

基于IAHP-未确知测度的煤矿瓦斯爆炸风险评估

刘佳林¹, 叶青^{1,2,3}, 贾真真¹, 杨颖倩¹, 许婷婷¹

¹湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

²地下空间防火防爆材料与装备湖南省工程研究中心, 湖南 湘潭

³火灾爆炸防控与应急技术湖南省普通高等学校重点实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年5月15日; 录用日期: 2024年6月17日; 发布日期: 2024年7月31日

摘要

为了对煤矿瓦斯爆炸风险进行量化并解决分析过程中不确定性处理的不足, 基于IAHP-未确知测度理论提出了一种煤矿瓦斯爆炸风险评估方法。首先, 基于专家经验确定影响瓦斯爆炸的主要风险指标, 并构建风险评估指标体系结构模型。然后, 通过IAHP方法计算出各影响指标权重, 同时以未确知测度理论为基础, 对具有不确定性和模糊性的信息进行合理的定量化分析, 构建指标测度函数, 得到结构模型的指标测度矩阵。最后, 基于置信度准则进行风险等级判定。结果表明: 4个一级指标中影响最大的是管理因素, 是导致煤矿瓦斯爆炸的关键风险因素; 20个二级指标中影响最大的是安全科技与投入, 其次是员工的平均工龄、通风系统、安全文化, 煤矿应重视这些因素在矿井安全生产单元中的重要作用; 影响最小的是自然发火期、煤层爆炸指数。根据煤矿实际开采情况对5个工作面进行瓦斯爆炸风险评估, 评判等级分别为安全、较安全、较安全、较安全、较安全, 评价结果与实际工程相符合, 基于该评价模型可为决策者有效管控煤矿瓦斯爆炸风险提供一定的理论指导。

关键词

瓦斯爆炸, 区间层次分析法(IAHP), 未确知测度理论, 置信度, 风险评估

Risk Assessment of Coal Mine Gas Explosion Based on IAHP-Unascertained Measure

Jialin Liu¹, Qing Ye^{1,2,3}, Zhenzhen Jia¹, Yingqian Yang¹, Tingting Xu¹

¹School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan

²Hunan Engineering Research Center for Fire and Explosion Prevention Materials and Equipment in Underground Spaces, Xiangtan Hunan

³Key Laboratory of Fire and Explosion Prevention and Emergency Technology in Hunan Province, Xiangtan Hunan

Abstract

In order to quantify the coal mine gas explosion risk and solve the shortage of uncertainty treatment in the process of analysis, a coal mine gas explosion risk assessment method based on IAHP-unascertained measure theory is proposed. First, the main risk indicators affecting gas explosion are determined based on the expert experience, and the risk assessment index system structure model is built. Then, the weight of each influence index is calculated by IAHP method. At the same time, based on the unascertained measure theory, the information with uncertainty and fuzziness is quantitatively analyzed, the index measure function is constructed, and the index measure matrix of the structural model is obtained. Finally, the risk level is determined based on the confidence criterion. The results show that management factor is the most influential factor among the four primary indexes, which is the key risk factor leading to coal mine gas explosion. Among the 20 secondary indexes, safety technology and input are the most influential, followed by the average length of service of employees, ventilation system and safety culture. Coal mines should pay attention to the important role of these factors in the mine safety production unit. The least influence is spontaneous ignition period and coal seam explosion index. According to the actual mining situation of the coal mine, the gas explosion risk assessment was carried out on 5 working faces, and the evaluation grades were respectively safe, relatively safe, relatively safe, relatively safe, and relatively safe. The evaluation results were consistent with the actual project, and based on the evaluation model, certain theoretical guidance could be provided for the decision makers to effectively control the gas explosion risk in the coal mine.

Keywords

Gas explosion, Interval Analytic Hierarchy Process (IAHP), Unascertained Measure Theory, Confidence Degree, Risk Assessment

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤矿瓦斯爆炸是在多种因素的共同作用下形成的极为复杂的灾害事故,同时也是威胁我国煤矿安全生产的重大灾害事故之一[1]。据不完全统计,近十年来我国煤矿每年都会发生重大及以上级别的瓦斯爆炸事故,且在现阶段中,90%以上的煤矿都存在瓦斯爆炸安全隐患[2]。随着高新技术的发展,煤矿的开采能力不断得以提升,煤层的开采深度随之增加,开采范围也在持续扩大[3]-[6],这对瓦斯爆炸风险的有效管控带来了巨大挑战,同时严重威胁井下作业人员的生命安全。由此可见,积极开展瓦斯爆炸风险指标识别及风险评估,及时采取有效控制措施,从源头遏制事故发生,对我国煤矿安全生产有着重要意义。

诸多学者针对煤矿瓦斯爆炸风险评估进行了大量研究,例如:李润求等[7]运用粒子群优化算法对SVM模型参数进行优化,构建出瓦斯爆炸灾害风险识别的PSO-SVM模型。Zhang Qing [8]基于灾害系统理论,将煤矿瓦斯爆炸灾害分为孕灾环境子系统、致灾因子子系统及承灾体子系统,同时对其建立了随机森林模型。皮子坤等[9]结合前景理论与模糊综合评价理论以及区间数排序理论构建煤矿瓦斯爆炸风险评估模型,并通过实例对该模型进行验证。李敏等[10]基于模糊贝叶斯网络提出一种煤矿瓦斯爆炸风险评

估方法,根据三角模糊数评估风险指标的条件概率,利用贝叶斯计算瓦斯爆炸发生概率,推理分析出瓦斯爆炸的事故成因。鲁锦涛等[11]从经典瓦斯爆炸事故案例中提取影响因素,基于集成灰色系统理论,构建灰色-物元风险评估模型,明确风险因素之间的作用路径。景国勋等[12]通过 SPA-VFS 方法,从人、机、环、管四个方面对煤矿瓦斯爆炸风险进行了全面评估,耦合模型评价结果与实际相符。Tauziede 等[13]结合矿井瓦斯和作业环境的各方面调查数据,对矿井瓦斯爆炸事故风险进行全面评估。Pejic 等[14]采用精细化方法构建矿井瓦斯爆炸风险指数,利用概率计算方法得出煤矿瓦斯爆炸的风险概率及危险程度。上述方法在实际工程中都取得了一定的效果,但由于导致瓦斯爆炸的因素众多,且煤矿安全生产系统中的大量信息具有模糊性和不确定性[15],加之无法对一些定性指标进行定量评价,这就使得所构建的模型对此类信息进行评价具有局限性。因此,需要探寻出一种既适用于煤矿前期勘察设计又能服务于巷道掘进施工过程,同时具有较好准确性、可靠性和实用性的多因素瓦斯爆炸风险评估模型。

王光远教授在 1990 年首次提出未确知测度理论,在分析不确定因素信息的同时,还能进行量化处理,在解决有序切割的问题上有着显著优势[16]。目前未确知测度理论广泛应用于巷道围岩稳定、冲击地压、隧道坍塌[17]-[22]等领域,并取得了较好的效果。鉴于此,本文将能够充分考虑瓦斯爆炸元素相关性的区间层次分析法(Interval Analytic Hierarchy Process, IAHP)和未确知测度理论相结合,从瓦斯爆炸事故的致灾机理和形成条件出发,基于危险源理论和事故致因理论,建立瓦斯爆炸风险评估指标体系。通过 IAHP 计算出指标权重,运用未确知测度的基本理论和计算规则,构建一种煤矿瓦斯爆炸风险评估模型,并将该模型应用于实际煤矿的风险评估,以校验其合理性与有效性,以期为煤矿瓦斯爆炸风险评估提供新的方法和思路。

2. 风险评估理论

2.1. IAHP

IAHP 是 AHP 的一种改进和扩展,该方法通过区间数对比两两因素之间的重要程度,在建立判断矩阵中采用数值区间替代单数值,有效解决了决策者因信息掌握不全而造成判断矩阵不准确的问题。IAHP 的计算过程与 AHP 一致,即首先确定与分析问题有关的影响因素,然后根据是否具有某些特征把这些因素聚集成组,将它们的共同特征作为系统中新层次的因素,同时这些因素也根据另外一组的特性构成更高层次的因素,最终形成单一的最高因素即分析目标,由此构建层次分析结构模型[23]。本文采用主观赋权法——IAHP 确定煤矿瓦斯爆炸各影响因素权重,步骤如下[24]。

- 1) 根据煤矿瓦斯爆炸建立层次分析结构。层次分析模型应包含目标层、准则层和指标层。
- 2) 确定判断矩阵。通过多位专家评判,采用二元对比法,明确每个层次中各元素的相对重要性。

$$A = [A^-, A^+] = (a_{ij})_{n \times n} = (a_{ij}^-, a_{ij}^+) = \begin{pmatrix} [1, 1] & [a_{12}^-, a_{12}^+] & \cdots & [a_{1n}^-, a_{1n}^+] \\ \left[\frac{1}{a_{12}^+}, \frac{1}{a_{12}^-} \right] & [1, 1] & \cdots & [a_{2n}^-, a_{2n}^+] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left[\frac{1}{a_{1n}^+}, \frac{1}{a_{1n}^-} \right] & \left[\frac{1}{a_{2n}^+}, \frac{1}{a_{2n}^-} \right] & \cdots & \left[\frac{1}{a_{mn}^+}, \frac{1}{a_{mn}^-} \right] \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中: A 为区间矩阵, A^- 和 A^+ 为 A 所确定的矩阵; a_{ij}^- 和 a_{ij}^+ 分别为矩阵 A^- 和矩阵 A^+ 的元素,且 $a_{ij}^- \neq 0$, $1/9 \leq (a_{ij}^-)_{n \times n} \leq (a_{ij}^+)_{n \times n} \leq 9$; $[a_{ij}^-, a_{ij}^+]$ 表示利用二元对比法得到的元素 a_i 与元素 a_j 之间的相对重要性; n 表示指标个数。

3) 区间判断矩阵的一致性检验。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{nm_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \right), m_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

$$k = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n a_{ij}^+ \right)^{-1}}, \beta = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n a_{ij}^- \right)^{-1}}, 0 \leq k \leq 1 \leq \beta \quad (3)$$

$$Q = [kx^-, \beta x^+] \quad (4)$$

式中： λ_{\max} 为最大特征值； m_i 为特征向量 M 的元素； k 和 β 均为修正系数； x^- 和 x^+ 分别为矩阵 A^- 与矩阵 A^+ 的最大特征根所对应的特征向量； Q 为所计算出的权重范围。

4) 确定各影响因素权重。

$$w(A_i) = \frac{1}{2}(kx^- + \beta x^+) \quad (5)$$

式中 $w(A_i)$ 为层次结构模型中各指标的权重，通过式(2)~式(5)检查权重的分布是否在合理范围。

2.2. 未确知测度理论

假设有 n 个待评价的对象 x_1, x_2, \dots, x_n ，则评价对象空间 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，每个评价对象包含有 m 个评价指标 I_1, I_2, \dots, I_m ，则指标空间 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ ，第 i 个评价对象关于第 j 个评价指标的测度值为 $x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 。对每个测度值设定 c 个评价等级 P_1, P_2, \dots, P_c ，则等级空间 $U = \{P_1, P_2, \dots, P_c\}$ ，若满足 $P_1 > P_2 > \dots > P_c$ 或 $P_1 < P_2 < \dots < P_c$ ，则称 $\{P_1, P_2, \dots, P_c\}$ 是评价等级空间 U 的一个有序分割类[25]。

2.2.1. 单指标测度

令 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in P_k)$ 表示指标测度值 x_{ij} 属于第 k 个评价等级 P_k 的程度，当 μ 满足：

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in P_k) \leq 1, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, c \quad (6)$$

$$\mu(x_{ij} \in U) = 1, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\mu\left(x_{ij} \in \bigcup_l^k P_l\right) = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in P_l), k=1, 2, \dots, c \quad (8)$$

则称 μ 为未确知测度。其中式(8)表示“归一性”，式(9)表示“可加性”。所有测度值所构成的矩阵称为单指标未确知测度评价矩阵。

$$\left(\mu_{ijk} \right)_{m \times c} = \begin{pmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1c} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imc} \end{pmatrix}, i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

2.2.2. 多指标综合测度

令 $\mu_{ik} = \mu(x_i \in P_k)$ 表示 x_i 属于第 k 个评价类 P_k 的程度，则

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk}, i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, c \quad (10)$$

由于 $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$ ，且 $\sum_{k=1}^c \mu_{ik} = \sum_{k=1}^c w_j \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=1}^c \mu_{ijk} \right) w_j = \sum_{j=1}^m w_j = 1$ ，所以 μ_{ik} 是未确知测度，矩阵

$$(\mu_{ik})_{n \times c} = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1c} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{nc} \end{pmatrix} \quad (11)$$

称为多指标综合测度评价矩阵， $(\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ic})$ 称为评价对象 x_i 的综合测度评价向量。

2.2.3. 置信度识别准则

在求出多指标综合测度评价矩阵的条件下，如果 $\{P_1, P_2, \dots, P_c\}$ 是评价等级空间 U 的一个有序分割，即可引入置信度识别准则。假设置信度为 λ ($\lambda > 0.5$ ，且常取 0.6 或 0.7)， $P_1 > P_2 > \dots > P_c$ ，令

$$k_0 = \min_k \left(k : \sum_{i=1}^k \mu_i \geq \lambda, k = 1, 2, \dots, c \right) \quad (12)$$

则认为评价对象 x_i 属于第 k_0 个评价类 P_{k_0} 。

3. IAHP-未确知测度综合评价

3.1. 评价指标体系的建立

建立瓦斯爆炸风险指标体系是对瓦斯爆炸进行风险评估的首要条件，也是评估结果可靠程度的主要影响因素。基于煤矿瓦斯爆炸事故的致灾机理和形成条件，将危险源理论和事故致因理论相结合，考虑“人-机-环境-管理”四个因素建立瓦斯爆炸风险评估指标体系[26] [27]，见图 1。

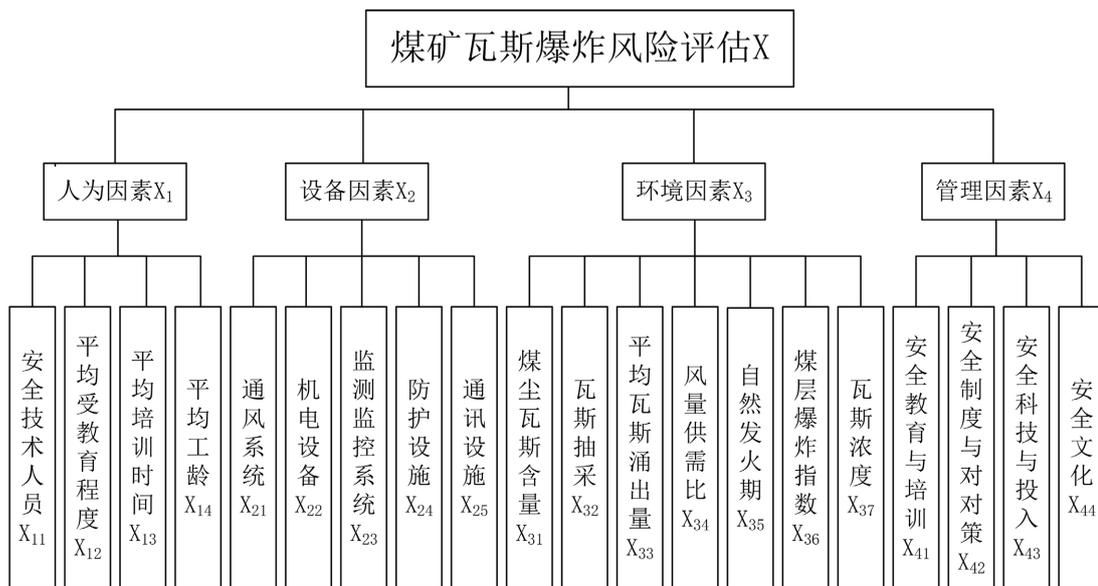


Figure 1. Hierarchical structure model of risk assessment index system

图 1. 风险评估指标体系层次结构模型

3.2. 评价等级的确定

根据常用的分级标准与专家经验及评价指标的意义，同时考虑具体的实际情况，将煤矿瓦斯爆炸风

险等级划分为安全、较安全、一般安全、较不安全和不安全 5 个评价等级，分别用 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 表示。由于煤矿安全生产的特殊性和井下环境的复杂性，加之瓦斯爆炸受多种因素的综合影响，依据各指标的不同属性，其分级标准见表 1。

Table 1. Evaluation index grading standard

表 1. 评价指标分级标准

指标	等级区间				
	P_1 (安全)	P_2 (较安全)	P_3 (一般安全)	P_4 (较不安全)	P_5 (不安全)
$X_{11}; X_{21}; X_{22}; X_{23}; X_{24}; X_{25}; X_{32}; X_{41}; X_{42}; X_{43}; X_{44}$	[90, 95)	[85, 90)	[75, 85)	[65, 75)	[50, 65)
X_{12}	[15, 16)	[12, 15)	[9, 12)	[6, 9)	[3, 6)
X_{13}	[120, 180)	[100, 120)	[60, 100)	[30, 60)	[20, 30)
X_{14}	[16, 20)	[12, 16)	[8, 12)	[4, 8)	[2, 4)
X_{31}	[2, 4)	[4, 5)	[5, 7)	[7, 10)	[10, 12)
X_{33}	[4, 5)	[5, 6)	[6, 8)	[8, 10)	[10, 12)
X_{34}	[95, 100)	[90, 95)	[85, 90)	[80, 85)	[75, 80)
X_{35}	[9, 12)	[6, 9)	[5, 6)	[4, 5)	[2, 4)
X_{36}	[8, 10)	[10, 14)	[14, 15)	[15, 18)	[18, 20)
X_{37}	[0.4, 0.5)	[0.5, 0.6)	[0.6, 0.7)	[0.7, 0.8)	[0.8, 0.9)

3.3. 评价指标权重的确定

基于评价指标分级标准，同时咨询多位专家及经验丰富的煤矿作业人员，综合考虑其所给意见，采用二元对比法构造出区间判断矩阵，一级指标区间判断矩阵如表 2 所示，同理，可构造二级指标区间判断矩阵并确定权重，在此不再叙述。根据式(2)~式(5)分别计算出各层次的指标权重，如表 3 所示。根据各指标的单权重以及所属层次的权重，得出 20 个评价指标的综合权重，如表 4 所示。

Table 2. First-level index judgment matrix

表 2. 一级指标判断矩阵

一级指标	X_1	X_2	X_3	X_4
X_1	[1, 1]	[1, 2]	[1, 2]	[1/2, 1]
X_2	[1/2, 1]	[1, 1]	[1, 2]	[1/2, 1]
X_3	[1/2, 1]	[1/2, 1]	[1, 1]	[1/2, 1]
X_4	[1, 2]	[1, 2]	[1, 2]	[1, 1]

Table 3. First-level index weight

表 3. 一级指标权重

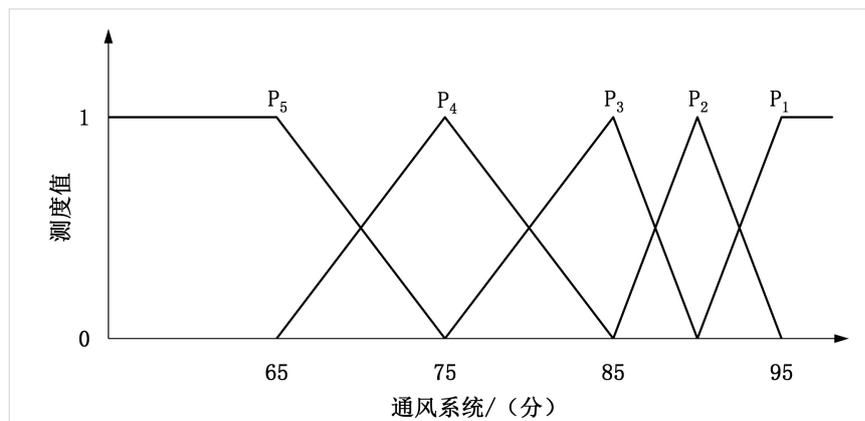
一级指标	$w(A_i)$
X_1	0.2673
X_2	0.2248
X_3	0.1890
X_4	0.3179
一致性检验	$k = 0.8715 < 1, \beta = 1.1265 > 1$, 满足一致性检验

Table 4. Comprehensive index weight
表 4. 综合指标权重

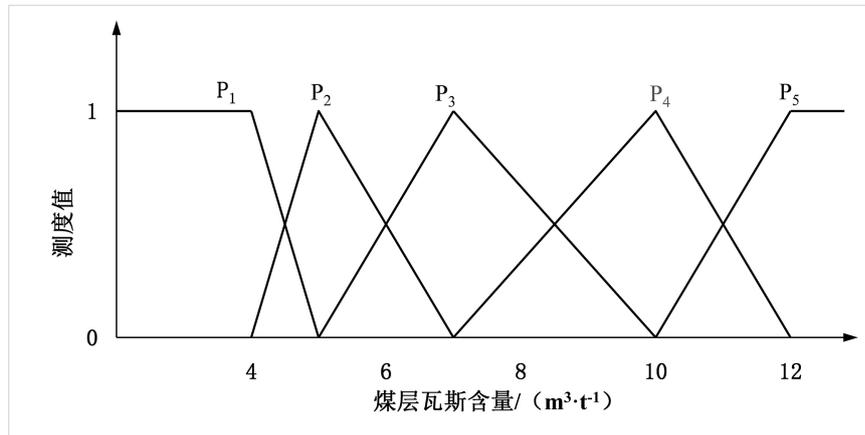
一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	综合权重
X_1	0.2673	X_{11}	0.1570	0.0420
		X_{12}	0.3234	0.0864
		X_{13}	0.1320	0.0353
		X_{14}	0.3845	0.1028
X_2	0.2248	X_{21}	0.4211	0.0947
		X_{22}	0.2756	0.0620
		X_{23}	0.1644	0.0370
		X_{24}	0.0849	0.0191
		X_{25}	0.0514	0.0116
X_3	0.1890	X_{31}	0.2124	0.0402
		X_{32}	0.0944	0.0178
		X_{33}	0.1604	0.0303
		X_{34}	0.2124	0.0402
		X_{35}	0.0238	0.0045
		X_{36}	0.0295	0.0056
		X_{37}	0.2647	0.0500
X_4	0.3179	X_{41}	0.1204	0.0383
		X_{42}	0.1801	0.0572
		X_{43}	0.4172	0.1326
		X_{44}	0.2818	0.0896

3.4. 建立未确知测度函数

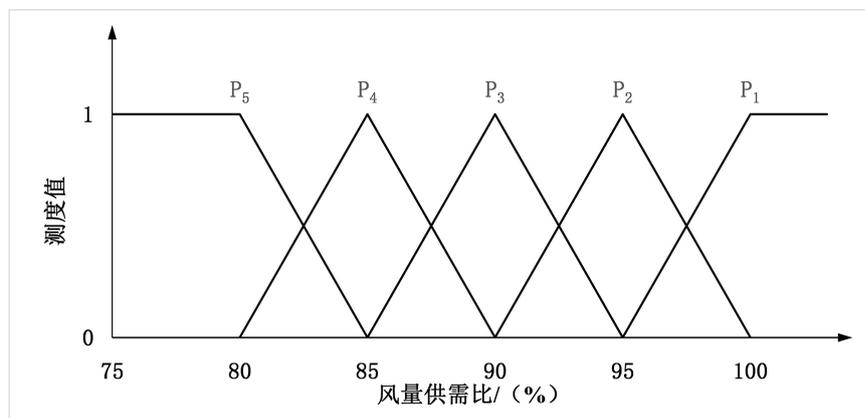
根据表 1 中各指标的分级标准, 结合单指标函数的定义选用直线法建立指标测度函数, 本文给出通风系统、煤层瓦斯含量和风量供需比测度函数见图 2。



(a) 通风系统测度函数



(b) 煤层瓦斯含量测度函数



(c) 风量供需比测度函数

Figure 2. Evaluation index measure function diagram
图 2. 评价指标测度函数图

4. 实例应用分析

运用 IAHP-未确知测度评价模型对贾宝山[28]等所作研究中的数据样本(表 5)进行评价, 以验证该模型的准确性。

Table 5. Evaluation of sample data
表 5. 评价样本数据

工作面 编号	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}	X_{37}	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}
1 [#]	95	12.18	183	26.05	95	95	95	95	95	11.21	95	6.36	105	6.5	22.34	0.51	95	95	95	90
2 [#]	95	11.56	163	21.32	90	90	90	90	90	10.16	90	5.10	100	7.2	21.12	0.56	90	95	95	90
3 [#]	90	10.84	151	19.58	95	95	95	90	90	12.45	85	9.53	100	6.6	20.51	0.76	90	95	90	90
4 [#]	90	13.31	193	24.50	95	95	95	95	90	16.01	95	7.93	105	8.8	22.34	0.41	95	95	95	90
5 [#]	95	11.85	171	23.34	90	95	95	95	95	6.12	85	4.01	98	9.5	19.89	0.68	90	95	90	90

以 1[#]工作面为例, 将各因素取值代入测度函数图中, 根据式(9)可得到 1[#]工作面人为因素的单指标测

度矩阵, 同理可得到设备因素、环境因素和管理因素的测度矩阵。

$$(\mu_{1jk})_{4 \times 5} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.06 & 0.95 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

结合区间层次分析法所确定的各指标权重, 由式(10)求出 1[#]工作面的多指标综合评价向量, 代入式(12), 其中取 $\lambda = 0.7$, 求出 k 值, 得到煤矿瓦斯爆炸风险等级评估结果见表 6。

Table 6. Gas explosion risk level assessment results table

表 6. 瓦斯爆炸风险等级评估结果表

工作面编号	综合评价指标测度					k 值	等级
1 [#]	0.7355	0.1246	0.0905	0.0160	0.0305	1	P_1
2 [#]	0.4843	0.3778	0.0764	0.0497	0.0088	2	P_2
3 [#]	0.3643	0.3988	0.1016	0.0867	0.0457	2	P_2
4 [#]	0.6869	0.1861	0.0782	0.0000	0.0457	2	P_2
5 [#]	0.4167	0.4079	0.1625	0.0074	0.0025	2	P_2

由表 6 可知, 1[#]工作面的瓦斯爆炸风险等级为安全, 其余 4 个工作面评估等级均为较安全, 在样本数据中, 1[#]工作面的指标值明显高于其他工作面, 因此安全水平相对较高。在煤矿开采过程中, 5 个采煤工作面均未发生瓦斯爆炸事故, 在人、设备、环境和管理方面也未发现

导致事故的危险因素, 实际情况与评估结果基本吻合, 说明运用 IAHP-未确知测度模型对煤矿瓦斯爆炸风险进行等级评估是可行的。

5. 结论

1) 本文提出了一种基于 IAHP-未确知测度的煤矿瓦斯爆炸风险评估方法, 该方法利用 IAHP 确定煤矿安全生产系统中影响瓦斯爆炸的各评价指标权重, 模型简单且操作容易, 通过区间数的模糊性及不确定性, 使所计算的指标权重更加客观、准确。同时, 基于未确知测度函数对定性与定量指标进行评价, 均满足“归一性”和“可加性”。两种方法结合, 使评价过程更为科学严谨, 为煤矿瓦斯爆炸风险评估提供了研究思路和科学依据。

2) 针对瓦斯爆炸事故本身的不确定性及矿井信息的未确知性, 从人、机、环、管 4 个方面构建评价体系, 将煤矿瓦斯爆炸风险划分为 5 个等级, 为瓦斯爆炸风险水平的测度提供一定的基础。通过 IAHP 所计算权重与多指标综合测度评价矩阵的乘积可确定 5 个工作面的评价结果分别为安全、较安全、较安全、较安全和较安全, 该评价结果符合现场工程实际, 说明评价方法较为合理, 对煤矿瓦斯爆炸风险评估具有一定的应用价值。

3) 在后续研究中, 可将该模型结合到更多矿区及不同工作面的现场实际数据中, 进一步验证其可靠性, 以提高该模型的精确度和普适性, 提高所述方法的评价和预测水平。

基金项目

国家自然科学基金项目“矿井多爆源瓦斯爆炸传播特性及热冲击动力学机制研究”(编号: 52174178)、“矿井瓦斯爆炸能量释放转化特性及热冲击能量耗损研究”(编号: 52174177)。

参考文献

- [1] 黄琪嵩, 程久龙, 贾吉喆, 等. RES 理论在煤与瓦斯突出危险性预测中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 248-253.
- [2] 边振华. 独头巷道挡板对爆炸冲击波的传播规律影响研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- [3] Meng, Z., Shi, X. and Li, G. (2016) Deformation, Failure and Permeability of Coal-Bearing Strata during Longwall Mining. *Engineering Geology*, **208**, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.029>
- [4] 吕广罗, 田刚军, 张勇, 等. 巨厚砂砾岩含水层下特厚煤层保水开采分区及实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 189-196.
- [5] 葛瑛, 傅贵. 预防特别重大瓦斯爆炸事故安全培训体系构建[J]. 煤炭工程, 2019, 51(1): 106-109.
- [6] 成连华, 郭阿娟, 郭慧敏, 等. 煤矿瓦斯爆炸风险耦合演化路径研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 59-64.
- [7] 李润求, 施式亮, 念其锋, 等. 基于 PSO-SVM 的煤矿瓦斯爆炸灾害风险模式识别[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(5): 38-43.
- [8] Zhang, Q. (2020) Risk Assessment of Gas Explosion Disaster Based on Random Forest Model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **446**, Article ID: 022081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/446/2/022081>
- [9] 皮子坤, 贾宝山, 贾廷贵, 等. 基于前景理论和区间数的煤矿瓦斯爆炸风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6): 91-96.
- [10] 李敏, 林志军, 鲁义, 等. 基于模糊贝叶斯网络的煤矿瓦斯爆炸风险评估[J]. 煤炭学报, 2023, 48(z2): 626-637.
- [11] 鲁锦涛, 任利成, 戎丹, 等. 基于灰色-物元模型的煤矿瓦斯爆炸风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(2): 99-105.
- [12] 景国勋, 陈纪宏. 基于 SPA-VFS 耦合模型的瓦斯爆炸风险评价[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(7): 2151-2158.
- [13] Tauziède, C., Pokryszka, Z. and Barrière, J.P. (2002) Risk Assessment of Surface Emission of Gas from Abandoned Coal Mines in France and Techniques of Prevention. *Mining Technology*, **111**, 192-196. <https://doi.org/10.1179/mnt.2002.111.3.192>
- [14] Medic Pejic, L., García Torrent, J., Querol, E. and Lebecki, K. (2013) A New Simple Methodology for Evaluation of Explosion Risk in Underground Coal Mines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **26**, 1524-1529. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.08.021>
- [15] Li, M., Wang, D. and Shan, H. (2019) Risk Assessment of Mine Ignition Sources Using Fuzzy Bayesian Network. *Process Safety and Environmental Protection*, **125**, 297-306. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.029>
- [16] Dong, L., Peng, G., Fu, Y., Bai, Y. and Liu, Y. (2008) Unascertained Measurement Classifying Model of Goaf Collapse Prediction. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, **14**, 221-224. <https://doi.org/10.1007/s12404-008-0046-9>
- [17] 严雅静, 顾水杰, 于祥, 等. 基于未确知测度理论的巷道围岩稳定性研究[J]. 金属矿山, 2019(11): 20-26.
- [18] 秦忠诚, 曹斌, 吴清法. 基于盲数理论改进未确知测度的冲击地压评价模型应用研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 224-227.
- [19] 温建敏, 张西寨, 丁剑锋, 等. 基于层次分析和未确知测度的冲击地压风险评价[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(7): 98-103.
- [20] Yin, Y., Wang, J., Zou, B., Zhang, J., Su, Y. and Sun, Q. (2023) Evaluation of Controlled Blasting Quality for Rock-Mass Tunneling Based on Multiple Indices. *Journal of Construction Engineering and Management*, **149**, Article ID: 04022155. <https://doi.org/10.1061/jcemd4.coeng-12025>
- [21] 周航, 廖昕, 陈仕阔, 等. 基于组合赋权和未确知测度的深埋隧道岩爆危险性评价——以川藏交通廊道桑珠岭隧道为例[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 2130-2148.
- [22] 任家苇, 左宇军, 林健云, 等. 基于改进未确知测度的含软弱夹层巷道围岩稳定性评价[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 39-43, 47.
- [23] 张乃禄. 安全评价技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [24] 李录, 秦本东, 郭佳奇, 等. 基于 IAHP-Fuzzy 的岩溶隧道突水风险预测[J]. 高压物理学报, 2022, 36(5): 190-202.
- [25] 翟强, 顾伟红, 赵映璿. 基于未确知测度理论的隧道施工瓦斯灾害风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3): 803-812.
- [26] 张江石, 李泳敏, 冒香凝, 等. 基于 NLP 的煤矿事故原因分类研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 20-26.

-
- [27] 李金蓉, 杨玉中. DS 理论-贝叶斯网络下的煤矿通风系统风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 146-153.
- [28] 贾宝山, 皮子坤, 李锐, 等. 煤矿瓦斯爆炸灰色-IAHP 危险性评价模型及应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(9): 909-913.