

衡献伟,付金磊,李青松,等.突出煤层微震动态响应与多参量指标预警方法[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):1-8. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.001

HENG X W, FU J L, LI Q S, et al. On Microseismic Dynamic Response and Multi-parameter Index Early Warning Method of Outburst Coal Seam[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,37(4):1-8. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.001

突出煤层微震动态响应与 多参量指标预警方法

衡献伟,付金磊*,李青松,左金芳

(贵州省矿山安全科学研究院有限公司,贵州 贵阳 550025;贵州省煤矿设计研究院有限公司,贵州 贵阳 550025)

摘要:针对目前常规监测预警技术及单一预警指标难以适应整个采掘过程等问题,以贵州义忠煤矿为工程背景,基于微震监测技术手段,分析井下典型信号的微震响应特征,研究微震预警指标与瓦斯涌出动态指标的相关性,形成一套科学、完备的预测指标体系.提出煤与瓦斯突出危险性的动态评价与参量联合预警方法,基于多指标参量联合预警的综合预警机制,对预警模型触发的预警进行分级处理,共划分为安全、较安全、危险和高度危险 4 个预警响应等级.实现微震信号的连续采集、预处理,微震事件的多维展示和时空分析,收集打钻等煤矿井下典型干扰信号,完成各类型信号的特征分析.通过微震指标与常规预测指标的相关性分析,认为微震指标的变化特征与突出危险性预测指标、瓦斯涌出指标变化有较好的一致性.研究结果可为实现煤与瓦斯突出微震预警提供理论支撑.

关键词:采动影响;煤与瓦斯突出;微震监测;多参量;预警方法

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)04-0001-08

On Microseismic Dynamic Response and Multi-parameter Index Early Warning Method of Outburst Coal Seam

HENG Xianwei, FU Jinlei, LI Qingsong, ZUO Jinfang

(Guizhou Mine Safety Scientific Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China;

Guizhou Coal Mine Design Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: In view of the problems that the current conventional monitoring and early warning technologies and single early warning indicators are difficult to adapt to the entire mining process activities, with Guizhou Yizhong Coal Mine as the engineering background, based on microseismic monitoring techniques, the typical underground signals are analyzed. The microseismic response characteristics of the microseismic response characteristics, the correlation between the microseismic early warning indicators and the gas emission dynamic indicators have been studied. A scientific and complete predictive indicator system has been formed, and the dynamic evaluation and parameter joint early warning method of coal and gas outburst risk has been proposed. The dynamic evaluation and parameter joint early-warning method of coal and gas outburst risk is proposed. Based on the comprehensive early-warning mechanism of multi-index parameter joint early-warning, the early-warning triggered by the early-

收稿日期:2020-08-19

基金项目:贵州省科技计划资助项目(黔科合基础[2019]1426号;黔科合支撑[2021]一般348;黔科合支撑[2020]4Y049号;黔科合支撑[2020]2Y056号)

*通信作者,E-mail: 1225118190@qq.com

warning model is classified into 4 early warning response levels, i.e. safe, relatively safe, dangerous, and highly dangerous. The continuous acquisition and preprocessing of microseismic signals, multi-dimensional display and spatiotemporal analysis of microseismic events are realized, typical interference signals in coal mines such as drilling are collected, and characteristic analysis of various types of signals is completed. Through the correlation analysis between the microseismic index and the conventional prediction index, it is considered that the variation characteristics of the microseismic index has a good consistency with the change of the outstanding risk prediction index and the gas gushing index. The research results have provided theoretical support for realizing microseismic early warning of coal and gas outbursts.

Keywords: mining influence; coal and gas outburst; microseismic monitoring; multi-parameter; early warning methods

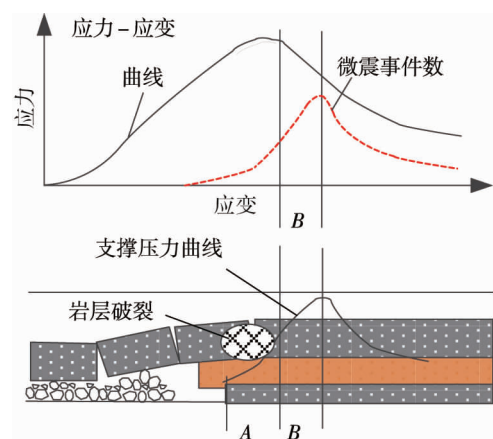
煤岩动力灾害是多种因素综合作用的结果,受采掘等因素扰动的影响,灾害发生的主要因素也将发生动态变化.因此,深入研究工作面影响因素的动态变化特征,监测煤岩体破坏失稳及状态变化趋势对提高预测预报的准确率意义重大.

很多学者对煤岩动力灾害机制进行了研究,并取得了阶段性的成果.在试验研究上,主要通过搭建和改进平台研究含瓦斯煤的力学特性^[1-3].研究发现^[4-7]:煤岩动力灾害往往是其他因素诱发引起的.张树光等^[8]基于弹塑性理论,得出了临界冲击半径随黏聚力的增大逐渐减小、随内摩擦角的增大逐渐增大的规律;Wang等^[9]对预应力饱和裂隙煤岩的动态冲击力学特性进行了分析.由于地下工程的复杂性,需要借助数值模拟来分析煤岩动力灾害问题,王志荣等^[10]、荣海等^[11]、张永刚等^[12]通过建立数值模型,模拟分析了瓦斯突出对巷道围岩的动力效应问题.经过长期研究,在预警方法方面还形成了接触式预测法和非接触预测法^[13].

近年来,多位学者致力于煤岩动力灾害非接触预测法的研究,微震监测预警技术受到关注^[14-19].微震监测技术是利用煤岩破裂产生的微震信息来研究煤岩结构和稳定性的一种实时、动态、连续的地球物理监测方法^[20],通过挖掘海量前兆信息,实现对煤矿典型动力灾害风险的精准判识及预警的新模式^[21].本文以微震监测技术为主要监测手段,通过对数据的深入挖掘和分析,建立一套科学、完备的预测指标体系,构建煤与瓦斯突出危险性的动态响应和多参量指标联合预警体系,以提高煤与瓦斯突出预警的准确性和前瞻性,提升矿井的安全保障能力.

1 采动影响下煤岩应力演化与微震监测机制

未采动前,周围煤岩体处于相对平衡的状态,随着工作面向前掘进,周围煤岩体的应力将重新分布,打破原有的平衡状态.硐室周围的部分煤岩体由三向受力转变成双向受力状态,围岩的稳定性降低,一般在应力差大的区域,煤岩体还会出现破裂现象,此时将释放出一定的能量并呈现出活跃的微震响应特征.采掘活动破坏了煤体的应力平衡状态,煤岩体在内外应力的综合作用下产生破坏会诱发煤与瓦斯突出.煤岩体在应力作用下发生破坏时产生微震和声波信号,根据微震事件定位原理可以判定破裂发生的位置^[22-23].通过微震监测手段确定煤岩层的破裂区域,可以找到高应力场区域和高应力差区域,进而便于实施煤岩体卸压开采.采动应力场与煤岩层的破裂关系如图1所示^[22].



A段为岩层破裂场中心位置与采煤工作面的距离;B段为破裂场中心位置与支持压力峰值区的距离;A+B段为支持压力峰值区与采煤工作面的距离

图1 采动应力场与煤岩层的破裂关系^[22]

2 工程背景与微震系统布置

2.1 工程背景

义忠矿井位于水城县金盆乡,矿井属于煤与瓦斯突出矿井,井田位于神仙坡向斜北翼,开采深度标高为+1 800~+1 250 m,井田走向长 4.50 km,倾斜宽度约 1.55 km,面积 6.995 1 km².该井田范围内含煤地层为龙潭煤组,11号煤层为全区主要可采的稳定煤层,煤层厚度为 3.18 m,平均倾角为 20°,但 11号煤层的突出危险程度高,在 11号煤层的采掘过程中施工防突、抽采钻孔时发生了喷孔、煤炮等动力现象。

11112回风巷和11092工作面具有相对独立的通风系统和必需的安全防护设施,为了监测11112工作面回风巷在掘进过程中的微震活动规律,利用微震监测系统对11112回风巷和上方11092工作面进行实时监测和数据采集。

2.2 微震监测系统布置

根据义忠煤矿的实际情况以及井下的瓦斯地质条件,将主机数据处理分析系统放置于义忠煤矿办公楼监控室主机房内,将Paladin信号接收系统安设于井下11112回风巷风门外硐室。ESG微震监控系统由地面信号分析系统、Paladin信号采集系统和信号传感器3部分组成,布置位置如图2所示。

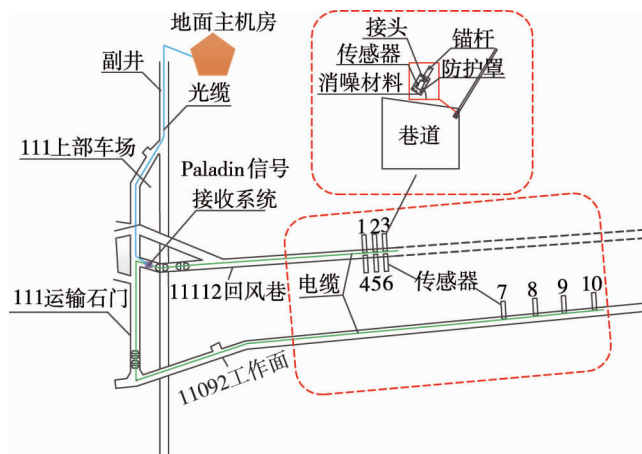


图2 ESG微震监控系统布置

3 基于微震监测的掘进工作面响应特征

3.1 巷道掘进过程中微震信号的采集

微震监测系统在义忠煤矿装设以来,从11112回风巷149 m持续掘进到553 m位置处,11092工作面在10月—12月的回采过程中,微震监测传感器一直跟随采掘工作面不断迁移.掘进过程中采集的微震信号可以从水平面(D)、东面(E)和北面(N)3个平面进行空间三维定向展示,如图3所示。

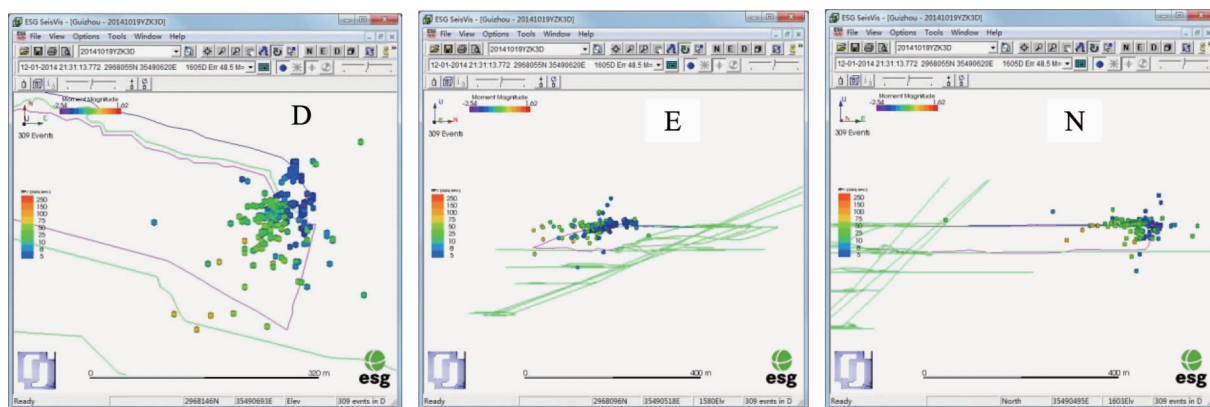
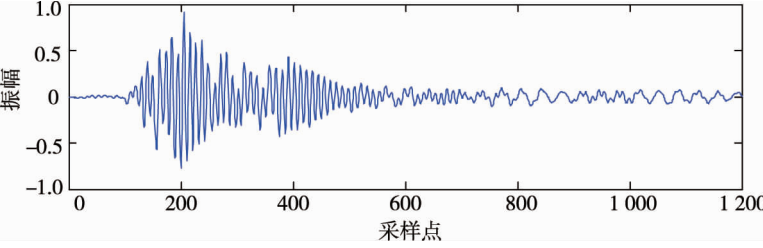
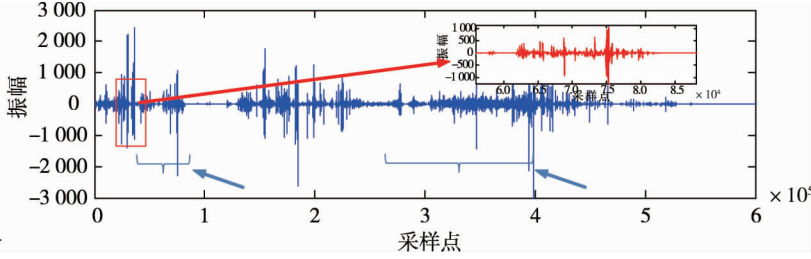
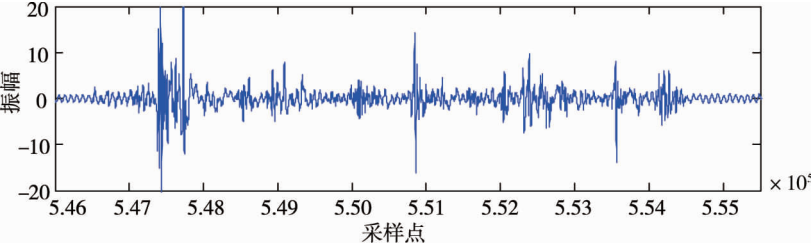
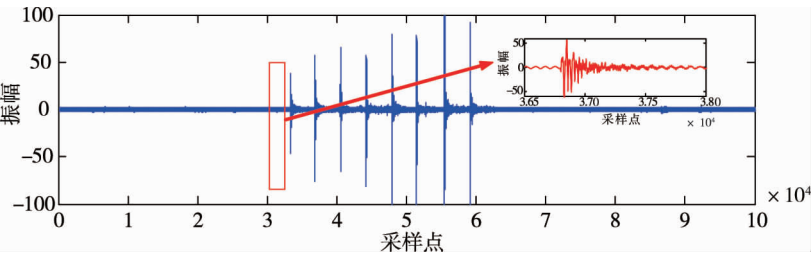


图3 微震事件空间三维展示

3.2 井下典型信号的微震响应特征

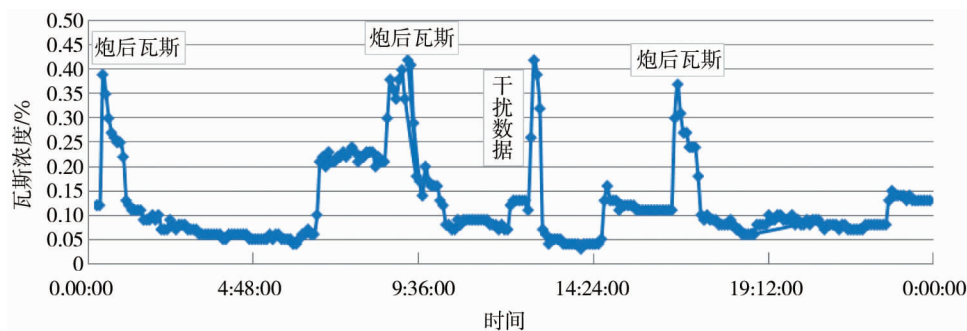
井下采掘活动伴随着大量随机产生的干扰信号,这些信号源包括打钻作业、人为敲击、轨道运输、爆破作业及其他人为干扰等信号,这些干扰信号的存在会影响微震信号的定位计算和结果分析.在现场试验的实施过程中,对主要工序的干扰信号进行测试和采集,便于后期对微震信号的识别提供依据和典型样本.井下典型信号的微震响应特征见表1。

表1 井下典型信号的微震响应特征

干扰信号	特征	典型震动波形
放炮作业	膨胀式破坏,振幅大,衰减快,频率高(一般为200~400 Hz),持续时间短	
打钻作业	呈现脉冲式跳跃,频率受机械的转速主导,所引起的煤壁震颤一般低于100 Hz,属于低频振动信号	
矿车运输	波形渐进式变化,机械振动信号,此类信号的频率较低,一般低于30 Hz,信号振幅较低、信噪比小	
人为敲击	具有明显的振动特征,信号起跳迅速,衰减迅速,振幅较大,波形整体“干净”	

3.3 微震预警指标与瓦斯涌出动态指标的相关性分析

2014年3月5日,义忠煤矿11112回风巷进行爆破作业,在当天的记录中,0时、8时和16时各有1次放炮事件.在起爆瞬间,煤体由于冲击作用发生破坏并产生剧烈震动,煤体破坏后该区域内的应力平衡被破坏并重新分布,从而寻求新的应力平衡.工作面瓦斯传感器(T_1)的监测结果如图4所示.由图4可以看出:每次爆破后瓦斯涌出出现了明显的波动(升高)特征,0时、8时和16时的最大瓦斯浓度分别达到0.39%,0.42%,0.37%.

图4 11112回风巷瓦斯浓度变化曲线(3月5日, T_1)

与此同时,掘进巷道的微震系统准确地记录了爆破作业,并捕捉到爆破后煤岩体内应力的重新分布引

起的微破裂事件如图5所示.在0时、8时和16时分别有相应的微震响应发生,尤其在16时,炸药膨胀以震动形式释放出大量能量,此时监测的微震信号的振幅(能量)达到最大,频率约为200 Hz(距离约200 m),引起巷道内瓦斯传感器的瓦斯监测值发生改变,当出现瓦斯涌出异常(增大或忽大忽小等)时,工作面的突出危险性随之增大.微震事件信号从发生频次、能量和大能量事件频次等方面均与瓦斯涌出的变化有较好的相关性,且其信号特征更能深层次地反映工作面前方突出危险的发展动态和趋势.

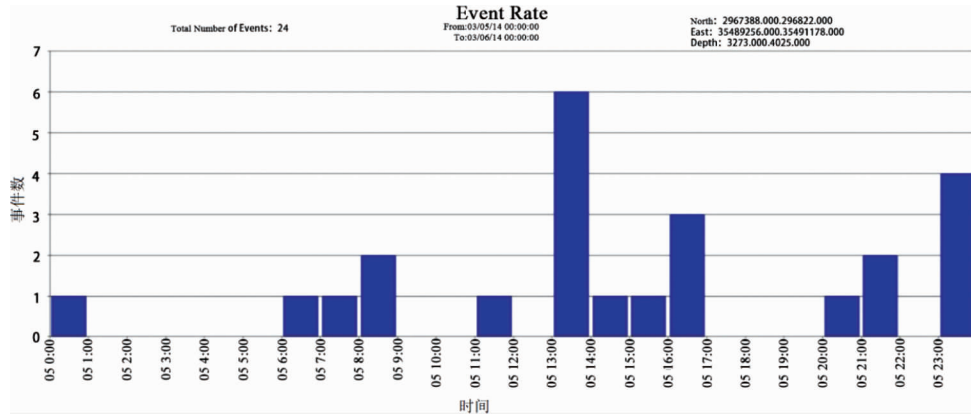


图5 3月5日微震事件发生频次统计(单位:时)

4 微震监测下突出煤层多参量指标预警方法

4.1 预警指标选取与体系构建

4.1.1 微震常规特征指标

煤岩体的破坏程度可以由瞬时释放的能量进行表征,而能量大小会触发相应的微震动.常规的变化特征指标主要包含频次指标 M_f 、能量指标 M_e 和空间分布密度指标 M_d ,三者分别从微震发生的多少、能量大小以及空间集聚程度等方面进行描述.

4.1.2 微震波形异动特征指标

波形的异动特征 I_w 是从微震波形的特征变化角度出发,通过辨识微震波形的异常,对突出灾害进行提前预测.波形异动指标是一个综合概念,主要通过提取微震波形的幅值域特征、时域特征以及频次特征,建立波形的异常变化趋势和识别机制,实现移动波形的判定与识别.

4.1.3 特征指数的计算

对于实时指标而言,由于现场环境和人为采掘等因素的不确定性,不能简单地用单一的指标数值进行判定,需要结合数据前后时序的变化特征进行分析.因此,需要对上述实时指标进行指标系统判据的构建.

1) 数据的准备与处理

在对各项指标进行计算前,首先需要确定参与计算的数据格式及序列长度.微震数据的选取以最小计算为单位,单位计算时长为3 d、重叠时长为1 d.波形特征以典型特征为参照,进行波形特征求解和突变识别两部分的.数据在处理前按照规定的格式处理,并由编制的相关模块进行计算求解.

2) 特征指数的计算

对于微震常规指标而言,其异常指标可构建为

$$M_i = \frac{e - e^{1-\mu_i(t)}}{e - 1}. \quad (1)$$

式中: $\mu_i(t)$ 为该指标在某一段时间 t 内的异常隶属度, $0 \leq \mu_i(t) \leq 1$.

假设日常监测到的微震数据序列为 S (固定时间窗口, d), 则异常隶属度的表述公式 $\mu_i(t)$ 为

$$\mu_i(t) = \frac{S_i - \min(S)}{\max(S) - \min(S)}. \quad (2)$$

式中: S_i 为微震信号的小波包分解.

微震综合指数由波形异动指标 I_w 与常规特征指标 I_s 这两部分所决定.假定常规特征指标 I_s 的综合指

数为可描述为

$$I_s = \sum M_i \mu_i = \sum M_d \mu_d + \sum M_{e1} \mu_{e1} + \sum M_{e2} \mu_{e2} + \sum M_d \mu_d \quad (3)$$

式中： μ_f 为频次指标的隶属度； M_{e1} 为能量指标 1； μ_{e1} 为能量指标 M_{e1} 对应的隶属度； M_{e2} 为能量指标 2； μ_{e2} 为能量指标 M_{e2} 对应的隶属度； μ_d 为空间分布密度指标的隶属度。

最终的微震综合指标指数 I_m 为

$$I_m = (1 - \gamma) I_s + \gamma I_w \quad (4)$$

式中： γ 为波形异动指标的权重值。

4.2 预警模型的构建与实现

煤与瓦斯突出预警的模式如图 6 所示。突出预警模式以基础指标对需要评价的工作面进行突出危险性评价，由评价结果给定综合预警指数的系数；以瓦斯浓度监测和微震监测为主体评价内容，其中瓦斯浓度指标指数为 I_g ，微震实时综合指标指数为 I_m 。

赋予瓦斯浓度指标指数 I_g 和微震实时综合指标指数 I_m 相应的权重为 $\beta, \alpha (\alpha + \beta = 1)$ ，求取最终的突出预警指数 I 。通过构建相应的预警模型和判断阈值（准则）对突出预警指数进行评判，并对相应的危险性等级（程度）予以不同的分级预警。此外，通过现场的实测数据以及异常情况进行对比分析，不断对模型进行检验和修正，从而达到最优预测效果。

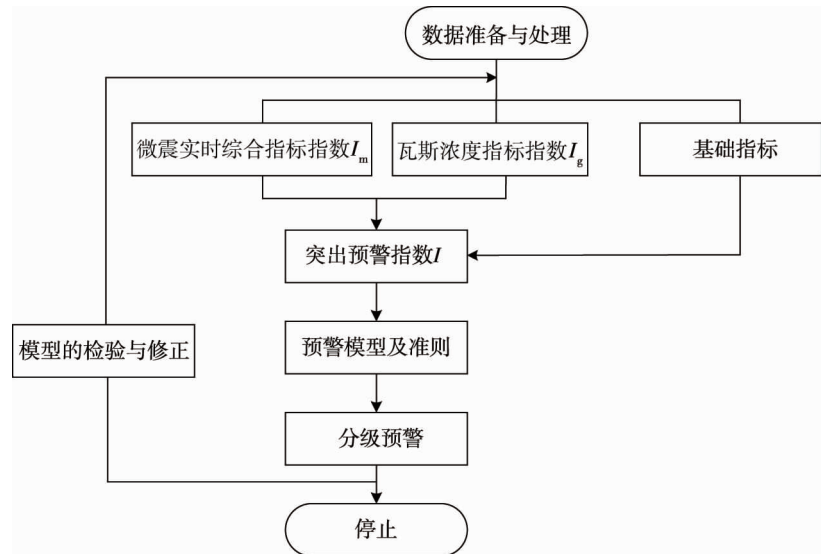


图 6 煤与瓦斯突出预警机制

4.3 多指标联合预警方法

煤岩动力灾害具有复杂、随机和突变的特性，因此，很难从单一预警指标确切地描述灾害发生的时间、地点和区域等信息，这也是难以对煤与瓦斯突出灾害进行准确、快速预测的根本原因。介于单一指标的信息单一性、适用范围有限以及预警可靠性低等缺陷，提出建立基于多参量信息融合的煤与瓦斯突出监测和预警机制，实现煤与瓦斯突出灾害前兆信息的快速识别与准确预警。

结合前文分析，提出基于震动场与瓦斯场的煤与瓦斯突出预警综合指数模型 I ：

$$I = \frac{e - e^{1-\xi}}{e - 1} (\alpha I_m + \beta I_g) \quad (5)$$

式中： I_g 为瓦斯浓度指标指数， $I_g \in [0, 1]$ ； I_m 为微震实时综合指标指数， $I_m \in [0, 1]$ ； ξ 为综合指标系数，用于对综合指标进行约束， $0 < \xi \leq 1$ 。

可以看出： ξ 取决于地质赋存、工序异常（打钻喷孔、卡钻）等基础信息，很大程度上约束着综合预警指数的大小。根据义忠煤矿突出危险性的等级，建议 ξ 取值为 0.8。

4.3.1 综合指标系数 ξ 的确立

综合指标系数 ξ 是综合考虑煤的物理特性、赋存现状以及开采特性，结合现场实测敏感指标及异常情况（煤体剥落、喷孔等）给出的约束综合指标的系数，取值范围为 0~1，详细分类见表 2。

表 2 综合指标系数 ξ

ξ 范围	$0 < \xi \leq 0.25$	$0.25 \leq \xi < 0.50$	$0.50 \leq \xi < 0.75$	$0.75 \leq \xi \leq 1$
取值	0.25	0.50	0.75	1

4.3.2 综合指标权重 α, β 的确立

综合指标权重与2类指标(瓦斯浓度指标指数 I_g 及微震实时综合指标指数 I_m)的特性有关.瓦斯浓度指标指数 I_g 是目前较为常见的预警指标,与煤和瓦斯突出的前兆直接关联,而微震实时综合指标指数 I_m 反映的是煤岩体内部的变化情况,从时效性来讲更具前瞻性,但目前观测 I_m 与瓦斯突出之间的关联性低于 I_g ,因此,建立综合指标权重 α, β 的分选模型,以瓦斯指标指数为判断基准来划分2类权重.综合指标权重 α, β 的具体选取参见表3.在实际观测后期,可根据监测结果与事故发生对应,优化综合指标系数和综合指标权重的数值.

表3 综合指标权重 α, β

指标	I_g 和 I_m 同时或均为超限触发		I_g 或 I_m 单一超限触发	
	系数 α	系数 β	I_g 触发 I_m 未触发	I_m 触发 I_g 未触发
权重值	0.5	0.5	$\alpha=0, \beta=1$	$\alpha=1, \beta=0$

4.4 分级预警机制的构建

为了方便矿山现场对预警事件的快捷处理,根据综合指数的危险程度,对预警模型触发的预警进行分级处理,共划分了4个等级,分别是安全、较安全、危险和高度危险,见表4.详细危险程度的意义及说明见表5.

表4 综合指标危险程度判定标准

综合指标危险程度	$0 \leq I < 0.25$	$0.25 \leq I < 0.50$	$0.50 \leq I < 0.75$	$0.75 \leq I < 1$
判定标准	安全	较安全	危险	高度危险
安全等级	I级	II级	III级	IV级

表5 综合指标危险程度的意义及说明

危险程度	意义及说明	采取措施
安全	正常生产	正常生产
较安全	加强消突措施,并对该区域进行重点监测,对监测结果进行定时定点分析、汇报	加强观测,采取消突措施
危险	应停止该区域的生产,并采取相应的消突措施,待重新检测相关指标合格后,方能生产	停止生产作业,采取消突措施
高度危险	高度危险状态,应立即停止生产,撤离相关人员	停产撤人

根据前一节分析,当瓦斯浓度指标指数 $I_g < 0.6$,综合指标权重 α, β 分别取默认值0.5时,综合指标分级预警结果如表6所示,共4级预警:I级为安全生产区域;II级为较安全区域;III级为一般危险预警区域,即“黄色预警”;IV级为高度危险预警区域,即“红色预警”.

根据多参量分级预警机制设计,预警结果遵循以下2点:

1)当 I_m 和 I_g 不同时,取较大值,如利用微震实时综合指标指数 I_m 得到的煤与瓦斯突出危险等级为“中度危险”,利用瓦斯浓度指标指数 I_g 得到的危险等级为“高度危险”,则综合二者之后得到的结论为“高度危险”.

2)当 I_m 和 I_g 相同时,分4种情况:两者均为“无危险”,则最终结果为“无危险”;两者均为“一般危险”,则最终结果为“中度危险”;两者均为“中度危险”,则最终结果为“高度危险”;两者均为“高度危险”,则最终结果为“高度危险”.

表6 分级预警机制

I_g	I_m			
	I级	II级	III级	IV级
I级	I级	II级	III级	IV级
II级	II级	III级	III级	IV级
III级	III级	III级	IV级	IV级
IV级	IV级	IV级	IV级	IV级

5 结论

1) 构建的义忠煤矿的微震监测系统可保证煤与瓦斯突出“小尺度”监测区域的高精度定位,依托 ESG 自带系统软件功能,实现了微震信号的连续采集、预处理、微震事件的多维展示和时空分析,为实现煤与瓦斯突出微震预警提供理论支撑。

2) 采集了爆破、打钻、轨道运输及人为敲击等煤矿井下典型干扰信号,完成各类型信号的特征分析,认为微震指标的变化特征与突出危险性预测指标、瓦斯涌出指标的变化有较好的一致性。

3) 提出基于多参量指标联合预警的综合预警机制,构建了基于微震实时指标、瓦斯动态指标和基础指标的综合预警模型,义忠煤矿突出危险性的综合指标系数 ξ 取值为 0.8。根据综合指标系数的危险程度,对预警模型触发的预警进行分级处理,为安全、较安全、危险和高度危险 4 个预警响应等级。

参考文献:

- [1] 孔祥国,王恩元,李树刚,等.震动载荷下含瓦斯煤动力学特征[J].煤炭学报,2020,45(3):1099-1107.
- [2] 王涛,王墨华,刘华博,等.冲击地压后瓦斯异常涌出条件及致灾原因分析[J].煤炭学报,2014,39(2):371-376.
- [3] Lu J, Yin G, Gao H, et al. True Triaxial Experimental Study of Disturbed Compound Dynamic Disaster in Deep Underground Coal Mine[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53:2347-2364.
- [4] Wang K, Du F. The classification and mechanisms of coal-gas compound dynamic disasters: A preliminary discussion[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2019,10(1):68-84.
- [5] 王振,尹光志,胡千庭,等.高瓦斯煤层冲击地压与突出的诱发转化条件研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):572-575.
- [6] 刘少虹.动静加载下组合煤岩破坏失稳的突变模型和混沌机制[J].煤炭学报,2014,39(2):292-300.
- [7] 夏方迁,曲效成,魏全德,等.高应力煤柱多关键层断裂诱冲机理及防治[J].煤矿安全,2020,51(5):162-168.
- [8] 张树光,陈雷.冲击地压巷道塑性区本构模型及影响因素研究[J].中国安全科学学报,2019,29(11):141-148.
- [9] Wang W, Zhang S, Li H, et al. Analysis of the Dynamic Impact Mechanical Characteristics of Prestressed Saturated Fractured Coal and Rock[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(19):1-10.
- [10] 王志荣,李潇旋,陈玲霞.基于断层带瓦斯突出的巷道冲击波对围岩的三维动力效应[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1796-1804.
- [11] 荣海,张宏伟,朱志洁,等.煤与瓦斯突出解危措施合理性判别与优化[J].安全与环境学报,2020,20(2):530-538.
- [12] 张永刚,鲍俊睿.过断层破碎带瓦斯应力分析及抽放工艺设计[J].煤矿安全,2020,51(2):142-145.
- [13] 王恩元,刘晓斐,何学秋,等.煤岩动力灾害声电协同监测技术及预警应用[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):942-948.
- [14] 何学秋,窦林名,牟宗龙,等.煤岩冲击动力灾害连续监测预警理论与技术[J].煤炭学报,2014,39(8):1485-1491.
- [15] 窦林名,何学秋,Ren T,等.动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):48-59.
- [16] 高保彬,李回贵,李化敏,等.声发射/微震监测煤岩瓦斯复合动力灾害的研究现状[J].地球物理学进展,2014,29(2):689-697.
- [17] 朱丽媛,李忠华,刘瀚琦.深部开采煤岩瓦斯动力灾害统一发生机制及监测技术[J].安全与环境学报,2017,17(3):937-942.
- [18] 朱权洁,李青松,李绍泉,等.煤与瓦斯突出试验的微震动态响应与特征分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(s2):3813-3821.
- [19] 姜福兴,杨光宇,魏全德,等.煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望[J].煤炭学报,2018,43(2):333-339.
- [20] 李楠,王恩元, GE Mao-chen.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.
- [21] 袁亮,姜耀东,何学秋,等.煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J].煤炭学报,2018,43(2):306-318.
- [22] 李绍泉.近距离煤层群煤与瓦斯突出机理及预警研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [23] 朱权洁,李青松,张尔辉,等.采动影响下突出煤层地质异常区域的微震特征规律研究[J].煤炭科学技术,2019,47(7):39-46.