的分析，建立了突出过程的力学作用机理。将突出过程划分为孕育、激发、发展和终止 4 个阶段 (图 3(c))。罗明坤等[24] 的研究指出，含瓦斯煤体是突出的物质基础，突出的发生需经历地质动力系统的孕育、形成、发展和终止等演化过程。聂百胜等[25] 指出在突出准备阶段，采掘扰动诱发煤体微破坏的连锁效应，引起能量积聚且阻力降低；当积聚能量突破屏障区域煤体的约束，突出就会发生；微破坏的持续性推动了突出的发展；微破坏的减弱和能量供给的减少、突出路径阻力增大使得突出终止。

前人的研究推动了业界对突出机理及演化过程的认知，为突出灾害的预测预警及防治提供了理论支撑与研究方向，基于上述研究成果，学者们广泛开展了突出预测和预警方法研究。

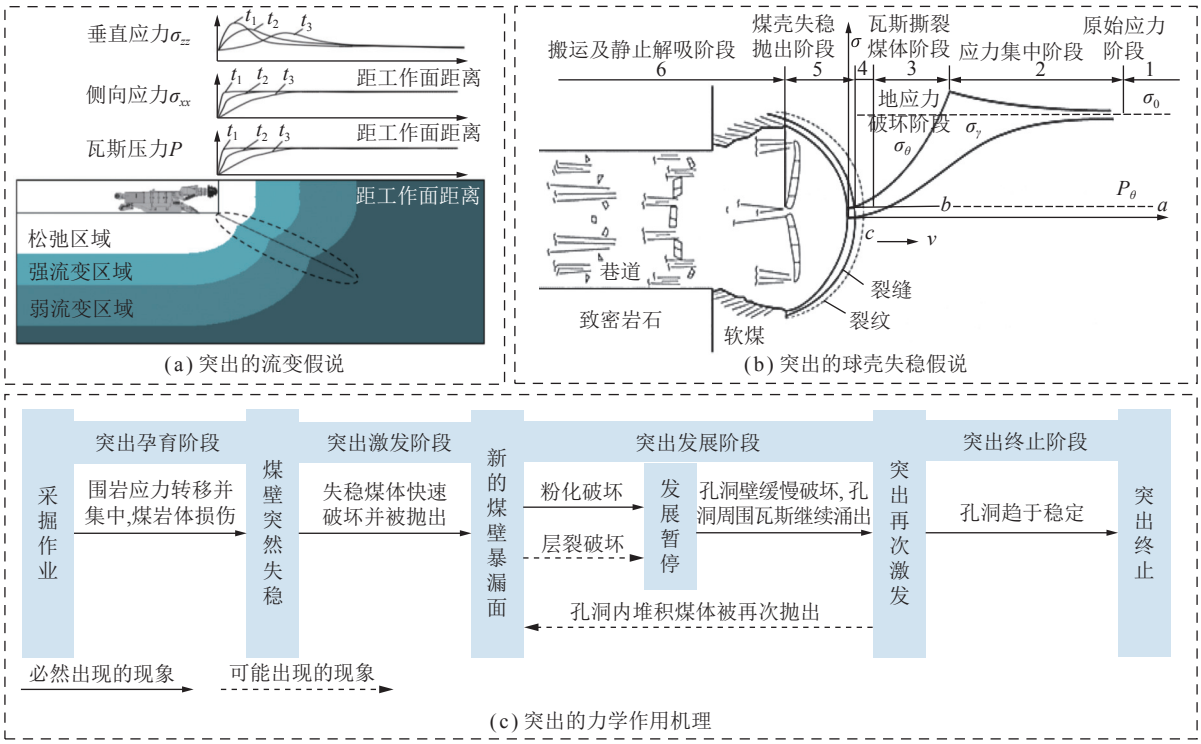


图 3　突出的流变假说、球壳失稳假说与力学作用机理[1, 15, 23, 26]

Fig.3　Rheological hypothesis, spherical shell instability hypothesis, and mechanical action process of outburst[1, 15, 23, 26]

2　突出预测研究进展

预测主要用于在采掘工作前对前方煤体的突出预测指标进行评价, 判断煤体是否具有突出危险性。基于综合作用假说中提出的突出影响 3 因素, 即地应力、瓦斯、煤的物理力学性质。学者们通过理论与试验研究发现, 原始煤体的物理性质、瓦斯压力等储存环境概况, 常可以通过打钻取样并进行相关的测试而获得, 并提出了相应的指标用于对突出危险性进行预测[27-28]。预测的目标可分为煤层突出危险性鉴定, 煤层区域预测, 局部工作面预测, 针对不同的预测目标环境, 可选用不同的预测指标[5, 29-31]。

我国颁布的 4 部《防治煤与瓦斯突出细则》(09 版名称为《防治煤与瓦斯突出规定》)(下文简称“《细则》”) 中, 分别对预测指标的适用场景及危险临界值进行了阐述, 具体内容见表 1。其中, 关于煤层突出危险性鉴定指标, 4 个版本无较大差异, 其中仅 1988 版的《细则》规定瓦斯压力危险临界值为 0.6 MPa, 其余版本皆为 0.74 MPa; 关于煤层区域危险性预测指标, 1988 版、1995 版的《细则》中所规定使用的综合指标 D、K, 在 2009 版、2019 版中被替换为了瓦斯压力 P 与瓦斯含量 W, 且 2019 版中增加了构造带的瓦斯含量危险临界值为 6 m^3/t; 关于煤层局部工作面预测指标, 4 个版本所规定使用的指标与临界值有所异同, 其中 1988 版《细则》规定的钻屑瓦斯解吸指标 C, 在之后的版本中并未继续沿用。4 个版本《细则》中规定的变化, 反映了一些突出预测指标的普适性, 以及我国对突出灾害预防的重视与对准确预测突出危险的迫切需求。

在《细则》明确规定要求使用的指标之外, 一些针对某种煤体条件, 经试验验证有效的指标同样被建议用于突出预测工作, 以提高突出预测的准确率, 如 R 指标等。笔者通过总结将这些预测指标划分为单指标与综合指标。此外, 在理论研究上, 部分学者同时选择了一些环境及管理类指标, 以综合考虑多方面因素对局部工作面的突出进行预测, 这类指标可称为多属性指标。

2.1　单指标预测

单指标预测法, 即指通过判断煤体打钻测量的某项指标是否大于危险临界值而预测煤体突出危险性的方法[29, 32-34]。这些指标主要为《细则》中规定突出预测时所需使用的指标, 包括可反映瓦斯赋存情况的瓦斯压力[35]、瓦斯含量[36]、钻孔瓦斯涌出初速度[31]、钻屑瓦斯解吸指标[30]、钻孔瓦斯放散初速度等; 可反映煤体物理力学性质的坚固性系数、煤的破坏类型[5]等; 可反映地应力大小的钻屑量[37]。各单项指标的含义及测量标准详见表 2。

由于煤层赋存环境的复杂性, 上述单项指标在井

表 1 突出危险性预测指标及其临界值[5]

Table 1 Prediction indexes and its critical values of outburst[5]

适用范围	指标	危险判别临界值			
		1988版	1995版	2009版	2019版
煤层突出危险性预测鉴定	煤的破坏类型	Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ	Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ	Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ	Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ
	瓦斯放散初速度Δp	≥10	≥10	≥10	≥10
	煤的坚固性系数f	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5
	瓦斯压力P/MPa	≥0.6	≥0.74	≥0.74	≥0.74
煤层区域突出危险性预测	综合指标D	≥0.25	≥0.25	—	—
	综合指标K	≥15	无烟煤≥20	—	—
	瓦斯压力P/MPa	—	—	≥0.74	≥0.74
	瓦斯含量W/($m^3 \cdot t^{-1}$)	—	—	≥8	≥8(构造带≥6)
煤层局部工作面突出危险性预测	最大钻屑量S_{max}/($kg \cdot m^{-1}$)或($L \cdot m^{-1}$)	≥6或5.4	≥6或5.4	≥6或5.4	≥6或5.4
	钻屑瓦斯解吸指标Δh_2	≥20 mm (H_2O)	≥200 Pa(干煤)或≥160 Pa(湿煤)	≥200 Pa(干煤)或≥160 Pa(湿煤)	≥200 Pa(干煤)或≥160 Pa(湿煤)
	钻屑瓦斯解吸指标K_1/($mL \cdot (g \cdot min^{1/2})^{-1}$)	≥0.8(f≥0.35)或≥0.6(f< 0.35)	≥0.5(干煤)或≥0.4(湿煤)	≥0.5(干煤)或≥0.4(湿煤)	≥0.5(干煤)或≥0.4(湿煤)
	钻孔瓦斯涌出初速度q/($L \cdot min^{-1}$)	按挥发分分类*	按挥发分分类*	≥5	≥5
	钻屑瓦斯解吸指标C	≥2.3	—	—	—

注：* 钻孔瓦斯涌出初速度临界值：当V_{daf}在5% ～ 15%时，临界值为5.0 L/min；当V_{daf}在15% ～ 20%时，临界值为4.5 L/min；当V_{daf}在20% ～ 30%时，临界值为4.0 L/min；当V_{daf}>30%时，临界值为4.5 L/min。

表 2 单项预测指标种类、含义与测量标准

Table 2 Meaning and measurement standard of each single prediction index

指标名称	指标含义	所反应的物理量	测量标准
煤的破坏类型	煤被破碎的程度	煤的地质赋存环境	煤的破坏类型分类表[38]
瓦斯放散初速度Δp	一定质量规定粒径的煤样，在0.1 MPa压力下吸附瓦斯后，向固定真空空间释放时，用压差表示的10～60 s内释放出的瓦斯量	煤的破坏程度和孔隙性质	《煤的瓦斯放散初速度指标(ΔP)测定方法》(AQ 1080—2009)
煤的坚固性系数f	煤体破碎的次数与捣碎后小于0.5 mm的煤粉体积之比	煤的力学性质	《煤的坚固性系数测定方法》(GB/T 2356112—2010)
瓦斯压力P	瓦斯在煤层中所呈现的压力	煤体瓦斯赋存状态	《煤矿井下煤层瓦斯压力的直接测定方法》(AQ 1047—2007)
瓦斯含量W	煤层中单位质量煤体所含有的瓦斯体积	煤体瓦斯赋存状态	《煤层瓦斯含量井下直接测定方法》(GB/T 23250—2009)
最大钻屑量S_{max}	在煤体中打直径为42 mm的钻孔过程中每米排出的钻屑质量	煤层的应力状态、煤的力学性质	《防治煤与瓦斯突出细则》(2019)
钻屑瓦斯解吸指标Δh_2	钻屑试样在卸压初期一段时间(2 min)瓦斯解吸而产生的压力差	煤层中的地质构造、煤层的破坏程度、瓦斯含量	《钻屑瓦斯解吸指标测定方法》(AQ/T 1065—2008)
钻屑瓦斯解吸指标K_1	钻屑试样在卸压初期一段时间(5 min)瓦斯解吸曲线的斜率	煤层中的地质构造、煤层的破坏程度、瓦斯含量	《钻屑瓦斯解吸指标测定方法》(AQ/T 1065—2008)
钻孔瓦斯涌出初速度q	在煤层中施工指定深度的钻孔，并测定打钻结束后2 min时钻孔的瓦斯流量	煤体渗透性、力学性质、瓦斯含量、瓦斯压力等	《钻孔瓦斯涌出初速度的测定方法》(MT/T 639—1996)

下现场运用过程中，其准确性亦存异同。如由于瓦斯压力、瓦斯含量危险临界值是根据历史突出事故统计特征而确定。但随着矿井开采深度的增加，且不同矿井存在不同的煤层赋存地质条件，部分矿井在低于指标危险临界值时，亦发生了突出事故[39]，如 2018 年黑龙江滴道盛和煤矿，在原始煤层瓦斯压力 0.67 MPa 下发生了突出事故[40]；2018 年河南新义煤矿，在瓦斯含量为 5.15 m^3/t 时发生的突出事故。因此，部分地方或

单位将瓦斯压力、瓦斯含量的危险临界值进行了下调，如河南省规定的 0.6 MPa 与 6 m^3/t、黑龙江部分煤矿规定的 0.6 MPa 与 5 m^3/t。

关于钻孔瓦斯涌出初速度预测准确性的研究方面，秦祥基[41] 认为在瓦斯含量高而透气性低，以及煤的破坏程度高强度低的地段，即使测定的 q 较小，突出危险性也很大。关于钻屑瓦斯解吸指标，我国学者[42] 经过工程经验实践发现，该指标对于结构破坏程度比较严重、瓦斯压力和含量较大的突出煤层预测准确性更高。在使用钻屑量预测时，齐黎明等[43] 认为其更适用于预测以应力作用为主导的突出危险。华福明、胡千庭等[44] 研究指出，q 指标对透气性较大的煤层敏感性较差，钻屑瓦斯解吸指标值能正确反映煤层的破坏程度和瓦斯含量的综合作用，但不能反映采掘工作面附近煤层的受力情况。

针对上述单项指标，目前研究的重点主要在探究不同预测指标对所要预测煤层发生突出的敏感性及危险临界值方面，这需要经过大量实测与统计得出，且不同地质与开采条件具有不同的敏感指标[39, 45]。我国部分矿井的突出危险敏感指标见表 3。

表 3　部分矿井突出危险敏感指标及临界值[30, 37, 43, 46]

Table 3　Sensitive indexes and their critical values of outburst risk in some coal mines[30, 37, 43, 46]

行政区域	煤层信息	敏感指标	特点
河南	首山一矿己15煤层	q、S	f=0.11～0.12，Δp=16～17，
	首山一矿己16-17煤层	q、S	q临界值为4.5 L/min，S临界值为6.0 kg/m
安徽	刘庄矿C13-1煤层	S、Δh_2	软分层，f=0.25，Δp=10
	丁集矿11-2煤层	S	f=0.39～0.79；Δp=0.33～5.00，赋存深度大，地应力高
	谢一矿望峰岗井C15煤层	S、K_1	f=0.33～0.58，Δp=4～5，地点−700 m
	谢桥矿13-1煤层	K_1	K_1与q的敏感性高于S
山西	寺河矿3煤层	K_1	Δp=2.12 MPa，W=28.97 m^3/t，Ⅱ～Ⅳ类煤
	寺家庄煤矿15号煤层	K_1	W=11.22～19.11 m^3/t
	白羊岭煤矿15号煤层	K_1	K_1临界值为0.30 mL/(g · $min^{1/2}$)
重庆	松藻煤矿K_1煤层	K_1、S	突出与地质构造及赋存变化关系密切，特别是在断层影响区
河北	通顺矿业有限公司2号煤层	Δh_2、S	P(表压)=0.14～0.33 MPa，f=0.43～0.56；Δp=18.1～21.7
	小屯矿2号煤层	Δh_2、S	f=0.53
云南	恩洪煤矿C9煤层	K_1、S	V类煤，Δp=23，f=0.18，P为1.12 MPa
贵州	大湾煤矿11煤层	K_1	W=10.87 m^3/t
四川	华蓥山K_1煤层	S、K_1	垂深460～870 m，地压大，P=3.2 MPa，W > 18 m^3/t
	石屏一矿C19、C24煤层	K_1、S	f=0.45；Δp=18；Ⅲ类煤；P(表压)=1.45 MPa；W=15.9 m^3/t
	叙永一矿C20、C24煤层	S、K_1	S临界值为5.20 kg/m，K_1临界值为0.41 mL/(g · $min^{1/2}$)
宁夏	乌兰煤矿7号煤层	S、K_1	f=0.18～0.39，Δp=7～16

2.2　综合指标预测

综合指标，即指采用 2 个或以上的反应地应力、瓦斯、煤体物理力学性质的单指标，通过运用公式计算而得出的指标，包括：R 指标、D 和 K 指标[47]、G 和 F 指标、B_1 和 B_2 指标、V_{30} 指标[48] 等，具体内容详见表 4。其中的 D、K 指标曾是《细则》中规定的在预测区域突出危险性时需要测量的指标，R 指标是《细则》中建议预测局部工作面突出危险性时使用的指标。

上述多种综合指标在预测突出时，基本综合考虑了瓦斯、地应力以及煤体的物理力学特性，在一定程度上避免了单项指标的片面性，但同时也增加了施工与参数处理的复杂程度，无法获得煤体破坏初始状态的关键信息[38, 49-50]，且由于不同的综合指标多是针对某一特定地质环境而提出，临界值多是根据现场经验而得，不同矿区条件各异[51]，易受人工、煤体赋存环境非均质性的影响[52]，因此未具备较好的普适性。

2.3　多属性指标预测

通过统计历史突出事件特征发现，突出发生地点常常具有煤层厚度突然变化、小型构造、煤质松软等地质异常特征以及由此导致的地应力、瓦斯异常等特征。多属性指标评价模型法，即指选择反应煤体赋存条件、地质构造、物理力学性质的多属性指标并对其进行量化[6, 53-54]，通过设置危险临界值判别准则[55] 或利用模糊综合评价[56]、层次分析[57]、可拓关联函数[58]

表 4 综合指标计算公式

Table 4 Calculation formulas of comprehensive indexes

综合指标	计算公式	公式说明
R	$R_1=(S_{\max}-1.8)(q_{\max}-4)$	$q_{\max}$为钻孔沿孔深最大每米瓦斯涌出初速度；H为开采深度；$\Delta h_{2\max}$为最大瓦斯解吸指标；$C_{\max}$为最大钻屑瓦斯解吸衰减系数
D	$D=\left(\frac{0.007\,5H}{f}-3\right)(P-0.74)$	
K	$K=\Delta p/f$	
G	$G=(\Delta h_{2\max}-15)(C_{\max}-1.7)$	
F	$F=(S_{\max}-4)(\Delta h_{2\max}-15)$	
B_1	$B_1=(q_{\max}-4)(S_{\max}-4)$	
B_2	$B_2=(\Delta h_{2\max}-30)(S_{\max}-4)$	
V_{30}	掘进工作面放炮后30 min内的瓦斯涌出量与落煤量之比	主要用于炮采条件下

等数学评价模型[59]，对所选择的指标进行量化、赋予权重并计算其与各危险等级的关联度，以此来综合评价目标区域的突出危险性[60]。其中层次–可拓法预测突出的流程如图 4 所示。

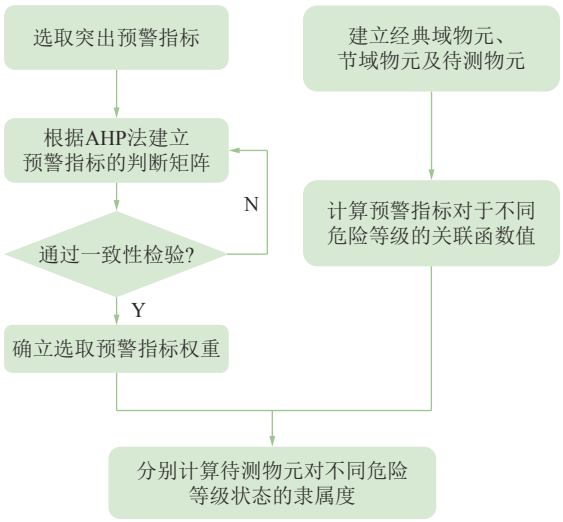


图 4 层次–可拓法突出预测流程[58]

Fig.4 Flow chart of level-extension model of outburst prediction[58]

此外，学者们开展了利用机器学习算法来预测突出的研究[61-64]，采用 BP、RNN、CNN、PSO-SVM 等机器学习算法，对历史突出事件的特征进行学习，如突出地点的煤的坚固性、煤的破坏类型、D、K、煤层厚度、构造类型等，然后根据新地点的上述特征，对新地点的突出危险性进行预测。其中 PSO-SVM 算法预测突出的流程如图 5 所示。

在上述客观性的地质、瓦斯赋存指标的基础上，为考虑主观的防突措施与管理隐患对突出危险性的影响，部分学者[66-67] 对突出危险进行预警时增加了防突措施重大缺陷指标 (如措施控制范围、措施空白带大小、超采超掘情况等) 与管理重大隐患指标 (如信息传输失误、违章作业、未绘制施工图等)，并建立了相应的预警模型。尽管多属性指标综合考虑了多种主客观潜在可诱发突出的指标，但究其根本仍然是基于对历史资料的统计而得出的结果，且对地质、管理等指标的量化增加了人为专业素养的影响，从而影响新位置的突出预测准确率。

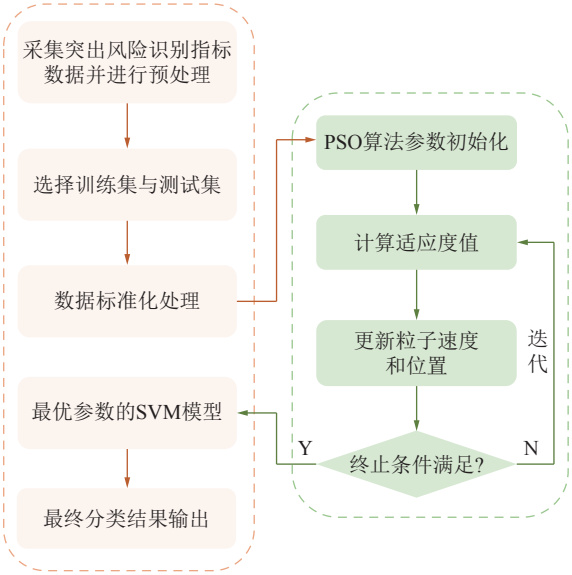


图 5 PSO-SVM 算法预测突出的流程[65]

Fig.5 Flow chart of PSO-SVM for outburst prediction[65]

3 突出预警研究进展

突出预警法，即用于在采掘工作进行时，通过各类传感器对前方煤体由应力扰动造成的煤体破裂信息或瓦斯变化信息进行连续监测，实时判断突出是否已经在孕育阶段，并在激发前进行报警。

煤矿突出预警最早根据采掘作业时的瓦斯浓度检测与瓦斯涌出量的人工计算来判断煤体的突出危险[48, 68]，之后基于矿井安全监控系统的成功研制与应用，实现了瓦斯浓度的实时监测与超限报警[69]。随着研究的深入，基于突出过程中应力扰动造成的煤体破

裂演化特征, 逐渐探究了声发射[70-73]、电磁辐射[7, 74-75]、微震[76-77] 以及声−电−瓦斯综合[78-79] 监测技术方法在突出预警方面的应用, 以及数学分析方法、机器学习算法监测数据挖掘方面的应用[61, 80-82](表 5)。

表 5　突出预警的主要研究进展

Table 5　Main research progress of outburst early warning

主要作者	主要研究进展
中国科技情报所重庆分所、重庆大学采矿系[68](1976)	总结介绍了瓦斯体积分数、瓦斯涌出等可用于在采掘工作进行中预测突出的方法
王兆全、周炳章[69](1988)	研制了KJ4煤矿安全生产监测系统，打破了我国煤矿监测需进口国外产品的局面
石显鑫等[83](1998)	研究开发了多道声发射实时监测系统及相关的软件
聂百胜等[84](2000)	研究了KDB5本安型突出电磁辐射监测仪在现场的应用情况
邹银辉等[85](2005)	开发了AEF-1型声发射监测装备，形成了滤噪技术，并利用现场监测数据验证了AE监测突出的可行性
秦汝祥等[86](2006)	研究提出运用瓦斯浓度序列的移动平均线、振幅、频次和方差等参数用于预报掘进工作面突出的发生
黄为勇[80](2009)	研究了机器学习算法在矿井传感器监测数据除噪、分析、融合与预警方面的应用
郭德勇等[87](2009)	分析研究了矿井瓦斯浓度与煤体温度监测数据的方差等变化特征，并探究利用神经网络对数据进行学习与危险判别
刘超[88](2011)	利用改进的微震监测系统，研究了微震用于突出预警可行性，并提出了预警指标与方法
朱世松等[89](2012)	提出运用时间序列相似性度量，对矿井瓦斯浓度监测数据进行聚类与危险识别
王恩元等[7](2014)	建立了突出电磁辐射预警准则，实现了突出演化过程电磁辐射的自动分析及预警
班擎宇[78](2015)	探究了声发射、电磁辐射、瓦斯多源监测在矿井突出预警方面的应用
宁小亮[90](2016)	研发了突出灾害监测技术装备、预警分析软件及控制平台，在200对矿井进行了推广应用
李成武等[91](2016)	提出了一种对不同源头噪声进行自动识别及除噪的方法
陶艳凤[92](2017)	提出利用声发射相对强弱指标进行突出预警的可行性，并基于煤矿井下噪声来源及其性质，探究了除噪方法
邱黎明等[93](2018)	开发了一种以声发射、电磁辐射和瓦斯浓度为预警指标的远程监测和综合预警系统
朱南南等[94](2018)	通过现场试验，提出把微震能率作为主要指标，把事件率作为辅助指标用于综合判断掘进面前方的突出危险性
王书芹[95](2018)	基于煤矿监控数据，采用深度学习相关方法，研究了瓦斯浓度预测、瓦斯浓度状态信息辨识和瓦斯突出因素估计的问题
陈亮等[75](2019)	提出了运用电磁辐射峰谷比值法用于突出预警的方法
LI Jiangong等[73](2019)	现场研究表明煤矿采煤工作面的声发射信号异常与瓦斯动力现象有较好的对应关系
曹康等[79](2020)	提出了应用声−电−瓦斯监测方法预警突出时所选参数的临界值
隆能增等[96](2021)	提出了微震−瓦斯互动响应的实时预警机制，构建了基于数据挖掘的突出智能预测模型与预警系统
袁亮[97](2021)	基于监测报警技术构建了突出远程监控预警平台，提出了智能、实时、准确预警突出的必要性

3.1　声、电、微震监测预警法

3.1.1　声发射监测预警法

煤岩变形及破坏的结果就是裂隙的产生、扩展、汇合贯通。研究表明, 裂隙的产生和扩展将会产生能量辐射, 弹性波就是其中的一种能量辐射形式。声发射 (AE) 监测技术即通过声发射传感器接收煤岩破裂过程中所产生的弹性波而判定煤岩是否发生破裂[98-100]。

声发射的监测频率主要在百赫兹与十兆赫兹之间, 监测时需将传感器置于煤体钻孔之内 (图 6(a))。现场研究发现, 突出发生之前, 声发生信号会出现明显上升, 如图 6 (b) 所示[73]。

利用声发射现象来监测预警突出主要采用声发射事件数、能量、振铃计数等指标[73, 85, 101-102]。声发射可实现煤岩破坏的动态监测, 但需要传感器与煤岩进行较好的耦合接触以监测到准确的破裂信号, 同时如何避免井下多种干扰声源 (机械噪声、打钻噪声等) 的影响尚需进一步研究[103]。

3.1.2　电磁辐射监测预警法

煤岩体是由成千上万的电子、原子等基本粒子组成, 当其发生变形破裂时, 电子等带电粒子变速运动就会向外辐射电磁波, 即电磁辐射 (EMR) 现象[104-106]。岩石电磁辐射的研究是从地震工作者发现震前电磁异常开始的。研究表明, 电磁辐射信号与采动过程中应力状态、压裂活动和瓦斯流动状态的变化有关[3], 如图 7 所示。在煤岩体的变形破裂过程中, 电磁辐射信号基本呈逐渐增强的趋势[107]。在应用电磁辐射技术进行突出预警时, 采用的指标主要包括电磁辐射脉

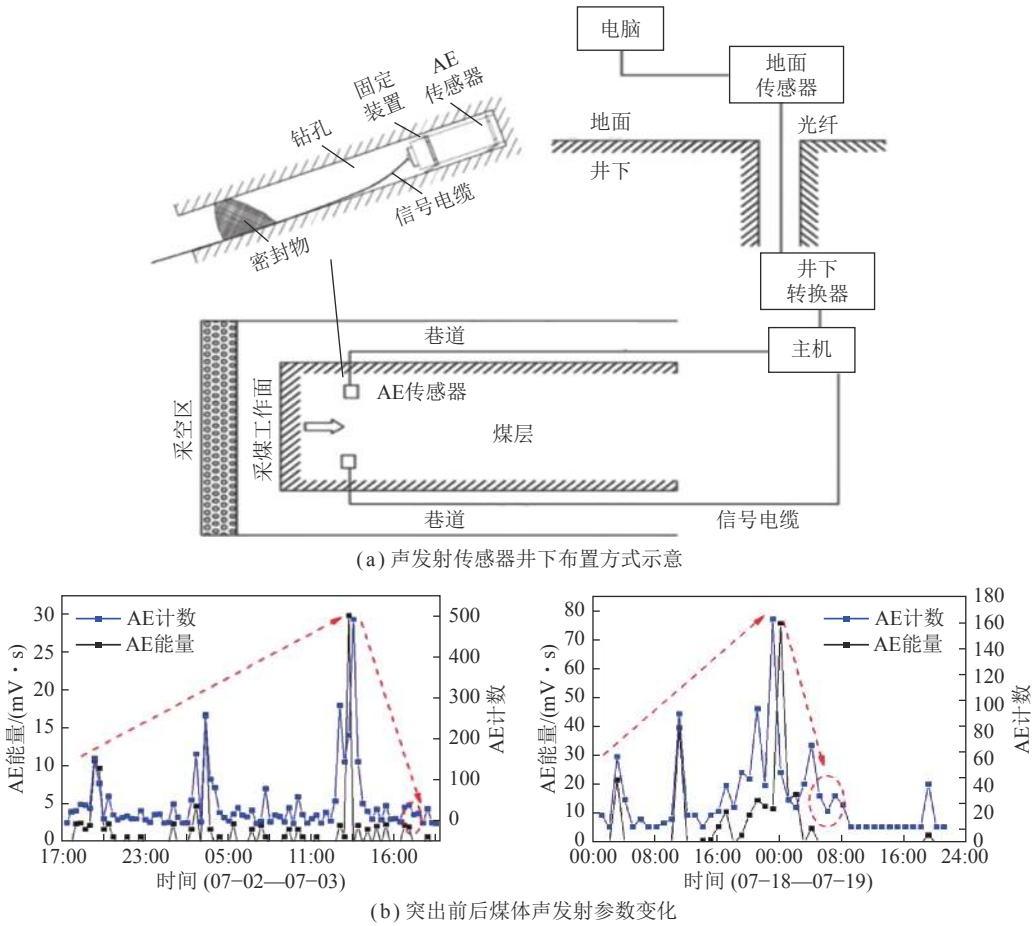


图 6 声发射传感器井下布置方式示意与突出前后煤体声发射参数变化折线[73]

Fig.6 Schematic diagram of the layout of acoustic emission sensor in coal mines and the variation curves of acoustic emission parameters of coal before and after outburst[73]

冲数、强度、能量、幅度等[7, 108]。电磁辐射预测技术具有无接触、不受煤岩体分布不均的影响等特点，但在使用期间应注意井下其他电磁信号的干扰，且监测范围较小，如何有效识别真正反应危险的异常信号，并提出合理有效的预警指标是未来提高预警准确率的关键[109]。

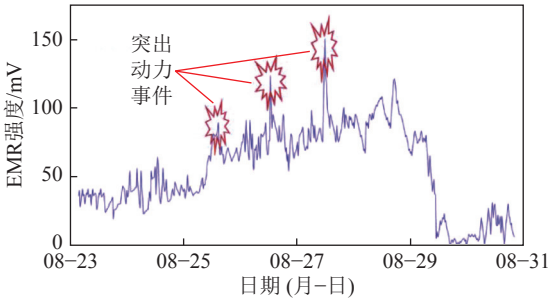


图 7 煤矿采煤工作面突出动力事件发生前后的电磁辐射强度变化[3]

Fig.7 Variation curve of EMR signal before and after outburst dynamic appearances in coal mining face[3]

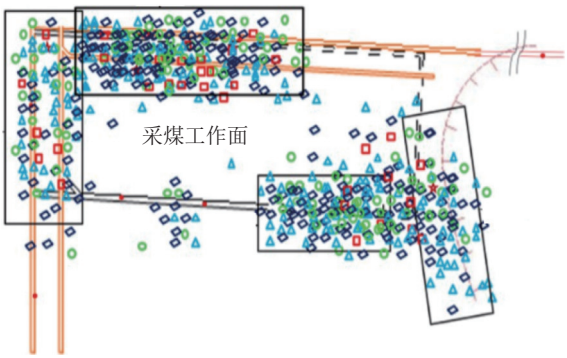
3.1.3 微震监测预警法

微震监测的基本原理与声发射相似，微震与声发射监测技术 2 者的区别在于所能接收的波形频率不同，微震的监测频率主要在几与几百赫兹之间。

煤岩体作为非均质体，其内部分布着微裂隙和微孔隙等，外力作用时这些缺陷端部产生应力集中，发生突发性破裂，积聚在煤岩体中的部分能量以弹性波的形式得以释放，这就是煤岩体在地应力、瓦斯压力及采掘作用等影响下产生的微震事件。微震目前较多应用于岩爆灾害的监测预警，其应用指标主要包括大事件、小事件、频率、能量、b 值等[96, 110-111]。

在利用微震预警突出的研究上，刘超[88] 研究了突出致灾过程中的微震效应，并利用改进的微震监测系统，对微震用于突出预警的可行性进行了现场研究。宋大钊等[112] 在对突出预警方法的研究中，应用微震监测技术判断采煤工作面范围内的应力集中区域，通过微震事件数的多少来判断应力集中程度大小。研究认为可利用微震监测提前判断突出危险与定位地质异常。7 个月的采煤过程中，采煤工作面附近的微震事件分布如图 8 所示。微震监测技术能够实时、动态、连续的监测发生在煤矿井下的微震活动，大尺度

监测范围可覆盖全矿井[113], 但受制于矿井地理环境的复杂多变以及多种背景噪声与干扰信号, 在井下微震信号自动识别和高精度到时自动拾取, 以及复杂介质的波速模型等方面仍亟需学者进行深入研究。



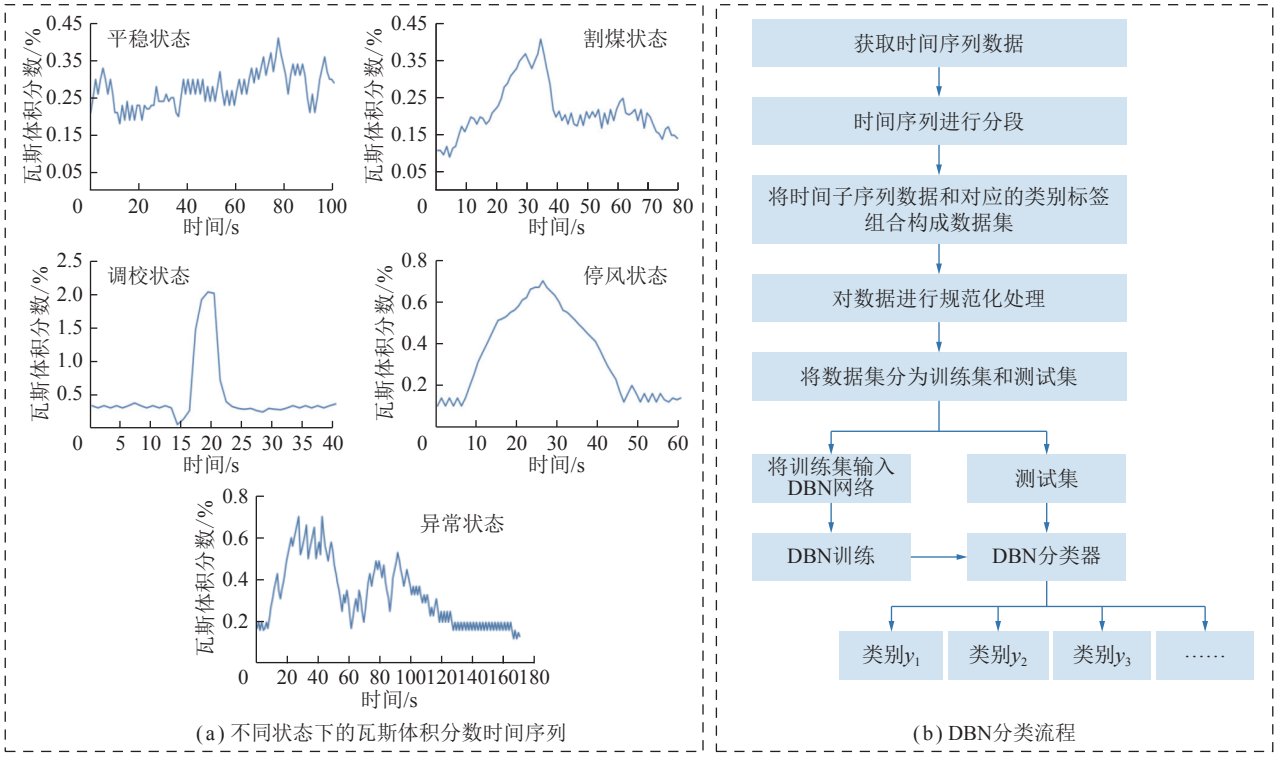
能量范围/J	震动事件次数	所占比例/%
0~100	146	16.82
100~1 000	308	35.48
1 000~10 000	376	43.32
10 000~100 000	35	4.03
100 000~1 000 000	3	0.35

图 8　采煤工作面附近微震事件分布[111]

Fig.8　Distribution of micro-seismic events near coal mining face[111]

3.2　瓦斯浓度时序监测预警法

矿井瓦斯体积分数监测系统是矿山安全生产系统之一, 瓦斯体积分数监测是矿井瓦斯防治及瓦斯灾害预防的重要手段之一。研究表明, 突出前瓦斯体积分数、瓦斯涌出量较平时会出现明显差异, 主要表现为明显波动式上升或忽大忽小, 这一特征可用于指示目标工作区域的突出危险性[82, 114]。瓦斯浓度时序监测预警法即指通过实时判断监测数据是否异常而实现突出危险性的动态预警, 其方式主要包括 3 种: ① 直接对井下传感器实时监控数据设置报警阈值[115]; ② 对监控数据进行二次处理[89, 116], 提取其波形变化特征 (如平均值、方差等), 之后对不同的二次指标设置相应报警阈值[117]; ③ 利用机器学习算法 (如 BP 神经网络、LSTM、CNN、MLP、DBN 等), 通过学习传感器所监测的大量正常状态与突出前异常状态的数据, 使机器能够预测未来一段时间的瓦斯浓度[118-119], 识别异常瓦斯浓度时序数列并发出警报[95], 其流程如图 9 所示。选用的指标除甲烷体积分数外可包括数据曲线变化峰值、上升梯度、下降梯度等。



(a) 不同状态下的瓦斯体积分数时间序列　　(b) DBN分类流程

图 9　DBN 时间序列分类流程[95]

Fig.9　Flow chart of DBN time series classification algorithm[95]

目前我国煤矿都已实现对瓦斯体积分数的实时监测, 但瓦斯浓度大小易受落煤量的影响, 且无法反应煤体、应力等地质环境信息, 利用其预警突出危险时存在无法对危险源进行时空分析的不足。

3.3　声电瓦斯综合监测预警法

鉴于突出发生前, 声发射、微震、电磁辐射、瓦斯监测信号皆会发生异常, 为全面监测采掘工作过程中的煤体、瓦斯异常信息, 提高预警的准确性, 部分学者

尝试联合利用上述多种监测手段对突出危险进行预警[112, 120]。

宋大钊等[112] 以微震监测与震动波速反演结果判断应力与地质构造异常区，预测突出危险区域。以声电瓦斯监测对局部突出危险进行即时预警，研究表明，在巷道作业过程中瓦斯异常发生前期，声发射信号表现出明显的急剧升高趋势，电磁辐射强度在瓦斯异常之前出现增加趋势，在瓦斯发生异常后达到最大值。曹康等[109] 采用声发射、电磁辐射、瓦斯联合监测预警方法，对贵州发耳煤矿掘进工作面的突出危险进行了预警研究，通过对不同参数预警结果赋予权重，最终给出综合预警结果。井下声电瓦斯传感器布置如图 10(a) 所示。现场研究证明，声发射、电磁辐射、瓦斯异常信号的产生与打钻时的动力现象具有较好的对应关系。发生卡钻时的声电瓦斯各类监测信号的变化如图 10(b) 所示。

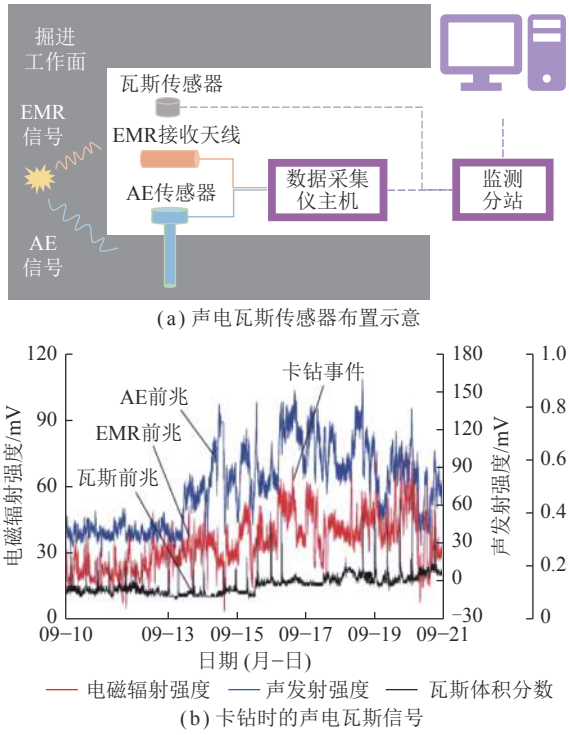


图 10 声电瓦斯传感器布置示意与卡钻时声电瓦斯信号[79]

Fig.10 Location schematic of AE, EMR and gas sensor and their curves of stuck drilling event[79]

3.4 预警监测系统

预警监测系统是预警方法技术的载体和展现方式，其功能主要包括：数据采集与传输、数据处理与存储，预警模型及准则、预警结果展示及发布等。这些功能的实现需要软件及网络的支持。可实现危险信息采集、分析、报警全流程无人干预，通过分析从矿井获取的结构化、半结构化及非结构化数据，实现灾害危险的实时感知、展现与报警。

我国从 19 世纪 80 年代开始研发煤矿安全监测系统，其中 1986 年工业性试验成功的 KJ-4 系统在当时取得较好的应用，其主要通过监测煤矿井下的瓦斯体积分数是否超限而对突出危险进行预警[69]。在 KJ-4 系统的基础上，研究人员不断对其改造，其中 KJ-54 系统针对突出危险的预警设置增添了声发射参数与红外测温参数。目前在煤矿现场得到较多应用的 KJ-90 系列系统 (图 11(a))[121-122]，采用 B/S 架构处理预警指标信息数据，基于 GIS 系统开发，可根据矿井采掘工程平面图对矿井各系统布置进行展示。采用人工检测上传、各类传感器采集的方式，通过井下环网，对瓦斯含量、地质构造、钻孔轨迹、声发射信息、钻屑指标、采掘进度、瓦斯体积分数等预警指标信息进行采集、传输；通过突出特征与数据异常信息的识别判断，发出正常、威胁、危险和绿色、橙色、红色的预警级别。

此外，基于声电瓦斯信号监测的预警系统也在煤矿现场得到了一定应用 (图 11(b))[93, 123]。布置在井下采掘工作面前方的监测仪器所获得的信号，经监控分站、井下交换机进入工业环网，之后经地面中心交换机传输至地面监控主机，在对监测数据进行干扰信号自动识别与滤除后，通过临界值法对危险状态进行判断预警。选用的指标包括声发射、电磁辐射强度与动态变化系数，以及瓦斯浓度。该系统在河南焦作某一矿井现场应用时的突出危险预警结果，得到了井下打钻过程中发生的卡钻、喷孔等瓦斯动力现象的验证。

随着网络信息技术的发展，基于煤矿安全监测监控系统、视频监控系统、矿压监测系统等多种类别监测系统，部分矿井建设了煤矿安全生产风险信息监测平台 (图 11(c))[124]，可展示多种类型监控数据，并进行风险预警。

4 突出预测与预警的展望

针对目前煤矿突出灾害预测预警所存在的不足，结合《细则》规定，笔者在现有的突出预测预警理论、指标及方法的基础上，分别对突出预测与预警的发展进行展望。

(1) 精细化突出预测。地应力、瓦斯、煤，3 者之间的耦合作用导致突出发生，其中煤体介质破坏是必要条件，地应力与孔隙瓦斯压力是充分条件。目前的预测指标无法根据 3 者的耦合作用判断煤体的安全状态，临界值多属现象与经验型，对目前由开采深度逐渐增加而导致的“三高一低”环境的适应性较差。因此在研究现有突出预测指标如何反应深部煤体赋

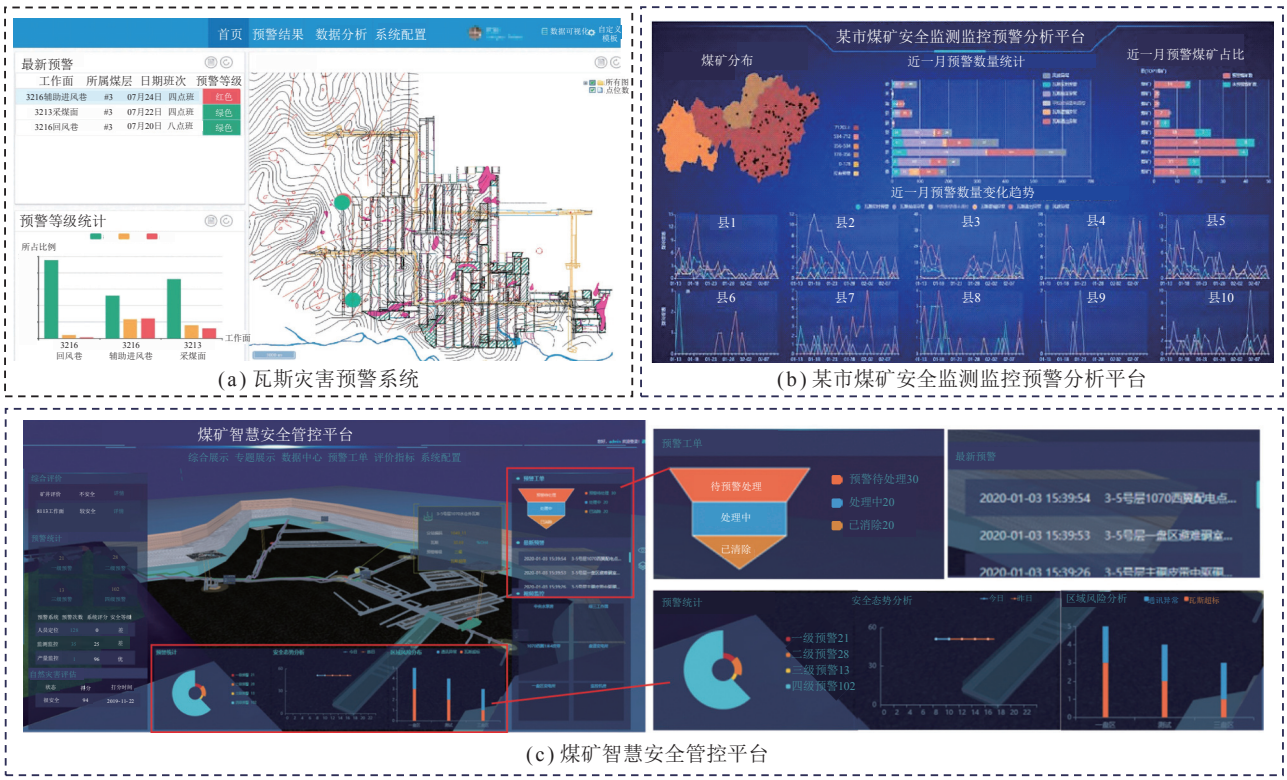


图 11　不同的煤矿安全监控预警平台[122-124]

Fig.11　Different intelligent safety control platforms of coal mine[122-124]

存环境危险性的同时，应结合尺度效应发展可量化煤体极限应力的指标，并综合考虑地应力 (原岩应力和扰动应力)、瓦斯压力，基于 3 者的力学平衡、能量平衡模型，量化突出启动判据。同时发展地质构造区范围判断指标，结合瓦斯含量、煤体瓦斯释放特性等指标，量化突出瓦斯潜能，预测突出强度，以此提高突出预测的有效性。

(2) 基于理论–经验–数据多重驱动的突出组合预警。突出是一个强非线性问题，其有效的求解方法是实时监测煤体破裂过程，跟踪指标的非线性变化，以此对未来短时域的安全态势进行较准确地超前研判，并针对危险给出预警。但目前的突出预警指标多采用基于现象与经验得出的阈值来判断危险性，缺乏对应的物化理论解释，同时模型的智能化尚存不足。有必要发展基于理论的物化指标趋势预警，基于历史事故经验的突出危险匹配模型，基于监测数据挖掘的前兆识别模型，同时提高预警模型的自适应、自学习能力。继而通过组合预警模型，将基于理论、经验、数据多重驱动的定性与定量预警相结合，弥补目前突出监测预警存在的误报率高、准确率低等不足，提高突出预警可靠性。

① 其中基于理论驱动的突出预警。应研究提高目前预测指标的适用性，对于随工作面推进而连续记录的钻屑瓦斯解吸指标、钻屑量指标等指标，利用随机森林、人工神经网络等机器学习模型，搭建趋势预警模型，跟踪指标的非线性变化信息，超前判断工作面前方的突出危险性。同时发展反应地应力、瓦斯、煤体的力学、能量指标，基于构建的力学平衡、能量平衡数学模型[1, 125-126]，通过生产环境的数字孪生模型，对突出危险的理论计算值与预警阈值进行可视化展示。

② 其中基于经验驱动的突出预警。应充分挖掘利用大量的历史突出灾害事故经验，统计以往事故的发生地点、开采深度、巷道类型、巷道断面面积、瓦斯含量、瓦斯压力、煤层平均厚度、煤层厚度变异系数、煤体破坏类型、坚固性系数、地质构造、突出预兆、诱导因素等指标。建立历史突出事故案例数据库，基于上述事故统计特征指标，利用可进行案例检索相似度计算的数学模型，如最近邻算法等。结合用于事故特征属性指标权重调优的数学模型，如遗传算法等，将目前的工况条件与全部历史案例进行比对，根据相似度匹配结果对突出危险进行预警。同时可选择历史突出事故中与当前工况条件最相似的案例，结合历史事故案例的致灾因素、灾害诱因，对现有生产环境的防突隐患进行排查与防范。

③ 其中基于数据驱动的突出预警。应利用声发射、电磁辐射、微震等地球物理监测技术，实时监测采掘工作面前方煤体的变形破裂信息，针对声发射事件、电磁辐射脉冲、微震事件等内含多特征参数的指标，

利用其多项特征参数 (如每一个声发射事件,包含声发射幅值、持续时间、振铃计数、能量等参数),采用无监督学习方法,通过 K-means、DBSCAN、Agglomerative、谱聚类等聚类算法,挖掘上述时序数据中内含的煤体失稳前兆信号,并通过 SVM、MLP、RNN 等机器学习算法,构建时序监测数据中煤体失稳前兆信号的识别预警模型。此外,根据井下小型动力事件 (卡钻、喷孔、偏帮等) 发生时的监测数据,采用监督学习方法构建监测数据的异常识别算法模型。针对监测中的瓦斯浓度、声发射波形、电磁辐射脉冲波形、微震波形等原始波形数据,利用 ARIMA、LSTM 等算法,通过生产过程真实监测数据的训练,构建时序监测数据的预测模型,并对预测数据进行异常识别,达到超前预警突出危险的目的。

(3) 基于数字孪生的煤矿突出灾害可视化智能预警。基于 GIS、MIM、数字孪生技术,依据矿山地质勘探测量相关数据、生产设备物理特征数据,构建地质资源模型、工程模型、生产模型等矿山生产构成要素的数字模型,其中地质资源模型主要包括煤岩层赋存物理形态特征、地质构造类别特征等,工程模型主要包括开拓、回采等“开挖模型”,生产模型主要包括综采机械模型、支护模型、抽采钻孔、管路模型等。在采掘作业等生产过程中,通过移动设备及矿井的信息化建设,结合静态探测数据与动态监测数据等多源异构数据,实现井下物理空间数字模型的动态修正,并对标安全生产法律法规文件,实现安全生产隐患的智能排查,规避隐患作业。同时,结合数值仿真技术,基于现场多源数据,实现采掘对象应力场、裂隙场、变形场、能量场、渗流场、温度场等多场演化特征的可视化。并对基于理论−经验−数据多重驱动组合预警模型的预警结果进行实时展示,实现对突出灾害时空特征的可视化智能预警。

5 结 论

(1) 基于突出综合作用机理,地应力、瓦斯、煤体物理力学性质是防治突出的关键三要素。预测和预警的指标仍以此为基础,主要反应采掘前及采掘中地应力、瓦斯、煤的物理力学性质的危险状态。

(2) 突出预测法主要用于在采掘工作前,对前方煤体的突出危险性进行评价与预测。通过对比指标测量值与危险临界值来预测突出,或者通过数学评价模型对多种指标进行综合评价来预测突出发生的可能性。不足的是,所使用的指标需要通过井下打钻、取样测量获得,存在工艺繁琐、不能整体预测、不能连续实时预测等缺点,且由于目前突出各影响因素之间的耦合致灾机理尚不清晰,指标适用情况各有侧重,存在人为因素对预测结果准确性产生影响的弊端,易造成局部危险预测缺失,以及采掘超出预测的安全范围,从而发生突出事故。

(3) 突出预警法主要用于在采掘工作进行中,通过实时监测煤体、瓦斯信息,判断突出是否已处于孕育阶段,并在激发前发出警报。所用的技术方法主要包括声发射监测、电磁辐射监测、微震监测、瓦斯浓度时序监测,以及声电瓦斯综合监测等,通过对指标数据的超限判识,对突出进行预警。可实现突出危险性的连续监测与预警,避免了静态预测方法存在的不连续性等弊端,但由于井下环境的复杂性,以及现有技术设备的精度及稳定性问题,监测数据存在较大噪声与误差,并因此造成误报警问题,影响现场应用中的预警准确率。目前针对监控数据的预警模型多是采用单指标阈值预警的方式,尚缺乏预警指标与突出机制的关联解释与分析。因此,最新的《细则》中只是鼓励采用上述监测手段增加突出预测的可靠性,并未明确要求使用。今后针对突出灾害的监测预警,需结合突出发生的机理与过程、大数据挖掘、智能判识等技术,在预警指标、预警方法上进行深入研究。

(4) 基于当前突出预测和预警现状,以及煤矿安全智能化的需求,未来突出预测应在启动判据与强度预测上,同时发展精细化、可量化指标;突出预警应跟踪指标的非线性变化,发展基于理论指标的趋势预警,基于事故经验的匹配预警,以及基于监控数据挖掘的前兆预警。通过组合预警模型,将定性与定量预警相结合,形成基于理论−经验−数据多重驱动组合预警模型。同时发展矿山数字孪生建设,形成整体、连续、准确的煤矿突出灾害可视化智能预警。

参考文献(References):

[1] 胡千庭,周世宁,周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1368−1372.
HU Qianting, ZHOU Shining, ZHOU Xinquan. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1368−1372.

[2] ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, WANG Xinxin, et al. Recent developments in coal mine methane extraction and utilization in China: A review[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31.

[3] QIU Liming, LI Zhonghui, WANG Enyuan, et al. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining-induced coal and gas outburst[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 54: 206−215.

[4] 王国法,庞义辉,任怀伟. 煤矿智能化开采模式与技术路径[J]. 采

矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 5−19.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Intelligent coal mining pattern and technological path[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 5−19.

[5] 程远平, 周红星. 煤与瓦斯突出预测敏感指标及其临界值研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 146−154.
CHENG Yuanping, ZHOU Hongxing. Research progress of sensitive index and critical values for coal and gas outburst prediction[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 146−154.

[6] 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.

[7] 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.

[8] CHEN Xiangjun, LI Liyang, WANG Lin, et al. The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China[J]. Safety Science, 2019, 115: 229−236.

[9] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716−725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716−725.

[10] 于不凡. 谈煤和瓦斯突出机理[J]. 煤炭科学技术, 1979(8): 34−42.
YU Bufan. Discussion on mechanism of coal and gas outburst.[J]. Coal Science and Technology, 1979(8): 34−42.

[11] BASIL B Beamish, PETER J Crosdale. Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1): 27−55.

[12] PAN Xiaokang, CHENG Hao, CHEN Jie, et al. An experimental study of the mechanism of coal and gas outbursts in the tectonic regions[J]. Engineering Geology, 2020: 279.

[13] SKOCHINSKI A A. Modern concepts on the nature of sudden outbursts of gas and coal and control techniques[J]. Ugol, 1954(7): 50−61.

[14] 林柏泉. 煤层瓦斯含量及煤与瓦斯突出机理探讨[J]. 阜新矿业学院学报, 1988(4): 31−40.
LIN Boquan. The study of gas content of coal and its mechanism of inquiry for coal and gas outburst[J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1988(4): 31−40.

[15] 周世宁, 何学秋. 煤和瓦斯突出机理的流变假说[J]. 中国矿业大学学报, 1990(2): 4−11.
ZHOU Shining, HE Xueqiu. Rheological hypothesis of coal and methane outburst mechanism[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1990(2): 4−11.

[16] 吕绍林, 何继善. 关键层−应力墙瓦斯突出机理[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1999(6): 80−84.
LÜ Shaolin, HE Jishan. Key layer and stress dike mechanism of coal and gas outbursts[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1999(6): 80−84.

[17] 郑哲敏. 从数量级和量纲分析看煤与瓦斯突出的机理[C]//郑哲敏文集.北京: 科学出版社, 2004.

[18] 张玉贵, 张子敏, 曹运兴. 构造煤结构与瓦斯突出[J]. 煤炭学报, 2007, 32(3): 281−284.
ZHANG Yugui, ZHANG Zimin, CAO Yunxing. Deformed coal structure and control to coal-gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 281−284.

[19] KHODOT B B. 煤与瓦斯突出[M].宋士钊等译. 北京: 中国工业出版局, 1966.

[20] 丁晓良, 丁雁生, 俞善炳. 煤在瓦斯一维渗流作用下的初次破坏[J]. 力学学报, 1990, 22(2): 154−162.
DING Xiaoliang, DING Yansheng, YU Shanbing. Incipient fracture of coal under one dimensional gas seepage,[J]. Acta Mechanica Sinica, 1990, 22(2): 154−162.

[21] 梁冰, 章梦涛, 潘一山, 等. 煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论[J]. 煤炭学报, 1995, 22(5): 492−496.
LIANG Bing, ZHANG Mengtao, PAN Yishan, et al. Theory of instability of flow fixation coupling for coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 22(5): 492−496.

[22] 郭德勇, 李佳乃, 王彦凯. 基于黏滑失稳与突变理论的煤与瓦斯突出预警模型[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(11): 1407−1412.
GUO Deyong, LI Jianai, WANG Yankai. Early-warning model of coal and gas outburst based on the stick-slip and catastrophe theory[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(11): 1407−1412.

[23] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出机理的球壳失稳假说[J]. 煤矿安全, 1995, 26(2): 17−25.
JIANG Chenglin, YU Qixiang. The “spherical shell destabilization” theory of coal and gas outburst[J]. Safety in Coal Mines, 1995, 26(2): 17−25.

[24] 罗明坤, 范超军, 李胜, 等. 煤与瓦斯突出的地质动力系统失稳判据研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 137−144.
LUO Mingkun, FAN Chaojun, LI Sheng, et al. Failure criteria of the geological dynamic system of coal and gas outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 137−144.

[25] 聂百胜, 马延崑, 何学秋, 等. 煤与瓦斯突出微观机理探索研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 207−220.
NIE Baisheng, MA Yankun, HE Xueqiu, et al. Micro-scale mechanism of coal and gas outburst: A preliminary study[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(2): 207−220.

[26] MA Yankun, NIE Baisheng, HE Xueqiu, et al. Mechanism investigation on coal and gas outburst: An overview[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2020, 27(7): 872−887.

[27] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出预测技术研究现状及发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(6): 40−43.

NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Present situation and progress trend of prediction technology of coal and gas outburst[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6): 40−43.

[28] LI Xiaozhao, HUA Anzeng. Prediction and prevention of sandstone-gas outbursts in coal mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 43(1): 2−18.

[29] WEI Jianping, ZHANG Wenyong, LI Zhenfu, et al. Discussion on sensitive coal and gas outburst prediction index during digging coal roadway[C]//International Symposium on Mining Science and Safety Technology. Jiaozuo, China, 2007.

[30] 韩颖, 余伟凡, 杨志龙, 等. 基于灰关联方法的突出预测敏感指标研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(1): 16−18.
HAN Ying, YU Weifan, YANG Zhilong, et al. Study on outburst prediction sensitive index based on grey relevancy analysis method[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2012, 31(1): 16−18.

[31] MOU Junhui, LIU Huihui, ZOU Yinhui, et al. A new method to determine the sensitivity of coal and gas outburst prediction index[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(12): 465.

[32] 桂祥友, 徐佑林, 孟絮屹, 等. 钻屑量与钻屑瓦斯解吸指标在防突预测的应用[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(3): 285−289.
GUI Xiangyou, XU Youlin, MENG Xuyi, et al. Application of the value of drilling cuttings weight and desorption index for drill cuttings to preventing coal and gas outburst[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(3): 285−289.

[33] TIAN Shixiang, JIANG Chenglin, XU Lehua, et al. A study of the principles and methods of quick validation of the outburst-prevention effect in the process of coal uncovering[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30: 276−283.

[34] TANG Jun, WANG Chaojie, CHEN Yujia, et al. Determination of critical value of an outburst risk prediction index of working face in a coal roadway based on initial gas emission from a borehole and its application: A case study[J]. Fuel, 2020, 267: 117229.

[35] 刘永立, 张海东, 张建伟. 煤与瓦斯突出动力灾害的多参数耦合监测预警[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(4): 345−349.
LIU Yongli, ZHANG Haidong, ZHANG Jianwei. Experimental study on coal and gas outburst based on dynamic disaster testing system[J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2017, 27(4): 345−349.

[36] WANG Liang, CHENG Yuanping, WANG Lei, et al. Safety line method for the prediction of deep coal-seam gas pressure and its application in coal mines[J]. Safety Science, 2011, 50(3): 523−529.

[37] 杜泽生, 罗海珠, 孙波, 等. 基于四率法的煤与瓦斯突出预测敏感指标的确定[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(7): 44−47.
DU Zesheng, LUO Haizhu, SUN Bo, et al. Setting up prediction sensitive index of gas outburst based on four rate method[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(7): 44−47.

[38] 俞启香, 程远平. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 236.

[39] 杨丁丁. 煤巷突出危险性预测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
YANG Dingding. Study on the prediction methods of outburst danger on coal roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2018.

[40] 邓照玉. 深部煤层区域预测指标临界值的研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(1): 34−37.
DENG Zhaoyu. Study on critical value of regional prediction index for deep coal seam[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(1): 34−37.

[41] 秦祥基. 关于钻孔瓦斯涌出初速度法预测煤巷掘进工作面突出危险性的探讨[J]. 焦作矿业学院学报, 1993(3): 1−5.
QIN Xiangji. Research of prediction coal ans gas outburst in coal mines using driling hole gas emission rate[J]. Journal of Jiaozuo Mining Institute, 1993(3): 1−5.

[42] 胡千庭, 文光才. 对预测煤与瓦斯突出的钻屑瓦斯解吸指标的探讨[J]. 煤炭工程师, 1993(5): 20−25.
HU Qianting, WEN Guangcai. Discussion on gas desorption index of drilling cuttings for predicting coal and gas outburst[J]. Coal Engineer, 1993(5): 20−25.

[43] 齐黎明, 卢云婷, 关联合, 等. 煤与瓦斯突出预测敏感指标确定方法探索及应用[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(3): 85−89.
QI Liming, LU Yunting, GUAN Lianhe, et al. Exploration and application of determination method of sensitive index for prediction of coal and gas outburst[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(3): 85−89.

[44] 华福明, 胡千庭. 突出预测指标S_{max}、K_1临界值确定方法的探讨[J]. 煤炭工程师, 1992(1): 12−15.
HUA Fuming, HU Qianting. Discussion on determination method of critical value of gas outburst prediction index S_{max} and K_1[J]. Coal Engineer, 1992(1): 12−15.

[45] 仇海生. 突出预测敏感指标及临界值确定研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2009.
QIU Haisheng. Sensitive indicators and threshold's ditermination study on coal and gas prediction[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2009.

[46] 邢长勇, 杨瀚, 黄光平, 等. 叙永一矿煤层突出预测敏感指标及其临界值确定[J]. 煤炭技术, 2020, 39(11): 83−86.
XING Zhangyong, YANG Han, HUANG Guangping, et al. Determination for sensitivity index and critical value of coal and gas outburst in Xuyong First Coal Mine[J]. Coal Technology, 2020, 39(11): 83−86.

[47] 王佑安. 煤和瓦斯突出危险性预测方法[J]. 煤矿安全, 1984(4): 1−7.
WANG You'an. Prediction method of coal and gas outburst[J]. Safety in Coal Mines, 1984(4): 1−7.

[48] 苏文叔. 利用瓦斯涌出动态指标预测煤与瓦斯突出[J]. 煤炭工程师, 1996(5): 2−7.
SU Wenshu. Prediction of coal and gas outburst by using gas emission dynamic index[J]. Coal Engineer, 1996(5): 2−7.

[49] 王汉斌. 煤与瓦斯突出的分形预测理论及应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
WANG Hanbin. Fractal forecast theory and its application of coal

and gas outburst[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.

[50] 王超杰. 煤巷工作面突出危险性预测模型构建及辨识体系研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
WANG Chaojie. Study on establishment of prediction model and identification system for outburst risk of coal roadway working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[51] 陈家清, 辛新平, 徐仲有, 等. 瓦斯突出危险性区域预测综合指标探讨[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(S1): 49−50.
CHEN Jiaqing, XIN Xinping, XU Zhongyou, et al. Discussion on comprehensive index of regional prediction of gas outburst risk[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000, 27(S1): 49−50.

[52] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出预测技术研究现状及发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(6): 43−46.
NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Present situation and progress trend of prediction technology of coal and gas outburst[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6): 43−46.

[53] 黄旭超, 孙东玲. 我国煤矿煤与瓦斯突出现状及预警技术的研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(7): 61−63.
HUANG Xuchao, SUN Dongling. Study on coal and gas outburst status and early warning technology in China coal mines[J]. Coal Science ans Technology, 2011, 39(7): 61−63.

[54] 李冬, 彭苏萍, 杜文凤, 等. 煤层瓦斯突出危险区综合预测方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 466−472.
LI Dong, PENG Suping, DU Wenfeng, et al. Comprehensive prediction method of coal seam gas outburst danger zone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 466−472.

[55] 牛森营. 豫西煤厚变化控制煤与瓦斯突出的机理分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(7): 127−128.
NIU Senying. Mechanism analysis of controlling coal and gas outburst by coal thickness change in western Henan[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(7): 127−128.

[56] 兰泽全, 王志亮, 张跃兵, 等. 煤与瓦斯突出危险性模糊综合评价方法研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(3): 159−163.
LAN Zequan, WANG Zhiliang, ZHANG Yuebing, et al. Study on coal and gas outburst risk fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(3): 159−163.

[57] 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, LÜ Pin. Study on early warning model of coal and gas outburst based on extension theory[J]. Coal Technology, 2017, 36(9): 172−174.

[58] 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.

[59] LIANG Yueqiang, GUO Deyong, HUANG Zhanfeng, et al. Prediction model for coal-gas outburst using the genetic projection pursuit method[J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 2017, 16(3): 271−282.

[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.
WU Liyun. Research on change characteristics of gas parameters and early-warning wodel of coal and gas outburst in soft roof-floor seam[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.

[61] 柴艳莉. 基于智能信息处理的煤与瓦斯突出的预警预测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
CHAI Yanli. Study on pre-warning and prediction of coal and gas outburst based on intelligent information system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.

[62] 曲方, 张龙, 李迎业, 等. 基于BP神经网络的煤与瓦斯突出预测系统开发[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(1): 11−16.
QU Fang, ZHANG Long, LI Yingye, et al. Development of coal and gas outburst prediction system based on BP neural network[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(1): 11−16.

[63] 梁跃强. 基于地质数据挖掘和信息融合的煤与瓦斯突出预测方法[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
LIANG Yueqiang. Prediction method of coal-gas outburst based on geological data mining and information fusion [D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2018.

[64] WU Yaqin, GAO Ronglei, YANG Jinzhen. Prediction of coal and gas outburst: A method based on the BP neural network optimized by GASA[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 133: 64−72.

[65] 李鑫灵, 袁梅, 董洪, 等. PSO-SVM模型在掘进工作面突出预警系统中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 90−95.
LI Xinling, YUAN Mei, DONG Hong, et al. Application of PSO-SVM model in outburst warning system of heading face[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(9): 90−95.

[66] ZHAO Xusheng, SUN Haitao, CAO Jie, et al. Applications of online integrated system for coal and gas outburst prediction: A case study of Xinjing Mine in Shanxi, China[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(6): 1980−1996.

[67] 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.
BIAN Xiaofei. The construction of extension dependent function and its application in coal and gas outburst early warning[D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2017.

[68] 中国科技情报所重庆分所, 重庆大学采矿系. 煤和瓦斯突出的预测方法[J]. 矿业安全与环保, 1976(3): 20−29.

[69] 王兆全, 周炳章. KJ4煤矿安全、生产监测系统[J]. 测控技术, 1988(1): 40−46.
WANG Zhaoquan, ZHOU Bingzhang. KJ4 monitoring system for coal mine safety production[J]. Measurement & Control Technology, 1988(1): 40−46.

[70] CHEN Wenxue, WANG Longkang, WANG Hui, et al. Zigbee-Based prediction system for coal rock dynamic disasters[J]. Procedia Engineering, 2011: 26.

[71] 康建东. 东林煤矿扭转构造带煤与瓦斯突出声发射预测技术[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(4): 53−55.

KANG Jiandong. Acoustic emission prediction technology for coal and gas ourburst in torsion structural zone in Donglin mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(4): 53−55.

[72] 刘亮亮. 基于声发射法的煤与瓦斯突出预测研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
LIU Liangliang. The prediction of coal and gas outburst based on the acoustic emission method[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013.

[73] 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.

[74] 李成武, 杨威, 王启飞. 利用煤体破裂电磁信号进行局部震源定位方法研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(3): 1001−1011.
LI Chengwu, YANG Wei, WANG Qifei. A method to determine the location of local mine earthquake source by using coal fracture electromagnetic signal[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(3): 1001−1011.

[75] 陈亮, 范志浩, 付江伟, 等. 基于电磁辐射峰谷比值法的煤与瓦斯突出预警[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(6): 94−98.
CHEN Liang, FAN Zhihao, FU Jiangwei, et al. Early warning of coal and gas outburst based on peak-to-vally ratio method of electromagnetic radiation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(6): 94−98.

[76] 邓志刚, 齐庆新, 赵善坤, 等. 自震式微震监测技术在煤矿动力灾害预警中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 92−96.
DENG Zhigang, QI Qingxin, ZHAO Shankun, et al. Initiative micro-seismic monitoring technology applied to early warning of mine dynamic disaster[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 92−96.

[77] 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.
ZHU Nannan. Study on the microseismic precursor characteristics and early-warning model of coal and gas outburst[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.

[78] 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.
BAN Qingyu. Study on precursor law of AE-EMR-GAS and early-warning technology of outburst in yizhong coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[79] 曹康, 李忠辉, 余得胜, 等. 掘进工作面煤与瓦斯突出前兆特征及综合预警研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 147−152.
CAO Kang, LI Zhonghui, YU Desheng, et al. Study on precursor characteristics and comprehensive early warning of coal and gas outburst risk in driving face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 147−152.

[80] 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.
HUANG Weiyong. Study on coal gas early-warning technology based on support vector machine and data fusion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.

[81] 李瑞华. 数据挖掘在煤矿安全监测中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
LI Ruihua. The application of data mining in colliery safety monitoring[D]. Xian: Xidian University, 2010.

[82] 杨艳国, 穆永亮, 秦洪岩. 工作面瓦斯浓度时间序列特征挖掘与预警应用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(3): 120−125.
YANG Yanguo, MU Yongliang, QIN Hongyan. Research on time series characteristics of gas concentration at working face and application of them to early-warning[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(3): 120−125.

[83] 石显鑫, 蔡栓荣, 冯宏, 等. 利用声发射技术预测预报煤与瓦斯突出[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(3): 61−66.
SHI Xianxin, CAI Shuanrong, FENG Hong, et al. The prediction of coal and gas outburst using the acoustic emission technique[J]. Coal Geology & Exploration, 1998, 26(3): 61−66.

[84] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 用电磁辐射法非接触预测煤与瓦斯突出[J]. 煤矿安全, 2000, 31(2): 41−44.
NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Non-contact prediction of coal and gas outburst by electromagnetic radiation method[J]. Safety in Coal Mines, 2000, 31(2): 41−44.

[85] 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.

[86] 秦汝祥, 张国枢, 杨应迪. 瓦斯涌出异常预报煤与瓦斯突出[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 599−602.
QIN Ruxiang, ZHANG Guoshu, YANG Yingdi. Predicting coal and gas outburst with monitored gas consistence[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 599−602.

[87] 郭德勇, 王仪斌, 卫修君, 等. 基于地理信息系统和神经网络的煤与瓦斯突出预警[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 15−18.
GUO Deyong, WANG Yibin, WEI Xiujun, et al. Early-warning of coal and gas outburst by GIS and neural network[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 15−18.

[88] 刘超. 采动煤岩瓦斯动力灾害致灾机理及微震预警方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
LIU Chao. Research on hazard mechanism and microseismic warning method for gas dynamic disasters of mining coal-rock[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.

[89] 朱世松, 汪云甲, 魏连江. 基于时间序列相似性度量的瓦斯报警信号辨识[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 474−480.
ZHU Shisong, WANG Yunjia, WEI Lianjiang. Gas monitoring warning signal identification based on time series similarity measure[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 474−480.

[90] 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.
NING Xiaoliang. Monitoring and early-warning technology of coal and gas outburst disaster[J]. China Occupational Safety and Health, 2016, 11(9): 50−51.

[91] 李成武, 董利辉, 王启飞, 等. 煤岩微弱电磁信号的噪声源识别及

去噪方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1933−1940.
LI Chengwu, DONG Lihui, WANG Qifei, et al. Noise auto identification and de-noising method of coal-rock weak electromagnetic signals[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1933−1940.

[92] 陶艳风. 基于声发射的煤与瓦斯突出预警与源定位研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
TAO Yanfeng. Study on early warning and source location of coal and gas outburst based on acoustic emission[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.

[93] 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.

[94] 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.

[95] 王书芹. 基于深度学习的瓦斯时间序列预测与异常检测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
WANG Shuqin. Gas time series prediction and anomaly detection based on deep learning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[96] 隆能增, 袁梅, 王关亮, 等. 煤与瓦斯突出微震−瓦斯互动响应预警研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 125−132.
LONG Nengzeng, YUAN Mei, WANG Guanliang, et al. Research on early warning of coal and gas outburst microseismic-gas interactive response[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 125−132.

[97] 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.

[98] COX S J D, MEREDITH P G. Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emissions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(1): 11−24.

[99] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 47(2): 286−298.

[100] WANG Xiao, WEN Zhijie, JIANG Yujing, et al. Experimental study on mechanical and acoustic emission characteristics of Rock-Like material under non-uniformly distributed loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(3): 729−745.

[101] 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.
LIU Lulu. Prediction of coal and gas outburst risk based on acoustic emission multi-parameters[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2018.

[102] 唐巨鹏, 郝娜, 潘一山, 等. 基于声发射能量分析的煤与瓦斯突出前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 31−42.
TANG Jupeng, HAO Na, PAN Yishan, et al. Experimental study on precursor characteristics of coal and gas outbusrt based on acoustic emission energy analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 31−42.

[103] 吴自立. AE信号参数预测预报煤(岩)与瓦斯突出危险性的进展及展望[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(1): 27−29.
WU Zili. Progress and Prospect of AE signal parameter prediction for coal (rock) and gas outburst risk[J]. Mining Safety& Environmental Protection, 2005, 32(1): 27−29.

[104] FRID V, VOZOFF K. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(1): 57−65.

[105] MARCO Lichtenberger. Regional stress field as determined from electromagnetic radiation in a tunnel[J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27(12): 2150−2158.

[106] BIZYAEV A A, YAKOVITSKAYA G E. Monitoring dynamic rock pressure events using improved EME recording instrumentation[J]. Journal of Mining Science, 2015, 51(5): 957−963.

[107] 王恩元, 何学秋, 窦林名, 等. 煤矿采掘过程中煤岩体电磁辐射特征及应用[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 216−221.
WANG Enyuan, HE Xueqiu, DOU Linming, et al. Electromagnetic radiation characteristics of coal and rocks during excavation in coal mine and their application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 216−221.

[108] QIU Linming, LIU Zhentang, WANG Enyuan, et al. Early-warning of rock burst in coal mine by low-frequency electromagnetic radiation[J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105755.

[109] 曹康. 发耳煤矿煤与瓦斯突出声电瓦斯特征信息提取及综合预警应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
CAO Kang. Feature information extraction and comprehensive early warning application of AE-EMR-Gas in FaEr coal mine for coal and gas outburst[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[110] WANG Shengchuan, DOU Linming, WANG Zhengyi, et al. Mechanism of coal bursts induced by horizontal section mining of steeply inclined coal seams and application of microseismic multi-parameter monitoring in early warning[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 14.

[111] 何学秋, 王安虎, 窦林名, 等. 突出危险煤层微震区域动态监测技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3122−3129.
HE Xueqiu, WANG Anhu, DOU Linming, et al. Technology of microseismic dynamic monitoring on coal and gas outburst-prone zone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3122−3129.

[112] 宋大钊, 何学秋, 邱黎明, 等. 区域和局部突出危险性动态实时监测预警技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 110−119.
SONG Dazhao, HE Xueqiu, QIU Liming, et al. Study on real time

dynamic monitoring and early warning technology of regional and local outburst danger[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 110−119.

[113] 李楠, 王恩元, GE Maochen. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 83−96.
LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines: present status and future prospects[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 83−96.

[114] 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.

[115] 徐雪战, 孟祥瑞, 邹云龙. 基于瓦斯浓度变化的煤与瓦斯突出预警技术[J]. 工矿自动化, 2016, 42(9): 17−21.
XU Xuezhan, MENG Xiangrui, ZOU Yunlong. Coal and gas outburst early-warning technology based on change of gas concentration[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(9): 17−21.

[116] 关维娟, 张国枢, 赵志根, 等. 煤与瓦斯突出多指标综合辨识与实时预警研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 922−929.
GUAN Weijuan, ZHANG Guoshu, ZHAO Zhigen, et al. Multi-index comprehensive identification and real-time warning of coal and gas outburst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 922−929.

[117] 魏连江, 胡青伟, 梁伟, 等. 基于K线图理论的瓦斯异常模式诊断研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(6): 24−27.
WEI Lianjiang, HU Qingwei, LIANG Wei, et al. Research on gas abnormal mode diagnosis based on K-line theory[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(6): 24−27.

[118] 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.
PENG Hong. Gas disaster prediction method research based on data mining and information fusion[D]. Beijing: Journal of University of Science and Technology-Beijing, 2013.

[119] 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.
CHEN Liang. Research on real-time monitoring & early warning technology of coal and gas outburst of the driving working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.

[120] 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, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557−1566.

[121] 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 method of coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(1): 6−10.

[122] 宁小亮. 基于大数据的煤与瓦斯突出预警技术[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(4): 51−56.
NING Xiaoliang. Early warning technology of coal and gas outburst based on big data[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(4): 51−56.

[123] 王恩元, 李忠辉, 李保林, 等. 煤矿瓦斯灾害风险隐患大数据监测预警云平台与应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 142−150.
WANG Enyuan, LI Zhonghui, LI Baolin, et al. Big data monitoring and early warning cloud platform for coal mine gas disaster risk and potential danger and its application[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 142−150.

[124] 李爽, 薛广哲, 方新秋, 等. 煤矿智能化安全保障体系及关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2320−2330.
LI Shuang, XUE Guangzhe, FANG Xinqiu, et al. Coal mine intelligent safety system and key technologies[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2320−2330.

[125] 杨陆武, 彭立世. 以煤体结构为基础的煤与瓦斯突出简化力学模型[J]. 焦作工学院学报, 1997(2): 57−62.
YANG Luwu, PENG Lishi. A simplified mechanical model for coal and gas outbursts based on coal structure[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1997(2): 57−62.

[126] 王刚, 武猛猛, 王海洋, 等. 基于能量平衡模型的煤与瓦斯突出影响因素的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 238−248.
WANG Gang, WU Mengmeng, WANG Haiyang, et al. Sensitivity analysis of factors affecting coal and gas outburst based on a energy equilibrium model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 238−248.