

潘俊锋,秦子晗,王书文,等.冲击危险性分源权重综合评价方法[J].煤炭学报,2015,40(10):2327-2335.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.6012

Pan Junfeng, Qin Zihan, Wang Shuwen, et al. Preliminary study on early warning method based on weight comprehensive and different-load sources of coal bump [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2327-2335. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.6012

冲击危险性分源权重综合评价方法

潘俊锋^{1,2}, 秦子晗^{1,2}, 王书文^{1,2}, 夏永学^{1,2}, 冯美华^{1,2}

(1.煤炭科学研究总院 开采设计研究分院,北京 100013; 2.天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013)

摘要:针对冲击地压综合监测如何设计及评价结果如何判断的问题,从诱发冲击启动的载荷源着手,提出冲击地压分源监测评价的理论,建立冲击地压分源权重综合评价模型,并开展实践应用研究。结果表明:冲击地压监测以激发冲击启动的载荷源为靶目标,分别对集中动载荷源、集中静载荷源开展分源监测,同时依据载荷源类别、产生原理、时空特征进行方法、方位确定;对不同监测物理量进行归一化处理,采取连续监测数据作为样本分析,通过熵权法进行计算,确定各监测指标对冲击地压贡献率的大小,计算其权重,避免了人为定权的主观因素影响;将分源监测结果进行量化后与权重进行加权计算,并对计算结果采用置信度识别原则,通过验证分析,分源权重综合评价方法能够反映出当前危险程度及发展趋势。

关键词:冲击地压;分源监测;权重综合评价;评价方法

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2015)10-2327-09

Preliminary study on early warning method based on weight comprehensive and different-load sources of coal bump

PAN Jun-feng^{1,2}, QIN Zi-han^{1,2}, WANG Shu-wen^{1,2}, XIA Yong-xue^{1,2}, FENG Mei-hua^{1,2}

(1. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In terms of the problems how to design integrated monitoring system and assess the result of early warning for coal bump, the basic principles of different-load sources monitoring and early warning are presented based on the sources of loading induced shock start. On that basis, the research on the theory and practice are carried out to establish the model of early warning method based on weight comprehensive and different-load sources of coal bump. The results show that: the scientific design of the coal bump monitoring system is the first step for accurate early warning. Sources of loading are the monitoring target of coal bump warning. Dynamic load and static load are monitored respectively based on the principles of producing, production time and spatial distribution characteristics, then the equipment are selected and arranged to carry out the work. Using the method of different-load sources monitoring and early warning, different physical quantities are normalized. With the analysis of monitoring data as sample, the weight is calculated according to the contribution rate of coal bump monitoring index by the entropy weight method that could avoid the influence of subjective factors. After the result of different-load sources monitoring quantification, it adopts weighted calculation. Subsequently, the result of calculation uses the credible degree recognition principle. Through the verification and analysis, the method of weight comprehensive early warning can reflect the level of risk and the current development

收稿日期: 2015-08-20 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204097); 国家自然科学基金煤炭联合基金资助项目(U1261211); 天地科技开采生产力转化基金资助项目(KJ-2015-TDKC-05)

作者简介: 潘俊锋(1979—),男,陕西旬邑人,副研究员。Tel: 010-84263121-8202, E-mail: panjunfeng@yeah.net

trend.

Key words: coal bump; different-load source monitoring; weight comprehensive early warning; warning method

冲击地压是发生在矿山井巷或采场周围煤岩体, 由于弹性变形能的瞬间释放而产生的以突然、急剧、猛烈的破坏为特征的动力灾害。冲击危险性评价是根据监测数据对当前区域的冲击地压发生, 即煤岩体瞬间冲出的可能性进行评估, 根据评估结果可发出警告, 一来可以及时疏散人员, 避免造成人员伤亡; 二来可以采取针对性的解危措施, 防止冲击地压的发生。钻屑法是当前使用最广泛的一种简单评价方法, 它根据不同深度每米钻屑量的多少及钻屑过程中的动力现象, 对该地点的冲击危险性进行判断^[1]。王恩元等^[2]研究了利用电磁辐射监测系统冲击危险性评价的方法。窦林名等^[3-4]获得了冲击地压矿井的微震分布特征, 用于指导冲击地压的监测评价。夏永学等^[5]针对微震及地音监测系统的特点, 对监测数据进行了统计分析, 结合矿井现状, 提出了微震监测与地音监测各自的评价指标。姜福兴等^[6-7]提出了钻屑当量法, 用应力测量代替钻屑法检测, 并将其与微震监测相结合, 进行冲击地压的多参量实时评价。近几年, 随着我国学者对冲击地压发生力源机制研究的逐渐明朗, 冲击地压监测评价迅速由单一方法转变为多参量、多尺度综合监测, 文献[8-10]对此进行了研究。尽管如此, 还存在较多问题需要进一步研究, 原因有: ① 监测设计时对激发冲击启动的载荷来源不清楚, 没有考虑这些载荷源在空间及尺度上分布的差异, 因而在设备布置时或者存在盲区, 或者同类型监测设备平行、重复布置; ② 冲击地压的发生往往是由多种力源共同作用的结果, 因此单一的监测评价手段很容易产生漏报、误报现象; ③ 采用了综合监测, 由于各类监测设备的原理不同, 监测适用目标也不同, 因而得出的各自的评价结果, 往往相互矛盾, 最终难以对危险状态综合下定论。

笔者以冲击地压发生载荷源为切入点, 基于冲击启动载荷源时间、空间孕育特征, 提出对冲击启动载荷源开展分源监测, 根据激发冲击启动的实际贡献大小, 对不同监测方法各自的评价指标、结果进行权重综合, 最终得到权重综合评价结果; 基于冲击地压分源权重综合评价理论模型开发了煤矿冲击地压危险性评价及综合评价系统, 在千秋煤矿冲击地压工作面进行了初步验证。

1 冲击地压分源监测评价基本原理

对冲击地压进行评价, 必须掌握冲击地压的发生

机理, 弄清其发生的载荷来源。依据文献[11-12]可知。冲击地压启动的载荷来源主要分为 2 类: 第 1 类是采动围岩系统外集中动载荷, 包括了远场或近场的厚硬岩层活动、采掘爆破等产生的冲击波, 以采场大面积坚硬顶板断裂或上覆高位坚硬顶板断裂、底板断裂、井下爆破产生的瞬间压缩弹性能为主; 第 2 类是采动围岩系统内集中静载荷, 指采动影响产生应力场后, 以顶、底板断裂前产生的集中弯曲弹性能和采场围岩中的集中压缩弹性能为主。

因此, 可根据引起冲击地压的 2 种类型的载荷源的特性选择合理的监测手段, 进行分源监测评价。采用微震监测系统来监测大范围高位坚硬厚岩层断裂所产生的动载荷; 采用地音监测系统来监测小范围低位坚硬厚岩层断裂所产生的动载荷; 采用煤体应力监测系统来监测采动围岩中产生的集中压缩弹性能。其中大范围高位坚硬厚岩层断裂, 是指微震监测系统传感器可覆盖到的半径为 10 km 的球体区域内的高位坚硬厚岩层断裂; 小范围低位坚硬厚岩层断裂, 是指地音监测系统传感器可覆盖到的半径为 300 m 的球体区域内的低位坚硬厚岩层断裂; 冲击地压启动区原位, 是指工作面煤壁前方及巷道两帮煤体中极限平衡区。

2 冲击地压分源权重综合评价模型

由于原理和范围的差别, 当前还没有一种监测手段能够针对冲击地压远场动载和近场静载同时进行监测, 因而, 不能采用单一方法或技术实现冲击危险性判别。提高冲击地压的评价准确率, 不仅需要对反映冲击地压不同危险源状态的监测指标进行分析, 还需要筛选物理意义明确、较为敏感且应用价值高的评价指标, 建立科学的评价准则和模型, 并经得起检验。因此, 基于冲击地压发生的复杂性, 监测手段的多样性等特点, 必须采用多手段联合监测, 多指标综合分析的评价方法, 又根据实际贡献大小, 对不同监测方法各自的评价指标、结果进行权重综合, 建立冲击地压权重综合评价模型, 其主要内容包括指标体系的确定、指标定量处理、指标权重的确定和综合计算模型。

2.1 冲击地压分源评价指标体系及分级

2.1.1 集中动载荷源评价指标体系及分级

(1) 远场岩层动载荷源微震评价分级。

煤矿井下开采活动时, 相比采掘空间, 远场高位岩层活动缓慢, 其破裂向外球面辐射出一种低频($f < 100$ Hz) 高能级震动信号, 称之为微震, 微震监测系统

通过对煤岩破坏启动发射的震动波的响应,实现约 10 km 范围的危险源探测。目前微震监测技术评价

较为成熟的就是冲击地压的微震能量分析法,具体评价分级见表 1。

表 1 冲击危险性的微震能量法评价

Table 1 Evaluation of burst hazard by microseismic energy

危险状态	回采工作面	掘进巷道
a 无危险	① 一般: $10^2 \sim 10^3$ J $E_{\max} < 5 \times 10^3$ J ② $\Sigma E < 10^5$ J/5 m 推进度	① 一般: $10^2 \sim 10^3$ J $E_{\max} < 5 \times 10^3$ J ② $\Sigma E < 5 \times 10^3$ J/5 m 推进度
b 弱危险	① 一般: $10^2 \sim 10^5$ J $E_{\max} < 1 \times 10^5$ J ② $\Sigma E < 10^6$ J/5 m 推进度	① 一般: $10^2 \sim 10^4$ J $E_{\max} < 5 \times 10^4$ J ② $\Sigma E < 5 \times 10^4$ J/5 m 推进度
c 中等危险	① 一般: $10^2 \sim 10^6$ J $E_{\max} < 1 \times 10^6$ J ② $\Sigma E < 10^7$ J/5 m 推进度	① 一般: $10^2 \sim 10^5$ J $E_{\max} < 5 \times 10^5$ J ② $\Sigma E < 5 \times 10^5$ J/5 m 推进度
d 严重危险	① 一般: $10^2 \sim 10^8$ J $E_{\max} > 1 \times 10^6$ J ② $\Sigma E > 10^7$ J/5 m 推进度	① 一般: $10^2 \sim 10^5$ J $E_{\max} > 5 \times 10^5$ J ② $\Sigma E > 5 \times 10^5$ J/5 m 推进度

注: $E_{\max}$ 指震动能量的最大值; ΣE 指一定推进距释放的微震能量总和; 如果确定的冲击地压的危险程度高, 当上述参数降低后, 冲击地压危险性不能马上解除, 必须经过一个昼夜, 或 1 个循环周转后, 逐级解除, 一个昼夜最多只能降低 1 个等级。

(2) 近场岩层动载荷源地音评价分级。

地音是煤岩体破裂释放的能量, 以弹性波的形式向外传递过程中所产生的声学效应。在矿山, 地音是由地下开采活动诱发的, 其震动能量一般为 $0 \sim 10^3$ J; 震动频率高, $150 \sim 3\,000$ Hz。相比微震现象, 地音为一种高频率、低能量的震动。大量科学研究表明地音是煤岩体内应力释放的前兆, 地音信号的多少、大小等指标反映了岩体受力的情况。

根据监测区域内每分钟的地音活动能量和频次, 计算每小时或每班次地音活动的能量和频次, 同时结合井下是否生产, 分别计算得到生产期间或非生产期间的班或小时地音能量和频次异常系数, 包括: ① 生产期间, 班地音频次异常系数 k_{azw} ; ② 非生产期间, 班地音频次异常系数 k_{azn} ; ③ 生产期间, 小时地音频次异常系数 k_{ahw} ; ④ 非生产期间, 小时地音频次异常系数 k_{ahn} ; ⑤ 生产期间, 班地音能量异常系数 k_{ezw} ; ⑥ 非生产期间, 班地音能量异常系数 k_{ezn} ; ⑦ 生产期间, 小时地音能量异常系数 k_{ehw} ; ⑧ 非生产期间, 小时地音能量异常系数 k_{ehn} 。

上述 8 个指标值的计算方法, 以 k_{azw} 和 k_{ezw} 为例, 其计算过程为

$$k_{azw} = \left| \frac{N_{azw} - \bar{N}_{azw}}{\bar{N}_{azw}} \times 100\% \right| \quad (1)$$

式中, N_{azw} 为生产期间, 当前班的地音频次值; $\bar{N}_{azw}$ 为前 10 个生产班地音频次的平均值。

$$k_{ezw} = \left| \frac{E_{ezw} - \bar{E}_{ezw}}{\bar{E}_{ezw}} \times 100\% \right| \quad (2)$$

式中 E_{ezw} 为生产期间, 当前班的地音能量值; $\bar{E}_{ezw}$ 为前 10 个生产班地音能量的平均值。

参照式 (1) (2), 可依次计算其他 6 个指标值。

监测区域冲击危险性大小, 根据地音能量异常系数和频次异常系数进行判断, 按异常系数值划分 4 个危险等级: 危险等级为 a, 无危险, < 0.25 ; 危险等级为 b, 弱危险, $0.25 \sim 1.0$; 危险等级为 c, 中等危险, $1.0 \sim 2.0$; 危险等级为 d, 强危险, > 2.0 。根据不同的危险等级需要制定不同的防治对策, 以确保安全生产。

如果上一个班结束时, 监测区域内冲击危险等级为 a 和 b, 则本班次只进行班危险等级评价, 否则还需要计算每小时的地音能量和频次异常系数。

2.1.2 集中静载荷源评价指标体系及分级

煤体作为冲击地压事故中的主体因素, 也是动静载荷作用的主要承载体, 因此, 可以根据煤体内垂直应力的增幅情况反映出冲击地压危险情况。煤体应力监测系统主要针对集中静载荷的监测与评价, 可以用两个参量来评价危险状态: ① 区域单元内比较相邻时间段测点的相对应力的增速; ② 区域单元内当前测点绝对应力与围岩试样单轴抗压强度的比值。

在对测点冲击危险状态进行判别时, 一般可根据表 2 中的 2 个指标综合衡量。测点冲击危险性共分为 4 类。在根据指数判定测点冲击危险性时, 应考虑到传感器埋设深度 h , 一般可分为浅部 $h < 2$ m 和深部 $h \geq 2$ m。分别利用 2 个指标对测点监测数据进行判别, 最终判别结果以冲击危险等级较高者为准。

表 2 冲击危险性的应力法评价
Table 2 Evaluation of burst hazard by stress of coal seam

危险等级	a 无危险		b 弱危险		c 中等危险		d 强危险	
	$h < 2\text{ m}$	$h \geq 2\text{ m}$	$h < 2\text{ m}$	$h \geq 2\text{ m}$	$h < 2\text{ m}$	$h \geq 2\text{ m}$	$h < 2\text{ m}$	$h \geq 2\text{ m}$
绝对应力指数 S	$S < 0.3$	$S < 1.0$	$0.6 > S \geq 0.3$	$2 > S \geq 1.0$	$1.0 > S \geq 0.8$	$2.0 > S \geq 2$	$S \geq 1.0$	$S \geq 2.0$
绝对应力增速 $v_\sigma /$ ($\text{MPa} \cdot \text{d}^{-1}$)	$v_\sigma < 0.04$	$v_\sigma < 0.06$	$0.06 > v_\sigma \geq 0.04$	$0.08 > v_\sigma \geq 0.06$	$0.08 > v_\sigma \geq 0.06$	$0.1 > v_\sigma \geq 0.08$	$v_\sigma \geq 0.08$	$v_\sigma \geq 0.10$

2.2 分源监测结果的量化

要进行分源监测的综合评价计算,需要对分源监测的结果进行量化分析,即将不同性质、不同单位的指标值能够用一种通用的方式进行数学运算。

首先将上述 3 种监测手段的监测结果统一为 4 种危险等级,按危险程度从低到高依次为 a、b、c、d,分别对应各监测系统评价结果的 4 个等级。按照定性指标的隶属度计算原则,第 i 种监测系统评价结果对第 j 等级的隶属函数为

$$r_{ij}(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i = v_j) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

那么评价结果集合为 $V = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4] = [“a” \ “b” \ “c” \ “d”]$, x 为分源监测的评价结果。这样分源监测的评价结果可以进行量化处理,其量化结果 R 如下:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 综合评价指标权重的确定

由于对矿井冲击危险性评价涉及多种监测手段,多个评价指标,而如何将不同的评价指标综合分析真实反映现场冲击危险,就必然对每个指标对冲击地压发生的贡献率进行设定,即每个指标的权重大小。然而,权重设定后,无论采用哪种算法,特别危险的某 1~2 种评价指标,很可能会被其他危险指数低的指标给中和,从而降低总体评价的危险程度,失去客观公正性。变权综合评价方式就应运而生,其权重大小除了本身对冲击地压发生的贡献率之外,还将受指标危险等级的影响,如果其中某一项指标危险等级较高,其对诱发冲击贡献率又大,其权重便随之增大,来回避其他安全性指标中和。对于权重的确定,笔者先确定指标的属性权重与等级权重,然后采用拉格朗日算子将属性权重和等级权重综合为组合权重,最后建立冲击地压监测评价的相对变权模型。

2.3.1 评价指标属性权重的确定

根据熵的定义,熵是系统无序程度的度量,可以

度量已知数据所含有的有效信息量和确定权重,在评价预测中得到了广泛的应用^[13]。在冲击评价模型中,可以通过对熵的计算确定权重,就是根据各监测评价指标数值的差异程度,确定各指标的权重。在所有评价对象的某项指标值差异越大时,其熵值越小,表明该指标贡献的有效信息量较大,所以其权重较大;反之,如果某项指标值差异较小,其权重也应该较小。如果各评价对象的某项指标值基本相当时,熵值也达到最大,那么该指标可以作为无用信息剔除。熵权作为一种有效合理的权重计算方法,避免了传统权重的求取基本依靠主观判断的方式,而是以现实数据为基础,通过分析指标的熵值变化,较为客观确定指标的权重。在实际操作中,选取一段时间内微震监测、地音监测和煤体应力监测的数据作为基础,通过熵权计算方法,即可求得三种监测方法各自的权重大小。

笔者以义马矿区千秋煤矿半孤岛综放工作面 2013-01-29—2013-02-08、2013-03-08—2013-03-18、2013-04-08—2013-04-18、2013-05-20—2013-05-30 四段连续时间内的监测数据分析结果为样本进行 3 种监测方法的熵权值计算,样本数量共计有 44 个,样本的具体情况见表 3。

下面使用熵权法对上述 3 种监测手段的属性权重进行计算,确定权重主要有以下 3 个步骤^[14]:

(1) 原始数据归一化。为了便于计算,将上述分析结果进行了数量化处理,设 m 个评价指标 n 个评价对象的原始数据矩阵为 $A = (a_{ij})_{m \times n}$,对其归一化后得到 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\max\{a_{ij}\}} \quad (5)$$

其中 $m=3$ 、 $n=44$,经归一化计算,各指标数值均被量化处理,其中等级 a 被量化为 0.25,等级 b 被量化为 0.5,等级 c 被量化为 0.75,等级 d 被量化为 1。

(2) 熵的计算。在有 n 个评价对象,每个对象有 m 个评价指标的问题中,第 i 个指标的熵为

$$h_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (6)$$

式中 $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$, 其中 $k = 1/\ln n$ 。

表 3 评价指标熵权法求值样本

Table 3 Evaluation samples of early warning indicators with entropy method

日期	微震 监测	地音 监测	应力 监测	日期	微震 监测	地音 监测	应力 监测
2013-01-29	a	a	a	2013-04-08	a	a	a
2013-01-30	a	a	a	2013-04-09	a	a	a
2013-01-31	a	b	a	2013-04-10	a	b	b
2013-02-01	b	a	a	2013-04-11	b	b	a
2013-02-02	a	b	a	2013-04-12	a	a	a
2013-02-03	b	a	b	2013-04-13	a	b	c
2013-02-04	b	a	b	2013-04-14	b	a	a
2013-02-05	b	a	b	2013-04-15	b	b	a
2013-02-06	b	b	b	2013-04-16	a	b	b
2013-02-07	c	a	d	2013-04-17	c	a	d
2013-02-08	c	c	a	2013-04-18	a	b	b
2013-03-08	b	a	a	2013-05-20	a	a	a
2013-03-09	a	b	a	2013-05-21	a	a	a
2013-03-10	b	a	a	2013-05-22	b	a	a
2013-03-11	a	a	b	2013-05-23	b	b	a
2013-03-12	c	a	b	2013-05-24	d	c	b
2013-03-13	b	a	b	2013-05-25	b	a	b
2013-03-14	b	a	b	2013-05-26	a	b	a
2013-03-15	b	a	b	2013-05-27	a	b	a
2013-03-16	b	a	b	2013-05-28	a	b	b
2013-03-17	c	b	d	2013-05-29	c	a	d
2013-03-18	b	a	b	2013-05-30	a	b	b

在对样本 44 个评价对象中 3 个评价指标的熵值计算, 其结果为

$$H = [0.975 \quad 0.980 \quad 0.969]$$

(3) 熵权的计算。在计算得到第 i 个指标的熵之后, 那么第 i 个指标的熵权计算为

$$w_i = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i} \quad (0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1) \quad (7)$$

根据计算公式, 得到 3 种监测方法的属性权重为

$$W' = [0.327 \quad 0.263 \quad 0.410]$$

2.3.2 评价指标等级权重的确定

指标的等级权重, 即该指标样本值对应的单指标指数所属的安全等级的权重。根据前文研究, 将评价指标按照危险程度划分了 4 个等级, 给每个等级都设定一个权重。计算评价指标的等级权重 w_{ij} , i 为评价单元的第 i 个指标, j 为指标的第 j 等级。依据前文

的指标分级标准, 对应的危险等级越高, 其冲击评价结果的影响就越大, 以此为依据可以建立相应的模糊互补判断矩阵 $C = (c_{ij})_{k \times k}$, 其中 k 为安全评价的等级数目^[15-16]。建立矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.80 & 0.70 & 0.60 \\ 1.25 & 1.00 & 0.70 & 0.60 \\ 1.43 & 1.43 & 1.00 & 0.70 \\ 1.67 & 1.67 & 1.43 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (8)$$

按方根法计算权重, 得

$$W'' = [0.185 \quad 0.207 \quad 0.266 \quad 0.343]$$

计算其最大特征根 $\lambda_{\max}$ 为

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_i \left[\frac{AW_i}{w_i} \right] = 4.011$$

经一致性检验得

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} = 0.004 < 0.1$$

表明可以接受判断矩阵的结果, 也就是说得到的权重可以采用。在做冲击危险性评价时, 根据每个指标的数值可得其所属的等级, 这个等级所对应的权重就是该指标的等级权重。

2.3.3 权重综合计算评价指标

由于各个指标, 依据它的危险等级大小划分为不同的级别, 这些级别具有与其对应的等级权重, 这个权重是通过层次分析法得到。赋予状态值后的各个指标, 依据其属于的级别就能确定对应的权重^[17], 也就是它的等级权重值。指标的综合权重 W 可由下式求得, 即

$$W = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad \cdots \quad w_n]$$

其中,

$$w_i = \frac{\sqrt{w_i' w_i''}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w_i' w_i''}} \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (9)$$

式中 w_i' 和 w_i'' 分别为第 i 个指标的属性权重和等级权重; n 为指标个数。

通过上面的计算方法, 就能得到要评价指标对应的动态权重。由于等级权重是通过指标的危险等级确定, 所以通过两类权重综合得到的综合权重能够随危险等级的变化而变化, 从而回避了固定权重中部分指标被中和的情况, 从而得到的评价结果更客观可靠。

2.4 权重综合评价结果

根据分源监测系统的评价结果, 将其量化后得到的评判矩阵与各监测系统的综合权重进行模糊计算, 由式(10)计算最终评价结果。

$$U = W \cdot R = [w_1 \quad w_2 \quad w_3] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{bmatrix} \quad (10)$$

所得结果为对评价集的隶属向量 U 。

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4]$$

对于结果,采用置信度识别原则^[18],设 λ 为置信度 ($\lambda > 0.5$,通常取 $\lambda = 0.6$ 或 0.7),令

$$k_0 = \min_k \left| k: \sum_{i=1}^k u_i > \lambda \quad k = 1, 2, 3, 4 \right| \quad (11)$$

由此判断过计算结果属于第 k_0 等级。

通过上述计算过程,可以将不同分源监测的评价结果进行综合分析,解决了不同监测系统结果存在相互矛盾的问题。但根据现场情况,钻屑法监测的时效性目前不能够实现工作面实时评价的需要,因此综合评价方法主要针对在线监测系统。日常评价主要以在线监测系统的综合评价结果为依据,当冲击危险等级达到 c 级时,可以根据现场需要采用钻屑法进行验证,以两者的较危险等级为最终结果。最终进行权重综合评价后,对综合结果采取相应防治对策,具体见表 4。

3 工程实践

前文基于冲击地压危险源时间、空间孕育特征,

表 4 冲击危险状态分级及相应对策
Table 4 Burst hazard grade and the corresponding countermeasures

危险等级	危险状态	防治对策
a	无危险	监测区采掘工作面可正常作业
b	弱危险	采掘过程中,加强冲击地压危险的监测预报
c	中等危险	进行采掘作业的同时,针对局部危险区域控制人员进入数量,并采取相应的“支-卸”措施
d	强危险	停止采掘活动,人员撤离危险地点;采取相应“支-卸”措施;监测检验危险是否解除,解除危险后方可进行下一步作业

提出对冲击地压载荷源开展多种手段分源监测,根据实际贡献大小,对不同监测方法各自的评价指标、结果进行权重综合,最终得到权重综合评价结果,为了进行生动的评价图形展示,促使冲击地压监测评价人员直接快速的完成以上工作,而不再做重复性的原始研究,形成有效的冲击地压综合评价系统,本文基于冲击地压分源权重综合评价理论模型开发了煤矿冲击地压危险性评价及综合评价系统,如图 1 所示。系统包括了五大模块,分别为:三维模型构建、模型及监测三维展示、监测数据管理、办公应用、系统管理。

自 2012-03-01 开始,采用评价系统对 21141 工作面范围内的冲击地压进行危险评价与评价工作,截

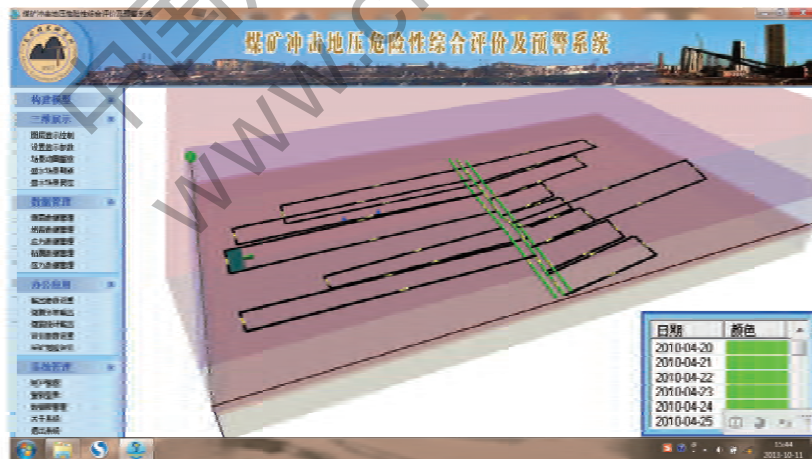


图 1 煤矿冲击地压危险性综合评价及评价系统主界面

Fig. 1 Main interface of burst risk comprehensive evaluation and early warning system of coal bump

止 2013-10-01 共进行了 608 d 的评价验证,效果良好。例如:2013-02-08 正在开采的 21141 工作面发生一起高能冲击事件,定位坐标为(4 200 2 878, -72),事件位于工作面前方 85 m 处,释放能量 1.63×10^7 J。震源距下巷煤帮约 36 m,靠近煤层底板。

根据 2013-01-29—2013-02-06 监测数据,微震和地音评价结果均为危险性较低的 a 级和 b 级,监测

结果三维显示如图 2 所示。直到冲击事件发生前一天,危险等级均上升至评价级别,其中微震评价等级为 c 级,地音评价等级为 a 级,应力监测评价等级为 d 级,权重综合 3 种评价结果,确定 2013-02-07 冲击危险等级为最高的 d 级(图 3),21141 工作面冲击危险性评价结果见表 5,2013-02-08 T 15:48 发生冲击,释放能量 1.63×10^7 J。

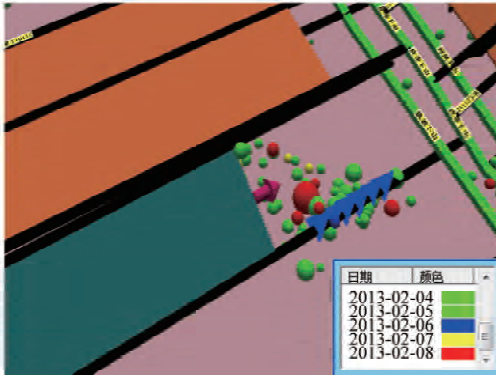


图 2 微震事件定位三维显示(2013-01-29—2013-02-08)

Fig. 2 Location of 3D display map of microseismic events

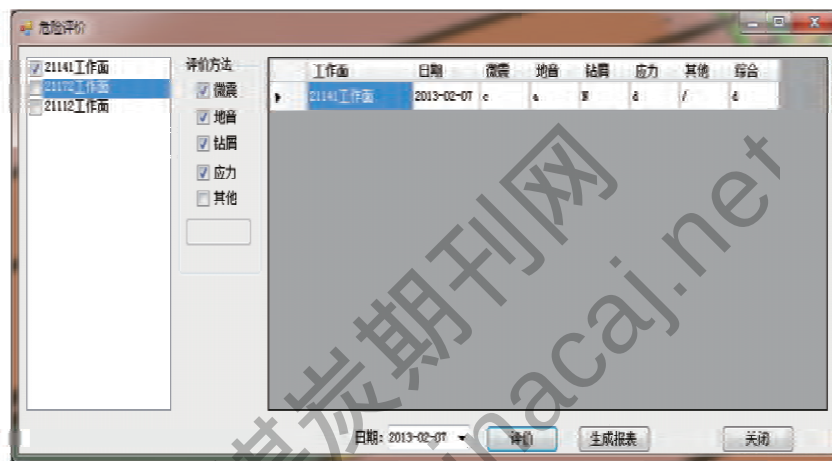


图 3 2013-02-07 评价系统评价结果

Fig. 3 Results of evaluation in February 7th

表 5 综合评价结果

Table 5 Results of comprehensive evaluation

日期	微震监测	地音监测	煤体应力监测	综合
2013-01-29	a	a	a	a
2013-01-30	a	a	a	a
2013-01-31	a	b	a	b
2013-02-01	b	a	a	b
2013-02-02	a	b	a	b
2013-02-03	b	a	b	b
2013-02-04	b	a	b	b
2013-02-05	b	a	b	b
2013-02-06	b	b	b	b
2013-02-07	c	a	d	d
2013-02-08	c	c	a	c

(1) 空间分区。

煤矿采掘活动区域不止一个,对于微震法监测而言,由于其监测范围为整个井田,记录的微震信号是多个采掘工作面影响的结果。而且由于各个采掘作业区的地质和开采技术条件不尽相同。为区分在不同影响条件下产生的微震,就要对煤矿中不同发

该冲击地压综合评价模型进入实用阶段后,每天利用监测数据对当前工作面进行预警,当评价结果达到“c”级以上时,及时在工作面前方应力集中区域进行大直径钻孔卸压和爆破卸压。截至 21141 工作面回采结束,未发生造成人员伤亡和设备损坏的冲击事故,实现了强冲击危险工作面的安全回采。

4 问题与建议

笔者尝试采用分源权重综合评价方法来评价煤矿冲击地压危险性状态,经过现场验证初步指导了实践应用,通过本研究,提出冲击地压综合评价今后需进一步研究的问题。

生微震的区域进行划分,针对性的对具有不同危险程度的区域进行监测评价。

本文评价系统分区主要以工作面为基本单位,对回采工作面以工作面巷道、开切眼以及工作面巷道巷口连接线为界外延 50 m 的封闭区域。分区确定后即可统计一段时间段内各评价指标的变化规律,研究在不同地质和开采技术条件微震等方法中各评价指标规律,从而用于冲击地压的预测预报。

(2) 层次化评价。

微震监测范围为整个井田,地音监测范围为工作面范围,煤体应力监测工作面煤帮以里约 30 m 范围,钻屑法针对前几种监测方法划分出的局部危险区域进行确认。煤炭开采,尤其深部煤炭开采,冲击启动载荷源,高位硬顶板,低位直接顶都有可能参与,加之构造,临近开采条件的变化,导致冲击地压危险源时间、空间都存在差异,为了不产生盲区,应根据载荷源的差异,选取各自对应的监测手段,实现层次化监测评价。但必须都聚焦于同一个特定区域,如此才能实现该区域综合评价。图 4 为空间层次化评价示意。

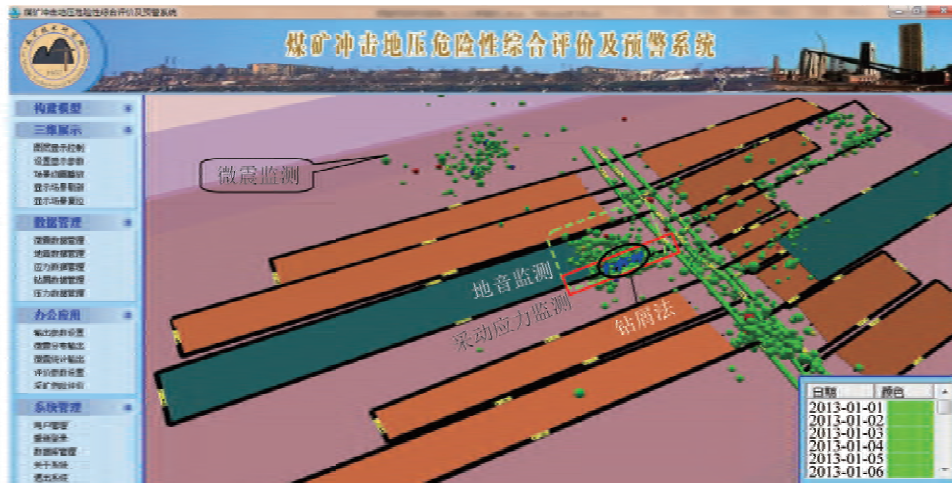


图 4 空间层次化评价示意

Fig. 4 Schematic of the hierarchical warning

(3) 降低布置误差。

目前可以用来评价冲击地压的方法或装备,无论哪一种,其自身所存在的误差不可避免,越是先进,则误差相对降低很多,而在设备安装时又有二次误差的产生,比如说,微震监测系统至少需要 4 个拾震器来完成一个事件的定位,所以所要监测的区域需要在拾震器布置的立体网络覆盖区内,而实际生产过程中采区的首采面或边界工作面,尤其是掘进工作面没有可布置拾震器的硐室、巷道,更不用说拾震器布置位置存在高差,就不能形成立体网络。所以水平煤层及矿井边界采掘区需注意传感器布置方位。

5 结 论

(1) 冲击地压监测评价应该以激发冲击启动的载荷源为靶目标,根据诱发冲击的集中动载荷源,集中静载荷源开展分源监测,同时需考虑不同类载荷源产生原理,同类载荷源产生的时间、空间分布特征来筛选方法与设备,并布置方位,因此,科学的冲击地压监测设计是准确评价的第 1 步。

(2) 针对综合评价结果出现矛盾的现象,采取连续监测数据作为样本分析,通过熵权法进行计算,确定各监测指标对冲击地压贡献率的大小,计算其权重。该方法避免了人为定权的主观因素影响,采用实际数据得出权重,更具客观性。

(3) 将分源监测结果进行量化后与权重进行加权计算,并对计算结果采用置信度识别原则。通过实例分析,分源综合评价方法能够反映出当前危险程度及发展趋势。

参考文献:

[1] Gu S T, Wang C Q, Jiang B Y, et al. Field test of rock burst danger

based on drilling pulverized coal parameters [J]. Disaster Advance, 2012, 5(4): 237-240.

[2] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤炭动力灾害电磁辐射监测仪及其应用 [J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 366-369.

Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhen tang, et al. Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 366-369.

[3] 曹安业, 龚林名, 李志华, 等. 高应力区微震监测信号特征分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 146-149, 154.

Cao Anye, Dou Linming, Li Zhihua, et al. Characteristic of microseismic monitoring signal in high stressed zone [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(2): 146-149, 154.

[4] Dou Linming, Chen Tongjun, Gong Siyuan, et al. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workplace [J]. Safety Science, 2011, 50(4): 736-740.

[5] 夏永学, 蓝航, 魏向志. 基于微震和地音监测的冲击危险性综合评价技术研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(S2): 354-359.

Xia Yongxue, Lan Hang, Wei Xiangzhi. Study of comprehensive evaluation technology for coal bump hazard based on microseismic and underground sound monitoring [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 354-359.

[6] 姜福兴, 曲效成, 于正兴, 等. 冲击地压实时监测预警技术发展趋势 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 58-63.

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): 58-63.

[7] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2346-2351.

Qu Xiaocheng, Jiang Fuxing, Yu Zhengxing, et al. Rockburst monitoring and precaution based on equivalent drilling research and its applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2346-2351.

[8] 王超. 基于未知测度理论的冲击地压危险性综合评价模型及应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.

- [9] 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.
- [10] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 煤样失稳破坏的多参量监测试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 667-674.
Jiang Yaodong, Lü Yukai, Zhao Yixin, et al. Multi-parameters monitoring experiments for the instability coal samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 667-674.
- [11] 潘俊锋, 蓝航, 毛德兵, 等. 冲击地压危险源层次化辨识理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2843-2849.
Pan Junfeng, Lan Hang, Mao Debing, et al. Study on hierarchical recognition theory of hazard source in coal bump[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2843-2849.
- [12] 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 Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 586-596.
- [13] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1230.
Cheng Qiyue. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1230.
- [14] 罗军刚, 解建仓, 阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1092-1098.
Luo Jungang, Xie Jiancang, Ruan Benqing. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1092-1098.
- [15] 丁香乾, 石硕. 层次分析法在项目风险管理中的应用[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 30(1): 97-102.
Ding Xiangqian, Shi Shuo. Application of the analytic hierarchy process to project risk management[J]. Journal of Ocean University of China, 2004, 30(1): 97-102.
- [16] 曹庆奎, 杨艳丽, 于瑞龙. 基于未确知集的煤矿安全评价[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 181-185.
Cao Qingkui, Yang Yanli, Yu Ruilong. The coal mines safety appraisal based on unascertained set[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 181-185.
- [17] 秦子晗, 彭永伟. 基于动态权重的区域冲击危险性评价方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(10): 18-21.
Qin Zihan, Peng Yongwei. Study on evaluation method of mine regional pressure bumping danger based on dynamic weight[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(10): 18-21.
- [18] 秦子晗. 煤矿安全动态评价模型的研究与应用[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2009.