

基于改进熵权法及未确知测度的 突出危险性评价

杨希法¹, 江泽标^{1,2*}, 权西平¹, 扶祥祥¹, 郭亚玲¹, 吴少康¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州大学 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为客观评价煤矿煤与瓦斯突出危险性,合理确定各影响因素权重,基于改进熵权法及未确知测度理论建立煤矿突出危险性评价模型.选取 4 个评价指标,采用改进熵权法计算权重值,结合未确知测度理论计算天安十三矿的多指标综合测度评判向量,最后根据置信度识别准则确定天安十三矿的 3 个样本地点的突出危险性评价等级.将评价结果与现场实际情况进行对比可知评价等级符合实际.因此,利用所提出的模型进行突出危险性评价十分有效,可以为煤矿突出危险性评价工作提供参考.

关键词:煤与瓦斯突出;改进熵权法;未确知测度;置信度识别准则;危险性评价

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)02-0037-06

Risk Assessment of Coal and Gas Outburst Based on Improved Entropy Weight Method and Uncertainty Measurement

YANG Xifa¹, JIANG Zebiao^{1,2}, QUAN Xiping¹, FU Xiangxiang¹, GUO Yaling¹, WU Shaokang¹

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Nonmetallic Mineral Resources in Guizhou, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to objectively evaluate the risk of coal and gas outburst in coal mines and reasonably determine the weight of each influencing factor, an evaluation model of coal mine outburst risk is established based on the improved entropy weight method and the undetermined measurement theory. It selects 4 evaluation indicators, uses the improved entropy weight method to calculate the weight value, and calculates the multi-indicator comprehensive measurement evaluation vector of Tian'an No. 13 Coal Mine in combination with the undetermined measurement theory. Finally, it highlights the risk assessment level of this above mine. Comparing the evaluation results with the actual situation on site, it can be seen that the evaluation level is in line with the actual situation. Therefore, it is very effective to use the proposed model to evaluate the outburst risk. It can provide reasonable suggestions for the prevention and control of coal and gas outburst according to the weight value of the influencing factors, which can provide references for the evaluation of the outburst risk of coal mines.

Keywords: coal and gas outburst; improved entropy weight method; uncertainty measurement; credible degree recognition criterion; risk evaluation

近年来,在国家政策指导和主管部门的引导下,煤矿瓦斯事故发生率整体表现为降低趋势,煤矿安全形势逐渐向好.但是瓦斯事故占总事故的比例仍在增加.随着矿井开采逐渐向深部进行,开采条件逐渐恶

收稿日期:2021-09-26

基金项目:贵州省科技厅资助项目(黔科合支撑[2020]4Y050)

*通信作者, E-mail: 327552007@qq.com

化,地应力及瓦斯压力升高,煤与瓦斯突出问题对煤矿安全的威胁程度日益增加,由此可见煤与瓦斯突出问题研究的急迫性和重要性.

煤与瓦斯突出是煤矿开采过程中极其复杂的动力现象,极易造成群死群伤事故,严重威胁着煤矿的安全生产.国内外专家学者针对煤与瓦斯突出事故的预测和预警做了大量研究工作,但是由于对煤与瓦斯突出的发生机理仍未完全掌握,目前仍缺少准确预测煤与瓦斯突出的系统性理论和方法.现有的预测方法仍停留在利用单一指标进行静态评价的阶段,具有较大的局限性,预测的准确性有待提高.大量研究成果和瓦斯突出的实测数据表明^[1-2],非突出矿井的各单项指标未超过临界值仍可能发生煤与瓦斯突出.因此煤矿突出危险性评价方法的研究是煤与瓦斯突出研究的重要内容.目前,煤与瓦斯突出危险性评价方法有很多,如灰靶决策理论^[3]、层次分析法(Antalytical Hierarchy Process, AHP)^[4]、灰色关联理论^[5]、突变理论^[6]、模糊综合评价法^[7]、粗糙集理论^[8]、BP神经网络^[9]、模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)^[10]、事故树分析法^[11]、支持向量机^[12]等.上述方法在矿井的煤与瓦斯突出危险性评价中取得了较好的应用效果,但是这些数学方法具有一定的局限性.如层次分析法的各指标权重的确定和模糊综合评价中隶属度的确定容易受人的主观因素影响;灰色关联理论和模糊层次分析法也具有一定的主观性,会造成突出危险性评价结果与实际情况存在偏差;BP神经网络方法需要大量的训练数据,对数据的要求较高;运用事故树分析法进行定量分析比较困难;支持向量机方法中如何选取核函数问题尚未得到解决.影响煤与瓦斯突出的某些因素传递的信息具有不确定性,上述方法不能很好地解决这一问题.

本文结合改进熵权法和未确知测度方法进行突出危险性评价.应用未确知测度理论^[13],构建各指标的未确知测度函数,根据置信度识别准则判定等级,最终得到突出危险性评价结果.未确知测度方法能够较好地处理突出危险性评价存在的不确定性信息,改进熵权法利用层次分析法和熵权法的优点,使得指标权重的确定既考虑人的主观判断的合理性,又包含客观因素的影响,确保评价结果的可靠性.

1 未确知测度计算理论

假设待评价的煤矿样本点有 m 个,则待评价的煤矿样本点可用空间向量 $\mathbf{R}=(r_1, r_2, \dots, r_m)$ 表示.对于每个待评价的煤矿样本点 $r_i(i=1, 2, \dots, m)$ 包含 n 个单向评价指标,用 t_1, t_2, \dots, t_n 表示,则评价指标空间 $\mathbf{T}=(t_1, t_2, \dots, t_n)$.如果 $r_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 表示评价对象即煤矿样本点 r_i 关于第 j 个评价指标的测量值,则 $r_i=(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$.若 r_{ij} 有 p 个评价等级,则可用 $\mathbf{C}=(c_1, c_2, \dots, c_p)$ 表示评价等级空间.设 $c_k(k=1, 2, \dots, p)$ 表示第 k 个评价等级,且第 k 级比第 $(k+1)$ 级等级高,即 $c_k > c_{k+1}$,则称 (c_1, c_2, \dots, c_p) 为评价等级空间 \mathbf{C} 上的有序分割类^[14].

1.1 单指标测度

$u=u_{ijk}(r_{ij} \in c_k)$ 表示测量值 r_{ij} 属于 c_k 的程度,且满足:

$$0 \leq u(r_{ij} \in c_k) \leq 1; \quad (1)$$

$$u(r_{ij} \in \mathbf{C}) = 1; \quad (2)$$

$$u(r_{ij} \in \bigcup_{i=1}^k c_i) = \sum_{i=1}^k u(r_{ij} \in c_i); \quad (3)$$

$$(u_{ijk})_{n \times p} = \begin{bmatrix} u_{i11} & u_{i12} & \cdots & u_{i1p} \\ u_{i21} & u_{i22} & \cdots & u_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{in1} & u_{in2} & \cdots & u_{inp} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中: c_i 为评价等级空间的一部分.式(1)、式(2)、式(3)分别表示“非负有界性”“归一性”和“可加性”,式(4)为单指标测度评价矩阵.

1.2 多指标测度

由各指标数值和突出危险性评价指标的分级标准得出指标综合测度评价矩阵,利用改进熵权法确定

指标权重,进而计算多指标综合测度.令 u_{ik} 表示煤矿样本点 r_i 属于第 k 个评价等级 c_k 的程度,则:

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^n w_j u_{ijk}; \quad (5)$$

$$0 \leq u_{ik} \leq 1; \quad (6)$$

$$u(r_i \in C) = \sum_{k=1}^p u_{ik} = 1; \quad (7)$$

$$u(r_i \in \bigcup_{l=1}^k c_l) = \sum_{l=1}^k u(r_i \in c_l). \quad (8)$$

式中: w_j 为突出危险性评价指标 t_j 在评价体系中所占的权重值; c_l 为评价等级.

待评价的煤矿样本点 r_i 的多指标综合测度评价向量可表示为 $U = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ip})$.

1.3 置信度识别准则

为了对待评价的煤矿样本点做出突出危险性评价结果,采用置信度识别准则.设 λ 为置信度 ($\lambda \geq 0.5$, 常取 0.6 或 0.7)^[15-16].若 $c_1 > c_2 > \dots > c_p$, 则有

$$s = \min \{ k : \sum_{l=1}^k u_{il} \geq \lambda, 1 \leq k \leq p \}. \quad (9)$$

式中: s 为隶属度; $k = 1, 2, \dots, p$. 当 k 的取值满足识别准则时,计算出隶属度 s , 可认为待评价的煤矿样本点 r_i 属于第 s 个评价等级.

2 确定指标权重

2.1 层次分析法

利用层次分析法计算煤矿突出危险性评价指标的主观权重,过程如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; \quad (10)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (11)$$

式中: CI 为检验指标; λ_{\max} 为最大特征值; n 为阶数; RI 为一一致性指标; CR 为一一致性比率,当 $CR < 0.1$ 时一致性检验通过.

2.2 熵权法

利用熵权法进行煤矿突出危险性评价指标的客观权重计算.依次对指标规范值、指标熵值及指标熵权进行计算.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; \quad (12)$$

$$b_j = -q \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}; \quad (13)$$

$$w_{bj} = \frac{1 - b_j}{\sum_{j=1}^n (1 - b_j)}. \quad (14)$$

式中: w_{bj} 为客观权重; y_{ij} 为规范值; x_{ij} 为指标值; b_j 为熵值; $q = 1/\ln m$.

当指标的评价分值相差较大时,熵权也较大,说明该指标提供的有用信息较多^[17].

2.3 改进熵权法确定综合权重

利用层次分析法和熵权法分别计算煤矿突出危险性评价指标的主观和客观权重,然后将主观权重与客观权重耦合得出突出危险性评价指标的综合权重.综合赋权提高突出危险性评价结果的准确性,组合权重的计算过程如下:

$$w_j = tw_{aj} + (1-t)w_{bj}; \quad (15)$$

$$t = \frac{e}{e-1}T_{AHP}; \quad (16)$$

$$T_{AHP} = \frac{2}{e}(h_1 + 2h_2 + \dots + eh_e) - \frac{e+1}{e}. \quad (17)$$

式中: w_j, w_{aj} 分别为组合权重和主观权重值^[13]; t 为组合赋权系数; e 为评价指标个数; T_{AHP} 为差异系数; h_1, h_2, \dots, h_e 为从小到大的突出危险性评价指标的主观权重排序值。

3 案例分析

平顶山煤业集团公司天安十三矿曾发生过煤与瓦斯突出事故,结合试验地点实测数据,对该矿的3个地点进行煤与瓦斯突出危险性预测.实测数据见表1^[18].

表1 试验地点参数

编号	测定地点	瓦斯压力/Pa	瓦斯放散初速度/Pa	煤的坚固性系数	开采深度/m
1	11081 机巷 280 m	870 000	2299.57	0.43	557
2	12051 风巷 500 m	910 000	1206.31	0.64	425
3	13081 风巷 70 m	2 100 000	776.72	0.65	709

3.1 评价指标的选取

参考《防治煤与瓦斯突出细则》,选取煤的瓦斯放散初速度、煤层瓦斯压力、煤的坚固性系数作为突出危险性评价指标。

每个煤层都有发生突出的最小开采深度,当小于该深度时不发生突出,当超过该深度且深度增加时,发生突出的危险性增加.一般来说,开采深度越大,煤层突出危险程度将越大。

选取的评价指标分别为煤层瓦斯压力 p 、煤的瓦斯放散初速度、煤的坚固性系数 f 及开采深度。

3.2 突出危险性评价等级的划分

将突出危险程度分为3级,分别为无突出、突出威胁和突出危险.评价等级空间 c_1, c_2, c_3 分别对应 A (无突出)、B (突出威胁) 和 C (突出危险) 这3个等级.煤层突出危险性评价分级标准见表2^[19].

表2 煤与瓦斯突出指标及分级标准

指标	突出危险性		
	A (无突出)	B (突出威胁)	C (突出危险)
瓦斯压力 p /Pa	<740 000	740 000~1 000 000	>1 000 000
瓦斯放散初速度/Pa	<1 330	1 330~1 995	>1 995
坚固性系数 f	>0.5	0.3~0.5	<0.3
开采深度/m	<417	417~634	>634

3.3 确定各指标的综合权重

利用熵权法对表1数据进行计算,得出指标的客观权重值.利用层次分析法计算主观权重系数,代入式(15),得出各评价指标的组合权重值,结果见表3。

表3 各指标权重值

权重	瓦斯压力	瓦斯放散初速度	坚固性系数	开采深度
AHP 法权重系数	0.385	0.198	0.171	0.246
熵权法权重系数	0.241	0.249	0.241	0.269
组合权重	0.274	0.237	0.225	0.264

3.4 构建单指标测度评价矩阵

根据煤层突出危险性评价分级标准,以A级(无突出)指标特征值的区间下限值作为A级(无突出)

标准,C级(突出危险)特征值的区间上限值作为C级(突出危险)标准,B级(突出威胁)特征值的区间中值作为分级标准^[20].按照以上标准绘制各单项指标的测度函数(图1以瓦斯压力为例).

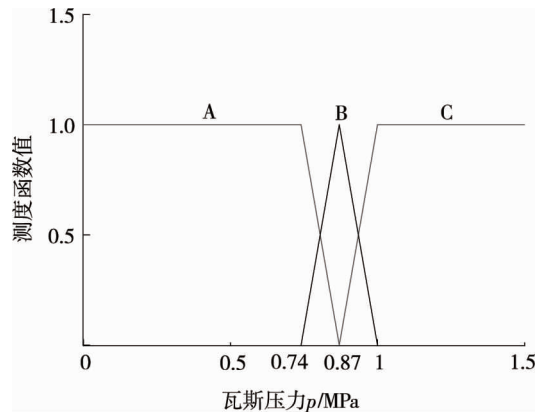


图1 瓦斯压力单指标测度函数

结合表1的实测参数值,以瓦斯压力为例进行说明.11081机巷280m处的瓦斯压力为0.87MPa,属于B级,且属于A级和C级的测度值为0.故瓦斯压力属于B级的测度值为1.同理可求出其他指标隶属于各个等级的测度值.最终得到11081机巷280m的单指标测度矩阵如式(18).

$$(u_{ijk})_{4 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \\ 0.3 & 0.7 & 0.0 \\ 0.0 & 0.7 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.5 多指标综合测度

由改进熵权法得出权重值,结合式(5),便可得到样本11081机巷280m的多指标综合测度评判向量

$$\mathbf{u}_{ik} = \sum_{j=1}^n w_j u_{ijk} = (u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}) = (0.068, 0.616, 0.316).$$

取置信度 $\delta=0.6$,由置信度识别准则计算得到 $s = \min \{k: \sum_{i=1}^k u_{il} \geq \lambda, 1 \leq k \leq p\} = 2$,则样本11081机巷280m的突出危险性评价结果为B级,属于突出威胁,与实际情况吻合.同理计算可得其余样本的多指标综合测度值和突出危险性评价结果,如表4所示^[18].

表4 十三矿试验地点突出危险性评价结果

编号	测定地点	综合未确知测度			评价结果	实际结果
		c_1	c_2	c_3		
1	11081机巷280m	0.068	0.616	0.316	突出威胁	突出威胁
2	12051风巷500m	0.700	0.218	0.082	无突出	无突出
3	13081风巷70m	0.462	0.000	0.538	突出危险	突出危险

3.6 结果分析

根据各样本未确知测度的大小得出3组样本评价结果与实际情况一致,说明该模型适合应用于煤与瓦斯突出预测.

瓦斯压力指标所占权重值最大,因此进行瓦斯治理是最有效的降低突出危险性的方法.

4 结论

1)基于改进熵权法及未确知测度理论建立煤矿突出危险性评价模型,将层次分析法和熵权法结合使用确定各指标权重,兼顾2种方法的优点.

2)以天安十三矿为例,对突出危险性评价模型进行应用,所得评价结果符合实际情况.结果表明该突出危险性评价模型科学合理,简便易行,具有一定的实际应用价值.但如何更合理地确定指标权重,进一步提高结果的可靠性,尚需进一步研究.

参考文献:

- [1] 黄政祥,龙祖根.煤层突出危险性的预评价方法[J].煤炭科学技术,2009,37(7):64-66.
- [2] 李大鹏,王志亮.煤与瓦斯突出危险性预测技术的研究[J].矿业安全与环保,2007,34(5):10-12.
- [3] 朱权洁,张尔辉,李青松,等.基于熵权法和灰靶理论的突出危险性评价方法及其应用[J].安全与环境学报,2020,20(4):1205-1212.
- [4] 房新亮.基于层次分析法的煤与瓦斯突出预测研究[J].能源与环保,2020,42(7):94-97.
- [5] 程霞,陈鲜展.灰色关联度分析法在煤与瓦斯突出模拟试验中的应用[J].煤炭技术,2018,37(10):179-181.
- [6] 杨培君,谢雄刚,韦善阳,等.基于熵权突变理论的煤与瓦斯突出危险性评价[J].矿业研究与开发,2021,41(7):38-43.
- [7] 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.
- [8] 方信,杨力,朱俊奇.基于改进RS-GRA的煤与瓦斯突出危险性评价[J].黑龙江工程学院学报,2021,35(5):31-36.
- [9] 马晟翔,李希建.基于因子分析与BP神经网络的煤与瓦斯突出预测[J].矿业安全与环保,2019,46(2):70-74.
- [10] 孙鑫,徐杨,林柏泉,等.煤与瓦斯突出影响因素评价分析的模糊层次分析方法[J].中国安全科学学报,2009,19(10):145-149.
- [11] 赵先伟,谢雄刚,王潞欧,等.FTA-ISM在煤与瓦斯突出中的应用[J].矿业研究与开发,2019,39(12):127-130.
- [12] 郑晓亮,来文豪,薛生.MI和SVM算法在煤与瓦斯突出预测中的应用[J].中国安全科学学报,2021,31(1):75-80.
- [13] 石勇,史秀志,丁文智.基于改进熵权法—未确知测度模型的黄金洞尾矿库综合安全评价[J].黄金科学技术,2021,29(1):155-163.
- [14] 曾佳龙,刘琼,黄锐,等.基于未确知测度理论的薄基岩厚松散含水层下煤层安全开采区域划定[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):898-904.
- [15] 宫凤强,李夕兵,董陇军,等.基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(2):323-330.
- [16] 唐海,万文,刘金海.基于未确知测度理论的地下洞室岩体质量评价[J].岩土力学,2011,32(4):1181-1185.
- [17] 汪佳.基于灰色评价法的石化行业VOCs治理技术评估研究[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(5):82-84.
- [18] 郭德勇,郑茂杰,郭超,等.煤与瓦斯突出预测可拓聚类方法及应用[J].煤炭学报,2009,34(6):783-787.
- [19] 梁运培,张洋洋,李全贵,等.煤层突出危险性的组合赋权属性综合评价模型[J].煤矿安全,2019,50(1):184-187.
- [20] 单博,陈剑平,王清.基于最小熵理论和未确知测度理论的泥石流敏感性分析[J].岩土力学,2014,35(5):1445-1454.