

基于云模型的采场冒顶片帮事故预警方法研究*

李明海,常通,杨一帆

(西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为了能够及时预警矿山冒顶片帮事故安全风险,实现事前预防和控制事故发生,减少人员伤亡和经济损失,构建了基于云模型-组合赋权法的冒顶片帮事故预警方法。首先,基于2-4模型确定了26个指标构成的冒顶片帮事故预警指标体系,把预警等级划分成5个等级;其次,采用乘法积分法将层次分析法和熵权法相结合,计算出26个预警指标组合权重,有效避免了两种赋权方法的局限性;最后,将组合赋权法与云模型相结合,构建了冒顶片帮事故预警模型。并将其应用于铜陵某金属矿山,通过案例研究,采用该预警方法得出的结果与实际情况相吻合,验证了该方法的准确性、可操作性和有效性。

关键词:冒顶片帮;安全风险预警;云模型;2-4模型;组合赋权

0 引言

近年来,我国矿山企业在安全生产方面的形势持续改善,安全生产事故明显减少。但不能忽视的是,冒顶片帮事故总量依然偏高,这些事故的发生给人们的生命、财产造成了巨大的损失,给社会带来了不良的影响,阻碍了矿山的继续发展。根据2017年全国非煤矿山生产安全事故统计分析报告,矿山中发生最多的事故类型是冒顶片帮事故,不仅起数最多,死亡人数也最多,近30%的伤亡事故与冒顶片帮事故有关。每年都有多起矿山发生冒顶片帮事故,如:2022年4月5日,栾川县洛阳百代公司大清沟金属矿山发生一起一般冒顶事故,导致2人死亡,直接经济损失达295万元。因此,采取有效的预警方法来预防和控制事故发生,是摆在我们面前的一个迫切任务。

学者们针对矿山冒顶片帮事故安全风险问题已有一定的研究,刘振平等运用事故树分析方法和灰色预测模型建立了采场顶板冒落事故预测模型,并用VC将此预测步骤开发为顶板冒落预测系统。LI等建立了基于FFTA-DFCE和风险矩阵方法的综合模型来评估冒顶片帮事故的风险,并应用到某矿山,验证了该模型对冒顶片帮事故风险分析和预测的有效性和可行性。XIE等采用灰色理论分析法预测冒

顶片帮事故发生的变化趋势,使用灰色代数曲线模型(GAM)预测冒顶分离,结果表明,GAM方法给出了较好的预测结果,预测的发展趋势反映了实际情况。综上所述,现有对矿山冒顶片帮事故的预警研究成果较为丰富,多采用的是FTA、灰色预测模型、模糊综合评价方法等传统的方法,尚未无将2-4模型、云模型和组合赋权法运用到矿山冒顶片帮事故预警的研究。本文基于2-4模型构建冒顶片帮事故安全风险预警指标体系,并将组合赋权法与云模型运用于冒顶片帮事故安全风险预警研究,以期矿山企业实现预防和控制冒顶片帮事故发生提供预警方法。

1 预警指标体系构建及等级划分

1.1 预警指标体系构建

本文基于2-4模型,结合相关研究文献及国家矿山标准规范,从不安全动作、不安全物态、习惯性不安全行为、安全管理体系、安全文化、组织外部因素6个维度构建了冒顶片帮事故安全风险预警指标体系,如图1所示。

1.2 预警等级划分

目前尚无统一标准的冒顶片帮事故安全风险预警分级体系,根据《国家突发公共事件总体应急预案》,按照危害程度、严重程度、发展趋势划分了预警

* 收稿日期:2023-05-06

作者简介:李明海(1971—),男,陕西澄城人,博士,正高级工程师,主要从事建筑智能化及建筑安全与防火方面的研究, E-mail: lmh369lmh@126.com。

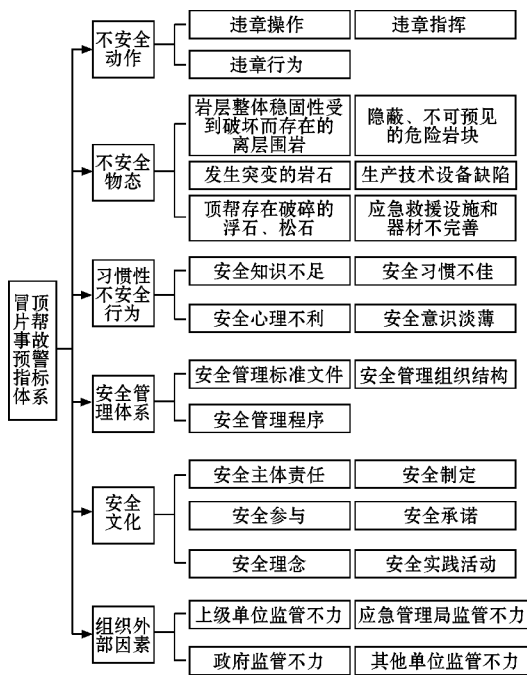


图1 冒顶片帮事故安全风险预警指标体系

表1 冒顶片帮事故安全风险预警等级划分

预警等级	预警界限	预警程度	预警信号	含义
I级	(8, 10]	巨警	红色	随时可能出现事故,需立即停工整改。
II级	(6, 8]	重警	橙色	有较大可能发生事故,需进行全面整改。
III级	(4, 6]	中警	黄色	事故发生可能性一般,需要有针对性地整改。
IV级	(2, 4]	轻警	蓝色	事故发生的可能性较小,需检查所采取的安全措施执行情况。
V级	[0, 2]	无警	绿色	处于安全状态,风险可忽略,不需要采取任何措施。

决策与实验室方法(DEMATEL)等,这种方法具有很强的主观性。客观赋权法通常有变异系数法(COV)、CRITIC方法、熵权法(EWM)、反熵权法(Anti-EWM)等方法,这种方法依赖于客观数据,不能充分考虑指标之间的相关性。这两种方法都是不完美的,因此,本文采用组合赋权法确定指标权重,采用层次分析法和熵权法通过式(1)的乘法积分法提高主客观权重,有效避免上述两种加权方法的局限性。

$$w_i = w_i' w_i^* / \sum_{i=1}^m w_i' w_i^* \quad (1)$$

式中, w_i 为组合权重; w_i' 为主观权重; w_i^* 为客观权重; m 为指标数量; i 为第 i 个指标。

2.1.1 层次分析法

层次分析法(AHP)是一种常见的主观赋权法,它根据专家经验比较每个指标的重要性,从而计算出各指标的主观权重值。具体步骤如下。

(1) 建立一个逐层递阶的模型,其中有3个层

等级,包括I级(特别重大),用红色表示;II级(重大),用橙色表示;III级(较大),用黄色表示;IV级(一般),用蓝色表示。根据专家意见以及相关研究文献,确定将冒顶片帮事故安全风险预警等级进行划分,包括I级(特别严重)、II级(严重)、III级(较重)、IV级(一般)、V级(安全)5个等级,并用红色、橙色、黄色、蓝色、绿色表示巨警、重警、中警、轻警、无警的信号输出。假设警报等级量化取值范围为[0, 10],详见表1。

2 冒顶片帮事故风险预警方法构建

2.1 基于组合赋权法的指标权重确定

权重是指事故影响因素对判断目标对象的相对重要程度。一般来说,确定指标权重的方法可以分为三种:主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。不同的赋权方法可能会导致不同的权重结果。主观赋权法通常有层次分析法(AHP)、网络分析法(ANP)、

次;最高层是目标层;中间层是准则层;最底层是指标层。

(2) 构造判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 定义矩阵 A 中的元素,其中 a_{ij} 为指标 i 相对于指标 j 的重要程度,引用数字1~9及其倒数作为标度,这些数字可以表示不同的相对重要性或优先级。具体见表2。

表2 判断矩阵标度定义

标度	含义
1	表示两个元素彼此具有相同的重要性。
3	表示两个元素相比,前者比后者稍重要。
5	表示两个元素相比,前者比后者明显重要。
7	表示两个元素相比,前者比后者强烈重要。
9	表示两个元素相比,前者比后者极端重要。
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值。

(3) 一致性检验。

计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值。

查找一致性指标 RI , 具体见表 3。

表 3 平均随机一致性指标

n	1	2	3	...	26	27	28
RI	0	0	0.52	...	1.6587	1.6631	1.667

计算一致性比例 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵是可接受的。

(4) 按照如下公式计算指标权重 w_i' 。

$$w_i' = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

2.1.2 熵权法

熵权法是一种常见的客观赋权方法, 其理论基础来源于信息熵。信息熵是对热力学中熵概念的引用, 用于描述事件信息的大小。根据信息熵的定义, 熵值可以用来判断某个指标的离散度。具体计算步骤如下。

(1) 构建原始数据矩阵。

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, x_{ij} 为第 j 个专家对第 i 个指标的评价值, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; m$ 为指标个数, n 为专家数。

(2) 原始矩阵标准化, 使用最小—最大归一化方法。

$$\begin{cases} x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \\ x'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \end{cases} \quad (6)$$

记 x'_{ij} 为 x_{ij} , 为避免归一化为 0 和 1, 设置 x_{ij} 的最大值 $(x_{ij})_{\max} = 0.998$, 最小值 $(x_{ij})_{\min} = 0.002$ 。

(3) 计算指标值 x_{ij} 在指标 i 下的权重。

$$p(x_{ij}) = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (7)$$

(4) 计算指标 i 的熵 e_i 。

$$e_i = -\frac{1}{\ln} \sum_{j=1}^n p(x_{ij}) \ln p(x_{ij}) \quad (8)$$

(5) 计算指标 i 的权重 w_i^* 。

$$w_i^* = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad (9)$$

2.2 基于云模型的事故风险预警模型构建

2.2.1 预警模型结构模式

影响矿山冒顶片帮事故发生的因素复杂多样, 为能够实现矿山冒顶片帮事故预警, 准确划分冒顶片帮事故风险等级, 本文将组合赋权法与云模型有机结合, 构建矿山冒顶片帮事故安全风险预警理论模型, 如图 2 所示。

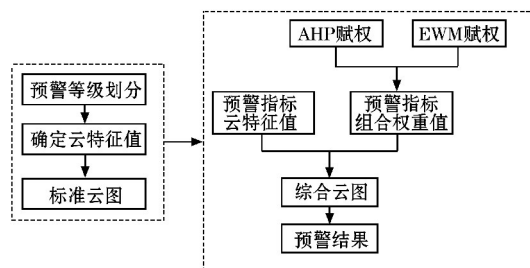


图 2 冒顶片帮事故安全风险预警理论模型

2.2.2 云模型

云模型理论是不确定语言描述与定量表达之间的转换模型, 可以将定性的语言描述转化为定量的数学表达, 同时也可以将定量的数学数据转化为定性的语言描述。设论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ 代表一个具体问题中的所有可能取值, C 代表 U 中的一个定性概念, 如果 x 是属于 U 中概念 C 的一个定量表现的元素, 那么它的特征隶属度 $\mu(x) \in (0, 1)$ 就是一个随机数值, 代表着 x 对 C 的归属程度, 即:

$$\mu: U \rightarrow [0, 1] \quad \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$$

每个 x 都被看作是一个云滴, 这些云滴构成了整个 U 上的云。每个云滴 x 都对应一个隶属度, 都是定性概念的数学转换映射到数字空间的点。

云模型通过期望 (E_x)、熵 (E_n) 和超熵 (H_e) 这 3 个数值特征来描述定性概念的定量特征。其中 E_x 是定性概念在论域中最具有代表的点, 即云的重心位置; E_n 反映了云滴 x 在论域 U 中的取值范围和离散程度, 用来度量定性概念的不确定性, 熵值越大, 离散程度越大, 概念越宏观, 造成的模糊性和随机性越大; H_e 为 E_n 的熵值, 反映了 E_n 的离散程度和随机性。

云模型有两种生成算法,即正向云发生器和逆向云发生器。正向云发生器是将数值特征转化为一定数量的云滴的过程,此转换过程通过 MATLAB 以编程方式实现,云滴的产生是云模型的核心。逆向云发生器是将一定数量的云滴转换为数值特征的过程,实现定量描述到定性分析的转换,具体如图 3 所示。

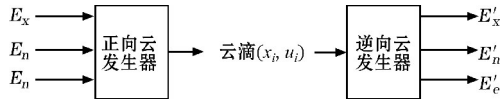


图 3 正向和逆向云发生器

正向云发生器的算法步骤如下:

- (1) 生成正态随机数 $E_{n_i} = \text{NORM}(E_n, H_e^2)$, 其中 E_n 为期望值, H_e^2 为方差;
- (2) 生成正态随机数 $x_i = \text{NORM}(E_x, E_n^2)$, 其中 E_x 为期望值, E_n^2 为方差;

- (3) 计算 x_i 的隶属度 $u_i = e^{-\frac{(x_i - E_x)^2}{2(E_n)^2}}$, 产生云滴 (x_i, u_i) ;

- (4) 重复步骤(1)到步骤(3) n 次(本文取 $n = 3000$), 直到产生 n 个云滴。

逆向云发生器的算法步骤如下:

- (1) 计算样本均值 $\bar{x}$ 。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

- (2) 计算样本方差 s^2 。

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (11)$$

- (3) 计算特征值 E_x, E_n, H_e 。

$$\begin{cases} E_x = \bar{x} \\ E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \\ H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \end{cases} \quad (12)$$

2.2.3 方法构建

结合 1.2 中的冒顶片帮事故预警等级划分的评语集, 根据式(12)计算预警等级的云特征值。

$$\begin{cases} E_x = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{6} \\ H_e = K \quad (K \text{ 为常数}) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $U_{\max}$ 为各预警区间最大值; $U_{\min}$ 为各预警区间最小值; K 为常数, 通常在 $0.01 \sim 0.1$ 取值, 本文取 $K = 0.1$ 。

根据公式计算各预警等级评语集云特征值, 如表 4 所示。

表 4 预警等级及云特征值

预警等级	云特征值
V 级	(1, 0.33, 0.1)
IV 级	(3, 0.33, 0.1)
III 级	(5, 0.33, 0.1)
II 级	(7, 0.33, 0.1)
I 级	(9, 0.33, 0.1)

借助 MATLAB 软件编写云发生器代码, 根据采场冒顶片帮事故各预警等级评语集的云特征值, 生成由 $n = 3000$ 个云滴组成的标准云图, 如图 4 所示。

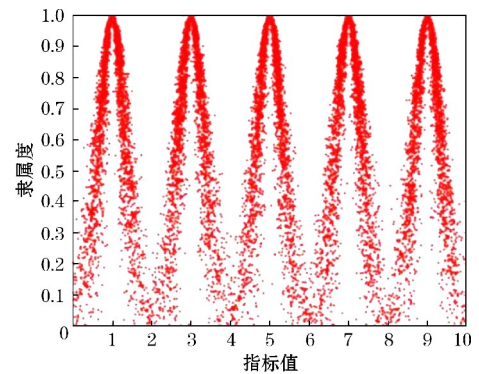


图 4 冒顶片帮预警等级标准云图

2.2.4 预警方法步骤

选取某个矿井, 邀请专家对该矿井的各项指标进行考察, 并对指标发生的可能性进行打分, 由 2.2.2 中的逆向云发生器的算法步骤得到 26 个指标的云特征值。指标可能性等级划分标准见表 5。

表 5 指标可能性划分标准

等级	区间值	等级	区间值
极小	[0, 2]	很可能	(6, 8]
不太可能	(2, 4]	极大	(8, 10]
有可能	(4, 6]		

根据式(1)~式(9)计算得到的 26 个指标组合权重值, 和专家打分计算得到的 26 个指标云特征值, 根据式(14)计算综合云特征值。

$$\begin{cases} E_x = \sum_{i=1}^n E_{xi} w_i \\ E_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_{ni}^2 w_i} \\ H_e = \sum_{i=1}^n H_{ei} w_i \end{cases} \quad (14)$$

式中, E_{xi} 为第 i 个指标评分的指标期望值; E_{ni} 为第 i 个指标评分的指标熵值; H_{ei} 为第 i 个指标评分的指标超熵; w_i 为第 i 个指标的组合权重值。

利用 2.2.2 中的正向云发生器的算法步骤将得到的综合云特征值借助 MATLAB 软件编写云发生器代码,从而生成云图。将得到的云图与预警等级标准云图进行对比,以 E_x 为主要预警标准,重合度最高的判断为该矿井的最终预警等级。

采用人工方式进行发布,管理人员或领导者根据判断的预警结果发布预警警情。

3 实证研究

本文选做应用研究的是铜陵市某金属矿山,开采的矿种是硫铁矿,该矿拥有安全生产许可证,生产规模为 200 t/a;开采深度为 +180 m 至 -680 m。有三个独立生成系统,其中两个是地下开采系统,分别为东翼和西翼地下开采系统,另外一个露天开采系统。

3.1 指标权重的计算

3.1.1 主观权重 w_i' 的计算

利用层次分析法对上述预警指标体系所列出的 26 项状态指标进行主观赋权,得出各指标主观权重 $w_i' = [0.0123 \ 0.0162 \ 0.0223 \ 0.0486 \ 0.0951 \ 0.0246 \ 0.0967 \ 0.0680 \ 0.0680 \ 0.0104 \ 0.0293 \ 0.0066 \ 0.0533 \ 0.0065 \ 0.0218 \ 0.0218 \ 0.0099 \ 0.0102 \ 0.0099 \ 0.0260 \ 0.0111 \ 0.0261 \ 0.1154 \ 0.0497 \ 0.0497 \ 0.0907]$ 。

3.1.2 客观权重 w_i^* 的计算

利用熵权法对上述预警指标体系所列出的 26 项状态指标进行客观赋权,得出各指标客观权重 $w_i^* = [0.0073 \ 0.1130 \ 0.0350 \ 0.0051 \ 0.0208 \ 0.0036 \ 0.0189 \ 0.0635 \ 0.0926 \ 0.0051 \ 0.0859 \ 0.0051 \ 0.0175 \ 0.0208 \ 0.0208 \ 0.0073 \ 0.0073 \ 0.0926 \ 0.0062 \ 0.0208 \ 0.1130 \ 0.0350 \ 0.0694 \ 0.0350 \ 0.0350 \ 0.0635]$ 。

3.1.3 组合权重 w_i 的计算

利用式(1)计算求出各项指标的组合权重 $w_i = [0.0021 \ 0.0426 \ 0.0182 \ 0.0058 \ 0.0462 \ 0.0021 \ 0.0427 \ 0.1009 \ 0.1470 \ 0.0012 \ 0.0588 \ 0.0008 \ 0.0218 \ 0.0032 \ 0.0106 \ 0.0037 \ 0.0017 \ 0.0220 \ 0.0014 \ 0.0127 \ 0.0293 \ 0.0213 \ 0.1872 \ 0.0406 \ 0.0406 \ 0.1346]$ 。

3.2 确定预警指标云特征值

邀请 5 位专家依据考察情况对各指标发生的可
能性打分,打分结果见表 6。

表 6 指标可能性打分

指标名称	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
违章操作	2	1	2	2	1
违章行动	1	2	2	1	1
违章指挥	1	2	1	1	1
岩层整体稳固性受到破坏而存在的离层围岩	4	5	4	4	4
发生突变的岩石	0	1	0	0	1
顶帮存在破碎的浮石、松石	5	4	5	6	5
隐蔽、不可预见的危险岩块	2	3	3	2	3
生产技术设备缺陷	1	1	2	3	2
应急救援设施和器材不完善	1	1	1	1	1
安全知识不足	5	4	5	5	5
安全心理不利	4	4	3	4	4
安全意识淡薄	2	3	2	2	2
安全习惯不佳	3	3	4	3	4
安全管理标准文件	4	4	5	4	5
安全管理组织结构	4	4	5	5	4
安全管理程序	2	3	2	2	3
安全主体责任	2	1	2	3	1
安全参与	2	1	2	2	1
安全理念	1	1	2	1	2
安全制定	2	3	2	2	3
安全承诺	2	2	1	2	3
安全实践活动	2	3	3	1	1
上级单位监管不力	0	1	2	1	1
政府监管不力	2	3	2	2	2
应急管理局监管不力	2	3	2	2	2
其他单位监管不力	1	2	3	2	3

根据式(10)~式(12),利用 MATLAB 软件编写代码,得到 26 个指标的云特征值,将 26 个云特征值和 26 个组合权重值根据式(14)得到综合云特征

值(E_x, E_n, H_e)=(1.7865,0.1117,0.1983)。

3.3 冒顶片帮事故预警结果

将得到的综合云特征值借助 MATLAB 软件编写云发生器代码,从而生成云图。将得到的云图与预警等级标准云图对比,以 E_x 为主要预警标准,重合度最高的判断为该矿井的最终预警等级,具体如图 5 所示。

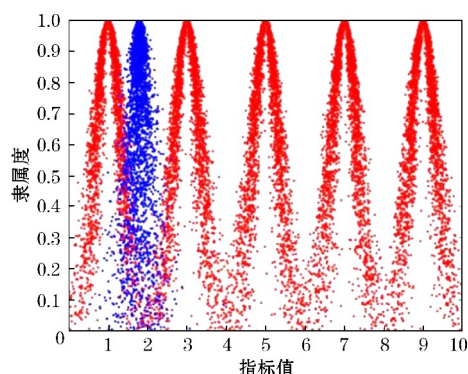


图5 预警等级综合云图

由图 5 可知,蓝色部分为该矿井冒顶片帮事故预警云图,红色部分为预警等级划分标准云图(颜色区分见电子版)。结合事故预警区间,可知该矿井事故预警云图介于“无警”和“轻警”等级标准云之间,且偏向“无警”等级标准云图。即判定该矿井冒顶片帮事故预警警情介于无警与轻警之间,相对来说和无警的重合度更高,且该矿井的综合云特征值(E_x, E_n, H_e)=(1.7865,0.1117,0.1983),矿井综合云特征值 1.7865 与无警的标准云特征值 1 的差值为 0.7865,与轻警的标准云特征值 3 的差值为 1.2135,因此该矿井发布的警情为无警。但该矿井事故预警警情还是有由无警演变成轻警的可能性,因此应该采取措施以达到更安全状态,建议检查该矿井所采取的安全措施执行情况,并进行隐患排查。

3.4 事故风险管控措施

该矿井冒顶片帮事故综合风险预警警情为无警,但仍存在一些问题,因此本文提出如下预防管控措施。

(1) 针对该矿井的矿体赋存条件和围岩稳定性,重点开展围岩变形与支护技术的专项研究,保障开采过程中支护手段的合理性与安全性,根据围岩的变化状况,及时做好支护参数优化,动态调整最优的支护方式,从而确保作业人员在开采过程中的人身安全。

(2) 针对作业人员偶尔摘脱安全帽等不安全行为,强化作业现场日常安全管理,加强对相关作业人员遵守劳动纪律和规章制度情况的监督检查,让各项制度和操作规程落到每个岗位,每位员工。加大落实奖惩制度,对经常性存在不安全行为、仅凭借经验作业的人员,既罚又惩,从而让遵章守纪成为风尚和习惯。

(3) 合理优化保险方案、制定检修维护方案和安全措施方案等。加强对矿山井下作业场所环境、重点部位和关键环节的安全检查;全面系统地排查梳理致灾因素、环境条件等方面存在的安全风险,细化优化隐患排查整治方案,做到把风险管控挺在隐患前面,把隐患排查治理挺在事故前面。

(4) 合理优化顶板分级管理制度,加强顶板管理,在进行采矿作业前对矿井顶板进行检查和处理,不能只是形式化的表面检查。对于发现的浮石问题,必须认真负责地进行处理。

4 结论

(1) 基于 2-4 模型确定了 26 个指标构成的冒顶片帮事故预警指标体系,对冒顶片帮事故预警等级进行了划分,包括Ⅰ级(特别严重)、Ⅱ级(严重)、Ⅲ级(较重)、Ⅳ级(一般)、Ⅴ级(安全)5 个等级。

(2) 通过层次分析法和熵权法,采用乘法积方法的方法确定预警指标组合权重,有效避免了两种赋权方法的局限性;将组合权重与云模型相结合,构建了冒顶片帮事故预警模型,增强了预警的时效性和准确性。

(3) 选取铜陵市某矿井进行了实例应用研究,得到综合云特征值为 1.7865,0.1117,0.1983,最终得出该矿井发布的警情应为无警。通过案例研究发现,预警结果与实际情况相吻合,验证了预警方法的有效性、准确性和可操作性。

参考文献:

- [1] 吕丽华. 非煤矿山事故原因分析及安全防范建议[J]. 现代矿业, 2021, 37(6): 235-237.
- [2] 张国荣. 小型非煤矿山事故类型及其危险因素辨识与防治[J]. 能源与环境, 2016(1): 105-107+109.
- [3] 《2017 年全国非煤矿山生产安全事故统计分析报告》发布[J]. 职业卫生与应急救援, 2018, 36(3): 284.
- [4] 刘振平, 许梦国, 吴璇, 等. 金属矿山采矿作业安全预警系统的实施[J]. 矿业安全与环保, 2007, 172(3): 83-85.
- [5] LI W, YE Y C, WANG Q H, et al. Fuzzy risk prediction of

- roof fall and rib spalling: based on FFTA-DFCE and risk matrix methods[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(8): 8535-8547.
- [6] XIE J L, XU J L, ZHU W B. Gray algebraic curve model-based roof separation prediction method for the warning of roof fall accidents[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(8): 514.
- [7] 国家突发公共事件总体应急预案[J]. *中国防汛抗旱*, 2006(1): 16-19.
- [8] ZHANG L A, WANG J W, WU J, et al. Early Warning of the Construction Safety Risk of a Subway Station Based on the LSSVM Optimized by QPSO [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(11): 5712.
- [9] 谢尊贤, 蔡二柱, 徐宝. 基于云模型-模糊理论的养老机构火灾安全风险预警系统[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(2): 588-598.
- [10] 戚日常, 范慧芳, 张爱祥, 等. 基于组合赋权与加权秩和比的电力变压器状态评估[J]. *高压电器*, 2022, 58(12): 199-206.
- [11] GUO M, ZHAO J W, PAN D, et al. Normal cloud model theory-based comprehensive fuzzy assessment of wooden pagoda safety[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2022, 55: 1-10.
- [12] PENG J Q, ZHANG J M. Urban flooding risk assessment based on GIS-game theory combination weight: A case study of Zhengzhou City[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 77, 103080.
- [13] LI J M, CHEN Y Y, YAO X H, et al. Risk Management Priority Assessment of heritage sites in China Based on Entropy Weight and TOPSIS[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2021, 49: 10-18.
- [14] LI D Y, LIU C Y, LIU L Y. Study on the universality of the normal cloud model[J]. *Engineering Sciences*, 2005, 3(2): 18-24.
- [15] 杨洁, 王国胤, 刘群, 等. 正态云模型研究回顾与展望[J]. *计算机学报*, 2018, 41(3): 724-744.
- [16] CAO W Z, DENG J L, YANG Y, et al. Water Carrying Capacity Evaluation Method Based on Cloud Model Theory and an Evidential Reasoning Approach [J]. *Mathematics*, 2022, 10(2): 266.