

基于危险源理论的煤矿瓦斯爆炸风险评价模型

曹树刚¹, 王艳平², 刘延保¹, 徐阿猛¹

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆科技学院, 重庆 400042)

摘 要: 从固有危险源、诱发危险源和人的因素等3类危险源观点出发, 分析了煤矿瓦斯爆炸事故的主要影响因素, 构建了瓦斯爆炸危险源风险预警指标体系. 应用模糊数学综合评价方法建立了相应的数学评价模型, 对矿井瓦斯爆炸危险源进行动态风险评价, 确定了矿井发生事故的危险等级, 有利于矿井及时采取合理的预警预控措施. 最后, 结合重庆市中梁山南矿5个采煤工作面的实际情况, 进行了采煤工作面危险源风险预警评价, 验证了风险评价模型的合理性.

关键词: 危险源; 瓦斯爆炸; 评价模型; 预警指标; 模糊综合评价

中图分类号: TD712.7

文献标识码: A

Risk assessment model of gas explosion in coal mine based on the hazard theory

CAO Shu-gang¹, WANG Yan-ping², LIU Yan-bao¹, XU A-meng¹

(1. Key Lab. for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400042, China)

Abstract: On the basis of three classes hazard, that is, inherent hazard, temptable hazard and human factor, analyzed the main influencing factors of coal mine's gas explosion accident, built the index system of gas explosion risk forewarning in coal mine. The fuzzy mathematics comprehensive assessment technique was applied to establish a corresponding mathematic assessment model. The dynamic risk assessment on the gas explosion hazard of coal mine was undertaken in the model and so the dangerous grade of accident for coal mine was identified. It is convenient to adopt reasonable forewarning and pre-control measures for coal mine in time. Finally, combined with the practical situation of the five coal mining working faces of Zhongliang Mountain South Mine in Chongqing, China, carried out hazard risk forewarning assessment of coal mining working faces and validated the rationality of the risk assessment model.

Key words: hazard; gas explosion; assessment model; forewarning index; fuzzy comprehensive assessment

为了实现对矿井瓦斯爆炸进行有效的控制, 必须对瓦斯爆炸灾变的可能性大小进行危险性评价. 传统的评价方法很少从瓦斯爆炸危险源角度出发研究瓦斯爆炸事故的评价方法^[1]. 本文从分析预测影响瓦斯爆炸的主要危险源入手, 提出危险源理论的煤矿瓦斯爆炸风险评价模型, 进行动态风险评价, 以利于采取相应的安全防护措施, 防止煤矿瓦斯爆炸事故的萌生与发展, 保证矿井的安全生产.

1 煤矿瓦斯事故危险源评价预警指标体系

煤矿瓦斯爆炸危险源系统是一个多目标、多准则、多因素、多层次的复杂系统,是由人-机-环境构成的动态、复杂系统.本文参照已有的研究成果^[2,3],从影响瓦斯危险源系统安全性、可靠性的固有危险源因素、诱发危险源因素、人的因素等3类危险源出发,根据实地调查研究分析,形成如图1所示煤矿瓦斯爆炸危险源风险评价预警指标体系.

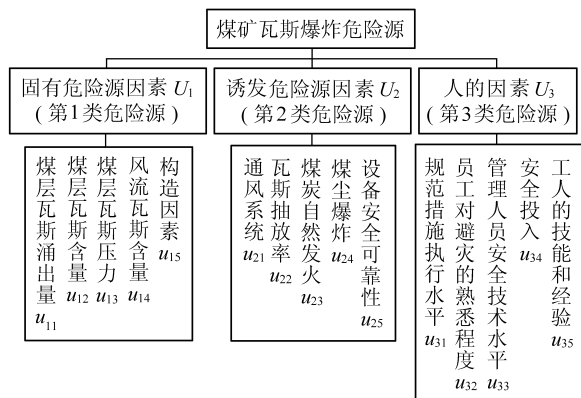


图1 煤矿瓦斯爆炸风险预警指标体系

Fig.1 The index system of gas explosion risk forewarning

2 煤矿瓦斯爆炸风险预警指标的模糊综合评价

人们对事故危险源的认识,常常是通过事后分析的方法探索危险源的状态.因此,危险源的危险状态本身是模糊的,用传统的概率方法研究瓦斯爆炸危险源,无法确切分清楚危险源的安全相对界限,危险源之间的逻辑关系很难描述清楚.采用模糊风险评价方法能够克服该缺点^[4].模糊评价模型分析流程如图2所示.

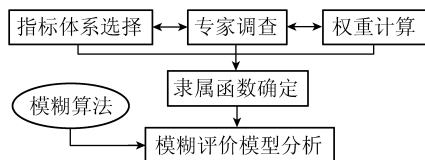


图2 模糊综合评价模型分析流程

Fig.2 Flow chart of fuzzy comprehensive assessment

2.1 多级模糊综合评判方法的基本原理

首先把评价对象的多种因素按属性分类,然后对每一类因素进行初级综合评价,最后对初级评价的结果进行高级综合评价^[5].具体评价过程如下:

(1) 确定因素集 U . 按其不同属性分成若干个不相交的因素子集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 、评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$.

(2) 对每个 U_k ($k=1, 2, \dots, n$) 进行初级综合评价. 根据 $U_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn_k})$ 中各因素的作用大小, 赋予相应的权数 A_k , $A_k = (a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn_k})$; 对 U_k 中的每个因素 u_{kn_k} 按照评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 的等级评定出 u_{ki} 对 v_j 的隶属度 r_{kij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$), 由此组成单因素评价矩阵 R_k . 则 U_k 的一级综合评价为 $B_k = A_k R_k = (b_{k1}, b_{k2}, \dots, b_{km})$.

(3) 对 U 进行高级综合评价. 将 U 中的 n 个因素子集 U_k 看成是 U 上的 n 个单因素, 按各 U_k 在 U 中所起作用的大小分配权重 A , $A = (a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn})$; 由各 U_k 的评价结果 B_k 得出总的评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix},$$

则得出 U 的综合评价

$$B = AR = A \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_m).$$

2.2 煤矿瓦斯爆炸风险预警模糊综合评价数学模型

(1) 建立因素集 煤矿瓦斯爆炸受第1类危险源、第2类危险源、第3类危险源的影响, 这些因素可分成下列不同层次的集合. 本文利用在中梁山矿务局的安全检查表和专家调查结果, 确定了评价指标体

系, 第 1 层评价指标 3 个, 第 2 层评价指标 15 个.

(2) 建立评价集 评价集为: $V = \{\text{很安全 } V_1, \text{较安全 } V_2, \text{一般安全 } V_3, \text{不安全 } V_4, \text{很不安全 } V_5, \text{特别不安全 } V_6\}$; 相应的分值为: $\{90, 80, 70, 60, 50, 40\}$. 显然, 评价结果越大事故风险越小.

(3) 确定评价指标的权重 进行综合评判, 关键是如何得出各因素对瓦斯爆炸风险影响的重要程度, 即权重向量 A, A_i . 对实际问题选定指标后, 根据专家和现场工程技术人员打分, 采用层次分析法确定各指标的权重值.

(4) 隶属度及隶属函数的确定 为了客观、真实地反映隶属度, 减少评价误差, 确定因素集各因素隶属于 V 的程度, 可以借鉴模糊控制理论常用的隶属函数确定方法. 依据概率分布规律, 预先构造各因素隶属度模糊子集. 经检验后进一步修改, 得到比较接近真实情况的隶属度. 本文隶属函数的确定借鉴了文献 [6] 的研究成果, 即

$$f_{11}(u_{11}) = \begin{cases} 1 & (90 \leq u_{11} \leq 100), \\ \frac{u_{11} - 80}{90 - 80} & (80 \leq u_{11} < 90), \\ 0 & (u_{11} < 80), \end{cases} \quad f_{12}(u_{11}) = \begin{cases} \frac{100 - u_{11}}{100 - 90} & (90 \leq u_{11} \leq 100), \\ 1 & (80 \leq u_{11} < 90), \\ \frac{u_{11} - 70}{80 - 70} & (70 \leq u_{11} < 80), \\ 0 & (u_{11} < 70), \end{cases}$$

$$f_{13}(u_{11}) = \begin{cases} 0 & (90 \leq u_{11} \leq 100), \\ \frac{90 - u_{11}}{90 - 80} & (80 \leq u_{11} < 90), \\ 1 & (70 \leq u_{11} < 80), \\ \frac{u_{11} - 60}{70 - 60} & (60 \leq u_{11} < 70), \\ 0 & (u_{11} < 60), \end{cases} \quad f_{14}(u_{11}) = \begin{cases} 0 & (80 \leq u_{11} < 100), \\ \frac{80 - u_{11}}{80 - 70} & (70 \leq u_{11} < 80), \\ 1 & (60 \leq u_{11} < 70), \\ \frac{u_{11} - 50}{60 - 50} & (50 \leq u_{11} < 60), \\ 0 & (u_{11} < 50), \end{cases}$$

$$f_{15}(u_{11}) = \begin{cases} 0 & (70 \leq u_{11} < 80), \\ \frac{70 - u_{11}}{70 - 60} & (60 \leq u_{11} < 70), \\ 1 & (50 \leq u_{11} < 60), \\ \frac{u_{11} - 40}{50 - 40} & (40 \leq u_{11} < 50), \end{cases} \quad f_{16}(u_{11}) = \begin{cases} 0 & (60 \leq u_{11} \leq 70), \\ \frac{60 - u_{11}}{60 - 50} & (50 \leq u_{11} < 60), \\ 1 & (u_{11} < 50). \end{cases}$$

将专家评分值代入上述隶属函数公式, 可以得到以下隶属度: $r_{11} = f_{11}(u_{11}), r_{12} = f_{12}(u_{11}), \dots; r_{21} = f_{11}(u_{12}), r_{22} = f_{12}(u_{12}), \dots; r_{31} = f_{11}(u_{13}), r_{32} = f_{12}(u_{13}), \dots; r_{41} = f_{11}(u_{14}), r_{42} = f_{12}(u_{14}), \dots; r_{51} = f_{11}(u_{15}), r_{52} = f_{12}(u_{15}), \dots; r_{61} = f_{11}(u_{16}), r_{62} = f_{12}(u_{16}), \dots$.

从而得到模糊关系矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{16} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{26} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{61} & r_{62} & \cdots & r_{66} \end{bmatrix}.$$

3 评价应用实例

3.1 重庆市中梁山南矿基本情况

重庆市中梁山南矿开采煤层属于二叠系上统龙潭组地层, 可采煤层多且间距小, 埋藏较深. 矿井断层

发育，构造活动强烈。煤层内瓦斯含量高，瓦斯压力大，极易发生煤与瓦斯突出，或发生瓦斯爆炸、火灾等事故。

3.2 评价结果

首先请20位现场生产技术管理人员及安全管理专家采用层次分析法确定各指标的权重，并对中梁山南矿1~5号采煤工作面危险源预警评价指标进行评分。限于篇幅，文中仅列出了采煤工作面评分和指标权重的最终结果，见表1。

表1 5个采煤工作面模糊综合评价

Table 1 The results of fuzzy comprehensive assessment in five coal mining working faces

类因素	权重 A	子因素	权重 A_k	各工作面专家评分值				
				1号	2号	3号	4号	5号
固有危险源因素 (U_1) (第1类危险源)	0.14	煤层瓦斯涌出量	0.07	93	80	45	87	50
		煤层瓦斯含量	0.52	90	39	40	85	45
		煤层瓦斯压力	0.23	90	65	58	80	55
		风流瓦斯含量	0.04	85	70	61	80	60
		构造因素	0.14	89	56	59	81	57
诱发危险源因素 (U_2) (第2类危险源)	0.24	通风系统	0.25	87	85	89	86	83
		瓦斯抽放率	0.44	80	79	81	82	75
		煤炭自然发火	0.05	77	80	79	81	80
		煤尘爆炸	0.06	73	72	80	79	81
		设备安全可靠	0.20	80	85	83	80	85
人的因素 (U_3) (第3类危险源)	0.62	规程措施执行水平	0.32	90	89	90	85	87
		员工对避灾的熟悉程度	0.06	85	81	84	83	80
		管理人员安全技术水平	0.32	80	85	89	81	90
		安全投入	0.20	80	84	85	80	81
		工人的技能和经验	0.10	80	83	81	80	79

以1号采煤工作面瓦斯爆炸风险为例，利用前述风险评价模型进行瓦斯爆炸危险源风险评价（各参数上标表示采煤工作面序号）。

(1) 初级综合评价 将表1专家评分值代入隶属函数公式，可以得到模糊关系矩阵为

$$R_1^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 1 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R_2^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.7 & 1 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 1 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 1 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_3^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

第1类危险源计算结果： $B_1^{(1)} = A_1 R_1^{(1)} = (0.966\ 0, 0.979\ 0, 0.034\ 0, 0, 0, 0)$ 。

第2类危险源计算结果： $B_2^{(1)} = A_2 R_2^{(1)} = (0.175\ 0, 0.943\ 0, 0.825\ 0, 0.057\ 0, 0, 0)$ 。

第3类危险源计算结果： $B_3^{(1)} = A_3 R_3^{(1)} = (0.350\ 0, 1.000\ 0, 0.650\ 0, 0, 0, 0)$ 。

对 $B_1^{(1)} \sim B_3^{(1)}$ 作归一化处理得 $R^{(1)}$ 为

$$R^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.488\ 1 & 0.494\ 7 & 0.017\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.087\ 5 & 0.471\ 5 & 0.412\ 5 & 0.028\ 5 & 0 & 0 \\ 0.175\ 0 & 0.500\ 0 & 0.325\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

(2) 高级综合评价 利用权重 A 和式 (1) 计算的 1 号采煤工作面瓦斯爆炸危险源风险评价结果为 $B^{(1)} = AR^{(1)} = (0.197\ 8, 0.492\ 4, 0.302\ 9, 0.006\ 8, 0, 0)$, 因 $V = (90, 80, 70, 60, 50, 40)$, 则 $B^{(1)}V^T = 78.812\ 5$.

同理, 可以算出 2~5 号采煤工作面瓦斯爆炸危险源风险评价结果:

$$B^{(2)} = (0.201\ 8, 0.425\ 6, 0.249\ 6, 0.043\ 9, 0.024\ 3, 0.054\ 8), B^{(2)}V^T = 75.725\ 1,$$

$$B^{(3)} = (0.269\ 5, 0.429\ 4, 0.160\ 9, 0.034\ 5, 0.042\ 7, 0.063\ 0), B^{(3)}V^T = 76.595\ 2,$$

$$B^{(4)} = (0.116\ 9, 0.499\ 3, 0.383\ 1, 0.000\ 7, 0, 0), B^{(4)}V^T = 77.323\ 0,$$

$$B^{(5)} = (0.196\ 6, 0.400\ 5, 0.233\ 4, 0.049\ 9, 0.059\ 5, 0.060\ 1), B^{(5)}V^T = 74.443\ 7.$$

由上可知, 5 个采煤工作面瓦斯爆炸危险源风险评价结果全部大于 70, 达到安全水平. 利用上述结果得出采煤工作面瓦斯爆炸风险顺序为 1 号 < 4 号 < 3 号 < 2 号 < 5 号. 其评价结果与现场实际生产情况相一致. 通常情况下, 如果评价结果为“一般安全”以下等级, 可以认为采煤工作面瓦斯爆炸事故危险源的风险程度较大, 必须及时采取整改措施. 达到“一般安全”以上, 才能进行生产.

4 结 语

(1) 依据 3 类危险源思想, 构建了煤矿瓦斯爆炸风险预警指标体系. 同时, 根据专家和现场工程技术人员打分, 利用层次分析法确定了各指标的权重值.

(2) 运用模糊综合评价方法, 将各专家定性分析结果定量化, 探索建立了有较大应用价值的煤矿瓦斯爆炸危险源风险评价模型, 有利于进行煤矿瓦斯爆炸事故危险源的科学预测.

(3) 将本文提出的风险评价模型应用于煤矿企业瓦斯爆炸安全管理工作中, 加强危险源预警管理, 促使煤矿安全管理从事后分析型向事前预防型战略转变, 有利于降低矿井安全事故发生率.

参考文献:

- [1] 田水承, 李 华, 陈勇刚. 基于神经网络的掘进面瓦斯爆炸危险源安全评价 [J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33 (3): 19~21.
- [2] 王魁军, 曹 林. 我国煤矿瓦斯灾害事故频发的原因分析 [J]. 中国煤炭, 2003, 29 (7): 9~11.
- [3] 钟茂华, 温丽敏, 刘铁民, 等. 关于危险源分类与分级探讨 [J]. 中国安全科学学报, 2003, 13 (6): 18~20.
- [4] 田宏霞, 郑双忠, 吴 穹. 企业安全性评价模糊数学方法研究 [J]. 工业安全与环保, 2003, 29 (3): 41~43.
- [5] 杨伦标, 高英仪. 模糊数学原理及应用 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1995.
- [6] 闵凡飞, 许俊杰, 扬晓鸿. 多层次模糊综合评判在选煤工艺流程选择中的应用 [J]. 煤炭学报, 2002, 27 (2): 201~205.