

基于模糊 Bow-tie 模型对煤与瓦斯突出危险性分析

郭亚玲¹, 江泽标^{1,2*}, 扶祥祥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: 为了更加全面分析某矿煤与瓦斯突出事故的危险性, 基于煤与瓦斯突出事故影响因素概率的不确定性, 结合事故树和事件树, 确定煤与瓦斯突出事故的影响因素为基本事件, 构建煤与瓦斯突出 Bow-tie 模型, 利用三角模糊数与专家评价相结合的方法, 计算各事件的模糊失效概率, 分析煤与瓦斯突出事故发生的概率及后果. 研究表明: 该矿煤与瓦斯突出事故发生的概率为 0.855×10^{-3} , 且一旦发生煤与瓦斯突出事故, 发生伤亡事故的可能性高于物质事故的可能性.

关键词: 煤与瓦斯突出; 模糊 Bow-tie; 事故树; 事件树; 三角模糊数; 模糊失效概率

中图分类号: TD77+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2022)02-0042-07

Hazard Analysis of Coal and Gas Outburst Based on Fuzzy Bow-tie Model

GUO Yaling¹, JIANG Zebiao^{1,2}, FU Xiangxiang¹, WU Shaokang¹

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Nonmetallic Mineral Resources, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to analyze the risk of coal and gas outburst in a coal mine more comprehensively, based on the uncertainty of the probability of influencing factors of coal and gas outburst accidents, combined with the accident tree and event tree, the basic events of the influencing factors of coal and gas outburst accidents are determined, and the Bow-tie model of coal and gas outbursts is constructed by using the triangular fuzzy numbers. Combined with expert evaluation, the fuzzy failure probability of each event is calculated, and the probability and consequences of coal and gas outburst accidents are analyzed. The research results show that, the probability of coal and gas outburst accidents in this mine is 0.855×10^{-3} , and once the coal and gas outburst accidents occur, the possibility of casualties is higher than that of material accidents.

Keywords: coal and gas outburst; fuzzy Bow-tie; fault tree analysis; event tree analysis; triangular fuzzy number; fuzzy failure probability

井下采掘过程中, 在地应力和瓦斯压力的共同作用下, 破碎的煤岩瞬间向采掘空间喷出并伴有大量瓦斯涌出的现象叫煤与瓦斯突出, 简称“突出”. 随着煤矿开采深度的逐渐增加, 地应力与瓦斯压力也增大, 突出危险性大幅度提升^[1]. 并且煤与瓦斯突出事故在煤矿事故中所占比例较大, 一旦发生事故, 所造成的损失也十分惨重. 煤与瓦斯突出问题一直威胁着广大矿工们的生命安全和财产安全^[2]. 根据煤矿安全生产网不完全统计, 我国近五年煤与瓦斯突出事故起数与死亡人数: 2017 年发生突出事故 3 起, 死亡人数 10 人; 2018 年发生突出事故 5 起, 死亡人数 22 人; 2019 年发生突出事故 7 起, 死亡人数 38 人; 2020 年发生突出事故 2 起, 死亡人数 15 人; 2021 年发生突出事故 4 起, 死亡人数 20 人. 由以上数据可知对煤矿突出灾害防

收稿日期: 2021-08-16

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

治分析尤为重要。

近年来许多学者在煤与瓦斯突出领域已取得了大量成果,如对煤与瓦斯突出危险性进行评价、构建煤与瓦斯突出预警模型等。朱权洁等^[3]针对突出预警指标过多和评价标准不同的问题,提出了熵权法与改进灰靶理论相结合的评价模型,避免了主观性,且现场应用中能准确评价突出危险等级;郑晓亮等^[4]针对煤与瓦斯突出事故真实数据量小及数据缺失的问题,提出了数据挖掘多重填补(Multiple Imputation, MI)算法补全缺失数据,增大可用数据集,并用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)方法对补全后的数据进行训练,可提高突出预测率;温廷新等^[5]用数据结合权重去除对突出事故影响小的因素,建立了改进果蝇优化算法(Improved Fruit Fly Optimization Algorithm, IFOA)-极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)预测模型,结果表明预处理训练样本预测模型优于未预处理模型;陈恋等^[6]针对现有的煤与瓦斯突出预测方法预测精度较低,计算过程复杂,提出了主成分-费歇尔判别模型,并将该模型用于预测煤与瓦斯突出等级,研究结果表明该模型可信度较高,其误判率为0,为预测煤与瓦斯突出提供了一种新方法。

以上研究仅对煤与瓦斯突出预测进行定性研究。为了使煤与瓦斯突出事故概率定量化,在现有研究的基础上,本文采用 Bow-tie 模型与三角模糊数相结合的方法,对煤与瓦斯突出危险性进行分析,为类似研究提供一个新思路。

1 模糊 Bow-tie 分析流程

1.1 Bow-tie 模型

Bow-tie 分析法^[7](又称蝴蝶结分析法)是基于“三角模型”以蝴蝶结的方式进行风险分析,分析危险源如何释放及导致的严重后果,识别危险释放前的预防措施与释放后的减缓措施,维持预防、减缓措施的有效性。Bow-tie 模型将危险源、有害因素、预防性控制措施、顶级事件、减缓性措施及后果之间的关联以领结的形状图形化展示出来,如图1所示。左边以事故树分析原理来构造,列举可能发展或导致特定顶级事件的危险源及有害因素,同时列举对于每一危险源相对应的有害因素应该采取的控制措施;右边依据事件树分析原理构造,同时列举减缓措施及危害事件进一步发展导致的后果。该模型可以更好地说明特定风险的状况,以帮助人们了解风险系统及防控措施系统。

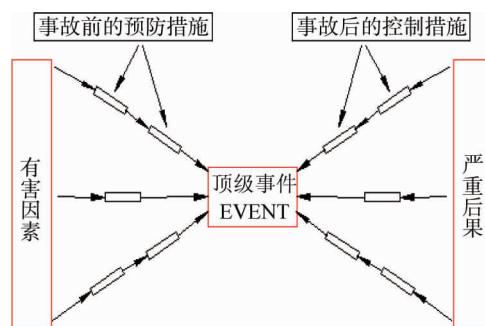


图1 Bow-tie 模型分析原理

1.2 模糊概率分析

由于多数事故统计数据不具备时效性,无法精确获得各事件发生概率,因此在本文研究中事故概率分析采用目前较为普遍的主观概率与模糊数学相结合的方法。常见的模糊数有三角模糊数^[8]、梯形模糊数^[9]、正态模糊数^[10]等,本文选用最常用的三角模糊数。

1.2.1 模糊数表示

定义^[11] 如果 M 可以用如下隶属函数 $f_M(x)$ 表示,则称 M 为三角模糊数,且该三角模糊数的表达形式为 $M=(l, m, u)$ 。

$$f_M(x) = \begin{cases} \frac{(x-l)}{(m-l)}, & l \leq x \leq m; \\ \frac{(u-x)}{(u-m)}, & m \leq x \leq u; \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

式中: l, u 分别为三角模糊数的上限值和下限值; m 为模糊数 M 隶属度为 1 时的取值。

1.2.2 模糊数聚合

进行模糊数聚合首先需不同专家对各基本事件分别进行评价,为了创建专家的语言变量与模糊数之间的转换关系,可建立等级语言变量,将专家们的语言评价转换为三角模糊数.由于不同专家对同一基本事件可能有不同的评价,为了降低单个专家的主观影响,实现整体观点的一致性,根据专家自身经验和知识储备的差异,赋予每个专家不同的权重,需要对每个专家的语言评价进行线性整合,计算公式为

$$M_i = \sum_{j=1}^p W_j M_{ij}. \quad (2)$$

式中: M_i 为模糊总数, $i=1,2,3,\dots,n$ (n 为事件个数); W_j 为第 j 个专家的权重, $j=1,2,3,\dots,p$ (p 为专家个数); M_{ij} 为第 j 个专家对事件 i 的模糊评分.

1.2.3 三角模糊数模糊概率化

根据1.2.2可将专家们的语言评价转换为三角模糊数,但其仍然是一个模糊值,在实际情况中的风险评估是需要事件因素的明确值,因此需采用去模糊化的方法将三角模糊数转化为相应的概率值.去模糊化的方法不仅可以降低其主观因素的影响,还可以提高评估风险的准确性.目前常用的去模糊化方法有最大最小集合法^[12]、最大隶属度法^[13]、重心法等.最普遍使用的是最大最小集合法,因此本文选择CHEN^[12]提出的最大最小集合法进行去模糊化.最大模糊集与最小模糊集可用公式表示为

$$f_{\max}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right)^r, & x_{\min} \leq x \leq x_{\max}; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{\min}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \right)^r, & x_{\min} \leq x \leq x_{\max}; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (4)$$

式中: r 为常数,可根据对待风险态度进行调整,本文取1;取 $x_{\min}=0, x_{\max}=1$,则简化后的最大模糊集与最小模糊集为

$$f_{\max}(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{\min}(x) = \begin{cases} 1 - x, & 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (6)$$

模糊数 M 的左、右模糊概率的可能值公式为

$$P_{RM} = \sup [f_M(x) \wedge f_{\max}(x)]; \quad (7)$$

$$P_{LM} = \sup [f_M(x) \wedge f_{\min}(x)]. \quad (8)$$

式中: P_{RM} 为右模糊概率; P_{LM} 为左模糊概率; $f_M(x)$ 为整合后的模糊集.

则模糊数 M 的模糊概率值可由式(9)求得.

$$P_M = (P_R + 1 - P_L) / 2. \quad (9)$$

式中: P_M 为模糊数 M 的模糊概率.

1.2.4 模糊失效概率

为了保证事件的真实概率和模糊概率一致,还需要将模糊概率转化为模糊失效概率,转化公式为

$$P = \begin{cases} \frac{1}{10^k}, & P_M \neq 0; \\ 0, & P_M = 0. \end{cases} \quad (10)$$

式中: P 为模糊失效概率;其中 $k = [(1 - P_M) / P_M]^{1/3} \times 2.301$.

1.2.5 顶级事件发生概率

若系统中各基本事件相互独立,利用与门和或门的模糊算子可以求出顶级事件发生的概率,计算公

式为

$$P_{\text{and}} = \left(\prod_{i=1}^n l_i, \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n u_i \right); \tag{11}$$

$$P_{\text{or}} = \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - l_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_i) \right). \tag{12}$$

式中: P_{and} 和 P_{or} 分别为与门和或门事件的发生概率.

1.3 事故后果分析

分析事故造成的不同程度的影响后果时,先确定一级指标和二级指标,再通过专家对各指标进行打分,应用层次分析法对各后果指标权重进行计算.由权重和三角模糊数计算不同后果事件的后果值模糊数,计算公式为

$$C_h = \sum_1^d W_d B_{hd}; \tag{13}$$

$$B_{hd} = \sum_1^q W_q B_{hq}. \tag{14}$$

式中: C_h 为某一后果事件 h 的后果值模糊数; W_d 为一级后果指标的权重值; d 为一级后果指标数量; B_{hd} 为后果事件 h 对一级后果指标的影响程度模糊数; q 为二级后果指标数量; W_q 为二级后果指标权重值; B_{hq} 为后果事件 h 对二级后果指标的影响程度模糊数.

2 煤与瓦斯突出模糊 Bow-tie 模型分析

2.1 煤与瓦斯突出模糊 Bow-tie 模型建立

由于突出事故的特殊性,因此对突出灾害的研究也存在不确定性.目前人们对煤与瓦斯突出机理的认识尚不完全清楚,在国内外具有影响力的突出机理研究主要分为“瓦斯主导作用假说”“地应力主导作用假说”“化学本质作用假说”和“综合作用假说”4类^[14].

“综合作用假说”^[15]被多数人认可,该假说认为煤与瓦斯突出是由于瓦斯、地应力、煤的物理力学性质三者综合作用导致.因此,本文主要依据“综合作用假说”,结合某矿实际情况绘制煤与瓦斯突出事故树,如图 2 所示.事故树中各事件符号含义如表 1 所示.

煤矿井下煤与瓦斯突出瞬间,采掘工作空间会喷出大量的煤与瓦斯流,不仅严重摧毁巷道设施,毁坏通风系统,而且使附近区域的井内全部充满瓦斯与煤粉,造成瓦斯窒息或煤流埋人,甚至会造成煤尘和瓦斯爆炸等严重后果.本文将突出事故后果的系统状态设定为伤亡事故和物质事故,绘制出煤与瓦斯突出事件树,如图 3 所示.

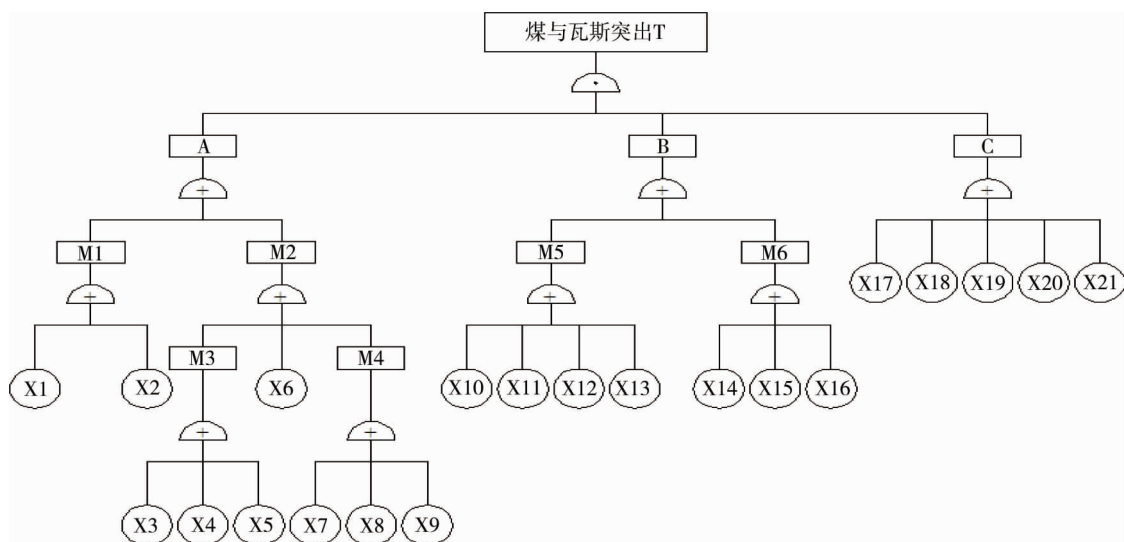


图 2 煤与瓦斯突出事故树

表 1 煤与瓦斯突出事故树各事件符号的含义

符号	事件名称	符号	事件名称
T	煤与瓦斯突出	X7	开采煤层瓦斯含量高
A	瓦斯	X8	预测预报失误
B	煤层及地质构造	X9	瓦斯渗透性强
C	煤体结构特性	X10	煤层厚度变化大
M1	瓦斯压力过大	X11	煤层倾角小
M2	瓦斯涌出量大	X12	煤层结构复杂
M3	防治措施不到位	X13	围岩透气性差
M4	瓦斯含量过大	X14	断裂构造
M5	煤层特征	X15	层间滑动
M6	地质构造	X16	褶皱构造
X1	煤层埋藏深	X17	煤的透气性差
X2	地应力过高的地质构造	X18	软分层结构
X3	通风不合理	X19	煤体破碎性强
X4	无区域防治措施或效果差	X20	煤体空隙率高
X5	防治措施力度不够	X21	瓦斯放散指数高
X6	地面大气压下降		

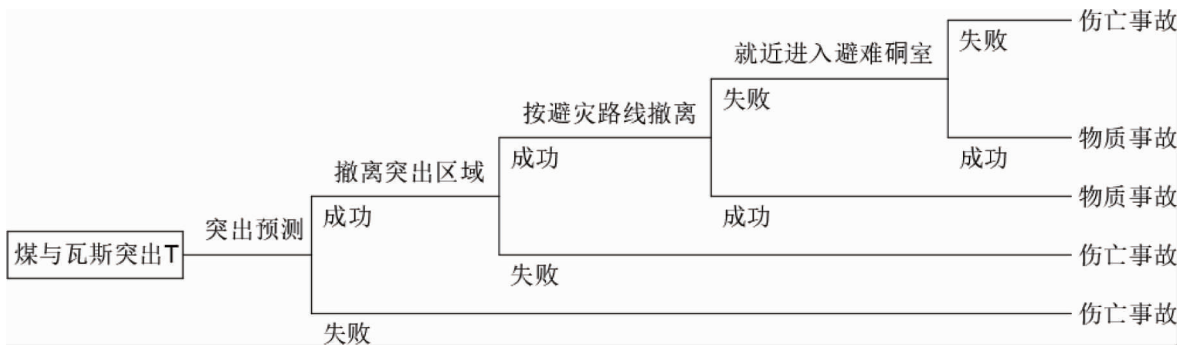


图 3 煤与瓦斯突出事件树

根据以上分析,结合煤与瓦斯突出的事故树和事件树,可以绘制出煤与瓦斯突出 Bow-tie 模型,如图 4 所示.

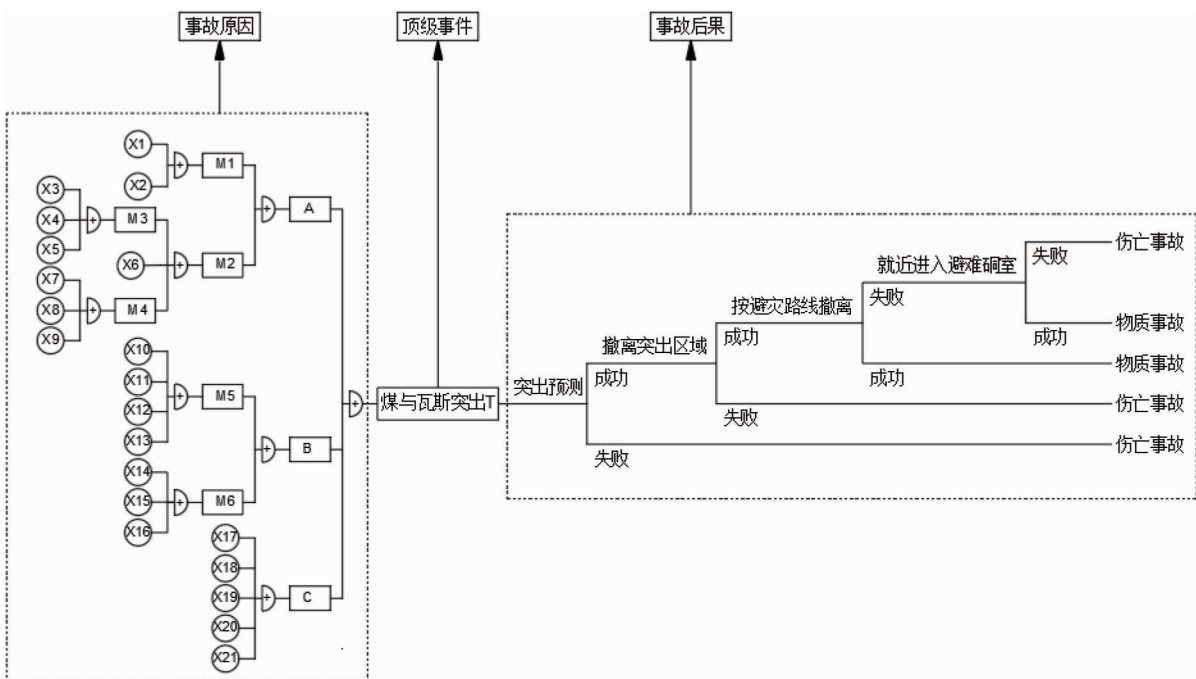


图 4 煤与瓦斯突出 Bow-tie 模型

2.2 模糊概率分析

语言变量建立 5 个等级:很低(VL),低(L),中等(M),高(H),很高(VH).将专家们对每个基本事件的语言评价转换为三角模糊数,很低(0,0,0.25)、低(0,0.25,0.50)、中等(0.25,0.50,0.75)、高(0.50,0.75,1)、很高(0.75,1,1).这些语言变量与隶属函数及三角模糊数的变换如图 5 所示.

本研究中邀请 3 位从事煤矿灾害防治的专家对煤与瓦斯突出事故的 21 个基本事件打分,依据专家们的自身经验和知识储备的差异,赋予 3 位专家的权重因子分别为 0.4,0.3,0.3.根据式(2)将结果整合为三角模糊数.

由以上分析的煤与瓦斯突出 Bow-tie 模型,根据故障树分析导致煤与瓦斯突出的影响因素有 21 个基本事件,由式(1)和式(2)可得出各基本事件的模糊数集,根据式(5)~式(9)可以计算出各基本事件的模糊概率,再由式(10)计算出模糊失效概率,计算结果如表 2 所示.

表 2 各基本事件三角模糊数及模糊失效概率

基本事件	模糊数聚合	P_{RM}	P_{LM}	P_M	模糊失效概率
X1	(0.575,0.825,1.000)	0.851	0.340	0.756	0.027
X2	(0.575,0.825,1.000)	0.851	0.340	0.756	0.027
X3	(0.225,0.375,0.625)	0.500	0.674	0.413	0.003
X4	(0.425,0.675,0.925)	0.740	0.460	0.640	0.013
X5	(0.525,0.775,0.925)	0.804	0.380	0.712	0.012
X6	(0.000,0.100,0.350)	0.280	0.909	0.186	0.000
X7	(0.650,0.900,1.000)	0.909	0.280	0.815	0.039
X8	(0.250,0.500,0.750)	0.600	0.600	0.500	0.005
X9	(0.150,0.300,0.550)	0.440	0.739	0.351	0.002
X10	(0.250,0.500,0.750)	0.616	0.585	0.516	0.006
X11	(0.075,0.225,0.475)	0.380	0.804	0.288	0.001
X12	(0.425,0.675,0.925)	0.740	0.460	0.640	0.013
X13	(0.500,0.750,1.000)	0.800	0.400	0.700	0.018
X14	(0.525,0.775,0.925)	0.804	0.380	0.712	0.020
X15	(0.350,0.600,0.850)	0.680	0.520	0.580	0.009
X16	(0.350,0.600,0.850)	0.680	0.520	0.580	0.009
X17	(0.675,0.925,1.000)	0.930	0.260	0.835	0.046
X18	(0.200,0.450,0.700)	0.560	0.640	0.460	0.004
X19	(0.300,0.475,0.625)	0.544	0.596	0.474	0.004
X20	(0.175,0.425,0.675)	0.540	0.660	0.440	0.003
X21	(0.600,0.850,0.925)	0.861	0.320	0.770	0.029

结合表 2 中的数据及式(11)和式(12)可求得顶级事件的三角模糊数,计算步骤同上可求得顶级事件的模糊失效概率,得出煤与瓦斯突出事故发生的概率为 0.855×10^{-3} .

2.3 事故后果计算

建立煤与瓦斯突出后果层次分析模型,由 3 位专家组成评价小组对后果因素进行打分,得到的各指标权重值如表 3 所示.根据三角模糊数表示的后果等级,对煤与瓦斯突出事故造成的后果事件 h ($h=1,2$;其中 1 表示伤亡事故,2 表示物质事故)进行评价,评价结果如表 4 所示.表 3 权重分配和表 4 专家评价仅为本研究所用.

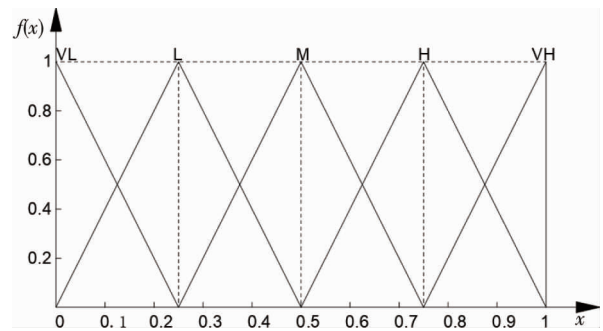


图 5 三角模糊数的映射函数曲线

表3 各指标权重值

一级指标	权重	二级指标	权重
社会	0.75	人员伤亡	0.73
		企业形象	0.20
		附近居民影响	0.07
经济	0.25	停产整顿	0.57
		设备损失	0.36
		经济赔偿	0.07

表4 事件影响后果专家评价

后果因素	专家1	专家2
人员伤亡	VH	VL
企业形象	H	L
附近居民影响	M	L
停产整顿	VH	H
设备损失	M	VH
经济赔偿	M	VL

根据式(13)和式(14)可计算煤与瓦斯突出的后果影响.计算得到 $B_{11} = (0.665, 0.915, 0.983)$, $B_{12} = (0.615, 0.865, 0.933)$, $B_{21} = (0.108, 0.358)$, $B_{22} = (0.555, 0.788, 0.948)$.

即伤亡事故和物质事故的总后果值模糊数为 $C_1 = (0.653, 0.903, 0.971)$, $C_2 = (0.139, 0.278, 0.506)$.

计算的后果值是以模糊数表示,根据式(3)~式(10)计算后果值的模糊失效概率,计算结果为 $P_{C1} = 0.0397$, $P_{C2} = 0.0012$.

从以上2个后果事件模糊失效概率可以看出,发生伤亡事故的概率高于发生物质事故的概率,并根据计算出的煤与瓦斯突出模糊失效概率为 0.855×10^{-3} ,因此为预防煤与瓦斯突出事故发生需从根本上控制煤与瓦斯突出的影响因素.影响煤与瓦斯突出的因素众多,由表2可知 X_{17} 的模糊失效概率值最大, X_7 次之,即对应基本事件为煤的透气性差和煤层瓦斯含量高,可针对这些重点影响因素,采取相应的防突措施.

3 结论

1) 建立煤与瓦斯突出模糊 Bow-tie 模型,采用定性分析和定量计算可以直观地确定煤与瓦斯突出事故的基本事件及事故后果,为类似研究提供参考.

2) 采用模糊 Bow-tie 模型计算出顶级事件发生的模糊失效概率为 0.855×10^{-3} .

3) 煤与瓦斯突出的主要因素是煤的透气性差和煤层瓦斯含量高,且一旦发生煤与瓦斯突出,造成伤亡事故的可能性高于物质事故.

参考文献:

- [1] 宋大钊,何学秋,窦林名,等.煤层突出危险微震区域探测技术研究[J].中国安全科学学报,2021,31(1):89-94.
- [2] 宁小亮.煤与瓦斯突出预警技术研究现状及发展趋势[J].工矿自动化,2019,45(8):25-31.
- [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] 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.
- [5] 温廷新,靳露露.基于预处理的 IFOA-ELM 煤与瓦斯突出预测模型[J].中国安全科学学报,2020,30(1):35-41.
- [6] 陈恋,袁梅,高强,等.主成分-费歇尔判别模型在煤与瓦斯突出等级预测中的应用[J].工矿自动化,2020,46(3):55-62.
- [7] 崔文罡,范厚明,姚茜,等.基于模糊 Bow-tie 模型的油轮靠港装卸作业溢油风险分析[J].中国安全生产科学技术,2016,12(12):92-98.
- [8] 赵传奇,张巨伟,孙蕴,等.基于三角模糊数的加氢裂化装置火灾爆炸事故树的分析与应用[J].安全与环境工程,2017,24(6):119-122.
- [9] 张园园,孙麟,刘明.梯形模糊事故树预测算法的改进及应用[J].中国安全科学学报,2020,30(11):156-161.
- [10] 常娟,杜迎雪,刘卫锋.正态模糊数信息集成算子及决策应用[J].数学的实践与认识,2018,48(11):118-125.
- [11] 周丽.基于模糊灰色关联分析的信息安全风险评估模型研究[D].重庆:西南大学,2013.
- [12] CHEN S J, HWANG C L, BECKMANN M J, et al. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [13] 邢海燕,葛桦,李思岐,等.基于模糊隶属度最大似然估计的焊缝隐性缺陷磁记忆信号识别[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(6):1854-1860.
- [14] 李希建,林柏泉.煤与瓦斯突出机理研究现状及分析[J].煤田地质与勘探,2010,38(1):7-13.
- [15] 刘德民,吴立云,杨玉中.“三软”煤层煤与瓦斯突出事故树分析[J].安全与环境学报,2015,15(3):33-36.